

# 第 90 回 レーザ加工学会講演論文集

Proceedings of the 90th Laser Materials Processing Conference

主催：一般社団法人レーザ加工学会

開催期日

2018 年 12 月 10 日(月), 11 日(火)

開催場所

産業技術総合研究所 臨海副都心センター



一般社団法人

レーザ加工学会

Japan Laser Processing Society

# 第 90 回レーザー加工学会講演論文集

Proceedings of the 90th Laser Materials Processing Conference

## 目 次

### プレナリーセッション

- [基調講演] Latest development in laser processing, welding and coating 1  
Fraunhofer IWS : Eckhard Beyer

### 10A1. レーザ溶接品質および継手特性

- ビームモード制御技術によるスパッタ低減 59  
古河電気工業(株) : 安岡 知道, 茅原 崇, 酒井 俊明, 繁松 孝
- 高出力固体レーザー溶接におけるスパッタ抑制技術の開発と適用 63  
三菱電機(株) : 久場 一樹, 多田電機(株) : 上野 彰大
- レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた荷重非伝達 HT780 鋼 T 継手疲労強度の支配因子と施工管理 69  
(株)IHI : 猪瀬 幸太郎, 神林 順子, 阿部 大輔, 松本 直幸, 野々村 将一
- 自動車用薄鋼板のレーザー溶接部の水素源調査 75  
新日鐵住金(株) : 巽 雄二郎, 徳永 仁寿, 宮崎 康信, 泰山 正則

### 10A2. レーザ溶接方法

- ウォブル溶接の紹介および ICI 技術によるキーホール深さ計測 81  
IPG フォトニクスジャパン(株) : 菊地 淳史
- 薄板のレーザー+CMT ハイブリッド溶接 87  
(株)タマリ工業 : 滝沢 宣人, 三瓶 和久
- 超ワイドエリア 3D ガルバノスキャナヘッドユニットの開発 91  
(株)ワイ・イー・データ : 清宮 雅明

### 10B1. 超短パルスレーザー加工

- 深層学習でレーザー加工をスマートに 101  
東京大学 : 谷 峻太郎, 小林 洋平
- 最適加工条件の効率的探索のための自動パラメータ可変レーザー加工システム 105  
産業技術総合研究所 : 吉富 大, 高田 英行, 鳥塚 健二, 小林 洋平

高機能レーザ加工を実現する位相制御技術 浜松ホトニクス(株)：伊藤 晴康, 朝稻 裕一	111
超短パルスレーザーを用いた特殊ガラスの精密加工技術 日本電気硝子(株)：平尾 徹	117

## 10B2. 硬脆材料の微細加工

短パルスレーザーで刃先成形された高脆工具の切削性能 名古屋工業大学：糸魚川 文広	121
フェムト秒レーザー照射によるダイヤモンド、SiC 加工 京都大学：下間 靖彦, 峰雪 序也, 栗田 寅太郎, キム ウンホ, 清水 雅弘, 三浦 清貴	125
短パルスレーザー照射による超硬合金の表面改質 東京工業大学：青野 祐子, 平田 敦, 京セラ(株)：廣崎浩 司, 徳永 隆司	133

## プレナリーセッション

[基調講演] Diamond lenses enable ultra-compact and lightweight laser processing heads Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT : Martin Traub, Carlo Holly, EdgeWave GmbH : Angelo Dimeo, Chair for Laser Technology LLT : Dennis Arntz, Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT : Mario Hesker, Dieter Hoffmann, Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF : Christoph Nebel, Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Chair for Laser Technology LLT : Reinhart Poprawe	135
--	-----

## 11A1. 最新のレーザー発振器と加工システム

【特別講演】 ImPACT プログラムにおけるマイクロチップレーザー製品化と適用技術開発 科学技術振興機構：佐野雄二, 三浦崇広, 北村一夫	139
Evolution of High Power Diode Lasers from IR to Blue and their applications Laserline GmbH : Markus Ruterling	145
レーザークリーニングの最新技術動向とその適用事例 クリーンレーザージャパン(株)：本村 孔作	159
Laser Metal Deposition : Innovative System Technology for Additive Manufacturing Processes with Powder and Wire Precitec GmbH & Co.KG : Markus Kogel-Hollacher	165

## 11B1. 表面処理, パターニング

【ベストオーサー賞受賞者講演】 レーザーラジエーションによる低希釈・低熱影響ニッケル基合金皮膜形成 日立造船(株)：谷川 大地	193
工具鋼の複合レーザー平滑化および微細周期構造形成 矢崎総業(株)：若林 知敬, 漆畑 卓朗, 石田 宏, 杉山 善崇, 慶應義塾大学：小林 知貴, (株)オプトクエスト：多久島 裕一, 慶應義塾大学：閻 紀旺	195
フェムト秒レーザー誘起周期構造形成及びその結晶性評価 名古屋工業大学：宮川 鈴衣奈, 江 龍修	201
フェムト秒レーザー光還元法による金属微細周期構造パターニング 静岡大学：小野 篤史, 鳥山 誠也, 住吉 真聡, ミゼイクスビガンタス	205

## ポスター発表

超音速旋回流を利用した減圧・吸引ノズルによるデブリの除去 福井県工業技術センター：芦原 将彰	211
機械学習によるレーザ加工の知能化 ~第1報 フェムト秒レーザによる焼結ダイヤモンド加工の予測~ 光産業創成大学院大学：楠本 利行, 森 清和	212
フェムト秒レーザ誘起周期的ナノ構造形成におけるポリマーを用いた周期制御 大阪大学：梶井 省吾, 竹名 啓輔, 塚本 雅裕*, 佐藤 雄二	213
サブナノ秒マイクロチップレーザ誘起衝撃波を利用した板曲げ加工 浜松工業技術支援センター：鷺坂 芳弘, 分子科学研究所：川崎 泰介, 平等 拓範, 科学技術振興機構：佐野 雄二	214
近・中赤外レーザの波長に対する透明樹脂溶着の各種特性評価 光産業創成大学院大学：真鍋 武士, 沖原 伸一朗	215
Rheinberg 照明によるガラス内部構造変化の明視野像と暗視野像の同時取得 立命館大学：杉本 凌, 寺井 誠也, 小笠原 佑真, 本間 健太郎, 渡邊 歴	216
レーザ焼結法による固体酸化物形燃料電池用セリア系電解質薄膜形成 茨城大学：石川 悠太, 山崎 和彦, 前川 克廣	217
リングビームレーザによるりん青銅端子への Sn 焼結膜形成技術 茨城大学：齋藤 隆平, (株)M&M 研究所：御田 護, 山崎 和彦, (株)M&M 研究所：前川 克廣	218
レーザ溶接におけるハブラニアンプロットと重回帰分析を用いた溶込み深さの予測の比較 大阪産業大学：部谷 学, 光産業創成大学院大学：舟山博人, 坪井昭彦, (株)レーザックス：田川正雄	219
純銅溶接における青色半導体レーザインテンシティが溶込み深さに及ぼす影響 大阪大学：森本 健斗, 塚本 雅裕, 佐藤 雄二, 升野 振一郎, 阿部 信行, 大阪大学, 大阪富士工業(株)：林 良彦, 安積 一幸	220
マルチレーザコーティング法を用いた Co-Cr 合金の 3D 造形と金属組織評価 近畿大学：平田 侑希, 大阪大学：塚本 雅裕, 原 隆裕, 佐藤 雄二, 吉田 実, 石川県工業試験場：舟田 義則, 大阪大学：阿部 信行	221

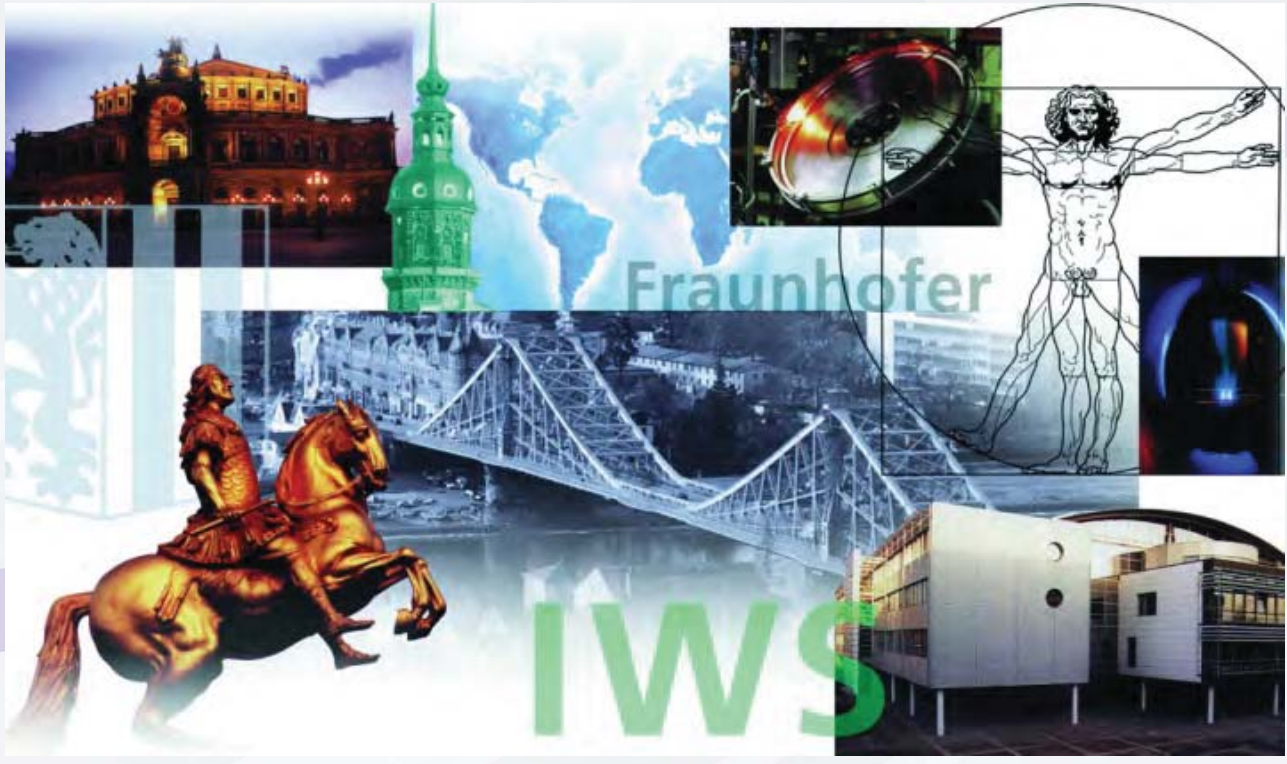
## ポスター展示

株式会社プロフィテット	223
Gentec EO Japan 合同会社	224
株式会社島津製作所	225
レーザーライン株式会社	226
前田工業株式会社	227
パルステック工業株式会社	228
三菱重工工作機械株式会社	229
古河電気工業株式会社	231
愛知産業株式会社	232



# プレナリーセッション

# Latest developments in laser processing, welding and coating



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

1

 **Fraunhofer**  
IWS

  
Dresden

## Content

- Drilling and Cutting
- Coating



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

2

 **Fraunhofer**  
IWS

  
Dresden

## From basics to industrial applications

In laser material processing we always transform optical energy into heat energy and partially in:

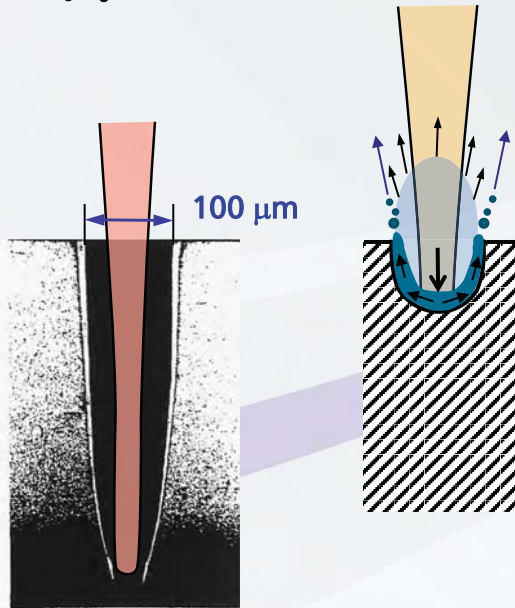
melting and melt movement  
evaporation and vapour flow  
plasma energy

To optimize the laser process we have to understand and control all this energy and energy flow.



# Laser Drilling

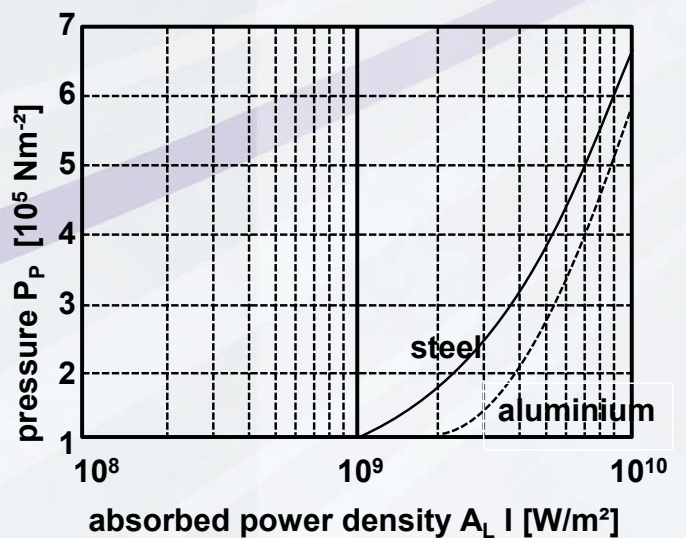
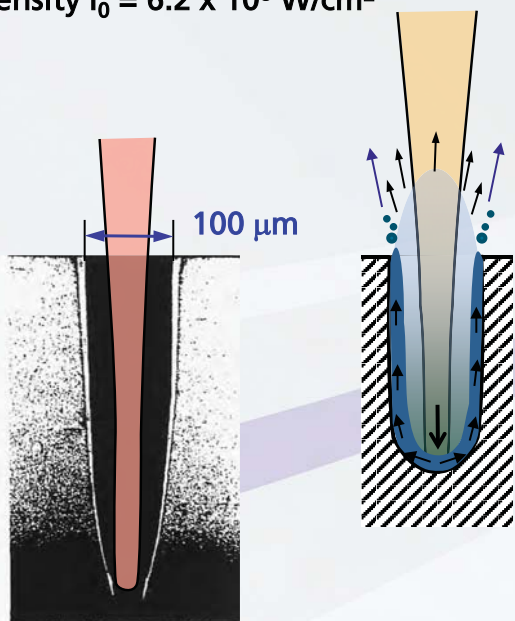
Beam diameter  $\varnothing = 50 \mu\text{m}$   
 Intensity  $I_0 = 6.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$



5

# Laser Drilling

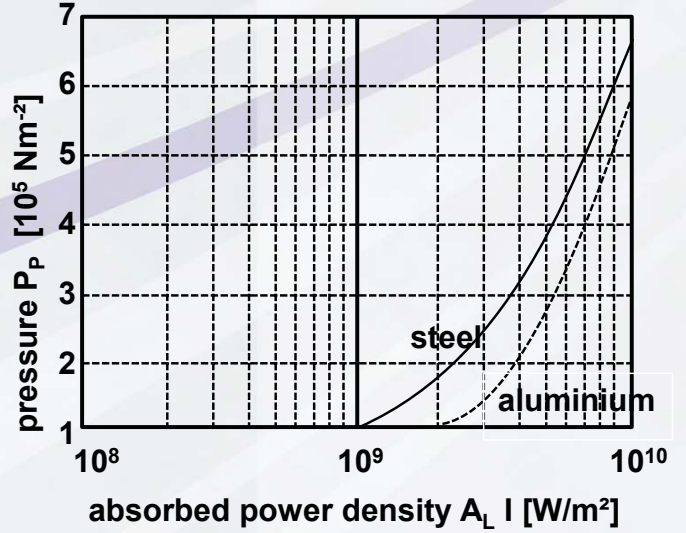
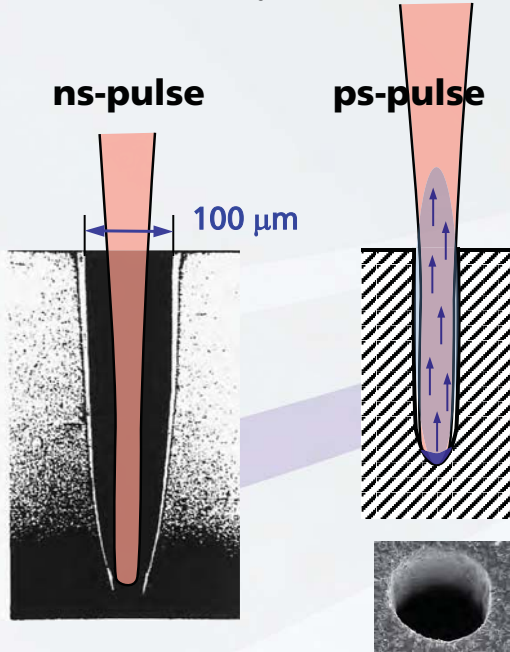
Beam diameter  $\varnothing = 50 \mu\text{m}$   
 Intensity  $I_0 = 6.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$



6

# Laser Drilling

Beam diameter  $\varnothing = 50 \mu\text{m}$   
 Intensity  $I_0 = 6.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$



# Laser Drilling / Cutting

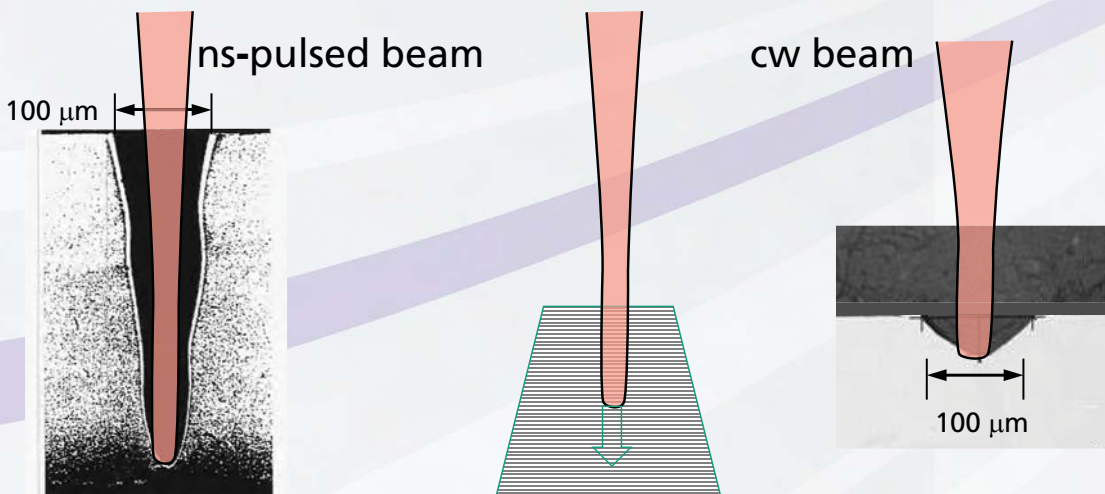
Short pulse

*Interaction time*

high speed cw beam  
 ( $v = 1000 \text{ m/min}$ )

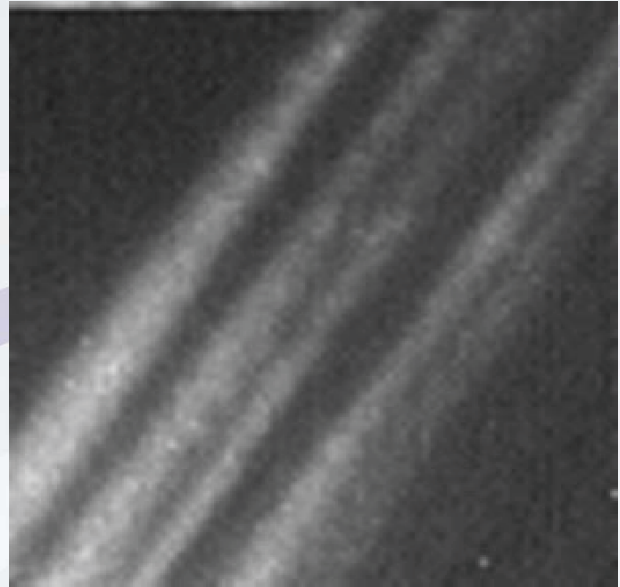
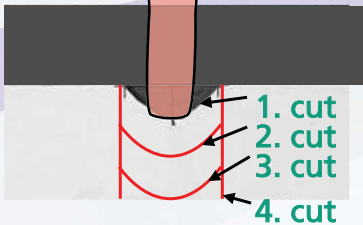
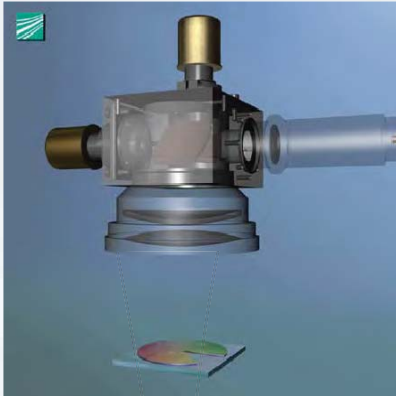
Intensity  $I_0 = 6 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$

Intensity  $I_0 = 4 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$



# Laser Remote Cutting

## remocut® Laser cutting without process gas



high speed Video

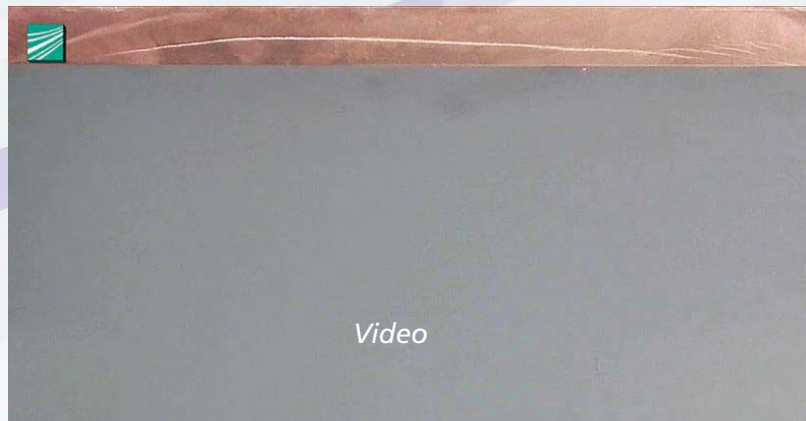
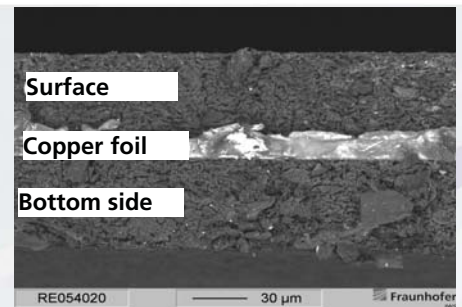
# Laser Remote Cutting

- Material thickness up to appr. 150  $\mu\text{m}$
- High cutting speeds and simultaneous keeping high quality demands (removal width)



$$P_L = 1000 \text{ W}$$

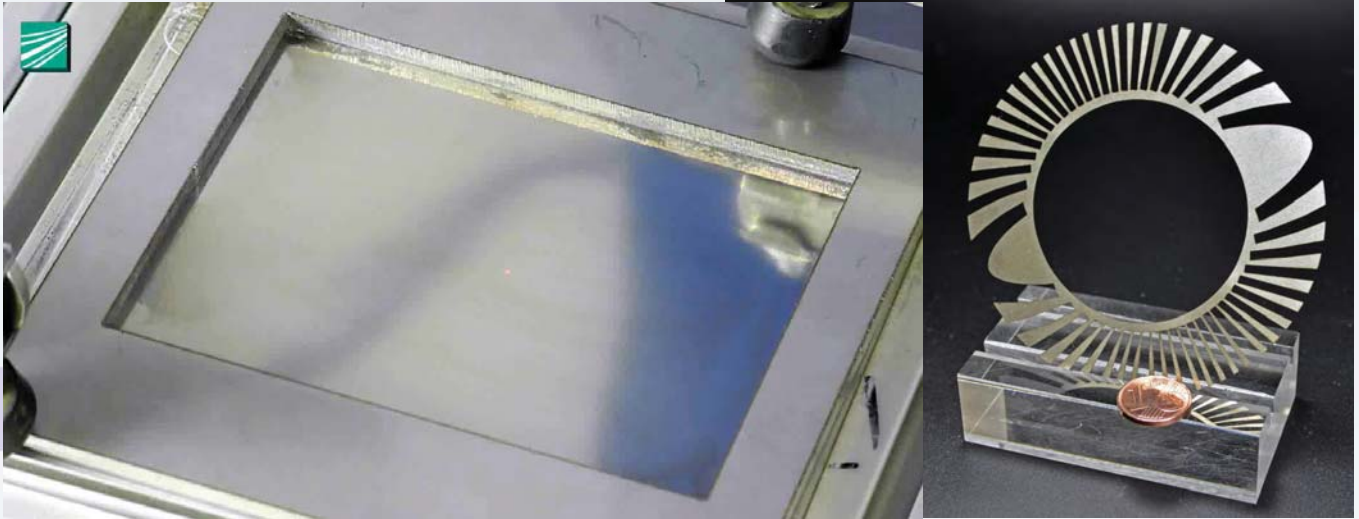
$$v_{\text{eff}} = 120 \text{ m/min}$$



Video

# Laser Remote Cutting

- Scanning of the laser beam through two fast galvo scanners
- Cutting with SM fiber lasers as an ablation process without assist gas

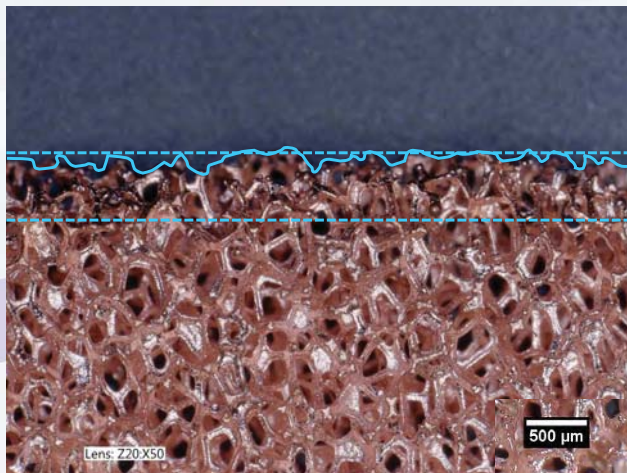


# Cutting of foam materials

## Thermal interaction zone

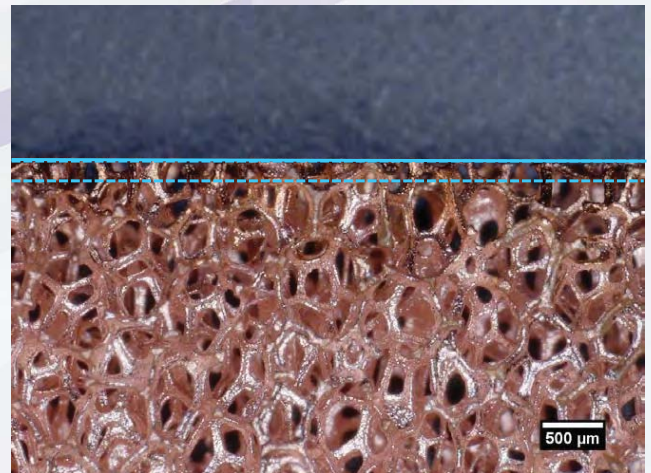
### Fusion cutting

- Effect zone > 500µm
- fraying



### Remote cutting

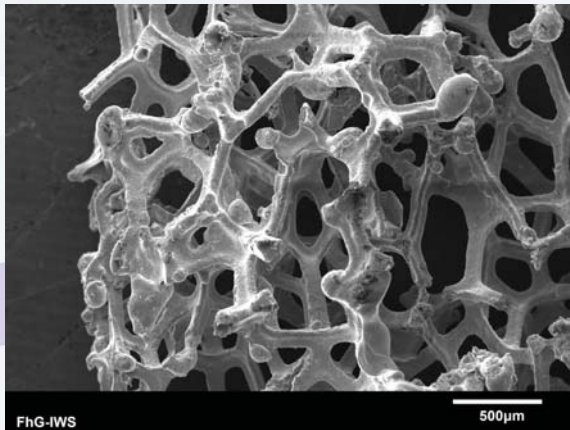
- Effect zone < 150µm
- No fraying



# Cutting of foam materials

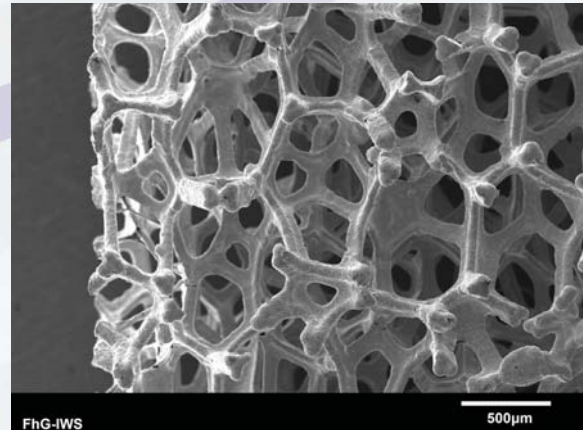
## Fusion cutting

- Molten material visible
- Material bonding



## Remote Cutting

- No visible molten material
- No material deposition



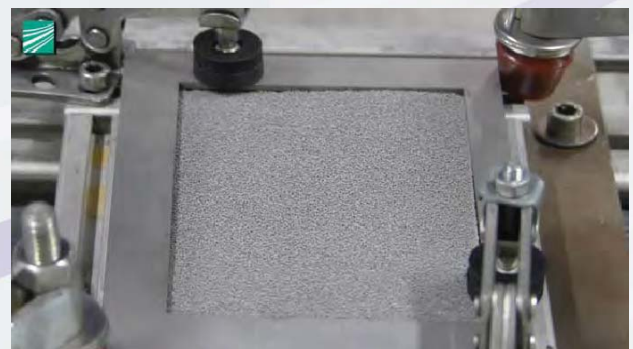
# Cutting of foam materials

## Remote cutting



copper

3 mm



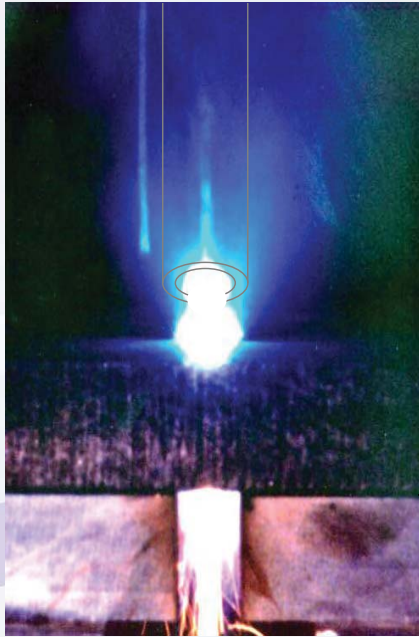
material

thickness

stainless steel

3 mm

# Laser Welding with Melt Expulsion



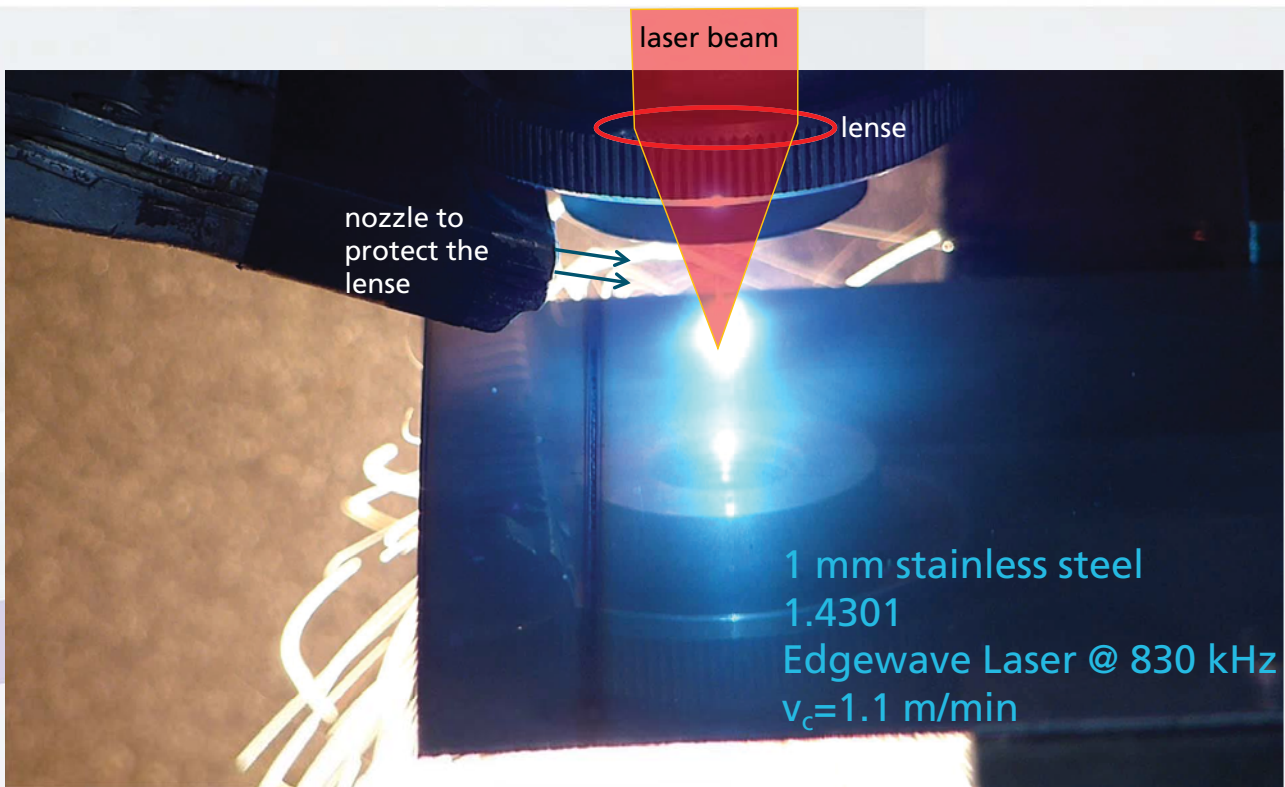
shielding gas  
nozzle

laser induced  
plasma

steel

12 mm

# Laser Cutting without Gas Nozzle



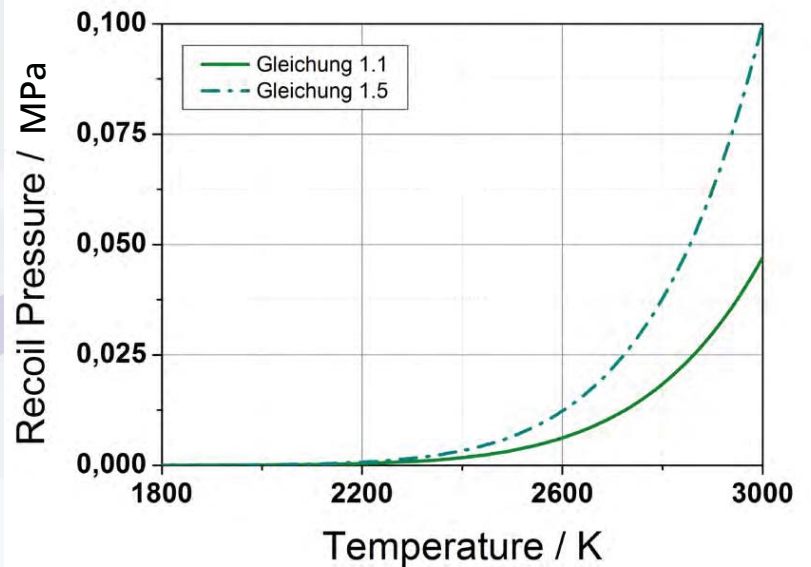
# Recoil Pressure

Modell Anisimov:

$$p_R = A \cdot p_s(T_S) = \frac{A \cdot B_0}{\sqrt{T_S}} \cdot \exp\left(-\frac{U}{T_S}\right)$$

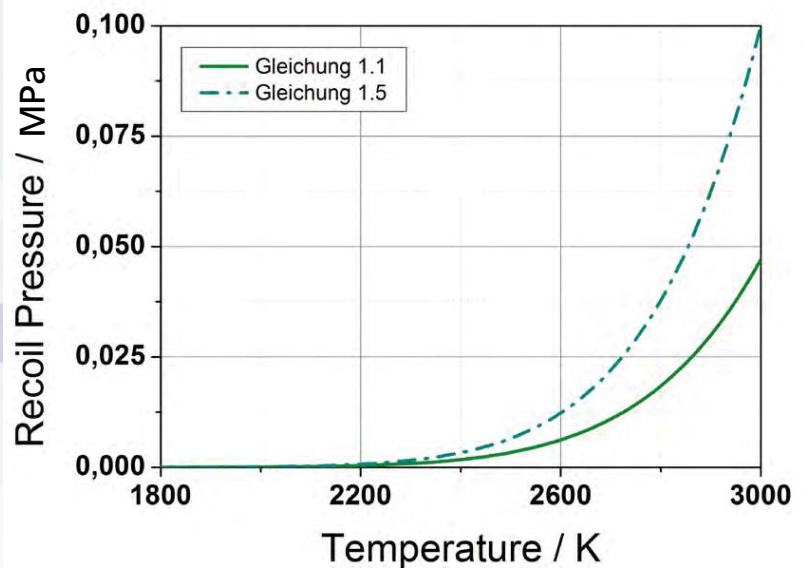
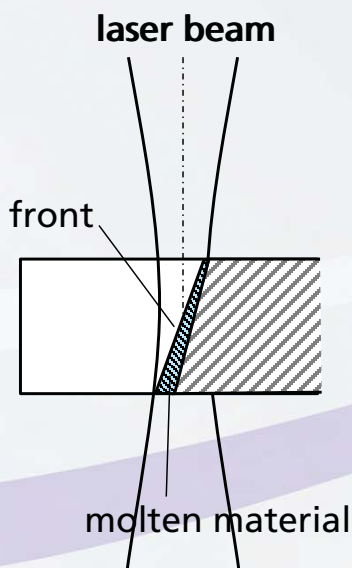
Clausius-Clapeyron:

$$\frac{p_s}{p_0} = \exp\left[U \cdot \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_S}\right)\right]$$



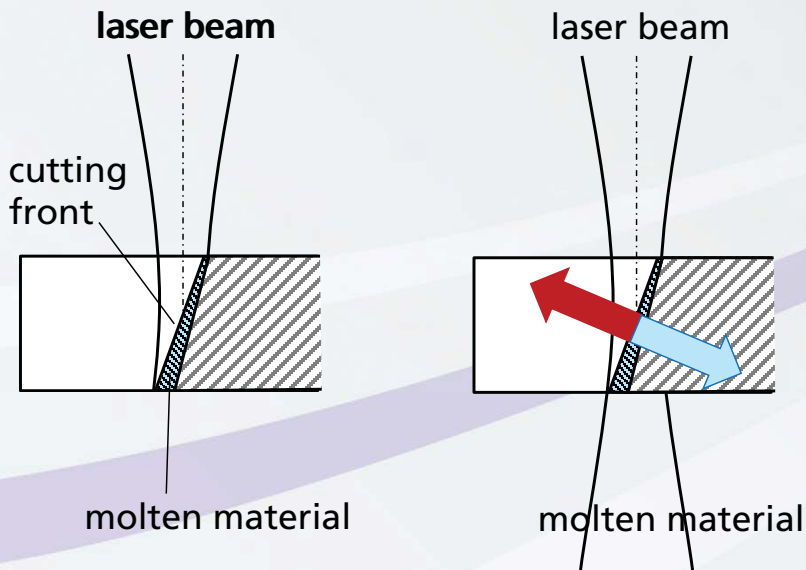
# Laser Cutting

## Recoil Pressure



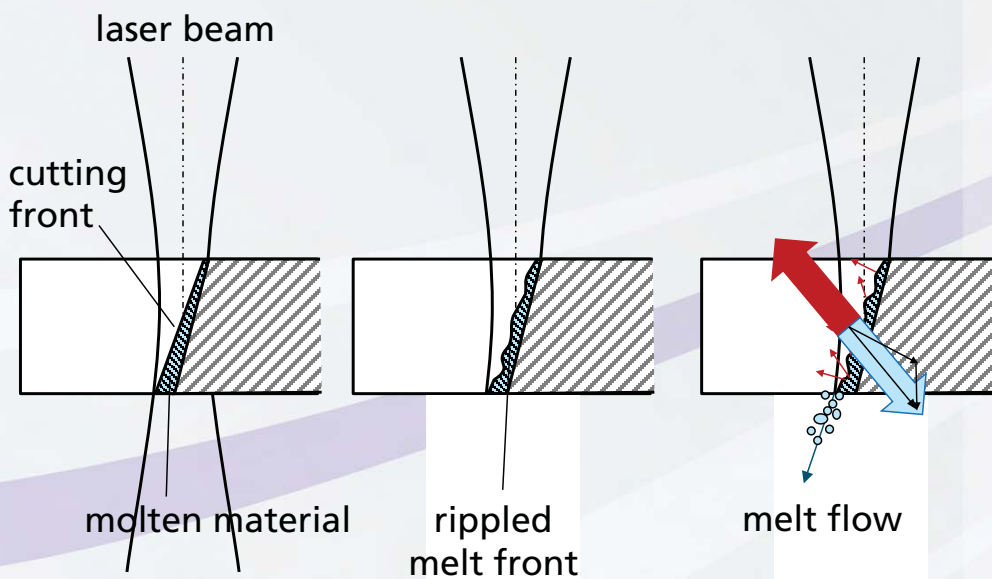
# Laser Cutting

## Vapour pressure



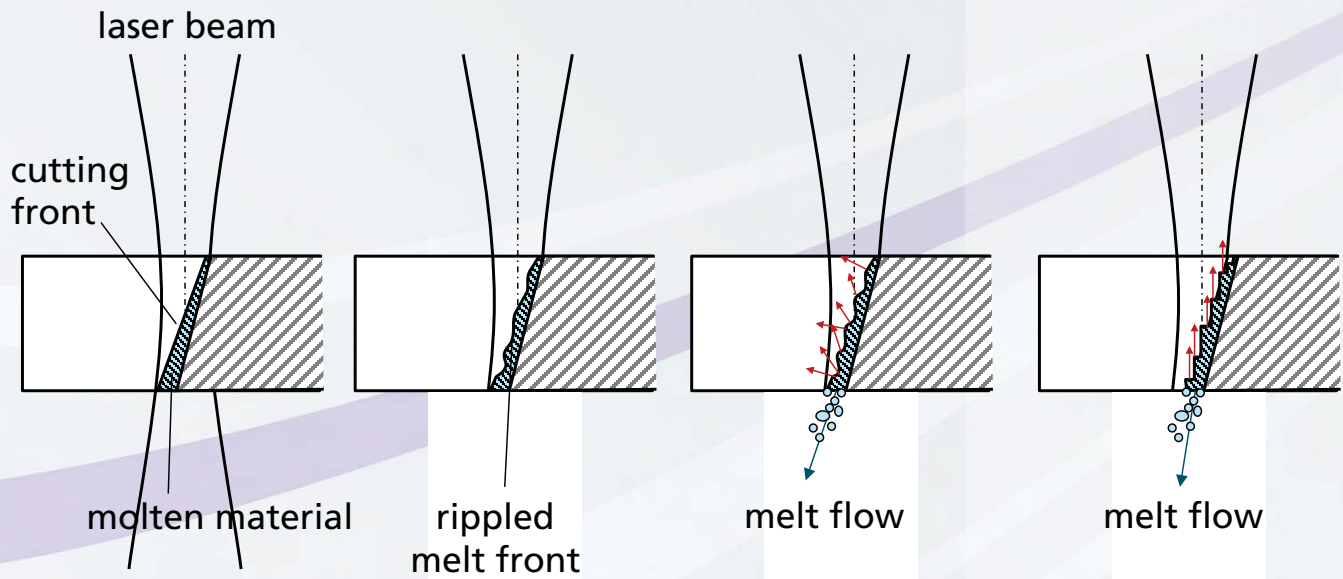
# Laser Cutting

## Vapour pressure at the melt front



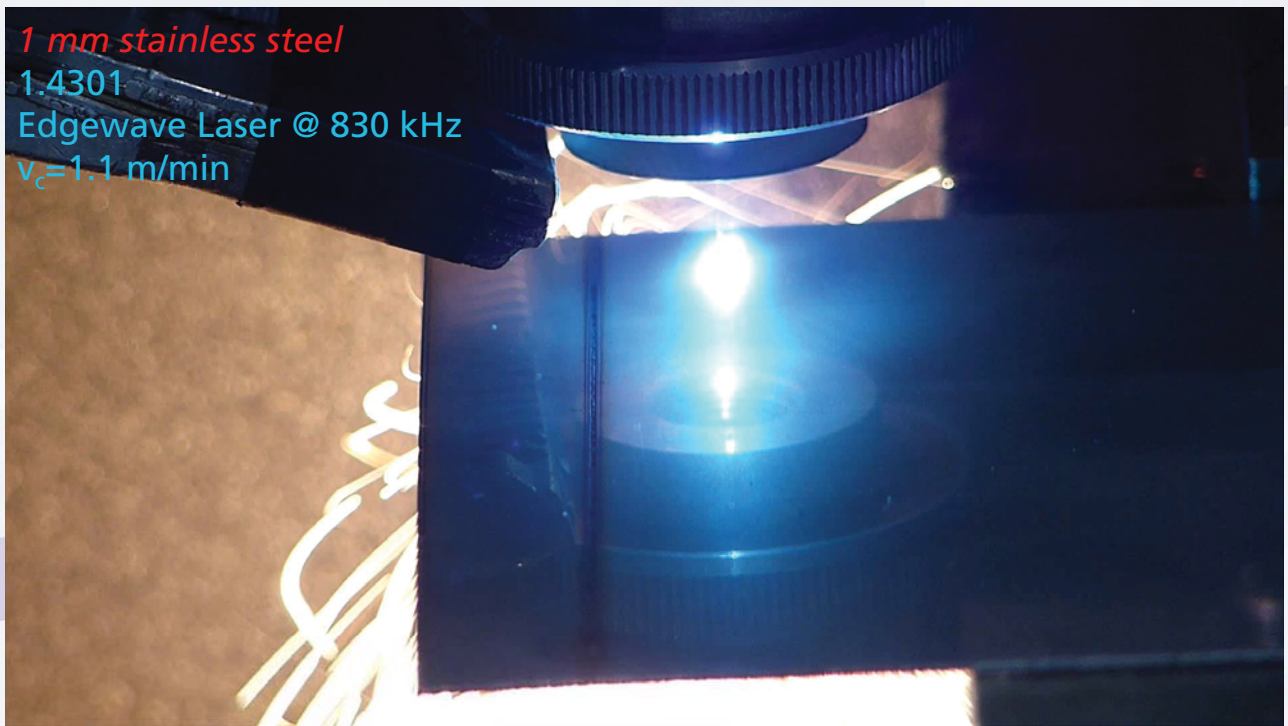
# Laser Cutting

## Vapour pressure at the melt front

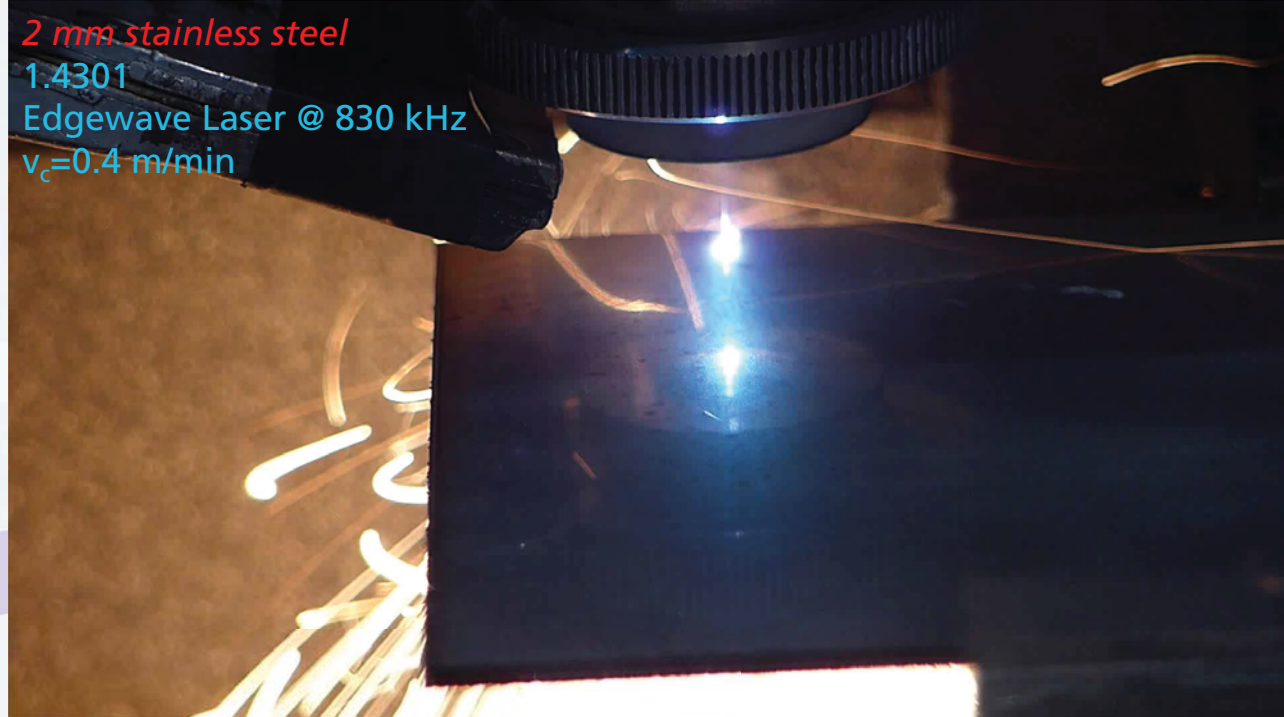


## Laser Cutting *without* Gas Nozzle

1 mm stainless steel  
1.4301  
Edgewave Laser @ 830 kHz  
 $v_c = 1.1$  m/min



## Laser Cutting *without* Gas Nozzle



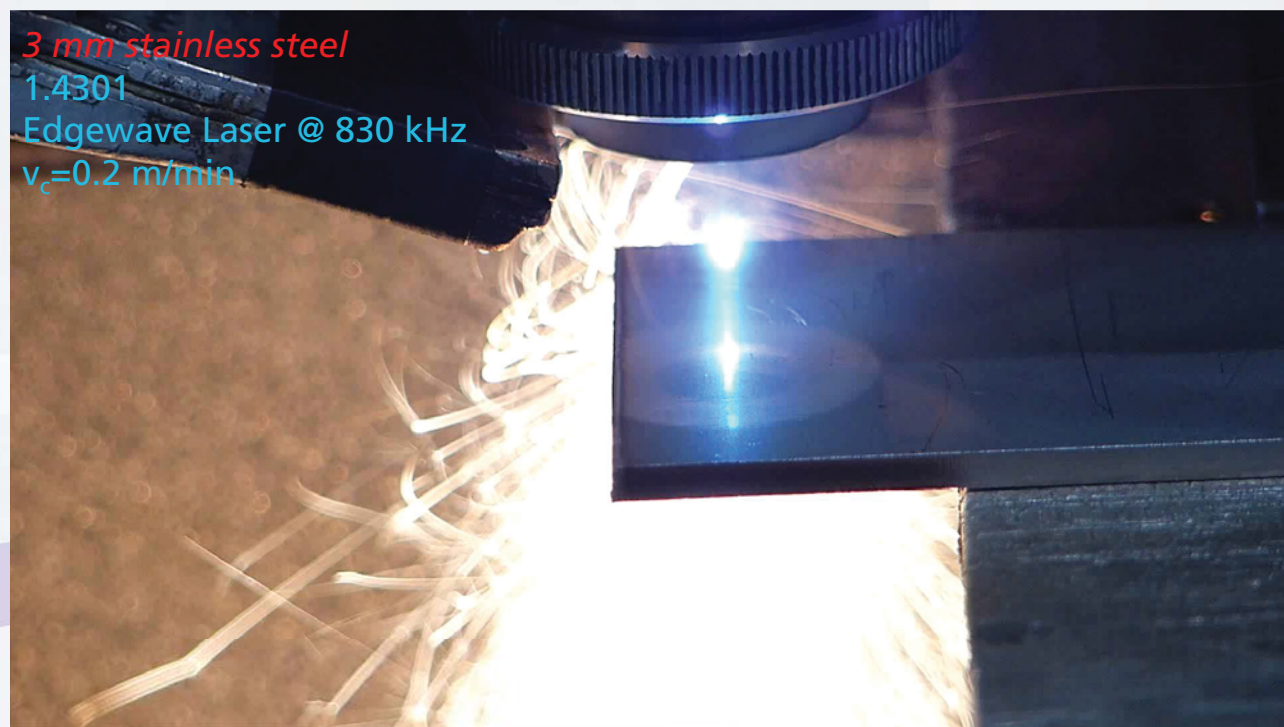
Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

23

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

## Laser Cutting *without* Gas Nozzle



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

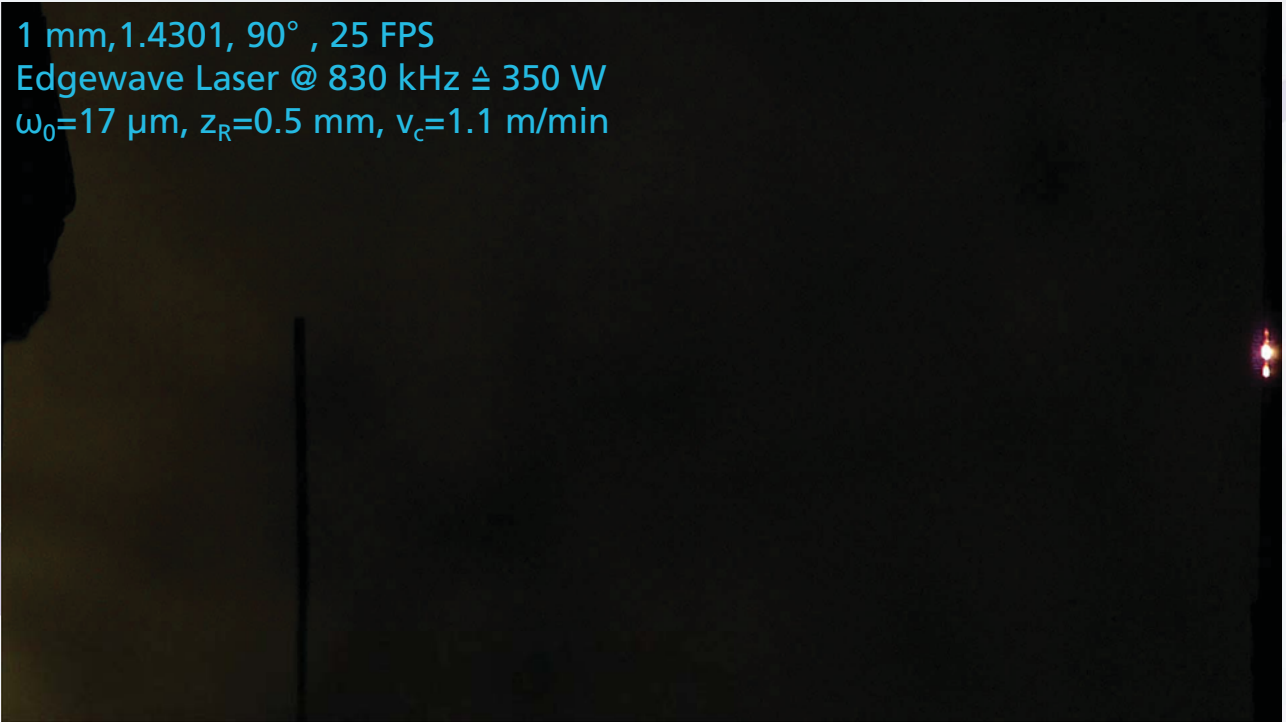
24

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

## Laser Cutting *without* Gas Nozzle

1 mm, 1.4301, 90°, 25 FPS  
Edgewave Laser @ 830 kHz  $\triangleq$  350 W  
 $\omega_0 = 17 \mu\text{m}$ ,  $z_R = 0.5 \text{ mm}$ ,  $v_c = 1.1 \text{ m/min}$



## Laser Cutting with *photonic pressure*

### Diode pumped ps-Laser

- max. average power: 350W
- max. pulse energy: 500  $\mu\text{J}$
- pulse time : 12 ps
- beam quality :  $M < 2$
- focus radius:  $r_0 = 17 \mu\text{m}$

## Diode pumped ps-Laser

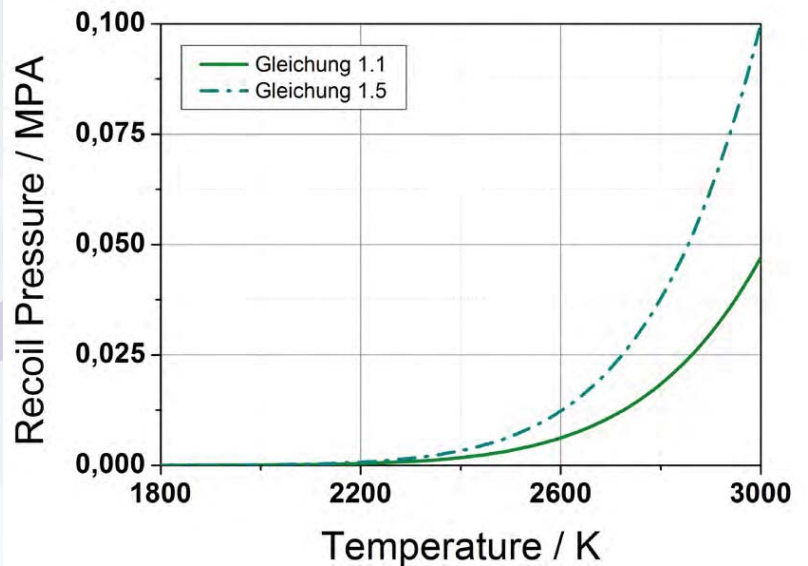
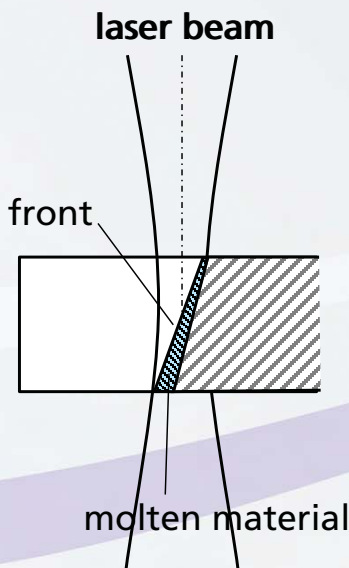
- max. average power: 350W
- max. pulse energy: 500  $\mu\text{J}$
- pulse time : 12 ps
- beam quality :  $M < 2$
- focus radius:  $r_0 = 17\mu\text{m}$

$$\text{Intensity} \quad I_{\text{Puls}} \approx 4.6 \cdot 10^{16} \text{ W/m}^2$$

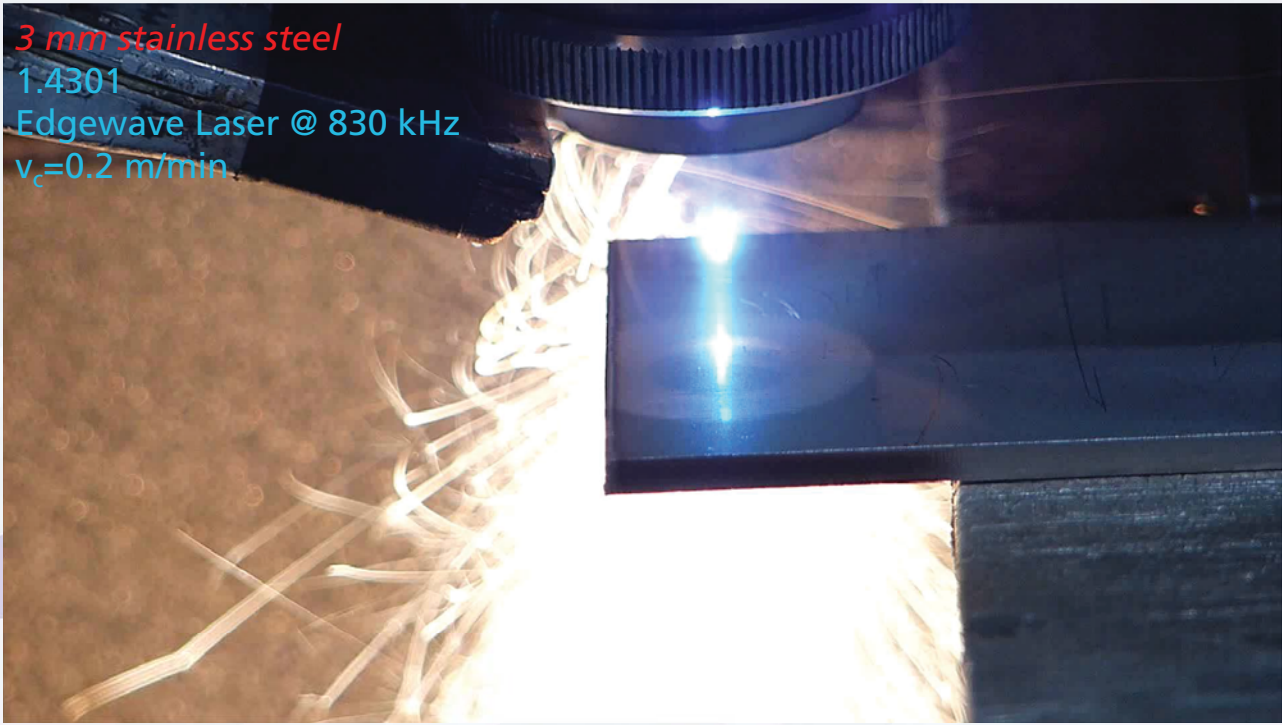
$$\text{Photonic pressure} \quad I / c_0 \approx 150 \text{ MPa}$$

## Laser Cutting

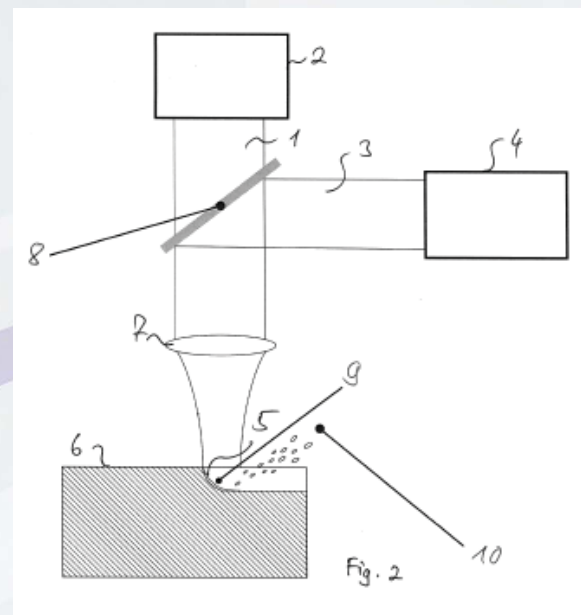
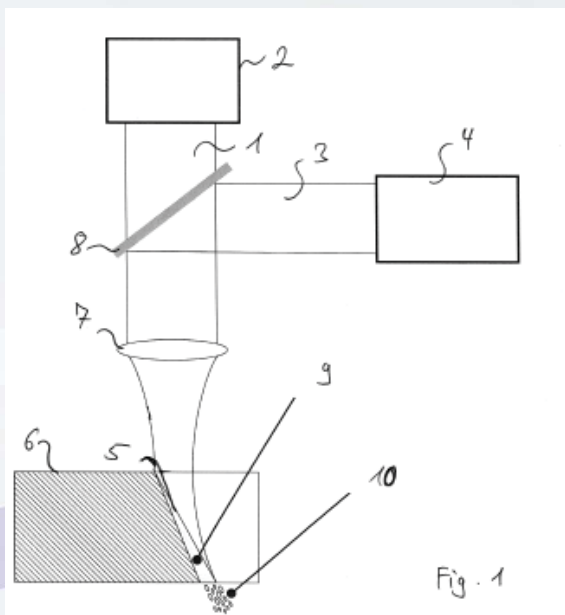
### Recoil Pressure



# Laser Cutting *without* Gas Nozzle

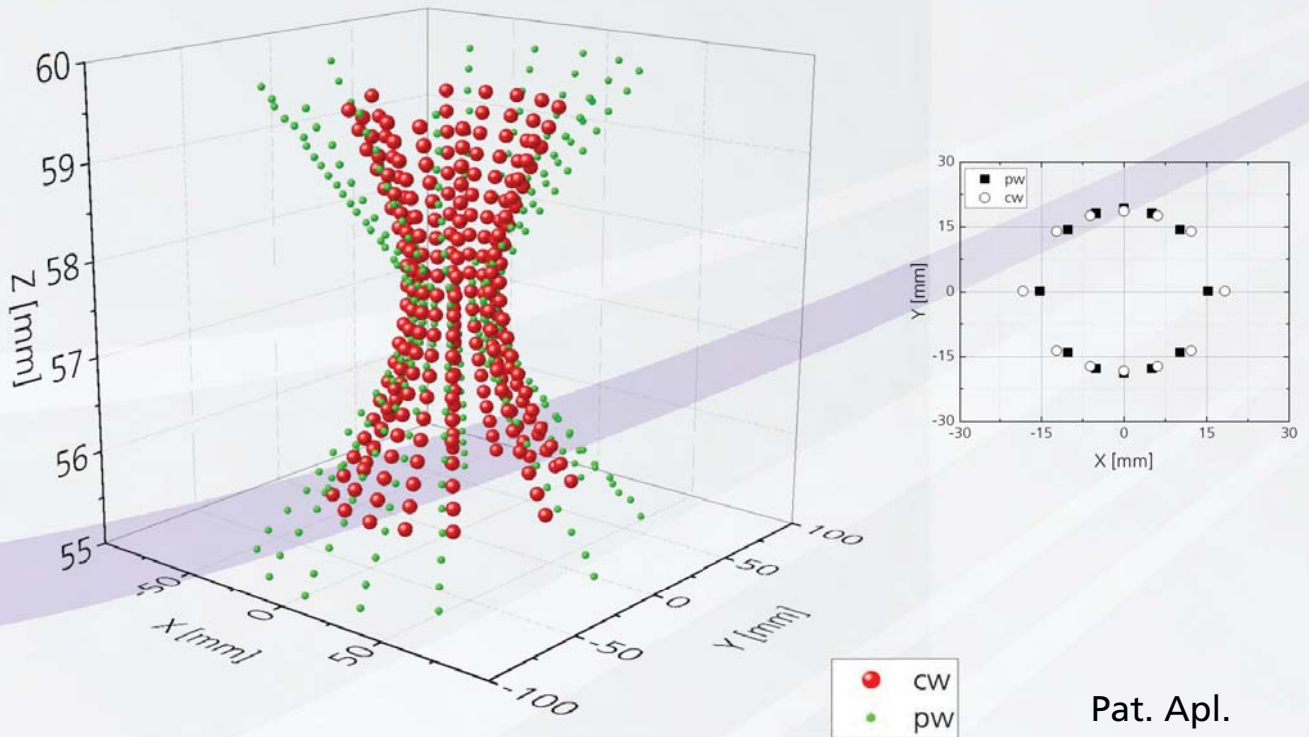


# Cutting with cw and pulsed Laser



Pat. Apl.

# Cutting with cw and pulsed Laser



Pat. Apl.

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

31

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Fraunhofer**  
Dresden

# Melt Expulsion in Fusion Cutting

$t=1 \text{ mm}$ ;  $v_c=1.0 \text{ m/min}$ ;  $z_f=-0.8 \text{ mm}$ ;  $p=2 \text{ bar}$



cw disc laser 300 W

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

32

 **Fraunhofer**  
IWS

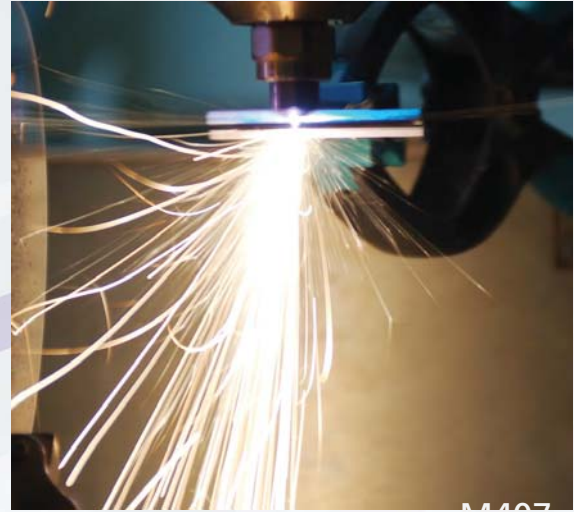
 **Fraunhofer**  
Dresden

# Melt Expulsion in Fusion Cutting

$t=1\text{ mm}$ ;  $v_c=1.0\text{ m/min}$ ;  $z_f=-0.8\text{ mm}$ ;  $p=2\text{ bar}$



cw disc laser 300 W



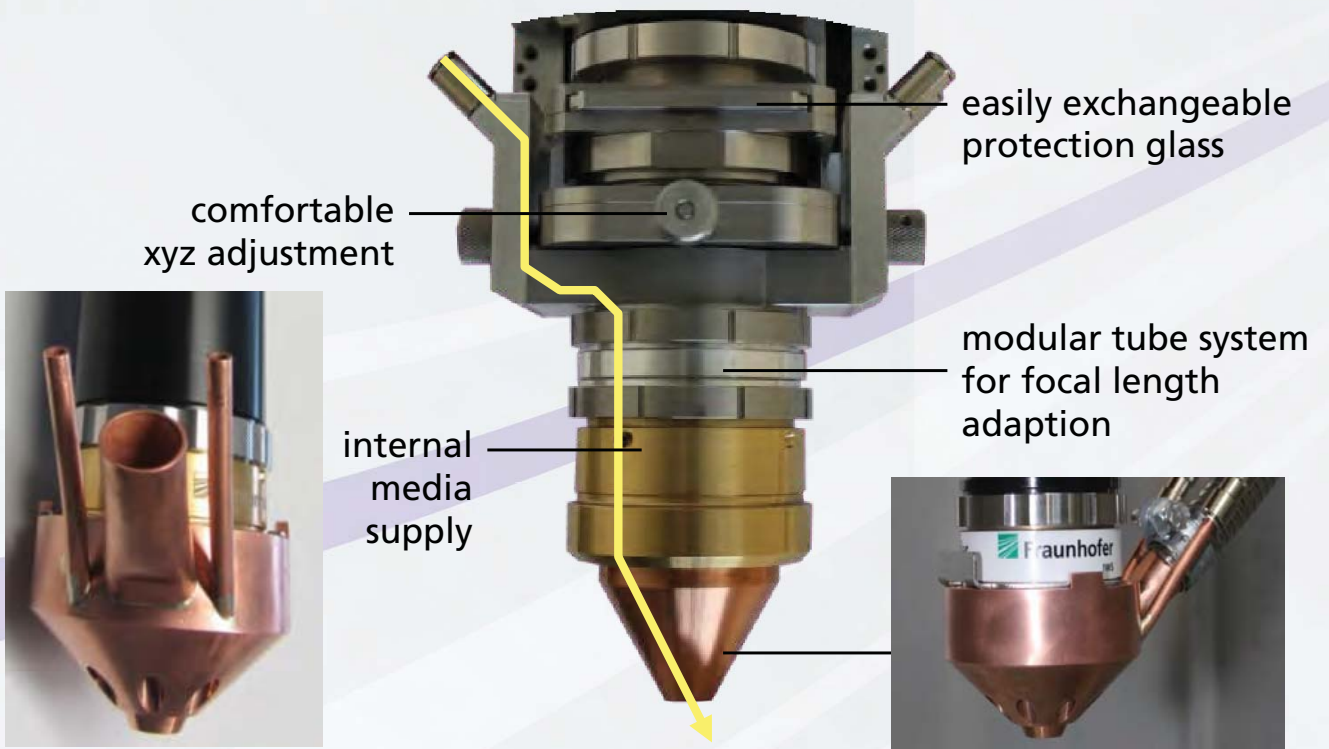
cw disc laser 220 W  
+ pulse laser 80 W

## Content:

- Drilling and Cutting
- **Coating**



# Laser Cladding

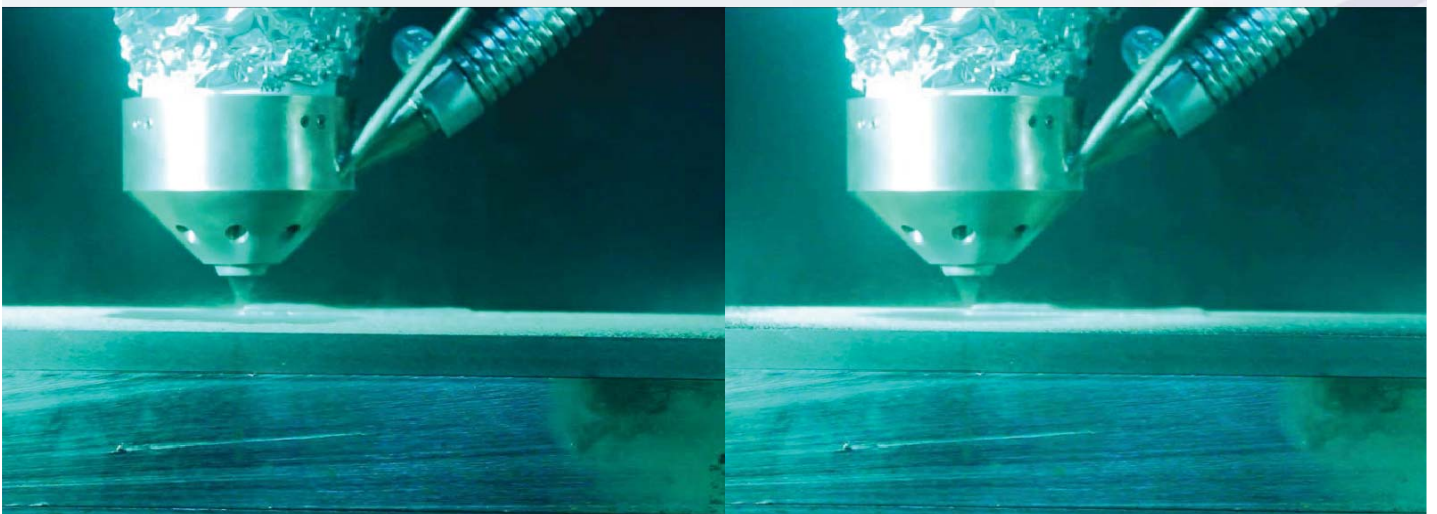


Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

35

# Nozzle for COAX powerline

## Laser-cladding of CuZn-Alloy



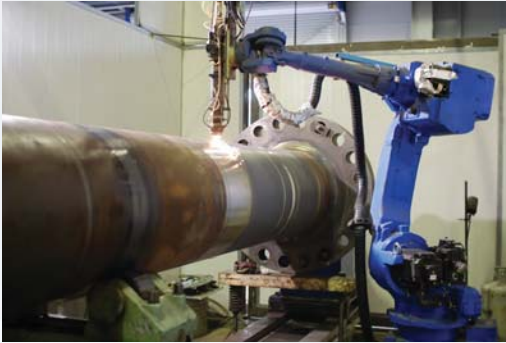
**Without exhaust**

**With exhaust of smoke**

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

36

## Repair of ship drives



Source: Roussakis S.A. Ship Repairs

- Large-area repair of ship drives: **6 kW diode laser and IWS COAX8 coaxial nozzle**

- Current example representing a **long-run cladding:**

- Propeller shaft of a passenger liner: 11 m length, 26 t weight.
- Deposition of 300 kg stellite material in operation time of **100 hours**.
- Meanwhile the ship is back at sea.

## Record in laser TC/Ni cladding: **18 kg/h!**

- TC + NiCrBSi  
(60Wt.%) (40Wt.%)  
MMC onto steel
- **18 kg/h** deposition rate  
at 10 kW diode laser

## Deposition of INCONEL 625 using coaxial nozzles

- Deposition rate at 8 kW  
diode laser power:  
**6.3 kg/h**
- Powder utilization:  
90...95 %



Laser cladding process using the  
COAXpowerline coaxial nozzle

# Laser Cladding Innovation

## Deposition of INCONEL 625 using *flat-jet nozzles*

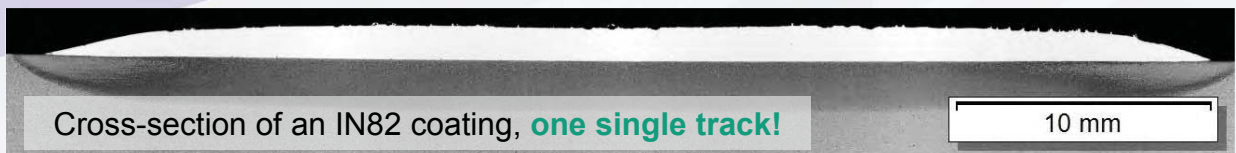
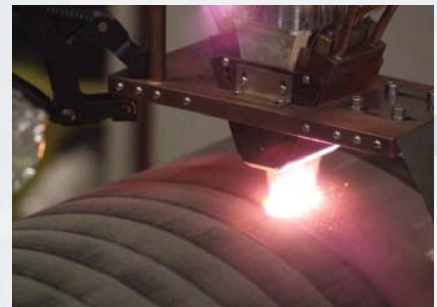
- Flat-jet nozzle's upper limit of feed rate: **30 kg/h**
- Metal powders, not suitable for carbide MMCs
- Large single tracks: up to **25 mm** in width
- Powder utilization: 60...90 %
- Potential application:
  - Lasers > **10 kW**,
  - deposition rate > **20 kg/h**
  - large-area corrosion protection



# Large-Area Cladding

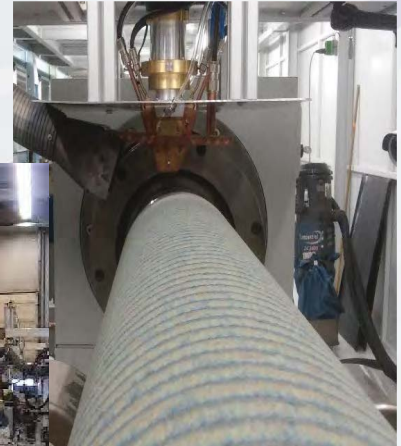
## Laser cladding with 20 kW laser power

- Wide, defect-free single tracks up **to 45 mm**
- Fine-grained solidification structure
- Low degree of overlapping between single tracks → increased cladding rate
- Metallurgical bonding to the substrate
- Low dilution (iron mixing): 3...5%
- High productivity at moderate cladding speed





## Laser Cladding of Hydraulic Piston Rods



12

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

41

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

## Laser Cladding with 50 kW Laserline Diode Laser

Setup:

**50 kW** Diode Laser

■ Cladding head with :

**45 mm spot width**

Fraunhofer IWS

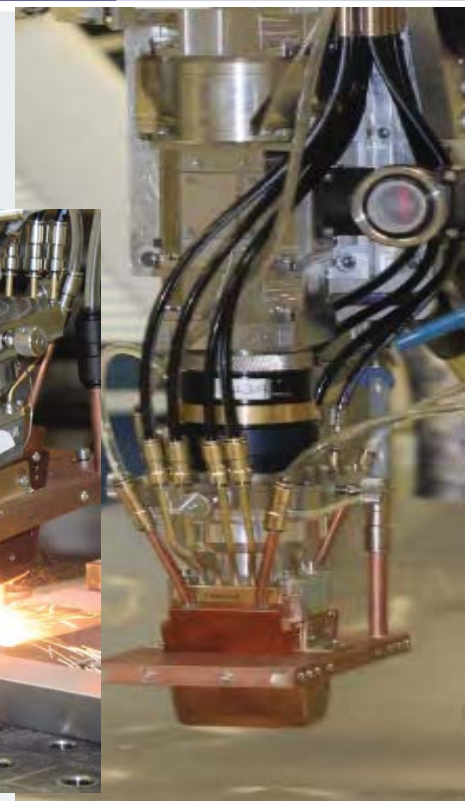
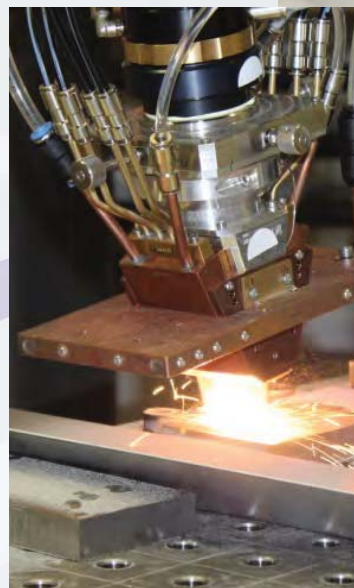
COAXn powder nozzle

type **COAX11V6**

■ material:

Substrate: 42CrMo4

Powder: Inconel 625,



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

42

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

# Laser Cladding with 50 kW Laserline Diode Laser

Setup:

**50 kW** Diode Laser

- Cladding head with :  
**45 mm spot width**

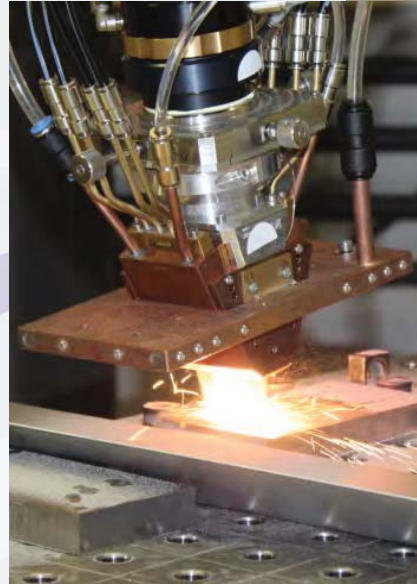
Fraunhofer IWS

COAXn powder nozzle  
type **COAX11V6**

- material:

Substrate: 42CrMo4

Powder: Inconel 625,



# Laser Cladding with 50 kW Laserline Diode Laser

**Successful result at 50 kW.**

no process problems despite  
the high laser power  
smooth and flat surface  
no cracks, holes, pores

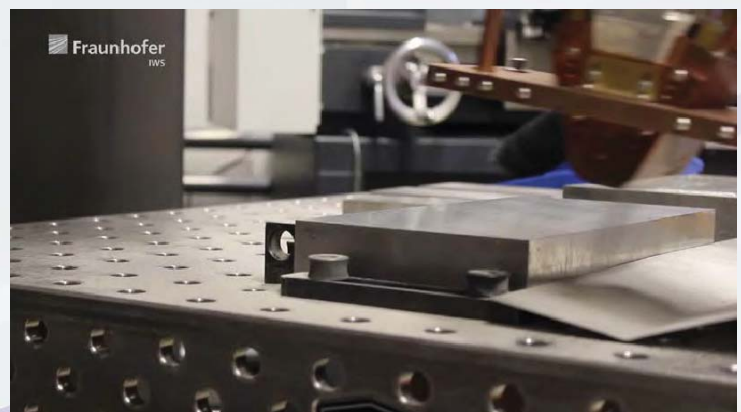
**Deposition rate:**

powder feed rate 580 g/min  
→ **35 kg/h**

surface cladding rate **3,5 m<sup>2</sup>/h**  
@ ~ 1,0 mm

thickness

cladding speed 1,42 m/min



Cladded sample:  
3 tracks, cladded  
area 130 x 120 x  
1,0 mm, 50 kW  
laser power, laser  
on time only ~ 15  
seconds

# Laser Cladding with Wire – Process



## WIRE-BASED LASER MATERIAL DEPOSITION



# Laser Cladding with Wire – Process



## Advantages of Laser Wire Cladding:

- 100% utilization of added material
- omni-directional 3D-processing due to centric wire feed
- shorter machine downtime (post-process maintenance time) due to 100% utilization (clean process, compared to powder deposit processes)
- Fraunhofer IWS Head:
  - higher accessibility due to compact design
  - Available for Fiber, Disk

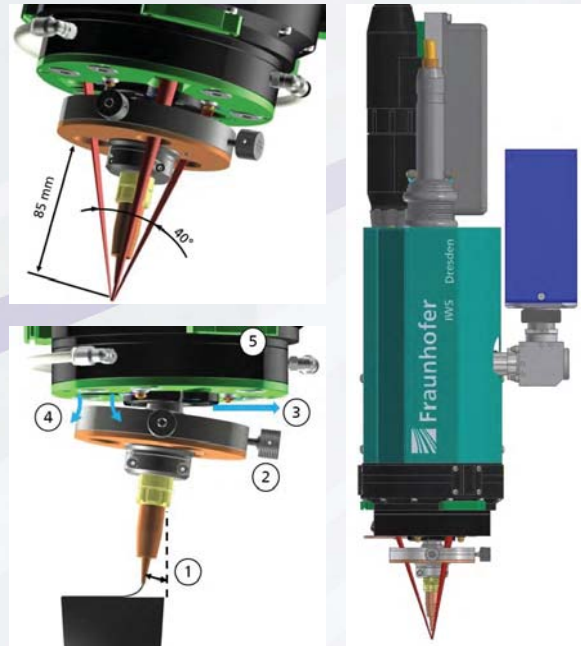
# Laser Cladding with Wire – Process

## COAXwire processing head

### Basic properties

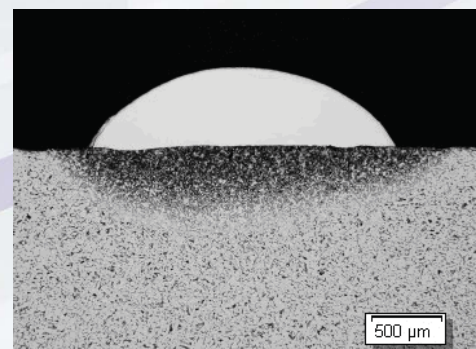
- 3 beam optic setup
- Centric wire supply
- Up to 4 kW laser power
- Weight with attachments ~ 20 kg

- ① Safety and collision shutdown
- ② XYZ-wire supply adjustment
- ③ Crossjet
- ④ Downjet
- ⑤ Cover glasses



# Laser Wire Cladding with Hot Wire

- Laser power: 3 kW
- Wire material: Inconel 625
- Wire diameter: 1 mm
- Wire speed: 4.8 m/min
- Wire Heating Power: 0.4 kW
- Travel Speed: 3.6 m/min
- Deposition rate: 1.9 kg/h



# Laser Wire Cladding with Hot Wire

## Cladding of patches on tool die



Quelle: ALOtec Dresden

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External  
Fraunhofer Institute for Material and  
Technology IWS



# Laser Wire Cladding

## *Laser system for cladding with centric wire feed*



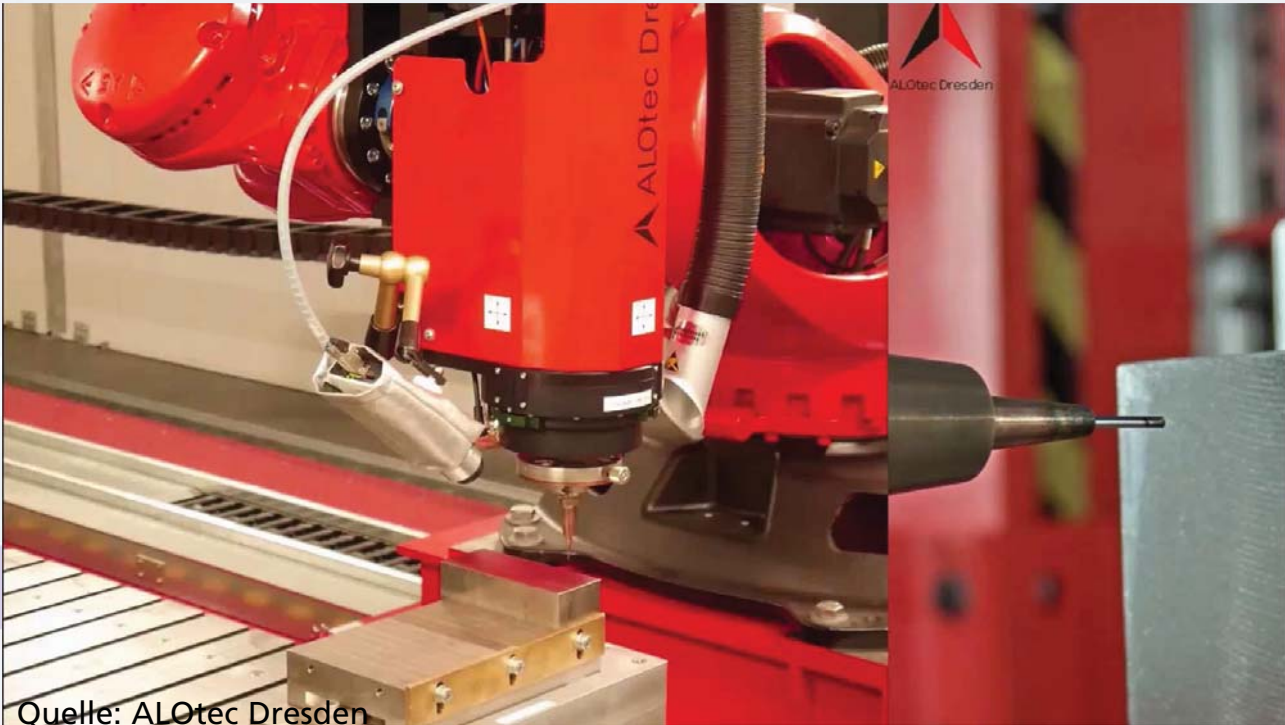
Quelle: ALOtec Dresden

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External  
Fraunhofer Institute for Material and  
Technology IWS



# Laser Wire Cladding

*Laser system for cladding with centric wire feed*



Quelle: ALOtec Dresden

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External  
Fraunhofer Institute for Material and  
Technology IWS



 **Fraunhofer**  
IWS



# Laser Wire Cladding

*Laser system for cladding with centric wire feed*



Quelle: ALOtec Dresden

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External  
Fraunhofer Institute for Material and  
Technology IWS



 **Fraunhofer**  
IWS



# Laser Wire Cladding

## *Laser system for cladding with centric wire feed*



Quelle: ALOtec Dresden

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External  
Fraunhofer Institute for Material and  
Technology IWS



## COAXWIRE *MINI*

### NEW FINE WIRE PLATTFORM

#### *Basic properties*

- 3 beam optic setup
- Wavelengths: VIS **450** – 1100 nm
- Weight with attachments ~ **10 kg**

#### *Technical features*

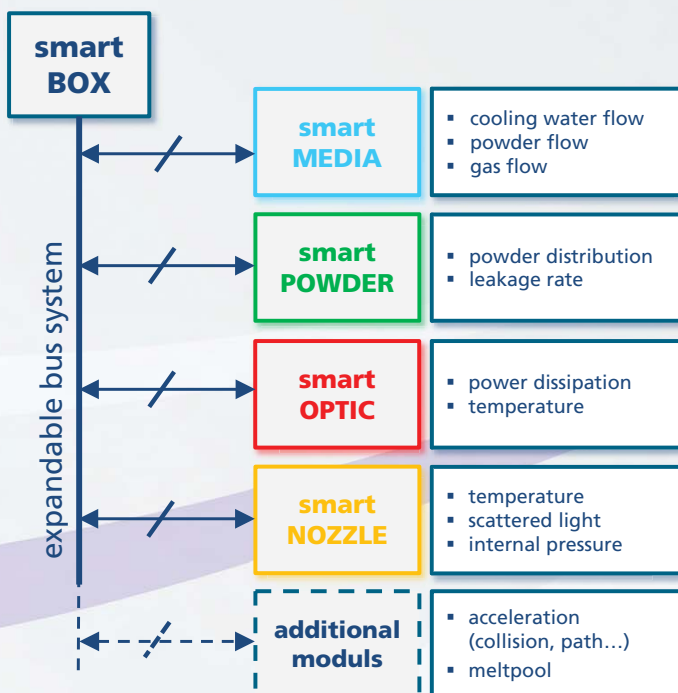
- ① Easy adjustments
- ② Integrated sensors
- ③ Fine wire guiding
- ④ Mini camera
- ⑤ Fume and smoke extraction



# DIGITAL SYSTEMS FOR LASER CLADDING

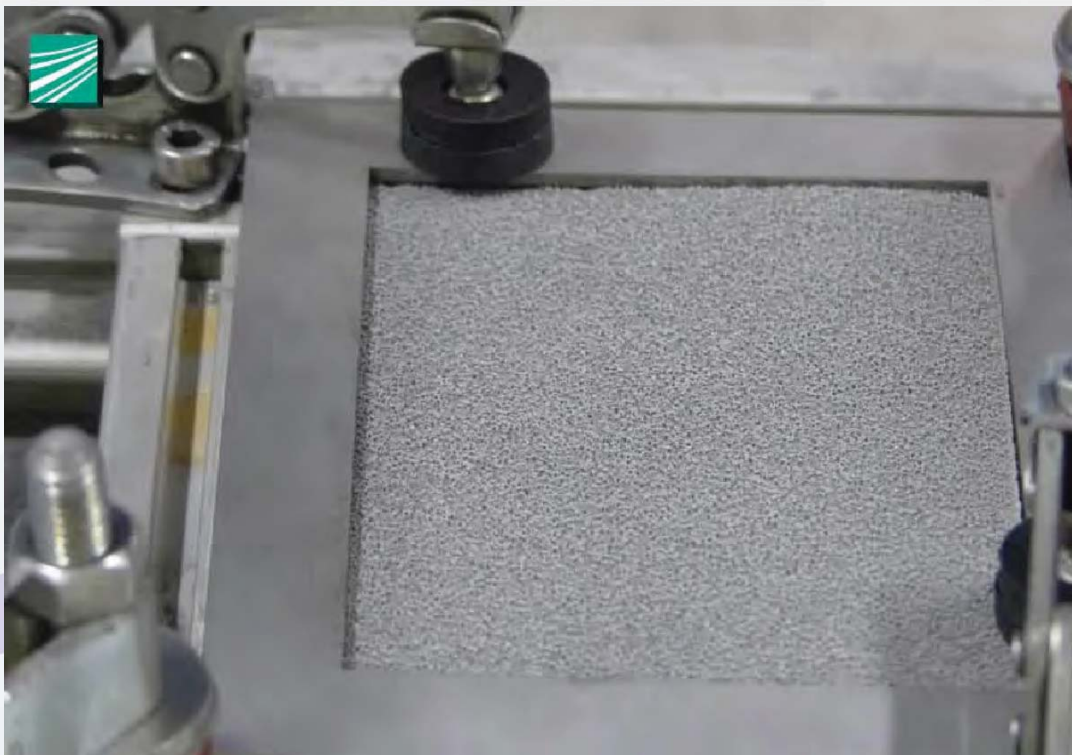


## Modular System



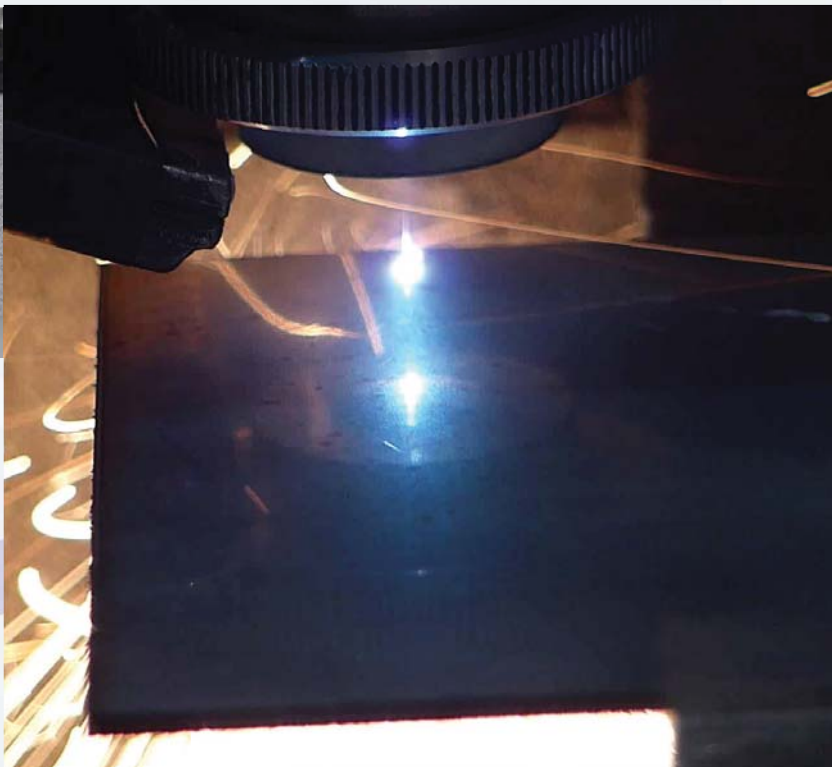
## Conclusion

## Conclusion



## Conclusion

## High Lights



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

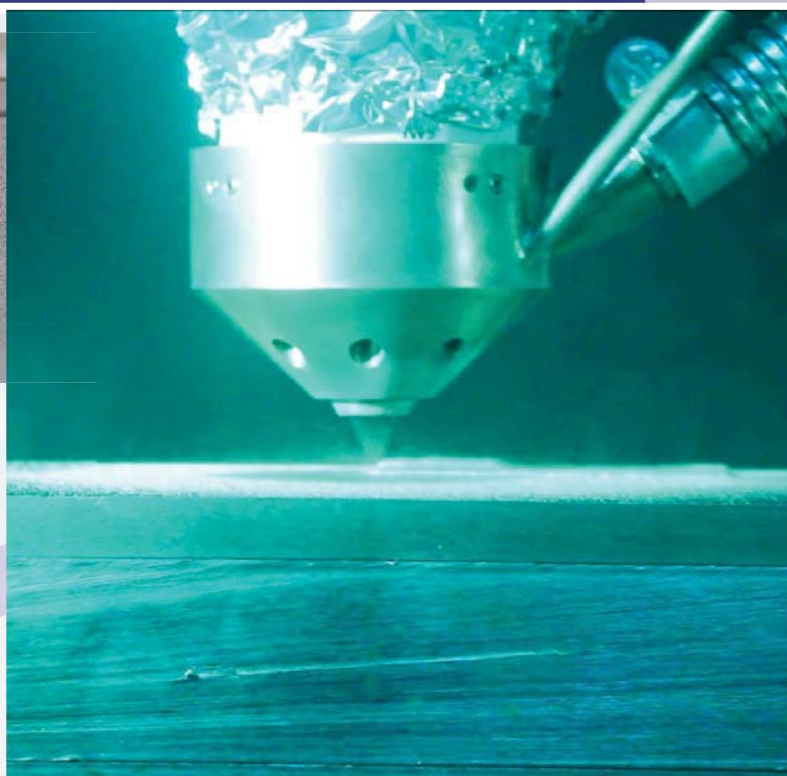
59

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

## Conclusion

## High Lights



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

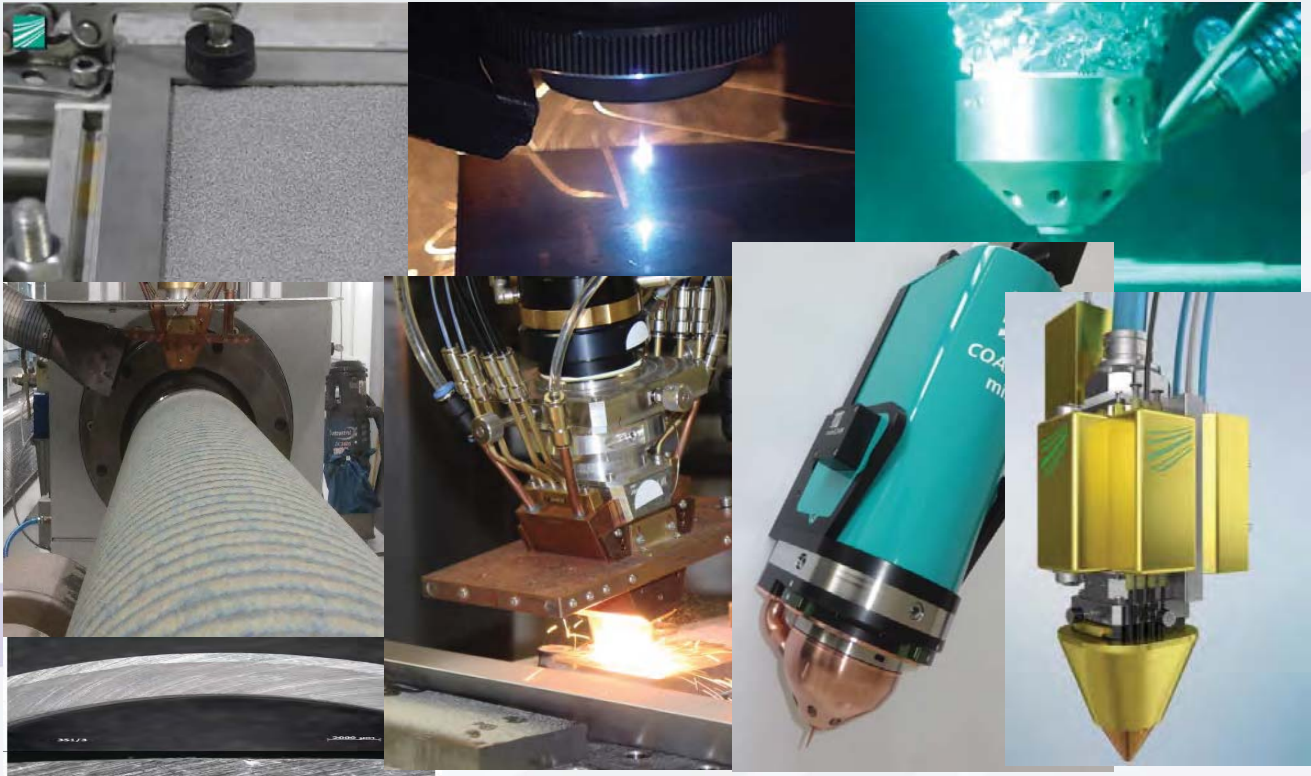
60

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

# Conclusion

# High Lights



Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

61

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**

# Conclusion

# High Lights



**Thank you for your attention**

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

62

 **Fraunhofer**  
IWS

 **Dresden**



## Thanks to the IWS Teams

**Dr. Achim Mahrle and the basic team**

**Dr. Andreas Wetzig and the cutting team**

**Dr. Denise Beitelschmidt and the thermal coating team**

**Dr. Stephan Nowotny and the team for wire cladding**

Prof. Ralf Eckhard Beyer, External Consultant,  
Fraunhofer Institute for Material and Beam  
Technology IWS

63

 **Fraunhofer**  
IWS

  
Dresden

# ISAM 2019 – 3<sup>RD</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADDITIVE MANUFACTURING TACKLING THE MATERIALS AND PROCESSING CHALLENGES

## SAVE THE DATE

**JANUARY 29–31, 2019  
DRESDEN, GERMANY**

### Special features:

- Business forum: market challenges and opportunities
- Elevator Pitches: fresh insights concisely delivered
- Posters: hot topics on display
- Exhibiton: tools for AM success

***[www.isam.network](http://www.isam.network)***

 **Fraunhofer**  
IWS

  
Dresden

 **TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**DRESDEN  
concept**



編集の都合により、33 ページから 58 ページまでは白紙です.

## 10A1. レーザ溶接品質および継手特性

# ビームモード制御技術によるスパッタ低減

## Spatter suppression with beam mode control technology

安岡知道\*, 茅原崇\*, 酒井俊明\*, 繁松孝\*

\*古河電気工業株式会社  
(〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地)

Tomomichi Yasuoka\*, Takashi Kayahara\*, Toshiaki Sakai\*, Takashi Shigematsu\*

\*Furukawa Electric Co., Ltd.  
(6 Yawata-Kaigandori, Ichihara, Chiba 290-8555 Japan)

ファイバレーザはその高いビーム品質により、非常に小さい領域に高いパワーを集光させることができる。これにより、加工時に熱影響が少なく、溶け込み深さの深い加工や、赤外領域で吸収をほとんど持たない銅の加工を実現することができる。その一方で加工中には多量のスパッタを発生させてしまう。このスパッタは溶接時の欠陥発生、加工部周辺の汚損を引き起こしてしまい、加工部材の強度低下や性能低下、製造現場における次工程の増加の原因となってしまう。これに対して、我々はビームモード制御技術を溶接に適用することでスパッタの抑制、加工欠陥の発生減少に成功した。

Owing to the high beam quality, fiber laser has high power density by minimal spot size. So we can get the results of narrow heat affected zone, deep penetration depth and welding with low absorption materials like copper. On the other hand, welding with fiber laser occur many spatters. These induce welding defects and poor appearance around the welding bead. To improve this, we applied beam mode control technology to the welding and succeed suppression of spatters.

**Key words:** Fiber Laser, Beam Quality, Spatter, Defect, Beam Mode Control Technology

## 1. 緒言

ファイバレーザは YAG 等の他のレーザと比較して、高いビーム品質と信頼性、効率性を持つ。また、加工点まで直接ファイバデリバリーすることができることから、産業用レーザとして非常に理想的であり、その市場規模は年々拡大している。従来、生産現場で使用されてきたレーザと比較しても使いやすい事から、他のレーザのみならず、抵抗溶接などの他の溶接方法からの置き換え検討・導入も進んでいる。

本稿ではその高いビーム品質を活かした加工特性、およびビームモード制御技術を組み合わせた新しいレーザ加工について報告する。

## 2. ファイバレーザ溶接技術

ファイバレーザはその優れたビーム品質により、高いパワー密度を得ることが可能である。その結果、溶接時には高アスペクトな溶け込みと少ない熱影響、さらに従来のレーザでは加工ができなかった銅のような高反射材料も加工可能である。本章ではまず弊

社のシングルモードファイバレーザおよびマルチモードファイバレーザの基礎的な加工特性を示す。

### 2.1 シングルモードファイバレーザ

当社のシングルモードファイバレーザの外観を Fig.1 に示す。発振器内部は励起用半導体レーザ、利得ファイバ、FBG(Fiber Bragg Grating) 等の部品で構成されており、発振されたレーザ光は光ファイバを通じて出力端まで伝送されている。



Fig.1 Single mode Fiber Laser manufactured by Furukawa Electric Co., Ltd

この発振器を使用した、SUS304, A5052, C1100 のビードオンプレートテストの結果が Fig.2~4 である。

Fig.2 は SUS304 に対して出力 1kW, 掃引速度 1m/min および 10m/min でレーザー照射した際の断面である。1 m/min で約 4 mm、10m/min で約 2.5 mm の溶け込み深さが得られていることが確認できる。Fig.3 は A5052 に対し出力 1kW, 掃引速度 1m/min および 10m/min でレーザー照射した際の断面である。こちらは 1 m/min で約 3 mm、10m/min で約 2mm となった。また、Fig.2 および Fig.3 により、SUS304、A5052 共に高アスペクト比の加工となっていることが確認できた。

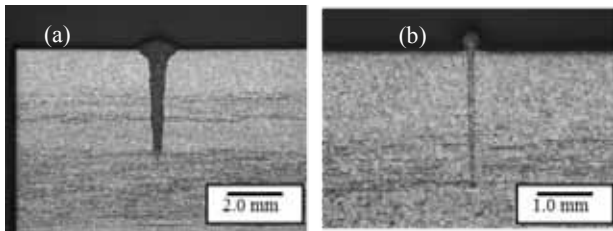


Fig.2 Cross-section view of SUS304 with SM1kW fiber laser (a) 1m/min (b) 10/min

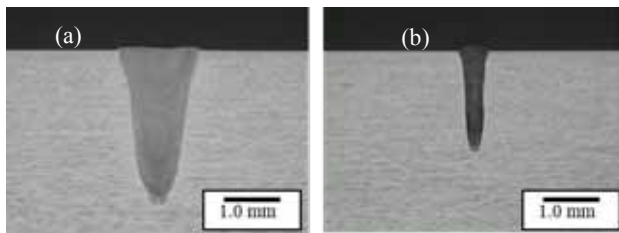


Fig.3 Cross-section view of A5052 with SM1kW fiber laser (a) 1m/min (b) 10/min

次に 1kW シングルモードファイバレーザによる SUS304, A5052, C1100 のビードオンプレート溶接試験における掃引速度と溶けこみ深さの関係を Fig.4 に示す。C1100 は他の 2 つの

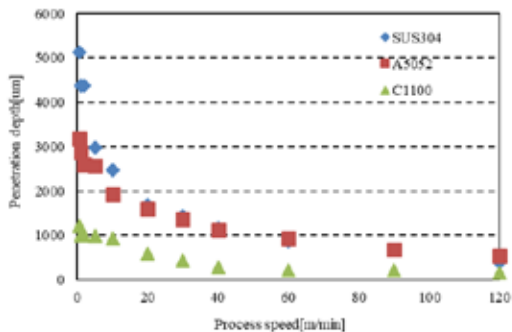


Fig.4 The result of bead on plate test with SM1kW fiber laser

材料と比較して溶け込みが浅くなっている。これは C1100 の持つ高热伝導率および高反射率に

よるものと考えられる。

## 2.2 マルチモードファイバレーザ

前章ではシングルモードファイバレーザの持つ加工特性を紹介したが、生産現場においてはより速い加工速度で加工をしたい、或いは、より深い溶け込み深さを得たいという要望も多い。そのような要望に応えるため、弊社では 2~6kW のマルチモード kW ファイバレーザを製品ラインナップとしている。このファイバレーザは、複数のシングルモードファイバレーザを合波することで構成されている[1]。



Fig.5 Multi Mode 6kW Fiber laser manufactured by Furukawa Electric Co., Ltd

Fig.5 は弊社製マルチモード 6kW ファイバレーザの外観であり、Fig.6~7 はそれを使用して SUS304, A5052, C1100 に対してビードオンプレートテストを実施した結果である。Fig.2 と Fig.6 を比較すると、溶け幅は太くなっているが、高アスペクトな形状は維持したままであることが分かる。また、溶け込み深さは Fig.7 のようになっており、Fig.4 と比較することでシングルモードファイバレーザよりも深い溶け込み深さを得ていることが確認できた。

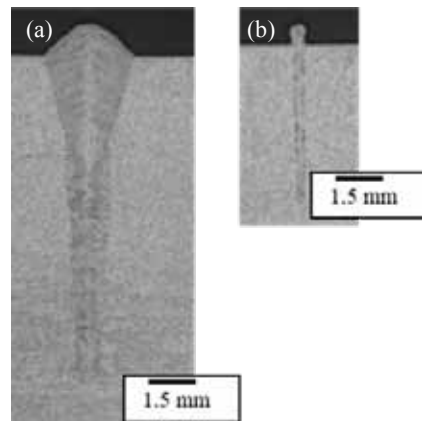


Fig.6 Cross-section view of SS304 with MM6kW fiber laser (a) 1m/min (b) 10/min

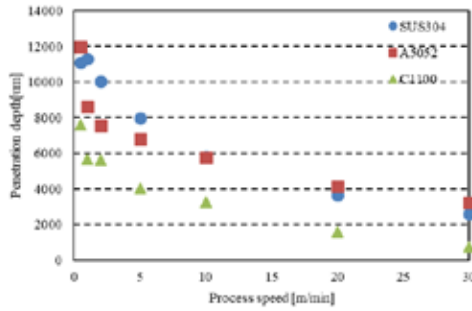


Fig.7 The result of bead on plate test with MM6kW fiber laser

### 3. ビームモード制御技術

これまで述べてきたように、ファイバレーザはその高いビーム品質および集光性により、従来では考えられなかった、局所的かつ深い溶け込み深さ、早いサイクルタイム、高反射材料の加工を提供してきた。その一方で、ファイバレーザを用いた溶接時には多量のスパッタが発生する。このスパッタはボイドやブローホールといった溶接欠陥を引き起こし、接合強度の低下や次工程の増加、種々の材料特性の減少を引き起こす。このスパッタを抑制するため、つまり溶融時の溶融池を安定化させるために我々はビームモード制御技術をファイバレーザ溶接に適用した。

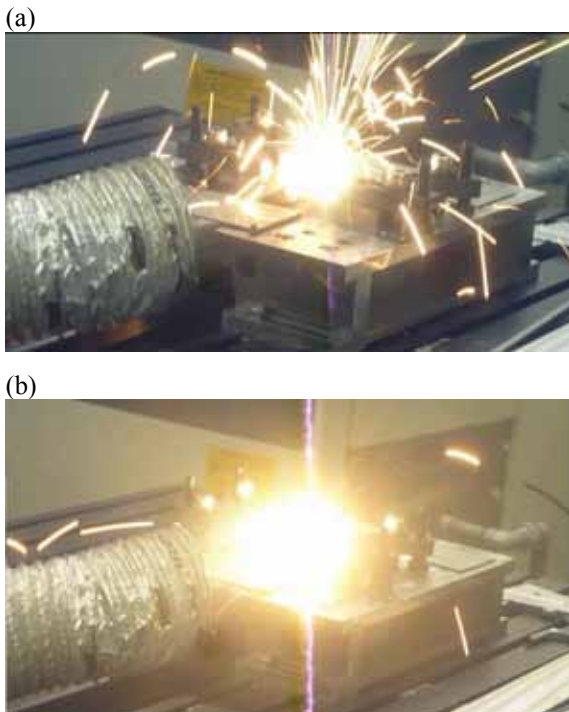


Fig.8 Appearance of bead on test with stainless steel.  
 (a) Conventional focused beam  
 (b) with beam mode controlled technology

Fig.8 は出力 3kW、加工速度 5m/min の条件下において、SUS304 上でビードオンプレート試験を実施した結果である。ビームモード制御を行わずに試験を実施した際は Fig.8 (a) のように多量にスパッタが発生していたが、ビームモード制御を用いた場合は Fig.8(b) のように大幅にスパッタを抑制することに成功した。

さらに出力を 5kW に上昇させて、SUS304 に対してビードオンプレートテストを実施した際の、スパッタの発生数をカウントしたデータが Fig.9 である。幅広い加工速度においてスパッタの発生を抑制することに成功し、少なくとも 40%以上のスパッタの抑制に成功した。

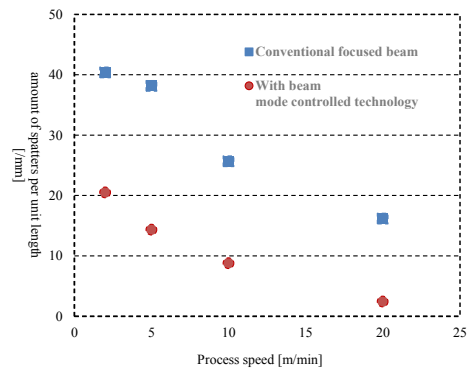


Fig.9 amount of spatters that occurs per unit length and Process speed with stainless steel at 5kw.

次に我々はこの技術を純銅の溶接に適用する事を検討した。純銅は自動車用モータやインバータなどに使用されており、近年の自動車の EV 化に伴い需要が高まっている。これらの自動車部品の設計自由度向上のために、ファイバレーザを用いた溶接は注目されているが、接合時の溶け込み深さを確保するために低速で溶接をした際には多量のブローホールが発生するという問題を抱えている。

これを克服するために、C1100 に対してビームモード制御技術を適用し、出力 6kW・加工速度 5m/min でビードオンプレートテストを実施した結果が Fig.10 である。ビームモード制御技術を用いない場合は不安定なビードであり、ブローホールが多量に発生していたが、ビームモード制御を適用することで非常に安定したブローホールのないビードを得ることができた。

この技術により、自動車用モータやインバータ用パワー半導体などの溶接、検査工程を効率化し、製造コストの大幅な削減と各種部品の高性能化に貢献できると考えている。



Fig.10 Optical images of bead on test with pure copper.  
(a) Conventional focused beam  
(b) with beam mode controlled technology

#### 4 結言

本稿では、ファイバレーザを使用した際の基礎的な加工特性から、ファイバレーザ使用時に発生する加工欠陥を抑制する方法を報告した。

加工欠陥を抑制するために、ビームモード制御をファイバレーザ溶接に適用することは非常に有効な方法であり、我々は現在この方法を様々な生産現場へ適用し始めている。また、本稿で紹介した以外の材料への適用も試みており、その欠陥の抑制にも成功している。

今後さらに開発を進め、より魅力的なレーザ加工ソリューションを皆様にご提案していきたい。

#### 参 考 文 献

[1] N.Yoshihiro, K. Kousuke, A. Ayumu and T. Takeshi,  
Journal of Japan laser processing society, Vol. 23, No.3  
(2016)

# 高出力固体レーザー溶接におけるスパッタ抑制技術の開発と適用

Spatter less welding technology with high power solid state laser and its application

久場一樹\*, 上野彰大\*\*

\*三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 駆動制御システム技術部  
(〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1)

\*\*多田電機 (株) 応用機工場 第二製造部 溶接機技術課 開発グループ  
(〒661-0001 尼崎市塚口本町 8-1-1 三菱電機 (株) 伊丹製作所内)

Kazuki KUBA\*, Akihiro UENO\*\*

\* Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R&D Center, Drive & Control Systems Department  
(8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan)

E-mail: [Kuba.Kazuki@dy.MitsubishiElectric.co.jp](mailto:Kuba.Kazuki@dy.MitsubishiElectric.co.jp)

\*\* Tada Electric Corporation, LTD. Industrial Apparatus Works, Welding Machine and Heating Apparatus Department, System  
Engineering Section

(8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-0001, Japan)

E-mail: [Ueno.Akihiro@TadaElectric.co.jp](mailto:Ueno.Akihiro@TadaElectric.co.jp)

高出力固体レーザー/ファイバレーザーを用いたレーザー溶接において、スパッタの発生とこれに伴う溶接品質の低下が大きな課題となっている。今回、ファイバ出口の加工光学系で、独自のレーザー集光強度分布を生成し、溶接点のキーホールと熔融池形状を制御・安定化させ、スパッタを劇的に抑制する技術を開発した。レーザー集光強度分布は、キーホール形成する強いレーザー光の周辺に、開口部を緩やかに広げる弱いレーザー光を有するもので、キーホール開口部を安定化させることで、10 kWの高出力においても、スパッタ発生量を95%以上削減することに成功した。スパッタ抑制に速度上限はなく、溶接速度は2倍以上に改善した。

In the field of high power solid-state/fiber laser welding, the spatter generation and the accompanying degradation of welding quality are large problems. We developed a unique laser focusing intensity distribution by using a processing optical system at the fiber exit port, which control and stabilize the shape of the keyhole and molten pool at the welding point and dramatically suppress the spatter generation. The focused laser beam intensity distribution has a strong main laser beam forming a keyhole and weak laser beam gently spreading the keyhole aperture. By stabilizing the keyhole aperture, we succeeded in reducing spatter generation by more than 95%, even at high output of 10 kW. There was no limitation of the welding speed for spatter-suppressing, and the welding speed was improved more than twice.

**Key words:** solid-state laser, fiber laser, welding, spatter, keyhole, molten pool, spatter-suppressing, 10 kW



Always Creating TADA

溶接品質と生産性の向上に貢献

## 高出力固体レーザー溶接における スパッタ抑制技術の開発と適用

2018年12月10日

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 駆動制御システム技術部  
久場一樹

多田電機株式会社 応用機工場 第二製造部 溶接機技術課  
上野彰大

三菱電機株式会社 多田電機株式会社

© Mitsubishi Electric Corporation



共同開発の役割

Always Creating TADA

三菱電機株式会社	レーザー溶接技術 レーザー溶接向け光学技術の研究開発
多田電機株式会社	レーザー溶接機の開発 レーザー溶接試験・評価

2



今回の開発成果

Always Creating TADA

スパッタがほとんどでないファイバ・固体レーザー溶接技術を  
多田電機と共同で開発

- 熔融金属の飛散量を95%以上削減 ⇒ 溶接品質を向上
- 溶接の標準速度を2倍に高速化 ⇒ 生産性を向上

従来技術



溶接部 →



溶接痕 (ヒート)

© Mitsubishi Electric Corporation 3



今回の開発成果

Always Creating TADA

スパッタがほとんどでないファイバ・固体レーザー溶接技術を  
多田電機と共同で開発

- 熔融金属の飛散量を95%以上削減 ⇒ 溶接品質を向上
- 溶接の標準速度を2倍に高速化 ⇒ 生産性を向上

開発技術



溶接部 →



溶接痕 (ヒート)

© Mitsubishi Electric Corporation 4



Always Creating TADA

## 開発の背景

© Mitsubishi Electric Corporation 5



レーザー溶接市場

Always Creating TADA

— ファイバレーザー溶接の規模が拡大 —



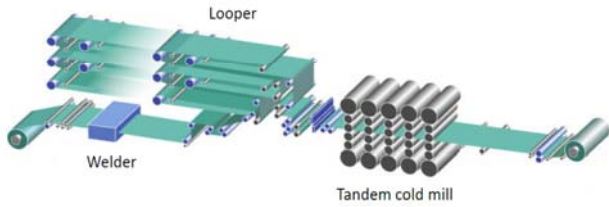
© Mitsubishi Electric Corporation 6



圧延ラインとレーザー溶接機



- Tandem Cold Mill (TCM) and Pickling and Tandem Cold Mill (PL-TCM) -

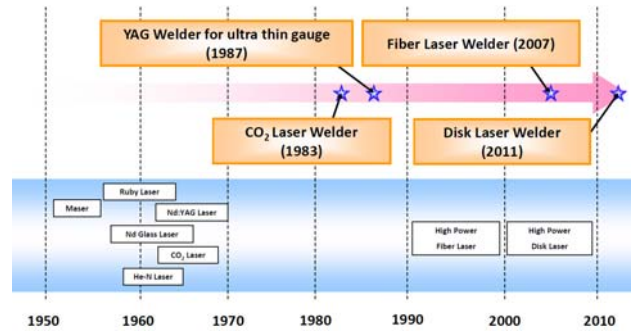


7

© Mitsubishi Electric Corporation



鉄鋼プロセスライン用レーザー溶接機の変遷

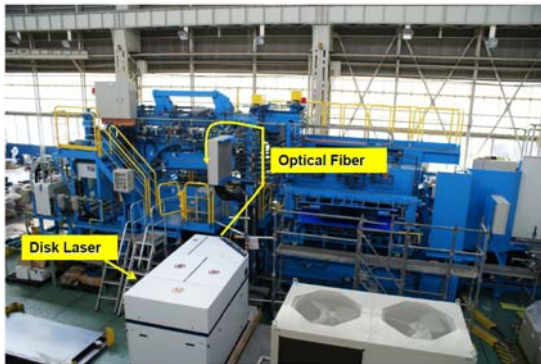


8

© Mitsubishi Electric Corporation



鉄鋼プロセスライン用レーザー溶接機



9

© Mitsubishi Electric Corporation



CO<sub>2</sub>レーザー溶接とファイバ・固体レーザー溶接



- 波長の違いによって、ファイバ・固体レーザー溶接時には、スパッタ（溶融金属の飛散）が大幅に増加

CO<sub>2</sub>レーザー溶接  
波長 10.6μm

ファイバ・固体レーザー溶接  
波長 1.07μm



10

© Mitsubishi Electric Corporation



開発成果の説明

11

© Mitsubishi Electric Corporation



ファイバ・固体レーザー溶接の課題



- 溶接品質と生産性向上のネックとなるスパッタ（溶融金属の飛散）の発生



溶接部 →



溶接痕 (ビード)

12

© Mitsubishi Electric Corporation

### スパッタの影響

- 溶接品質の低下
  - ・接合部表面の肉厚が減少し、接合強度が低下
- 製品不良
  - ・スパッタが材料表面に付着し、製品不良が発生
- 生産性の低下
  - ・スパッタの発生を抑制するため、溶接速度を遅く設定

接合部の断面比較

溶接痕の外観比較

13 © Mitsubishi Electric Corporation

### 開発のポイント (1)

- 強いレーザー光の周囲に弱いレーザー光を同時に発生
- 溶接速度にかかわらず、熔融金属の飛散を抑制

従来技術

開発技術

開発

レーザー光の集光強度分布の比較

14 © Mitsubishi Electric Corporation

### スパッタ抑制メカニズム

- 弱いレーザー光により、キーホール開口部を押し広げ、スパッタの推進力となる、上昇する熔融金属流を緩和

従来技術

開発技術

※キーホール：レーザー光による金属の瞬時溶融・蒸発によって発生する穿孔

15 © Mitsubishi Electric Corporation

### 高速度カメラによる溶接現象観察

- 強いレーザー光の周囲に弱いレーザー光を発生させ、深い溶け込み孔の周囲に浅い溶融領域を形成し、スパッタの発生を効果的に抑制

従来技術

開発技術

深い溶け込み孔 (キーホール)      浅い溶融領域

16 © Mitsubishi Electric Corporation

### 開発のポイント (2)

- ビーム伝送用光ファイバから出るレーザー光を集光し、溶接材料へ照射するビーム集光光学系に独自の工夫
- 汎用レンズの組合せで、スパッタを抑制するビーム強度分布を実現

ファイバ・固体レーザー溶接機の構成

17 © Mitsubishi Electric Corporation

### 従来技術と開発技術の比較

従来技術

溶接痕(ビード)

開発技術

溶接痕(ビード)

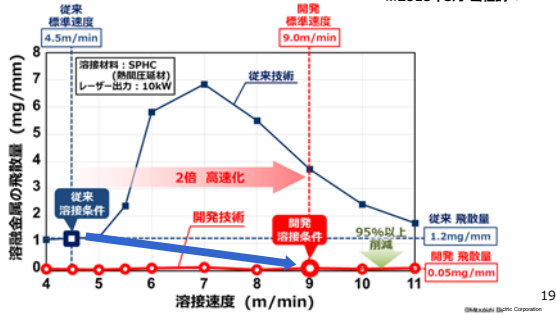
18 © Mitsubishi Electric Corporation

開発技術の効果 (1)

従来のファイバレーザ溶接に対し、

- 熔融金属の飛散量を95%以上削減
- 溶接の標準速度を2倍に高速化
- 世界最大レーザ出力※10kWで効果を実証

※2018年5月 当社調べ



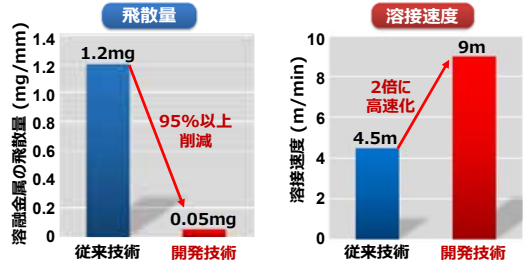
19

開発技術の効果 (1)

従来のファイバレーザ溶接に対し、

- 熔融金属の飛散量を95%以上削減
- 溶接の標準速度を2倍に高速化
- 世界最大レーザ出力※10kWで効果を実証

※2018年5月 当社調べ

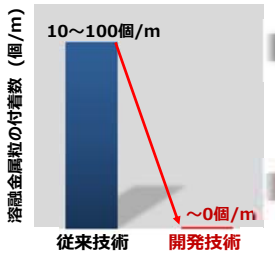


20

開発技術の効果 (2)

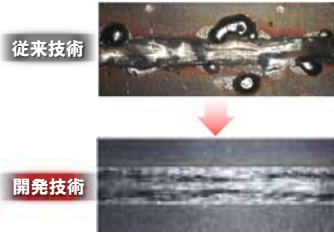
溶融金属粒の付着抑制

- 溶接する製品の品質・歩留向上
- 後工程 (付着物除去) の削減



● 溶接材料: 4.5mm厚-SPHC (熱間圧延材)  
● レーザ出力: 10kW

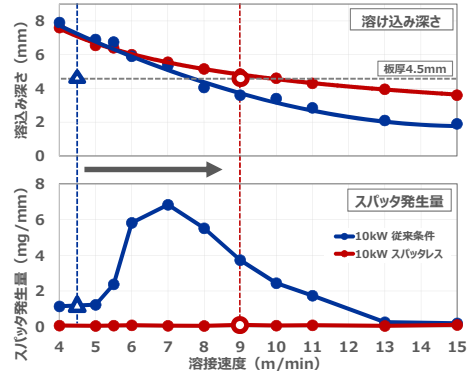
溶接痕(ビード)



21

溶込み深さ・スパッタ発生量の速度依存性

● スパッタレスビームは、従来条件より深い溶け込み性能を示す。



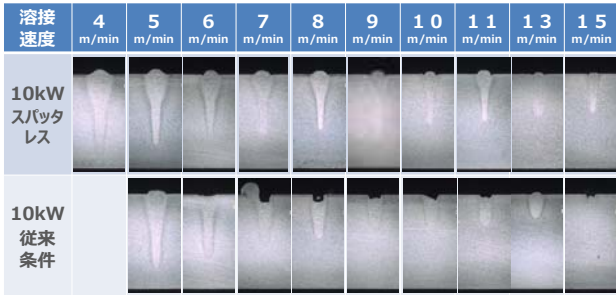
24

溶接性能とスパッタ抑制効果

23

MITSUBISHI ELECTRIC Changes for the Better Always Creating TADA  
**ビード断面の速度依存性**

- 従来条件 : スパッタが強くなる 6m/min 以上で、ビードに深い窪みが発生
- スパッタレス : 全速度域で、窪みのない滑らかなビードを形成

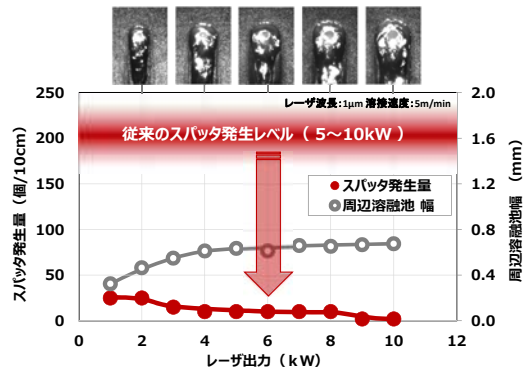


レーザー : 出力10kW 波長 : 1μm 溶接材料 : SPHC t9mm

25

MITSUBISHI ELECTRIC Changes for the Better Always Creating TADA  
**スパッタ発生量のレーザー出力依存性**

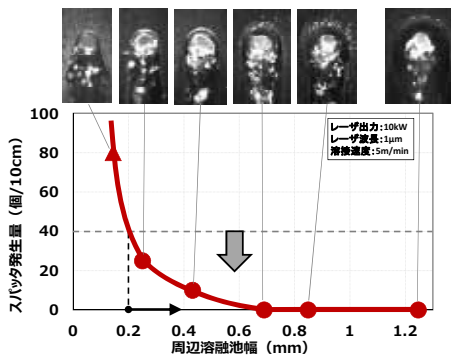
- 開発した技術は、1~10kWの広い出力範囲でスパッタを抑制する。



26

MITSUBISHI ELECTRIC Changes for the Better Always Creating TADA  
**スパッタ発生量の周辺溶融池幅依存性**

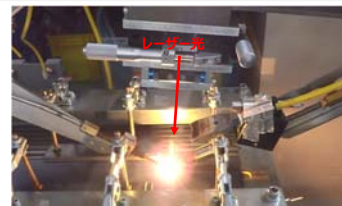
- 周辺溶融池幅が0.2mm以上で、スパッタ抑制効果が現れる。



27

MITSUBISHI ELECTRIC Changes for the Better Always Creating TADA  
**まとめと今後の展開**

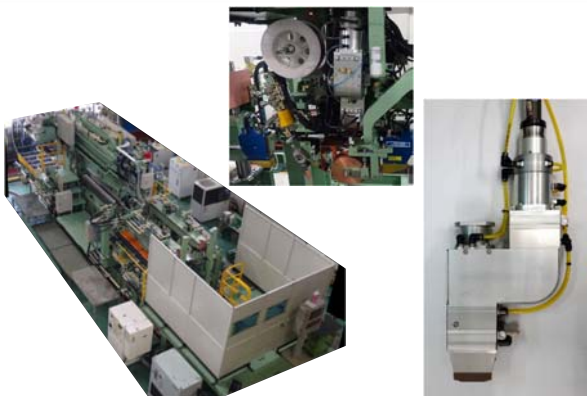
- ファイバレーザー溶接において
- 溶融金属の飛散量を95%以上削減  
⇒ 溶接品質を向上
  - 溶接の標準速度を2倍に高速化  
⇒ 生産性を向上



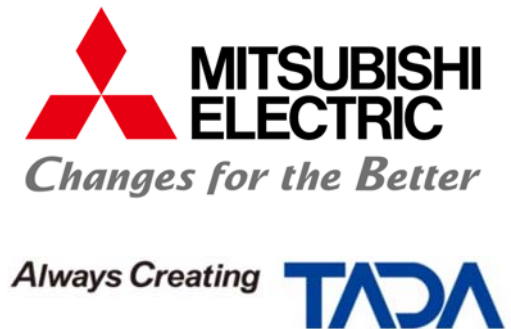
- 2019年度 製品化予定

28

MITSUBISHI ELECTRIC Changes for the Better Always Creating TADA  
**レーザー溶接機とスパッタレス加工ヘッド**



29



# レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた荷重非伝達 HT780 鋼 T 継手疲労強度の支配因子と施工管理

Dominant factor of HT780 non-load carry T joint fatigue strength  
using laser arc hybrid welding and quality control

猪瀬幸太郎\*, 神林順子\*, 阿部大輔\*, 松本直幸\*, 野々村将一\*

\*株式会社 IHI

(〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1)

Koutarou INOSE\*, Junko KANBAYASHI\*, Daisuke ABE, Naoyuki MATSUMOTO, Shoichi NONOMURA

\*IHI Corporation

(1ShinNakahara-Cho, Isogo, Yokohama, Kanagawa 235 -8501, Japan)

E-mail: [koutarou\\_inose@ihi.co.jp](mailto:koutarou_inose@ihi.co.jp)

レーザー・アークハイブリッド溶接を用い HT780 鋼の荷重非伝達型 T 継手を製作し、疲労強度の検証とその支配因子の検証を行った。施工条件を変えた 5 ケースの施工条件において荷重非伝達型 T 継手を製作し、疲労強度を検証した。フランク角が小さい溶接金属では止端半径が大きく成形される。フランク角と止端半径が疲労強度に及ぼす影響は大きく、前者が小さく、後者が大きくなるほど疲労強度は向上する。溶接材料の体積の比（入熱・ワイヤ送給比とする）を大きくすると溶接金属のフランク角は小さく、止端半径は大きくなる。今回製作した継手のなかには疲労強度 D 等級と同等以上と評価できる継手もある。すべての継手は少なくとも疲労強度 E 等級と同等以上であった。継手のフランク角の最大値は  $47^\circ$ 、止端半径の最小値は 1.3mm である。疲労強度保証のための施工管理の指標として用いる事ができる。

The study intended for clarify that dominant factors of fatigue strength of T joint which welded by laser arc hybrid welding. Fatigue test has been conducted using 5 types of T joints fabricated under different welding conditions respectively. Dominant factors for fatigue strength of T joint are Frank angle and radius at toe of T joint fillet. The fatigue strength is increasing inverse proportional to Frank angle and proportional to radius at toe. Heat-filler feeding ratio affects Frank angle and radius at toe. The former would be decreased and later should be increased by heat-filler feeding ratio increasing. In the study, fatigue strength of the one type of joint shall be recognized as JSSC fatigue strength class D. All types of joint in the study can be deal as at least JSSC fatigue strength class E. Frank angle of these joints are smaller than 47 degree and radius of toe are larger than 1.3mm. These quantitative results of the study are very useful for quality control of practical fabrication. That secures the fatigue strength of Non-load carry T joint welded by laser arc hybrid welding.

**Key words:** Laser Arc Hybrid Welding, T Joint, Fatigue Strength, Heat Filler Feeding Ratio, Frank angle, Curvature at Toe of Weld

## 1. 緒 言

これまで大型鋼構造物は用いる鋼材の高強度化とそれを活かす接合技術の発展によって構造物としての機能を高めてきた<sup>(1),(2)</sup>。現在においても高強度鋼材を用いる事への期待は大きく、その有効性を示す様々な検討が報告されている<sup>(3)</sup>。一方、高強度鋼を効果的に用いるには課題もあり、特に溶接継手強度の確保とその合理的評価の必要性が指摘されている。例えば構造物の耐久性能において重要となる溶接継

手の疲労設計であるが、日本鋼構造協会による鋼構造物の疲労設計指針・同解説（以下、JSSC 疲労設計指針とする）では溶接継手の疲労強度等級は母材の強度区分に関係なく規定されている<sup>(4)</sup>。このため強度区分に関係なく動的荷重によって変動する応力範囲が制限され、軽量化や長大化といった高強度鋼材の適用効果が十分に達成できない場合がある<sup>(5)</sup>。また 800MPa 級鋼を用いた構造物の建設実績が現在ほど無い頃の設計規準のなかには疲労設計曲線を用いるのではなく、応力範囲を頻度に関係なく一律に制

限する許容応力度設計もある。そこでは高強度鋼の溶接継手の許容応力範囲がより強度区分の低い鋼材より低く抑えられている<sup>(6)</sup>。このように高強度鋼の性能を十分に活用するにはまず継手の疲労強度改善が重要であるが、それを合理的に評価した設計も必要となる。さらに設計上の疲労強度を保証するための施工管理の整備も求められる。

筆者らは高強度鋼材に用いる溶接プロセスとしてレーザ・アークハイブリッド溶接に着目した。レーザ・アークハイブリッド溶接はアーク溶接と比較すると入熱が低いため、溶接変形、残留応力といった溶接施工の影響を低減し、継手性能を改善する事が期待できる。またアーク電流の他にレーザ光を独立した熱源として併用するため溶接熱源の制御における設定自由度も高い<sup>(7)</sup>。実構造物への使用実績もあり、その時実施した施工試験では少なくともアーク溶接継手と同等以上の疲労強度を有する事が報告されている<sup>(8)</sup>。ただし実工事としては施工対象に限られていたため母材は 500MPa 級鋼材であり、継手も施工部位の板厚に対応した特定の条件範囲に限られている。

そこで本研究ではレーザ・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 鋼の溶接継手の疲労強度を検討する。継手形式は構造物の継手に占める割合の大きい荷重非伝達型 T 継手である。この継手において疲労き裂は溶接金属の止端から発生し母材を進展する。JSSC 疲労設計指針はアーク溶接継手を前提としているが、そこでは溶接ままの継手を疲労強度 E 等級に分類している。レーザ・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 鋼の継手も同じ E 等級として扱いその疲労設計曲線を用いて設計出来れば前述した許容応力による設計より有効に高強度鋼を使う事ができる。一方、アーク溶接を用いた荷重非伝達 T 継手の



Fig.1 Overview of laser arc hybrid welding for fatigue test specimen

疲労強度を改善するには止端を仕上げる必要があり、この場合継手は疲労強度 D 等級となる。レーザ・アークハイブリッド溶接の溶接条件を適正化する事で、溶接ままの継手の疲労強度を D 等級相当まで改善できれば高強度鋼を用いる構造物の合理化にさらに貢献できる。

本研究ではまず HT780 鋼を対象に溶接条件、溶接材料を変えて荷重非伝達型 T 継手を製作し、それぞれの継手性状を検証する。また溶接条件が継手性状および疲労強度に与える影響を明らかにし、溶接条件の適正化によって疲労強度が向上する事を示す。併せて必要となる施工管理方法も検討する。

## 2. 施工実験

### 2.1 実験方法および実験供試体

レーザ・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 鋼の荷重非伝達型 T 継手の施工状況を Fig.1 に示す。レーザ光源はファイバレーザであり、アークトーチと一体化した T 継手施工専用の溶接トーチを用いている。溶接施工要領と疲労試験片の採取位置を Fig.2 に示す。全長 450mm、全幅 400mm のスキンプレートにリブを溶接し、この部材 1 枚毎に幅 80mm の試験片を 4 本採取して疲労試験に供している。母材と施工に用いた溶接ワイヤの化学成分を Table 1, Table 2 に示す。すべての試験において母材は同じとしたが溶接ワイヤは強度区分の異なる 3 種類を用いている。施工条件は Table 3 に示すように溶接ワイヤとレーザ出力、アーク電流などの溶接条件を変えた 5 ケースを実施した。一方トーチ角度、狙い位置

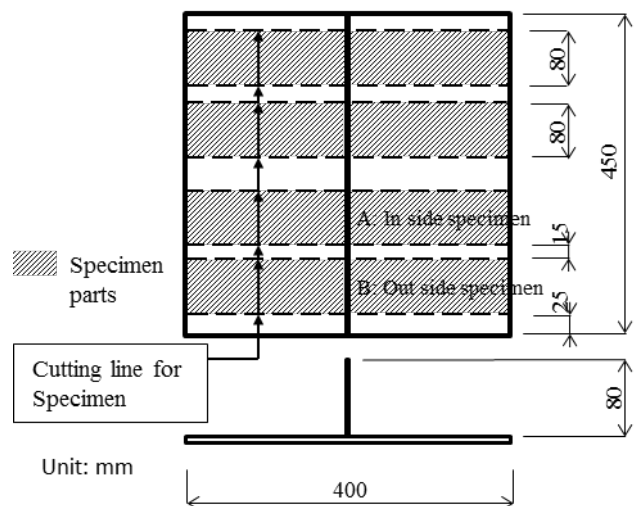


Fig.2 Fatigue test specimens cutting from Laser arc welded panel

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

	Chemical compositions						Tensile test		Remarks
	C	Si	Mn	P	S	Others	Y.P	T.S	
	[%]						[N/mm <sup>2</sup> ]		
Base metal	0.09	0.21	0.95	0.006	0.002	Cu-Ni-Cr-Mo-Nb-B	813	825	HT780

などの基本的な機器の構成条件はすべての施工において同じとした。

### 2.2 継手性状

Fig.3 に継手マクロ写真の一例を示す。荷重非伝達 T 継手ではあるが、リブの接合部には未溶着がなく、完全溶込みに相当する継手が施工されている。本研究では溶接金属の形成状態を示す指標として止端半径 (R<sub>t</sub>) とフランク角 (θ) に着目した。同図にその定義を示す。Fig.4 に本研究において疲労試験に供した継手の止端半径とフランク角を示す。これらは

Table 2 Chemical compositions of welding wire

	Chemical compositions						Tensile test	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Y.P	T.S
	[%]						[N/mm <sup>2</sup> ]	
a	0.05	0.65	1.14	0.013	0.017	0.25	404	496
b	0.10	0.72	1.36	0.010	0.012	0.24	480	568
c	0.06	0.47	1.61	0.006	0.003	0.19	717	869

Table 3 Welding condition

Welding procedure	Welding wire	Laser Power [kW]	Arc current	Heat input [J/mm]
Case 1	a	6.0	80	558
Case 2	b	6.7	160	917
Case 3	b	6.0	80	558
Case 4	c	6.0	80	558
Case 5	c	6.0	113	632

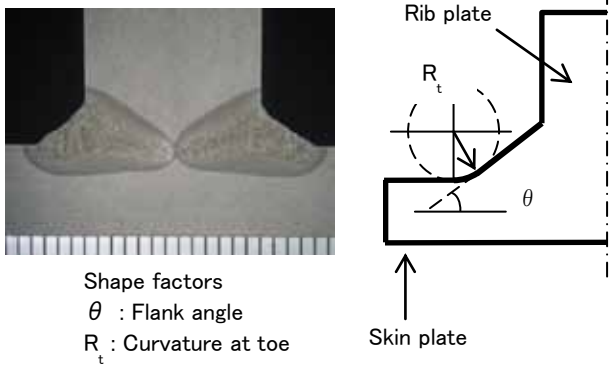


Fig.3 Macrograph of Laser arc welded joint and shape factor

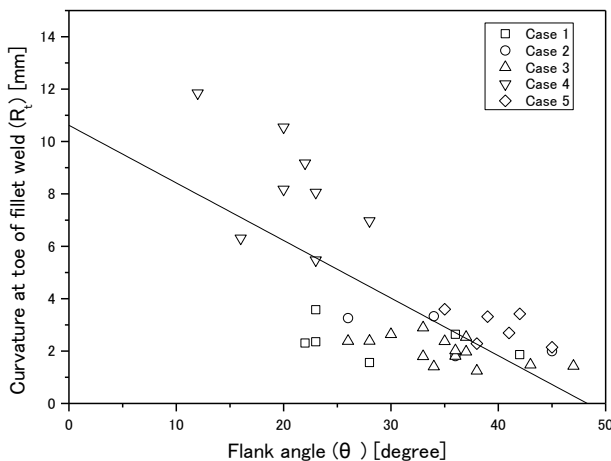


Fig.4 Correlation of Flank angle and curvature at toe

トーチ角度や狙い位置によって変化するが、それらが同一であっても溶接条件や溶接ワイヤによって変化する事が分かる。傾向としてはフランク角が小さくなると止端半径が大きい。フランク角が最も大きい継手の止端半径は他と比較して最も小さい事を確認した。

### 3. 疲労試験

#### 3.1 疲労試験および評価方法

疲労試験要領を Fig.5 に示す。疲労試験の荷重条件は 4 点曲げであり、疲労き裂発生を監視、公称応力範囲の管理それぞれのための歪ゲージを貼付する。き裂の発生状況を監視するのは溶接止端から 5mm 位置のゲージであり、本研究ではひずみ範囲が初期値より 15%減少した時点疲労寿命の評価指標の一つとして扱う。また本研究では荷重載荷点の変位が初期値より 1.5mm 増加した時点で試験を停止するがこれも疲労寿命の評価指標とする。後者の方が疲労寿命を長く評価するが疲労設計曲線のような対数軸を用いた作画では極端な差異は生じない。Fig.6 に試験完了時、すなわち荷重載荷点変位が 1.5mm 増加し

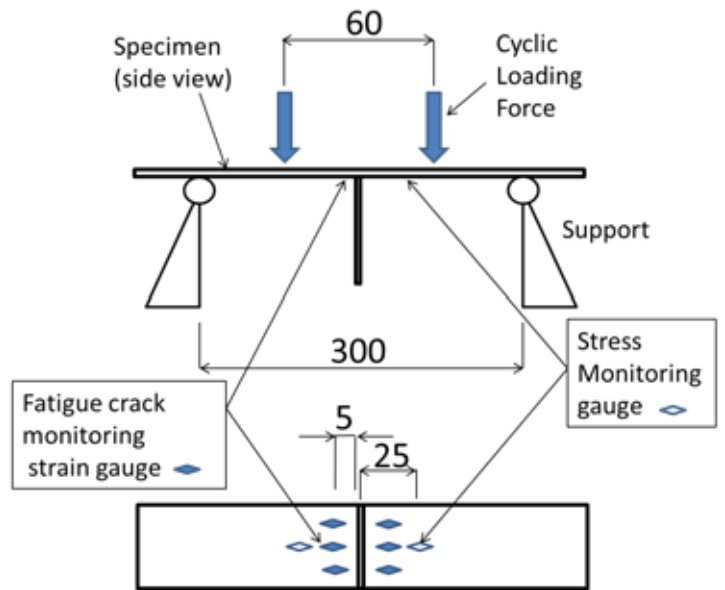


Fig.5 four points bending fatigue test method of Laser arc hybrid fillet welded joint

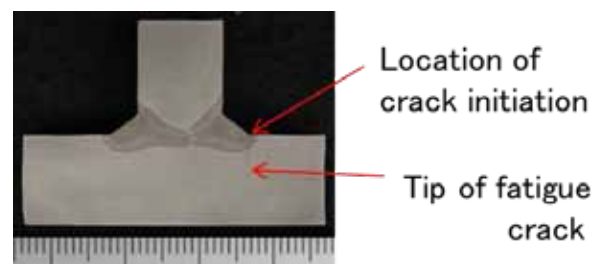


Fig.6 Location of crack initiation and crack propagation

た時点のき裂深さを例示する。止端から発生した疲労き裂の進展量は母材板厚の半分程度あり、この状態までを疲労寿命としても寿命を過大に評価するものではない。ただし本研究ではより厳しい評価指標である溶接止端から 5mm 離れた位置の変動ひずみ範囲が 15% 減じた時点点を疲労寿命とした。

疲労試験における荷重は試験片中心から 25mm 離れた位置にあるひずみゲージから得る公称応力によって管理する。ここでは外力による応力比が 0.1 となるように荷重を設定した。溶接止端部は引張側の変動応力状態となるため、疲労試験では残留応力の大きさに関係なく継手の疲労強度を安全側に評価できる。

### 3.2 疲労強度の支配因子とその影響

同一溶接条件毎の継手の疲労強度を評価する指標として、荷重を 200 万回载荷したときに継手が疲労破壊する応力範囲、すなわち 200 万回疲労強度を用いる。Fig.7 にその定義方法を例示する。応力範囲を変えて得た平均 SN 曲線より 200 万回で破断するときの応力範囲を求める。ここに示すケース 4 の場合、

200 万回疲労強度は 216MPa を得る。Fig.8 に溶接入熱と継手の 200 万回疲労強度との関係を示す。入熱が低いと疲労強度は高い。ただし同図に示すように同じ入熱量であっても差が生じる事も見て取れる。溶接継手においては形状不連続に起因する応力集中の疲労強度への影響が大きく、その低減にはフランク角が小さく、止端半径が大きい事が望ましい。Fig.9 にフランク角と 200 万回疲労強度との関係を示す。フランク角が小さいと疲労強度が高い傾向が認められる。

疲労強度への影響が高いと考えられる因子について多変量解析を実施した。前述したように止端半径とフランク角は独立ではないため、ここでは止端形状の指標としては止端半径のみを用いている。Fig.10 に解析で得た回帰式による 200 万回疲労強度と、実験値のそれとの比較を示す。両者はよく一致している事が見て取れる。

以上から、疲労強度への影響因子としては止端半径（これと相関するフランク角も含む）と、アーク入熱比が支配的である事、これらを管理する事により設計要求に応じた疲労強度は確保できると言える。

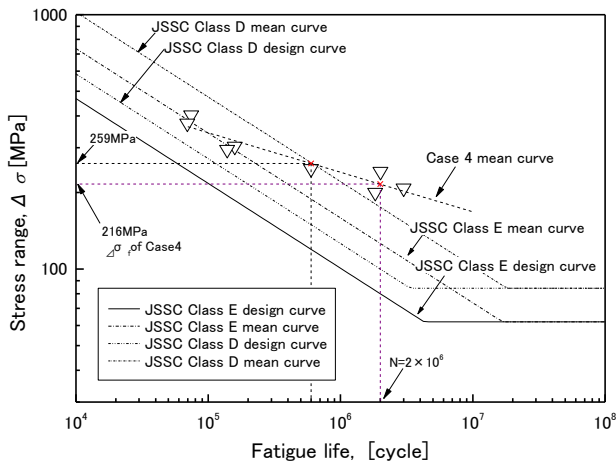


Fig.7 Definition of fatigue strength at  $2 \times 10^6$  point

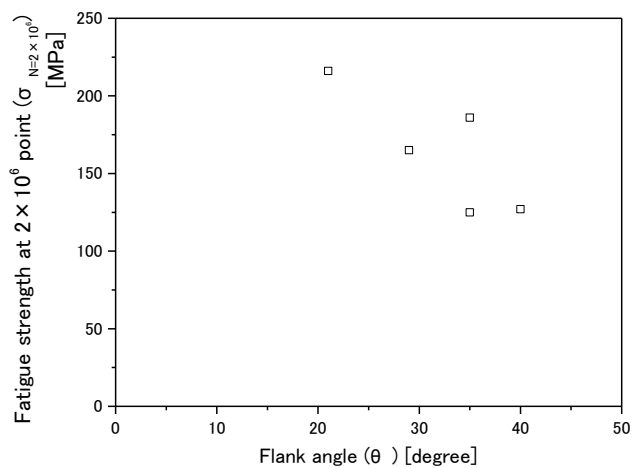


Fig.9 Effect of Flank angle for fatigue Strength at  $2 \times 10^6$  point

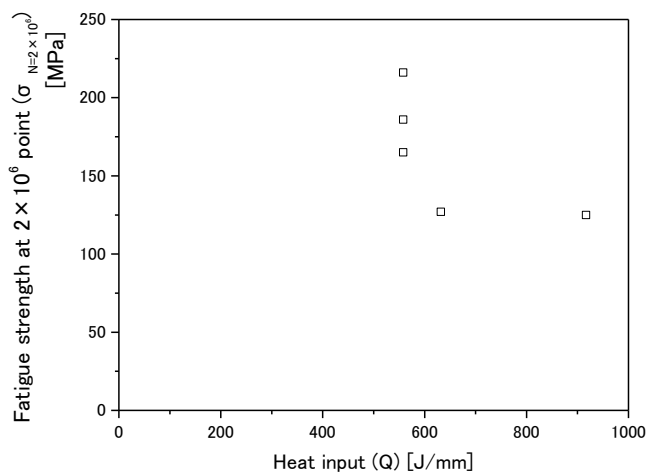


Fig.8 Effect of heat input for fatigue strength at  $2 \times 10^6$  point

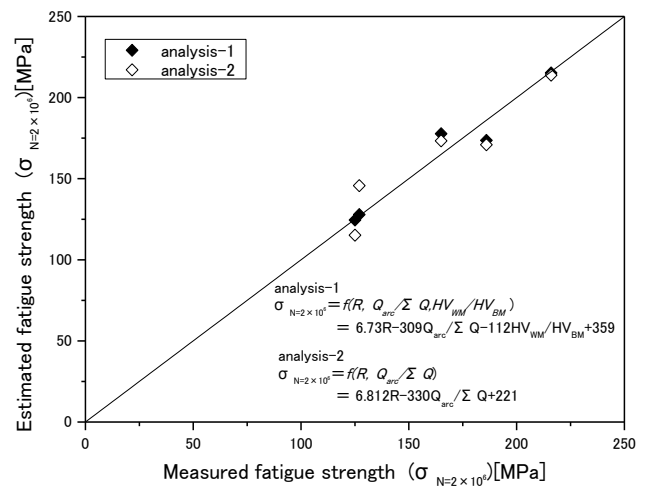


Fig.10 Comparison of measured fatigue strength and estimated one

4. 止端形状の成形方法

Fig.11 に入熱量がすみ肉溶接金属のフランク角 ( $\theta$ ) に及ぼす影響を示す。ここでは指標として入熱量と単位溶接長さには供給される溶接材料の体積の比 (入熱・ワイヤ送給比とする) を用いて示す。傾向として溶着金属量に対して十分な熱量を与えるとフランク角が小さくなる事が見て取れるが、これは文献[9]の結果と併せるとより顕著と言える。ワイヤ送給量を保持したまま、入熱量を増やした場合、余盛りが形成されにくくなるためと推察される。アーク溶接の場合、適正なアーク電流値が溶接ワイヤの送給量と連動しているのに対し、レーザー・アークハイブリッド溶接では独立したレーザーを熱源として併用するため入熱・ワイヤ送給比の設定自由度が高い。以上のことはレーザー・アークハイブリッド溶接ではフランク角、止端半径の形状制御がアーク溶接よりも容易である事、ワイヤ送給量と連動するアーク入熱を相対的に小さくすることで、フランク角は小さく、止端半径は大きく溶接金属を成形できる事を示している。

継手強度の観点では、アーク溶接では T 継手の強度はのど厚によって確保されており、フランク角が小さくなることで静的強度は低下する。これに対して完全溶込継手相当まで溶込みを確保したレーザー・アークハイブリッド溶接では溶け込みが深く、のど厚の減少による強度への影響は少ない。文献[8]では試験結果として脚長と溶込み量を管理したレーザー・アークハイブリッド溶接による T 継手ではのど厚がアーク溶接の 1/3 のであっても継手強度は完全溶込み溶接相当となる事が報告されている。

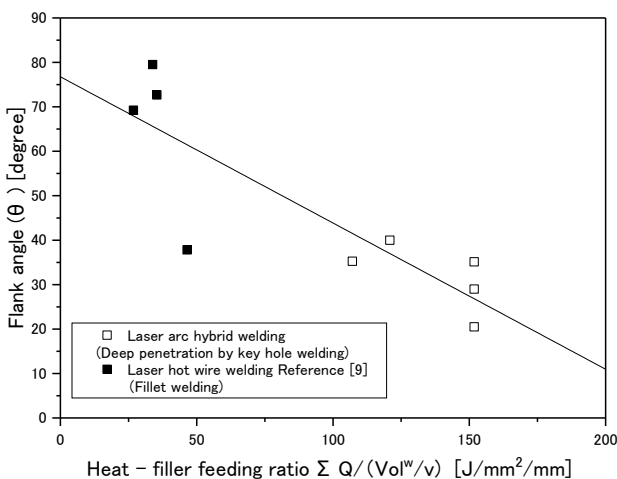


Fig.11 Effect of Heat-filler feeding ratio and Frank angle

5. HT780 鋼荷重非伝達型 T 継手疲労強度と施工管理

本研究において得た全 38 体の疲労試験結果を Fig.12 に示す。JSSC 疲労設計指針では止端仕上げをしていない荷重非伝達 T 継手は疲労強度 E 等級とされている。一方、施工ケース 4 の継手では、疲労試験結果の平均曲線は応力範囲  $\Delta\sigma = 250\text{MPa}$  以下の領域において、疲労強度 D 等級の平均曲線を上回る。よって実用的な応力範囲と言える  $\Delta\sigma = 250\text{MPa}$  以下ではその疲労強度を少なくとも疲労強度 D 等級として扱う事ができる。また本継手は、応力範囲  $\Delta\sigma = 250\text{MPa}$  以上の疲労試験も含め、供試体 8 体すべてが疲労強度 D 等級設計曲線を満たしている。これらの実験事実により施工ケース 4 の継手は高い確度で疲労強度 D 等級であると判断できる。文献[10]では、疲労強度 D 等級の継手の止端仕上げは止端半径 3mm 以上と定められている。施工ケース 4 の継手の止端半径は平均値 ( $R_{t,ave}$ ) が 8.3mm, 最小値 ( $R_{t,min}$ ) は 5.5mm であり、この基準を満たしている。一方、フランク角であるが、平均値 ( $D_{ave}$ ) は  $21^\circ$ , 最大値 ( $D_{max}$ ) は  $28^\circ$  であった。

同図より、施工ケース 4 と比較するとその他の継手の疲労強度は低い事が分かる。ただし、すべての疲労試験結果は疲労強度 D 等級設計曲線より高く、それぞれの平均値は疲労強度 E 等級の平均曲線を満たしている。従ってここに示す継手の疲労強度は少なくとも疲労強度 E 等級と同等以上であると言える。図示した継手のフランク角の最大値 ( $D_{max}$ ) は  $47^\circ$  であり、止端半径の最小値 ( $R_{t,min}$ ) は 1.3mm であった。これらは今回試験した応力範囲において疲労強度 E 等級を保証するための施工管理値として用いる事ができる。また施工ケース 4 を除くとフランク角平均値 ( $D_{ave}$ ) は  $35^\circ$ , 止端半径 ( $R_{t,ave}$ ) のそれは 2.4mm である。これらの値も施工を行う上での目安となる。

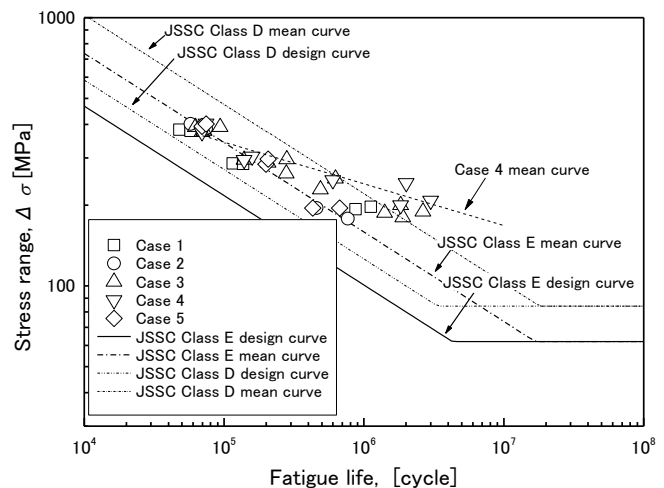


Fig.12 Fatigue Strength of laser arc hybrid welded fillet joint

## 6. 結 言

レーザー・アークハイブリッド溶接を用いて HT780 鋼の荷重非伝達型 T 継手を製作し、疲労強度の支配因子と施工管理について検証した。本研究において得た知見の範囲ではあるが、その結果を以下に総括する。

- ・レーザー・アークハイブリッド溶接を用い HT780 鋼の荷重非伝達型 T 継手を製作し、疲労強度の検証とその支配因子の検証を行った。
- ・レーザー出力、アーク電流、溶接材料を変えた 5 ケースの施工条件において継手を製作した。またフランク角が小さくなると、止端半径は大きく成形されることを確認した。
- ・200 万回疲労強度を評価指標として用い、疲労強度の支配因子を検討した。レーザー・アークハイブリッド溶接においてもフランク角と止端半径が荷重非伝達型 T 継手の疲労強度に及ぼす影響は大きい。前者が小さく、後者が大きくなるほど疲労強度は向上する。また、総入熱に対するアーク溶接入熱比も疲労強度への影響を及ぼす。
- ・T 継手を製作する溶接施工において、トーチ角度やねらい位置が同一であっても入熱量と単位溶接長さには供給される溶接材料の体積の比（入熱・ワイヤ送給比とする）を大きくすると溶接金属のフランク角を小さく、止端半径を大きく制御する事ができる。
- ・今回製作した継手のなかには荷重非伝達型 T 継手として疲労強度が D 等級と同等と評価できる継手もあった（施工ケース 4）。
- ・5 種類の継手からなる 38 の供試体の疲労強度は  $\Delta\sigma \leq 400\text{MPa}$  の範囲では D 等級設計曲線より高く、それぞれの平均値は疲労強度 E 等級の平均曲線を満たしている。
- ・フランク角と止端半径はレーザー・アークハイブリッド溶接を用いた荷重非伝達型 T 継手においても疲労強度保証のための施工管理指標として用いる事ができる。

## 謝辞

本研究には、PJ 研究：鉄鋼材料の革新高強度・高機能化基盤研究開発研究体（JRCM：（財）金属系材料研究開発センター）の成果の一部が含まれる。記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- (1) KIJ I Noboru, Development of welding technology for ship building using high strength steel, national meeting workshop of J.W.S, pp25-47, (2013)
- (2) INOSE Koutarou, Development of welding technology for bridge construction using high strength steel, national meeting workshop of J.W.S, pp49-57, (2013)
- (3) For example, Kansai chapter of JSCE WG, Study on Development of Steel Bridges Effectively Using High Performance Steel, Japan Society Civil Engineers, (1996)
- (4) Japan Society of Steel Construction: Fatigue Design Recommendations for Welded Structures, GIHODO SHUPPAN, pp5-12, (1993)
- (5) For example, INOSE Koutarou, NAKANISHI Yasumasa, IMOTO Izumi : Study on design for Extra High Strength steel structure, Welding in the World Volume47,NO.3/4, (2003)
- (6) NAKANISHI Yasumasa, YAMAOKA Hiroto, INOSE Koutarou, YASUDA Kouichi, SUMI Hiroyuki, Project of Fundamental Technology for Steel Materials with enhanced Strength and Functionality, Development of Laser arch hybrid welding for High strength steel, Welding technology, vol.60, SANPO PUBLICATIONS, INC, pp75-85, (2012)
- (7) INOSE Koutarou, ABE Daisuke, MATSUMOTO Naoyuki, OOWAKI Katsura: Effect of laser arc hybrid welding condition for welded joint properties, Preprint of the national meeting of J. W.S Vol.88, pp18-19, (2011)
- (8) For example, Koutarou INOSE, Katsura OOWAKI, Junko KANBAYASHI and Yasumasa NAKANISHI, Functional assessment of laser arc hybrid welded joint and their application for bridge construction, Welding in the World, Vol.56, No.7/8, pp118-124, (2012)
- (9) INOSE Koutarou, KANBAYASHI Junko, ABE Daisuke, MATSUMOTO Naoyuki: Effect of fillet joint properties welded by laser hot wire welding for fatigue strength, Preprint of the national meeting of J.W.S vol.92, pp158-159, (2013)
- (10) Japan Road Association: Specifications for Highway Bridges, MARUZEN Publishing, pp200-213, (2012)

# 自動車用薄鋼板のレーザ溶接部の水素源調査

Investigation of hydrogen sources dissolved laser weld metal  
of steel sheets in automobile field

巽 雄二郎\*, 徳永 仁寿\*, 宮崎 康信\*, 泰山 正則\*

\*新日鐵住金株式会社  
(〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

Yujiro Tatsumi\*, Masatoshi Tokunaga\*, Yasunobu Miyazaki\*, Masanori Yasuyama\*

\*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation  
(20-1 Shintomi, Futtsu-shi, Chiba 293-8511, Japan)  
E-mail: tatsumi.r9b.yujiro@jp.nssmc.com

自動車車体に対し、レーザ溶接が適用されている。一方、レーザ溶接部の水素については、これまで報告がなかった。そこで薄鋼板のレーザ溶接部の水素に関し、水素源と、溶接後の水素濃度や成形性の時間依存性を調査した。その結果、レーザ溶接金属に溶解する水素量の低減には、溶接中雰囲気湿度を低く、鋼板の防錆油除去が有効であることがわかった。また溶接後の時間経過により、拡散性水素量が低減し、エリクセン成形高さが向上するとわかった。

Laser welding has been applied to automobile bodies. However there have been no reports on hydrogen in laser weld metal. So, we investigated the source of diffusible hydrogen released from weld metal and the time dependence of hydrogen amount and formability of welded blank. As the results;

- 1) In order to reduce the amount of hydrogen dissolved in the laser weld metal, it is effective to lower the humidity of the atmosphere at welding and to remove the rust preventive oil of the steel sheet.
- 2) As time elapses after welding, the amount of diffusible hydrogen reduces and the height of Erichsen forming improves.

**Key words:** Laser welding, Tailor welded blank, Diffusible hydrogen, Formability

## 1. 緒 言

自動車の車体には軽さと高い衝突安全性や、高い剛性など種々の要求がなされる。このため、車体構造、材料、成形、溶接等様々な観点から検討が進められてきた。材料面では鋼自体の強度を高めて板厚を減じたり、アルミニウム、樹脂等の軽量材料に置換したりされる。工法面では、テーラードブランク (TWB: Tailor Welded Blank) や車体組立てにレーザ溶接や接着が活用されている。

テーラードブランクは、強度や板厚の異なるブランクを溶接一体化したプレス成形用の鋼板である。種々の鋼板を適材適所に配置することによる高機能・軽量化や一体化成形によるコスト削減等のメリットを背景に、1980年代後半から活用されている。溶接法には、レーザ溶接、マッシュシーム溶接、プラズマ溶接等が用いられてきた。現在は生産性や溶接部特性（プレス成形性、耐食性）の観点より、レーザ溶接が主に採用される。

車体を組立てる工法には、点接合の抵抗スポット溶接が主として用いられているが、車体の高剛性化による乗り心地・操安性向上を目的として、線接合のレーザ溶接も実施されている。

当学会においても薄鋼板のレーザ溶接部の特性について、硬さや成形性、継手強度に関して多くの報告がされてきた。しかし、水素に関する報告は見られなかった。最近、前田らによる溶接金属に水素が溶解するとの報告<sup>(1)</sup>があり、著者らも水素源の特定に関する報告<sup>(2)</sup>を行った。

本稿では、水素源の特定に関する調査結果を報告し、水素の放出挙動や水素による鋼の脆化について調査した結果を述べる。

## 2. レーザ溶接直後の溶接部拡散性水素量

溶接前の鋼板は後に図 6(a)に示すように、通常拡散性水素(以下単に水素と記す)は検出されない。このため、溶接後に水素が検出されたとすれば、その水

素は溶接により鋼板の防錆油や雰囲気中の水(湿気)より溶接金属中に溶解したと考えられる。そこで、以下の試験を進めた。

### 2.1 供試材料

供試材料は板厚 1.2mm の TS980MPa 級冷延 Dual Phase(DP)鋼板であり、18mm 幅×50mm 長に切断して実験に供した。鋼板表面の防錆油の影響を明確にすべく、先ずアセトン浴で超音波洗浄により脱脂した。その後鋼板を防錆油に浸漬し、24 時間吊り下げて余分な油分を除去した。鋼板に塗布された防錆油量は塗油前後の鋼板質量差より、約 3g/m<sup>2</sup>と求められた。

### 2.2 溶接試験

図 1 に示すように、18mm 幅中央に 50mm 長の溶接ビードを有する試験片を作成した。レーザ溶接にはファイバレーザを用い、鋼板表面において集光径がφ0.6mm となる光学系を使用した。レーザ出力は 3.6kW、溶接速度は 6.0m/min とし、1 枚の鋼板を貫通するメルトランを行った(表 1)。溶接始末端にタブ板を配置し(図 2)、クレータ等のない溶接定常部を評価対象とした。その他前提として、溶接ワイヤは供給しない、シールドガス(Ar 等)は供給しない条件である。

溶接時の湿度管理のために、図 3 に示すチャンバー<sup>(3)</sup>を用いた。チャンバー内を 1/1000atm まで減圧し、絶対湿度を各 3 条件調整した空気を大気圧になるまで封入した。湿度を制御した空気は溶接中も鋼板表面に流し続け、プルーム除去に供した。溶接後 2~3 分室温で放置し、試験片の温度が室温程度まで冷却

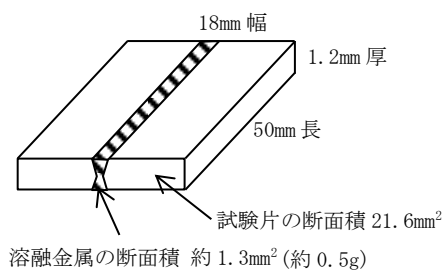


図 1 水素量測定試験片形状

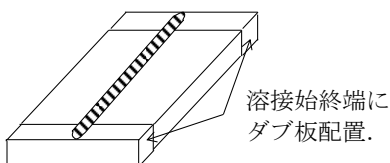


図 2 タブ付き溶接

された後、水素量の測定までの間は水素の拡散を抑制するために試験片を液体窒素に浸漬した。

一般的に湿度といえば相対湿度を指し、空気中のある温度下において、含むことのできる最大の水分量(飽和水蒸気量)を 100%とし、実際に含まれる水分量の割合を示した数値である。一方、絶対湿度は、空気の体積や質量に対する水分量を示した数値である。本試験は冬場に試験を行っており、実験時の絶対湿度は相対湿度 100%でも高々 13g/m<sup>3</sup>である(図 4)。

### 2.3 水素量測定方法

ガスクロマトグラフィーを用いた昇温脱離法で試験片全体(約 8.5g)より放出される水素量を測定した。先に述べたように溶接前の鋼板からは拡散性水素が検出されていないことから、この測定された水素量は全て溶接金属から放出されたと考えた。すなわち、溶接金属の質量(溶接金属部断面積×溶接長 50mm×鉄の密度 7.87g/cm<sup>3</sup>≒0.5g)に対する割合にて、溶接金属の拡散性水素濃度を算出した。測定温度範囲は室温から 200℃までとし、昇温速度は 100℃/hr とした。

### 2.4 水素量測定結果

#### 2.4.1 水素放出カーブ

レーザ溶接部の横断面写真を図 5 に、各絶対湿度における水素放出カーブを図 6 に示す。防錆油の有無に関わらず、溶接金属形状に変化は認められなかった。また、いずれの水素放出カーブにおいても、150℃以下で水素が放出され、拡散性水素と考えられた。溶接前の鋼板からは水素が検出されていないため、水素は溶接部から放出されたと考えられる。

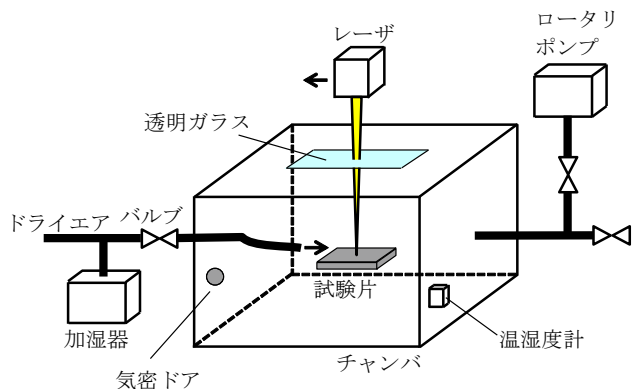


図 3 溶接設備の概念図<sup>(3)</sup>

表 1 レーザ溶接条件

発振器	ファイバレーザ	レーザ出力	3.6kW
集光径	φ0.6mm	溶接速度	6.0m/min
形態	メルトラン	溶け込み深さ	1.2mm 厚貫通

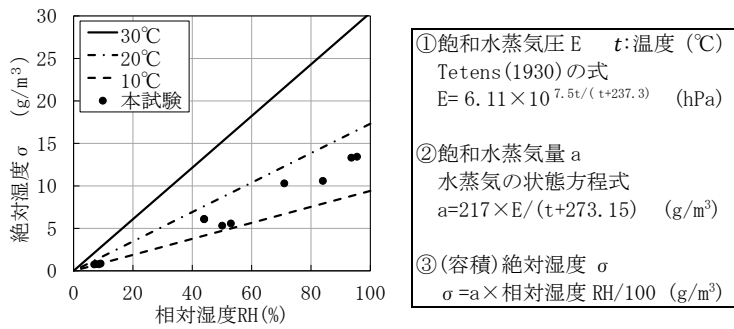


図 4 本試験での絶対湿度範囲 0.8~13g/m³ (冬場 9.5~17°C)

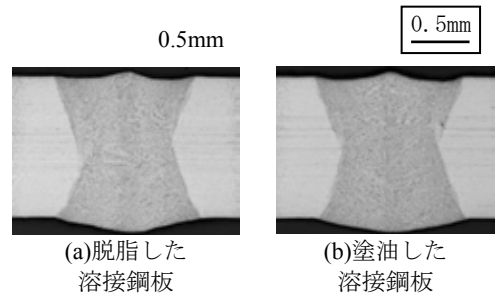


図 5 溶接金属形状

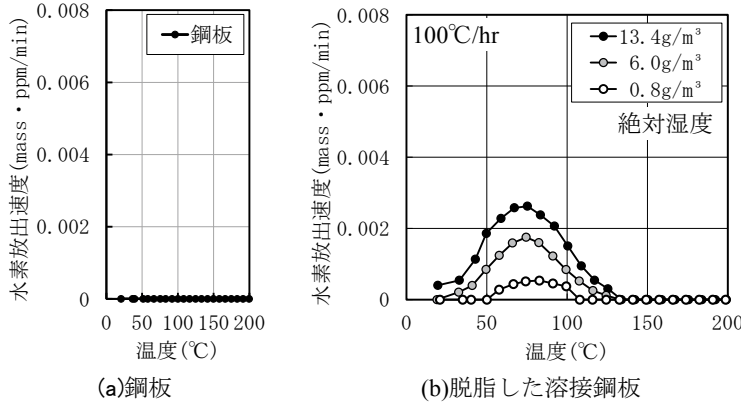


図 6 水素放出カーブ(試験片約 8.5g に対する濃度)

2.4.2 水素量の実験条件依存性

溶接金属の水素濃度に及ぼす防錆油および絶対湿度の影響を図 7 に示す。防錆油の有無によらず絶対湿度の増加に伴い溶接金属中の水素量は増加する傾向を示した。そして今回調査した絶対湿度の範囲では、湿度の増加に伴う水素量増加の傾きは防錆油の有無に関わらずほぼ一定であった。また今回の防錆油の塗布条件では、防錆油による水素量の増加量は約 2.5ppm と見積もられた。

2.4.3 水素源調査のまとめ

レーザー溶接において溶接金属に溶解する水素は、雰囲気中の湿気や防錆油に由来することが確認された。従って、溶接金属の水素濃度を低く抑えるには、溶接中の湿度を低くすることや鋼板の防錆油を除去することが有効であると考えられた。

3. レーザ溶接部残留水素量の溶接後の経過時間依存性

溶接金属に溶解した水素は、母材への拡散および鋼板表裏面から放出され、減少する。その減少速度は、低温ほど低くなると考えられる。テーラードブランクでは、溶接後にプレス成形を行うが、プレス迄の時間が短ければ、多くの水素を溶接金属に残留したまま、ひずみが付与される。この際、水素脆化現象により、成形時の伸びの低下が懸念される。そこで、溶接部に残留する水素量の時間依存性を調査した。

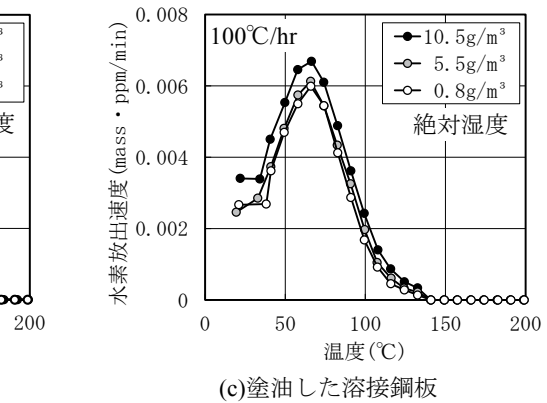


図 7 溶接金属の拡散性水素量

3.1 供試材料

供試材料には、板厚 1.2mm の TS270MPa 級冷延鋼板と TS980MPa 級 DP 冷延鋼板を使用した。

3.2 溶接試験

レーザー溶接には YAG レーザを用い、集光径が  $\phi 0.6 \text{ mm}$  となる光学系を使用した。レーザー出力は 1.9kW、溶接速度は 2.0m/min とした。

3.3 水素量測定方法

鋼板表面をドライな雰囲気、鋼板裏面をウェットな雰囲気、水素を溶解させた。なお、今回試験における鋼板裏面の絶対湿度は、980DP 鋼で

は平均で 17.4g/m<sup>3</sup>, 範囲では 15.9~19.4g/m<sup>3</sup>, 270 軟鋼では平均で 20.7g/m<sup>3</sup>, 範囲では 17.7~23.8g/m<sup>3</sup> であった. 溶接後, 室温で 10 秒から最大 3 日までの所定時間経過後, JIS Z 3118 に準拠して測定した.

### 3.4 水素量測定結果

水素量の溶接後経過時間依存性を図 8 に示すが, プロットは実験値, 曲線は回帰した一次元拡散方程式の解である. 縦軸の溶接部の残留水素率は, 溶接 10 秒後に測定された水素量に対する, 各経過時間後に残っていた水素量の割合である.

溶接後の試験片の模式図を図 9 に示す. 水素放出に関して, 板厚が薄く, ビード幅が狭いことより, 板厚方向への水素拡散のみを考慮した. また, 拡散が Fick の法則に従うことを仮定し, 式(1)に示す一次元拡散方程式で考察する.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

ここで, C(x,t) は位置 x(mm), 時間 t(s) における水素濃度(mass ppm)である. D は水素拡散係数(mm<sup>2</sup>/s), x は板下端からの板厚方向の距離(mm), L は板厚(mm)である.

初期条件として溶接金属中には C(x,0)=C<sub>0</sub> の水素が一様に溶解していると仮定する. C<sub>0</sub> は t=0 における初期平均水素濃度である. また境界条件は板上端および下端で C(L,t)=C(0,t)=0 とする. これらの初期条件および境界条件を満たす一次元拡散方程式の解を求める. そして C(x,t) を x で積分し, L で割ることで溶接終了後の経過時間 t における溶接金属内の平均水素濃度 C(t) が求まる.

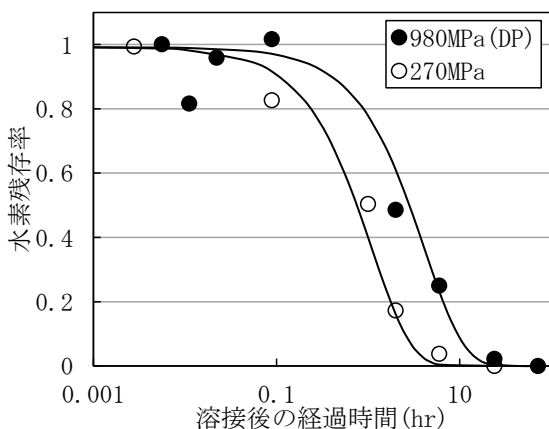


図 8 水素量の溶接後経過時間依存性

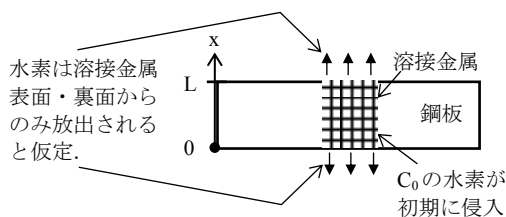


図 9 試験片の模式図

$$\frac{C(t)}{C_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-D \left( \frac{2n-1}{L} \pi \right)^2 t} \quad (2)$$

式(2)を用いて, D をフィッティングした結果が図 8 に示した曲線である. 計算値は実験値を良く再現していることが分かる. 980DP 鋼での水素放出が 270 軟鋼に比べ若干遅いが, 厚板のアーク溶接同様, 温かい環境で保管することにより, 水素放出を加速することができる.

## 4. エリクセン成形性評価

溶接金属に及ぼす水素脆化の影響を明らかにするためにエリクセン試験を行った.

### 4.1 供試材料

供試材料には TS590MPa 級の冷延鋼板の板厚 1.6mm と 1.4mm の差厚テーラードブランクを使用した.

### 4.2 溶接試験

レーザ溶接には YAG レーザを用い, 集光径が φ 0.6mm となる光学系を使用した. レーザ出力は 3kW, 溶接速度は 6.0m/min とした.

### 4.3 エリクセン試験方法

溶接後の経過が 10, 20 分, 1, 2, 3 時間, 1 日での, エリクセン成形高さを比較した. また, 気温と湿度の異なる溶接雰囲気において, 溶接 1 時間後のエリクセン成形高さを調査した.

### 4.4 エリクセン試験結果

図 10 に示すように, 時間経過とともに, エリクセン成形性の改善がみられた. また, 図 11 の絶対湿度とエリクセン成形高さの関係をみると, 溶接 20 分後では絶対湿度の上昇に伴い, 成形高さの低下が認められたが, 1 日後では絶対湿度によらず, 成形高さが高位で安定していることが分かる. また, 破面を SEM 観察した(図 12). 溶接 10 分後の成形試験における破面にはエリクセン試験の外側表面付近で水素に影響された擬へき開破面が見られたのに対し, 板厚中央付近では水素影響がなく, 延性的に破断したと考えられるディンプル破面が見られた. 一方, 溶接 1 日後は, 外側, 板厚中央部ともにディンプル破面が見られ, 延性破面であった.

## 5. 結 言

自動車用薄鋼板のレーザ溶接部の水素に関し, 水素源と, 溶接後の水素濃度や成形性の時間依存性を調査した. その結果, 以下の知見を得た. レーザ溶接金属に溶解する水素量の低減には, 溶接中雰囲気

の湿度を低く、鋼板の防錆油除去が有効であることがわかった。溶接後の時間経過により、拡散性水素量が低減し、エリクセン成形高さが向上するとわかった。

参 考 文 献

- (1) 前田, 鈴木: 高炭素薄鋼板のレーザー貫通溶接で発生する割れに関する研究, 溶接学会全国大会講演概要 Vol.101, (2017-9), 340 - 341.
- (2) 徳永, 巽, 小林, 内藤, 宮崎, 泰山: レーザ溶接部に溶解する水素の発生源の調査, 溶接学会全国大会講演概要 Vol.102, (2018-4), 170-171.
- (3) 内藤, 徳永, 阪本, 爲實, 宮崎: 減圧環境下のレーザー溶接におけるスパッタ量評価, 溶接学会全国大会講演概要 Vol.97, (2015-9), 152 - 153.

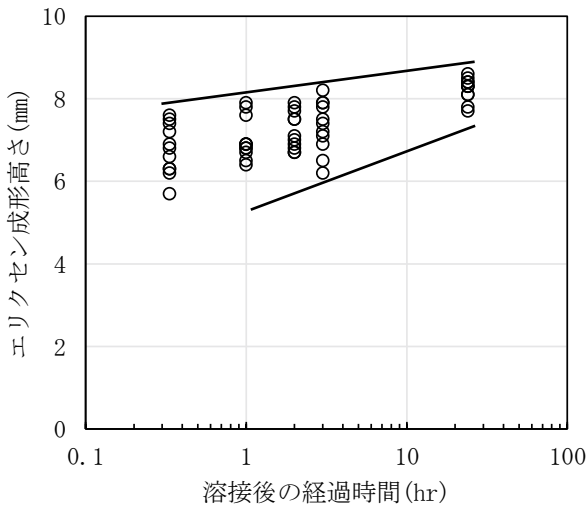


図 10 エリクセン成形高さの時間依存性

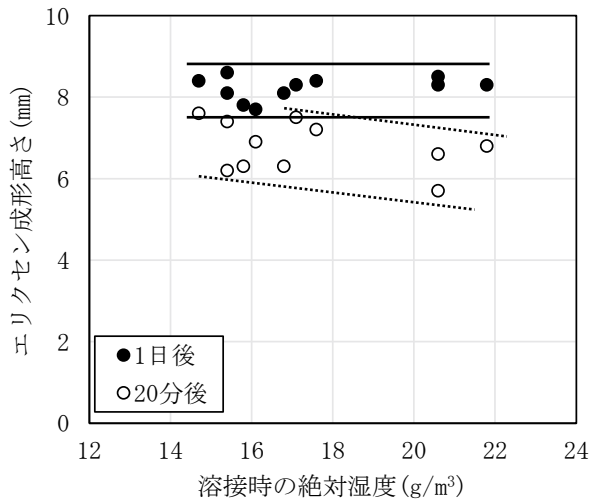
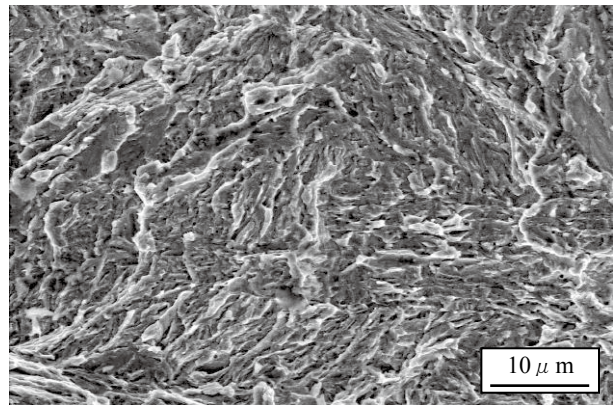
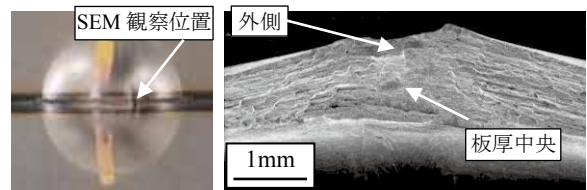
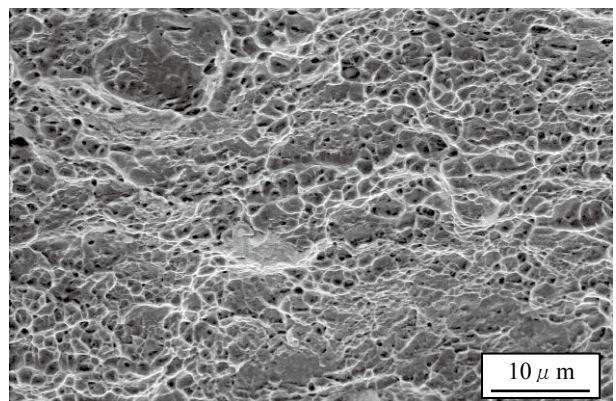


図 11 溶接時の湿度とエリクセン成形高さの関係



(a) 外側表面付近(擬へき開破面)



(b) 板厚中央付近(ディンプル破面)

図 12 破面 SEM 観察(溶接 10 分後)

## 10A2. レーザ溶接方法

# ウォブル溶接の紹介および I C I 技術によるキーホール深さ計測

Introduction of wobble welding and keyhole depth measurement by ICI technology

菊地 淳史\*

\* I P G フォトニクスジャパン株式会社  
(〒446-0059 愛知県安城市三河安城本町 1-34-5)

Atsushi KIKUCHI\*

\*IPG Photonics Japan Limited,  
(1-34-5 Mikawa-Anjo-Honmachi, Anjo, Aichi 446-0059, Japan)  
E-mail: akikuchi@ipgphotonics.com

高輝度ファイバーレーザーのビームを高速ウォブリングすることで、スポット径を変更しなくても、ビード幅や溶け込み形状が変更でき、ギャップや位置ずれにも効果的な、ウォブル溶接を紹介する。また、溶接キーホール深さを I C I 技術で計測可能なシステムもあわせて紹介する。

By high-speed wobbling with high-brightness beam fiber laser, we introduce wobble welding which can change the bead width and penetration shape without changing the spot diameter, which is effective also for gap and misalignment. We also introduce a system that can measure and assurance weld keyhole depth by ICI (In-line Coherent Imaging) technology.

**Key words:** fiber laser, wobble, keyhole depth, ICI

## 1. はじめに

ファイバーレーザーの高出力化、高輝度化、低価格化が進み、レーザー溶接の適用範囲が日々広がっている。元々レーザー溶接は、局部加熱により熔融池を最小限に抑えて、低入熱、低歪みが特長でもあるが、昨今、電気自動車部品などへのレーザー溶接の適用も増えてきており、大電流を必要とするようなアプリケーションには、はんだ付けではなく、幅広く溶融させる溶接技術が必要とされている。IPGフォトニクスは、ファイバーレーザー発振器メーカーであるが、発振器の特性をフルに活用していただくために、光学ヘッドまで供給できる体制を整えている。ウォブル溶接は、レーザービームを高速で動かすことができる光学ヘッドを使い、幅広く溶接することが可能になるほか、溶接品質の向上、位置ずれやギャップ裕度の向上にも寄与するもので、レーザー溶接の適用範囲を大きく拡大できるものと期待されている技術である。ここでは、ウォブル溶接用ヘッドの特長とその結果を紹介する。また、レーザー溶接された部品が、どれくらいの溶け込みが得られたのかを知るには、抜き取り検査で断面を確認するしか有効な手段が無いのが現状である。溶接時の反射光やプラズマ光などをフォトダイオード等でモニタリングし、その安定度をインラインで

監視する装置も市販されているが、飽くまで熔融現象を監視しているものであり、実際の溶け込み深さを測定している訳ではない。IPGフォトニクスは、2017年にカナダにある Laser Depth Dynamics 社を傘下に収め、その会社の基盤技術である I C I (In-line Coherent Imaging) 技術を使い、キーホール深さをインラインでモニタリングできる装置を光学ヘッドとセットで供給できる体制を整えた。この I C I 技術を使えば、溶接部の溶け込みを断面カットすることなく、計測することが可能となり、断面カットするための高額スクラップ品を生み出すことも最小化することが可能になる。本稿では、この装置の特長もあわせて紹介する。

## 2. ウォブル溶接用光学ヘッドの紹介

ウォブル溶接用の光学ヘッドは、2機種提供可能であり、利用する出力や光学構成により選定する。図1に装置外観、表1に仕様を示す。ウォブルモードは、標準で4種類あり、ウォブルモード、周波数、振り幅を指定し、レーザー照射することで、ウォブル溶接が可能となる。モードは、円、直線、8の字、無限大の形状から選択する。図2にモードの形状例を示す。使用するフォーカスレンズによって実際の振り幅が変わるので、集光スポット

径と使用する出力によって、ヘッドおよび光学構成を決定する必要がある。



図1. ウォブル溶接ヘッド外観  
(左: FLW-D30W 右: FLW-D50W)

型 式	FLW-D30W	FLW-D50W
最大許容出力	~6kW	~12kW
ウォブル周波数	~1000Hz	~500Hz
コリメートレンズ	50-100mm	100-200mm
フォーカスレンズ	100-500mm	150mm-1000mm

表1. ウォブル溶接ヘッド仕様

Wobble Mode	Schematic	Sample Weld
Circle (CW & CCW)		
Linear		
Eight		
Infinity		

図2. ウォブルモード

### 3. 近赤外レーザー光による銅溶接の課題

近赤外である波長  $1 \mu\text{m}$  帯のレーザーは、銅溶接における課題として、高反射および高熱伝導という、材料の持つ2つの物理特性が挙げられる。ある程度接合幅が必要な溶接の場合には、スポット径を大きくして出力の大きなレーザーを用いる必要がある。しかし銅溶接においては、固体状態の銅の吸収率は、

約4%程度しかなく、熱伝導性が高いため、スポット径が大きい場合には、熔融状態になるまでは、高いレーザー出力が必要となる。集光スポットを小さくし、パワー密度を上げると、低いパワーでもすぐに熔融状態を作り出せる。銅は熔融状態では、吸収率は10%程度まで向上し、さらにキーホールを形成すると、一気に60%近くまで吸収率が上昇する。よってキーホールを形成しながら溶接を行えば、高出力レーザーを用いなくても十分溶け込みが得られる。銅溶接プロセスのもう一つの問題は、5m/min以下の低速溶接では不安定になってしまい、スパッタやブローホールなどが発生し荒れたビード外観になってしまう。安定したビード外観にするには、5-15m/minまで速度を上げれば良好なビード外観を得ることが可能となるが、ロボットなどの駆動システムへの要求が高まり、高い設備投資を生み出してしまう。図3に出力1500W、スポット径 $\phi 100\mu\text{m}$ の時に速度を変化させた時の銅の溶接ビード外観を示す。

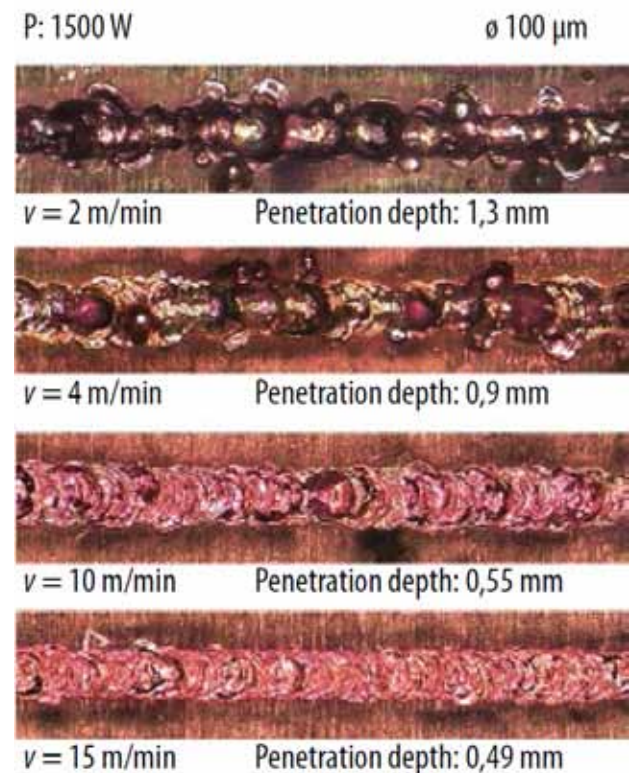


図3. 出力およびスポット径一定時に速度を変化させた時の、溶け込み深さと表面状態

### 4. 銅材料へのウォブル溶接適用

そこで熔融効率の高いスポット径でビームをウォブルさせながら溶接することで、低い出力および低速の領域においても、安定した溶け込みと表面状態を得ることが可能になる。実験では、わずか1kWのシングルモードレーザーにて、1m/minにてウォブル幅を変化させた場合でも、安定した溶け込みと表面

状態を得ることができた。図 4 にウォブル径を変化させた時のビード外観を示す。また、図 5 にその時の溶け込みの断面を示す。

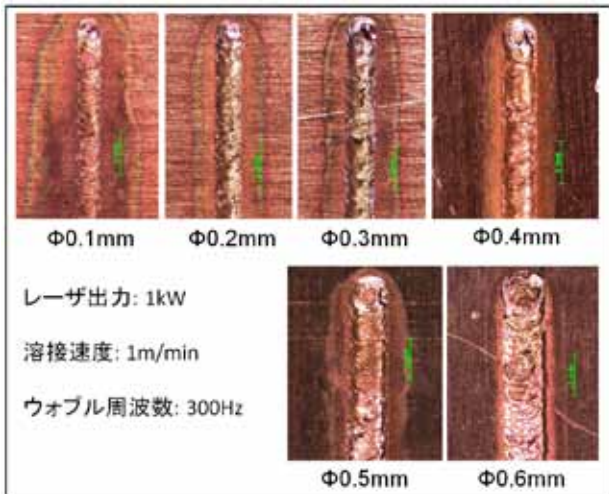


図 4. ウォブル径を変化させた時のビード幅と外観

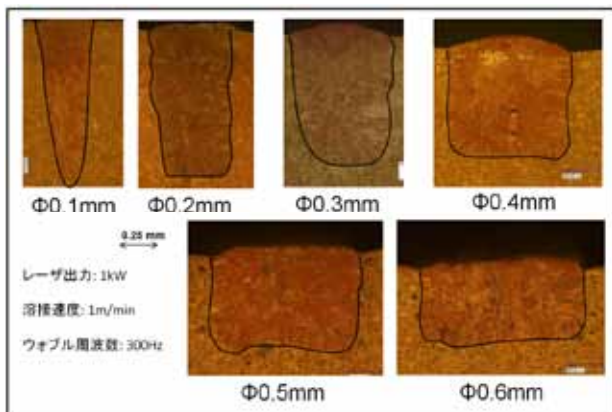


図 5. ウォブル径を変化させた時の溶け込み形状

### 5. QCW レーザとウォブル溶接の組み合わせ

上記では、CW レーザでの適用例を紹介したが、IPG では、従来のフラッシュランプ励起 YAG レーザの置き換えを狙った QCW レーザも販売している。これは、平均出力が数百ワットと低いものでも、ピーク出力は 10 倍出力可能な装置である。図 6 に装置外観を示す。QCW での溶接は、ミリ秒単位で kW 出力のパルスレーザを照射できることを特長としており、熱歪みを嫌うような部品の溶接に最適である。150W の QCW レーザは、シングルモード発振も可能であり、これまでは、穴あけ、除去加工に主に使われてきた。溶接用にはスポット径の大きくできるマルチモードを適用するのが常識であったが、ウォブル溶接との組み合わせによって、用途の拡大が期待されている。図 7 に QCW パルス発振しながら、ウォブル溶接した例を示す。ウォブル無しで溶接した場合、シングルモードビームでは、表面が荒れて

しまい、きれいな溶接ビードを形成するのは困難であるが、ウォブルとの組み合わせにより、高品位な溶接が可能となる。また従来であれば、大きなスポット径で大きなエネルギーを必要としていた溶接も、低出力のレーザで対応が可能となる。



図 6. YLR-150-1500-QCW-AC 装置外観

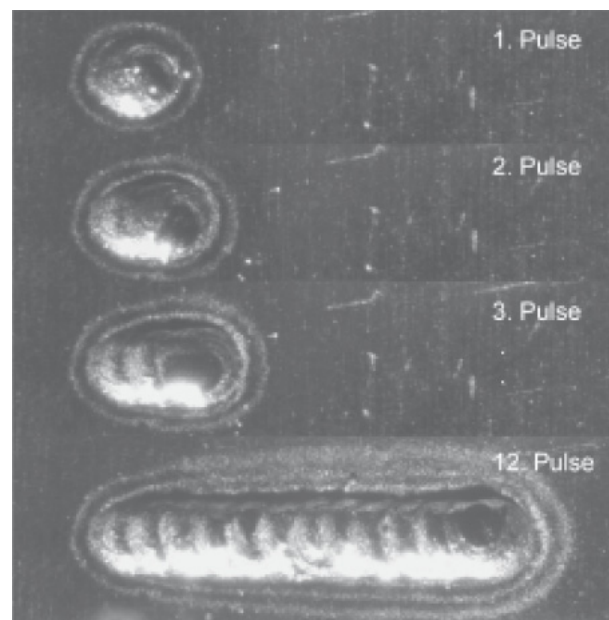


図 7. 高輝度 QCW レーザでのウォブル溶接  
パルス発振周波数:10Hz/パルス幅:20mS  
ウォブル周波数:600Hz

### 6. 溶接部品の溶け込み検査

レーザ溶接プロセスは、時々不良を発生させてしまうことがある。出力変化、位置ずれ、プログラムミス等様々な要因が考えられるが、そのために、定期的にオフラインでのパワー測定や抜き取り検査により、実際の製品をカットして溶け込み確認している。これにより多くのスクラップを発生させてしまい、高額な製品の場合、製造コストへの影響も大きくなる。そういった負担を軽減させるために、インラインの検査装置が求められている。現在、市販されているものは、プラズマ光や反射光の状態を見て、溶接良否を判定する装置もあるが、溶け込み深さを

直接見ている訳ではないので不確定さは残る。ここでは新しい検査方法として、インラインで直接キーホールの深さを測定することができる ICI (Inline Coherent Imaging) 技術を紹介する。

### 7. ICI 技術の基本原理

図 8 に ICI 技術の基本原理を示す。光源から発せられた光がビームスプリッターにて分光され、計測対象物の表面と同距離( $Z_0$ )に配置された参照ミラーと  $Z_0$ +キーホール深さ( $Z_1$ )から戻ってきた光をスペクトロメータにて受光し、その信号を高速処理することで  $Z_1$  の距離をリアルタイムで測定するものである。OCT(Optical Coherence Tomography)とも呼ばれており、医療用の計測機器としても利用される技術であるが、これをレーザ溶接のキーホール深さ計測に応用した技術である。

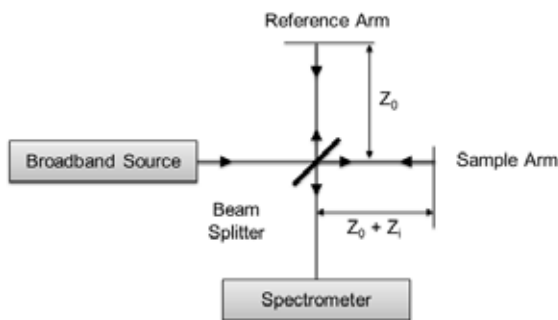


図 8. ICI 技術の基本原理

### 8. LDD-700 の紹介

LDD-700 は、光源およびスペクトロメータを内蔵し、外部機器とのインターフェースを有した“コアモジュール”、ビームスプリッターと参照ミラーを内蔵した“光学モジュール”、光源をワーク上でスキヤニングし、立体的に座標を捉える“3Dモジュール”から構成され、これらのユニットから得られた信号を高速で処理できるパソコンに”OmniWELD”というソフトウェアをインストールし、ユーザインターフェースとして使用する。3Dモジュールは、加工ヘッドの CCD カメラポートを利用して取り付けることが可能である。そのため CCD カメラと同時に利用することができないが、LDD-700 の 3D LiveView 機能を利用することで、CCD カメラよりも高精細にワーク形状を認識することができ、且つ立体的に画面上に映すことができるため、CCD カメラ以上の使い方ができる。図 9 に装置外観および仕様、図 10 に LiveView 画像例を示す。これは、スケールを加工点に置いて PC 画面上に映し出されたものであるが、スケール上のメモリの凹凸やスケール

ル自体の厚み(高さ)が計測されており、3DCAD のように立体的に動かして見ることが可能である。



計測光源波長	800-900nm
計測周波数	~250kHz
高さ方向分解能	<20μm
高さ方向視野	6,9,12mm (購入時選択)
横方向分解能	25μm (光学系による)
横方向視野	~40mm

図 9. LDD-700 装置外観および仕様

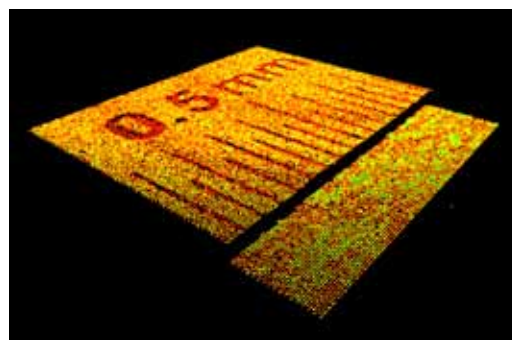


図 10. 3D LiveView 画面例

### 9. LDD-700 の特長

キーホールの深さを測る際の重要なこととしては、レーザ照射位置とキーホールの最深部との位置関係は、異なるということである。通常キーホールは、レーザビーム照射部に形成されるが、溶接速度が変化するにつれて、照射部よりも後方に移動する。また、移動速度、レーザ出力、狙いの深さなどによって、キーホール位置は、変化するので、条件に合ったパラメータでのキーホール位置を探さなければならない。LDD-700 は、このキーホールのアライメントがアナログ機械的調整ではなく、画面でキーホールの最深部確認しながら、キーホールの位置座標を

直接デジタルで入力することができ、そのデータはジョブファイルとして保存できるので、初期設定で登録すれば、ファイルを呼び出すだけで、キーホール位置を都度機械的に調整する必要がなく、条件毎に変更することが可能である。キーホールアライメント時の画面例を図 1 1 に示す。

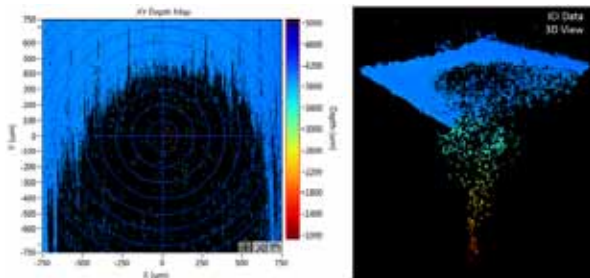


図 1 1. キーホールアライメント画面例

## 10. 計測データの種類

LDD-700 には、キーホール深さだけでなく様々なパラメータを同軸でリアルタイムに計測することができる。溶接前のシームポジションおよびワーク高さ、溶接後のビード高さおよびビード幅も、同時に計測できる。それぞれに閾値を設定することができ、単独あるいは複合的に合否判定することができる。それぞれの計測部位は、図 1 2 に示す箇所を、高速でスキャンして監視している。溶接前のシームポジションやワークの高さ、およびキーホール深さに関しては、取得したデータをリアルタイムでアナログ電圧出力に変換できる機能があり、それらの信号を利用して、シームトラッキングやハイトセンシングや出力フィードバックなどに利用することも可能である。図 1 3 に、シームポジションをモニタリングして、アナログ出力した波形例を示す。

上段の写真は実際の鉄板を任意形状に切断して突き合せたものであり、それをシームラインとして、中心から離れたときに、どれくらい離れたのかをアナログ電圧で出力した波形が、下段の写真となっている。

実際に溶接した時に、画面に表示される画像例を図 1 4 に示す。上段は、キーホール深さとビード高さを複合的に表示し、キーホール深さに閾値を入れた例である。閾値は破線で表示され、範囲内にデータがあれば Pass と判定し、外れると赤く表示され Fail と判定される。判定条件も様々に設定できるので、製品に合った最適な品質管理が可能である。中段は、溶接前のシームポジションを見たものである。色の違いは、材料の高さの違いを表しており、段差の境界をシームポジションとした例である。その他にも材料の歪や隙間などが、確認できる。下段は、溶接後のビードを上から観察した様子で、色の違いによってオーバーフィルやアンダーカットの状況が確認

できる。

また、平面の計測だけでなく、円形状の部品においても、部品寸法を入力するだけで、計測距離が補正されて、正しい値を取得することが可能となっている。図 1 5 に円筒形状溶接のイメージ図を示す。この図に示す通り、円筒形状の場合、シームポジションとビード高さが、レーザー照射位置と異なる高さになるので、円筒の径を補正データとして入力することで、正しい値が自動で計算される。このようなラジアル方向のような溶接だけでなく、スラスト方向の溶接や照射角度がついて溶接する場合などでも対応しており、様々な継手形状、溶接形状を確認することが可能となっている。さらに、シーケンスモードという機能を利用することで、1 ワーク中でも複数個所の溶接を異なる条件で溶接してもそれぞれを、個別に計測判定することが可能である。

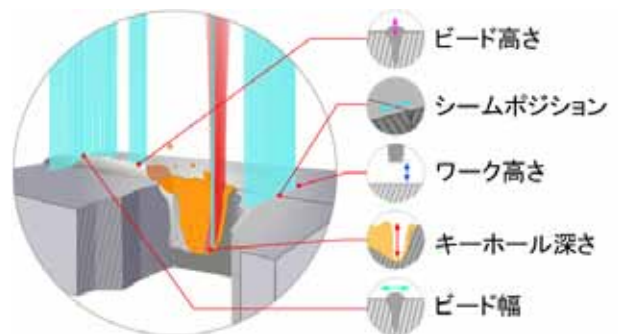


図 1 2. 計測可能なパラメータ

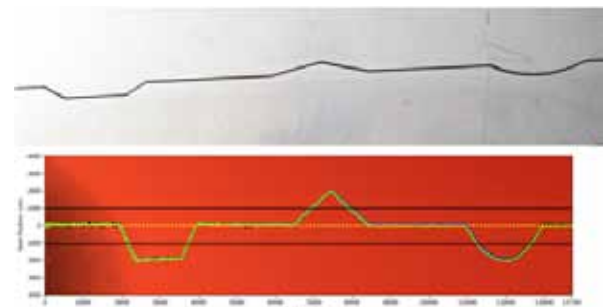


図 1 3. シームポジション計測とアナログ出力例

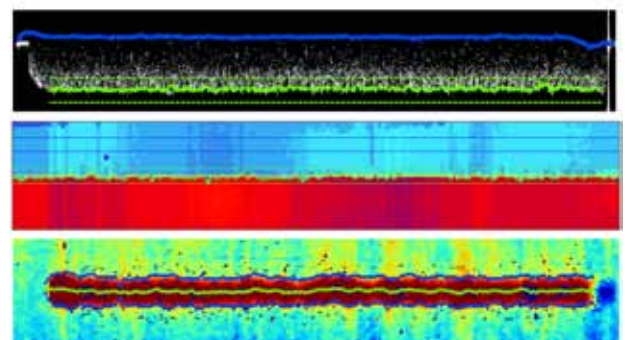


図 1 4. 測定データ例

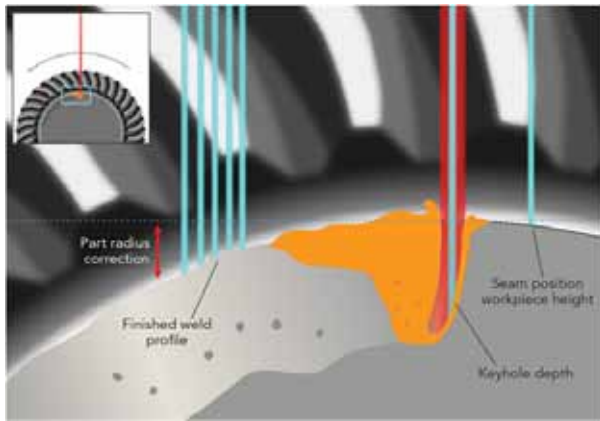
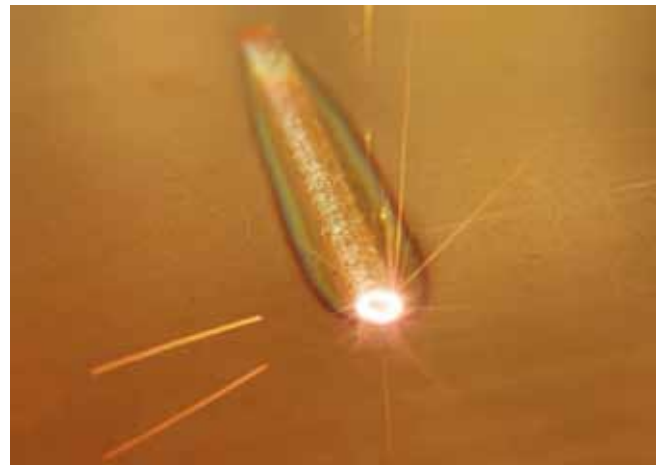


図 1 5. 円筒形状計測における高さ計測補正



銅のウォブル溶接

## 11. 課題と展望

LDD-700 で計測不可能な場合としては、熱伝導型の溶接がある。熱伝導型の溶接の場合は、キーホールを形成しないので、深さを判定できない。また、貫通溶接などの場合も、計測光が戻ってこないため、通常の使い方では判定できないが、逆に、非貫通の場合は、キーホールが形成されるので、判定条件の設定によっては、貫通／非貫通の判定は可能である。また、ウォブルヘッドやスキャナー光学系などを用いた加工の場合、ビームが動いてしまうため、キーホール深さを見る計測光の位置もその動きに追従しなければならない。ウォブル溶接の場合は、モニタリングする箇所をウォブル軌跡上に固定するか、またはウォブルの軌跡を異なる周波数や逆方向でトレースすることで、断続的ではあるが、キーホール深さを確認することができる。

スキャナー光学系との組み合わせによる、2Dの自由軌跡加工については、現在開発を進めている。これが実現できれば、リモート溶接などへの応用範囲が大幅に広がると期待されている。

以上

## 薄板のレーザー+CMT ハイブリッド溶接

Laser + CMT hybrid welding for thin steel plate

滝沢宣人\*,三瓶和久\*

\*株式会社タマリ工業 レーザ事業部  
(〒445-0802 愛知県西尾市米津町五郎田 1-1)

Nobuhito TAKIZAWA\*, Kazuhisa MIKAME\*

\*TAMARI INDUSTRY CO.,LTD.  
(1-1 Gorota, Yonezu-cho,Nishio-City,Aichi 445-0802 Japan)  
E-mail: [n-takizawa@tamari.co.jp](mailto:n-takizawa@tamari.co.jp)

低歪で生産性の高いレーザー溶接は自動車のボデーに代表されるように薄鋼板の溶接への適用が進んでいる。しかし、製品に適用されているのは重ね溶接継手が主である。隅肉溶接にはアーク溶接が適用されているが、歪が大きく、生産性も劣る。シャシー周りの厚板に適用が制限されているのが現状である。レーザーで隅肉溶接が可能となれば、適用範囲が広がり、構造最適化、軽量化にも貢献できる。造船、橋梁等の厚板の溶接への適用が進められているレーザー・アークハイブリッド溶接は余盛形成と板間隙間への対応の点で優れている。そこで、ワイヤ送給量とレーザー入熱を制御し、余盛形状を制御するレーザー溶接工法を開発し、自動車用薄鋼板への適用拡大を図る。その手法として、薄板の重ね隅肉継手に対してレーザー+CMT ハイブリッド溶接の適用を検討した。本報告では、高速度カメラでワイヤの熔融挙動、余盛の形成挙動を観察し、溶接ワイヤの送給条件とレーザー照射条件をコントロールし、各パラメータと余盛形状の計測結果から、アンダーカット、アンダーフィルのない余盛形状が安定的に得られる溶接パラメータを明確化した。ギャップ（板間隙間）裕度、狙い位置の裕度について報告する。

Laser welding with low distortion and high productivity is being applied to welding thin steel plates as represented by the body of automobiles. However, mainly applied to products is lap welded joints. Arc welding is applied to fillet welding, but strain is large and productivity is inferior. The present situation is that the application to the thick plate around the chassis is restricted. If fillet welding becomes possible by laser, the range of application is expanded, contributing to structure optimization and weight reduction. Laser-arc hybrid welding, which is being applied to the welding of thick plates such as ship buildings and bridges, is superior in terms of surplus formation and compatibility with plate-to-plate gaps. Therefore, we develop precision control laser welding method which precisely controls wire feeding amount and laser heat input, and precisely control the shape of the embossment, and expand application to automotive thin steel sheet. As a method to do this, application of laser + CMT hybrid welding to the lamina fillet joint of thin sheet was investigated. In this report, we observe the melting behavior of the wire and the formation behavior of the surplus in a high speed camera, control the feeding condition of the welding wire and the laser irradiation condition, and from the measurement result of each parameter and the extra shape, undercut. We report the gap and the tolerance of the target position when clarifying the welding parameters that can stably obtain the surplus shape without undercut and underfill.

Key words: Laser Welding, Laser-arc Hybrid Welding, Dry Cold Metal Transfer Welding, Fillet Welded Lap Joints

## 1. はじめに

低歪で生産性の高いレーザー溶接は自動車のボデーに代表されるように薄鋼板の溶接への適用が進んでいる。しかし、製品に適用されているのは重ね溶接継手が主である。隅肉溶接にはアーク溶接が適用されているが、歪が大きく、生産性も劣る。シャシー

周りの厚板に適用が制限されているのが現状である。レーザーで隅肉溶接が可能となれば、適用範囲が広がり、構造最適化、軽量化にも貢献できる。

レーザー溶接とアーク溶接を併用するハイブリッド溶接は継手間隙間の裕度を拡大し、かつ、低歪な溶接法として造船、橋梁への厚鋼板への適用が

進められている<sup>1) 2)</sup>。新しいアーク溶接手法としてコールドメタルトランスファー (CMT) プロセスが製品化されている。従来の MIG/MAG 溶接と異なり、特殊なワイヤ送給制御により、アーク発生時、ワイヤを溶融プールに向かって送給し短絡を検知すると同時にワイヤを引き戻すプロセスで、精密な波形制御性能と併せて、スパッタを極限まで押え、入熱を大幅に削減することができる。薄板のアーク溶接に適したこのプロセスとレーザを組み合わせたハイブリッド溶接による薄板の重ね隅肉溶接への適用を検討した。

## 2. 使用材料及び使用設備

### 2.1 供試材と試験片寸法

代表的な高張力鋼板である SCP590 の板厚 1.6mm、2.0mm を使用して図 1 に示す重ね隅肉継手を構成し、試験に供試した。溶接ワイヤは SE-50T、線径  $\phi 0.9\text{mm}$  を使用した。

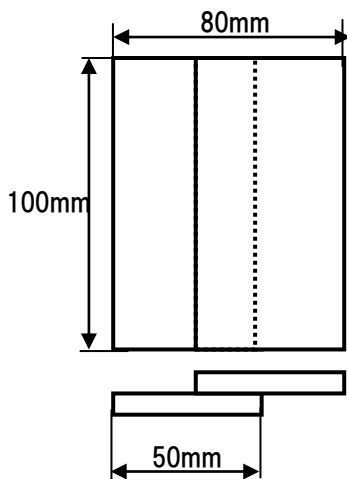


図 1. 供試材

### 2.2 使用設備と構成・配置

実験に使用したレーザ・アークハイブリッド溶接設備の構成は、レーザ発振器は 6kW のファイバレーザ (IPG 社製 YLS6000)、アーク溶接機は高精度のワイヤ送給が可能な CMT 溶接機 (Fronius 社製 TPS400i+CMT) である。多関節ロボット (KUKA 製 KR60HA) にレーザトーチとアークトーチを取り付け直線走査させた。

レーザと溶接ワイヤの配置を図 2 に示す。アーク溶接トーチ及びレーザトーチの角度を水平から 45 度として、溶接方向に対してアーク溶接を先行させ溶着金属を供給することで、ギャップ裕度の小さいレーザ溶接の欠点を補完する。また、後行する高エネルギー密度のファイバレーザによりキーホールを形成し深い溶け込み深さの溶接ビードを形成する。図 3 に実験に使用したレーザ装置の外観写真を示す。

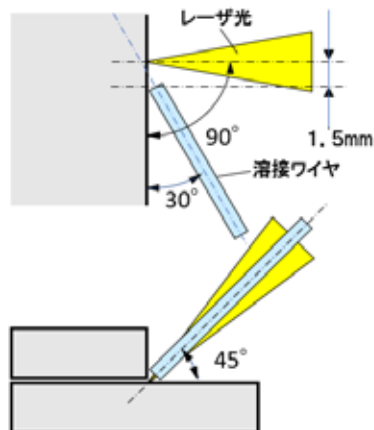


図 2. レーザと溶接ワイヤの配置

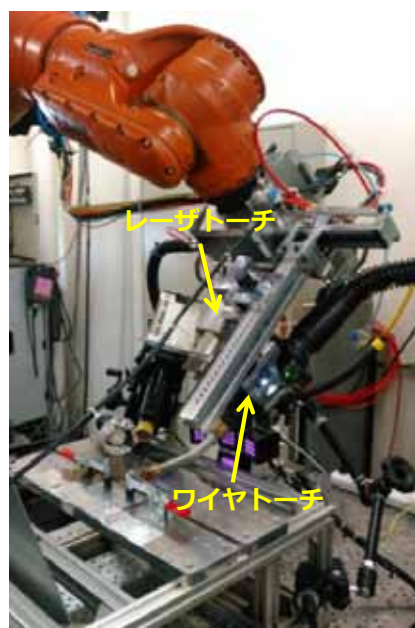


図 3. 実験システムの外観写真

## 3. 試験方法

### 3.1 適正溶接条件の確認

ハイブリッド溶接により、適正な余盛形状と溶け込み深さが得られる溶接条件範囲を調査した。溶接速度を 4m/min に固定して、溶接ワイヤの送給条件とレーザ照射条件をコントロールし、高速度カメラでワイヤの溶融挙動、余盛の形成挙動を観察した。

アンダーカット、アンダーフィル 0 が得られた溶接条件を基準条件として、

- ・狙い位置裕度
  - ・ギャップ裕度
- を調査した。

### 3.2 狙い位置裕度の確認

3.1 で求めた適正溶接条件にて、溶接狙い位置の設定を上板の端部を基準として  $\pm 0.5\text{mm}$  の範囲を 0.1mm 間隔で移動させて狙い位置裕度を確認した。

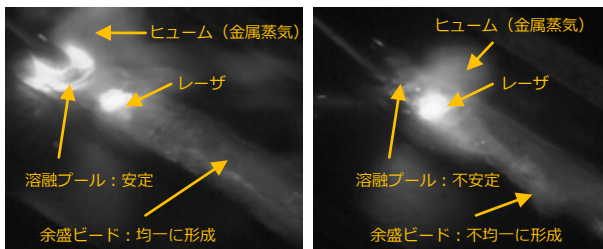
### 3.3 板間隙間裕度の確認

3.1 で求めた適性溶接条件にて、板間隙間を 0.1mm 間隔で増加させて、狙い位置裕度を確認した。

## 4. 試験結果

### 4.1 適正溶接条件の確認

溶接ワイヤの送給条件とレーザー照射条件をコントロールして、高速度カメラでワイヤの溶融挙動、余盛の形成挙動を観察した。図 5 に高速度カメラの撮影画像を示す。ハイブリッド方式ではアーク加熱によって溶接ワイヤを溶融しつつ、試料の表面を加熱溶融することができるため溶融池が安定して形成される状況 (図 4. a) が観察された。ワイヤの供給量と電流値は比例関係にあり、電流値が下限を超えるとアークが不安定になる (図 4. b)。余盛を減らすためにワイヤの供給量を減らすには限界があることが確認できた。



a. 適正電流：安定な溶融池 b. 電流不足：溶融不良  
図 4. 高速度カメラの撮影画像

試験片の余盛形状を、3D 形状測定機を用いて計測した。図 5 に 3D 形状計測画像を示す。計測結果から、溶接ワイヤの送給条件とレーザー照射条件と余盛高さ、アンダーカットとの関係を調査した。

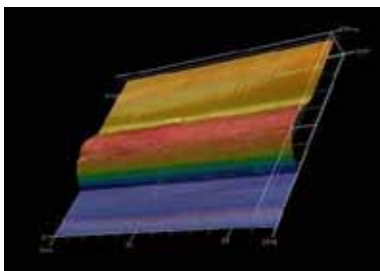


図 5. 3D 形状計測画像、計測

調査結果として図 6 に余盛形状とワイヤ供給速度の関係を示す。また、図 7 にアンダーカットとレーザー出力の関係を示す。余盛高さはワイヤ供給速度と相関があり、ワイヤ供給速度の増加に従って増加する。余盛高さが増加すると余盛ビード端部の止端角も増加することから、疲労強度が重視される場合には注意が必要である。アンダーカットは板厚に対して適切なワイヤ供給速度とレーザー出力をコントロー

ルする。例えば 2.4kW のレーザーに 12m/min 以上の速度でワイヤを供給することでアンダーカットがほぼ 0 となり、アンダーカットを防止することが可能である。良好な余盛ビードが形成された溶接ビードの断面写真を図 8 に示す。

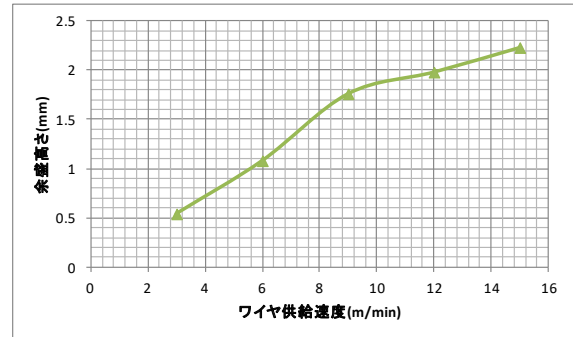


図 6. 余盛形状とワイヤ供給速度

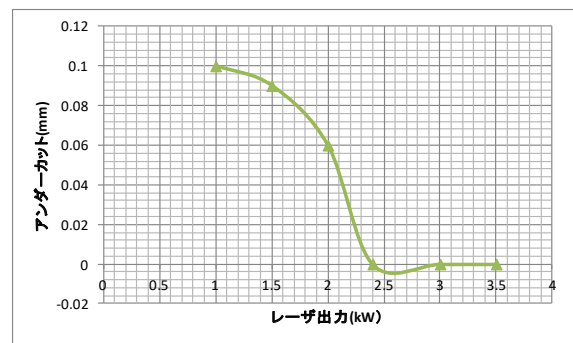


図 7. アンダーカットとレーザー出力



図 8. 溶接ビード断面写真

### 4.2 溶接部の硬度分布

図 9、10 に SCP590 溶接部の硬度分布の計測結果を示す。母材の硬度 200HV<sub>v</sub> に対して溶融金属の硬度 350~389 であり、硬度上昇が認められる。熱影響部の軟化は認められない。

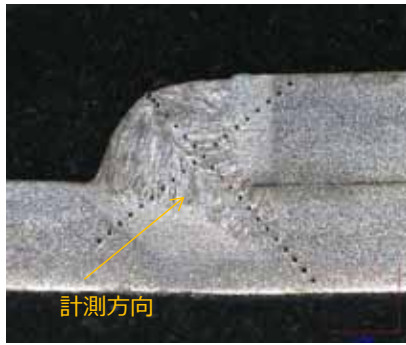


図 9. 溶接部の硬度分布計測位置

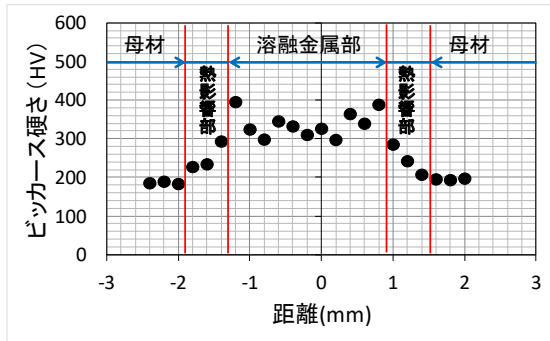
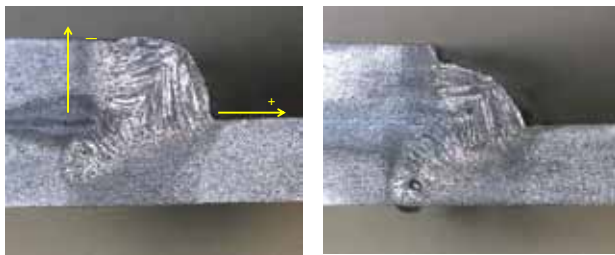


図 10. 溶接部の硬度分布

#### 4.3 狙い位置裕度の確認

狙い位置による溶接ビード断面形状の変化を図 11 に示す。隅肉部から上板方向を-, 下板方向を+とし、狙い位置-0.5~+0.3mm が溶接可能な範囲であった。しかし、狙い位置 : +0.3mm ではアンダーカットが生じており、余盛ビード形状の補正が必要なが判る。

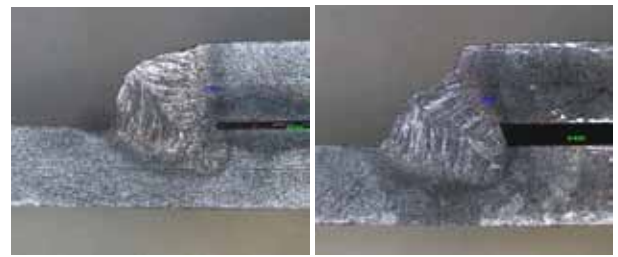


a. 狙い位置 : -0.5mm      b. 狙い位置 : +0.3mm

図 11 溶接ビード断面写真

#### 4.4 板間隙間裕度の確認

板間隙間による溶接ビード断面形状の変化を図 12 に示す。出力、ワイヤ供給量を変更せずとも 0.5mm の隙間を十分埋めることが可能であった。しかし、隙間の増加によりアンダーカットが生じており、余盛ビード形状の補正が必要なが判る。



a. 板間隙間 : 0.2mm      b. 板間隙間 : 0.5mm

図 12. 溶接ビード断面写真

#### 4.4 余盛形成と引張強度

ワイヤの供給量を変えて余盛形状を変化させた強度評価用試料を作成し、引張強度試験を実施した。結果を図 13 に示す。ワイヤ供給量の増加に伴い引張強さが増加する。余盛面積の計算から求めたワイヤ供給量 12m/min 以上で引張強度が 12kN 超えて母材破断が得られた。ワイヤ供給量の増減により、余盛形状を制御することで必要な引張強度をコントロールできることが確認された。

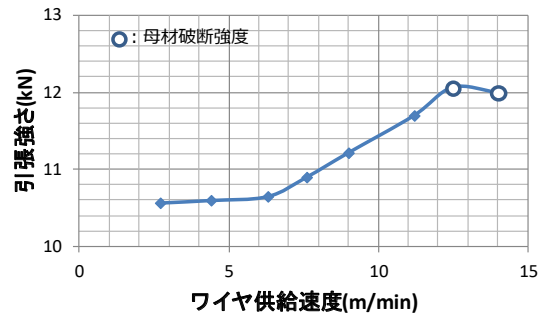


図 13. 引張強度試験結果

#### 5. 結言

自動車分野ではボデー等の薄板の溶接に低歪で生産性の高いレーザ溶接の適用を検討するため、レーザ溶接+CMT 溶接のハイブリッド方式による余盛制御を検討した。今回の試験で、CMT 溶接によるアーク溶接+レーザのハイブリッド方式で良好な余盛ビードが形成でき、引張強度試験でも母材破断する溶接強度が確保できた。本開発は新あいち創造研究開発事業補助金の助成を受けて実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 木村他  
レーザ・アークハイブリッド溶接の海上保安庁むけ大型巡視艇への適用  
三井造船技報 No. 216(2016-2)
- 2) 猪瀬他  
レーザ・アークハイブリッド溶接の橋梁部材への適用  
IHI 技報 Vol49. No. 1 (2009-3)

# 超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの開発

Development of ultra-wide area 3D galvano-scanner head unit

清宮雅明

株式会社ワイ・イー・データ 技術部  
(〒350-1307 埼玉県入間市新光182番地)

Masaaki KIYOMIYA

YE DATA Inc. Engineering Div.  
(182 Shinko, Iruma, Saitama 358-0055 Japan)  
E-mail : masaaki.kiyomiya@yaskawa.co.jp

この度弊社では、超ワイドエリアをカバーする高出力レーザー対応の3Dガルバノヘッドユニットを開発したので、製品の特徴について紹介する。ワイドエリアをカバーすることで、外部軸を併用せず大型のワークを加工することが可能となり、生産性の向上が期待できる。

また、ガルバノスキャナについても、レーザーの高出力化への対応のニーズが高まっており、高出力レーザーへの対応状況についても紹介する。

We have developed a 3D galvano head unit which covers an ultra-wide scanning area for a high power fiber laser, and we introduce the features of the product. By the wide area of the scanning, it is possible to process a large work-piece without using an external motion stage, and productivity can be expected to be improved.

In addition, there has been an increasing needs of a galvano scanner with increasing of laser power, and we also introduce current galvano scanner units for the high power fiber lasers.

**Key words:** galvano scanner, wide area, high power fiber laser

ワイ・イーデータ会社情報  
概要・拠点・事業構成



【商号】 株式会社ワイ・イー・データ  
 【本社所在地】 埼玉県入間市新光182番地  
 【代表者】 井土 信行  
 【従業員】 117名 (2016年3月20日現在)  
 【グループ会社】  
 唯一奉思工程服務股份有限公司 (台湾)



【オプトメカトロニクス事業】

■ガルバノスキャナMIRAMOTION 光学応用製品



■フラットパネル用レーザーマーキング装置・周辺露光装置

高出力レーザー対応製品の開発と変遷

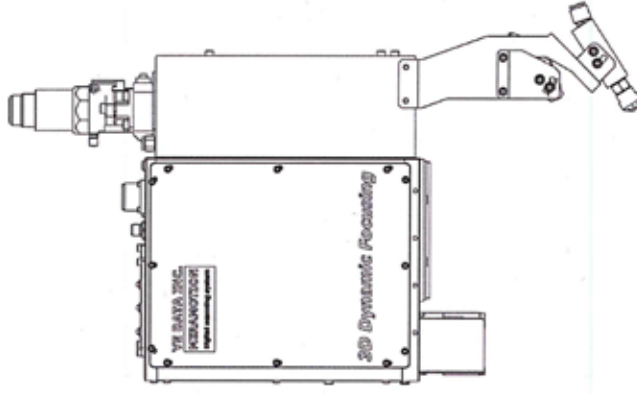
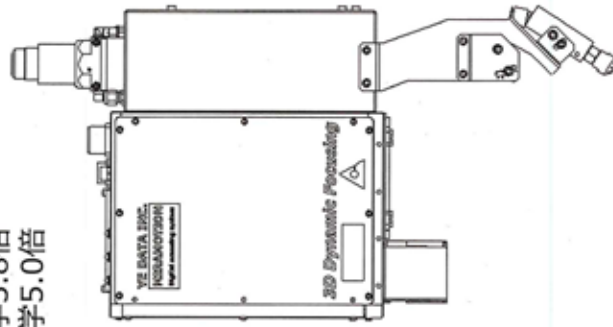
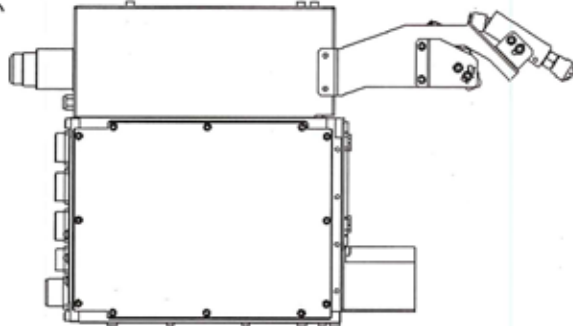
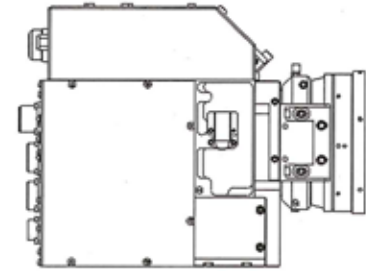
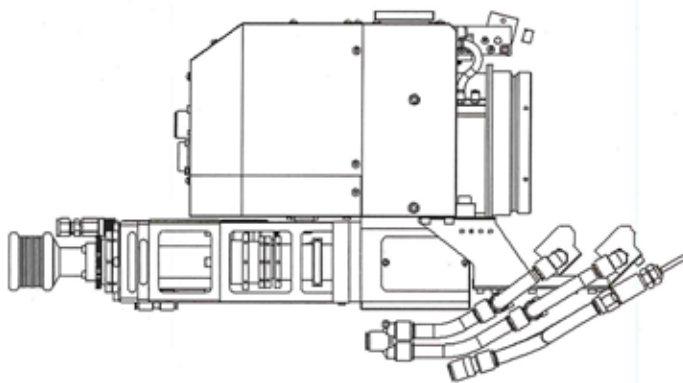
■ 2D初期型  
光学3.0倍

■ 2D小型機  
光学2.4倍  
光学4.0倍  
光学5.5倍  
光学6.2倍

■ 3D初期型  
光学3.7倍  
光学3.0倍  
光学2.4倍  
光学1.5倍

■ 3D現行型  
光学1.5倍(SMレーザー専用)  
光学2.0倍(SMレーザー専用)  
光学3.0倍(SMレーザー専用)  
光学2.4倍  
光学3.0倍  
光学3.8倍  
光学5.0倍

■ 3Dワイドエリア New!  
光学6.0倍  
光学7.4倍  
SMレーザー専用機(計画中)



対応レーザー  
マルチモード 4kW  
応用事例  
自動車車体溶接  
大型複写機筐体溶接

対応レーザー  
マルチモード 4kW  
応用事例  
自動車車体溶接  
車載電池封止溶接  
バスバー溶接

対応レーザー  
マルチモード 6kW  
応用事例  
自動車車体溶接  
金属部品溶接  
車載電池封止溶接  
バスバー溶接

対応レーザー  
マルチモードレーザー 8kW  
シングルモードレーザー 3kW  
製品の特徴  
・低吸収材の採用  
・DOE装着スロット標準装備

対応レーザー  
マルチモードレーザー 10kW(暫定)  
シングルモードレーザー 5kW(暫定)  
製品の特徴  
・ガルバノミラー大型化・可動域拡大  
・観察可能波長域の拡大

### 3Dガルバノスキャナの動作原理

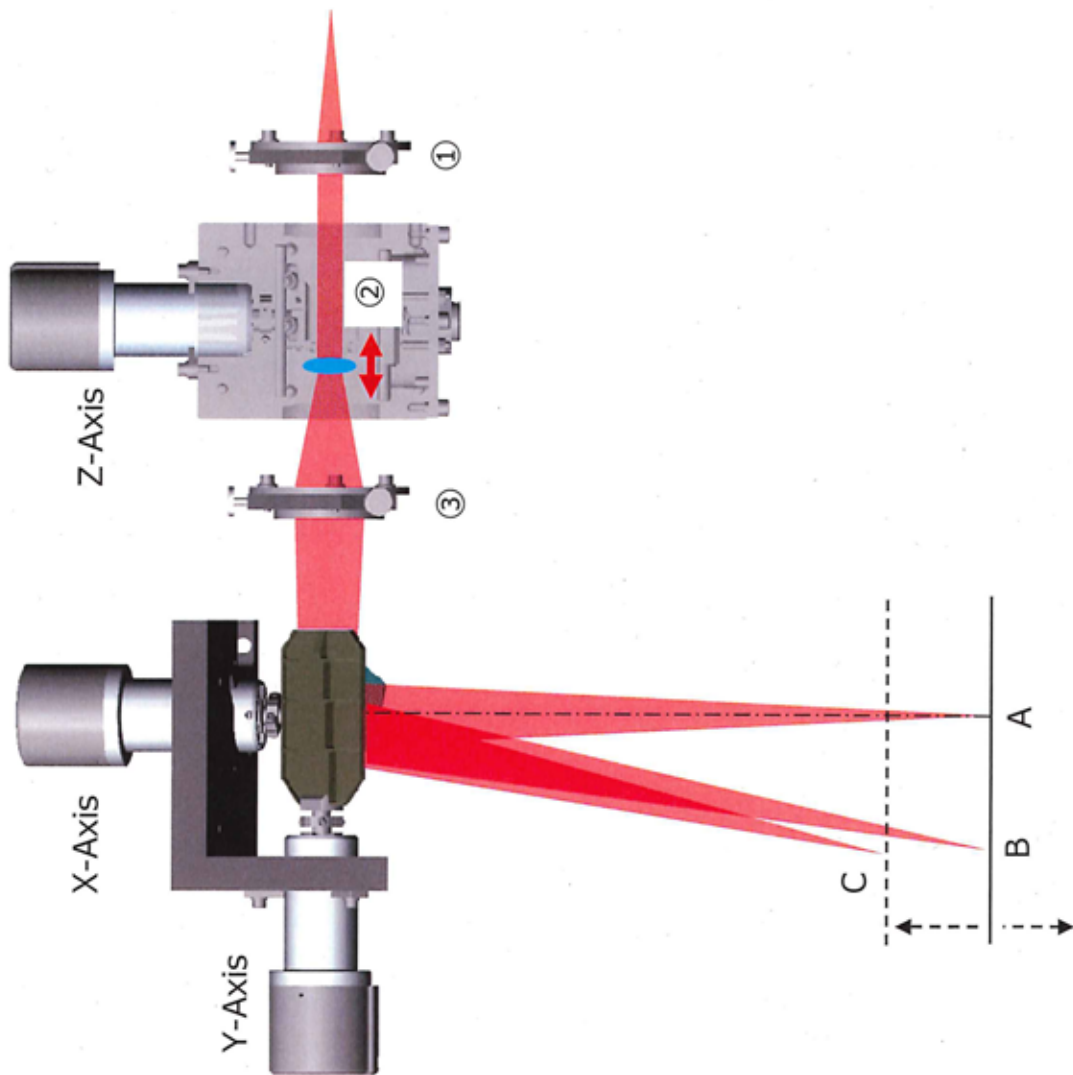
3Dガルバノヘッドユニットの光学系は、以下の主たる3つのレンズ群にて構成されています。

- ① コリメーティングレンズ(凸レンズ)  
ファイバー端より一定の拡がり角にて拡散するレーザを概略平行光とする。
- ② 可動レンズ(凹レンズ)  
概略平行光となった光を拡散光とする。このレンズの光軸方向の移動にて下記集光レンズでの集光位置を可変する。
- ③ 集光レンズ(凸レンズ)

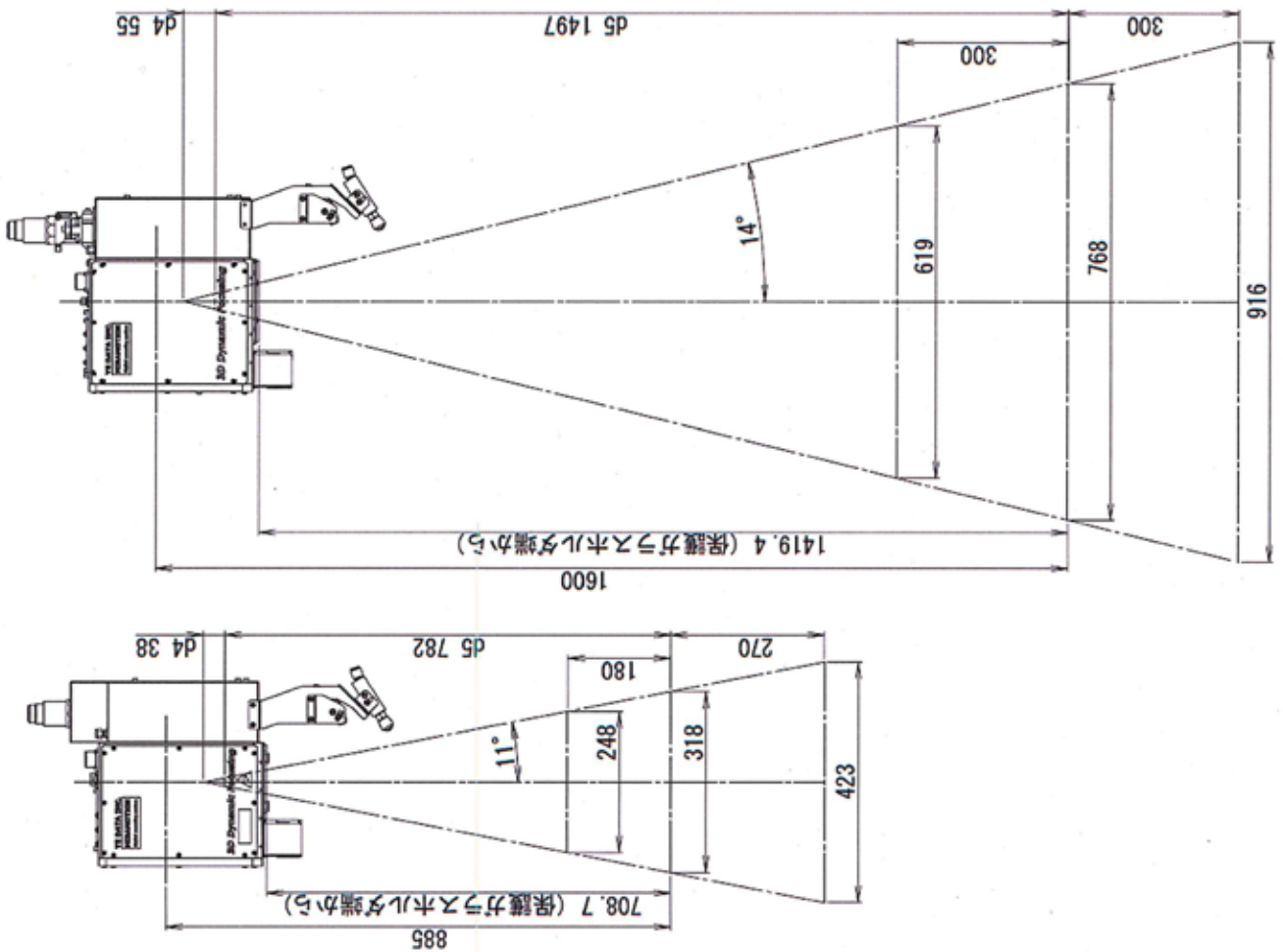
前段②にて拡散光となった光を加工面に向け集光する。

ファイバー射出後の拡がり角の違い(マルチモード/シングルモードなど)には、①のf値を変更し、系全体の光学倍率の作り分けは、③のf値の変更にて対応します。

左図は、ファイバー導光式のレーザを用いる場合の標準的なレンズ構成例です。Z軸可動レンズの動作により、ガルバノ直下原点(A)とカバーエリア周辺(B)の光路長補正を行い、さらにフォーカス面の可変(C)も可能です。



超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの仕様. 1



[ 既存製品との比較 ]

3D現行型

YD-3000M-5.0(マルチモードレーザー用5.0倍機 図左側)

・カバーエリア

318mm (X軸スキャン方向)×303mm (Y軸スキャン方向)

・焦点面可変範囲

-180mm～+270mm (進行方向が正)

3Dワイドエリア型 New!

YD-3XXXM-7.4(マルチモードレーザー用7.4倍機 図右側)

・カバーエリア

768mm (X軸スキャン方向)×738mm (Y軸スキャン方向)

・焦点面可変範囲

±/-300mm

## 超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの仕様. 2

[ ガルバノミラーの大型化 ]

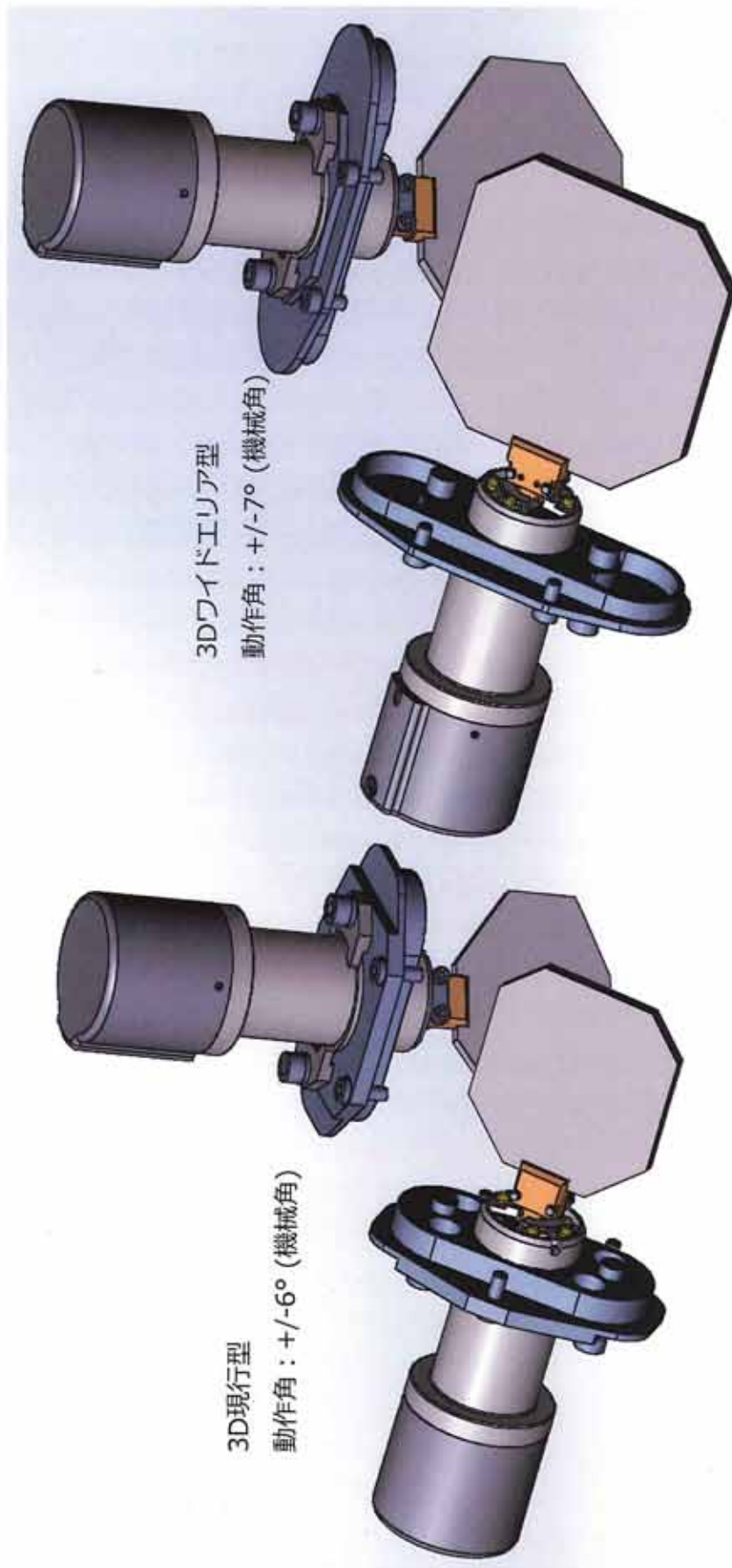
広いカバーエリアを確保し、かつ溶接用途に最適な集光径を得るため、ガルバノミラーを3D現行型より大型化。

3D現行型Xミラー：φ41mm → 3Dワイドエリア型Xミラー：φ54mm

ミラーの大型化により、応答性は劣化したが見、溶接用途には十分な応答性を得ている。サーボ時定数の比較は以下のとおり。

3D現行型：55msec → 3Dワイドエリア型：91msec

(安川電機製多関節ロボットと組み合わせてオンザフライ動作を行う場合のサーボ時定数は約2.0msec)

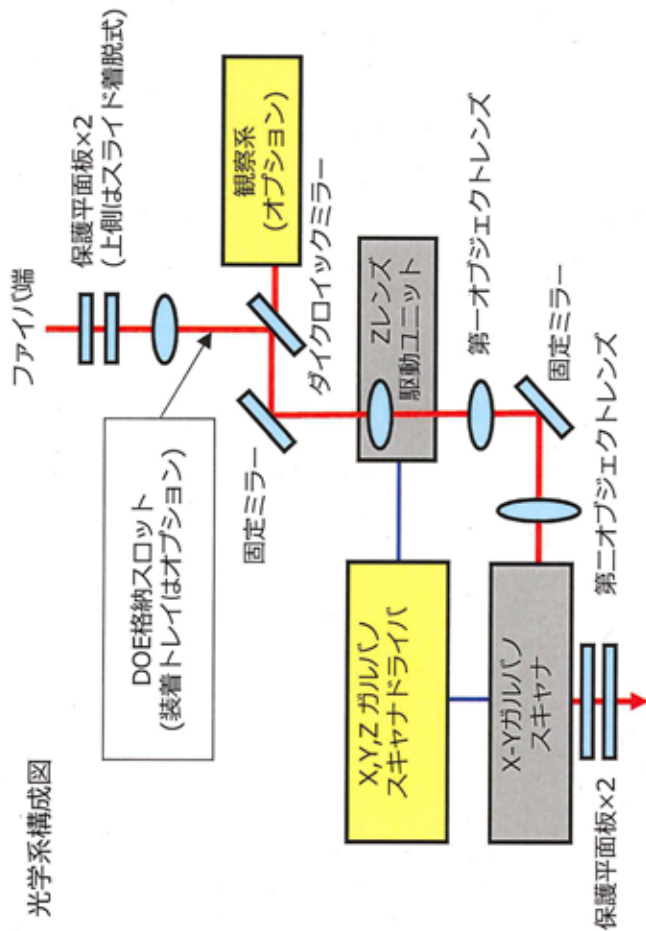


# 超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの高出力対応. 1

[ 3D機の光学構成 ]

部材名称	形状	基材*	光学膜*	透過率/反射率@1070nm
Φ25 保護平面板(2枚)	丸型平面板	合成石英	誘電体多層膜反射防止コート	透過率: 99.8~99.9% 各面
Φ30 コリメーションレンズ	平凸球面レンズ	合成石英	誘電体多層膜反射防止コート	透過率: 99.8~99.9% 各面
Φ40 ダイクロイックミラー	丸型平面板	合成石英	誘電体多層膜反射+半透過コート	反射率: 99.8~99.9%
Φ50 固定ミラー(1)	丸型平面板	合成石英	誘電体多層膜反射コート	反射率: 99.8~99.9%
Φ25 Zレンズ	平凹球面レンズ	合成石英	誘電体多層膜反射防止コート	透過率: 99.8~99.9% 各面
Φ40 第一オブジェクトレンズ	両凸球面レンズ	合成石英	誘電体多層膜反射防止コート	透過率: 99.8~99.9% 各面
Φ60 固定ミラー(2)	丸型平面板	合成石英	誘電体多層膜反射コート	反射率: 99.8~99.9%
Φ60 第二オブジェクトレンズ	両凸レンズ(片側非球面)	合成石英	誘電体多層膜反射防止コート	透過率: 99.8~99.9% 各面
Xガルバノミラー	異形(φ54光側径対応)	合成石英	誘電体多層膜反射コート	反射率: 99.8~99.9%
Yガルバノミラー	異形(φ50光側径対応)	合成石英	誘電体多層膜反射コート	反射率: 99.8~99.9%
Φ135.5 保護平面板(2枚)	丸型平面板	合成石英	誘電体多層膜反射防止コート	透過率: 99.8~99.9% 各面

光学系構成図



\* レンズ基材及び光学膜については詳細非開示とするが、吸収の少ない材料とコーティングプロセスを選定している。

## 超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの高出力対応、2

[各光学素子のレーザー耐力]

各光学素子のレーザー耐力と、スキャナ実装状態における損傷マージンは下表となる。

部材名称	ビーム通過径* mm (1/e <sup>2</sup> )	パワー密度** kW/cm <sup>2</sup> (@10kW)	レーザー耐力*** kW/cm <sup>2</sup> (実験値)	損傷マージン (倍)
Φ25 保護平板(2枚)	10.69	11.14	4527	406
Φ30 コリメーションレンズ	12.77	7.81	4527	580
Φ40 ダイクロイックミラー	12.77	7.81	4527	580
Φ50 固定ミラー(1)	12.77	7.81	4527	580
Φ25 Zレンズ	12.77	7.81	4527	580
Φ40 第一オブジェクトレンズ	20.27	3.10	4527	1461
Φ60 固定ミラー(2)	25.36	1.98	4527	2287
Φ60 第二オブジェクトレンズ	35.60	1.00	4527	4506
Xガルバノミラー	34.67	1.06	4527	4274
Yガルバノミラー	33.44	1.14	4527	3976
Φ135.5 保護平板(2枚)	31.90	1.25	4527	3618

\*ビーム通過径は、3Dワイドエリア型7.4倍機に、ファイバ発散角80mradのレーザーを接続した場合の計算値です。

\*\*パワー密度は、10kWレーザー接続時の値です。

\*\*\*レーザー耐力は、下記のレーザー照射条件による実験値を示す。この条件は実験実施時の機材による限界値で、本条件では各素子とも損傷発生無し。

試験スポット径	300μm
レーザー出力	3.2kW
パワー密度	4527kW/cm <sup>2</sup>

### 超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの高出力対応、3

[ 各部の温度上昇 ]

弊社の3Dスキャナでは、温度上に対し、下記のふたつの部位について注意が必要となる。

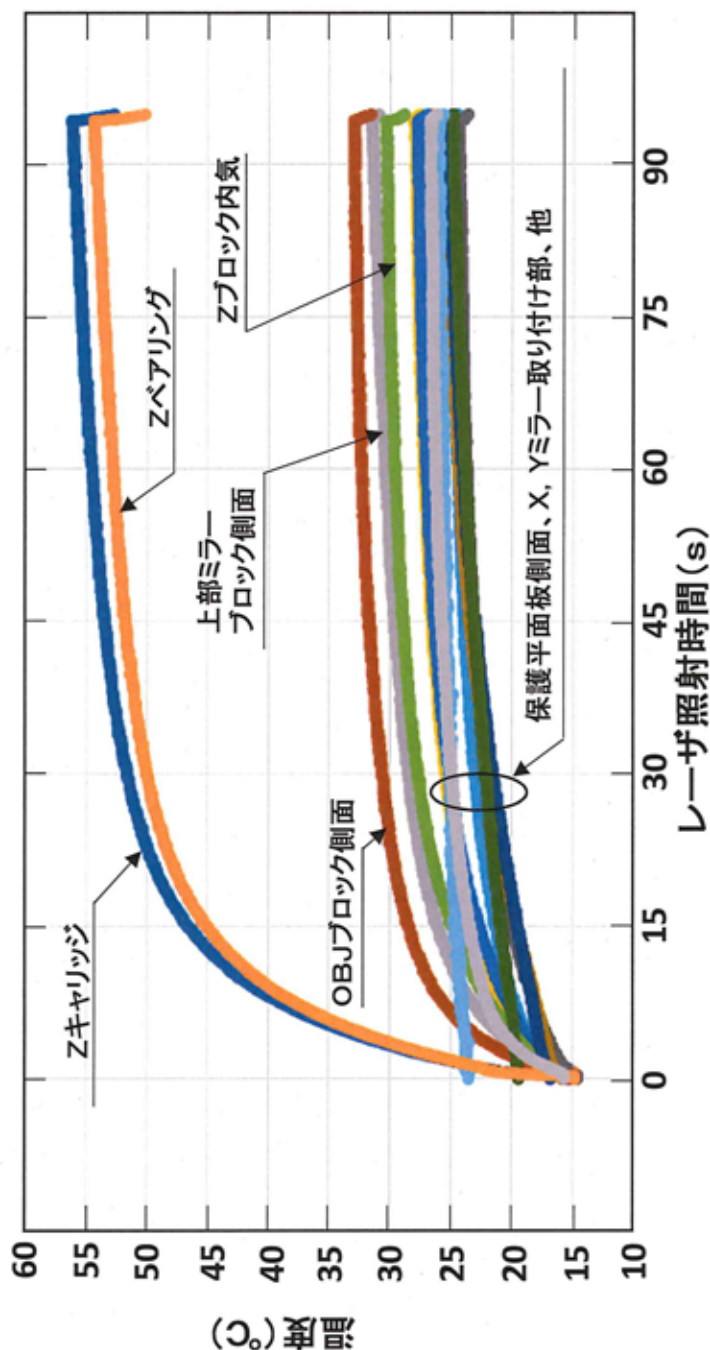
①Zレンズ(可動レンズ)駆動機構を支持するベアリングのグリス (耐熱温度100℃, 80℃以上で寿命影響が発生)

②ガルバノミラーを固定する接着剤 (軟化開始温度80℃)

下のグラフは、超ワイドエリア3D機に10kWレーザを90分連続照射した際の、各部の温度上昇実測値を示す。温度上昇試験は周囲温度25℃, 冷却水温度15℃で実施しており、測定値に15℃を加算すると、ワースト環境条件の周囲温度40℃, 冷却水温度30℃での結果を推定できる。懸念部位の実測結果は以下のとおりで、いずれも問題なく、高出力レーザの連続使用状態においても、安定した動作が期待できる。

①Z駆動機構のベアリング部：測定終了時の計測温度が約55℃。15℃を加算すると70℃となる。

②のガルバノミラー接着部温度は、Xミラー、Yミラーとも、測定終了時の温度は約25℃。15℃を加算すると40℃となる。



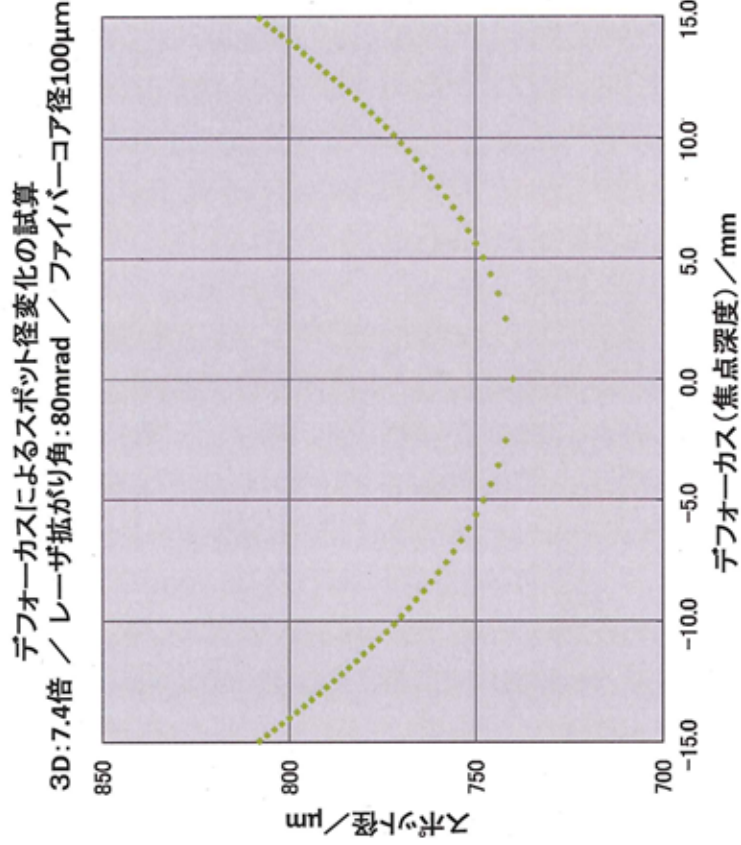
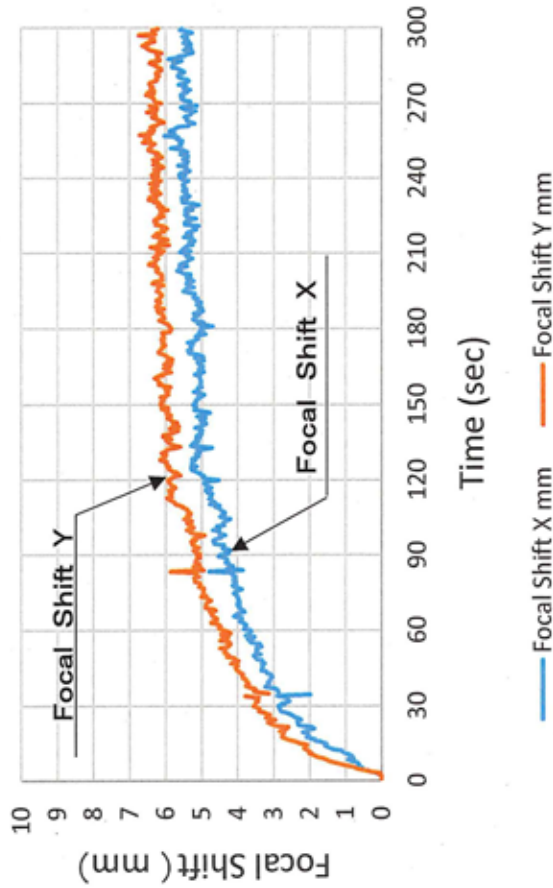
超ワイドエリア#3温度上昇試験結果：10kW連続

## 超ワイドエリア3Dガルバノスキャナヘッドユニットの高出力対応, 4

[フォーカスシフト]

高出力レーザーがレンズを通過する際の発熱により、硝材の屈折率変化や部分的な膨張により凸レンズの性質を強調し、集光位置がスキャナ側に近づいていく挙動を示す。下左図は6kW5分の連続照射を行った際のフォーカスシフトの実測値を示す。フォーカスシフト量は投入熱量に比例した挙動を示すことから、10kW連続照射では、約10mmのフォーカスシフトが生ずると考えられる。下右図は7.4倍機のデフォーカス特性で、100 $\mu$ mファイバ接続時には、ワーク面において約4%のビーム径変化が生じる。弊社ではZ軸を用いたフォーカスシフト打消し制御の検討を行っている。

超ワイドエリア M-7.4倍 Focal Shift  
#3 レーザパワー6.0kW / 5min照射



## 10B1. 超短パルスレーザー加工

# 深層学習でレーザー加工をスマートに

Smart Laser Processing using Deep-Learning Technology

谷峻太郎\*, 小林洋平\*

\*東京大学 物性研究所

(〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 物性研究所 小林研究室)

Shuntaro TANI\*, Yohei Kobayashi\*

\*The Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

(5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan)

E-mail: [stani@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:stani@issp.u-tokyo.ac.jp)

新材料・新目的に合わせた加工を実現するためには、加工パラメーター探索の高速化が必要不可欠であり、加工→計測→評価→加工→…のフィードバックサイクルの高速化は効率のよいパラメーター探索を実現する鍵となる。フィードバックサイクルの高速化にはサイバー空間とフィジカル空間の緊密な融合が不可欠であり、近年急激な発展を遂げている深層学習技術が緊密な融合を実現する重要な鍵のひとつとなる。我々はレーザー加工において深層学習を用いた高速なフィードバック手法の開発を進めている。特に本発表では高精度かつ高品位な除去加工が可能とする超短パルスレーザー加工を対象として、加工の進捗状況をその場かつリアルタイムで検出する手法について報告する。本手法は高速カメラにより散乱光パターンをパルス毎にモニタすることにより、1 ms 以内に除去体積を推定可能とするものである。

Acceleration of the parameter optimization for laser processing is of great importance in industrial applications. As the vast parameter space of the laser processing requires many cycles of processing, measurement, and evaluation, in-situ measurement of laser processing will be a key to accelerate the parameter optimization. For this purpose, we developed a method to monitor removal volume during femtosecond laser micromachining. Specifically, we monitored a scattering pattern using a high-speed camera and analyzed the removal volume utilizing a sequence of the images of the scattering pattern. The combination of high-speed camera and deep-learning technology enabled us to estimate the removal volume in 1 ms during the processing.

**Key words:** Laser-based Material Removal, Scattering Pattern, Real-time Monitoring, Deep Learning, In-situ Monitoring

## 1. 緒言

第 5 期科学技術基本計画にはサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることにより個々のニーズに応える社会 Society 5.0 の実現が謳われており、この実現するためにひとりひとりが持つニーズに応えるものづくり、Mass customization (少量多品種生産) が重要となる。近年急激な発展を遂げている深層学習技術が少量多品種生産の流れをシーズ・ニーズの両方向から後押ししており、例として材料分野における高機能材料開発の高速化を支えるマテリアルズインフォマティクス、医療分野における深層学習援用による高速診断、またそれを支える電子機器の微細化などを挙げることができる。このような急速なシーズ開発技術とニーズ展開技術の進展を支え

るうえで、自由度の高いレーザー加工によるものづくりは大きな力を発揮することが期待される。レーザーによる加工は高い集光性による局所高精度性、非接触であることによる機械的無摩耗性に加え、多種多様なレーザー光源および加工機のパラメーターをもち、様々な材料に対して様々な目的に応じて様々な種類の加工を行うことができることから、Society 5.0 におけるスマートファクトリーを実現する上で重要な役割を果たすことが期待されている。一方、加工パラメーターの自由度・多様性のため、探索が必要なパラメーター空間は莫大な広さとなり、目的に合わせた最適なパラメーター出しに要する時間がレーザー加工の導入の閾値を高くする要因の一

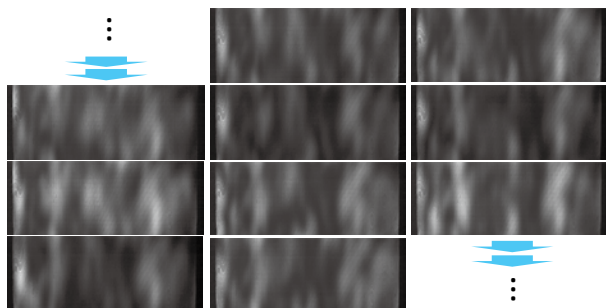


図 1 散乱光パターンのパルス毎の時間変化 (左上から右下への時系列順)。

つとなっている。新材料・新目的に合わせた加工を実現するためには、加工パラメーター探索の高速化が必要不可欠であり、加工→計測→評価→加工→…のフィードバックサイクルの高速化は効率のよいパラメーター探索を実現する鍵となる。このようなフィードバックサイクルの高速化にはサイバー空間とフィジカル空間の緊密な融合が不可欠であり、前述の深層学習技術が重要な鍵のひとつとなる。深層学習とは「原因と結果」のようなデータの組の関係を近似する函数を探索する手法であり、2012年の画像認識の国際大会において前年度までの誤り率の記録を大幅に塗り替えたことを契機として<sup>(1)</sup>自動運転・機械翻訳など様々な分野での応用にむけ精力的な研究が進められている。深層学習は深層ニューラルネットワークと呼ばれる単純な非線形函数を何重にも組み合わせることで複雑な函数を構築する手法がベースとなっており、目的に応じた入出力データの設定と適切なニューラルネットワークを選択が重要となる。

我々はレーザー加工において深層学習を用いた高速なフィードバック手法の開発を進めている。特に本発表では高精度かつ高品位な除去加工が可能とする超短パルスレーザー加工を対象として、加工の進捗状況をその場かつリアルタイムで検出する手法について報告する。本講演では散乱光を高速カメラで撮像することにより、加工の進捗状況を測定する手法の開発について報告する。

## 2. 実験手法および実験結果

加工の進捗に応じたフィードバックを実現するためには、その場モニタリングが必要となり、フィードバックをかける対象・タイムスケールに応じて測定手法を選択する必要がある。レーザー加工のその場モニタリングはこれまで超高速カメラによるイメージング、透過 X 線の撮像、中赤外領域での温度モニタリングなどの光学的な測定や加工に伴って発生する音波の計測など様々な手法の開発がなされてきた

前		
後		
差分		
パターン変化率	15.3 %	7.6 %

図 2 散乱光パターンのフレーム毎の差分とパターン変化率。

<sup>(2,3)</sup> 本研究において主題となる超短パルスによる除去加工については、切削深さないしは除去体積が重要な指標となる。レーザー加工最中における 3 次元形状測定はレーザー加工に伴って発生する噴出物やプラズマからの発光、光学系の配置など様々な困難が伴っている。加工と測定を繰り返すことにより加工中の切削深さや除去体積のその場観察手法として、レーザー加工機と 3 次元顕微鏡や電子顕微鏡を組み合わせ測定する手法の開発が行われているが<sup>(4,5)</sup>、レーザー照射と測定を同時に行うことができないため、リアルタイムに加工の進捗状況を測定することは不可能であった。またリアルタイムでの切削深さの測定を実現する手法として、プローブ用のレーザーを用いて加工部位からの反射光と参照光との干渉縞をもちいた測定手法の開発が進められているが<sup>(6,7)</sup>、干渉縞を測定するためには加工面の面精度が加工途中においても保たれている必要があり、また加工の最初から観測を続けなければならないなど、実際上の応用は困難であった。我々はレーザー光が加工痕近辺において散乱されることにより作られる散乱光パターン (スペックル) には加工進捗を評価するのに十分な情報が含まれているとの仮定のもと、加工痕からの散乱光パターンを高速カメラによりパルス毎に撮像することで除去体積の推定を行う手法を開発してきた。図 1 にパルス毎に撮像された散乱光パターンの典型例を示す。加工用のレーザーにはチタンサファイア再生増幅器を用いた繰り返し 1 kHz、パルス幅 35 fs の超短パルスレーザーを用いており、除去加工に伴う加工痕の形状変化によりプローブ光の散乱パターンが変化する。レーザーの繰り返しに同期した高速カメラを用いることで、1 フレーム毎の散乱光パターンの撮像が可能となっている。

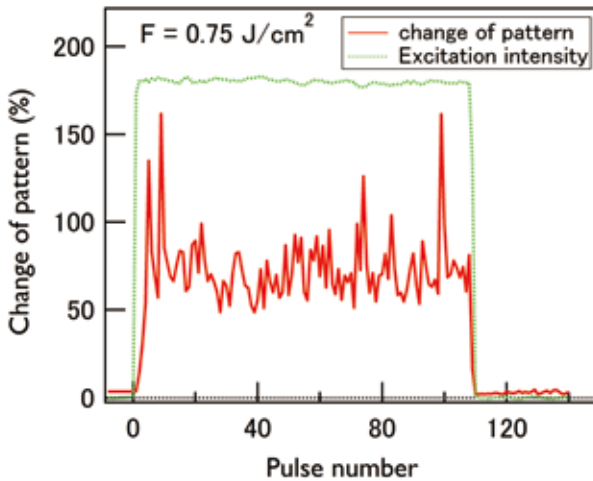


図 3 照射レーザー強度とパターン変化率の時間変化の典型例

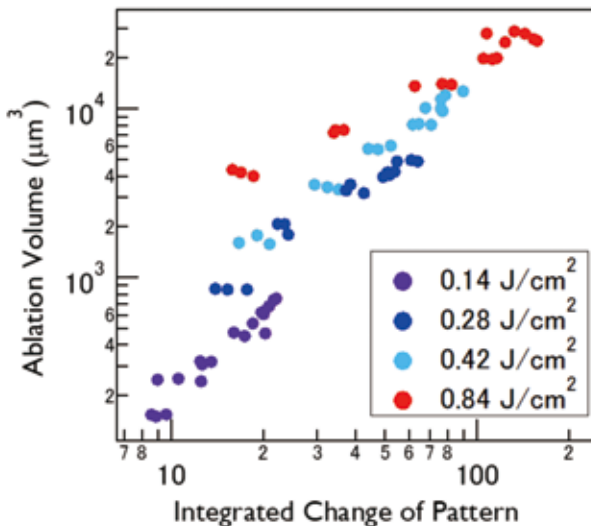


図 4 散乱光パターンを用いた深層学習のスキーム

1 フレーム毎にパターンが徐々に変化する場合と大きく変化する場合があることがわかるが、散乱光パターン自身を人間の目で見ても情報を取り出すことは困難である。レーザー走査型顕微鏡や白色顕微鏡を用いた顕微 3 次元形状構築では対物レンズの焦点位置を掃引しているが、原理的には散乱光パターンにも同等の情報が含まれているはずである。しかしながら、観測に用いることのできる立体角の制限、多重散乱・吸収に伴う予測不可能性、位相回復計算にかかる計算時間などの理由により、散乱光パターンに対して位相復元アルゴリズムを適用して 3 次元形状しようとする、リアルタイム計測はおろか加工進捗の評価自体困難である。

我々はパルス毎に変化する散乱光パターンの差分を評価することにより、加工進捗が評価できるのではないかと考え、散乱光パターンの変化を下記のように

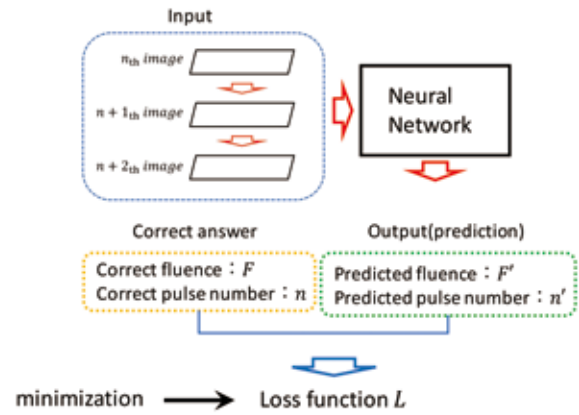


図 5 散乱光パターンを用いた深層学習のスキーム

にパターン変化率と呼ぶ量を持ちいて定量化した。

$$\text{パターン変化率} = \frac{\text{パターン差分の 2 乗平均平方根}}{\text{散乱光強度の平均値}}$$

散乱光パターンのフレーム間の差分を取ることで、レーザー照射により変化した度合いを抽出し、散乱光強度で規格化することにより無次元量として解析を行った。図 2 にレーザー加工過程におけるレーザーパルス照射前と照射後の散乱光パターンおよびその差分を示す。赤で示している領域は散乱光強度が減少した領域であり、青で示している領域は散乱光強度が増加した領域である。照射するレーザーのフルエンスが高い方が、散乱光パターンの変化も大きくなっており、それを反映してパターン変化率も増大している。

図 3 に加工用のパルスを 1 kHz で 100 ms 照射したときのパターン変化率のフレーム毎の値を示す。点線が照射しているレーザー強度を、実線がそれに伴うパターン変化率を表す。加工用のレーザー照射に伴いパターン変化率が 70%程度まで上昇し、照射終了とともにほぼ 0 に戻る。これは散乱光パターンの変化が加工過程の良いプローブになっていることを示している。

図 4 にパターン変化率の時間積分を横軸に、除去体積を縦軸にプロットしたデータを示す。ひとつひとつのデータ点は、図 3 のようにして得られたパターン変化率を時間積分したものと、その結果作られた加工痕からレーザー走査型 3 次元顕微鏡により測定された除去体積に対応し、様々なフルエンスと様々な照射時間に対して実験を行うことにより得られたものである。除去体積は積分されたパターン変化率と正の相関を示しており、除去体積が散乱光パターンの時間変化から推測可能であることを示している。

しかしながらパターン変化率を用いた本手法では除

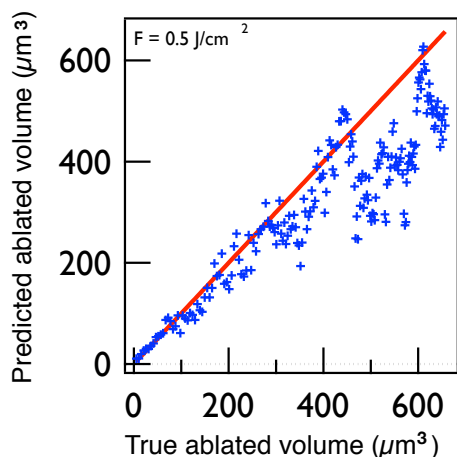


図 6 実際の除去体積と 3 フレームの連続する散乱光イメージから深層学習により予測された除去体積。実線は傾き 1 を示す。

去体積の推定のために、加工過程のパターン変化率を加工開始から常にモニタしておかなければならず、切断加工など照射箇所が時間変化する場合には適用することができない。

### 3. 深層学習による除去体積推定

我々は前述の深層学習技術を用いて、散乱光パターンと除去体積を深層ニューラルネットワークによる関係付けることに成功した。具体的には図 5 に示すような深層学習の手法を適用することにより、パルス毎に撮像された、連続する 3 フレームの散乱光パターンから除去体積の推定する深層ニューラルネットワークの構築を行った。深層学習を適用するためには、入出力のデータセットの選び方、ニューラルネットワークの構成、損失関数の設定、学習方法の選定に加え、大量のデータを準備することが重要であることが知られている。我々は、高速カメラとレーザー加工機を組み合わせた、散乱光パターン自動測定システムを構築し、さまざまなフルエンスに対して約 10 万フレームの散乱光パターンデータを取得するとともに、散乱光パターンと除去体積の関係をもっとも適切に記述しうるネットワーク構造と損失関数の探索を行った。

図 6 に約 10 万フレームのデータに対して、適切に設計されたニューラルネットワークと損失関数を用いて深層学習を行った結果を示す。学習が進んだ深層ニューラルネットワークを用いて 3 枚の散乱光パターンから除去体積を推定したものを縦軸に、実際の除去体積を横軸に示している。推定に用いたデータセットは学習に用いたデータセットとは独立であり、図 1 のような散乱光パターンを 3 フレーム与え

るだけで除去体積を 30% 以内の誤差で予測可能であることが分かった。学習後のニューラルネットワークを用いて散乱光パターン 3 枚から除去体積を推定するためにかかる計算は、順方向の深層ニューラルネットワークの計算を行うだけで良いことからミリ秒以内に行うことが可能である。この計算時間の短さは 1 kHz のレーザーと同期したモニタリングを行うことで、リアルタイムでの除去体積の推定が可能であり、散乱光パターンのモニタリングを通じたフィードバックおよびパラメーター最適化が可能であることを示している。

### 4. 結論

我々は高速カメラを用いた散乱光パターンのパルス毎撮像と深層学習技術を組み合わせることでフェムト秒レーザーによる除去加工の加工進捗のその場測定が可能であることを明らかにした。散乱光と深層学習を組み合わせた本手法はフェムト秒レーザーによる除去加工に止まらず、さまざまな加工に対してその場観察を通じたパラメーター最適高速化のツールになることが期待される。

#### 謝 辞

本研究の成果の一部は NEDO 委託事業「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」により得られたものである。本研究の遂行に尽力いただいた青柳弓槻氏に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- (1) A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, *Advances in Neural Information Processing Systems* **25**, 1097–1105 (2012).
- (2) H. Kawakami, H. Wang, M. Tsukamoto, M. Miyagi, T. Shoubu, and Y. Kawahito, *Opt. Express* **26**, 22626 (2018).
- (3) G. Chryssolouris, *CIRP Annals* **43**, 513 (1994).
- (4) M. P. Echlin, M. Straw, S. Randolph, J. Filevich, and T. M. Pollock, *Materials Characterization* **100**, 1 (2015).
- (5) S. Tani and Y. Kobayashi, *Appl. Phys. A* **124**, 265 (2018).
- (6) A. Ancona, F. Di Niso, F. P. Mezzapesa, G. Scamarcio, M. Dabbicco, Pietro M. Lugarà, and T. Sibillano, *Opt. Express* **20**, 663 (2012).
- (7) A. G. Demir, P. Colombo, M. Norgia, and B. Previtali, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **65**, 2621 (2016)

# 最適加工条件の効率的探索のための 自動パラメータ可変レーザー加工システム

Automatic parameter-variable laser processing system for  
efficient optimization of process conditions

吉富 大\*, 高田 英行\*, 鳥塚 健二\*, 小林 洋平\*\*

\*産業技術総合研究所  
(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2)

\*\*東京大学 物性研究所  
(〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

Dai YOSHITOMI\*, Hideyuki TAKADA\*, Kenji TORIZUKA\*, Yohei KOBAYASHI\*\*

\*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
(Central-2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan)

E-mail: [d.yoshitomi@aist.go.jp](mailto:d.yoshitomi@aist.go.jp)

\*\*Institute for Solid State Physics, University of Tokyo  
(5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan)

最適加工条件の効率的探索のために、各種パラメータを柔軟に自動可変制御できる高出力ファイバレーザーと加工装置を開発し、効率よくパラメータ可変加工データを取得するシステムを構築した。パルス幅は 400 fs~400 ps の 3 桁の可変性を実現し、熱的・非熱的の境界領域を探るのに適している。さらにパルスエネルギーは 2 桁、照射パルス数はシングルショットから連続まで、繰り返し周波数は 1 MHz の任意分周に可変できる。平均出力は 100 W 以上であり、高スループットな条件下での探索が可能である。加工装置は、試料用の精密ステージとビーム走査用のガルバノスキャナーに加えて、加工痕を観察するための光学顕微鏡を搭載し、同一のシステムからレーザーパラメータと加工装置の設定および顕微鏡観察までを一括で制御することができる。パラメータを可変した数百点のアブレーションパターン顕微鏡画像を 30 分程度で取得することに成功した。

For the purpose of efficient optimization of laser processing, we have developed an automatic parameter-variable high-average-power femtosecond fiber laser and a processing system for efficient acquisition of parameter-dependent processing results. The wide-range variability of pulse duration from 400 fs to 400 ps is suitable for searching in the transition regime from nonthermal to thermal process. The system has further variabilities of pulse energy by two orders of magnitude, number of irradiated pulses from single shot to continuous, and repetition rate of arbitrary fractional frequencies of 1 MHz. An average output power of > 100 W enables optimization under the high-throughput process condition. The processing system is equipped with an optical microscope to view the processed area besides a high-precision sample stage and a Galvano scanner. A simultaneous control of laser parameters, processing conditions, and acquisition of microscope images is manipulated by a single program. We obtained microscope images of ablation craters with several hundreds of parameters in 30 minutes.

**Key words:** optimization, parameter variable, femtosecond, picosecond, fiber laser, ablation, craters, pulse duration

## 1. 緒 言

レーザー加工において、加工速度や加工品質は、対象材料の種類や形状だけでなく、レーザー光の各種パラメータにも大きく依存する。レーザー光が物質に照射されると、光が物質に吸収される過程、吸収されたエネルギーにより高温になった電子系から格子系へエネルギーが緩和していく過程、プラズマ

の膨張や衝撃波の伝搬が起きる過程、マクロに熱拡散が起きる過程など時間領域や強度領域の異なる種々の過程が起きるため、レーザーのパルス幅やパルスエネルギーはレーザー加工において重要なパラメータとなる<sup>(1-4)</sup>。非常に短いパルスを用いて、加工部の熱影響領域を抑制した加工ができるという結果も報告されており<sup>(2-4)</sup>、フェムト秒からピコ秒にわた

るパルス幅領域における知見は非常に重要である。また、熱の蓄積効果という観点からは、照射パルス数や繰り返し周波数も加工に影響するパラメータとなる<sup>(5,6)</sup>。

このような各種加工パラメータの最適値を効率よく探索するためには、レーザー光のパラメータを柔軟に自動可変制御できるレーザーシステムが必要となる。そこで、本研究ではパルス幅・パルスエネルギー・照射パルス数・繰り返し周波数を自動可変制御できるフェムト秒ファイバレーザーシステムを開発した。実用的な高スループットな加工条件下における最適パラメータの探索を可能にするために、100 W を超える平均出力を実現した。それと同時に、高精度な自動制御ステージと顕微鏡観察系を備えた加工装置を開発し、同一のプログラムからレーザーの各種パラメータと加工ステージ・観察系を同時一括制御可能な加工システムを構築した。

## 2. レーザーシステム

まず、開発したレーザーシステムの詳細について述べる。Fig. 1 に開発したパラメータ可変ファイバレーザーシステムの全体構成を示す。半導体レーザー励起で高平均出力増幅が可能な Yb 添加ファイバーによるチャープパルス増幅法を採用した。加工用光源としての堅牢性と保守性を重視し、高出力増幅前のシーダー部分については、発振器内部の自由空間光路を除くすべての光路を偏波保持ファイバーの融着により構成した。

非線形偏波回転を用いた Yb ファイバーのモード

同期発振器から中心波長 1035 nm で 繰り返し周波数 75 MHz、平均出力 50 mW のパルス発振が得られる。自由空間型の共振器構成の場合、偏光子からの出力が用いられることも多いが、本システムでは、50 %出力結合器からのファイバー出力を用いることにより、発振器の調整後も後段のアラインメントを必要としない構成にして、システムの保守性を高めている。

増幅ファイバー内の非線形効果を抑制するために、2 段のチャープファイバブラッググレーティング (CFBG) を用いて、3 ns までのパルス幅延伸を行った。ファイバー型音響光学変調器を用いて、繰り返し周波数を 75 MHz から 1 MHz まで分周し、CFBG の透過損失と分周による平均出力の低下を補填するために、各段の直後計 3 か所に前置増幅器を配置した。次に、Yb 添加フォトニック結晶ファイバー (PCF) 増幅器と Yb 添加ロッドファイバー増幅器で 163 W まで増幅した。増幅出力によらずほぼ同じスペクトル形状が得られたが、このことはファイバー内部の非線形効果が顕著には起きていないことを示している。パルス幅 3 ns、モードフィールド径 65  $\mu\text{m}$  で平均パワー 160 W におけるファイバー内部での光強度を計算すると、約 1.6 GW/cm<sup>2</sup> となる。ファイバーの有効長を実際の長さの半分 40 cm と仮定すると、非線形位相はほぼ 1 rad となり、非線形効果が顕著に現れない結果と一致している。

パルス圧縮器には、3 ns という長いチャープパルス幅に対応できるように、幅 30 cm の大型の反射型回折格子を用いた。溝本数は 1740 lines/mm で、高出力に耐えるため誘電体多層膜が施されている。遠隔制

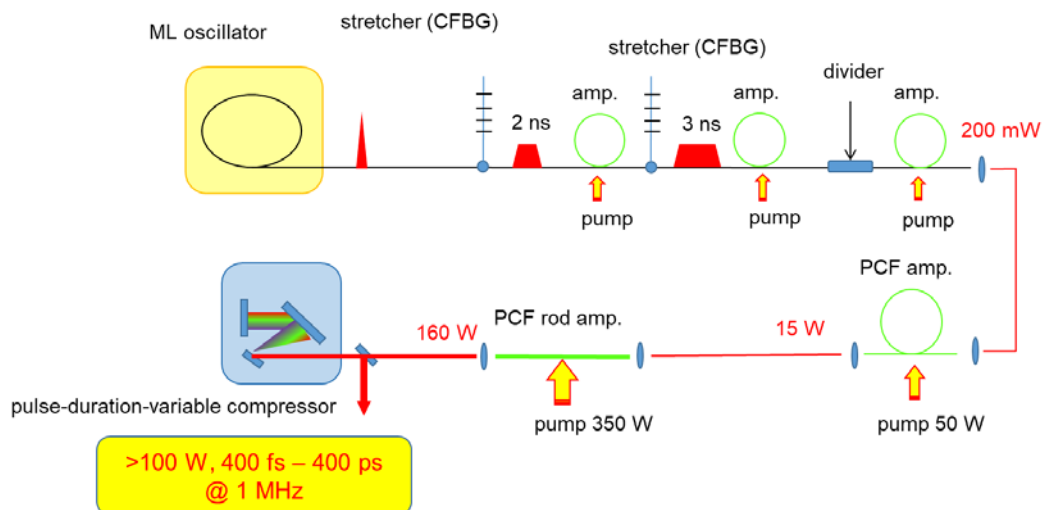


Fig. 1 Schematic layout of the parameter-variable laser system.

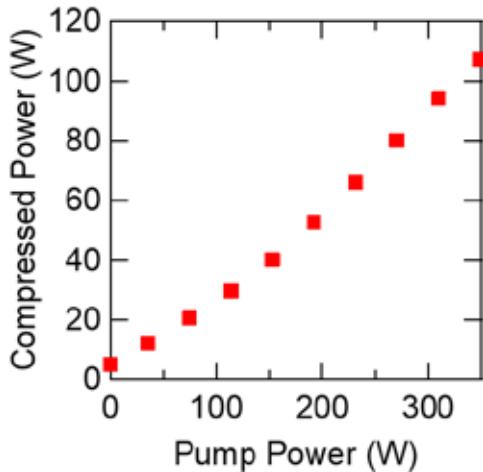


Fig. 2 Compressed power of the rod fiber amplifier output

御自動ステージを用いて、回折格子間隔を制御することにより分散補償量を変化させて、圧縮パルス幅を可変制御することができる。Fig. 2 に、ロッドファイバー増幅器の圧縮後の平均出力特性を示す。最大で 107 W の平均出力、107  $\mu$ J のパルスエネルギー（繰り返し 1 MHz）が得られた。最大出力時の圧縮パルスの測定パルス幅は、425 fs であった。

### 3. パラメータ可変性

#### 3.1 パルス幅

各種パラメータの可変性について述べる。Fig. 3 に平均出力 100 W において回折格子位置を変化させた時の自己相関により測定したパルス幅の変化を示す。実線はパルス波形をガウシアンと仮定した場合の 2 次分散によるパルス広がり理論値を表している。最短パルス幅近傍で理論値からずれているのは、高次の残留分散の影響である。約 400 fs から約 400 ps までの 3 桁に及ぶ可変性を実現できた。

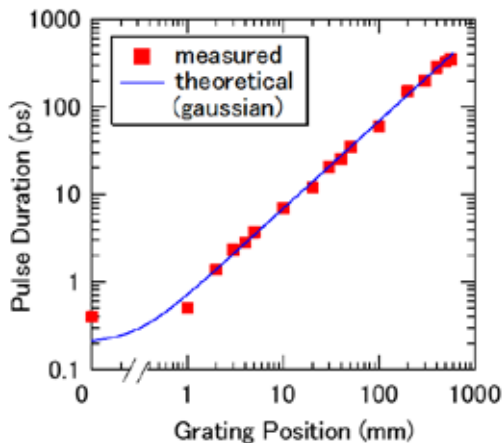


Fig. 3 Variability of the pulse duration.

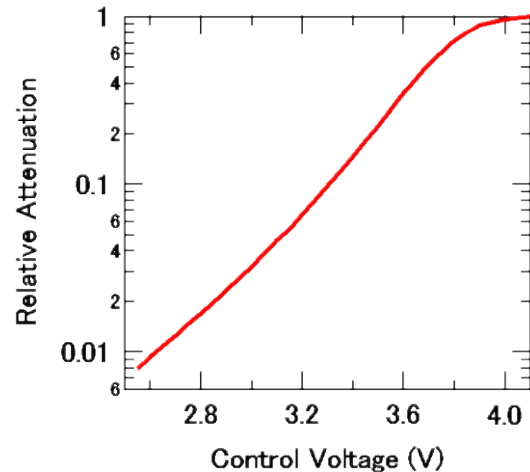


Fig. 4 Variability of pulse energy attenuation.

#### 3.2 パルスエネルギー

パルスエネルギー及び照射パルス数・繰り返し周波数を可変にするために、ロッドファイバー増幅器出力後に音響光学変調器を設置した。パルスエネルギーは、変調器に印加する RF 信号強度を制御することにより、変調器の回折効率を変化させることによって可変した。Fig. 4 に、RF 信号を制御するための制御電圧値を変化させた時のパルスエネルギーの変化(最大を 1 とした時の減衰量の相対値)を示す。約 2 桁にわたって、パルスエネルギーを可変することができている。

#### 3.3 照射パルス数・繰り返し周波数

設置した音響光学変調器の応答時間は 1  $\mu$ s 以下であるため、繰り返し 1 MHz の増幅パルス列から任意のタイミングでパルス抜き出すことが可能である。変調器に印加する RF 信号にゲートをかけることにより、照射パルス数と繰り返し周波数を可変制御した。照射パルス数については、シングルショットから連続まで任意のパルス数に設定することが可能である。Fig. 5 は、(a) シングルショットの場合と (b) 10 パルスに設定した場合のパルス列を PIN フォトダイオードで測定した結果である。波高値がばらばらに見えるのは、デジタルオシロスコプのサンプリングによるものである。

繰り返し周波数については、 $N$  パルスごとに抜き出す操作を行うことにより、1 MHz の  $N$  分周 ( $N$  は任意) の周波数に設定することが可能である。本方式では、増幅前に繰り返し周波数を制御する場合と異なり、パルスエネルギーを変化させることなく分周できることが利点である。Fig. 6 に、(a) 10 kHz の場合と、(b) 100 kHz でパルス数 5 に設定した場合

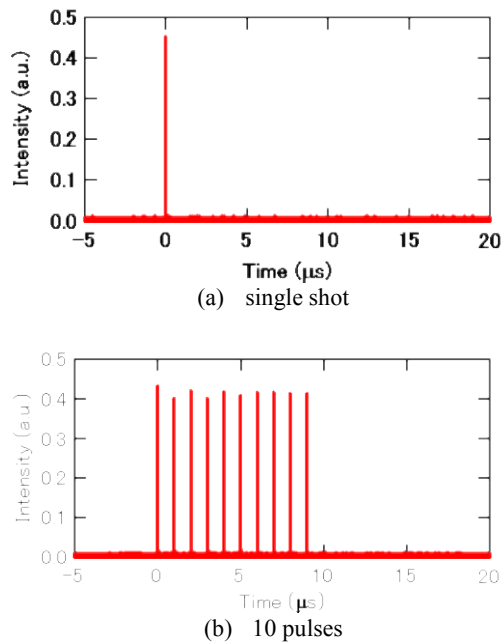


Fig. 5 Variability of number of irradiated pulses. The variation in peak values is due to limited sampling.

のパルス列の結果を示す。

#### 4 加工装置

本レーザーシステムの開発とあわせて、加工装置の開発も行った。装置の全体イメージ図を Fig. 7 に示す。プログラミング制御可能な高速高精度な大型移動ステージの上に加工サンプル台を設置し、加工後にサンプル台に設置したまま加工痕を観察できるように、各種倍率の光学顕微鏡を搭載した。制御コンピューター上の単一の制御プログラムによって、

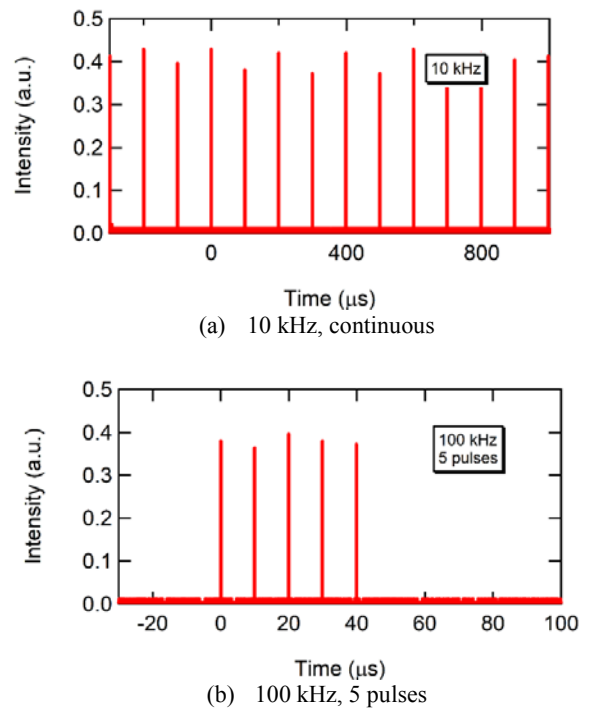


Fig. 6 Variability of repetition rate. The variation in peak values is due to limited sampling.

レーザーの各種パラメータから加工ステージの動作条件および顕微鏡画像の取得までを一括で制御することが可能になっている。これにより可変範囲にある任意のパラメータを設定した加工とその加工痕観察を効率的に行うことができる。

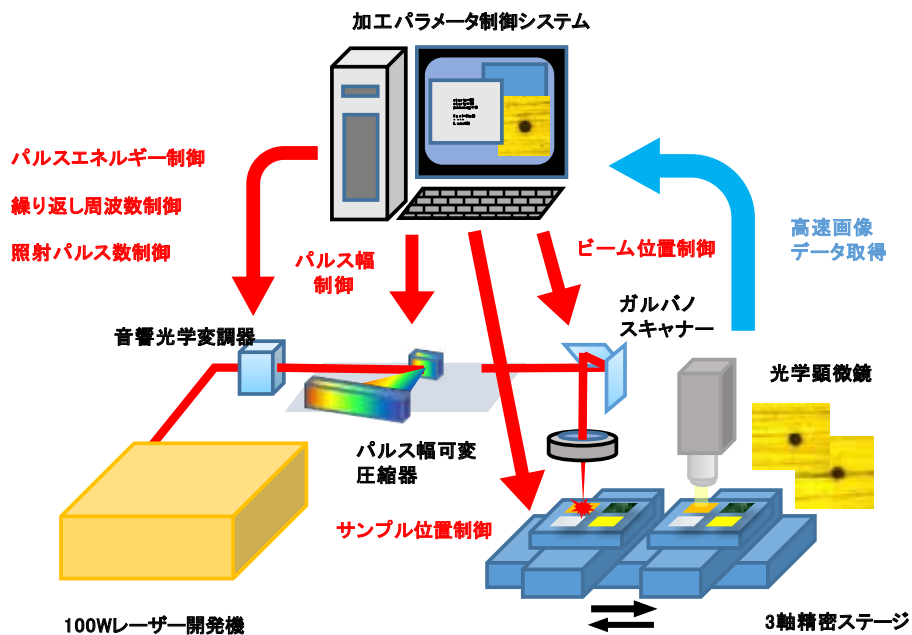
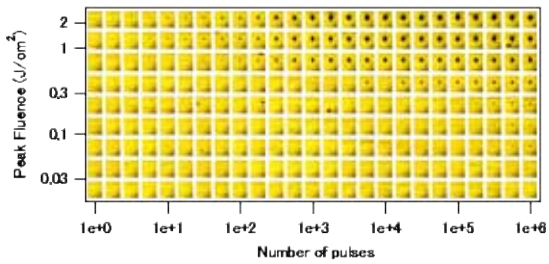
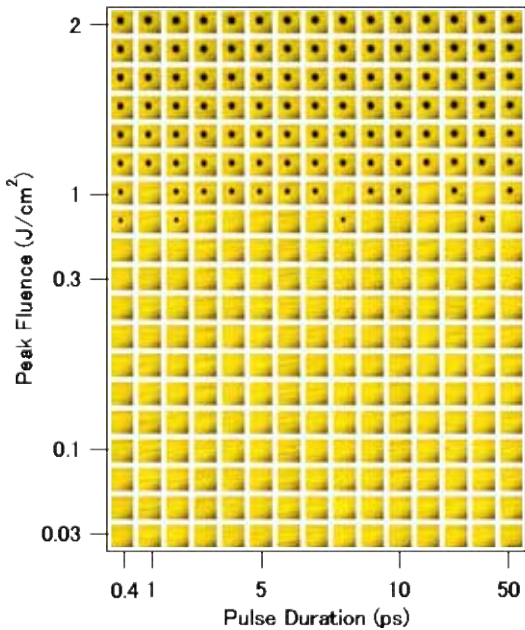


Fig. 7 Schematic diagram of the parameter-variable laser processing system.



(a) Peak fluence vs. number of irradiated pulses. The pulse duration was 330 fs.



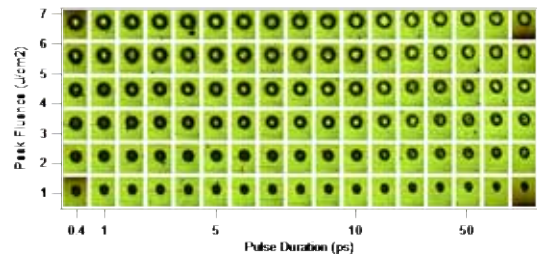
(b) Peak fluence vs. pulse duration. The number of irradiated pulses was 10000.

Fig. 8 Microscope images of ablation craters on copper.

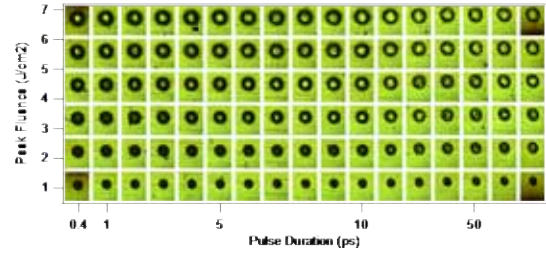
### 5 パラメータ可変加工の実例

開発した加工システムの性能評価のために、銅・ステンレス及びシリコンの基板にパラメータ可変のアブレーション加工を試みた。銅については、可変パラメータとして、パルスエネルギー（フルエンス）と照射パルス数、パルスエネルギー（フルエンス）とパルス幅の2通りの組み合わせで可変し、基板上にマトリックス状にアブレーションを行った。レーザーパラメータの可変制御とステージ上の加工位置制御はすべて単一の制御プログラムから自動で行っている。さらに、加工後、光学顕微鏡の直下にステージを移動させ、すべての加工痕の観察と画像取り込みをプログラミング制御で行い、二次元マッピングとして配置したものを Fig. 8 に示す。

パルスエネルギーとパルス幅の組み合わせについては、比較のため、ステンレス(SUS304)やシリコンについても行ったので、結果を Fig. 9 に示す。画像

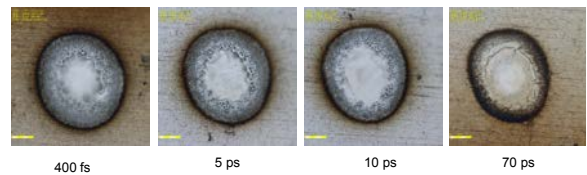


(a) SUS304

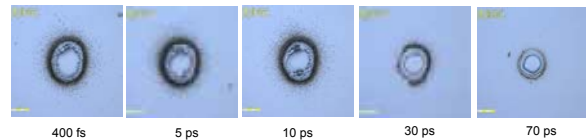


(b) Si

Fig. 9 Microscope images of ablation craters on SUS304 (a) and silicon (b). The number of irradiated pulses was 100 in both cases. The green background is due to incorrect white balance of the camera.



(a) SUS304 (peak fluence 6.6 J/cm<sup>2</sup>)



(b) Si (peak fluence 2.2 J/cm<sup>2</sup>)

Fig. 10 Microscope images of ablation craters on SUS304 (a) and silicon (b) with various pulse durations. The number of irradiated pulses was 100 in both cases.

が緑色がかっているのは、撮像カメラのホワイトバランスが適正でなかったため、今は適正に調整されている。Fig. 10 に代表的なパルス幅における顕微鏡画像の拡大図を示す。10 ps よりも短いパルス幅領域では加工痕の辺縁部に微細構造が顕著に見られたが、70 ps においてはなめらかな構造となっており、パルス幅の伸長に伴う熱による熔融に由来するものと考えている。

今回のような表面のアブレーション加工の場合は、加工が短時間で完了するために、これら数百点のデータを加工から観察まで含めて 30 分程度で一括取得することができた。切断や穴あけなどにおいては

加工自体に相応の時間を要すると思われるが、本システムの自動制御プログラムによって、手動調整による手間を最小限に抑えて、最適加工条件を探索するための大量のデータを効率よく収集することが可能となった。

## 6. まとめ

レーザー加工における最適加工条件を効率よく探索するためのパラメータ可変高出力ファイバレーザーシステムを開発した。繰り返し 1 MHz、パルス幅約 400 fs において、平均出力 100 W を達成した。可変パラメータとして、パルス幅は 400 fs から 400 ps までの約 3 桁、パルスエネルギーは 2 桁、照射パルス数はシングルショットから連続までの範囲で可変でき、繰り返し周波数は 1 MHz の任意分周に設定可能である。また、単一のプログラムからレーザーのパラメータ可変制御と加工ステージの設定・加工痕の観察画像取得まですべてを一括制御できる加工装置の開発を行い、基板上的パラメータ可変アブレーション加工を実証した。本装置により熱的・非熱的領域の境界をまたぐ時間領域を含む様々な条件下における加工試験を行い、最適加工条件を探索するための大量のデータを効率よく収集することが可能となった。

## 謝 辞

本研究に関する有益な助言をいただいた東大物性

研の趙智剛研究員（現在は山東大）、小菅淳研究員に感謝する。この成果の一部は、新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）「高輝度高効率次世代レーザー加工」の委託業務の結果得られたものである。

## 参 考 文 献

- (1) B. Rethfeld, D. S. Ivanov, M. E. Gardia, and S. I. Anisimov: Modeling ultrafast laser ablation, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, (2017), 193001.
- (2) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann: Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A* **63**, (1996), 109.
- (3) 橋田昌樹, 藤田雅之, 節原裕一: フェムト秒レーザーによる物質プロセッシング, *光学* **31**, (2002), 621.
- (4) S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling: Ablation of metals by ultrashort laser pulses, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**, (1997), 2716.
- (5) A. Ancona, F. Röser, K. Rademaker, J. Limpert, S. Nolte, and A. Tünnermann: High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system, *Opt. Express* **16**, (2008), 8958.
- (6) C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, B. Çetin, D. K. Kesim, Ö. Akçaalan, S. Yavaş, M. D. Aşık, B. Öktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, and F. Ö. Ilday: Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature* **537**, (2016), 84.

# 高機能レーザー加工を実現する位相制御技術

## Phase-control Technique for High-functional Laser Processing

伊藤晴康\*, 朝稲裕一\*\*

\*浜松ホトニクス株式会社 レーザ事業推進部  
(〒434-8601 静岡県浜松市浜北区平口 5000)

\*\*浜松ホトニクス株式会社 固体事業部  
(〒435-8558 静岡県浜松市東区市野町 1126-1)

Haruyasu ITOH

\*Laser Promotion Division, Hamamatsu Photonics K.K.  
(5000 Hirakuchi, Hamakita-ku, Hamamatsu City, 434-8601, Japan)  
E-mail: haruyasu@lpd.hpk.co.jp

\*\*Solid State Division, Hamamatsu Photonics K.K.  
(1126-1 Ichino-cho, Higashi-ku, Hamamatsu City, 435-8558, Japan)

空間光位相変調器を用いた位相制御技術により、QR コードやデータマトリックスコード等の一括多点加工、内部加工における球面収差補正、多光束干渉を用いた周期微細構造の形成等が報告されている。一方で、近年における超短パルスレーザーの高出力化に伴い、高い耐光性を有する液晶型空間光位相変調器 (LCOS-SLM) が開発されつつある。また、位相制御を行うためのソフトウェアも充実しつつあり、空間光位相変調器による位相制御技術を用いた高機能レーザー加工を簡便に行える環境が整えられつつある。本稿では、空間光位相変調器シリーズの概要を述べるとともに、様々なレーザーに対する LCOS-SLM の耐光性、ならびにレーザー加工における位相制御技術の適用例に関して概説する。

Phase-control technique using a spatial light modulator (LCOS-SLM) enables us to enhance the efficiency and accuracy of laser processing such as batch multipoint processing like two-dimensional codes, spherical aberration correction, and precise periodic structuring by multiple-beam interference. The temperature-controlled LCOS-SLM indicates enough stability to various high-power lasers. The enhanced software for LCOS-SLM improved the convenience in laser processing. In this paper, we describe the properties of LCOS-SLM with high light stability, and the various application in high performance laser processing.

**Key words:** Spatial Light Modulator, Computer-generated hologram, Laser processing

### 1. はじめに

近年、レーザー光の波面を制御するための空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) の必要性が高まりつつあり、レーザー光を透明材料内部に集光する際に発生する球面収差の補正<sup>1)</sup>、超短パルスレーザーの分散補償<sup>2)</sup>、多光束干渉を用いた微細周期多点一括加工等の様々な用途が実現されている<sup>3)</sup>。特に、CMOS 技術を基盤とした液晶型空間光位相変調器 (LCOS-SLM: Liquid Crystal On Silicon-Spatial Light Modulator)<sup>4)</sup>は、高解像度・高精度に波面が制御でき、またコンピュータ制御による書換えが可能であるため、レーザー加工に新たな付加価値を創出するデバイスとして注目されつつある。一方、非熱微細加工を可能とするイッテルビウム (Yb) 系の超短パルスレーザーの著しい技術進歩に伴い、製造ラインにおいて高

出力・高繰返しの超短パルスレーザーが実用化されつつある。ピコ秒パルスをレーザーの繰返し周期よりも小さい数ナノ秒周期のパルス群として発生させるバーストモードとする事で、同じ平均出力 (パルスエネルギーが小さい) にも関わらず、加工効率を向上させることが可能となる。レーザー光を時間的に分離する技術であるバーストモードに対し、空間光変調器を用いた波面制御は、レーザー光を空間的に分離する技術である。超短パルスレーザーの高出力化に伴い、一括多点生成を用いた加工用途が広がりつつある<sup>5)</sup>。また、多点分岐を行うための位相データと球面収差を補正するための位相データとの併用が可能であるため、トレーサビリティを目的とした医療部品への 2 次元コードの内部マーキング等への要求が高まりつつある。本稿では、LCOS-SLM による位相制御技術を用いた高機能レーザー加工を概説する。

表 1 LCOS-SLM の損傷と位相特性が観測されなかったレーザーの特性

種類	波長	パルス幅	周波数	ビーム径 [at 1/e <sup>2</sup> ]	平均強度	LCOS-SLM
Fiber	1030 nm	17.8 ns	40 kHz	8.9 mm	50 W	C14280-03
Yb:YAG	1030 nm	0.9 ps	200 kHz	7.8 mm	20 W	C14280-03
Yb:YLF(SHG)	527 nm	250 ns	1 kHz	9.3 mm	20 W	C14280-04M
Yb:YAG(SHG)	532 nm	15 ps	100 kHz	8.3 mm	6 W	C14280-04M

表 2 ピコ秒レーザー (532 nm, 12 W, 15 ps, 100 kHz, トップハット) を 100 時間照射した前後の特性

種類	総位相変調量 ( $\pi$ rad)	波面精度 ( $\lambda$ )
試験前	2.2197	0.011
試験後	2.2302	0.041
変化量	0.0105	0.03

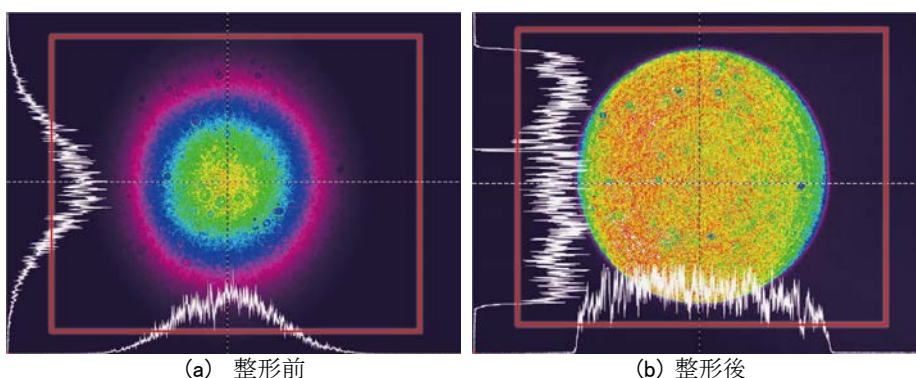


図 1 LCOS-SLM 上でのビームプロファイル (赤い枠が LCOS-SLM の変調面の大きさに相当)

## 2. 空間光位相変調器 (LCOS-SLM)

### 2.1 LCOS-SLM の耐光性

LCOS-SLM は, CMOS 回路と, 透明電極が施された透明基板の間に平行配向ネマティック液晶層が挟まれた構造を有する液晶デバイスである. 透明基板と CMOS 回路には配向膜が形成されており, パソコンのグラフィックスボードから出力されるデジタル画像信号 (8 bit=256 階調) の階調値に応じて, 2次元状に配列された画素に照射される光の位相が制御される. 専用コントローラにより, 画像信号に対して位相変調が線形に変化する.  $2\pi$  よりも大きい位相変調が必要とされる場合は, 所望の位相量を  $2\pi$  で折り返して表示する位相折り畳み技術<sup>9)</sup>を用いることにより実現できる.

液晶デバイスである LCOS-SLM をレーザー加工に適用した場合に, 最も懸念される特性はレーザーに対する耐光性である. 通常, 素子の破壊が生じる破壊しきい値に対して位相変化が生じる動作しきい値が低い場合, 耐光性を評価する場合には, 位相変化が生じる動作しきい値が指標となる. 例として, レーザー光を連続して 8 時間照射した場合に, デバイスの損傷と位相特性の変化の両方ともが観測されなかったレーザーの特性を表 1 に示す. いずれも後述する空

間光位相変調モジュールにより LCOS-SLM の変調部の温度を一定に保った場合の結果である. 超短パルスレーザーの第 2 高調波を照射した場合は, 液晶において 2 光子吸収に伴う吸収が発生するため, 基本波と比較して耐光性が低くなる. そこで, ホモジナイザにより LCOS-SLM 上での強度分布をトップハットとすることにより, 耐光性を向上させることが可能となる. 表 2 は, 中心波長 532 nm, 平均強度 12 W, パルス幅 15 ps, 繰返し周波数 100 kHz のレーザー光を, ホモジナイザにより, 直径 11 mm のスーパーガウシアンに整形し, LCOS-SLM に連続 100 時間照射した場合の総位相変調量および波面精度を計測した結果である. 図 1(a)はホモジナイザを使用しない場合の LCOS-SLM 上での強度分布であり, 表 1 はこの状態に対する結果となる. 一方, 図 1(b)はホモジナイザによって強度分布を均一化した場合の LCOS-SLM 上での強度分布であり, 表 2 はこの状態に対する結果となる. 入射光の強度分布を均一化, すなわちエネルギー密度を低減させることにより, 耐光性が 6 W から 12 W に向上し, LCOS-SLM とホモジナイザとの併用が有効であることが確認された.

### 2.2 水冷型空間光位相変調器

LCOS-SLM の特性変化や熱的破壊を回避するた



図 2 水冷方式 LCOS-SLM の外観

めには、レーザ光照射に伴って発生する蓄積熱を効率よく外部に放熱させる必要がある。図 2 は筐体内部に水冷型ヒートシンクを内蔵し、放熱効率を高めるために最適化設計された水冷方式の空間光位相変調器である。液晶変調部が搭載されたヘッド基板裏面には、変調部の CMOS チップが取付けられたセラミック基板に直接接触するための開口部が設けられており、この開口部にヒートシンクを接触させることにより蓄積熱が循環水に吸熱される。水冷方式とすることにより、耐光性能が従来の  $40 \text{ W/cm}^2$  から  $210 \text{ W/cm}^2$  以上まで高められ、 $100 \text{ W}$  級の高強度レーザを用いたレーザ加工への適用が可能となる。

### 2.3 空間光位相変調モジュール

レーザ光の位相制御技術を産業用途へ適用させるためには、空間光変調器の利便性および汎用性を向上させる必要がある。そこで、LCOS-SLM の性能を最大限に活用し、かつ既存の光学システムへの導入を容易にする空間光位相変調モジュール C14280 を開発した。図 3 に空間光位相変調モジュールの概念図を示す。本モジュールは、入射光（水平偏光）をプリズム型のミラーにより LCOS-SLM（画素サイズ： $12.5 \mu\text{m}$ 、有効領域： $16 \times 12.8 \text{ mm}$ 、画素数  $1280 \times 1024$ ）へと切り出し、LCOS-SLM により入射光の位相を制御した後にプリズム型のミラーを介して再び元の光軸上に戻す構成となっている。これにより、装置の小型化、ならびに安定性・操作性の向上が実現されるだけでなく、空間光位相変調モジュールを既存の光学系の光軸上に配置するだけで、容易に位相制御を行うことが可能となる。本モジュールでは、ヘッド基板裏面の開口部に銅ブロックが装着され、銅ブロック内部に埋め込まれたサーミスタの抵抗値がペルチェ温度コントローラにフィードバックされることで銅ブロックの温度が一定に保たれる。さらに、モジュール筐体に取り付けられた空冷ファンを用いて放熱器を 2 次冷却させることで、平均強度が数十ワット級のレーザ光を制御することが可能となる。また、図 4 に示されるように、上記の位相変調部（上段）と駆動回路部（下段）を一体化させ、これらを

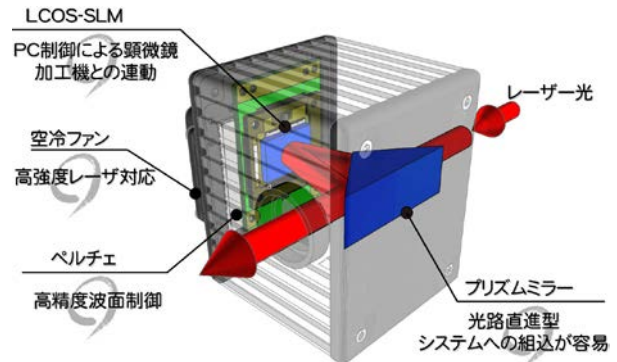


図 3 空間光位相変調モジュールの構造



図 4 空間光位相変調モジュールの外観

AC アダプタにより駆動させることにより、システム構築時におけるユーザの負担が軽減される。

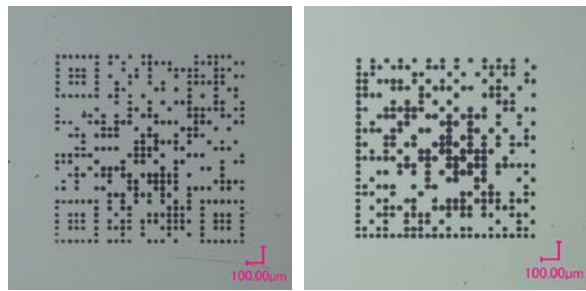
尚、空間光変調器によって制御された空間位相（波面）は、常に同じ波面を維持しながら伝播することは無く、伝播距離に伴ってビームの形状ならびに波面に変化が生じる。そのため、両側テレセントリックリレーレンズ等により空間光変調器の変調面を集光レンズの後側焦点面に結像させる必要がある。

## 3. レーザ加工への位相制御技術の適用例

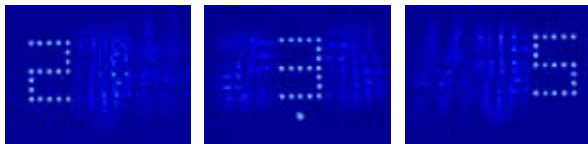
### 3.1 多点同時加工による生産効率の向上

#### 3.1.1 2次元コードマーキング

近年、医療器具や電子部品の製造において、品質管理の観点から製品もしくは部品の製造過程を追跡（トレース）する必要性が生じ、QR コードや DataMatrix コード等の 2 次元コードをマーキングすることで、より多くの情報を限られたスペースに付与する需要が高まりつつある。現在のレーザマーキングでは、ガルバノミラーにより集光点を走査することにより所望の 2 次元コードがマーキングされている。近年では、微小電子部品への数百  $\mu\text{m}$  オーダーのマーキングの需要が高まりつつあるが、このような微小マーキングでは対物レンズが用いられるために、ガルバノミラーでは加工困難なケースが生じつつある。そのため、高出力レーザの集光点を任意



(a) QR コード (b) DataMatrix コード  
 図 5 2次元コードのマーキング加工例



(a)-5 mm (b) 焦点面 (c) +5 mm  
 図 6 ORA 法によって生成された3次元多点分岐



(a)-5 mm (b) 焦点面 (c) +5 mm  
 図 7 3次元多点分岐による加工痕

の多点に分岐することが可能な位相制御技術が注目されつつある。

光利用効率の高い空間光位相変調器は、コンピュータにより位相パターンを書き換える事が可能であるため、部材ごとに異なる2次元コードをマーキングする用途に適したデバイスである。集光点を多点に分岐するための位相情報(CGH: 計算機ホログラム)は、回折理論を基礎としたフーリエ光学解析により求めることが出来る。CGHは反復フーリエ変換アルゴリズム<sup>7)</sup>(IFTA: Iterative Fourier Transform Algorithm)により算出される。空間光位相変調モジュール C14280 に搭載されるライブラリを用いることで、QRコードやDataMatrixコードの作成、そしてこれらのコードを生成するためのCGHが自動的に作成されるため、簡便にマーキングを行うことが可能となる。図5は、本機能を用いて、アルミ蒸着面にQRコードやDataMatrixコードのマーキングを行った実例である。本例では、ガルバノミラー、f-θレンズ( $f=125$  mm), ならびに空間光位相変調モジュールを組み合わせてマーキングを行っているが、対物レンズを用いることにより、数百  $\mu\text{m}$  オーダーのマーキングも可能である。尚、2次元コードは、2次元配列のON/OFFから情報を読み取るため、多点で生成された以下の加工痕から2次元コードを直接読み取ることが可能である。

### 3.1.1 3次元一括多点分岐

上記の2次元コードマーキングで使用された

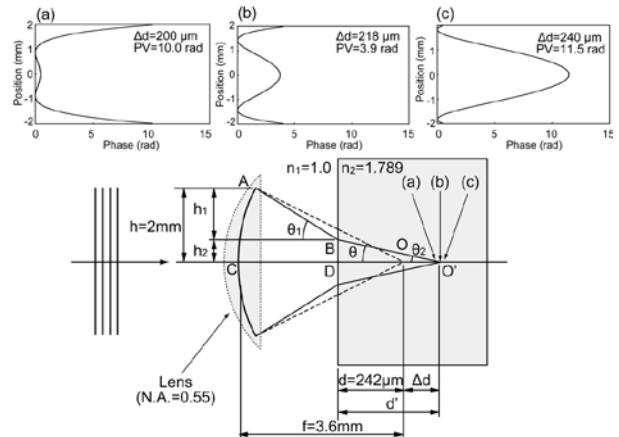


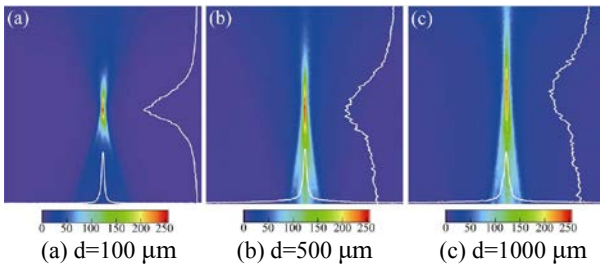
図 8 位相制御技術を用いた球面収差補正の概念

IFTA 法は、集光点を同一平面内に分岐する手法であるが、最適回転角法<sup>8)</sup>(ORA: optimal-rotation-angle method)を用いることにより、集光点を立体的に多点に分岐することが可能となる。図6は、焦点距離300 mmのレンズの焦点面近傍にHe-Neレーザーの集光点を分岐した状態をビームプロファイラで観測した結果である。焦点面の5 mm手前に2というパターン、焦点面に3というパターン、5 mm後方に5というパターン(いずれも19点)が同時に生成されていることが確認される。図7は、対物レンズ(N.A.=0.45)により、フェムト秒レーザー(780 nm, 180 fs, 1 kHz)を合成石英内部に集光した際の加工痕を観測した結果である。表面から2000  $\mu\text{m}$ の深さにレンズ焦点面を設定し、焦点面を含めて上下に多点が同時に形成されることにより、レーザー光を走査することなく立体的な加工痕が同時に形成されることが確認された。

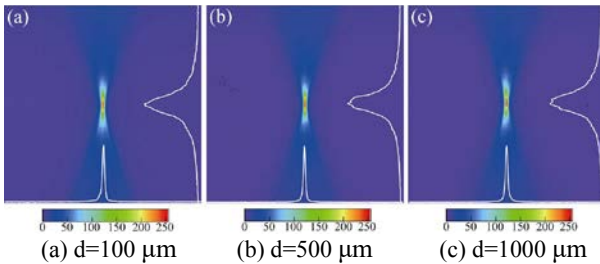
### 3.2 球面収差補正による品質改善

透明材料内部にレーザー光を集光する内部加工では、高いエネルギー密度を実現させるために高N.A.の対物レンズが用いられる。しかしながら、透明材料内部にレーザー光が集光される場合、異なる材料間の屈折率ミスマッチに依存した球面収差が発生する。球面収差は、集光領域を肥大化させると共にエネルギー密度も低下させるため、加工精度ならびに加工効率を劣化させる要因となる。このような問題を回避するために、入射前の波面を逆補正することによる球面収差補正が有効となる。位相制御技術を用いた球面収差補正の概念を以下に記す。

図8に、球面収差を補正する波面を作成するための概念を示す。屈折率が均一な媒質中を光が伝播する場合、入射平面波はレンズによって曲率半径がレンズの焦点距離  $f$  に等しい球面波に変換され、最終的に同一位置に集光される(図中破線)。一方、屈折率が  $n_1$  の媒質から屈折率  $n_2$  の媒質へと伝播する場合、光線が境界面で屈折する。この際、光軸から



(a)  $d=100\ \mu\text{m}$  (b)  $d=500\ \mu\text{m}$  (c)  $d=1000\ \mu\text{m}$   
 図 9 球面収差が発生している状態での集光部を側面から観察した結果



(a)  $d=100\ \mu\text{m}$  (b)  $d=500\ \mu\text{m}$  (c)  $d=1000\ \mu\text{m}$   
 図 10 球面収差を補正した状態での集光部を側面から観察した結果

の距離に応じて屈折角が異なるために光線ごとに集光位置が光軸方向に異なる、いわゆる球面収差が発生し、光線が光軸と面内の両方の方向に広がる。そこで、全ての光線が同一点に集光するように、レンズに入射するレーザー光の波面をあらかじめ制御することによって球面収差が補正され、集光状態が改善される(図中実線)<sup>1)</sup>。しかしながら、深い位置では球面収差が増大するので、これを補正するためには大きな位相変調量が必要となる。しかし、空間光変調器の解像度と位相変調量は有限であるため、広い深さ範囲に対応するためにはこの点を考慮して補正波面を設計する必要がある。空間光位相変調モジュール C14280 に搭載されるライブラリで 사용되는手法では、補正波面の PV 値が最小となるように集光点 O' を設定することで、広い深さ範囲での球面収差補正が可能となる。

図 9 および図 10 は、波長  $660\ \text{nm}$  のレーザー光を、対物レンズ(オリンパス, LMPlan50IR, N.A. = 0.55,  $f=3.6\ \text{mm}$ )を用いてアクリル内部( $n=1.49$ )に集光した際の集光部を側面から拡大観測した結果である。球面収差が発生している状態では、集光部の深さが(a)  $100\ \mu\text{m}$ , (b)  $500\ \mu\text{m}$ , (c)  $1000\ \mu\text{m}$  と深くなるにつれて集光状態が悪化していく様子が確認される。これに対して、空間光位相変調器によって球面収差を補正した場合には、いずれの深さにおいても良好な集光状態が維持される。

位相制御による球面収差補正技術は、CGH を用いた多点生成技術との併用も可能である。例えば、ガラス等の透明材料内部に 2 次元コードをマーキングする場合は、多点を生成するための位相データ(CGH)と球面収差を補正するための位相データとを

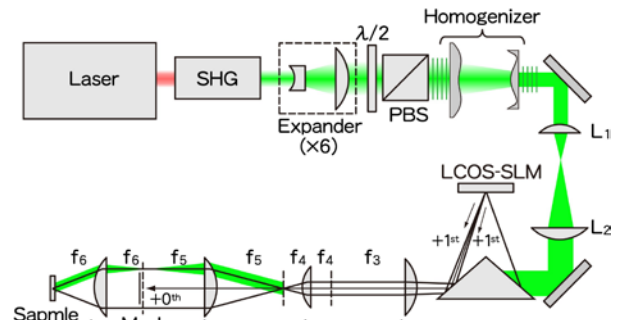
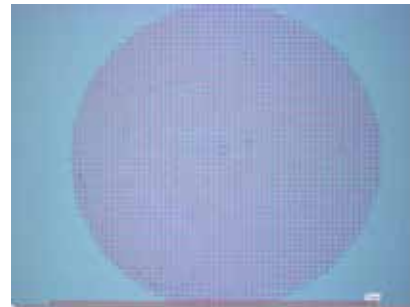
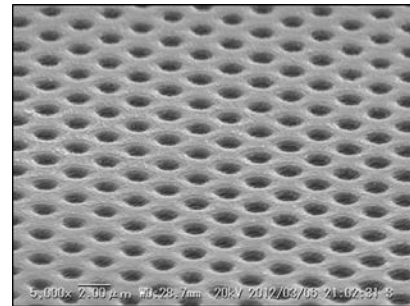


図 11 多光束干渉加工の構成例



(a) 形成された微細周期構造の全体像



(b) SEM による拡大観察像

図 12 多光束干渉加工による加工結果

足し合わせることで、任意の深さにおいて良好なマーキングが可能となる。

### 3.3 多光束干渉加工による高機能化

複数の光束に分岐されたレーザー光を、数度～数十度の角度で試料に照射した際に生じる多次元の干渉を利用すると、加工面に波長オーダーの微細構造を形成することが可能になる<sup>9)</sup>。この際、コンピュータ制御による書換えが可能な空間光位相変調器を用いることにより、微細構造の形状や間隔を制御することが可能となる。

図 11 は、筆者らが行った多光束干渉加工システムの構成である。光源には LD 励起 Yb:YAG 超短パルス高強度レーザー(浜松ホトニクス, L11590)の第 2 高調波を用いた。中心波長は  $515\ \text{nm}$ , パルス幅は約  $1\ \text{ps}$ , 最大出力は  $2\ \text{W}$  である。前記レーザーから出射されるガウシアンビームは、ビームエキスパンダおよびホモジナイザにより均一な強度分布に整形される。ホモジナイザ出射後の均一な強度分は、後段の拡大結像光学系 ( $f100 \times f300$ ) により、LCOS-SLM 上では直径  $11\ \text{mm}$  程度の均一な強度分

布に整形される。干渉加工光学系では, LCOS-SLMの位相変調面と加工面とは結像関係にあり, 加工に必要なフルエンスを確保するために2段の結像縮小光学系が用いられた。L3, L4, L5には, それぞれ焦点距離 200 mm, 60 mm, 300 mmの凸レンズが用いられ, L6には20倍 (N.A.=0.4, 焦点距離 9 mm)の対物レンズが用いられた。この場合, LCOS-SLM後段の結像光学系全体での倍率は0.009倍になる。また, 結像光学系内のフーリエ面に設けられたマスクにより+1次光以外の不要光が遮断され, 干渉パターン生成に必要な光束だけが選択される。これにより, 複数分岐された光束が加工ワーク上で重なり合い, 干渉パターンが形成されることで周期的微細加工が実現される。回折光学素子 (DOE: Diffractive Optical Element) が用いられる手法<sup>10)</sup>と異なり, 空間光位相変調器によるホログラムが用いられる本手法は, ホログラムを切り替えることにより加工形状や加工間隔を任意に制御できる特徴を有する。

本実験では, 入射光を4光束に分岐して, ガラス基板上に成膜されたITO (Indium Tin Oxide) 薄膜に微細周期穴加工を行った。加工部を顕微鏡観察した結果を図12(a)に, 電子顕微鏡 (SEM) により観察された画像を図11(b)に示す。孔数は約2500, 一孔の直径, 孔と孔の間隔共に約1.5  $\mu\text{m}$ であった。ガウシアンビームを用いた場合にはフルエンスの高い中央付近が選択的に加工されてしまうが, ホモジナイザを用いることにより, 加工面全域に渡って形状ならびに深さが均一な周期微細穴加工が実現された。

#### 4. まとめ

空間的な位相分布を高精度に制御することが可能な空間光位相変調器 LCOS-SLM, ならびに高精度波面制御技術の加工応用例として, 多点に分岐されたレーザ光を用いた2次元コードマーキング, レーザ光を透明材料内部に集光した場合に生じる球面収差補正技術, さらに波長オーダの微細構造を形成する多光束干渉加工を紹介した。近年では, レーザ加工に新たな付加価値を創出するためのツールとして空間光位相変調器が着目されつつあり, 空間光位相変

調器の具体的な応用分野が示され, 性能に対する要求も具体化し, 実応用が検討されるようになった。今後は, さらに幅広い応用分野に利用されていくことを期待したい。

#### 5. 参考文献

- (1)Haruyasu Itoh, Naoya Matsumoto, and Takashi Inoue: Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller, *Optics Express*, **17**, (2009), 14367-14373.
- (2)Peng Xi, Yair Andegeko, Dmitry Pestov, Vadim V. Lovozoy, Marcos Dantus: Two-photon imaging using adaptive phase compensated ultrashort laser pulses, *J. Biomed. Opt.*, **14**, (2009), 014002.
- (3)伊藤晴康, 齋藤寛, 井上卓: 超短パルスレーザ加工への高精度波面制御技術の適用, *レーザー加工学会誌*, **20**, (2013), 133-138.
- (4)T. Inoue, H. Tanaka, N. Fukuchi, M. Takumi, N. Matsumoto, T. Hara, N. Yoshida, Y. Igasaki, and Y. Kobayashi: LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase-only modulation, *Proc. SPIE Photonics West*, (2007), 6487.
- (5)伊藤晴康, 長谷川智士, 早崎芳夫, 豊田晴義: 空間光位相変調器を用いたホログラフィックレーザ加工, *レーザー研究*, **43**, (2015), 227-232.
- (6)GHIGLIA Dennis C., and PRITT Mark D.: *Two-Dimensional Phase Unwrapping. Theory, Algorithms, and Software*, Wiley-Interscience, (1998).
- (7)F. Wyrowski and O. Bryngdahl.: Iterative Fouriertransform algorithm applied to computer holography, *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, (1988), 1058.
- (8)Jörgen Bengtsson: Kinofom design with an optimal-rotation-angle method, *App. Opt.*, **33**, (1994), 6879-6884.
- (9)T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, and H. Misawa: Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, (2001), 725-727.
- (10) T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, and H. Misawa.: Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001), 725.

# 超短パルスレーザーを用いた 特殊ガラスの精密加工技術

Precise machining for specialty glass by ultrashort pulse laser

平尾 徹\*

\*日本電気硝子株式会社 電子部品事業部  
(〒520-8639 滋賀県大津市晴嵐二丁目 7 番 1 号)

Toru HIRAO\*

\*Nippon Electric Glass Co., Ltd. Electronic Products Division  
(7-1, Seiran 2-chome, Otsu, Shiga 520-8639, Japan)  
E-mail: tshintaku@neg.co.jp

本稿では、超短パルスレーザーを用いた特殊ガラスの精密加工技術について紹介する。超短パルスレーザーは、高いパルスエネルギーを有するため、難加工材料の精密加工への適用が期待される。

一方、ガラスは、ディスプレイ、太陽電池、照明、光通信等の製品において幅広く使用されている。しかしながら、ガラスは割れやすいという典型的な難加工材料であることから、さらに広範な製品への適用が阻害されている。そこで、ガラスへの透過率が高い発振波長をもつ超短パルスレーザーを使用することで、様々なガラスへの精密加工を行った。パルス幅、繰返し周波数等を中心にレーザー加工条件を最適化することで顧客の要求を満足することができ、顧客での評価を経て、その一部は実用化された。

Glass products are widely used in all around us, e.g. displays, solar cells, lighting, optical communication. For further expansion of glass applications in the future, it is necessary to approach by development of newly precision machining of a brittle glass material to give new functions. In this paper, ultrashort pulse laser with oscillation wavelength of high transmittance in the glasses was applied to the machining of various glasses. By optimizing laser machining conditions, mainly on the pulse width and repetition frequency, unique products that could not be achieved by conventional method was developed successfully, where parts of them have started to be put into practical use.

**Key words:** Laser machining, Ultrashort pulse laser, Cutting, Drilling, Jointing

## 1. はじめに

ガラスは、その組成を無限に変更することができ、それぞれの用途に見合う組成に最適化することができる。そのため、ディスプレイ、太陽電池、照明、光通信等の様々な製品において、基板、カバーガラス、レンズなどとして使用されており、製品サイズ、デザイン、性能を決めるキーマテリアルの一つになっている。しかしながら、ガラスは割れやすいという典型的な難加工材料であることから、広範な製品への適用が阻害されている。

一方、超短パルスレーザーは、今までにない高いパルスエネルギーを有するため、例えば透明材料内部へ集光照射すると、集光点近傍の微小領域において多光子プロセスなどによる非線形光吸収が生じる。この現象を利用して様々な難加工材料の精密加工が

期待され、様々な用途で開発が進められている<sup>1)~5)</sup>。

その中で我々は、ガラスへの透過率が高い発振波長をもつ超短パルスレーザーを利用することで、様々なガラス材料に対して様々な精密加工をトライした。本稿ではその事例についていくつか紹介する。

## 2. 超短パルスレーザー装置

レーザーが発振している時間の幅をパルス幅という。また、ピコ秒からフェムト秒というごく短いパルス幅をもつレーザーを超短パルスレーザーと称している。本稿において使用した超短パルスレーザー装置の概要について説明する。

装置概観写真を図 1 に示す。レーザー発振器は、Coherent 社製 Monaco 1035-40-1。中心発振波長は 1035nm、最大出力は 40W、最大繰返し周波数は 1MHz である。

1035nm の直線透過率が 90%以上（厚み：1mm 時）のガラス材料を選択して加工した。



図 1. 超短パルスレーザー加工装置  
本装置の主な特徴は、以下の 3 点。

- ・パルス幅が可変（400fs～10ps）
- ・固定光学ヘッドとガルバノヘッドを同時搭載  
それらを連動させたオンザフライ加工が可能
- ・パルス波を分配する機能（バーストモード）搭載

### 3. 超短パルスレーザーを用いたガラス加工技術

#### 3.1 高アスペクト比を有する孔あけ加工

光スイッチ用途として、光ファイバーを集積保持できるマイクロホールアレイ（以下 MHA）と呼ばれる多数孔あき部材が求められている。厚みは 1mm 以上で孔径精度は $\pm 1\mu\text{m}$ 、位置精度も $\pm 1\mu\text{m}$ と非常に厳しい精度が要求される。その部材として熱的に安定なガラスが期待されているが、孔あけ時にカケやクラックが発生すると、強度が極端に低下し、部材として長期信頼性に欠けてしまう。当社では、超短パルスレーザーを用いて、そのパルス幅、繰り返し周波数等のパラメーターを最適化し、且つレーザー加工環境を工夫することで、カケやクラックなく、高精度に複数の孔加工に成功した。加工した 176 穴について孔径精度： $126\pm 1\mu\text{m}$ 、位置精度も $\pm 1\mu\text{m}$ を達成した。

図 2 に作成した MHA の試作品写真を示す。



図 2.MHA 試作品（左：全体、右：拡大）  
（ガラス材料：石英ガラス 1mm 厚）

#### 3.2 極薄板ガラス：“Glass-ribbon”の孔あけ加工

当社の製品である“Glass-ribbon”は厚みが 4～20 $\mu\text{m}$ と非常に薄いガラスである。そのため、耐熱性やガスバリア性等、ガラスが本来持っている特徴にフレキシビリティや加工性を付与できる。図 3 に“Glass-ribbon”の写真を示す。



図 3. “Glass-ribbon”の写真

この“Glass-ribbon”を所望のサイズ、形状に精密に切断すること、および微小な孔を複数形成することにより、細胞等をサイズで分けることが可能な極薄ガラスフィルター等医療用途への拡販が期待できる。

しかしながら、その薄すぎる厚みのため、加工時にクラックを形成しやすく、加工が非常に難しい。筆者らは、加工時の“Glass-ribbon”の固定方法、およびレーザー加工条件を最適化することで、加工時にクラックを発生させることなく、“Glass-ribbon”の微細加工に成功した。図 4 に“Glass-ribbon”に複数の孔を形成した試作品写真を示す。



図 4. “Glass-ribbon”孔あけ試作品  
サイズ：20×20mm、厚み：15 $\mu\text{m}$ 厚  
孔径：50 $\mu\text{m}$ 、孔ピッチ：100 $\mu\text{m}$

#### 3.3 半導体用基板ガラスのマーキング加工

主に工程管理やトレーサビリティを目的として、ガラス基板の表面あるいは内部に識別可能な数字や文字等のマーキングが施される。しかしながら、マーキング処理はガラスに微細なキズを付与させて行うため、基板ガラス自体の強度劣化が危惧される。

一方、様々な情報を識別番号に付与させるため、マーキング自体も複雑化しており、それに伴う視認性の向上も不可欠となっている。当社では、本用途にて、様々な組成を有する基板ガラスを供給しており、それぞれに適したレーザー加工条件を選択し、上記問題をクリアさせたマーキング処理を実現している。

図 5 にマーキング処理部の写真を示す。

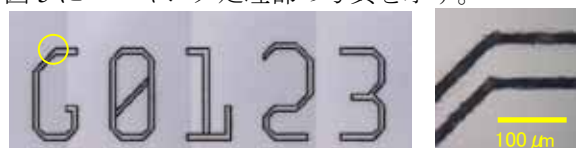


図 5.マーキング処理部（ホウ珪酸ガラス表面）  
（左：全体、右：○部拡大）

### 3.4 薄膜パターニング加工

次に、ITO 透明電極薄膜のパターニング加工技術について紹介する。レーザーによる ITO 等の薄膜パターニング技術は、フォトリソのような前後の処理工程やマスクが不要なドライプロセスで、微細な加工も可能であり有用なプロセスとして期待されている。従来課題であったレーザー加工時に発生するデブリについては、レーザーパワーのピーク出力およびビームプロファイルを最適化することにより、解決することができた。また、下地のガラス基板に対して吸収のない波長のレーザーを選択することでガラス基板へのレーザーによるダメージを低減することができている。

レーザーによるパターニング加工の外観写真を図 6 に示す。白く映っている部分がレーザーにより ITO 薄膜をトリミングした部分である。また、マイクロスコブによるレーザーパターニング部分の断面観察結果を図 7 に示す。

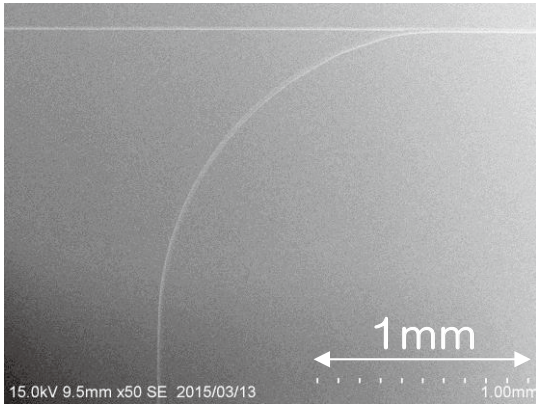


図 6. ITO 薄膜のレーザーパターニング

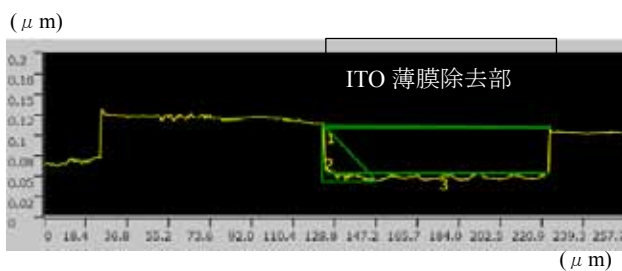
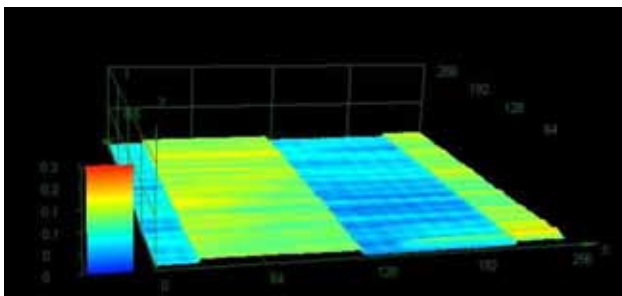


図 7. レーザーパターニング部の断面観察

### 3.5 レーザー接合

デバイスの長寿命化のためにデバイスの封止技術の開発が近年活発になっている。ガラスは樹脂と比較して化学的、熱的耐久性や化学物質の遮断性に優れるため、封止材料として格段に優れている。現在、ガラスリッド（デバイスの蓋として使用される板状のガラス）とセラミックパッケージ（アルミナ等のセラミック材料で形成され、IC、LSI 等の集積回路を搭載するためにその表面あるいは内部に電極配線が施されたセラミック基板）との封止には、ガラスフリット（粉末状のガラス）を加熱して接合するという方法が一般的にとられているが、加熱時の残留泡による強度低下、位置精度の良い接合が困難、ガラスフリットとの熱膨張係数のマッチングが必要等の問題がある。特に異種ガラス間、異種材料間で高精度、高強度に接合する技術は確立していない。

そこで、超短パルスレーザーを用いてガラスフリットを用いず、ガラス同士を直接接合させるトライアルを行った。

超短パルスレーザーを用いて局所的にガラスを溶融させることができる。連続照射されたパルス波の時間が、焦点部の溶融痕からの熱拡散に必要な時間よりも短い場合、熱蓄積を誘発させ、ガラスの温度を段階的に上昇させることができる。さらに、レーザー焦点を移動させることで、連続した溶融部を誘発させることができる。

図 8 にほう珪酸ガラス同士のレーザー接合部を示す。図より、約  $100 \times 150 \mu\text{m}$  サイズの接合部を有していることがわかる。この接合部の大きさは、出力、繰り返し周波数、走査速度等に支配される。また、予め基板を洗浄する等して、その表面をクリーンな状態にしておけば、接合前にオプティカルコンタクト等のガラス基板同士の特別な処理をすることなく、接合することが可能となる。

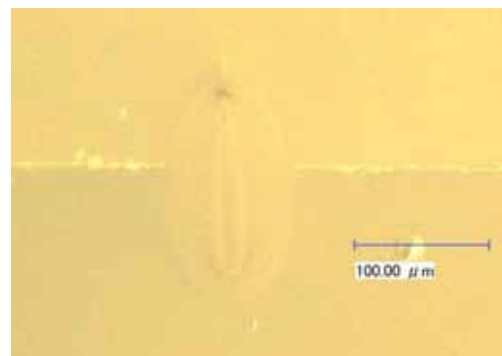


図 8. ほう珪酸ガラス基板同士のレーザー接合部  
ガラス厚み：0.7mm、熱膨張係数：6.6ppm/°C

このレーザー接合技術の開発を進めることで、異なる熱膨張係数を有するガラス、あるいはガラス以外の組み合わせであっても、接合できる可能性があると考えられる。

今後は様々な材料の組み合わせについて、レーザーによる直接接合に関する開発を進めていく。

#### 4. まとめ

我々は、超短パルスレーザーを用いて、当社が保有する様々なガラス材料の精密加工を行った。ガラス自体の特性を理解し、パルス幅、繰返し周波数を中心としてレーザー照射時のパラメーターを最適化することで、顧客の要望を満たす加工が実現でき、その一部はすでに実用化されている。

さらに、超短パルスレーザーの特徴を生かし、接合技術への展開を考えている。高繰返し周波数により、接合させたい界面に連続的な熱蓄積を誘発させ、ガラス同士において接合させることができた。

接合部の長期信頼性を鑑みると、まだまだ不十分な技術ではあるが、さらに、レーザー照射条件等を最適化することで、将来、有用な技術として期待できる。

今後も、顧客のニーズに応えながら、当社のガラス材料の価値を高める活動を行っていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 伊東一良：第79回レーザー加工学会論文集(2013) 143.
- 2) K.Itoh,W.Watanabe,S.Nolte,and C. B. Schaffer :MRS Bulletin 31 (2006) 620
- 3) R.R.Gattass and E.Mazur: Nature Photon. 2 (2008) 219.
- 4) K.Itoh,W.Watanabe, and Y.Ozeki: Proc.IEEE97 (2009) 1011.
- 5) 渡邊,太田:レーザー研究 2013年1月

## 1 0 B 2 . 硬脆材料の微細加工

# 短パルスレーザーで刃先成形された高脆工具の切削性能

I Machining Performance of Hard and Brittle Cutting Tool  
shaped with Short Pulse Laser

糸魚川文広\*

\*名古屋工業大学大学院 工学研究科  
(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Fumihito ITOIGAWA\*

\*Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology  
(Gokiso-Cho, Showa-Ku, Nagoya 466-8555, Japan)  
E-mail: itoigawa@nitech.ac.jp

単パルスレーザーの入射角を非常に大きくして高脆材料表面を薄く除去することで、ダイヤモンド研削に比べ機械的・熱的損傷の少ない表面を創製できる。工具刃先稜線を形成する二面に対し、この方法を適用し刃先成形することで、超硬合金、cBN 焼結体など高脆工具であっても刃先近傍表面および表面直下への欠陥導入が抑制され、鋭利かつ耐久損性の高い切削工具が創製できた。cBN 焼結体をロウ付けしたインサートの場合、刃先丸みを 1 $\mu\text{m}$  程度までチップングすることなく鋭利に成形可能で、これにより、研削加工と同等の表面粗さで焼入れ鋼の仕上げ加工が可能となった。また、CVD ダイヤモンド・コーティング工具も容易に刃先を鋭利成形でき、超硬合金の切削においても剥離することなく、良好な切削が可能であった。

Short pulse laser processing with a large incident angle as a finishing process for hard and brittle material can fabricate excellent surface without mechanical and thermal defects in comparison with a diamond wheel grinding process. Shaping a hard-and-brittle cutting tool with this laser processing develops a very sharp and tough tool edge. Even in the case of a sintered cBN insert, a sharper tool edge with less than 1 $\mu\text{m}$  radius is obtained and enables precision finish for hardened steel parts equivalent to ground finish. Furthermore, this laser processing is applicable to sharpening CVD diamond-coated tools. The sharpened CVD diamond-coated tool makes it possible to machine sintered WC-Co molding dies excellently without delamination of a coated layer.

**Key words:** Cutting tool, short-pulse laser processing, hard and brittle material, sharpened tool edge, cBN insert, CVD diamond

## 1. はじめに

切削加工に代表される除去加工プロセスは金属加工プロセスの中で高い精度を必要とする工程を担う重要なプロセスである。この高い精度を担保しているのは、加工プロセスで発生する熱を切り屑が系外へ排出してくれることと、変形や摩耗による工具刃先位置変化が生じ難い硬い工具を使用可能であることであり、後者は材料物性によるところが大きい。塑性変形のし難さも耐摩耗性も基本的には硬さを向上させれば向上するため、工具材料開発の方向は“より硬く”することにあるが、これは靱性の低下とトレードオフの関係にあり、欠損による急激な工具刃先位置変化のリスクを増大させることとなる。立方晶窒化ホウ素(cBN)やダイヤモンドのような高脆工具では、この欠損リスクが一層高くなるが、刃先部

の欠損リスクは刃先成形時の機械加工によるマイクロチップングに代表される欠陥導入の影響が大きい。一般に市販工具では、このような欠陥部を取り除きくさび角を鈍角とする処理（チャンファリング、ホーニング）を施し欠損リスクを小さくしている。これは、一方で“切れ味”を低下させ、切削抵抗の増大と寸法精度や表面粗さの低下をもたらす。

Suzuki らはナノ秒レーザーを用いて、焼結 cBN 工具のすくい面に対し、非常に大きな入射角で表面加工することで、見かけ硬さが増加することを見出し、その工具での焼入れ鋼仕上げ加工は、加工初期から表面粗さが安定することを示した<sup>(1)</sup>。これは物理的接触を伴わない短パルスレーザー加工では、マイクロチップングや焼結粒子の脱落が生じないためと考えられる。

ここでは、このようにして短パルスレーザーで刃先

成形された cBN 工具と CVD ダイヤモンド・コーティング工具の刃先形状品質とそれら工具の切削性能について報告する。

## 2. 短パルスレーザーによる刃先成形

ターゲットとする高脆工具材料は主に立方晶窒化ホウ素(cBN: cubic Boron Nitride)の焼結体とダイヤモンドで、これは高硬度材の高速加工を考えたとき、熱伝導率の大きい材料が工具温度の点で有利であると考えられるからである。図 1 に示すように、レーザー光は焦点距離の長い (100 mm) 単レンズで“緩やかに”絞り、光軸と加工面がほぼ平行となるよう工具材料を配置する。こうすることで光軸方向に比較的長い距離 (約 1mm) にわたりパワー密度が同程度の加工が進行する。高脆工具を用いた切削加工では、一度に切り取る被削材厚さはせいぜい 0.2 mm 程度で、切り屑が工具と強く擦過する距離はその数倍である。したがって、刃先から 1 mm 程度が高精度に加工できれば十分で、平面を加工するのにレーザーの走査は一軸のみでよく装置の送り機構を簡単に高精度化できる。

工具刃先稜線は 2 面の交差する線であるから、鋭利で精度の高い刃先稜線を得るためには、それぞれ

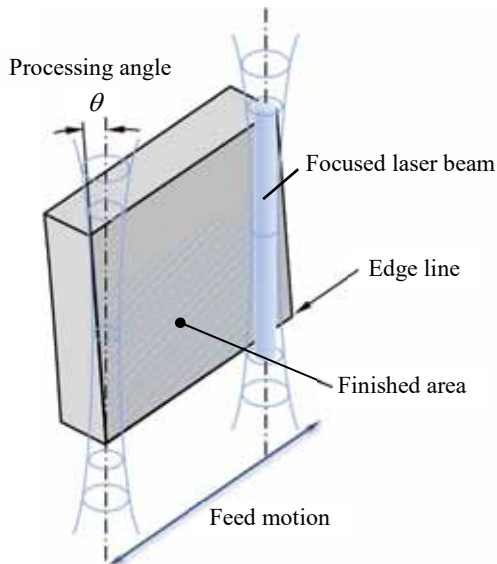


図 1 Schematic diagram of edge sharpening with short pulse laser

表 1 Laser processing conditions

Wave length	355 nm
Pulse width	5 ns
Frequency	15 kHz
Power	3 W
Focal point distance	100 mm
Feed speed	30 mm/s
Processing angle	3 - 15 degree

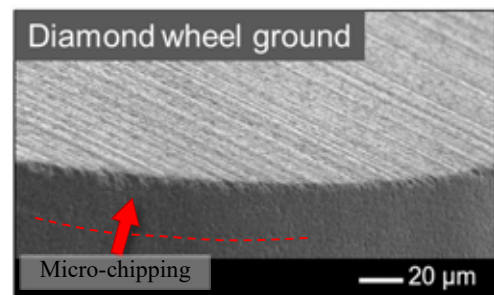
の面を端部まで幾何学的に正しく創製できることが重要であり、送り機構の単純さはこの点で利点である。

レーザーのパルス幅は 5 ns であるが、工具材料の良好な熱拡散特性と加工の進展方向により熱影響は比較的小さく抑えられる。また、プラズマとデブリの噴出方向は主に加工面の法線方向となるから、アシストガスを用いなくともプラズマによるレーザーの吸収やデブリの再付着がほとんど生じない。

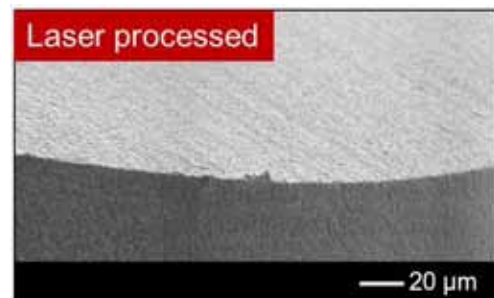
## 3. 立方晶窒化ホウ素 (cBN) 工具

立方晶窒化ホウ素はダイヤモンドに次いで硬い工具素材であり、鋼材との親和性も低いことから、焼結体をロウ付けしたインサートとして、焼入れ鋼切削に多用されている。また、熱伝導性に優れることから、Ni 系耐熱合金や Ti 合金の高速加工にも用いられる。しかし、硬いがゆえに脆性であり、特に焼入れ鋼の切削に用いられるものはセラミックバインダで焼結されており、ダイヤモンド砥石研削で刃先を成形すると図 2 (a) に示すようにマイクロチップングが多数生じる。そのため、市販品では刃先はホーニング処理されている場合が多い。

図 2 (b) は前節で述べた手法で短パルスレーザー加工により刃先を成形した結果で、刃先にマイクロチップングが見られないことが分かる。また、表面粗さも  $0.3\mu\text{mR}_z$  程度の平滑面が得られた。このように



(a) Ground finish



(b) Pulse laser finish

図 2 Photomicrographs of tool edge sharpened by different process

加工面に平行に近い入射角で短パルスレーザー加工を行うことで、研削加工に劣らない高品位な刃先を成形できることが分かる。

図 3(a) (b)は図 2(a) (b)に示したそれぞれの刃先に対しサンドブラストを用いてエロージョン試験を行った結果で、研削仕上げした cBN 工具刃先には 30 $\mu\text{m}$  程度の大きな欠損が生じた。この欠損の起点は図 2(a)中に矢印で示したマイクロチップングと一致する。また、すくい面の研削条痕も摩滅が進んでいることから、研削による刃先成形時に表面に多くの欠陥が導入されていることが示唆される。一方、短パルスレーザー成形した刃先には大きな欠損は見られず、すくい面粗さの増加も大きくない。この結果は短パルスレーザー刃先成形が硬脆工具材料の低損傷成形手法に成り得ることを示めており、これにより得られた低損傷表面は工具の切削性能を向上させることになると考えられる。

図 4 に焼入れした軸受鋼 (SUJ2) を旋削加工した表面の写真を示した。切削速度は 100 m/min, 工具送りは 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$  とした。図 4(a) は研削により刃先成形した cBN 工具で切削した場合、図 4(b) は短パルスレーザーで刃先成形した cBN 工具で切削した場合の結果である。前者は映り込んだ文字が不鮮明となっているのに対し、後者はほぼ鏡面が得られていることが分かる。

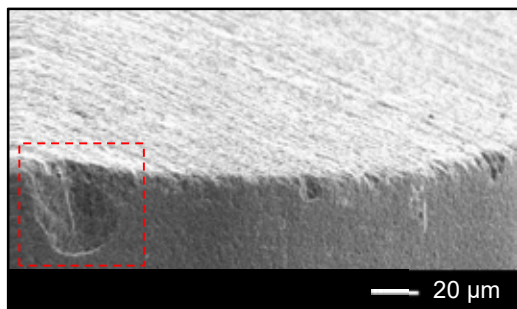
図 5 は図 4 で示した加工表面の触針式粗さ計による

測定結果で、図 5(a)(b)はそれぞれ図 4(a)(b)に対応する。研削により成形した工具での旋削結果は工具送りマーク (5 $\mu\text{m}$  ピッチ) に比して周期の長いうねり成分が大きく重畳しているが、短パルスレーザーで成形した工具での旋削面は工具送りマーク以外のうねり成分は十分小さく、良好な旋削がなされていることが分かる。前者の大きなうねり成分の発生は、刃先部への被削材料の凝着成長、脱落が原因と考えられ、これは刃先鋭利さが不足していることに起因する。一方、後者にはそのうねりが見られないことから、刃先の鋭利さが旋削中、維持されていたと考えられる。

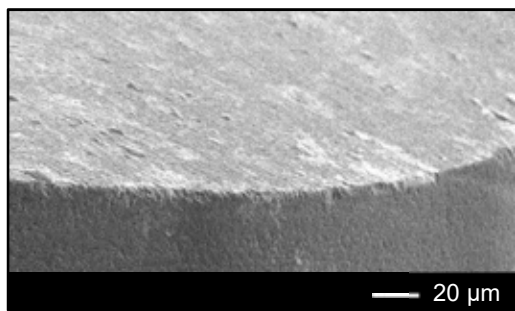
これら旋削結果の相違は、図 2 に示した刃先初期形状と図 3 に示した刃先の耐エロージョン性の相違から予想される結果であり、cBN 工具の短パルスレーザーによる刃先成形の有用性を示すものといえる。

#### 4. CVD ダイヤモンド・コーティング工具

ダイヤモンドはその高い硬度と熱伝導率から超精密加工用切削工具として多用されている。この用途では、工具刃先稜線の丸みはサブミクロンが要求されるが、高硬度ゆえ、その成形は容易ではなく大きなコストが要求される。そもそも、天然ダイヤモンドを用いる場合はその希少性により、高压合成ダイヤモンドを用いる場合も、その製造コストにより、

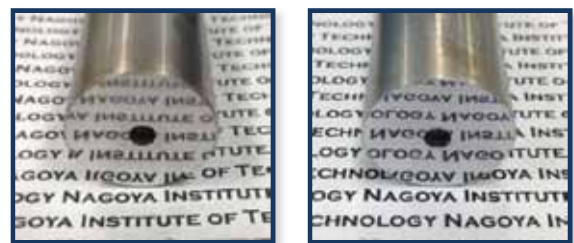


(a) Ground finish edge



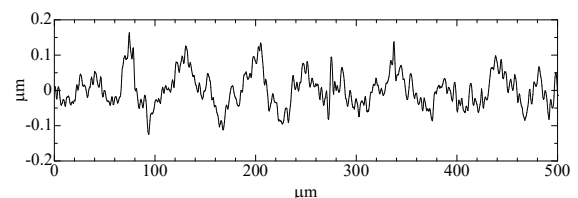
(b) Pulse laser finish edge

図 3 Comparison in edge toughness under sand-blast erosion test (abrasive: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, grain size: #60, discharge pressure: 0.4 MPa, inject duration: 3 sec)

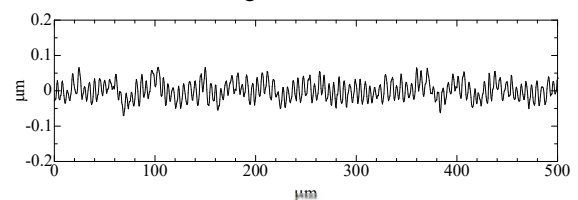


(a) with ground finish tool (b) with pulse laser finish tool

図 4 Precision cutting results of hardened steel (SUJ2)

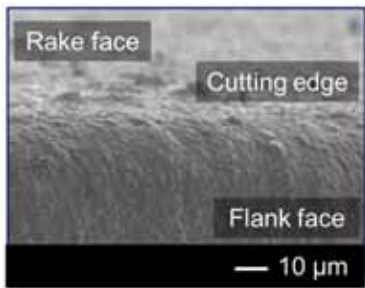


(a) with ground finish tool

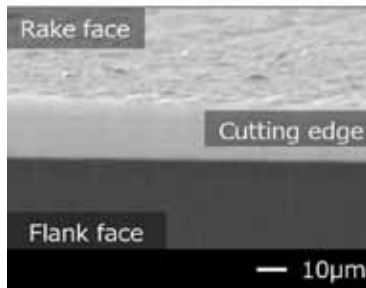


(b) with pulse laser finish tool

図 5 Surface profiles of precision cutting surface

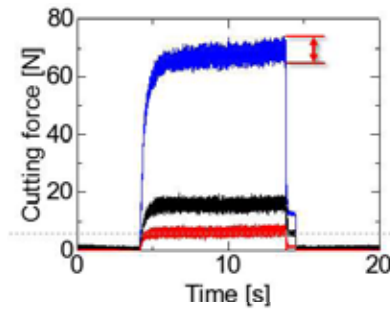


(a) as-deposited tool edge

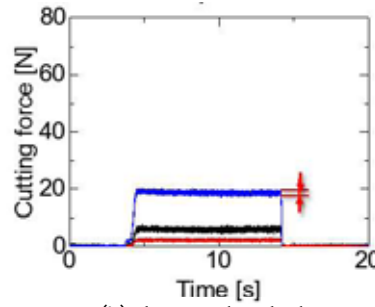


(b) sharpened tool edge

図 6 Photo-micrographs of CVD diamond coated tool edge

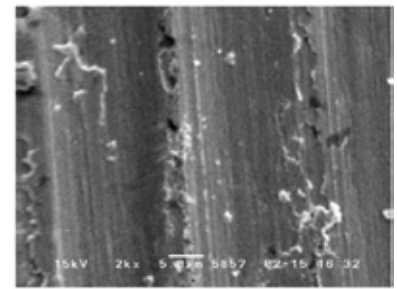


(a) as-deposited tool edge

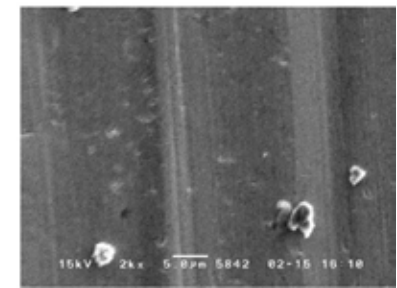


(b) sharpened tool edge

図 7 Cutting forces in turning of sintered carbide (WC/12Co)



(a) as-deposited tool edge



(b) sharpened tool edge

図 8 SEM images of finished surface in turning of sintered carbide

素材費としても高価であることから、超精密加工用ダイヤモンド工具は非常に高価とならざるを得ない。近年、CVDによるダイヤモンドの超硬合金へのコーティングが切削工具としての使用に耐えるものとなり、比較的安価で入手可能となってきた。工具の形状成形は超硬母材であればよいことから、エンドミルのような複雑形状のダイヤモンド工具も容易に実現できる利点を持ち、すでに多くの生産現場で利用が進んでいる。

しかしながら、厚膜のコーティングとせざるを得ず、図 6(a) に示すように刃先稜線には膜厚に相当する大きな丸み (10–20 $\mu\text{m}$ ) が存在する。この刃先部分を 2 節で示した短パルスレーザによる手法で刃先成形した結果を図 6(b) に示す。図から分かるように短パルスレーザ成形により、非常に平滑な面と鋭利な刃先が成形できていることが分かる。この成形は短時間で可能であり、図 6(b) の刃先を得るのに要する往復走査回数は 10 回ほどであり、実加工時間は 1 分を要しない非常に低コストプロセスである。

図 7 は図 6 に示した工具を用いて超硬合金の旋削加工をした場合の加工抵抗 (青線：背分力，黒線：主分力，赤線：送り分力) で、短パルスレーザ成形を施していない as-deposited の状態では、大きな刃先丸みに起因して非常に大きな背分力が生じていることが分かる。この背分力は刃先丸みを小さくすることで、約 1/4 にまで低下する。同時に図中矢印で示した加工力振動の振幅も約 1/3 に減少したことが

分かる。

図 8 は図 7 に示した加工により生成された加工表面の SEM 写真で、刃先丸みの大きな as-deposited の状態では、いわゆる“掘り起こし”によるバリ状の欠が生成され、表面に数多くの欠陥が生じている。一方、短パルスレーザで成形された鋭利な刃先をもつ工具で生成された表面は、僅かに WC 粒子の脱落と思われ小さな凹部が見られるが、良好な切削がなされたことが分かる。

## 5. おわりに

物理的接触のない除去プロセスである短パルスレーザ加工を用いて、cBN や CVD ダイヤモンドなど硬脆材料の工具刃先を成形した。成形した刃先はクラックやマイクロチップングなど機械的欠陥の導入が少なく、ダイヤモンド砥石による成形刃先に比べ強靱な刃先となった。また、このようにして成形した工具を用いて、焼入れ鋼や超硬合金などの硬質材料を直接切削のみで精密仕上げ加工できることを示した。

## 6. 参考文献

- (1) D. Suzuki, F. Itoigawa, K. Kawata, T. Suganuma and T. Nakamura, “Edge Sharpening and Surface Modification of PcBN Cutting Tool by Pulsed Laser Grinding,” Key Engineering Materials, Vols. 523-524 (2012) pp 131-136.

# フェムト秒レーザー照射によるダイヤモンド, SiC 加工

## Femtosecond laser processing of diamond and SiC crystal

下間靖彦\*, 峰雪序也\*, 栗田寅太郎\*, キムウンホ\*, 清水雅弘\*, 三浦清貴\*

\*京都大学 大学院工学研究科 材料化学専攻  
(〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂)

Yasuhiko SHIMOTSUMA\*, Nobuya MINEYUKI\*, Torataro KURITA\*, Eunho KIM\*, Masahiro SHIMIZU\*,  
Kiyotaka MIURA\*

\*Kyoto University, Graduate School of Engineering, Department of Material Chemistry  
(Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan)  
E-mail: yshimo@func.mc.kyoto-u.ac.jp

フェムト秒レーザーの超高速と超高強度を活かして、難加工材料である SiC やダイヤモンドの内部の構造変化を光誘起させた。SiC では、フェムト秒ダブルパルス列によって、レーザー伝搬方向に対して垂直な面内に非晶質相の形成を伸張させることができ、スライス加工への応用の可能性を示した。ダイヤモンドでは、局所的なグラファイト化に加え、NV センターを形成することができ、スピン量子ビットへの応用の可能性を示した。

In this paper, we have demonstrated femtosecond laser processing of hard-to-work material such as SiC and diamond. For SiC, the transformation to amorphous phase can be photoinduced in the plane perpendicular to the laser propagation direction by the femtosecond double-pulse configuration, leading to the possibility of application to wafer slicing technique. For diamond, in addition to the localized graphitization, NV color centers, acting as spin quantum bits, are stably induced by the Fourier-transform-limit 40fs pulses.

**Key words:** instruction, manuscript, journal, JLPS, five to ten keywords

### 1. 緒 言

次世代パワーデバイスの実用化が進む中、SiC [1] や GaN [2], 最近では、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3]などのワイドバンドギャップ半導体材料の研究開発が盛んに行われている。さらに、未だ高耐圧パワーデバイスとしての応用の報告はないものの、ダイヤモンド結晶基板 [4]の研究開発も進められている。また、半導体の中でバンドギャップが最大である AlN [5]は、深紫外光源材料として期待されており、昇華法やハイドライド気相成長 (HVPE) 法などの単結晶基板作製の研究が数多く行われている。主なワイドバンド半導体の物性値を表 1 にまとめた [6-9]。現在、SiC やダイヤモンドをはじめとした難加工材料に加え、サファイア基板等からの GaN 結晶層の剥離 (リフトオフ加工) や Si や SiC 結晶のウェハに対して透過波長のレーザー光を用いたステルスダイシング [12] やスライス加工 [13] 等、幅広い加工分野でのレーザー光の利用が進められている。一般的には、レーザー加工とは、レーザー光の直進性、高密度パワー、集光性を活かし、金属をはじめプラスチック、ガラス、木材、

紙、布などの多様な材料に対して、切断、穴開け、溶接、焼入れなどの熱的な加工、光化学反応を利用した材料のエッチングや堆積等のことを指す。中でも、熱影響や熱衝撃等によるアシストを利用した比較的パルス幅が長いナノ秒レーザーによる加工が工業的に良く用いられている。

Table 1 Typical properties of wide band gap semiconductors

Material	Eg [eV]	$\mu$ [cm <sup>2</sup> /V s]	Ec [MV/cm]	$\lambda$ [W/cm K]	Type
4H-SiC	3.3	720/650	~ 2.5	3.7	I
GaN	3.4	900	~ 3	2.5	D
$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.9	300	~ 8	0.2	D / I <sup>*)</sup>
AlN	6.3	1100	~ 12	2.9	D
Diamond	5.5	1900	~ 10	22	I

Eg: bandgap,  $\mu$ : electron mobility, Ec: maximum electric field,  $\lambda$ : thermal conductivity, D: direct, I: indirect.

\*) There are different reports that the transition type of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is direct [10] or indirect [11].

一方で、パルス幅がピコ秒以下の超短パルスレーザーを光源に用いた材料加工は、ナノ秒レーザー等に比べて重要な利点を有している。最近では、半導

体レーザーで直接励起が可能な Yb 系結晶やファイバーレーザーの研究開発の進展に伴い, 平均出力が 100 W を超える超短パルスレーザー光源も市販されるようになり, 超短パルスレーザーの特徴である (1) 超高速と (2) 超高強度を活かした高精度な材料加工の分野で広く使用されるようになってきている。

(1) については, パルス幅が電子とフォノンのカップリング時間 (ピコ秒オーダー) よりも短く, 材料の熱拡散速度に比べて速いため, レーザー光のエネルギーは, 熱などへの変換が少ない状態で材料に注入され, 効率と精度が高い微細加工が期待できる。さらに (2) については, レンズなどで集光することにより容易に数百  $\text{TW}/\text{cm}^2$  もの高いパワー密度を実現できるため, 集光部近傍だけ空間選択的に多光子吸収や多光子イオン化などの非線形相互作用を誘起することが可能である。本稿では, フェムト秒レーザーを光源として用い, 特に SiC とダイヤモンドの結晶内部の局所領域の加工 (光誘起構造変化) に関して紹介する。

## 2. SiC 結晶内部のフェムト秒レーザー加工

SiC は, 化学的安定性, 耐熱性に優れた材料であり, 研磨材, 耐火材, 発熱体として広く応用されている。200 種類を超える SiC の結晶多形の中で, 六方晶 4H-SiC は, 可視から近赤外まで透明なワイドバンドギャップ半導体であり, 熱伝導率や絶縁破壊電界強度が Si に比べて優れていることから, パワーエレクトロニクスデバイスの重要な材料の一つとして期待されている。一方で, SiC の硬度はダイヤモンド, 炭化ホウ素 ( $\text{B}_4\text{C}$ ) に次いで地球上で 3 番目であり, 難加工材料であることから, SiC ウェハの製造コストが問題となっている。インゴットから半導体ウェハを切り出す方法として, ダイシングソー技術が一般に用いられており, ワイヤソー等によるダイシング技術は, 大量生産に有利であるものの [14], スライシング時のデブリ洗浄や摩擦熱の冷却が必要であり, ウェット環境下で行われることが一般的である [15]。さらに, 切断面の欠けやクラック発生等によるウェハの強度の低下も起こるため, 一般にワイヤー当たり  $180 \mu\text{m}$  以上の切りしろが必要となり, 表面研磨後には最終的に約  $250 \mu\text{m}$  程度の損失が生じる [14]。最近, SiC 薄膜の高品質なスライス技術として, スマートカット技術 [16] が注目されている。また, パルスレーザーを用いた新しいダイシング技術として, ステルスダイシング [17] も実用化されている。ナノ秒レーザーを Si 結晶内部に集光照射し, 熱衝撃を局所的に発生させ, 高密度な転位形成が集光部近傍で光誘起される [18]。このため, デブリ等の発生がなく, ドライ環境下で最小限の切りしろでウェハを割断することができる。一方で, フェムト秒レーザーを SiC 結晶の内部に集光照射すると,

ナノ空孔が形成されることが報告されている [19]。一般にフェムト秒レーザーと物質との相互作用の非線形性と球面収差によって, レーザー集光部の改質領域は, レーザーの伝搬方向に伸長する傾向がある。一方で, SiC 結晶内部の集光部では, カラーセンター形成 [20] やグラファイトとシリコンへの相分離 [21] が光誘起されて光吸収が変化する。このため, フェムト秒ダブルパルス列照射によって, レーザー伝搬方向における改質領域の伸長を抑制でき, SiC ウェハのスライス加工への応用の可能性がある [22]。

実験では, 厚さ  $420 \mu\text{m}$  の N ドープ 4H-SiC (0001) ウェハ (TankeBlue Semiconductor) を  $5 \times 5 \text{ mm}$  角に切断したものを試料とした。フェムト秒レーザー光源は, 中心波長  $780 \text{ nm}$ , パルス幅  $220 \text{ fs}$ , パルス繰返し周波数  $1 \text{ kHz}$  のサイバーレーザー社製 IFRIT を使用し, パルス幅を最大  $6 \text{ ps}$  まで変化させた。これまでにフェムト秒レーザー ( $800 \text{ nm}$ ,  $130 \text{ fs}$ ,  $1 \text{ kHz}$ ) による 4H-SiC 結晶内部の構造改質は, 高 NA の油浸対物レンズ ( $100\times$ , NA 1.35) を用いた研究 [19] が報告されているが, 試料表面から内部の深い位置を直接構造改質することを目的として, より低い NA (= 0.80) の対物レンズを用いた。また, SiC の高い屈折率に由来した球面収差を補償するため, LCOS 型空間光位相変調器 (LCOS-SLM; 浜松ホトニクス) を使用した。照射レーザーパルスと物質との相互作用を促進するために行ったフェムト秒ダブルパルス列の照射実験では, マッハツェンダー型の光学遅延構成 (時間分解能  $220 \pm 40 \text{ fs}$ ) を使用した [23]。パルエネルギー ( $E_p$ ) を  $10 \mu\text{J}$  に固定し, パルス幅 ( $\tau_p$ ) を変えて SiC 結晶内部に集光照射した結果を Fig. 1(a) に

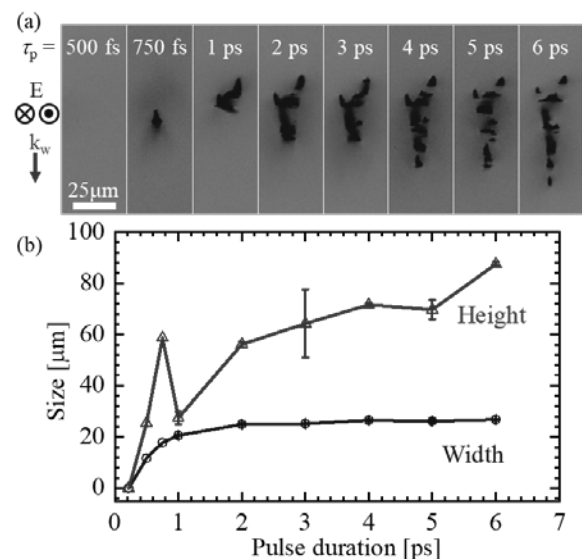


Fig. 1 (a) Cross-sectional optical micrographs of the black-colored structural modifications inside 4H-SiC induced by the ultrashort pulse laser with the different pulse durations. Symbols of  $k_w$  and  $E$  show the laser propagation direction and polarization direction, respectively. (b) The heights and widths of the photoinduced structures inside 4H-SiC as a function of the pulse duration.

示す.  $\tau_p = 220$  fs の場合, SiC 結晶内部のみを構造改質するためのレーザー条件は極めて狭く ( $E_p = 10 \sim 13 \mu\text{J}$ ), ほとんどの条件で表面が損傷した.  $\tau_p > 750$  fs において, 試料表面が損傷することなく, 集光部に黒色の構造変化領域が観察された. 4H-SiC における光励起された電子の緩和時間は, 伝導帯間の電子-フォノン散乱が支配的であり, その減衰時間は 0.63 ps 程度と見積もられている[24]. 一方で間接遷移型半導体の場合, Shockley-Read-Hall (SRH) 再結合が支配的であることが知られており[25,26], 4H-SiC の場合, SRH の寿命は 800 ns 程度と報告されている[27]. 以上のことから, 光励起により基底状態にある電子が枯渇し, ブリーチが生じたことが関係していると考えられる. Fig. 1(b)より, 黒色の構造変化領域のサイズは, パルス幅とともに増加し, その幅は  $\tau_p > 2$  ps で一定 (約  $25 \mu\text{m}$ ) となった. 一方, 球面収差を補償しているにもかかわらず, 構造変化領域の長さはパルス幅とともに増加し,  $\tau_p > 3$  ps では断続的に形成された. これはパルス幅が電子-フォノン散乱による緩和時間よりも長いことに加え, 熱レンズ効果やフィラメンテーションによるものと考えられる.

$\tau_p$  を 220 fs に固定し, ダブルパルス間隔時間 ( $\tau_{\text{delay}}$ ) で等分割したフェムト秒ダブルパルス列のトータルの  $E_p^{\text{total}} (= 2E_p)$  を変化させて試料内部に集光照射した結果を Fig. 2 に示す. 集光部近傍の黒色の構造変化領域の形状と光誘起構造が形成される確率を求めたところ,  $E_p^{\text{total}} > 10 \mu\text{J}$  において結晶内部のみを安定して加工できるものの, 構造変化領域の長さは大きく変動した[Fig. 2(a)]. これは, レーザー照射前の結晶内部に既に存在するマイクロパイプ欠陥による影響と考えられる. シングルパルス列による結果

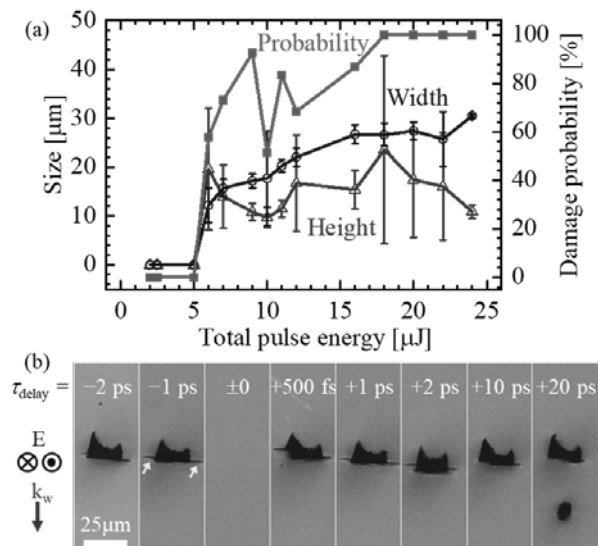


Fig. 2 (a) The heights and the laser-induced damage probabilities of the photoinduced structures inside 4H-SiC as a function of the total pulse energy.  $\tau_{\text{delay}}$  was 2 ps. (b) Cross-sectional micrographs of the black-colored structural modifications inside 4H-SiC induced by the femtosecond double-pulses ( $\tau_p = 220$  fs) with the delay time of 2 ps. Arrows point cracks.

[Fig. 1(a)]と比較すると, Fig. 2(b)に示すように,  $\tau_p > 750$  fs においても構造変化領域が形成されており,  $\tau_p = 220$  fs,  $\tau_{\text{delay}} = 2$  ps の典型的な条件において, 内部加工の  $E_p$  しきい値は約  $6 \mu\text{J}$  ( $= 3 \mu\text{J} + 3 \mu\text{J}$ ) であることを確認した. また, 内部加工が可能な  $E_p^{\text{total}}$  の範囲は  $6 \sim 26 \mu\text{J}$  ( $E_p = 3 \sim 13 \mu\text{J}$ ) であり, シングルパルス列の場合に比べて約 4 倍広い条件設定が可能であった. さらに興味深いことに, 構造変化領域の長さは  $E_p^{\text{total}}$  の増加とともに変化せず, 約  $15 \mu\text{m}$  と一定であった.  $\tau_p = 220$  fs,  $\tau_{\text{delay}} = 2$  ps の場合, 構造変化領域の長さは,  $\tau_p = 2$  ps の場合の 3 分の 1 程度であった. このようにダブルパルス列において, 構造変化領域がレーザー伝搬方向に伸長しなかった原因は, 第 1 到達パルスによって光誘起された構造が第 2 到達パルスのエネルギーを吸収し, レーザー伝搬に伴う構造変化の伸びを抑制したためと考えた[22]. 一方で  $\tau_{\text{delay}} > 20$  ps において, 構造変化領域がレーザー伝搬方向に分割して形成された. これは自己収束によるものと考えられる. フェムト秒ダブルパルス列照射 ( $\tau_p = 220$  fs,  $\tau_{\text{delay}} = 2$  ps) によって形成された黒色の構造変化領域のラマンスペクトルを Fig. 3 に示す. レーザー照射前の 4H-SiC の主要なラマンピーク ( $206, 610, 778, 799$  および  $995 \text{ cm}^{-1}$ ) は, 既に報告されている 4H-SiC (点群  $C_{6v}$ ) で観測されるピークと一致した[28]. レーザー照射後の黒色の構造変化領域では,  $778 \text{ cm}^{-1}$  のメインピークの幅が積層欠陥や残留歪みに由来してわずかに広がった[29]. さらに, 黒色の構造変化領域では,  $480 \text{ cm}^{-1}$  近傍および  $1400 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$  の 2 つの波数領域で顕著なスペクトル変化が観察された.  $480 \text{ cm}^{-1}$  付近のブロードなピークは, アモルファスシリコンによるものと考えられる. また,  $1400 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$  にみられるピークは, 無秩序炭素構造の G ( $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ ) および D ( $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ ) バンドに由来するものと考えられる. したがって, レーザー照射後の黒色構造変化領域は, 4H-SiC からアモルファスシリコンやアモルファスカーボンに相変化したと考えられる. 同様のラマンスペクトルの変化は, 4H-SiC 結晶の表面を損傷した場合にも観測されている[30].

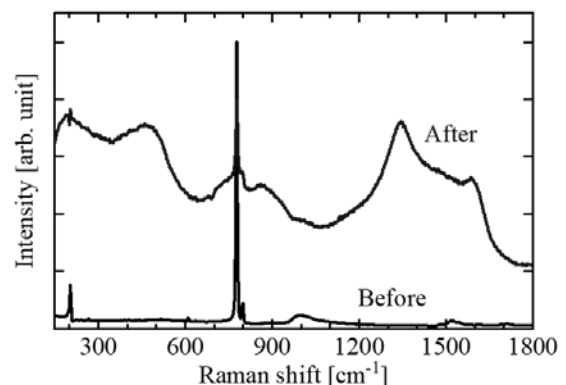


Fig. 3 Typical micro-Raman spectra before and after laser irradiation.

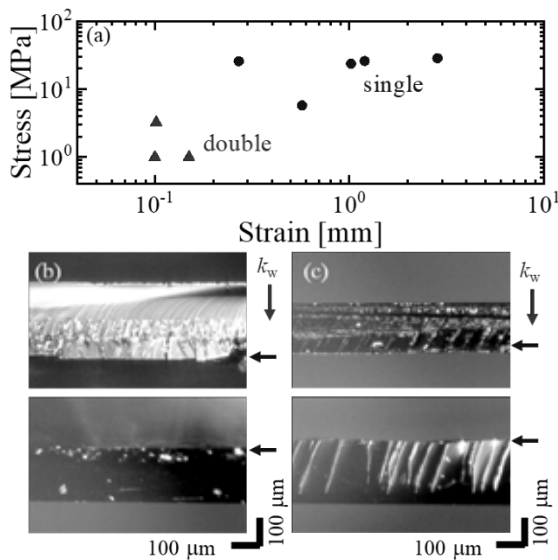


Fig. 4 (a) Plots of tensile stress as a function of strain. Optical micrographs of the exfoliated surfaces viewed from the cross-sectional direction after the laser writing by (b) single- and (c) double-pulse trains are shown. The blue arrows and  $k_w$  show the exfoliated surfaces and the laser propagation direction. The laser writing conditions by the single-pulse trains were as follows:  $E_p = 10 \mu\text{J}$ ,  $\tau_p = 1 \text{ ps}$ . The laser writing conditions by the double-pulse trains were also as follows:  $E_p = 5+5 \mu\text{J}$ ,  $\tau_p = 220 \text{ fs}$ , and  $\tau_{\text{delay}} = 1 \text{ ps}$ .

SiC ウェハのスライス加工への応用の可能性を見出すことを目的に、 $5 \times 5 \text{ mm}$  角の試料全体に  $25 \mu\text{m}$  ピッチでレーザー加工 (スキャン速度  $100 \mu\text{m/s}$ ) した後、万能引張試験機により表面に垂直な方向に応力をかけて剥離試験を行った (Fig. 4). 剥離に必要な応力は、通常のシングルパルス列照射の場合に比べてダブルパルス列照射の方が 1 桁以上小さいことがわかる [Fig. 4(a)]. 特にダブルパルス列の場合、引張試験機の検出下限 ( $\sim 1 \text{ MPa}$ ) よりも小さな応力でも剥離に成功しており、c 平面に沿った構造変化に加え、 $\langle 1120 \rangle$  方向へのクラック形成によるものと考えられる [Fig. 4(b, c)]. 剥離した試料表面を触針式の表面粗さ計で評価したところ、シングルパルス列の剥離面は不規則で、最大  $24 \mu\text{m}$  の段差が確認された [Fig. 5(a, c)]. これは、レーザーの伝搬方向に構造変化領域が伸長し、かつ不連続に形成したためと考えられる [Fig. 1]. 一方、ダブルパルス列による剥離面の表面粗さの最大値は  $5 \mu\text{m}$  程度であり、従来のワイヤーソー法の切りしろ ( $\sim 180 \mu\text{m}$ ) に比べて明らかに小さかった. フェムト秒ダブルパルス列を利用したこのレーザーライティング技術は、SiC ウェハだけでなく、ダイヤモンド等の他の難加工材料や AlN 結晶基板、貴金属や硬質材料への応用の可能性を秘めている.

### 3. ダイヤモンド内部のフェムト秒レーザー加工

非晶質内にフェムト秒レーザーを集光照射すると、局所的な熱蓄積や衝撃波の発生と伝搬等によって、その集光部近傍において結晶析出が光誘起される

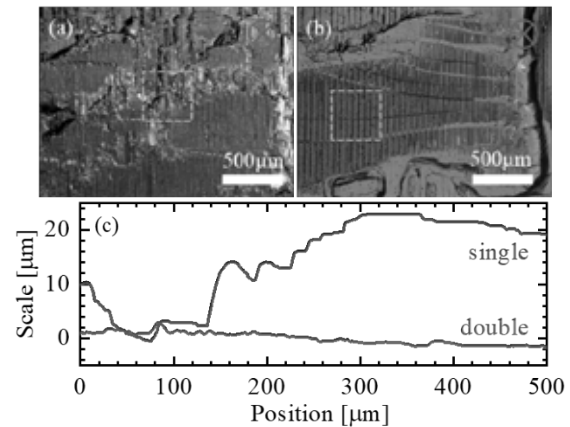


Fig. 5 Optical micrographs of the exfoliated surfaces for (a) single- and (b) double-pulse trains. The surface profiles on the exfoliated surfaces measured on the regions surrounded by the dashed yellow lines are also shown in (c). The laser writing conditions are same in Fig. 4.

[Fig. 31-33]. 一方で、ダイヤモンドの場合、照射レーザーパルスのエネルギーに応じて、欠陥の形成やグラファイト (黒鉛) 化が観察されている. これまで、ダイヤモンド表面のグラファイト化における電子および格子系の非平衡ダイナミクスに関する理論計算 [34,35] が報告されているが、ダイヤモンド内部に 3 次元的に光誘起したグラファイト構造の導電率の実験的な評価の報告は少ない [36]. ここでは、フェムト秒レーザー照射によりダイヤモンド内部の局所領域のグラファイト化による導電率の変化および NV 欠陥形成による発光スペクトル変化について報告する. 実験では、単結晶 CVD 合成ダイヤモンド IIa 型 ( $N < 1 \text{ ppm}$ )、HPHT 合成ダイヤモンド Ib 型 ( $N \sim 100 \text{ ppm}$ ) を使用した.

#### 3.1 局所グラファイト化による導電構造形成

フェムト秒レーザーパルス (中心波長  $780 \text{ nm}$ , パルス幅  $220 \text{ fs}$ , パルス繰返し周波数  $1 \text{ kHz}$ ) を 20 倍 (NA 0.45) の対物レンズを用い、Ib 型ダイヤモンド結晶 ( $N \sim 100 \text{ ppm}$ ) 内部に集光照射した. 典型的なレーザーフルエンスは約  $28.5 \text{ J/cm}^2$  とした. 焦点を試料裏面から表面に向かってレーザー伝搬方向に平行に  $20 \mu\text{m/s}$  で走査し、光誘起した黒色の構造変化を円柱状に形成した [Fig. 6(a, b)]. 照射後、集束イオンビーム (JIB-4500; JEOL) を用いて断面加工した後、走査型電子顕微鏡 (JSM-6700F; JEOL) および顕微ラマン分光 (Almega XR; Nicolet) により評価した [Fig. 6(c, d)]. 試料表面から約  $23 \mu\text{m}$  の深さまですり鉢状にアブレーションされているものの、それより内部の黒色光誘起構造領域は、緻密な構造を有しており、空隙やクラック等は観察されなかった. 直径約  $18 \mu\text{m}$  の黒色光誘起構造領域におけるラマンスペクトルは、グラファイト構造に由来した G ピーク ( $1590 \text{ cm}^{-1}$  付近) および欠陥由来の D ピーク ( $1350 \text{ cm}^{-1}$  付近) が確認でき、黒色光誘起構造領域は一部がグラファイト化し、導電性を示すことが示唆された. 照

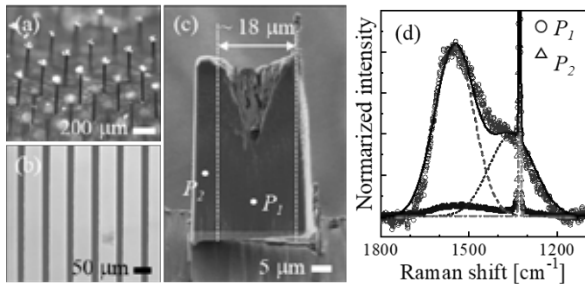


Fig. 6 (a) Optical microphotograph, (b) lateral view, and (c) SEM image of the cross-sectional surface of black photoinduced structures in diamond. The double-headed arrow  $d$  and the points marked  $P_1$  and  $P_2$  represent a laser-induced area, a laser-irradiated and non-irradiated points, respectively. (d) Micro-Raman spectra at  $P_1$  and  $P_2$  points on the cross-sectional surface. The components of the G peak (broken line), D peak (dotted line), and diamond peak (dashed-dotted line) deduced from the fittings (solid line) are also shown.

射レーザーのエネルギーフルエンスを変え ( $28.5 \sim 427 \text{ J/cm}^2$ ), ダイヤモンド内部に形成したグラファイト化領域の導電率を 4 端子法により測定した[Fig. 7]. 2 本分の円柱状に形成したグラファイト化領域の抵抗は, I-V 測定結果 ( $2R = (V_A - V_C)/I_{sup}$ ) から求まり, グラファイト化領域の幅 ( $d$ ) と試料の厚み ( $t$ ) から導電率 ( $\sigma = 4t/\pi R d^2$ ) を計算した. グラファイト化領域の幅はエネルギーフルエンスに対して比例するが, 導電率は  $28.5 \text{ J/cm}^2$  で最大  $64 \text{ S/m}$  に達し,  $200 \text{ J/cm}^2$  以上では減少した. これは, 高フルエンスの場合, フィラメンテーションが起り, グラファイト化領域が断続的に形成されたためと考えられる.

### 3.2 NV 欠陥形成による発光スペクトル変化

ダイヤモンド中の窒素と空孔により形成される NV センターは, 室温で光学的に観測及び操作が可能であるため, スピン量子ビットや磁場などの超高感度センサーとしての応用が期待されている. これまでにダイヤモンド NV センターの作製技術として, 化学気相成長 (CVD) 法により薄膜を成長させる方法[37], ダイヤモンドに窒素イオンを注入する方法[38], 窒素入りの不純物ダイヤモンドに電子線等の量子ビームを照射して空孔を作り熱処理を施す方法[39]が研究開発されている. 一方で, ダイヤモンド NV センターのセンサー応用では, ダイヤモンド試料の表面近くに形成するほど高感度となるものの, コヒーレンス時間が短くなるという問題があった[40]. このため, ダイヤモンド結晶の表面および内部を含めた任意の位置に空間的に制御された NV センターの形成技術が求められている. 最近, ダイヤモンド表面[41]および内部[42]にフェムト秒レーザーを集光照射し, その後の熱処理によって, 集光部近傍に NV センターを形成するという報告がなされている. 我々は, ダイヤモンド結晶内部の局所的な相変化(グラファイト化)や応力分布現象を利用して, テラヘルツ波用光学素子[36] や量子コンピュータ用ダイヤモンド光導波路 [43] に関する研究を行

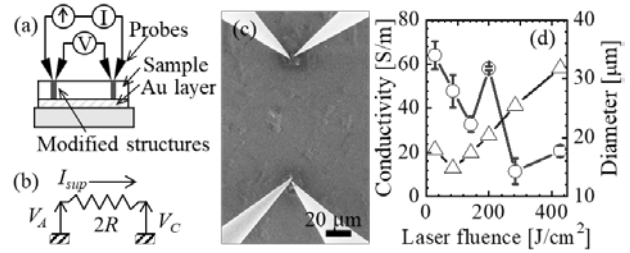


Fig. 7 (a) Schematic illustration and (b) equivalent circuit of the four-terminal method, where  $R$  is the electrical resistivity of a modified structure,  $V_A$ ,  $V_C$  is the electric potential of the anode and cathode,  $I_{sup}$  is the supply current, respectively. (c) SEM image during the measurements with four-point probe. (d) Conductivity (unfilled red circle) and radius (unfilled blue triangle) of the modified structures as a function of the laser energy fluence.

ってきた. ここでは, これまで明らかにされていない照射パルスレーザーのパルス幅による NV センター形成への影響について述べる.

フェムト秒レーザーパルス (波長  $800 \text{ nm}$ , 繰り返し周波数  $250 \text{ kHz}$ ) を 50 倍 (NA 0.80) の対物レンズを用い, IIa 型ダイヤモンド結晶 ( $N < 1 \text{ ppm}$ ) 内部  $50 \mu\text{m}$  の位置に集光照射した. 多光子パルス内干渉位相走査 (MIIPS) 法を用いたパルスシェイパーにより高次の位相分散を制御して波形整形したフーリエ変換限界パルス ( $40 \text{ fs}$ ) と, 二次分散を付加した  $1 \text{ ps}$  パルスを用い, パルスエネルギーを変えて照射した. パルス幅の測定はミラーやレンズ等の光学素子由来の分散を考慮するため, 対物レンズ通過後の試料入射直前の位置で行った. レーザー照射後, 光学顕微鏡観察および共焦点光学顕微鏡を用いた NV センター由来の発光 (PL) スペクトル ( $640 \sim 660 \text{ nm}$ ) 測定によって, NV センター形成の有無を確認した. レーザー照射前のダイヤモンド試料でも NV センター由来の発光が確認できたため, レーザー未照射部における蛍光強度で規格化した. Fig. 8 に示すように, 光学顕微鏡において黒色に変化した領域は, グラファイト化しており, 発光強度が著しく低下した. 一方, グラファイト化していない照射部ではレーザー照射により新たに形成された NV センターによって, 発光強度が増加した. グラファイト化および NV センター形成確率をパルス幅で比較すると, パルス幅を短くすることによって, グラファイト化よりも優先的に NV センターが形成するエネルギー範囲が明らかに広がった. 特に,  $40 \text{ fs}$  の場合,  $40 \text{ nJ}$  以下では, グラファイト化確率はほぼゼロであった. Fig. 9 にパルスエネルギーに対する NV センター形成確率および規格化した発光強度変化をまとめて示す. この結果は, 短パルスの方が長パルスに比べグラファイト化を抑制しながら NV センターを形成可能であることを示唆している. このような改質挙動の違いは, パルス幅による光イオン化過程やプラズマによる吸収の寄与の違い等によると考えられるが, 詳細は今後検討する必要がある.

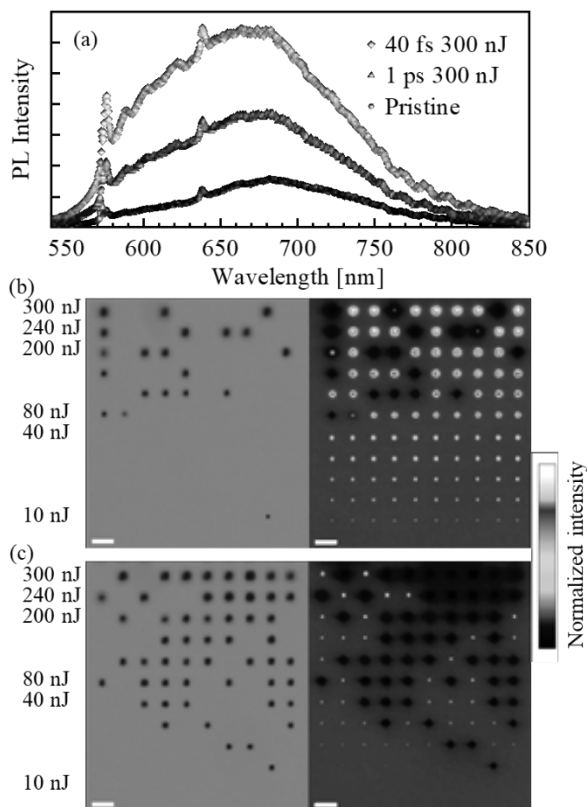


Fig. 8 (a) PL spectra of pristine and NV center formed regions. Optical transmission images (left) and PL maps (right) of modified regions induced by (a) 40 fs pulses and (b) 1 ps pulses. The scale bar indicates 10  $\mu\text{m}$ . The irradiated pulse energy are shown on the left end.

#### 4. 結言

最近の超短パルスレーザー光源の進歩にともない、非線形光学現象を応用した加工技術の発展が目覚ましい。中でも、SiC やダイヤモンドをはじめとして、炭素繊維複合材料 (CFPR) に代表される難加工材料において、高精度なレーザー加工用光源として積極的に利用されている。また、バッテリーや航空機エンジンなどの精密なレーザー加工をはじめとして、材料表面および内部のナノ加工などに代表される高付加価値レーザー加工技術においても、超短パルスの特徴を活かした研究開発も活発に行われている。今後は、量子技術、バーチャルリアリティ、自動運転車用のカメラや各種センサー等の分野においても超短パルスレーザープロセッシング技術の応用が期待される。半導体製造技術等の各種微細加工技術を駆使することによって、量子情報デバイスの分野への応用の可能性も秘めており、今後の積極的な研究開発が求められる。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 17H03040 による。ダイヤモンド NV センターの評価方法に関して、ご討論頂いた京都大学 水落憲和教授に感謝する。

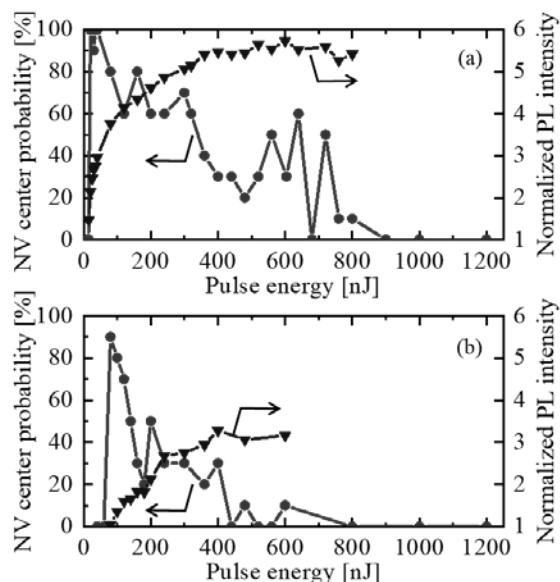


Fig. 9 PL intensity and NC center formation probability as a function of pulse energy for (a) 40 fs pulses and (b) 1 ps pulses. Because all of irradiated regions were graphitized at pulse energy higher than 900 nJ for 40 fs and 800 nJ for 1ps, PL intensity is not depicted at the energy higher than its energy.

#### 参考文献

- (1) Tairov, Yu. M. and Tsvetkov, V. F.: Investigation of growth processes of ingots of silicon carbide single crystals, *J. Cryst. Growth*, 43, (1973), 209.
- (2) Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. and Toyoda, Y.: Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, *App. Phys. Lett.*, 48, (1986), 353.
- (3) Ueda, N., Hosono, H., Waseda, R. and Kawazoe, H.: Synthesis and control of conductivity of ultraviolet transmitting  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals, *Appl. Phys. Lett.*, 70, (1998), 3561.
- (4) Mokuno, Y., Chayahara, A., Soda, Y., Horino, Y. and Fujimori, N.: Synthesizing single-crystal diamond by repetition of high rate homoepitaxial growth by microwave plasma CVD, *Diamond Related Mater.*, 14, (2005), 1743.
- (5) Melnik, Yu., Soukhoveev, V., Ivantsov, V., Sizov, V., Pechnikov, A., Tsvetkov, K., Kovalenkov, O., Dmitriev, V., Nikolaev, A., Kuznetsov, N., Silveira, E. and Freitas Jr., J.: AlN substrates: fabrication via vapor phase growth and characterization, *Phys. Stat. Sol. A*, 200, (2003), 22.
- (6) Willander, M., Friesel, M., Wahab, Q. and Straumal, B.: Silicon carbide and diamond for high temperature device applications, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 17, (2006), 1.
- (7) Chow, T. P., Omura, I., Higashiwaki, M., Kawarada, H. and Pala, V.: Smart power devices and ICs using GaAs and wide and extreme bandgap

- semiconductors, *IEEE Trans. Electron Devices*, 64, (2017), 856.
- (8) Tsao, J. Y., Chowdhury, S., Hollis, M. A., Jena, D., Johnson, N. M., Jones, K. A., Kaplar, R. J., Rajan, S., Van de Walle, C. G., Bellotti, E., Chua, C. L., Collazo, R., Coltrin, M. E., Cooper, J. A., Evans, K. R., Graham, S., Grotjohn, T. A., Heller, E. R., Higashiwaki, M., Islam, M. S., Juodawlkis, P. W., Khan, M. A., Koehler, A. D., Leach, J. H., Mishra, U. K., Nemanich, R. J., Pilawa - Podgurski, R. C. N., Shealy, J. B., Sitar, Z., Tadjer, M. J., Witulski, A. F., Wraback, M. and Simmons, J. A.: Ultrawide-bandgap semiconductors: Research opportunities and challenges, *Adv. Electron. Mater.*, 4, (2018), 1600501.
- (9) Phillips, D. J., Smith, E. R., Luo, H., Wellenius, P., Muth, J. F., Foreman, J. V. and Everitt, H. O.: The potential of wide band-gap semiconductor materials in laser-induced semiconductor switches, *Proc. of SPIE*, 7311, (2009), 731109.
- (10) Orita, M., Ohta, H., Hirano, M. and Hosono, H.: Deep-ultraviolet transparent conductive  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films, *Appl. Phys. Lett.*, 77, (2000), 4166.
- (11) He, H., Blanco, M. A. and Pandey, R.: Electronic and thermodynamic properties of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Appl. Phys. Lett.*, 88, (2006), 261904.
- (12) Ohmura, E., Kumagai, M., Nakano, M., Kuno, K., Fukumitsu, K. and Morita, H.: Analysis of processing mechanism in stealth dicing of ultra thin silicon wafer, *J. Adv. Mech. Des. Syst.*, 2, (2008), 540.
- (13) DISCO Abrasive Systems, Method for production of SiC plate-like workpiece, Japan patent JP2015-223589A
- (14) Koch, W., Endrös, A. L., Franke, D., Häbeler, C., Kalejs, J. P. and Möller, H. J.: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, A. Luque and S. Hegedus, ed. (Wiley, 2002), Chap. 6.4.
- (15) Di Cioccio, L., Letertre, F., Le Tiec, Y., Papon, A. M., Jaussaud, C. and Bruel, M.: Silicon carbide on insulator formation by the Smart-Cut® process, *Mater. Sci. Eng. B*, 46, (1997), 349.
- (16) Lee, J. H., Bargatin, I., Park, J., Milaninia, K. M., Theogarajan, L. S., Sinclair, R. and Howe, R. T.: Smart-cut layer transfer of single-crystal SiC using spin-on-glass, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 30, (2012), 042001.
- (17) Fukuyo, F., Fukumitsu, K. and Uchiyama, N.: The stealth dicing technologies and their application, *Proc. LPM*, (2005).
- (18) Ohmura, E., Fukuyo, F., Fukumitsu, K. and Morita, H.: Internal modified-layer formation mechanism into silicon with nanosecond laser, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, 17, (2006), 381.
- (19) Okada, T., Tomita, T., Matsuo, S., Hashimoto, S., Ishida, Y., Kiyama, S. and Takahashi, T.: Formation of periodic strained layers associated with nanovoids inside a silicon carbide single crystal induced by femtosecond laser irradiation, *J. Appl. Phys.*, 106, (2009), 054307.
- (20) Castelletto, S., Almutairi, A. F. M., Thalassinos, G., Lohrmann, A., Buividas, R., Lau, D. W. M., Reineck, P., Juodkazis, S., Ohshima, T., Gibson, B. C. and Johnson, B. C.: Fluorescent color centers in laser ablated 4H-SiC nanoparticles, *Opt. Lett.*, 42, (2017), 1297.
- (21) Choi, I., Jeong, H. Y., Shin, H., Kang, G., Byun, M., Kim, H., Chitu, A. M., Im, J. S., Ruoff, R. S., Choi, S.-Y. and Lee, K. J.: Laser-induced phase separation of silicon carbide, *Nat. Commun.*, 7, (2016), 13562.
- (22) Kim, E., Shimotsuma, Y., Sakakura, M. and Miura, K.: 4H-SiC wafer slicing by using femtosecond laser double-pulses, *Opt. Mater. Express*, 7, (2017), 2450.
- (23) Sugioka, K., Iida, M., Takai, H. and Micorikawa, K.: Efficient microwelding of glass substrates by ultrafast laser irradiation using a double-pulse train, *Opt. Lett.* 36, (2011), 2734.
- (24) Tomita, T., Saito, S., Suemoto, T., Harima, H. and Nakashima, S.: Structure dependent ultrafast relaxation time of photo-excited carriers in SiC, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 73, (2004), 2554.
- (25) Hall, R. N.: Electron-hole recombination in germanium, *Phys. Rev.*, 87, (1952), 387.
- (26) Shockley, W. and Read, Jr., W. T.: Statistics of the recombinations of holes and electrons, *Phys. Rev.*, 87, (1952), 835.
- (27) Ščajev, P., Gudelis, V., Jarašiūnas, K. and Klein, P. B.: Fast and slow carrier recombination transients in highly excited 4H- and 3C-SiC crystals at room temperature, *J. Appl. Phys.*, 108, (2010), 023705.
- (28) Burton, J. C., Sun, L., Pophristic, M., Lukacs, S. J., Long, F. H., Feng, Z. C. and Ferguson, I. T.: Spatial characterization of doped SiC wafers by Raman spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, 84, (1998), 6268.
- (29) Nakashima, S., Mitani, T., Tomobe, M., Kato, T. and Okumura, H.: Raman characterization of damaged layers of 4H-SiC induced by scratching, *AIP Adv.*, 6, (2016), 015207.
- (30) Ferrari, A. C. and Robertson, J.: Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, *Phys. Rev. B*, 61, (2000), 14095.
- (31) Miura, K., Qiu, J., Mitsuyu, T. and Hirao, K.: Space-

- selective growth of frequency-conversion crystals in glasses with ultrashort infrared laser pulses, *Opt. Lett.*, 25, (2000), 408.
- (32) Ma, H., Guo, G., Yang, J., Guo, Y. and Ma, N.: Femtosecond laser irradiation-induced phase transformation on titanium dioxide crystal surface, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 264, (2007), 61.
- (33) Nakamura, K., Sora, Y., Yoshikawa, H. Y., Hosokawa, Y., Murai, R., Adachi, H., Mori, Y., Sasaki, T. and Masuhara, H.: Femtosecond laser-induced crystallization of protein in gel medium, *Appl. Surf. Sci.*, 253, (2007), 6425.
- (34) Jeschke, H. O., Garcia, M. E. and Bennemann, K. H.: Microscopic analysis of the laser-induced femtosecond graphitization of diamond, *Phys. Rev. B*, 60, (1999), R3701.
- (35) Wang, C. Z., Ho, K. M., Shirk, M. D. and Molian, P. A.: Laser-induced graphitization on a diamond (111) surface, *Phys. Rev. Lett.*, 85, (2000), 4092.
- (36) Shimizu, M., Shimotsuma, Y., Sakakura, M., Yuasa, T., Homma, H., Minowa, Y., Tanaka, K., Miura, K. and Hirao, K.: Periodic metallo-dielectric structure in diamond, *Opt. Express*, 17, (2009), 46.
- (37) Matsumoto, S., Sato, Y., Kamo, M. and Setaka, N.: Vapor deposition of diamond particles from methane, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 21, (1982), L183.
- (38) Pezzagna, S., Rogalla, D., Wildanger, D., Meijer, J. and Zaitsev, A.: Creation and nature of optical centres in diamond for single-photon emission - overview and critical remarks, *New J. Phys.*, 13, (2011), 035024.
- (39) McLellan, C. A., Myers, B. A., Kraemer, S., Ohno, K., Awschalom, D. D. and Jayich, A. C. B.: Patterned formation of highly coherent nitrogen-vacancy centers using a focused electron irradiation technique, *Nano. Lett.*, 16, (2016), 2450.
- (40) Zhang, X., Wang, F., Jiang, L. and Yao, Y.: Manipulation of the dielectric properties of diamond by an ultrashort laser pulse, *Phys. Rev. B*, 95, (2017), 184301.
- (41) Kononenko, V. V., Vlasov, I. I., Gololobov, V. M., Kononenko, T. V., Semenov, T. A., Khomich, A. A., Shershulin, V. A., Krivobok, V. S. and Konov, V. I.: Nitrogen-vacancy defects in diamond produced by femtosecond laser nanoablation technique, *Appl. Phys. Lett.*, 111, (2017), 081101.
- (42) Chen, Y.-C., Salter, P. S., Knauer, S., Weng, L., Frangeskou, A. C., Stephen, C. J., Ishmael, S. N., Dolan, P. R., Johnson, S., Green, B. L., Morley, G. W., Newton, M. E., Rarity, J. G., Booth, M. J. and Smith, J. M.: Laser writing of coherent colour centres in diamond, *Nat. Photon.*, 11, (2017), 77.
- (43) Sotillo, B., Bharadwaj, V., Hadden, J. P., Sakakura, M., Chiappini, A., Fernandez, T. T., Longhi, S., Jedrkiewicz, O., Shimotsuma, Y., Criante, L., Osellame, R., Galzerano, G., Ferrari, M., Miura, K., Ramponi, R., Barclay, P. E. and Eaton, S. M.: Diamond photonics platform enabled by femtosecond laser writing, *Sci. Rep.*, 6, (2016), 35566.

## 短パルスレーザー照射による超硬合金の表面改質

Modification of WC/Co Surface by Short-Pulse Laser Irradiation

青野祐子\*, 廣崎浩司\*\*, 徳永隆司\*\*, 平田 敦\*

\*東京工業大学

(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

\*\*京セラ株式会社

(〒895-0292 鹿児島県薩摩川内市高城 1810)

Yuko AONO\*, Koji HIROSAKI\*\*, Takashi TOKUNAGA\*\*, Atsushi HIRATA\*

\*Tokyo Institute of Technology

(2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan)

E-mail: aono.y.aa@m.titech.ac.jp

\*\*KYOCERA Corporation

(1810 Taki-cho, Satsumasendai-shi, Kagoshima 895-0292, Japan)

水中でパルス幅ナノ秒以下の短パルスレーザーを照射することで、金属材料表面のピーニング処理が可能である。本研究では、このレーザーピーニングによる表面改質を、工具用超硬合金 (WC/Co) へ実施し、硬さと耐摩耗性を評価した。また、セラミックと金属から成る複合材料でのレーザーピーニング効果の発現メカニズムを解明した。適切なエネルギー密度で処理することで、最大約 50HV の硬さ向上が見られ、このときの改質層の厚さは 0.1mm 以上に及んだ。この硬さ向上効果は、Co 含有量の増加に伴い大きくなる。さらに、ナノインデンテーション法による W 相と Co 相の硬さ試験からも、Co 相が硬くなっていることが示唆されており、超硬合金のレーザーピーニングは金属相の硬度向上によるものであると結論づけた。本手法により先端を処理した超硬切削工具を用い、外径旋削により耐摩耗性を評価した結果、未処理工具に比べ摩耗量は約半分まで軽減された。

Surface of WC/Co alloy for cutting tool was modified by irradiation of short-pulse laser to improve its hardness and wear durability. The surface hardness increased by up to about 50HV when it was treated with optimum laser fluence and number of scanning. Results of nano-indentation test suggests that the hardness increase was mainly caused by work hardening of metal or Co phase. The modification technique was then applied to WC/Co cutting tool. Out side of SCM steel rod was cut with both flank and rake faces treated tool. Wear of the tip was about half of non-treated WC/Co cutting tool.

**Key words:** laser peening, surface modification, WC/Co alloy, cutting tool

# プレナリーセッション

# Diamond lenses enable ultra-compact and lightweight laser processing heads

Martin TRAUB<sup>\*1</sup>, Carlo HOLLY<sup>\*1</sup>, Angelo DI MEO<sup>\*2</sup>, Dennis ARNTZ<sup>3</sup>,  
Mario HESKER<sup>\*1</sup>, Dieter HOFFMANN<sup>\*1</sup>, Christoph NEBEL<sup>\*4</sup>, Reinhart POPRAWÉ<sup>\*1,3</sup>

\*1 Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Steinbachstrasse 15, 52074 Aachen, Germany  
info@ilt.fraunhofer.de

\*2 EdgeWave GmbH, Carlo-Schmid-Straße 19, 52146 Wuersele, Germany

\*3 Chair for Laser Technology LLT, RWTH Aachen University,  
Steinbachstrasse 15, 52074 Aachen, Germany

\*4 Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF, Tullastrasse 72,  
79108 Freiburg, Germany

Monocrystalline synthetic CVD (chemical vapor deposition) diamond as optics material offers unique potential for the future of high power laser application. The outstanding materials properties include extremely high thermal conductivity, wide transmission range, high index of refraction and high hardness as well as high young's modulus. These properties enable extremely small and lightweight laser processing heads. We will present the manufacturing and characterization results of diamond lenses suited for high power applications, and an ultra-compact laser processing head based on diamond lenses will be discussed. The laser processing head is designed for sheet metal cutting and was successfully tested with a 1 kW single mode cw fiber laser.

**Keywords:** Monocrystalline synthetic diamond, diamond lens, lens design, laser cutting, laser processing head

## 1. Introduction

Poly-crystalline diamond (PCD) is well established as an optical material for high power CO<sub>2</sub>-lasers emitting in the MIR at 10.6 μm [1]. Due to scattering at the grain boundaries, considerable losses occur if PCD is used for disc and fiber lasers which emit at around 1 μm. In contrast, high quality mono-crystalline diamond (MCD) offers a sufficiently high transmission and is suited for the visible to NIR wavelength range. The MCD used for the experiments were grown by use of microwave assisted chemical vapor deposition (CVD) [2], [3].

In a cooperation between the Fraunhofer ILT, IAF and IPT the complete process chain for setting up small and lightweight laser processing heads has been developed. This process chain includes optical design based on the specific properties of diamond, manufacturing of synthetic diamonds, lenses and adapted optical coating, mechanical design of laser processing heads and applications like laser cutting.

### 1.1 Material properties compared to fused silica

Although an extremely wide range of amorphous optical materials are available, almost all glasses are not suited for high power laser applications due to the relatively high coefficient of thermal expansion (CTE) in combination with a thermal conductivity typically below 2 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. The laser power absorbed by coatings and bulk material leads to temperature gradients and mechanical stress. Both

**Table 1** Material properties of monocrystalline diamond compared to fused silica [3].

Property	Monocrystalline diamond	Fused silica
Thermal Conductivity $k$	>2,000 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1.38 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Thermal Expansion CTE	1.0 × 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	0.51 × 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Index of Refraction $n_d$	2.42	1.46
Transmission range $\lambda_{\min}$ - $\lambda_{\max}$	0.23-100 μm	0.17-2.8 μm
Knoop hardness	90 GPa	6 GPa
Young's Modulus $E$	1220 GPa	70 GPa
Density $\rho$	3,520 Kg m <sup>-3</sup>	2,200 Kg m <sup>-3</sup>

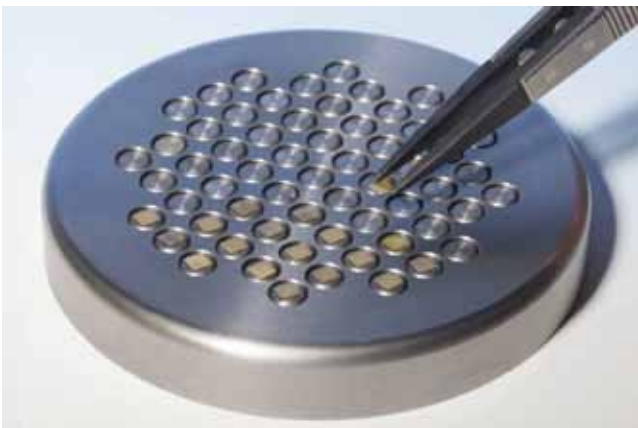
effects change the optical properties of the bulk material, and the mechanical tension caused by the non-uniform heating can destroy the optical component. Fused silica is a well-established material for high power laser applications

due to low absorption and thermal expansion, but the low thermal conductivity results in large temperature gradients and thereby significant thermal lensing. In contrast to fused silica, diamond offers a very high thermal conductivity (3 orders of magnitude larger). Therefore, significantly smaller temperature gradients occur for diamond lenses compared to fused silica lenses. In addition, the difference of the index of refraction of diamond and air is approximately twice as large as the corresponding value for fused silica. The higher index results in smaller spherical aberrations, which are dominant for centered laser optics, and for a given refraction power, larger radii and thus thinner lenses can be realized. The material properties of diamond and fused silica are summarized in Table 1.

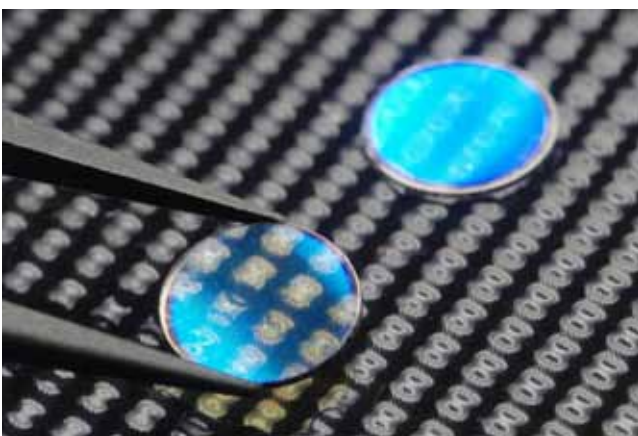
## 2. Manufacturing of diamond lenses

The manufacturing process of the diamond lenses consists of the steps growing of substrates, grinding of optical surfaces, centering and coating.

The substrates used for manufacturing the diamond lenses are grown in a microwave plasma enhanced chemical vapor deposition (MPECVD) reactor. The typical linear growth rate amounts to  $3\text{--}5\ \mu\text{m} \times \text{h}^{-1}$ . To scale the volume growth rate, up to 61 MCD substrates are grown in parallel as shown in Fig. 1.



**Fig. 1** Substrate holder for parallel growth of up to 61 substrates [3].



**Fig. 2** Coated diamond lenses (diameter: 8 mm) [3].

After growth the substrates are separated from the growth diamonds by laser cutting. These substrates serve as blanks for the subsequent conventional grinding and pol-

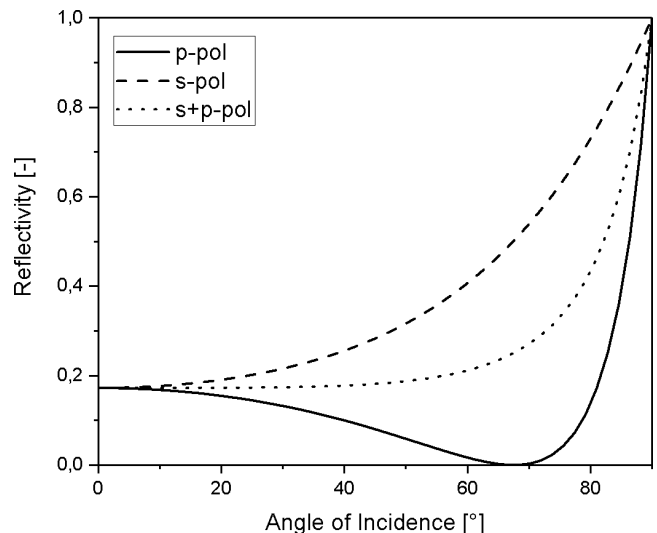
ishing process. Either one or both sides can be curved. Since the outer shape of the blanks as well as the relative position of the spherical surfaces are not defined, a second laser cutting process is applied to center the lens and to generate a cylindrical lens' edge. Alternatively, the laser ablation process allows to generate a conical surface to optimize the heat flow between the diamond lens and the lens mount [4]. Centered as well as coated MCD lenses are shown in Fig. 2.

### 2.1 Coating design

The high index of refraction of diamond causes comparably high Fresnel losses for an uncoated diamond-to-air interface, and the losses amounts to 17.2% per surface for normal incidence (see Fig. 3).

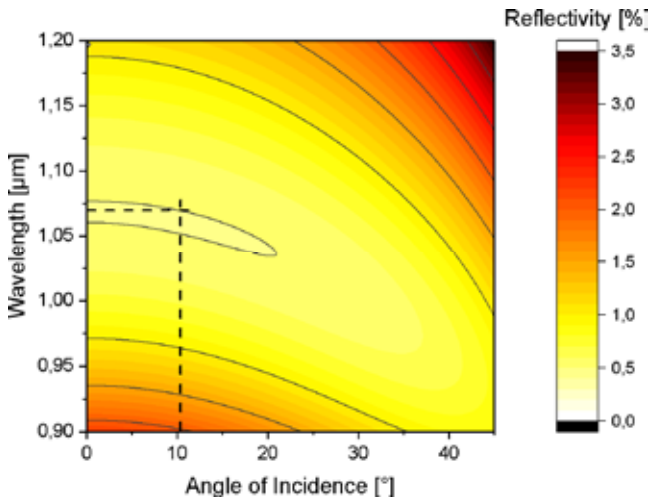
Optical thin film coatings significantly reduce the Fresnel losses. The simplest design consists of a single layer with an optical path length of  $\lambda/4$ , resulting in two reflected partial waves with an optical path difference of  $\lambda/2$ . Perfectly destructive interference of the two reflected waves occurs if the amplitudes of both waves are equal. Thus the ratio of the refractive indices of the surrounding atmosphere  $n_a$  and the coating material  $n_c$  shall be equal to the ratio of the refractive indices of the coating material  $n_c$  and the diamond bulk material  $n_d$ . If the surrounding material is air ( $n_a=1$ ), the refractive index of an ideal coating material  $n_{c,i}$  amounts to

$$n_{c,i} = \sqrt{n_d} \approx 1.56. \quad (1)$$



**Fig. 3** Reflectivity of uncoated diamond as a function of the angle of incidence for s-, p- and average polarized radiation ( $\lambda=1.07\ \mu\text{m}$ ).

Although not perfectly matched,  $\text{SiO}_2$  is a well suited material for coating diamond due to chemical stability, low absorption and similar CTE compared to diamond. As shown in Fig. 4, the reflectivity is below 0.5% for a wavelength range between  $1.02\ \mu\text{m}$  and  $1.08\ \mu\text{m}$ . For the design wavelength of  $1.07\ \mu\text{m}$ , the reflectivity is below 0.5% up to an angle of incidence of  $10^\circ$ . Both ranges are sufficient for typical high power laser applications if the optical system consists of a small number of optical components.

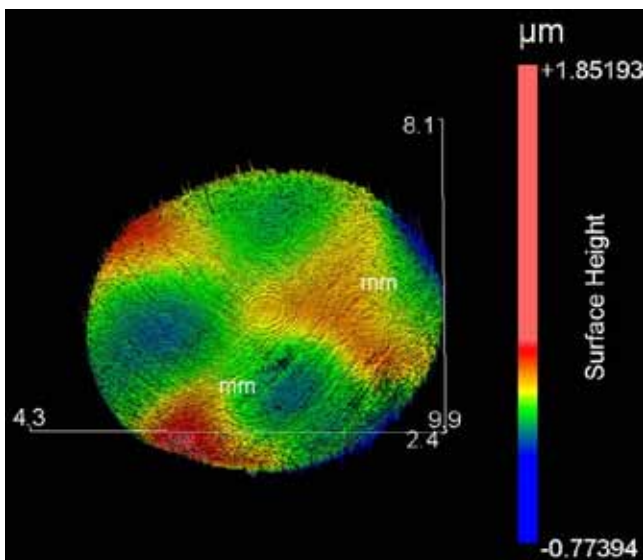


**Fig. 4** Reflectivity of a diamond-to-air interface coated with a single layer of SiO<sub>2</sub> as a function of angle of incidence and wavelength (surrounding media is air;  $n_a=1$ ).

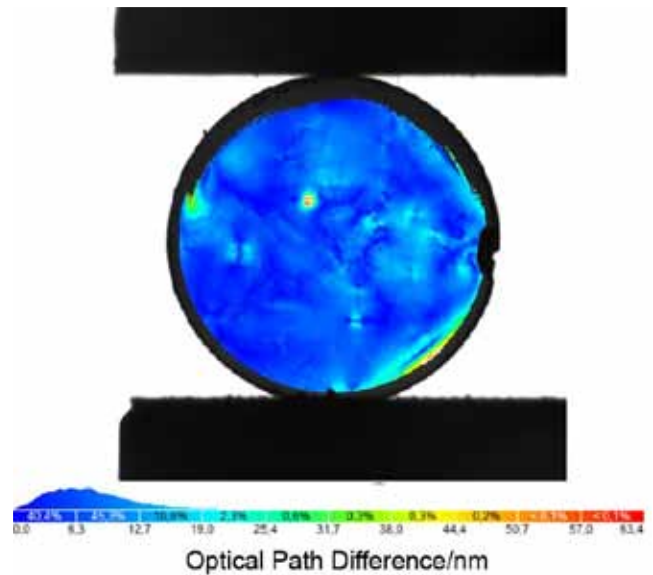
**3. Characterization of diamond lenses**

Beside reflection losses, the quality of the bulk material, surface roughness and form deviation influence the performance of optical components. Surface irregularities and local variation of the index of refraction caused by imperfections deform the wave front of a transmitted laser beam and increase the spot size in the focal plane compared to an ideal lens. Scattering induced by surface roughness causes power losses and heating of lens mounts and housings.

After polishing, the diamond lenses' surface shape and roughness are measured using a white light interferometer. Fig. 5 shows the height plot of a typical diamond lens (DL2). For this lens, the peak-to-valley (PV) value of the surface deviation amounts to 0.338 μm or  $\lambda/3$  for a wavelength of 1.07 μm. The smallest surface deviation observed amounts to 0.169 μm ( $\lambda/6$ ).



**Fig. 5** False color plot of the lens' surface topology (best sphere removed; scale bar is larger than the P-V value).



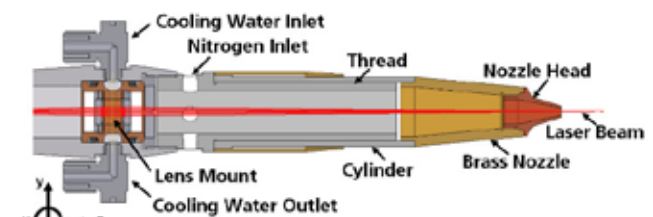
**Fig. 6** Polariscope analysis of a finished diamond lens (diameter: 8 mm).

The surface roughness amounts to 49 nm (surface roughness depth  $R_z$ ) and 7 nm (arithmetic mean surface roughness  $R_a$ ).

Impurities and dislocations can form during the growth process inside the diamond. These imperfections lead to scattering centers, local refractive index gradients and birefringence, which causes depolarization of the light field [5]. The analyzed diamond exhibits large areas that induce only small changes in the polarization. A few dislocations in the crystal cause characteristic stress fields, which lead to birefringence. The defects causing a maximum wavefront deviation of 63.4 nm are shown in Fig. 6. According to the plotted histogram, the deviation is below 19.0 nm for more than 95% of the projected volume.

**4. Design and characterization of the laser processing head**

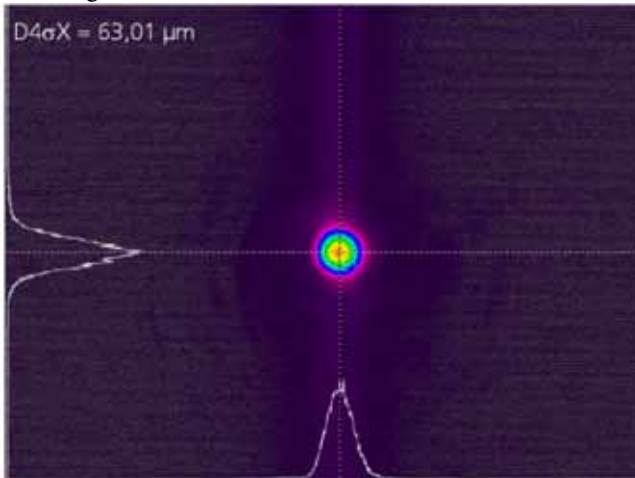
The laser head is designed for thin metal sheet cutting. One of the main goals of the optical and mechanical design process was to minimize the laser processing head's weight and size. Therefore, no conventional fiber mount and collimating optics was foreseen. Instead the QBH fiber is directly connected to the laser processing head. The lens mount is made of copper and cooled by water. To adjust the nozzle's outlet to the laser's focal plane, the nozzle can be axially moved by a threaded cylinder. A cross section of the laser processing head is shown in Fig. 7. The realized laser processing head weights approx. 200 g.



**Fig. 7** Mechanical design of the laser processing head.

The optical system images the fiber exit plane onto the workpiece. The waist diameter ( $1/e^2$ ) expected by design

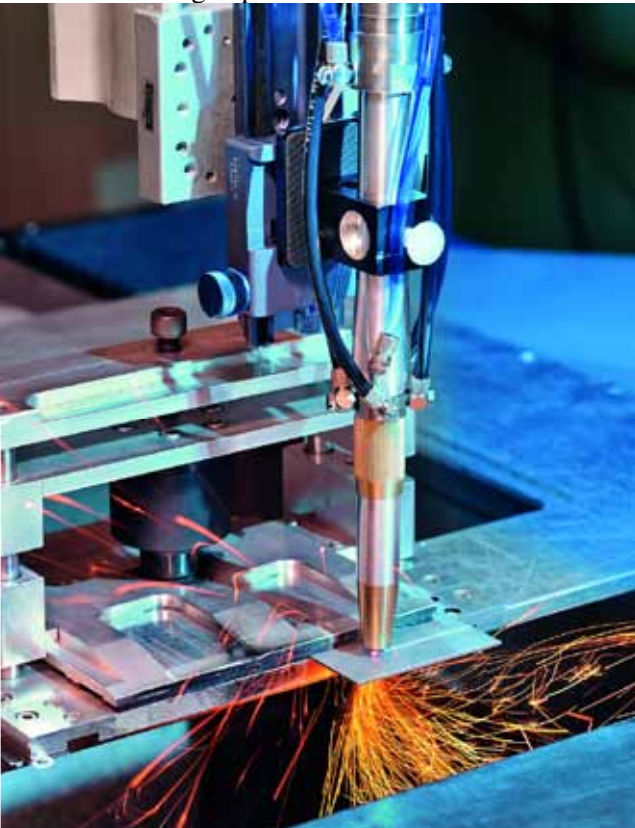
amounts to  $54\ \mu\text{m}$ . Although the optical design is diffraction limited (wavefront deviation  $< 0.01\lambda$  PV), the measured waist size is  $63\ \mu\text{m}$  which is 17% larger than the theoretical value (see Fig. 8). The observed decrease in beam quality is mainly caused by surface irregularities and de-centering of the diamond lenses.



**Fig. 8** Intensity distribution in the focal plane, measured with a single mode fiber laser at 48 W output power.

### 5. Laser cutting results

For the cutting experiments, a 1 kW single mode fiber laser was used. The sheet metal was attached to a motorized x-y-table. The parameters of the cutting experiments are summarized in table 2 and Fig. 9 shows the cutting experiment.



**Fig. 9** Laser cutting experiment with the compact material processing head based on MCD lenses.

**Table 2** Parameters of the laser cutting experiments.

Property	Experiment A	Experiment B
Material	1.4301	1.4301
Thickness	1.0 mm	1.5 mm
Nitrogen pressure	5.0 bar	8.5 bar
Cutting speed	2.5 m/min	1.0 m/min

### 6. Summary

Based on diamond lenses manufactured by the Fraunhofer IAF, we have designed, manufactured and tested a compact laser processing head suited for metal sheet cutting with a single mode fiber laser. The lenses were characterized using a white light interferometer and a polariscope.

The realized cutting head weights approx. 200 g which corresponds to a weight reduction of 90% compared to conventional laser cutting heads. Stainless steel sheets with a thickness up to 1.5 mm were cut using the laser processing head and a commercial 1 kW single mode fiber laser. Further experiments will also cover additive manufacturing processes such as laser metal deposition.

### References

- [1] A. Bennett, "Diamond – A Laser Engineer's Best Friend," *Optik & Photonik*, Vol. 9, Issue 4 (Wiley-VCH, Weinheim, 2014), pp. 49–52.
- [2] C. Widmann, W. Müller-Sebert, N. Lang, C. Nebel, "Homoeptaxial growth of single crystalline CVD diamond," *Diamond and Related Materials*, Vol. 64 (Elsevier, Amsterdam, April 2016), pp. 1–7.
- [3] M. Traub, C. Holly, D. Hoffmann, C. Wiedmann, V. Zuerbig, „Synthetic Mono-Crystalline Diamond Lenses for High Power Laser Materials Processing Applications,“ in *Optical Design and Fabrication 2017* (Freeform, IODC, OFT), OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper OTu3B.3.
- [4] C. Holly, M. Traub, D. Hoffmann, C. Widmann, D. Brink, C. Nebel, T. Gotthardt, M. C. Sözbir, C. Wenzel, "Monocrystalline CVD-diamond optics for high-power laser applications," in *Proc. SPIE 9741, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*, 974104 (18 March 2016).
- [5] Friel, I., Clewes, S. L., Dhillon, H. K., Perkins, N., Twitchen, D. J., and Scarsbrook, G. A., "Control of surface and bulk crystalline quality in single crystal diamond grown by chemical vapour deposition," *Diamond Rel. Mater.* 18, 808-815 (2009).

## 1 1 A 1 . 最新のレーザ発振器と加工システム

# ImPACT プログラムにおける マイクロチップレーザ製品化と適用技術開発

Commercialization of micro-tip lasers and  
development of their applications in ImPACT program

佐野雄二\*, 三浦崇広\*, 北村一夫\*

\*国立研究開発法人 科学技術振興機構  
(〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町)

Yuji SANO\*, Takahiro MIURA\*, Kazuo KITAMURA\*

\*Japan Science and Technology Agency  
(K's Gobancho, 7, Gobancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0076, Japan)  
E-mail: yuji.sano@jst.go.jp

内閣府 ImPACT プログラム「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」は、生産現場・社会インフラ・医療・セキュリティーなど様々な分野での利用が可能なレーザ装置を超小型化・簡素化・メンテナンスフリー化することにより、製品・サービス・研究開発の競争力を飛躍的に向上させることを目指している。本プログラムでは高出力化したマイクロチップレーザなど超小型高出力パルスレーザの開発・製品化を進めるとともに、開発したレーザの適用技術開発を進めている。また、マイクロチップレーザの無償貸与を行うとともにレーザ試用プラットフォームの整備を行い、市場への展開を推進している。

**Key words:** ImPACT program, pulse laser, ultra-compact, commercialization, application

## 1. 緒言

革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) は実現すれば産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす科学技術イノベーションの創出を目指したプログラムであり、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の主導で進められている。2014 年度～2018 年度の五カ年にわたり実施され、16 名のプログラム・マネージャー (PM) がハイリスク・ハイインパクトな挑戦的研究開発を推進している<sup>(1)</sup>。その 1 つである「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」では、X線自由電子レーザー (XFEL) を超小型化するための基盤技術の開発と高出力パルスレーザの超小型化開発を推進してきた<sup>(2,3)</sup>。

本稿では、高出力パルスレーザ特にマイクロチップレーザの高出力化・超小型化開発とその製品化および適用技術開発の概要を紹介する。

## 2. 開発内容および開発体制

大出力のパルスレーザは寸法・重量や消費電力が大きく設置環境の制約も大きい。また、装置が高額のため、産業分野における適用は必ずしも進んでい

ない。そこで、マイクロチップレーザ技術やレーザ媒質の結晶方位制御技術を活用し、パルスレーザを超小型化・高効率化・簡素化するとともに低価格化を推進しパルスレーザの適用範囲拡大を図っている。レーザ開発の目標仕様を表 1 に示す。

マイクロチップレーザは分子科学研究所 (分子研) が開発してきた技術<sup>(4-6)</sup>を発展させ、小型のまま高出力化することを目指している。高出力化において最大の課題であった排熱の問題を熱伝導性の高い透明ヒートシンク材とレーザ媒質との常温接合技術で解決し、目標値であるパルスエネルギー 20mJ を手の平サイズで実現している。マイクロチップレーザ発振器の構成を図 1 に示す。

表 1 レーザ装置の目標仕様

	マイクロチップレーザ	テーブルトップレーザ
ピーク出力	約500W(最大500W)	約300W
平均出力	約2W (最大10W)	約300W
レーザ波長	1064nm	1064 nm
パルスエネルギー	20 mJ (最大100mJ)	1J
パルス幅 (半値幅)	400ps-1ns	10-40ns
繰り返し周波数	100Hz	300Hz
偏光	直線偏光 (偏光比>100:1)	直線偏光
ビーム品質 M <sup>2</sup>	<2	約10
装置寸法	20mJ (空冷時) ヘッド部: W100xD150xH60mm 電源部: 19inchラック(3U=4U)	開発機 (ヘッド,電源含む,チラー除く) W1200xD2400xH1800mm 標準機 (ヘッド,電源,チラー含む) W1200xD1700xH1600mm
重量	ヘッド部重量 <1kg (20mJ,空冷時)	約2000kg
制御環境温度	10-30℃	10-30℃ (但し結露なきこと)

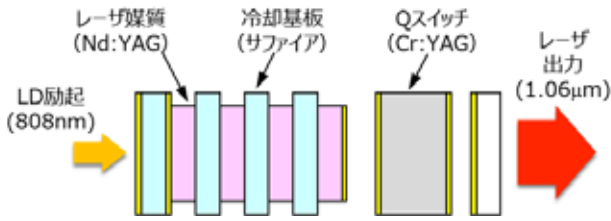


図1 常温接合による高出力マイクロチップレーザ

一方、浜松ホトニクス株式会社（浜ホト）が開発しているテーブルトップレーザは、高エネルギーで高スループットが必要となる応用向けに、ジュール級のパルスエネルギーで高繰り返し発振を目指している<sup>(7)</sup>。セラミックレーザ媒質や小型高出力の半導体レーザ（LD）による励起技術などを活用することにより、目標値であるパルスエネルギー1J、繰り返し300Hzを実現し、長寿命化とランニングコストの低減も期待できる。開発したテーブルトップレーザを図2に示す。

これらのレーザ技術を広く展開していくためには研究試作に留まらず、小型・安価で信頼性の高いレーザ装置として製品化し、市場へ投入する必要がある。本プログラムのレーザ開発・試作、製品化、ユーザー利用、適用技術開発のスキームを図3に示す。

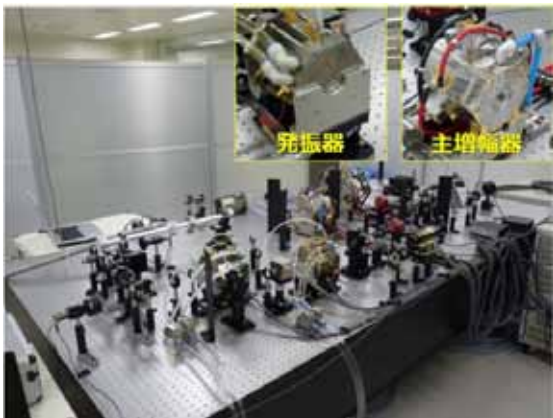


図2 テーブルトップレーザ

マイクロチップレーザについては分子研で開発したレーザの超小型化・高出力化に必要な技術の移管を受け、製品化に意欲的に取り組む企業を公募した。さらに、マイクロチップレーザの特長を生かした応用のアイデア、応用システムの提案も公募し、並行して適用技術開発を推進した。レーザ製品化のみではシーズ指向に偏り応用展開につながらない場合もあるため、適用技術開発も並行して行うことで、ニーズをレーザ開発にフィードバックした。また、メーカーとユーザーとのマッチングを図り、協創的な作業を行うことで、事業化に向けたより具体的な体制構築も期待できる。

開発したレーザの応用展開を広く推進する施策として、マイクロチップレーザを試用できるプラットフォームを構築した。公設試である浜松工業技術支援センターに分子研が開発したレーザを設置して一般に開放することで、ユーザーが気軽にレーザを試す場を提供した。また、ImPACT プログラム終了後も本プラットフォームのレーザをユーザーが利用することにより、レーザ適用技術の開発をユーザーが主体となって推進していくことが期待できる。

### 3. マイクロチップレーザの製品化

マイクロチップレーザの製品化を希望する企業を2016年度に公募した。採択は1社のみとせず複数社とした。1社のみとした場合、事業環境の変化によりレーザ製品事業から撤退するリスクがあることや、競争原理による将来の低価格化の推進を考慮したものである。

広くユーザーに使用されるための最も大きな要因の1つが製品価格である。そこで、製品化したマイクロチップレーザの販売価格が量産時に100万円以下となる計画を提示することを採択の条件の1つとし、低価格化に強い意欲のある企業を募集した。図4に採択した企業とその提案内容を示す。



図3 レーザの実用化・適用技術開発のスキーム



図 4 レーザ製品化 3 社の提案

採択した 3 社は分子研から技術移管を受けるのみではなく、各社が持つ独自技術やアイデアを分子研の技術と融合して製品化する構想を提案しており、特徴のあるマイクロチップレーザが開発・製品化できると期待している。また、3 社の販路やターゲット層には重複が少ないことから、お互い競争しつつ部品の融通や共通化など協力も見込める体制の構築が期待できる。3 社は 2017 年度から試作機の開発を行い、ImPACT 終了の 2018 年度には製品プロト機を完成させ、早ければ 2019 年度に製品としてリリースする計画である。

レーザ試作機は ImPACT ホームページ<sup>(2)</sup>より応募頂くことにより試用が可能である。なお、開発途中であることから試作機は目標仕様を保証するものではなく、また数量に限りがあることから貸出時期などユーザーの要望に応えられない場合があることを留意願いたい。

表 2 第一回「アイデア公募」で採択した提案

#### マイクロチップレーザ（ハンドヘルドレーザ）の応用（7 件）

<b>【製造】先進的スマート溶接システム</b> 提案企業：大阪大学、メーカー他 提案目標：溶接をしながら検査を行うことにより、溶接時に品質を保証。ものづくりをスマート化	<b>【医療】超小型皮膚疾患用レーザー治療器</b> 提案企業：(株)ユニタック 提案目標：マイクロチップレーザで装置を低価格化。市場シェアを獲得し、患者負担を低減
<b>【インフラ】携帯型レーザーによる鋼構造物の疲労き裂防止</b> 提案企業：近畿大学、メーカー他 提案目標：現場で簡単に使える携帯型レーザービーミングシステムを開発し、インフラを長寿命化	<b>【インフラ】産業インフラ検査用レーザー超音波可視化検査</b> 提案企業：つくばテクノロジー(株) 提案目標：現場で使えるレーザー超音波可視化検査装置を開発、簡易で高効率インフラ保守装置を提供
<b>【インフラ】塗膜除去後の品質検査技術</b> 提案企業：(株)トヨコー 提案目標：橋梁等の現場で使える LIBS 塩素分析装置を開発。インフラ寿命を延長	<b>【宇宙】宇宙用液体推進システムの高度化</b> 提案企業：長岡技術科学大学、他 提案目標：超小型で低毒性推進剤のレーザー点火システムを確立し、次世代宇宙産業の国際競争力の優位性確保
<b>【宇宙】宇宙機用液体燃料エンジンのレーザー着火システム</b> 提案企業：(株)IHI エアロスペース 提案目標：レーザー着火システムで宇宙機用エンジンを大幅に簡素化し、国際競争力の優位性を確保	

#### テーブルトップレーザの応用（2 件）

<b>【製造】航空機構造部材のレーザービームフォーミング技術</b> 提案企業：沖縄高専、大阪大学、メーカー他 提案目標：新たな製造技術であるレーザー成形技術を開発し、世界をリード。マーケットを変革	<b>【製造】ナノ秒 J パルスを活用する材料表面加工技術</b> 提案企業：産総研、メーカー他 提案目標：クリーニング技術や摺動シール材の機能向上・低コスト化技術を確立し、産業応用へ広く展開
---	--

#### 4. レーザ適用技術開発

開発中のレーザの特長を生かした適用技術開発の提案を公募した。よりインパクトの高い成果を実現するため、大きな経済効果が期待できるものの実現性や有効性が未確認であり、事前にフィジビリティ・スタディ (FS) が必要な提案を「アイデア公募」として募集した。そこで原理検証を行うとともにアイデアのブラッシュアップを行った。その上で、実用化に向けシステム化の実証まで行う提案を新規提案も含め公募した。2 段階で公募を行うことにより、潜在的なニーズを把握し、意欲あるユーザーの発掘を図った。

セキュリティ応用に関しては社会的意義が大きいため、実施機関を指名して開発に取り組んだ。

##### 4.1 アイデア公募

第一回「アイデア公募」は 2015 年度に実施した。経済効果、市場規模、提案の具体性、実証可能性、レーザの必要性、実施体制などを精査し、17 件の応募からマイクロチップレーザ（ハンドヘルドレーザ）の応用 7 件とテーブルトップレーザの応用 2 件の合計 9 件を採択した。表 2 はその提案内容である。

採択した機関は、約半年間でアイデアの練り上げとニーズの確認を行った。また、分子研および浜松ホトニクスにてレーザ試作機を用いた FS 試験を行い、レーザ装置のイメージを把握するとともに、基礎データの取得やシステム適用性を検証した。その結果、低出力でのシステム成立性や信号強度 (S/N) の向上など従来のレーザと比べた優位性を実証する成果も得た。

第一回「アイデア公募」終了後も再公募の希望が多数あったため、2016年度に第二回「アイデア公募」を実施した。ただし、採択から ImPACT 終了までの期間が短くシステムを実証することが難しいため、FS 実施中または実施後に他の競争的資金などに応募することを条件とした。公募はシステム化実証と同時にを行い、両者合わせ 14 件の応募があった。第一回アイデア公募と同様の観点で審査し、図 5 に示すマイクロチップレーザの応用 4 件を採択した。IHI エアロスペースを除く 3 件は、第一回アイデア公募には提案のなかった新規案件である。採択した 4 機関は FS 試験等により当初の目標を達成し、競争的資金などへの提案活動を行っている。なお、2018 年度には(株)TCK 提案の「装置組み込みが可能な超小型深紫外レーザユニットの開発」を追加で採択した。

#### 4.2 システム化実証

システム化公募は、第二回「アイデア公募」と同時期に行い、ImPACT 期間内にシステム化の実証を完了する提案を募集した。第一回アイデア公募で採択した機関には原則応募を依頼し、新規提案を含め 10 件の応募があった。FS で提案内容がより具体化されていること、市場規模が大きく経済効果が期待でき事業化を実現するための実施体制が整備されてい



図 5 第二回「アイデア公募」で採択した提案



図 6 システム化実証で採択した提案

ること等を精査し、図 6 の 3 機関を採択した。3 機関は ImPACT 終了の 2018 年度までに応用システムを構築し、プロセス性能を実証するとともに事業化に向けた計画を作成している。

#### 4.3 セキュリティー応用

セキュリティーに関する技術は、国民の生命と財産を守るものとして重要であり、ImPACT プログラムのミッションの 1 つである。近年のテロ対策から人が多く集まる都市部や駅などの公共施設で危険物質をいち早く検出することが求められている。その手法として多くの危険物質で強い吸収を示すテラヘルツ (THz) 波を用いたセキュリティー応用が注目されている。

理化学研究所が開発している非線形波長変換 THz 波光源は、サブナノ秒の短いパルス幅が特長のマイクロチップレーザを用いることで、従来の約 10 万倍の出力向上を達成している<sup>(8)</sup>。また光学的な逆変換を用いることで高感度の THz 波検出も実現している<sup>(9)</sup>。本 ImPACT プログラムでは、これらの技術を用いて図 7 に示すような危険ガス検出システムの実現を目指した開発を行っている。危険物質から漂う微量ガス分子を高感度 (10ppb) かつ高速 (1 秒以下) で検出するシステムを開発し、実証機を試作して実用化に向けた課題の明確化を図る計画である。

#### 5. レーザ試用プラットフォームの構築

多くのユーザーと議論していく中で、様々な分野にレーザの応用を広げるためには、ユーザーが気軽にレーザを試用し FS 等が行える場が必要であることが明確になってきた。前述のとおりレーザ試作機の試用品も開始しているが、レーザの取り扱いに不慣れなユーザーによる利用は難しい。そこで、ユーザーサポートを日常業務としている公設試にハンドヘルドレーザを設置し、レーザ試用プラットフォームを構築した。これにより、ImPACT 終了後もユーザーによるレーザ試用の環境が整った。

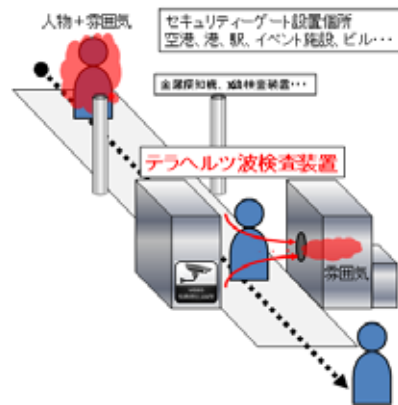


図 7 THz 波による危険ガス検出システム

プラットホームの構築は、全国の公設試の中でも多様なレーザー装置を所有し、レーザーを熟知するとともにユーザーサポート経験の豊富な浜松工業技術支援センターに依頼した。分子研が開発したマイクロチップレーザーに増幅器を加えた MOPA 構成の 100mJ 級レーザー装置を設置し、2018 年 7 月からユーザー利用を開始した<sup>(10)</sup>。今年度中には手の平サイズのハンドヘルド型も設置し、利用に供していく予定である。

プラットホームに設置したレーザーの仕様を表 3 に、実験ステーションの様子を図 8 に示す。プラットホームの利用は ImPACT ホームページ<sup>(2)</sup>より応募頂くか、浜松工業技術支援センター<sup>(11)</sup>に連絡頂くことにより可能である。

表 3 プラットホームに設置したレーザーの仕様

	波長	パルス幅	繰返し	パルスエネルギー
標準仕様	1064 nm	700 ps	10 Hz	100 mJ
オプション			100 Hz	2.5 mJ

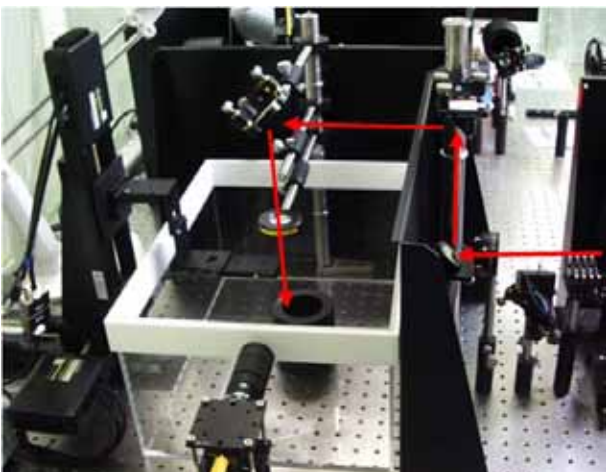
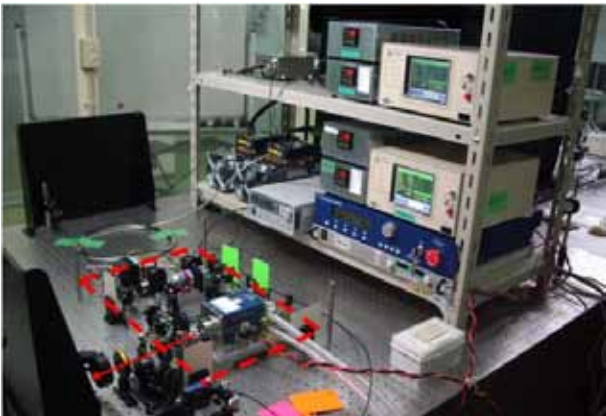


図 8 プラットホームに設置したレーザー (上) と実験ステーション (下)

## 6. 結 言

ImPACT プログラムで開発を進めているマイクロチップレーザー (ハンドヘルドレーザー) およびテーブルトップレーザーの実用化と応用展開に向けた取組について紹介した。両レーザーともに目標出力性能を達成し、実用化に向けたフェーズに入っている。マイクロチップレーザーは、企業 3 社がそれぞれ特長のあるレーザーの製品化に取り組んでいる。そのレーザーを用いた応用では、医療・製造・インフラ・セキュリティと今後も成長が期待できる分野でシステム化の実証を進めている。また、計測や宇宙などの分野においても適用検討が進んでいる。レーザー試用プラットホームの構築も完了し、今後更なる応用展開の拡大が期待できる。

ImPACT プログラムにおけるレーザーの超小型化開発が端緒となり、レーザーが産業や社会の様々な場面で活用され、日常生活に不可欠なツールに成長していくことを願っている。

## 参 考 文 献

- (1) [www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html](http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html)
- (2) [www.jst.go.jp/impact/program/03.html](http://www.jst.go.jp/impact/program/03.html)
- (3) 佐野雄二, "ユビキタス・パワーレーザーによる産業と科学技術の振興," OPTRONICS, (2018) No.4, pp. 140-141.
- (4) 平等拓範, "マイクロドメイン制御によるハイパワーレーザー材料," 応用物理学会誌, Vol. 85, No. 10, pp. 863-869 (2016).
- (5) 平等拓範, "レーザー点火技術の最新動向～自動車エンジンからコージェネレーションガスエンジンまで," 電気学会誌, Vol. 136, No.5, pp. 296-300 (2016).
- (6) 平等拓範, "100MW に迫る掌サイズのマイクロチップレーザーの開発," OPTRONICS, (2018) No.4, pp. 156-161.
- (7) 川嶋利幸, 他, "1J, 300Hz を達成したコンパクトなテーブルトップレーザーの開発," OPTRONICS, (2018) No.4, pp. 151-155.
- (8) 南出泰丞, "高出力テラヘルツ波光源の最先端と広がる応用," 電子情報通信学会誌, Vol. 97, No. 11, pp. 924-930, (2014).
- (9) H. Minamide et al., "Kilowatt-peak Terahertz-wave Generation and Sub-femtojoule Terahertz-wave Pulse Detection Based on Nonlinear Optical Wavelength-conversion at Room Temperature." J Infrared Milli Terahz Waves, Vol. 35, No. 1, pp. 25-37 (2014).
- (10) [www.iri.pref.shizuoka.jp/seminar/event/2215.html](http://www.iri.pref.shizuoka.jp/seminar/event/2215.html)
- (11) [www.iri.pref.shizuoka.jp/about/hamamatsu](http://www.iri.pref.shizuoka.jp/about/hamamatsu)



# Evolution of High Power Diode Lasers from IR to Blue and their applications

- December 2018
- Markus Rütering – Sales Manager Asia & Germany



## Laserline Overview

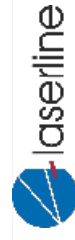
# Company Overview



- Head office, Mülheim-Kärlich, Germany
- Founded in 1997
- Privately owned company:
  - Dr. Christoph Ullmann and Volker Krause
- 350 employees (Sep. 2018)
- Continuous growth
- Approx. 5,500 systems delivered
- Global presence
  - Laserline subsidiaries
  - Distributors
- Leading company in high power diode lasers for industrial us

CONFIDENTIAL

Applications with High Power Diode Lasers



Laserline Overview

Subsidiaries



**USA**

- Sales
- Service
- Applications
- 2 offices in Santa Clara and Detroit



**China**

- Sales
- Service
- Applications
- Office in Shanghai



**Japan**

- Sales
- Service
- Applications
- Office in Tokyo

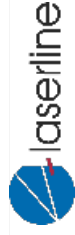


**Korea**

- Sales
- Service
- Applications
- Office in Seoul

**Brazil**

- Sales & Service
- Office in Sao Paulo

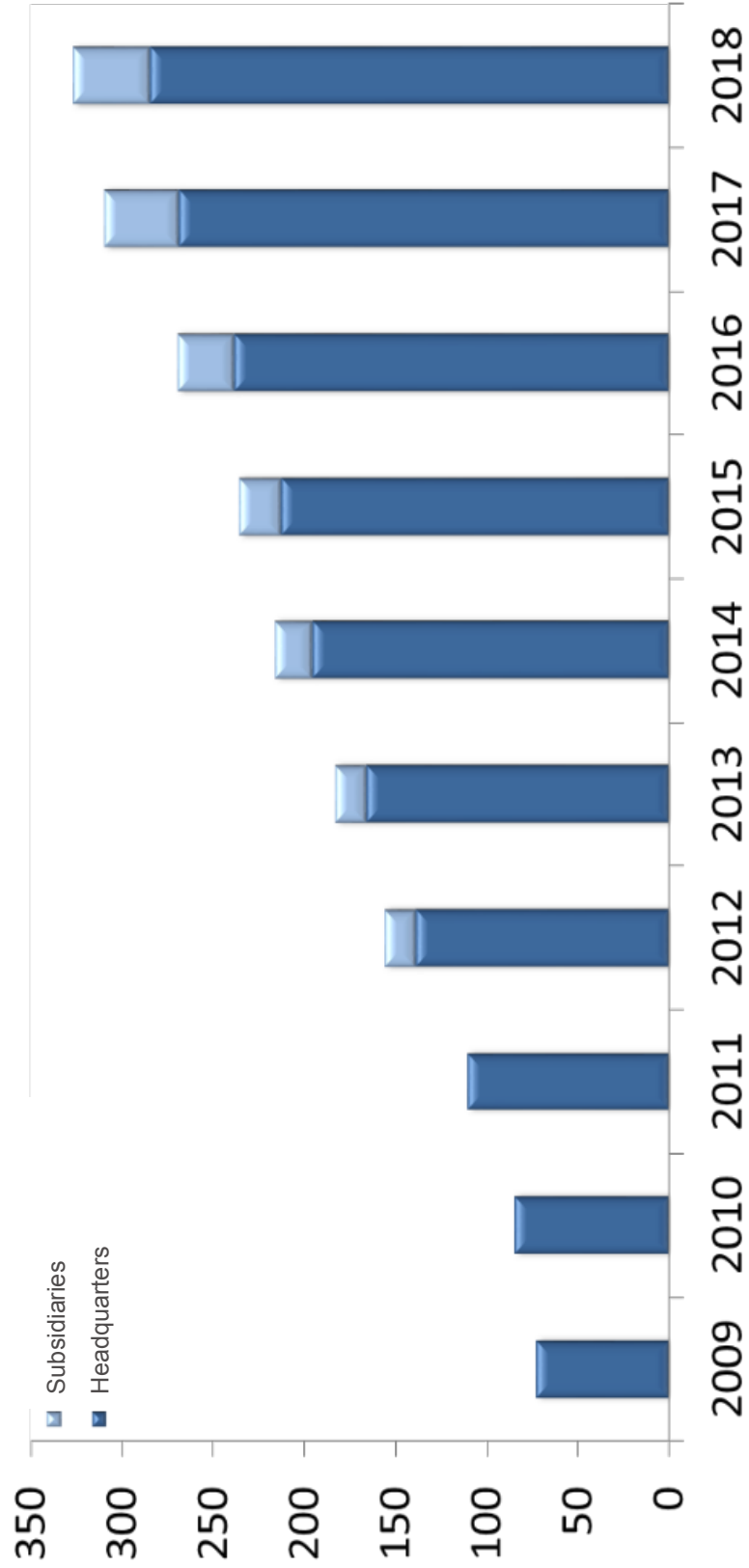


CONFIDENTIAL

Applications with High Power Diode Lasers

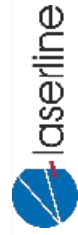
Company Overview

# Company Growth



CONFIDENTIAL

Applications with High Power Diode Lasers



Laserline's Philosophy

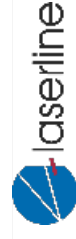
## Customer Relationship

- Cooperative and trustful partnership
- Long term oriented
- Learning from customers in order to improve
- Highest quality products
- Adaptation of products to meet customer requirements



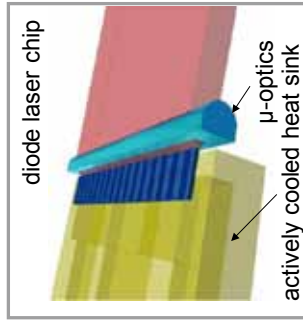
CONFIDENTIAL

Applications with High Power Diode Lasers

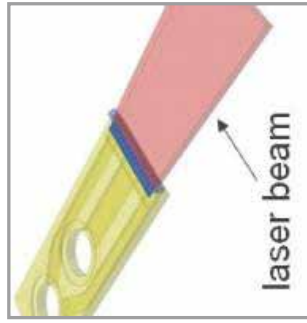


Lasertechnology

# High Power Diode Laser Technology

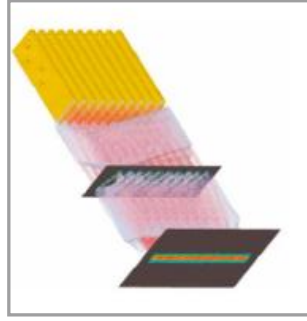


**Diode Laser Chip**



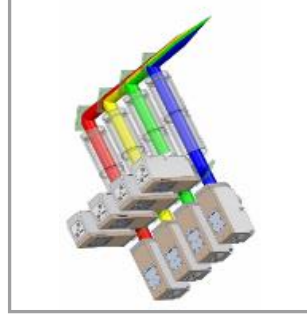
**Diode Laser Bar**

Up to 250 W



**Diode Laser Stack**

500 W to 4.0 kW



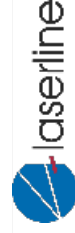
**Diode Laser Head**

Up to 25 kW

- Compact laser design based on diode laser stacks with low number of components
- Active cooling: Enabling technology for most compact design and low costs of production
- Modular, extremely reliable product

CONFIDENTIAL

Applications with High Power Diode Lasers



Laserline's Philosophy

# From Lasers to Solutions

After Sales Service

Special Application Experts for optimization

Commissioning, Start Up and Training

Application Lab and Qualification

Processing Optics

Laser Source



CONFIDENTIAL

Applications with High Power Diode Lasers



7

Laser Products Overview

# Fiber-coupled Diode Laser Systems



## LDF product family

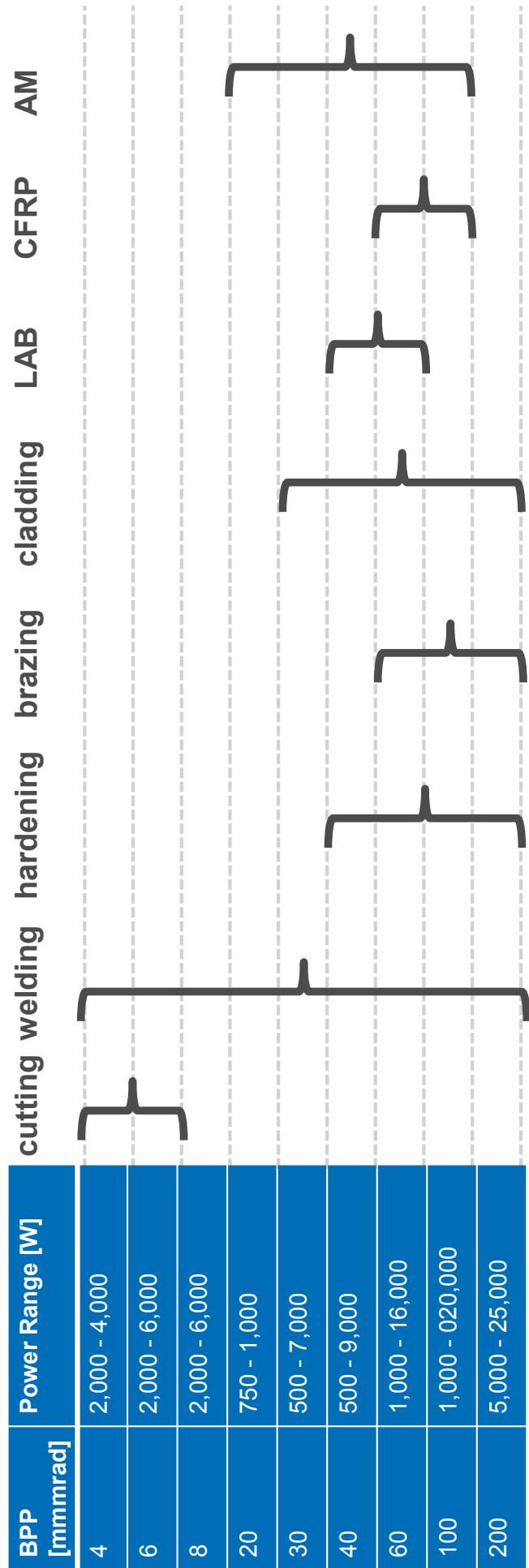
- Up to 25 kW output power diode laser
- Mobile laser systems
- Different sizes and power classes
- Integrated beam quality converter for higher brilliance
- 4 mm mrad @ 4 kW
- 6 mm mrad @ 6 kW

## LDM product family

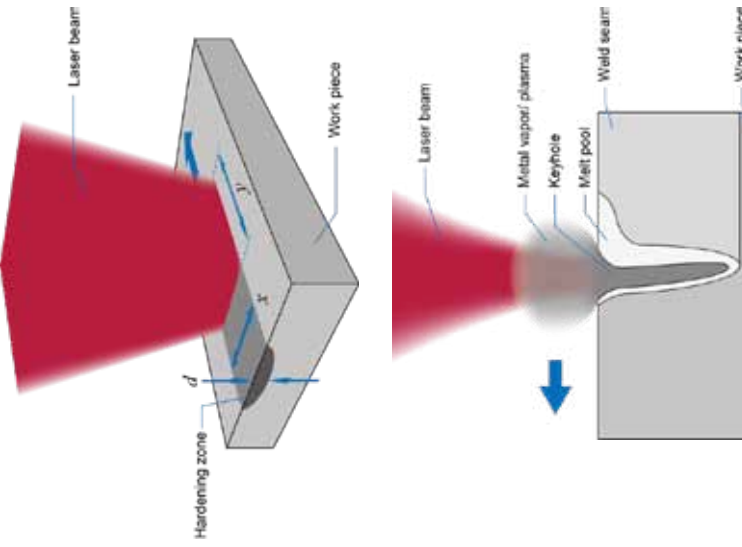
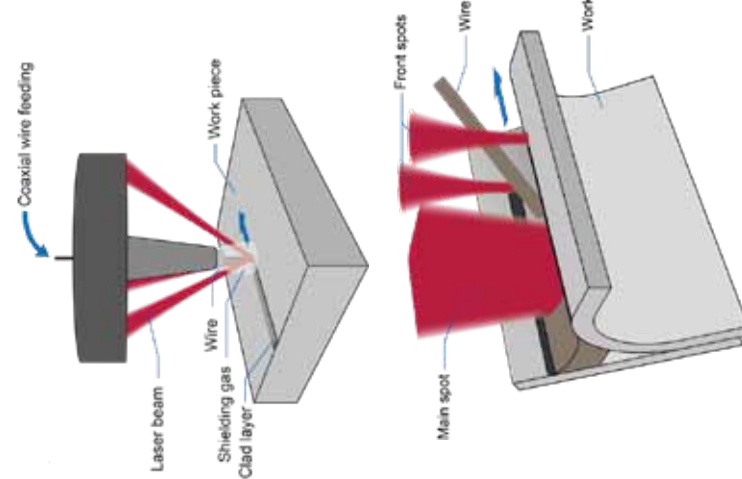
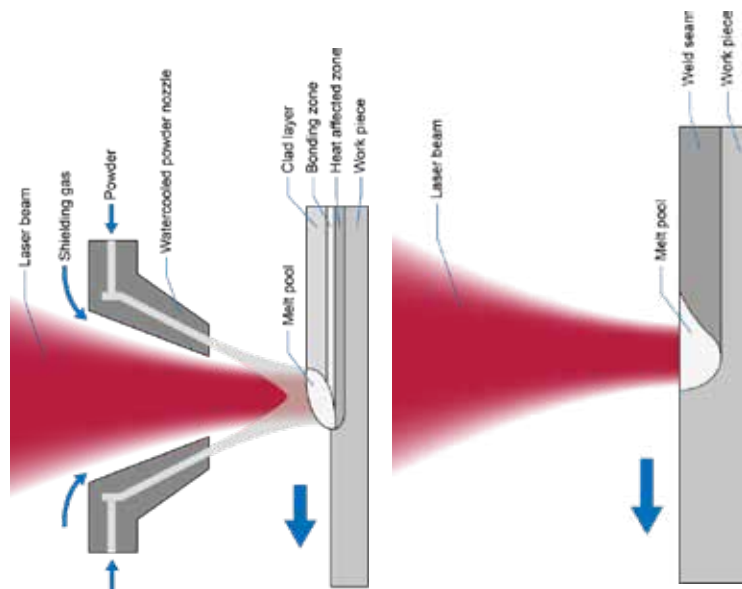
- 5 Height units
- Up to 4 kW output power
- 19" rack mount design
- Robust, reliable, compact
- 7 Height units
- Up to 6 kW output power
- 19" rack mount design
- Low investment and maintenance

Application Basics

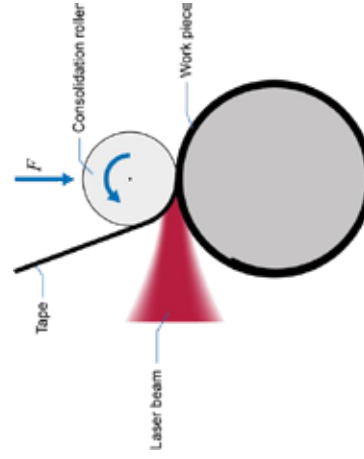
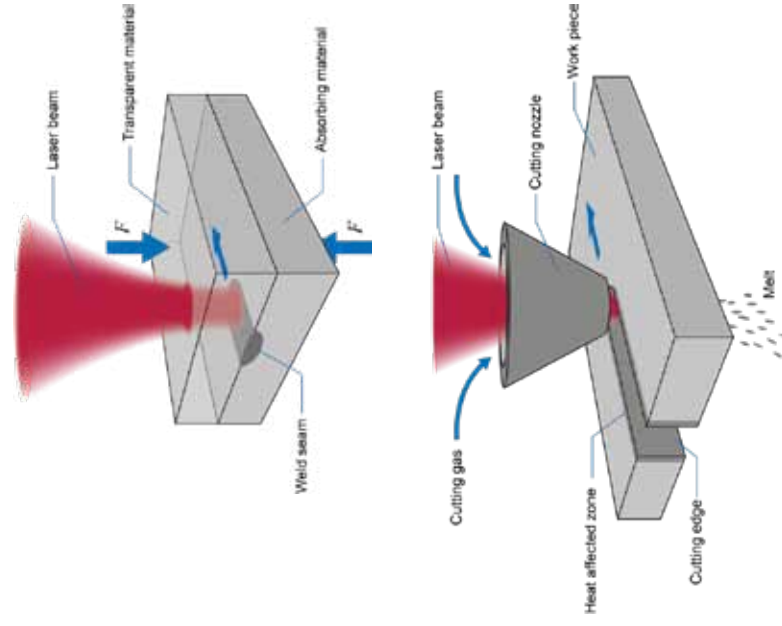
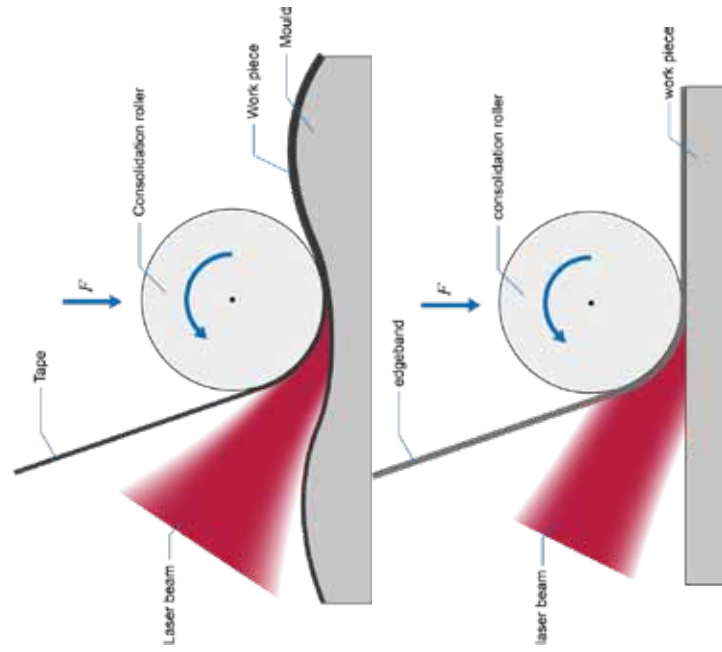
# Applications I



# Application Basics Applications II



# Application Basics Applications III



BlaulLas

## The Laserline LDM<sub>blue</sub> 2018



- Standard LDM configuration
- Product configurations:
  - 500 W @ 60 mm mrad
  - 300 W @ 60 mm mrad



CONFIDENTIAL

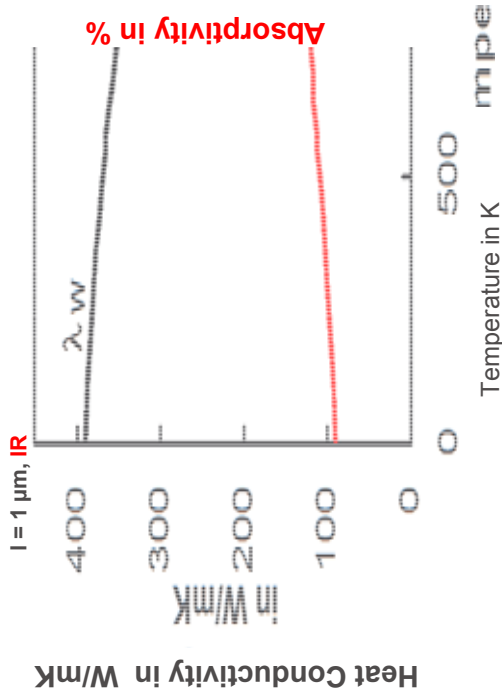
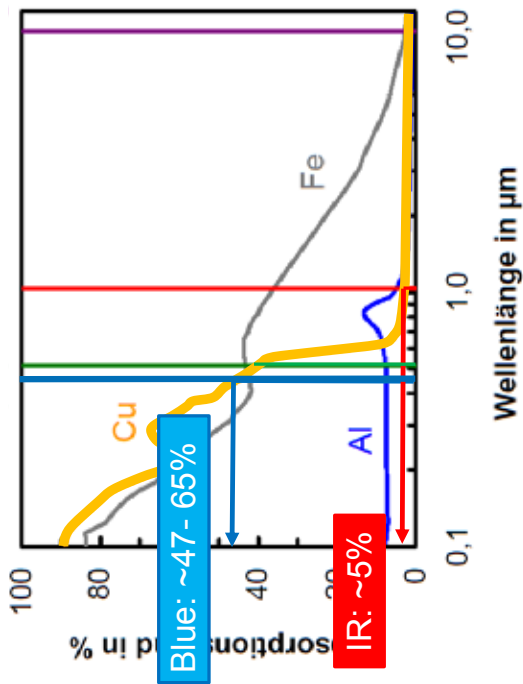
Applications with high power diode laser



12

500 W Blue Diode Laser

# Absorption in Copper



Source:  
 Paik, E. D.: Handbook of Optical Constants of Solids. (Orlando, Florida) Academic Press Vol. 2, 1981.  
 Blom A., Dumas, P., Engen, van P., Hoving W., (2003). Proc. SPIE, Vol. 4977, 483.  
 CRC Handbook of Chemistry and Physics: Thermodynamic Properties as a Function of Temperature, Edition 95th.

By courtesy of Robert Bosch GmbH, Andreas Heider 6. Laser Symposium Dresden Feb 28th 2018

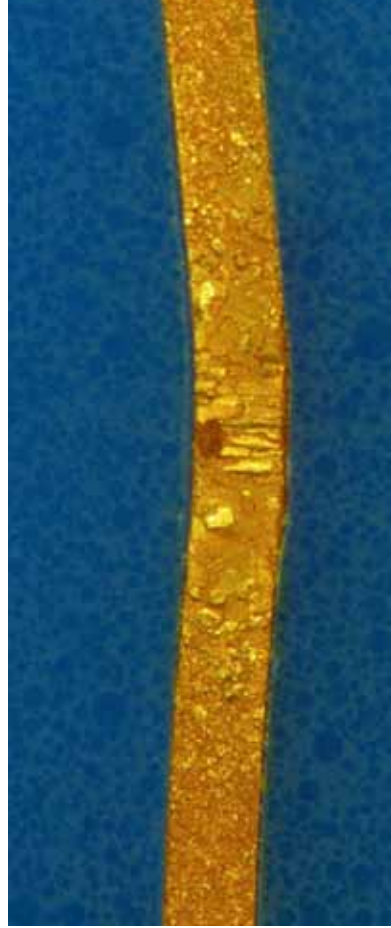
CONFIDENTIAL

Applications with high power diode laser



## First Application Results

# Welding of 0.3 mm Copper with Blue Diode Laser



- Blue diode laser
- 580 W
- 0,6 mm spot
- 2 m/min

# レーザークリーニングの最新技術動向とその適用事例

## The latest laser cleaning technology and applications

本村孔作\*

\*クリーンレーザージャパン株式会社  
(〒231-0004 神奈川県横浜市中区元浜町 3-21-2 ヘリオス関内ビル 4F)

Kosaku Motomura

\*cleanLASER Japan, Ltd  
(231-0004, Kanagawa, Yokohama, Naka-ku, Motohamacho, Helios Bldg, 4F, Japan)  
E-mail: [sales@cleanlaser.jp](mailto:sales@cleanlaser.jp)

レーザークリーニング技術は各産業分野の具体的な仕様にて導入が進んでいるのと同時に、環境負荷低減への貢献や省人化への対応は言うまでもなく、現在では複合材等の新素材の普及、既存インフラ設備・構造物の延命化、エネルギー分野の廃棄物対策など新たな課題に対応する局面をむかえ、更なる技術進化が期待される重要分野と認識されている。

レーザークリーニング装置技術全般においても発振器本体、オプティクス、ソフトウェア等の設計構成も高精度・高品質要求を満たせるクリーニング技術として市場要求に答えられる専門性がより必要とされ、装置製造の専門企業により新技術開発も加速し、国家プロジェクトとしての開発や先端的な案件をユーザーと協同で具現化するプロジェクトも多くみられている。

ここではレーザークリーニング分野における全体的な高出力化、自動化オプティクスに新機能を加えた特殊仕様、また近年拡大するマニュアル用途に対応する最新仕様等の最新技術を紹介する

Laser cleaning technology utilizations has been expanding in many industrial fields, however, presently facing new phase to overcome coining issue of solution for new material use such as CFRP, maintenance of infrastructure and reduction of waste caused by energy production, beside reduction of energy waste and replacement of labor work and technology revolution is very much expected and also regarded as necessary technology.

Generally speaking about laser cleaning technology, expertise in this technology, especially specialized manufactures are highly required for development of new laser source, optical unit and software to meet demands from market who expect high precision and high quality in technology and official R&D project with government, technical corporation with their users to achieve particular application are seen more in these days.

Here we introduce the trend of laser cleaning technology which has more attention from market such as high power, special optics based on inline-247 optics and latest specification of manual application with increasing demands from market

**Key words:** laser cleaning technology, optics, high power

### 1. 初めに

レーザークリーニング技術はその優位性より様々な市場での検証期間を経て、近年更に導入事例も増え、各分野における課題に答える形で新アプリケーションの技術革新も進んでいる。特にレーザークリーニングに特化した装置メーカーによる、国家プロジェクトとしての開発や各分野の大手ユーザーとの共同研究として新仕様の開発が急速に進んでおり、特定市場や専用アプリケーションに特化した

レーザークリーニング技術を持つメーカーが独自の市場開拓を行い、他社と差別化を図っている状況も見られている。

以下、既に市場で拡大され、今後注目されるレーザークリーニング技術の最新仕様を、発振器、オプティクスなどの技術面、具体的なアプリケーションなどの適用面にて、その優位性や課題、今後の展開等を紹介する。

## 2. レーザークリーニング装置開発の動向

### 2.1 レーザークリーニング装置構成

レーザークリーニング装置の優位性はそのコアとなる発振器製造技術、独自ソフトウェアによるところが大きいのは言うまでもなく、これら製造技術が安定したビーム品質・耐久性は内製エンジニアリング技術による製品品質保証にもつながり、更に新技術の開発基盤ともなっている。既に一般的にみられるヘビーデューティー仕様のモバイル装置構成やファイバー前後でのレーザー出力差モニタリング、保護ガラス汚れ検知等に加え、現在市場に普及する装置・技術傾向を以下に紹介する

#### 2.1.1 レーザー発振器

レーザークリーニング用発振器はその適用アプリケーションにより YAG レーザー、ファイバーレーザー等の各種モデルが採用されており、生産設備への導入による速度対応、厚い除去対象物や広域処理対応より 1kW 前後の出力も一般的に採用され、導入実績も数年に渡り加速している。また近年ケレン作業に近いレーザークリーニング技術としての装置も市場展開され、CW 発振やガウシアンパルスを意図的に設計に組み込むモデルもみられている (写真 1.参照)



写真 1. cleanLASERSystem CL1000 mobile model

#### 2.1.2 ビームスイッチ

1つの発振器からレーザーオプティクスを2つ取付けることで、自動ロボットとマニュアル作業の両アプリケーションに対応、異なるオプティクスを装備、異なる場所での使用等、自動化によりフレキシブルに対応する (図 1.参照)

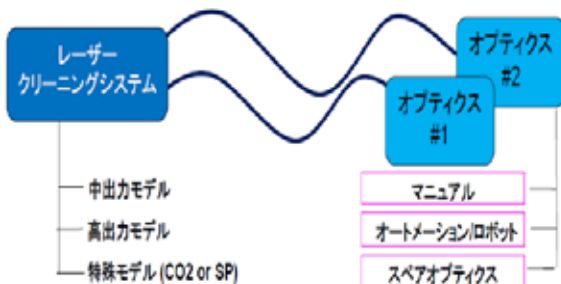


図 1. ビームスイッチ概要

#### 2.1.3 ファイバー延長

ロボットアプリケーションや大型ガントリーへの搭載ではファイバー長が約 20m~50m を通常使用しているが、屋外でのオンサイト作業、高所作業等の要求に対し、100m のファイバー延長も標準的に使用されている (図 2.参照)

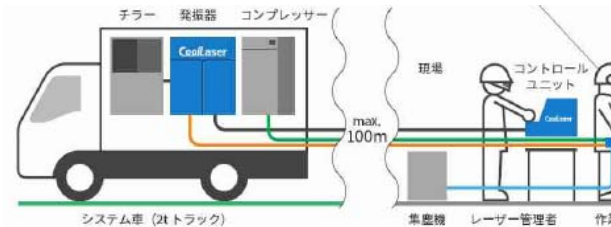


図 2. 株式会社トヨコー”CoolLaser システム概要”

#### 2.1.4 EMS (Electrical Margin Shield)

オプティクスの小型化・軽量化、ソフトウェアの単純化に伴い、高精度 1D スキャンングを採用する必要性も増え、スキャン端部における電子的パルス制御機能が、特に高精度を求められるアプリケーションにおいては不可欠となっている。(図 3.参照)

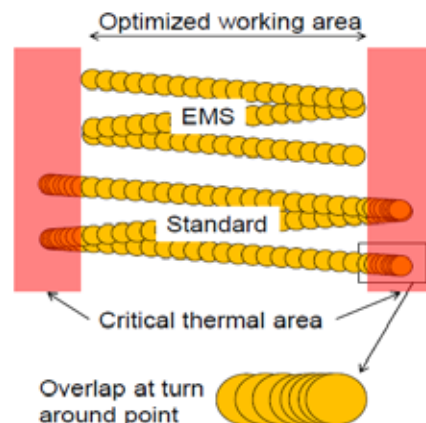


図 3. Electrical margin shield function

#### 2.1.5 MDS(Motion Distance sensor)

オペレータや周辺の安全を考慮したセンサー類の搭載も重要視されており、特に対象物有無、焦点距離、モーション有無検知が必要とされ、本体ソフトウェアと連動出来る仕様となっている。また繊細な対象に対し、対象物の温度検知機能が必要となるケースも多い。(写真 2-3.参照)

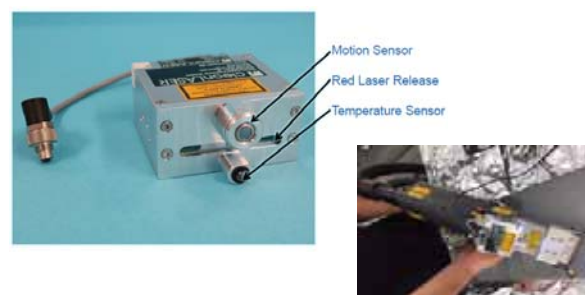


写真 2-3. MDS sensor, MDS sensor at optics

## 2.2 レーザーオプティクス

レーザークリーニングのマニュアル用途での市場も拡大する中、サクシオンや冷却機構の組みに加え、人間工学に基づいた設計、狭隘部にアクセスしやすい等、専用アプリケーションに特化した機能を備えるオプティクスがその優位性を評価されている。ヘビーデューティー仕様が必要となる市場では保護ガラスの汚れ防止や交換性能、また耐高温環境等に耐える仕様となっており、今後更にオプティクス本体の着脱が容易となる機能などが市場に展開される(写真.4)

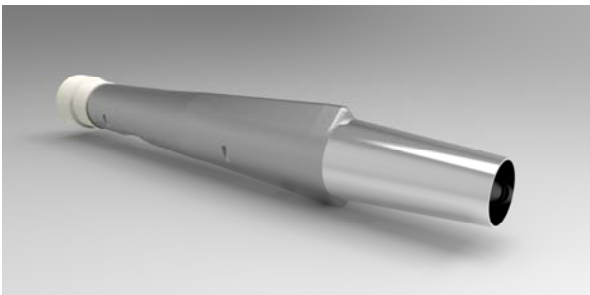


写真.4 株式会社トヨコー「クーレーザーヘッド」

### 2.2.1 シェアモーションオプティクス

接着前処理として溝部内面エリア全面にレーザークリーニングが適用できるように開発されたオプティクスが普及している。センター光軸を中心に回転機構があり、対象物を動かさずにケース接着部全周を短時間でクリーニング可能となる(写真 5.参照)

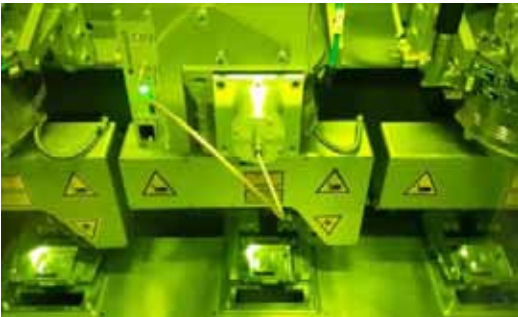


写真 5 シェアモーションオプティクス

### 2.2.2 ダックヘッドオプティクス

航空機製造におけるナットプレート用プライマー除去・接着前処理アプリケーションは接着強度を向上させる手法の新技术として米国大手航空機製造で既に採用されている。ナットプレートは両面より挟み込む形で接着される為両面処理が必要となり、物理的にアクセス制限のある裏面にレーザー照射が適用できる特殊設計となっている(写真 6.参照)



写真 6. ダックヘッドオプティクス

### 2.2.3 オープンクリーナー

食品市場においては従来の湿式洗浄やブラシ洗浄と比較しレーザークリーニングの特徴の1つであるドライ洗浄が菌類や遺物混入の観点からも必要とされ、既に国内外にて多くの製造ラインへレーザークリーニング装置の適用されている。近年は更に冷却や吸引機構が特殊設計された既存製造ライン専用設備が普及されており、簡単装着、他ラインへの移設も容易に可能な設備として、洗浄品質は言うまでもなく、製品品質を安定させる手法として欧米大手菓子メーカーの世界各国で稼働する焼成用オープンに多数組み込まれている(写真 7.参照)



写真 7 オープンクリーナオプティクス

### 2.2.4 原子力除染用オプティクス

原子力除染においては常に持ちこみ設備の二次汚染対策が課題となり、特に開口部のある設備は汚染対策自体が困難となるが、レーザークリーニングではダブル保護ガラス仕様を採用し、養生シートを挟み込みことで、除染作業後に作業面にある保護ガラス1枚と養生シート以外は全て汚染を避けられることが可能となり、光学技術の優位性が大きく活かせる。100mファイバー長を本体に採用、レーザーオプティクスを除染エリアまで持ち込んで作業することができ、またこのオプティクス本体も内部循環冷却機構、ダアプリケーションが可能となる。現在レーザークリーニングによる除染データが発表されており、今後除染による汚染廃棄物の削減、具体的に再利用が可能な循環サイクルが期待されている(図 4.参照)

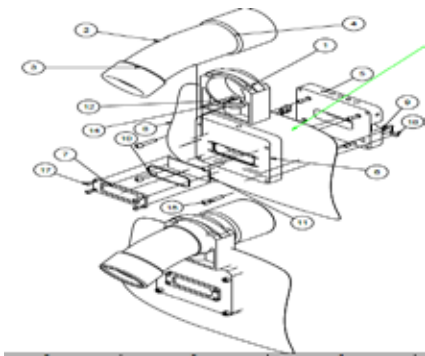


図 4. ダブル保護ガラス仕様オプティクス

### 3. レーザークリーニング最新アプリケーション

#### 3.1 金型クリーニング(複合材製品)

主に航空機・自動車分野にて軽量化を目的とする CFRP 素材等の部品適用が増加しており、金型素材にインバー等の特殊素材適され、更に高精度・高品質製品の成型が可能となると同時に金型の洗浄品質がより重要視される。製造製品が繊細かつ重要部品である為、レーザークリーニング連続稼働における安定性や信頼性は言うまでもなく、金型素材へのダメージ・影響が厳しく審査されるが、既に欧米の大手航空機メーカーによる長期にわたる技術評価・検証が終了し、レーザークリーニング装置が導入・自動稼働している。金型本体サイズが大型の為、装置構成には高精度ガントリーシステムなども導入されている (写真 8.参照)

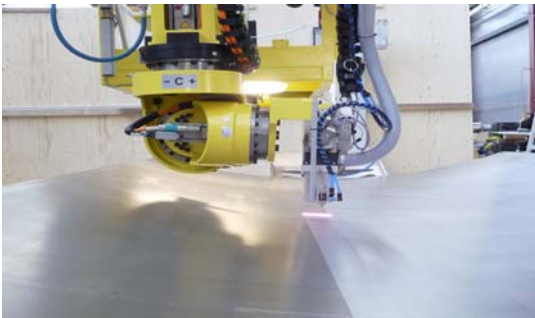


写真 8. ガントリーシステムによる金型自動洗浄

#### 3.2 接着前処理 (異種金属、異種素材)

異種金属、異種素材における接合技術として接着方式も航空分野・自動車分野を始めとし多様に採用されるようになってきている。特に軽量化を前提としたアルミ素材と複合材 CFRP 等の接着アプリケーションは増加しており、航空宇宙においても研究所でのレーザークリーニング検証が終了し、接着ラインへ組み込んだインライン洗浄などの仕様が導入されている (写真 9-10.参照)



写真 9-10. 航空宇宙・自動車部品の接着前処理

また従来よりみられる電装部品や駆動部品ケーシング類の接着前処理に加え、接着後の防水・耐水性能品質が問われる電気自動車バッテリーケース類へも採用され、必要パラメータ、また処理タクトより中-高出力モデルが使用されている (写真 11.参照)



写真 11. Pretreatment for battery case

#### 3.3 溶接前処理(レーザー溶接・ブレイジング)

レーザークリーニングによる溶接前クリーニングはかなり前より市場で採用されるアプリケーションだが、軽量化・高品質製品化の流れよりアルミ合金への適用が増加し、その溶接品質の向上は重要性が増している。主に溶接部のブローホール対策として採用されるが、各メーカーによる独自の研究データも公表され始めている (図 5. 参照)

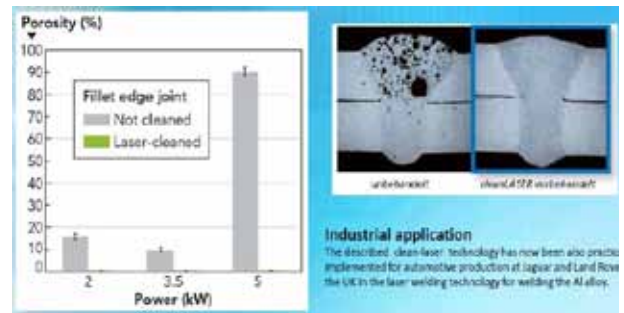


図 5. Porosity reduction by Laser Pretreatment(AL alloy)

### 3.4 溶接後処理

溶接後処理による酸化膜除去は、後工程の塗装品質向上を目的として以前より市場採用されており、既に各部材における適正パラメータもほぼ確立してきている。更に高インテンシティによるスラグ対象への適用研究も進んでいるが、波長特性上、別手法を組み合わせる方向と同時進行している

### 3.5 錆除去(プラント等メンテナンス)

各種プラント、原子力施設、道路・橋梁、電力施設等の屋外施設での腐食対策となる錆除去アプリケーションにおいても、専用の装置特性を持つレーザークリーニング技術が導入され始めている。レーザークリーニングの定義は多少異なるがケレン処理品質が求められる分野には連続波のレーザーやガウシアン波形のパルスレーザーがより効果を生じ、金属材料への入熱や物理的な加工影響による構造強度変化の影響が回避されるべき再利用対象やアプリケーションにおいては安定、且つ、均一なトップハットパルス波形を出す中高出力レーザーが適用されている。市場採用されるレーザークリーニング装置はヘビーデューティー仕様、且つ、安定的な設備性能を達成し安全性能・機能も取り入れた装置構成により錆除去に加え、塩化物除去効果の優位性からも注目度が高い分野と言える。(写真 12-13参照)

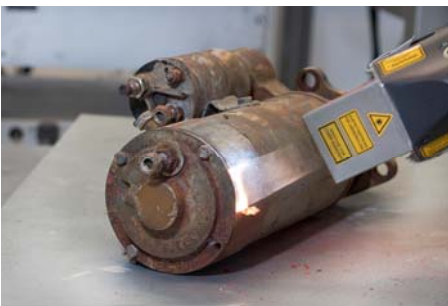


写真 12. Rust removal by cleanLASERSystem

#### 事例 2 微細加工



写真 13. CoolLaser 施工例(微細加工)

## 4 まとめ

レーザークリーニング技術の実用例が増える中、その装置・技術にもより専門性が求められ、各装置の技術レベルも一層高くなってきている。しかしながら欧米での導入事例と比較し、国内での適用例はまだ少なく、今後レーザークリーニング技術をより認知してもらい、専門的な検証が行える環境の普及が必要と考えられる。また遠隔操作や無人化でのアプリケーションなどへの取組も検討され、日本独自となるレーザークリーニングアプリケーションやそのシステム構成にも期待される。

### 参 考 資 料

-Jan Sommer (CleanlaserSystem GmbH),  
Laser Cleaning Technology “Presentation for latest laser cleaning technology and application”, Aachen, Germany(2018)

Coollaser\_pamphlet\_201807 (株式会社トヨコー)

**M**PRECITEC



## **Laser Metal Deposition : Innovative System Technology for Additive Manufacturing Processes with Powder and Wire**

Dr. Markus Kogel-Hollacher  
Frédéric Adam  
Christian Staudenmaier



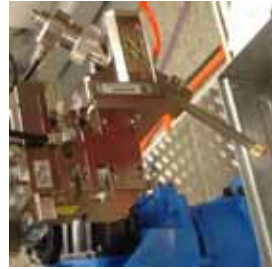
90 回レーザー加工学会講演会

# LMD WITH POWDER – STATE OF THE ART

- Different nozzle types flexibly adaptable for various applications

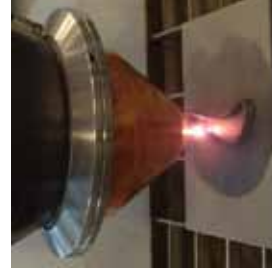
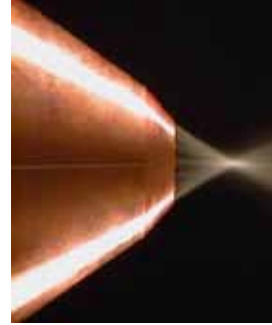
## Off-axis nozzle

- + lean design
- + shielding gas around the powder stream
- uni-directional
- larger powder focus



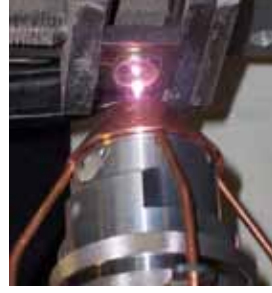
## Ring nozzle

- + homogeneous powder distribution
- + high powder efficiency (spot size ~ 0,8mm)
- limitation for working tilted positions



## Multi beam nozzle

- + easy work in horizontal position
- + stands higher laser power
- worse powder distribution
- worse powder efficiency (spot size ~ 3mm)



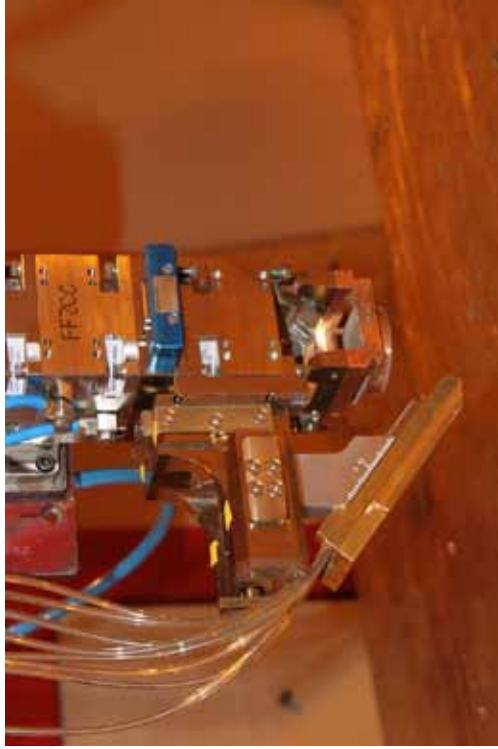
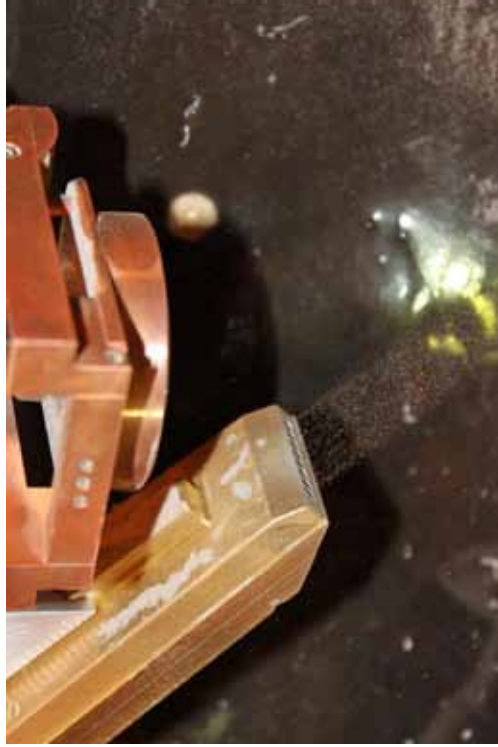
# LMD WITH POWDER YC52 AND YC30 PROCESSING HEAD

- Applications Off-Axis nozzle



## LMD WITH POWDER YC52 AND YC30

- Further increase of the track width → Flat nozzle with Scan Tracker



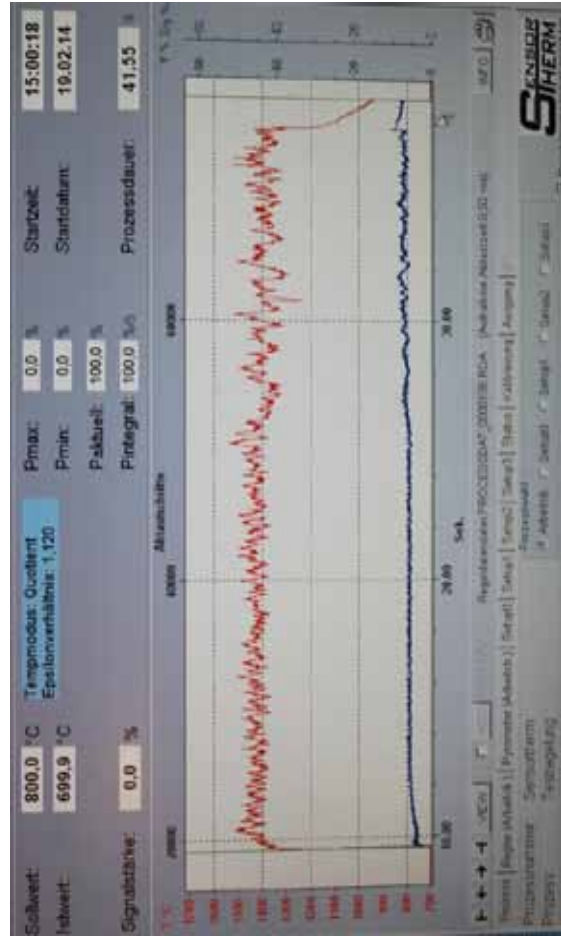
## LMD WITH POWDER YC52 AND YC30

- Further increase of the track width → Flat nozzle with Scan Tracker



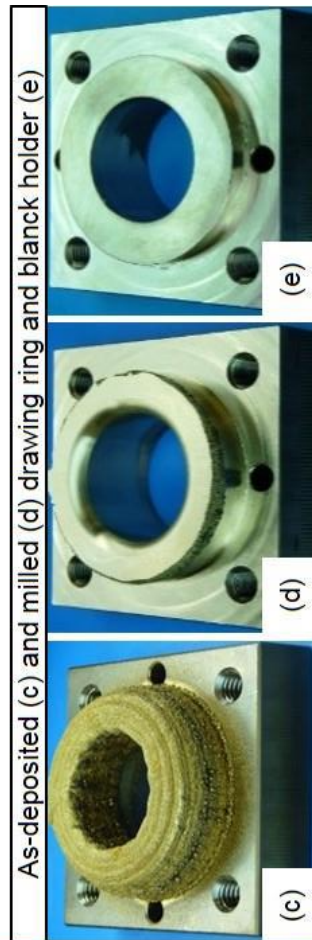
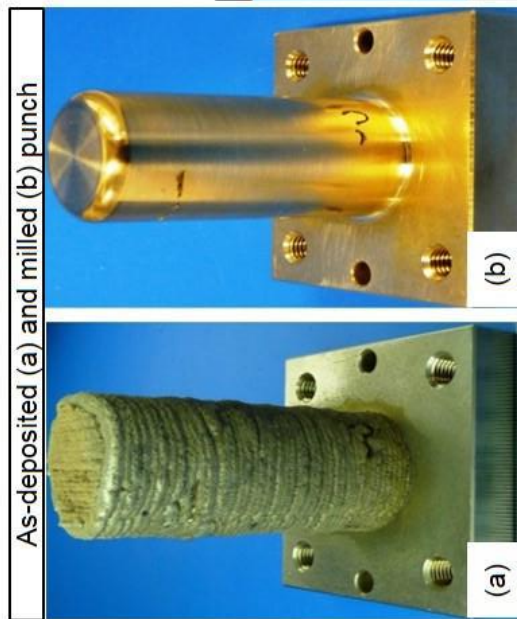
## LMD WITH POWDER YC52 AND YC30

- Further increase of the track width → Flat nozzle with Scan Tracker



## LMD WITH POWDER YC52 AND YC30 PROCESSING HEAD

- Applications Ring nozzle
  - Laser System: TRUMPF HL4006D
  - Laser Power: 2,5 kW
  - Deposition speed: 0,5 m/min
  - Power feed rate: 20 g/ min
  - Powder Efficiency: 70%
  - Substrate: CuAlNi5Fe4
  - Powder: CuAl10Fe1
  - Particle size: -125+45 $\mu$ m
  - Shielding gas: Argon



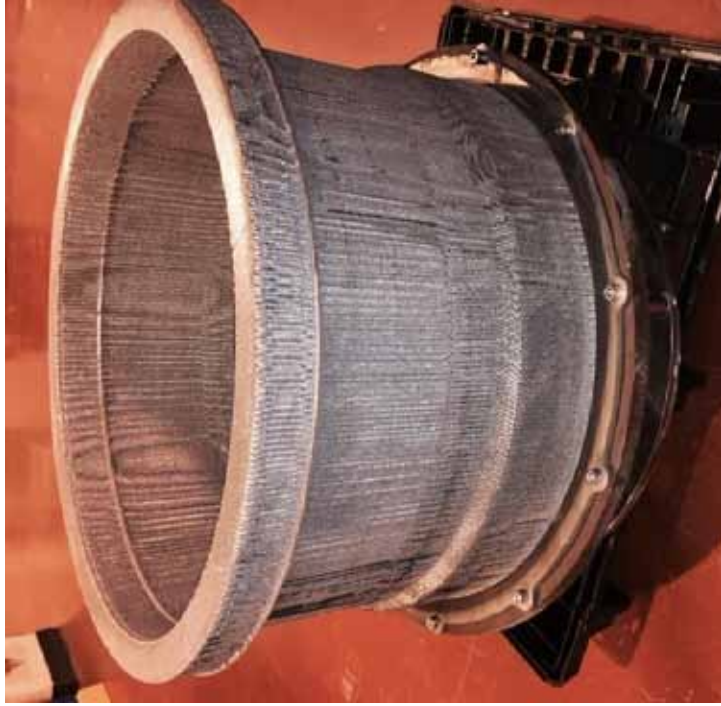
## LMD WITH POWDER YC52 AND YC30 PROCESSING HEAD

- Applications Ring nozzle
- Laser System: IPG 2kW Fiber Laser
- Build volume: 1200x800x800
- Control: Siemens 840D
- Powder distributor: 1 bowl (1.5L)
- Upgrade: 5 bowls of 1.5L or 3L
- Controlled atmosphere with purification system
- Renishaw probe
- Milling spindle 2.5kW – 24k RPM



## LMD WITH POWDER YC52 AND YC30 PROCESSING HEAD

- Applications Ring nozzle
  - Aerospace structural part
    - Inside diameter: 590mm
    - Outside parameter: 670mm
    - Height: 400mm
    - Weight of powder: 35kg
    - Material: TA6V
    - Construction time: 110 hours



IREPALASER  
PRECITEC

# LMD WITH POWDER – RUNNING APPLICATIONS

- Repairing of gear components

## Applications

- Petrochemical industry / offshore drilling
- Shipping
- Storage and transhipment
- Sugar industry
- Steel industry
- Energy companies

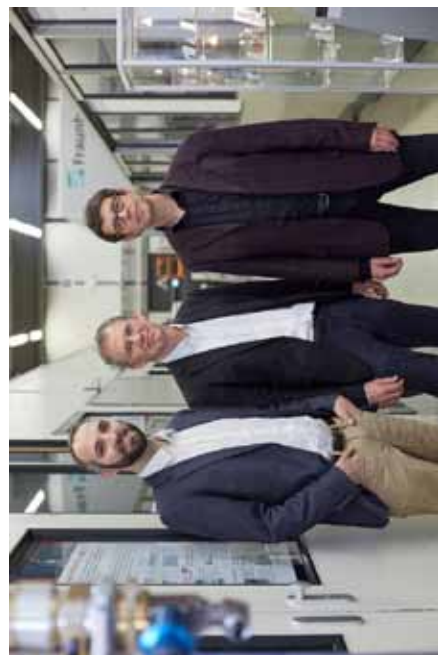
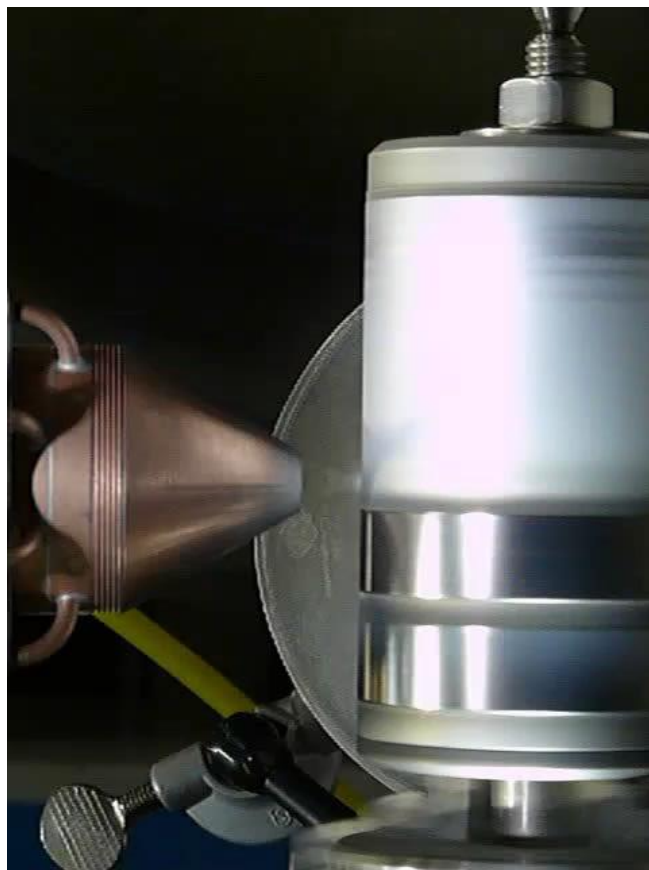


Source: Stork Gears & Services



# LMD WITH POWDER – RUNNING APPLICATIONS

- Extreme high-speed Laser Material Deposition (EHLA) – A way out of the chromium ban



## Parameters

- Scanning speed  
 $v_s = 200 \text{ m/min}$
  - Laser spot size  
 $d_L = 1.5 \text{ mm}$
  - 4 Layers, incl. remelting
- Joseph von Fraunhofer Prize 2017  
Berthold Leibinger Innovation Award 2018



## LMD WITH POWDER – RUNNING APPLICATIONS

- Northwestern Polytechnical University of China
  - 5 meter-long titanium wing beam for the C919 passenger plane
  - Expected to be put into commercial operation in 2016



## LMD WITH POWDER – RUNNING APPLICATIONS

- 3D Laser Direct Manufacturing by Avic Laser, China

They started in 2000 and didn't give up:

- Inert gas protection system
- Thermal stress reduction
- Defect control
- Metal lattice growth control
- Saving 90% of raw material
- 5% of original costs



Titanium part for J-20 or J-31 stealth fighter

Technology used in J-15, J-16, J-20, and J-31 jet fighters, the Y-20 Strategic Airlifter, the C919 commercial airliner, and next generation stealth fighters.

Used in major **load-bearing parts**, e.g. J-15's front landing gear.



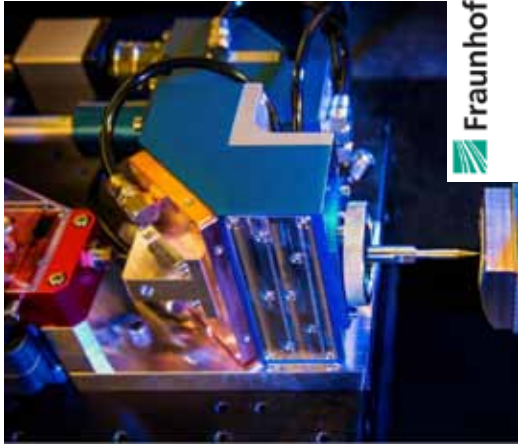
Fraunhofer  
ILT



# LMD WITH WIRE – A NEW APPROACH FOR LMD

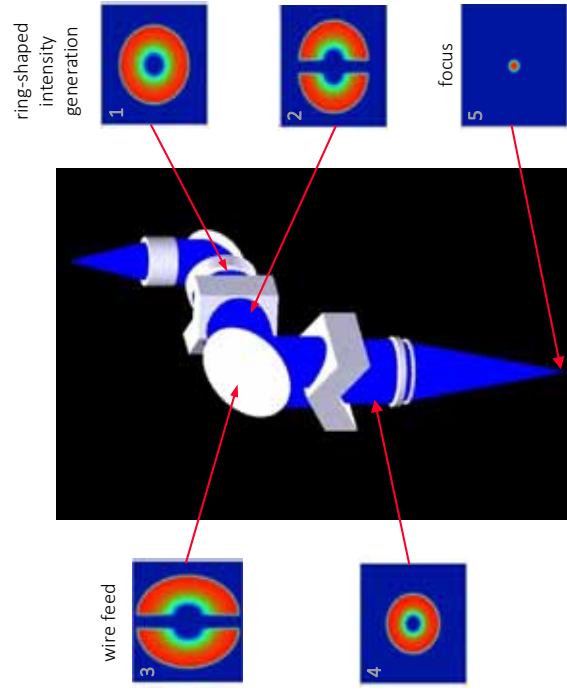
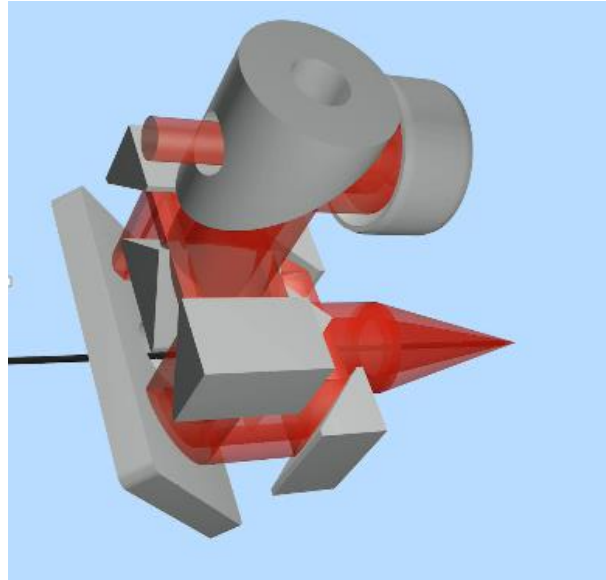


**PRECITEC**



© PRECITEC GmbH & Co. KG | 03.12.2018 | 14

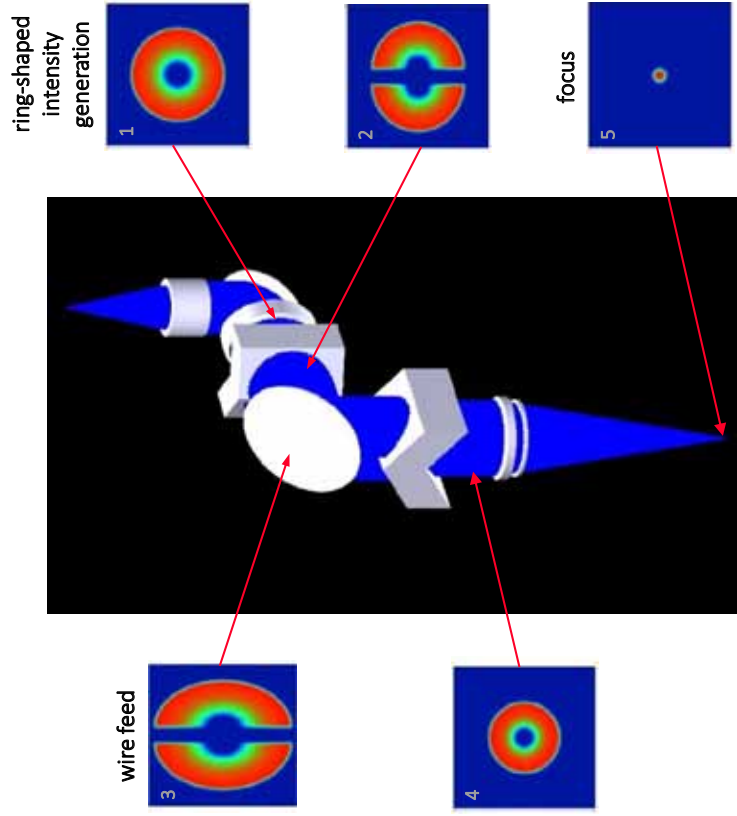
# LMD WITH WIRE – A NEW APPROACH FOR LMD



# LMD WITH WIRE – A DEEPER LOOK INTO THE BEAM PATH

## PRECITEC COAXPRINTER

- obscuration-free wire feed
- direction independent Intensity distribution
- homogeneous preheating in all directions
- beam shaping suitable for fiber-based laser systems, such as diode lasers, disk lasers and fiber lasers



# LMD WITH WIRE

## INTRODUCTION

- The coaxial wire feed technology allows for several applications, for example:
  - Laser brazing
  - Laser cladding
  - Laser welding with wire
- All applications benefit from the circular laser focus melting the wire.
- The main advantages are obvious:
  - Omni-directional processing
  - 100% material use
  - the wire is fused homogeneously from all directions and well connected with the local melt pool
  - stable process, even if the working distance fluctuates in a certain range



# LMD WITH WIRE

## TECHNICAL SPECIFICATIONS COAXPRINTER

### TECHNICAL SPECIFICATIONS

max. laser power	5 kW (cw, 900 - 1080nm)
fiber diameter	≤ 600 μm
focal lengths collimation	50 mm (NA ≤ 0.25), 100 mm (NA ≤ 0.13)
focal lengths focusing	160 mm
stick-out	≈ 10 mm
filler wire diameter	1.0 - 1.6 mm

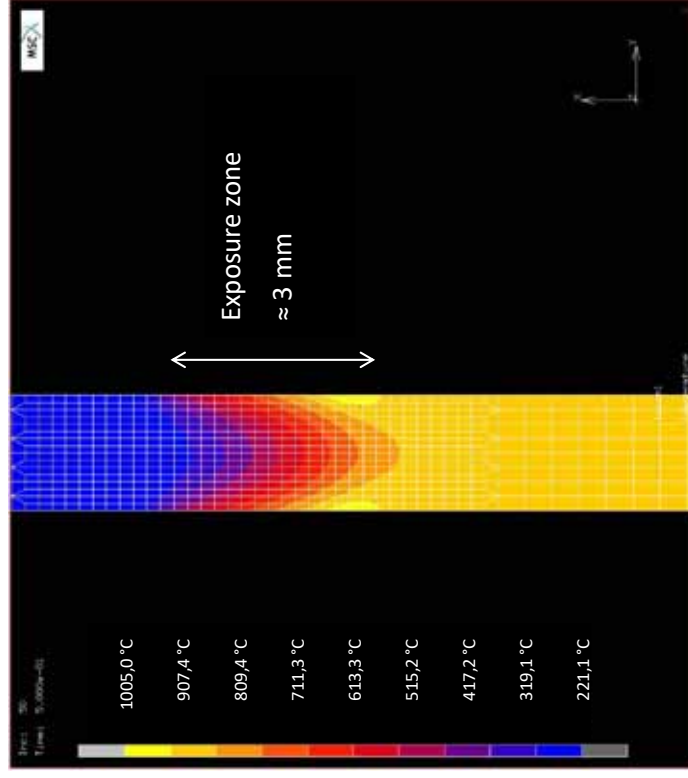
# LMD WITH WIRE – A DEEPER LOOK INTO THE BEAM PATH

## TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE WIRE – FEM ANALYSIS

- laser power 3 kW
- exposure zone  $\approx$  3mm
- wire speed 5 m/min.
- wire diameter 1.6 mm

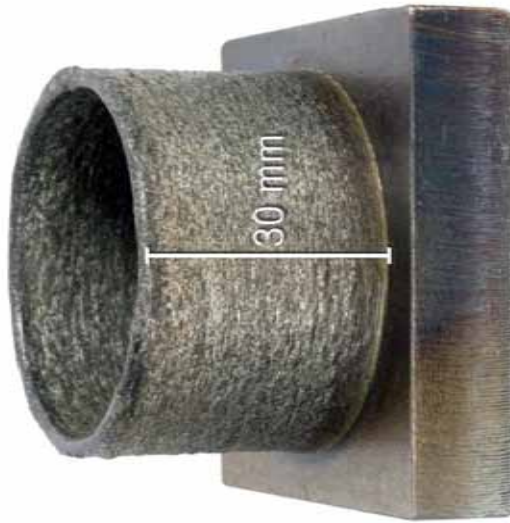
### Result of the FEM analysis:

The wire is hot before hitting the workpiece surface

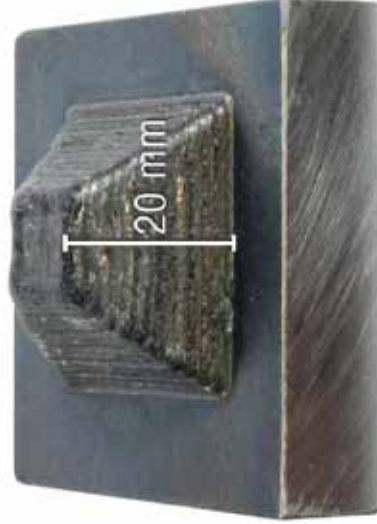


# LMD WITH WIRE – PRECITEC COAXPRINTER

## APPLICATION EXAMPLES



Laser power = 875 W  
Process speed = 1,25 m/min.  
Wire speed = 1,4 m/min.  
Wire diameter: 1mm



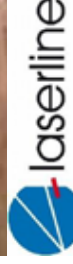
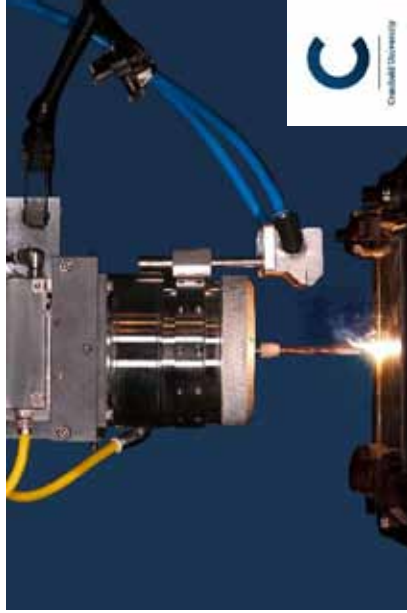
Laser power = 1,25kW  
Process speed = 1 m/min.  
Wire speed = 1,4 m/min.  
Wire diameter: 1mm



Laser power = 1,25kW  
Process speed = 1 m/min.  
Wire speed = 1,4 m/min.  
Wire diameter: 1mm

# LMD WITH WIRE – PRECITEC COAXPRINTER

## APPLICATION EXAMPLES



© PRECITEC GmbH & Co. KG | 03.12.2018 | 22



# LMD WITH WIRE – PRECITEC COAXPRINTER

## APPLICATION EXAMPLES

- Material SS316L
- 1,5-1,8 kW
- 1m/min robot/machine speed
- 1,2m/min wire feed rate
- 0,4 to 0,6 mm single track height
- Deposition rate: 470 g/h (60 cm<sup>3</sup>/h)



# LMD WITH WIRE – PRECITEC COAXPRINTER

## APPLICATION EXAMPLES



- Material SS307Si
- 1,5 kW
- 0,8m/min robot/machine speed
- 2m/min wire feed rate
- 0,8 – 0,9 mm single track height

# LMD WITH WIRE – PRECITEC COAXPRINTER

LASER CLADDING: VIDEO



© PRECITEC GmbH & Co. KG | 03.12.2018 | 25

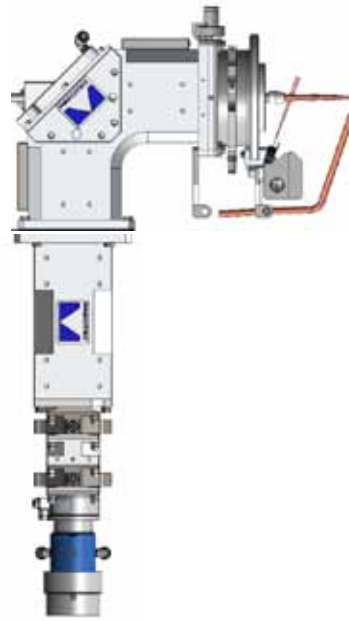
**PRECITEC**

# LMD WITH WIRE – PRECITEC COAXPRINTER

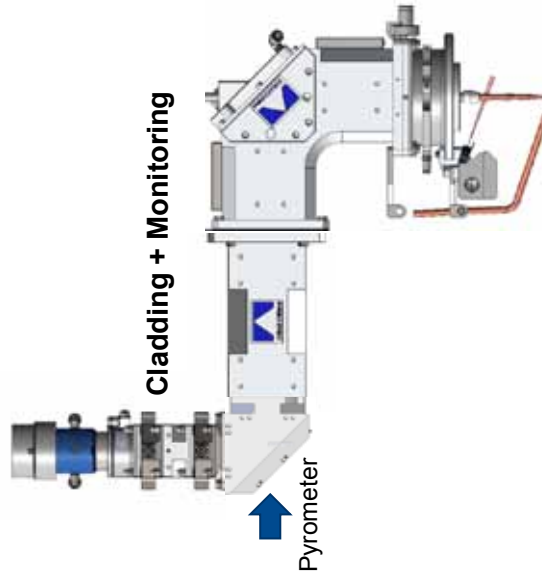
## POSSIBLE CONFIGURATIONS

- SS316 with machine speed 1m/min and laser power 2 kW  
 → wire speed 1,4 m/nmin  
 → 500 g/h

Cladding

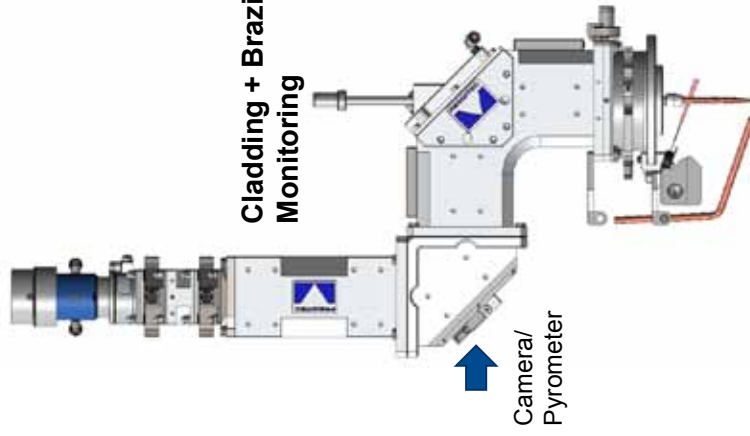


Cladding + Monitoring



Weight: 12 kg

Cladding + Brazing + Monitoring



## TAKE AWAY MESSAGES

- Powder based LMD still a standard processing method
- The introduction of the coaxial cladding head awakens enthusiasm amongst the LMD community
- Working in full 3D and without material loss opens new areas
- The fully circular focus enables a large process window
- Very high material efficiency is possible since the additional material is introduced and processed at 100%
- Modularity – different components compatible to each other – supports the range of variation
- Collaboration with machine builders and researchers extends the range of use

**M**PRECITEC



**Thanks for your kind attention!**

Precitec GmbH & Co. KG  
Draisstr. 1  
76571 Gaggenau  
Germany

Dr. Markus Kogel-Hollacher  
R&D Projects

## 1 1 B 1. 表面処理, パターニング

【ベストオーサー賞受賞者講演】

レーザークラディングによる低希釈・低熱影響ニッケル基合金皮膜  
形成

Formation of Ni alloy layer with low dilution and smooth surface by laser cladding

谷川 大地

日立造船株式会社

TANIGAWA Daichi

Hitachi Zosen Corporation

掲載学会誌 Vol. 24 No. 3 (2017 年)

レーザー加工学会ホームページより会員専用「論文検索 デヂエ」  
内、「レーザー加工学会誌」にて閲覧いただけます。

## 工具鋼の複合レーザ平滑化および微細周期構造形成

Surface Smoothing of Tool Steel by Multiple Laser Processing and Forming of Nanoscale Periodic Structures

若林知敬<sup>\*</sup>, 漆畑卓朗<sup>\*</sup>, 石田宏<sup>\*</sup>, 杉山善崇<sup>\*</sup>, 小林知貴<sup>\*\*\*</sup>, 多久島裕一<sup>\*\*</sup>, 閻紀旺<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>矢崎総業株式会社 技術研究所  
(〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 3-1)

<sup>\*\*</sup>株式会社オプトクエスト  
(〒362-0021 埼玉県上尾市原市 1335)

<sup>\*\*\*</sup>慶應義塾大学 理工学部 機械工学科  
(〒223-8522 神奈川県横浜市日吉 3-14-1)

Tomohiro Wakabayashi<sup>\*</sup>, Takuro Urushibata<sup>\*</sup>, Hiroshi Ishida<sup>\*</sup>, Yoshitaka Sugiyama<sup>\*</sup>, Tomoki Kobayashi<sup>\*\*\*</sup>,  
Yuichi Takushima<sup>\*\*</sup>, and Jiwang Yan<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Yazaki corporation  
(3-1 Hikari-No-Oka, Yokosuka-City, Kanagawa 239-0847, Japan)

E-mail: tomohiro.wakabayashi@jp.yazaki.com

<sup>\*\*</sup>Optoquest Co., Ltd  
(1335 Haraichi, Ageo-City, Saitama 362-0021, Japan.)

<sup>\*\*\*</sup>Keio University, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology  
(3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-City, Kanagawa 223-8522, Japan)

切削加工や積層造形といった金属材料の加工では、仕上げ処理工程において表面粗さを低減することが必要であり、手研磨や精密な機械加工が行われている。しかし、これらには複雑な形状の処理に限界があるほか、長い加工時間や熟練したスキルを要する。これに対してレーザ加工では、波長、パルス幅、フルエンスなどの選択で微細な形状をも短時間で対処することができる。

工具鋼表面の熱影響を抑えた平滑化手段として短パルスによるアブレーション加工と連続波レーザによる熔融加工を複合的に用い、積層造形品のような大きい表面粗さを持つ加工品に対しても表面粗さ  $0.1 \mu\text{mRa}$  を下回る仕上げを実現するとともに、熱影響や酸化による着色を抑え、鏡面を得ることができる目途が立った。また、アブレーション工程における照射条件の調整により照射波長程度の周期を持つ微細周期構造が形成でき、仕上げ加工と同時に金型における離型性向上が図れることがわかった。

Finishing of metal surface which is rough machined or additive manufactured is usually done by cutting or hand polishing to flatten the surface, but much skill and time is needed for those. On the other hand, laser processing can treat even fine structure surface in a short time with appropriate conditions such as wavelength, pulse duration, beam fluence, and so on. We used multiple laser processing method to smooth tool steel surface. The first process was ablation for removal of large asperity with picosecond pulsed fiber laser irradiation, and the second process was continuous wave laser irradiation to remove the oxide layer and for further smoothing by surface tension effects. The surface roughness of less than  $0.1\mu\text{mRa}$  was obtained from an origin surface roughness of  $1.0\mu\text{mRa}$ . And also low heat affected and oxidized surface was obtained. The result demonstrates the effectiveness of the proposed multiple laser processing method. Furthermore, forming of nanoscale laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on the flattened surface was observed after surface flattening under specific ranges of laser fluence and defocus length.

**Key words:** laser, tool steel, surface finishing, multiple processing, nanoscale, periodic surface structures

## 1. 緒言

切削加工や現在実用化に向けた動きが活発な積層造形といった金属材料の加工では、仕上げ処理として表面粗さの低減が必要であり、手研磨や機械研磨、および精密な機械加工が行われている。しかし、これらには複雑な形状に対する限界があるほか、長い加工時間や熟練したスキルを要する。

これに対してレーザ加工では、レーザ光の波長やパルス幅を選択しフルエンスを調整した上で、光学系により絞ったビームスポットを走査することで複雑な形状にも短時間で対処することができる。これまでに短パルスレーザによるアブレーション加工にて熱影響の小さい加工面が得られている<sup>(1)</sup>。また、長パルスレーザや連続光レーザによる材料表面の熔融にて表面張力による平滑化が可能であることが知られており<sup>(2)(4)</sup>、その表層における挙動に関する研究も行われている<sup>(5)(6)</sup>。さらに、近年では表面粗さの大きい積層造形品のレーザ熔融平滑化の検討例も見られ始めた<sup>(7)(8)</sup>。しかし、これまでに検討例の多い熔融加工においては、高強度のレーザ光を照射すると表面および深さ方向への熱影響が顕著になり鋼材表層の物性に变化が生じる。構造体をはじめ金型等の仕上げ工程では熱影響による硬度の変化やマイクロクラックの発生を抑制した仕上げ加工が求められる。

本発表では、ピコ秒パルスによるアブレーション加工と連続波レーザによる熔融加工を複合的に用いた手法により工具鋼表面の粗さをサブミクロンレベル以下まで大きく低減させると同時に、表層の熱影響や酸化による着色を抑え、鏡面を得ることができたので報告する。また、アブレーション工程でレーザ光のフルエンスやデフォーカスの調整により照射波長程度の周期を持つ微細周期構造の形成も確認された。この周期構造の金型上への適用を想定し離型力への効果も確認したので併せて報告する。

## 2. 複合レーザ平滑化

### 2.1 アブレーション加工による凸部選択的除去 工具鋼表面の比較的大きい凸部を除去すること

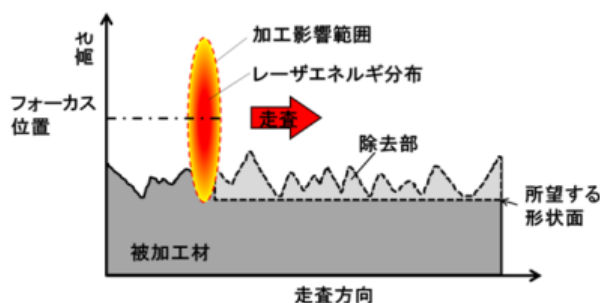


図1 アブレーション加工影響範囲制御の概念

で凹凸を平坦化する方法として、比較的安価な短パルスファイバレーザを用いた加工影響範囲制御の概念(図1)を明らかにした<sup>(9)</sup>。図2に加工系概略図を示す。レーザ光は被加工金属材料の表面上方から照射、走査した。ここでは光学系に焦点深度の浅い集光レンズを用いることで深さ方向の加工影響範囲の制御性を高め、レーザ光のフルエンス、デフォーカス量、走査回数を調整することで除去量を制御した。加工影響範囲下端が所望する加工後形状ラインに合うべくフォーカス位置を調整し、大小2つのフルエンスにて2ステップの加工を行った。具体的には、初めに大きいフルエンスで荒加工を行い、次にフルエンスを1桁落とすことで加工影響範囲下端の制御性、およびエネルギー密度変化の勾配をより高め、さらなる粗さの低減を図った。実験的に得られたフォーカス位置より下方への加工影響範囲は2つのフルエンスでそれぞれ105 $\mu\text{m}$ 、40 $\mu\text{m}$ であった。

レーザには(株)オプトクエストで開発した波長1030nmのパルス幅可変ファイバレーザ(PFLA-1030TP)を使用し、パルス幅65ps、繰り返し周波数100kHzにて照射を行った。本レーザはフォトニック結晶ファイバを用いた高出力アンプを採用しており、出力パワーを変化させても高いビーム品質(M2~1.04)が得られる。そのため、良好な集光性能により高さ方向の加工選択性を高精度化することができている<sup>(10)</sup>。

図3はレーザ照射前後の被加工物の断面曲線であり、初期形状として用意したP-V値60 $\mu\text{m}$ の周期的凹凸面の凹部の高さ位置を変えずに凸部のみを選択的に除去し、照射後の表面粗さを0.66 $\mu\text{mRa}$ まで低減できたことを示している。

図4にレーザ加工前後の被加工材の断面SEM(Scanning Electron Microscope)像を示す。前後の比較の為、断面確認位置は加工量の少ない加工前

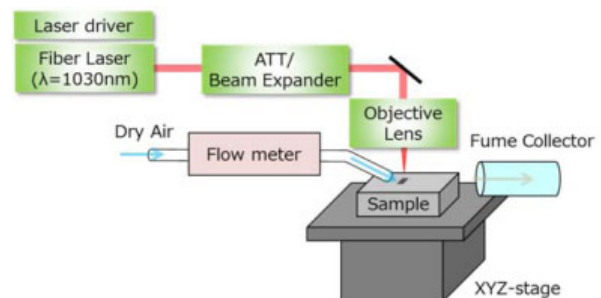


図2 アブレーション加工系外略図

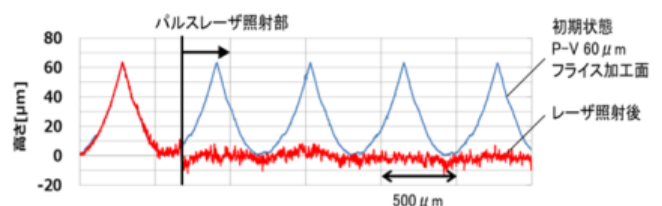


図3 アブレーション加工前後の断面曲線

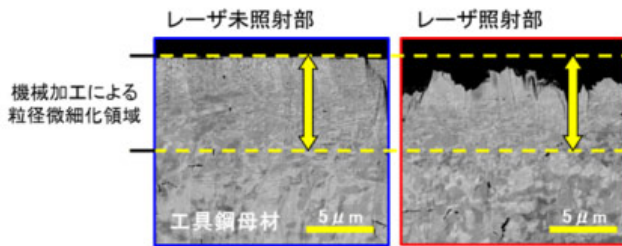


図 4 アブレーション加工前後の断面 SEM 像

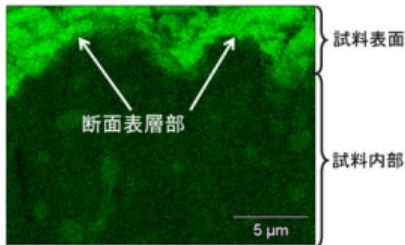


図 5 加工部断面の EDX 酸素原子マッピング

プロファイルにおける凹部としている。加工前の状態に存在した機械加工の熱による結晶の微細粒領域はレーザー照射によって進展がなく、ピコ秒パルスの照射により熱影響が加わっていないことを確認した。また、図 5 は図 4 の断面の EDX(Energy Dispersive X-ray spectrometry)による酸素原子マッピングである。大気下でのアブレーション加工で加工の効率化を図ったこと、レーザー光の繰り返し走査により、表層に  $1\mu\text{m}$  厚程度の薄い酸化膜の形成もしくは酸化デブリの沈着を確認したが内層への進展はないことがわかった。

## 2.2 酸化物層/デブリ除去

アブレーション工程で大気下での照射としたために被加工物表層に極薄く生じた酸化物層は、黒色を呈しているため仕上がり品としての不具合や接触物への付着、続く溶融加工による平坦化での材料内層への巻き込みといった悪影響を招く恐れがあり、除去しなければならない。酸化物層除去に対し化学的、物理的に種々の除去手段を試みたが、結局被加工材である工具鋼の加工閾値以下の低エネルギー密度によるレーザー照射でもっともよい効果が得られた<sup>(11)</sup>。これはすでに実用化されているレーザークリーニング技術の応用であり、酸化物層の選択的除去を母材とのレーザー光の吸収率差を利用して行うものである。レーザー照射条件抽出に用いた加工系の概略図を図 6 に示す。

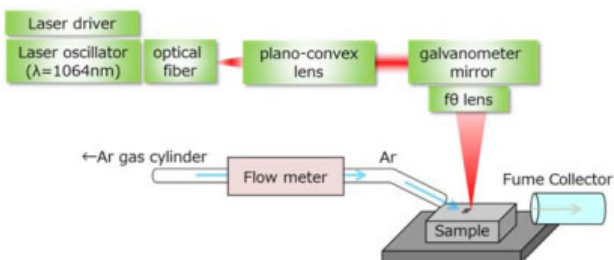
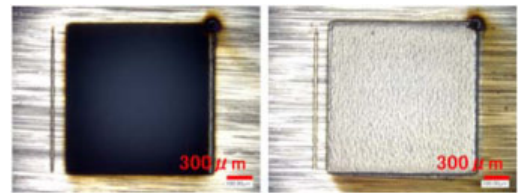


図 6 酸化層除去/溶融加工系概略図

図 7 酸化層除去加工面  
(左が照射前, 右が照射後)

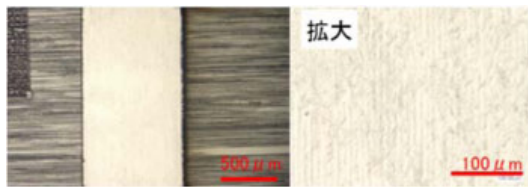
ここでは波長  $1064\text{nm}$  の連続波レーザーを用い、被加工物表面に集光、走査した。レーザー照射部へは不活性ガスを噴射し、加工面の酸化を抑制した。効果の実証は表面粗さ  $1.0\mu\text{mRa}$  を持つ研磨加工面に前項で示した大気下でのアブレーション加工を施し、黒化したものを用いて行った。図 7 に酸化物層を除去した後の加工面を示す。酸化物の除去によって黒化した層がなくなり、金属光沢が得られていることがわかる。

## 2.3 溶融平滑化加工

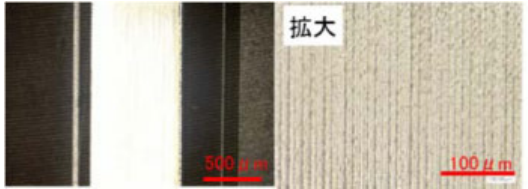
酸化物層除去の検討にて用意したものと同様のランダムな表面粗さを持つ研磨加工試料、及び周期的な表面粗さを持つフライス加工試料を用いて溶融平滑化の検討を行った。

レーザーによる溶融平滑化についてはこれまでに多くの研究事例がある。これらを参考にし、理想的な溶融平滑化として、均したい凹凸の周期や高さに応じた広さ、深さを一度に加熱・溶融でき、液相の被加工材の粘度に応じた液面の振動緩和時間と凝固時間のバランスを最適にすることを念頭に置いた。このことから、スポット径、エネルギー密度、走査速度、加工回数、走査方法を適宜照射条件として設定した加工実験から平滑化に対して良好な条件を抽出した。

図 8(a), (b)にそれぞれ研磨加工面、フライス加工面の溶融平滑化加工実施後のマイクロスコブ像を示す。いずれも焼入れした資料であるが、(b)は切削加工後に焼入れ処理を行っているため、非照射部表層にごく薄い酸化被膜が存在している。図 9 には研磨加工面のレーザー照射前後の断面曲線、図 10 にはフライス加工面のレーザー照射前後の断面曲線、図 11(a), (b)には研磨加工面、フライス加工面の断面曲線の FFT 解析結果を示す。研磨加工面は照射前の性状によると考えられる低周波成分が影響するものの  $0.08\mu\text{mRa}$  まで表面粗さを低減することができた<sup>(11)</sup>。一方、およそ  $50\mu\text{m}$  の一定した空間周波数を持つフライス加工面では表面粗さ  $0.1\mu\text{mRa}$  程度を再現よく得ることができた。なお、このときの集光スポット径は  $120\mu\text{m}$  であった。空間周波数に対する解析では、研磨面の加工においては広い波長成分を、フライス面の加工においては単一的な波長成分をそれぞれ低減できていることがわかる<sup>(11)</sup>。



(a) 研磨加工面の溶融平滑化加工面



(b) フライス加工面の溶融平滑化加工面

図 8 溶融平滑化加工面

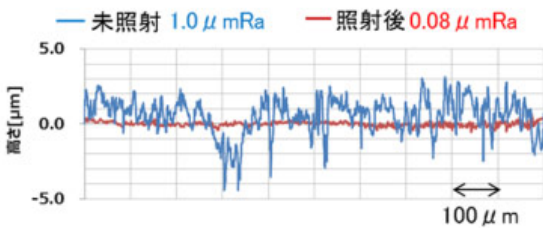


図 9 溶融加工前後の断面曲線 (研磨面)

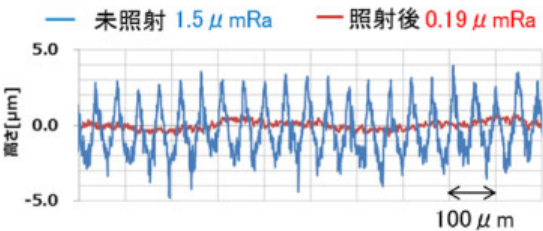
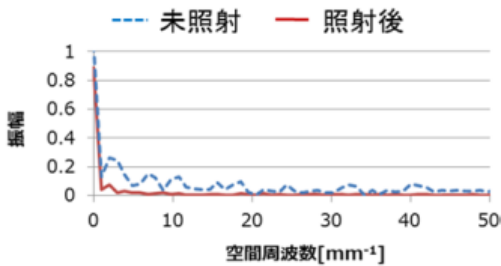
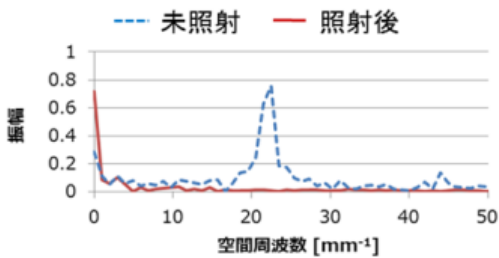


図 10 溶融加工前後の断面曲線 (フライス加工面)



(a) 研磨面



(b) フライス加工面

図 11 溶融加工前後の FFT 結果

図 12 には、アブレーションからの一連の複合平滑化加工を行った面の拡大像を、また図 13 には加工表

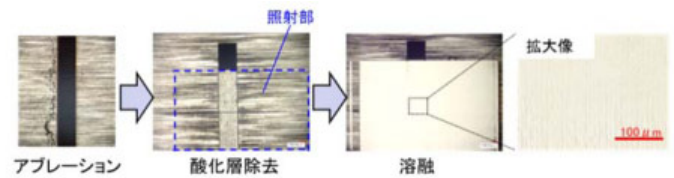


図 12 複合レーザー加工表面像

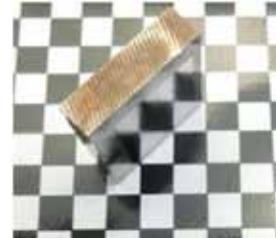


図 13 加工表面の概観

面の概観と像を投影したときの様子を示す。良好な平滑化加工面と金属光沢により鏡面が得られていることがわかる。

また、図 14(a), (b)にはアブレーションから溶融までの複合プロセスを経た加工部の断面 SEM 像およびEDXによる酸素原子マッピングを示す。断面SEM像において、表層近く 10μm の領域の結晶粒の拡大及び、その下 5μm 程度の結晶粒の微細化といった粒径の変化より、熱影響範囲は表面から 15μm 程度であると推定している。これは溶融のみによるレーザー研磨に比べて充分小さい熱影響層厚であると言えるほか、EDXの結果より表層に酸化物の局在が無いことを確認した<sup>(11)</sup>。さらに、加工部断面の表層付近に対してナノインデントによる硬度試験を行った結果を図 15 に示す。被加工材が焼入れ後の工具鋼であるため、加工部表層からの距離が遠い部分つまり母材層はインデンテーション硬さ約 7300N/mm<sup>2</sup> (ロック

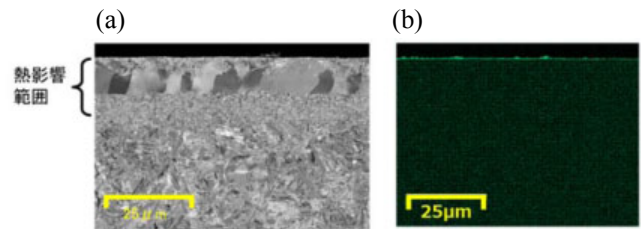


図 14 溶融加工部断面の SEM/EDX 解析 (a)断面 SEM 像, (b)EDX による酸素元素分布

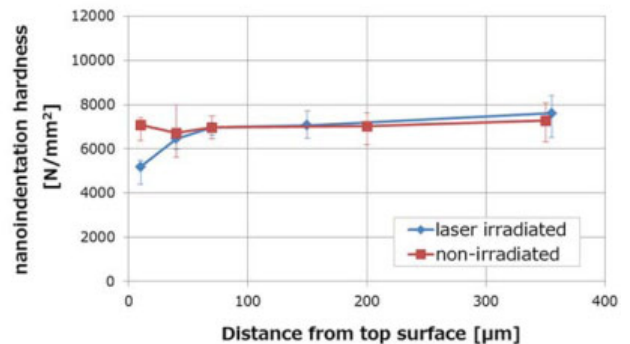


図 15 加工面断面の硬度分布

ウェル硬度換算：60HRC) と高硬度であるが、表層 10 $\mu\text{m}$  では約 5200N/mm<sup>2</sup> (48HRC) となった<sup>(11)</sup>。汎用金型に求められるような硬度を上回るレベルは確保できているが、硬度の低下を緩和する照射条件については今後の検討を行っていく。

### 3. 平滑化表面への微細周期構造形成

短パルスレーザーによるアブレーション加工領域では、加工閾値近傍のフルエンスによるレーザー照射で照射波長程度の周期を持つ微細構造が加工面表面に生成されることが知られている<sup>(12)</sup>。この微細周期構造は濡れ性や光学特性、摩擦係数の制御に寄与するほか、金型表面に施すことで離型性の向上を図ることができると考えられる。

図 1 に示したような概念図にて、所望する形状面に対するフォーカス位置、つまり所望する形状面から加工影響範囲中心までの距離をデフォーカス量とした。前述したアブレーション加工と同様のレーザーおよび加工系 (図 2) を用い、フォーカス位置から下方への加工影響範囲が 40 $\mu\text{m}$  となる条件でデフォーカス量を変え、50 回の繰り返し面走査による照射を行った。照射後の加工深さを示す断面曲線を図 16 に、そのとき得られた加工表面 SEM 像を図 17 に示す。デフォーカス量 10 $\mu\text{m}$ 、26 $\mu\text{m}$  で表層の除去とともに微細周期構造 (LIPSS : Laser Induced Periodic

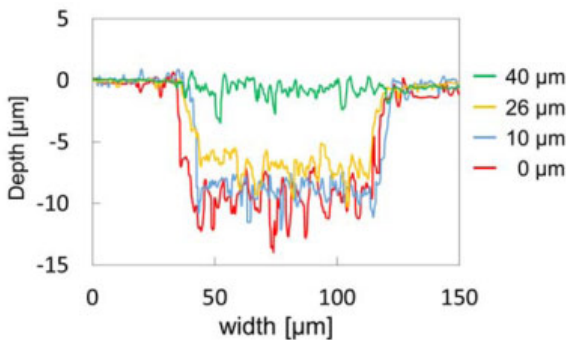


図 16 50 回繰り返し走査後の加工面の断面曲線

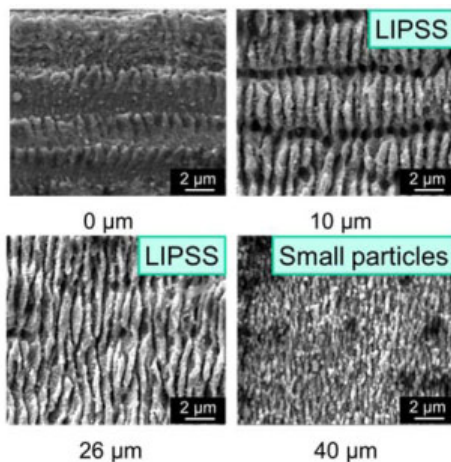


図 17 各デフォーカス量における微細周期構造拡大像

Surface Structure) が得られており、加工面において周期構造が生成される条件が整っていたことが推定できる<sup>(13)</sup>。

図 18 に周期構造の有無による工具鋼からの樹脂の離型性のちがいを確認した系を示す。左図のように工具鋼の表面に PBT (polybutylene terephthalate) を載せて成形温度まで昇温させた後、金型ではさんで圧力 (200N) をかけ、冷却後右図のように工具鋼を下方垂直に引っ張って離型力を測定した。図 19 に結果を示す。非照射部分からの離型力に比べて周期構造を設けた部分の離型力が大幅に低減できていることがわかった。このことから、レーザーにて金型として表面仕上げを行うと同時に表面に微細周期構造を設けることで金型の離型性を向上させられることが示された。

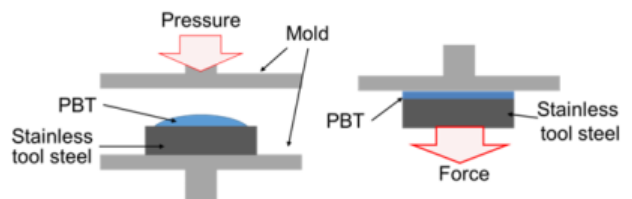


図 18 離型力測定手順

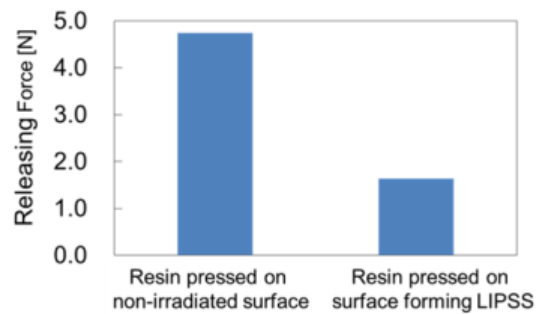


図 19 照射部と非照射部の離型力

## 4 まとめ

工具鋼に対するアブレーション加工から熔融加工までの一連の複合レーザープロセスにより、積層造形品のような大きい表面粗さを持つ加工品に対しても表面粗さ 0.1 $\mu\text{mRa}$  を下回る仕上げを実現するとともに、熱影響や酸化による着色を抑え、鏡面を得ることができる目途が立った。

また、アブレーション工程における照射条件の調整により照射波長程度の周期を持つ微細周期構造が形成でき、アブレーションによる仕上げ加工と同時に金型における離型性向上にも寄与できることがわかった。

## 参考文献

- (1) 深見翔, 並木久幸, 田辺理枝, 伊藤義郎: レーザーによる高硬度金型材料の微細加工 (第 2 報) - フ

- エムト秒レーザー加工における熱影響層ー, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2006), H36.
- (2)A. Temmler, et al. : Laser polishing, Proc. SPIE 8243, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII, 82430W, (2012).
- (3)J. Kumstel et al. : Polishing Titanium- and Nickel-based Alloys using Cw-Laser Radiation, Physics Procedia, 41, (2013).
- (4)Evgueni V. Bordatchev, et al. : Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73, 1-4 (2014), 35-52.
- (5)F. E. Pfefferkorn et al.: Improving surface finish in pulsed laser micro polishing using thermocapillary flow, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 62, 1, (2013), 203-206.
- (6)Madhu Vadal, et al., : Effects of Pulse Duration on Laser Micro Polishing, Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 1,1 ,(2013).
- (7)Debajyoti Bhaduri et al. : Laser polishing of 3D printed mesoscale components, Applied Surface Science, 405, (2017), 29-46.
- (8)Benoit Rosa et al. : Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces, Journal of Laser Applications, 27, (2015).
- (9)世良博史, 漆畑卓朗, 石田 宏, 杉山善崇, 若林知敬, 白須賢治, 閻 紀旺: ピコ秒レーザーアブレーションによる工具鋼の平滑化加工, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2017), F39.
- (10)多久島裕一, 若林知敬: 精密レーザー加工用 1030 nm 帯パルス幅可変ファイバレーザー, オプトニュース Vol.12, No.6 (2017)
- (11)漆畑卓朗・石田宏・杉山善崇・若林知敬・閻紀旺: 工具鋼の複合レーザー平滑化加工, 精密工学会 2018 年度春季大会学術講演会講演論文集, (2018), C76.
- (12)A. Y. Vorobyev et al. : Periodic ordering of random surface nanostructures induced by femtosecond laser pulses on metals, J Appl Phys, 101, (2007), 034903.
- (13)Tomoki Kobayashi et al, : Smoothing of steel materials and formation of nano periodic structures by picosecond pulsed laser ablation, COLA 2017, (2017), 249.

# フェムト秒レーザー誘起周期構造形成及びその結晶性評価

Formation and crystallinity evaluation of femtosecond-laser-induced periodic structures

宮川鈴衣奈, 江龍修

名古屋工業大学大学院 工学研究科 物理工学専攻  
(〒466-85557 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

Reina MIYAGAWA, Osamu ERYU

Nagoya Institute of Technology, Department of Physical Science and Engineering  
(Gokiso, Showa, Nagoya, Aichi, 466-8555 Japan)  
E-mail: miyagawa.reina@nitech.ac.jp

高再現性で形成されるフェムト秒レーザー誘起周期構造 (LIPSS) を機能的に応用させるため, その結晶状態を調べた. パワーデバイスや光デバイス応用にも有用な SiC, GaN, Si, Sapphire 基板に形成した LIPSS は, 形状は同様に見えるが材料によって結晶状態が異なることが分かった. SiC 上 LIPSS は結晶質で基板からの結晶乱れが無いのに対して, GaN や Sapphire では結晶質は維持しているもののナノ粒子状の結晶配向乱れが発生した. また, Si では LIPSS 中央部は数 10 nm サイズの結晶粒子の集合体である多結晶状態で, その多結晶領域をアモルファス層が覆っている構造であった. LIPSS の結晶状態を決定付ける材料物性及びレーザー照射条件の解明, 欠陥発生ダイナミクスを理解し, 制御していく.

LIPSS have attracted much interest as a wonderful technique for forming the fine structures without a mask and wet-process. The high reproducibility indicates an availability of application such as quantum devices. In this study, we investigated the crystalline state of LIPSS onto SiC, GaN, Si and sapphire substrates. In the case of SiC, the core of the 200-nm-pitch LIPSS retained a high crystalline quality continued from the SiC substrate, where the crystal orientation was aligned with that of the SiC substrate. In the case of GaN and sapphire, the LIPSS kept the crystalline including localized orientation fluctuation with the particle sizes of several dozens of nm. We continue to clarify and control the defining material properties and conditions of the crystallinity.

**Key words:** femtosecond laser, LIPSS, semiconductors, crystallinity evaluation, TEM

## 1. 緒言

フェムト秒レーザーの高強度安定発振の実現により, 材料への熱的ダメージを極力抑えられること, 非線形光学効果が発現することを活かした透明材料へのレーザー加工やダメージの少ないレーザーダイシングなどが可能になった<sup>(1-3)</sup>. フェムト秒レーザーを結晶表面に集光照射することで, レーザの波長より短い周期の構造 (Laser Induced Periodic Surface Structures : LIPSS) が自発的に形成されることが知られている<sup>(4-10)</sup>. 表面プラズモンポラリトンの励起<sup>(5-7)</sup>や光パラメトリック崩壊過程<sup>(7,8)</sup>, 第 2 次高調波発生<sup>(9,10)</sup>などの寄与が形成メカニズムとして提案され, 実験結果との整合性も示されているが, 詳細は明らかになっていないことも多い. 本研究では, 再現性高く形成される LIPSS を機能的に応用させるため, LIPSS の形状や結晶状態を調べ, その構造を決定付ける材料物性及び照射レーザーの条件を明らかにすることを目的とし

ている. ここでは, 被照射材料の違いによる結晶状態の違いについて述べる. 被照射材料は, パワーデバイスや光デバイス応用にも有用な SiC, GaN, Si, Sapphire を用いた. 各材料は表 1 に示す材料物性を有し<sup>(11-15)</sup>, いずれも化学的・物理的に安定な材料である.

表 1 各材料物性値

	SiC (6H)	GaN	Si	Sapphire
Bandgap [eV]	3.02	3.39	1.12	8.1-8.6
Electron mobility [cm <sup>2</sup> /Vs]	100(∥c) 450(⊥c)	1200	1500	2200
Breakdown electric field [MV/cm]	3.0	3.3	0.3	48
Thermal expansion coefficient (Δa/a) [10 <sup>-6</sup> /K]	3.9	5.59	3.59	7.5
Thermal conductivity [W/cmK]	4.9	2.1	1.5	0.42
Thermal diffusivity [cm <sup>2</sup> /s]	2.2	0.43	0.8	0.1
Melting point [K]	2793	>2000	1414	2030
Refractive index	2.7	2.5	3.42	1.7

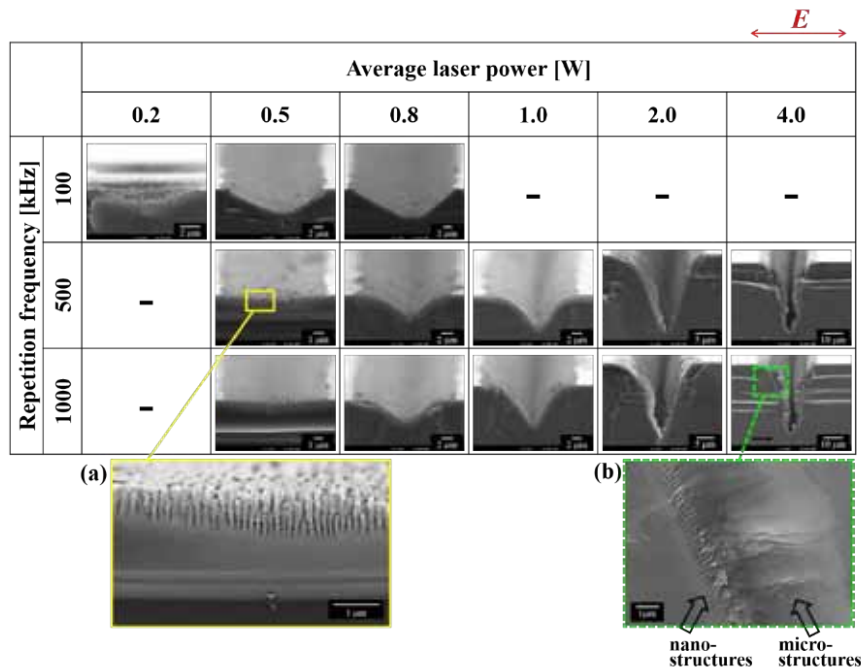


図1 6H-SiCに形成したLIPSSの鳥瞰SEM像  
(a) 500 kHz, 0.5W, (b) 1000 kHz, 4.0 W

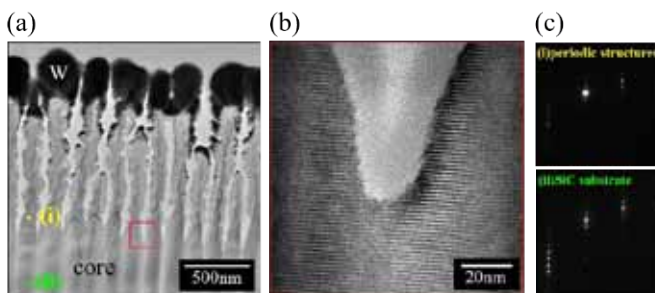


図2 6H-SiC上LIPSSのTEM像 (500 kHz, 0.5W)  
(a)明視野像, (b)高分解像, (c)回折パターン

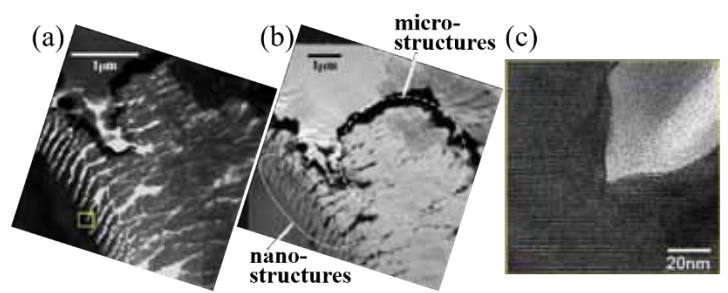


図3 6H-SiC上LIPSSのTEM像 (1000 kHz, 4.0W)  
(a)明視野像, (b)暗視野像, (c) 高分解像

## 2. 実験方法

レーザー照射にはフェムト秒レーザー発振器 (IMRA AMERICA Inc., FCPA  $\mu$  jewel D-10K:  $\lambda=1045$  nm,  $T_p=450$  fs,  $f=100$ -1000 kHz) を用いた。レーザー光を各基板の表面に集光し、スキャン照射した。集光後のビーム径は約  $15 \mu\text{m}$  で、平均レーザーパワーが  $100$  mW, 繰り返し周波数が  $100$  kHz のとき、ピークパワーは  $1.3 \text{ TW/cm}^2$ , フルエンスは  $0.6 \text{ J/cm}^2$  と見積もられる。レーザー照射前後に、アセトン, フッ酸 (50 wt%), 超純水, IPA の順で基板洗浄を行った。レーザー照射前の洗浄では基板表面の有機汚染及び自然酸化膜の除去を, レーザー照射後はデブリの除去を目的としている。レーザー照射後, SEM (JEOL JSM-7800F) 及び TEM (JEOL JEM-ARM200F, JEM-2000EX, JEM-2100EX) でLIPSSの形状や結晶状態を評価した。TEM観察試料はFIB (JEOL JEM-9320FIB) プロセスで作製し, 表面にはW及びCを堆積した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 SiC基板へのLIPSS形成

6H-SiC基板に, 平均レーザーパワーを  $0.2$ - $4.0$  W, 繰り返し周波数を  $100$ - $1000$  kHzに変化させて形成したLIPSSの鳥瞰SEM像を図1に示す。レーザーの偏光方向は図中にEで示した。SiC基板表面に, レーザの偏光方向に垂直な方向に  $200$  nm周期のLIPSSを形成した。LIPSSの形成方向は基板の結晶方向に依らず, レーザの偏光方向のみに依存する<sup>(16)</sup>。LIPSS周期への照射レーザー条件の影響は小さいが, 平均パワーが大きくなるほど周期の乱れが大きくなる傾向があった<sup>(17)</sup>。レーザーのピークパワーが大きくなると (平均パワーの増大もしくは繰り返し周波数の減少) SiC基板はV字状にアブレーションされ,  $4.0$  Wの照射では約  $35 \mu\text{m}$  深さだった。V字状アブレーションされた場合, LIPSSはその側面及び底面に形成された。図1(b)に示すように, 平均パワーが  $2.0$  W以上では  $200$  nm周期のLIPSS (ナノ構造) 上に数  $\mu\text{m}$  サイズのマイクロ構造を形成した。

図 1(a)に示した 500 kHz, 0.5 W のレーザ照射で形成した LIPSS の TEM 像を図 2 に, 図 1(b)に示した 1000 kHz, 4.0 W で形成した LIPSS の TEM 像を図 3 に示す. 図 2 より, LIPSS のコアは結晶質でその表面を約 20 nm 厚さのアモルファス層で覆われた構造であることが分かる. LIPSS のコアは高分解像からも分かるように 6H-SiC 結晶で, 基板からの結晶乱れが無い高結晶性を維持している. 図 3 に示した LIPSS 上にマイクロ構造が形成された場合にも, LIPSS のナノ構造部は非常に高品質な 6H-SiC 結晶質であることが分かる. マイクロ構造部はアモルファスで, LIPSS の表面を覆っていた数 10 nm のアモルファス領域がレーザの積重照射により拡張, 合体したと考える.

### 3.2 Si, GaN, Sapphire 上 LIPSS の結晶性評価

図 4 に Si にレーザパワーを 50-70 mW, 繰り返し周波数を 100 kHz で照射して形成した LIPSS の SEM 像及び TEM 像を示す. 50 mW では約 650 nm 周期の LIPSS を形成し, 75 mW 以上ではこの LIPSS に加えて数  $\mu\text{m}$  サイズのマイクロ構造を形成した. 75 mW の LIPSS 部とマイクロ構造部の TEM 観察像を図 4(d)に示す. (i)で示した領域はマイクロ構造部, (ii)で示した領域は LIPSS 部で, それぞれの明視野 (BF) 像と暗視野 (DF) 像を示した. LIPSS 部とマイクロ構造部のどちらも, 構造の中央部は数 10 nm サイズの結晶粒子の集合体である多結晶状態で, その多結晶領域をアモルファス層が覆っている. LIPSS 部とマイクロ構造部の違いは, このアモルファス層の厚さで, LIPSS 部では 200 nm 程度なのに対してマイクロ構造部では約 1  $\mu\text{m}$  厚さであった. Si の融点はここで示す他の材料に比べて低いことから, Si の LIPSS は一度溶解して再結晶化したと考える.

GaN にレーザパワー 300 mW, 繰り返し周波数 100 kHz で照射して形成した LIPSS の断面 TEM 明視野像を図 5 に示す. GaN の面内結晶方向依存を調べるため, 図 5(a)は GaN の  $\langle 1-100 \rangle$  方向に平行なレーザ偏光方向で  $\{1-100\}$  面を表出する LIPSS, 図 5(b)は GaN の  $\langle 11-20 \rangle$  方向に平行な偏光方向で  $\{11-20\}$  面を

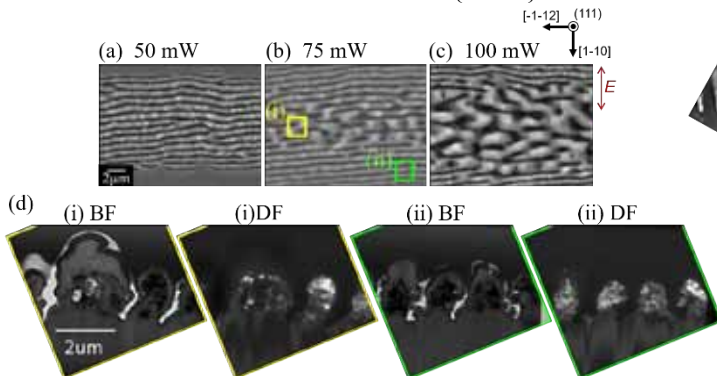


図 4 Si 上 LIPSS の SEM 像及び TEM 像 (a)50 mW, (b)75 mW, (c)100 mW, (d)75 mW の TEM 像

表出する LIPSS である. LIPSS の周期は GaN の結晶方位に依らず約 200 nm であるが, LIPSS のアスペクト比が異なることが分かる.  $\{1-100\}$  面を表出する LIPSS の方が高アスペクト比で, 幅は約 50 nm, 高さは約 1.2  $\mu\text{m}$  であった. また, 図 6 に示した LIPSS の断面明視野及び暗視野 TEM 像より (レーザパワー: 100 mW), LIPSS 部も GaN 結晶質を維持しているが, 局所的に数 10 nm 粒子状の結晶配向乱れが発生していることが分かる. また, Raman 分光測定による残留応力を調べたところ, LIPSS 領域及びその直近の周辺は, 圧縮・引張の混在した残留応力が発生していた. 結晶配向乱れの欠陥や応力が LIPSS 形成のどの過程で発生したのかは今調査中である.

Sapphire にパワー 4 W, 繰り返し周波数 1000 kHz でレーザ照射して形成した LIPSS の断面 TEM 像を図 7 に示す. LIPSS はレーザの偏光方向に垂直方向に, 約 300 nm 周期で形成された. 図 7(c)に示した LIPSS 領域の回折パターンからも, Sapphire 結晶質を維持していることが分かるが, GaN 同様の粒子状の局所的な結晶配向乱れが発生している. この配向乱れは, 数 10 nm から 100 nm 径と GaN に比べて大きい. また, LIPSS 領域では c 面内方向に転位も発生していることが分かる. 結晶配向乱れは Sapphire 基板内部からも観察されたことから, レーザ照射前から存在していた可能性もあり, 今後高品質基板での詳細な検討と構造形成ダイナミクスの理解が必要である.

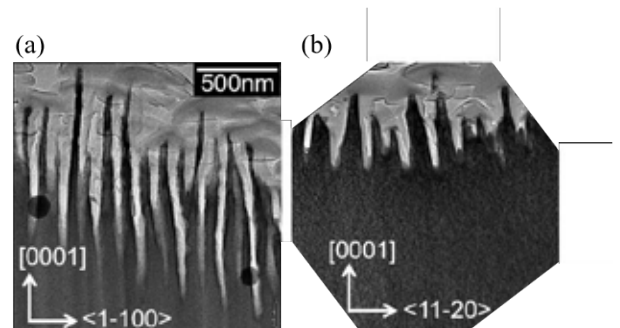


図 5 GaN 上 LIPSS の TEM 像 (P=300 mW) (a) $E // \langle 1-100 \rangle_{\text{GaN}}$ , (b)  $E // \langle 11-20 \rangle_{\text{GaN}}$

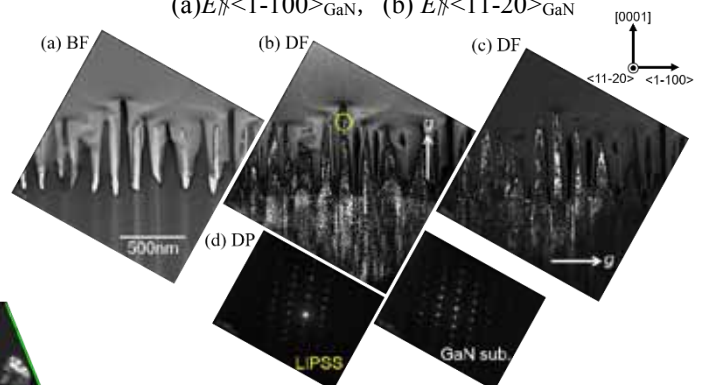


図 6 GaN 上 LIPSS の TEM 像 (P=100 mW) (a)明視野像, (b)暗視野像( $g // [0001]_{\text{GaN}}$ ), (c)暗視野像( $g // \langle -1-100 \rangle_{\text{GaN}}$ ), (d)回折パターン

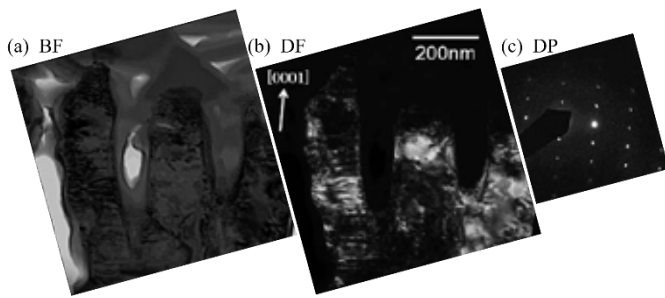


図7 Sapphire上LIPSSのTEM像  
(a)明視野像, (b)暗視野像, (c)回折パターン

#### 4. まとめ

フェムト秒レーザー照射による結晶基板へのLIPSS形成において、各被照射材料のLIPSSの結晶状態を調べた。材料によってアブレーションやLIPSS形成のレーザーパワー閾値が異なるので直接的な比較は難しいが、形状は同様に見えるLIPSSでも材料によって結晶状態が異なることが分かった(図8)。今後は、LIPSSの結晶状態を決定付ける材料物性及びレーザー照射条件の解明、欠陥が発生する場合にはLIPSS形成のどの過程で発生するのかをダイナミクスとして理解していく。さらに、形状や結晶状態を制御し、デバイスへの応用に繋げていく。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（JP17K14111, JP16H06415）、公益財団法人 天田財団 奨励研究助成 A、東北大学金属材料研究所 共同利用（No.16K0056, 17K0103）、名古屋工業大学学内研究推進経費の助成を受けたものです。フェムト秒レーザー発振器を用いた実験を行う機会を与えていただいたIMRA AMERICA Inc.に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- (1) S. Nakamura, K. Sugioka, and K. Midorikawa: Enhancement of resolution and quality of nano-hole structure on GaN substrates using the second-harmonic beam of near-infrared femtosecond laser, *Appl. Phys. A*, 101, (2010), 475.
- (2) S. Maruo and J. T. Fourkas: Recent progress in multiphoton microfabrication, *Laser & Photon. Rev.*, 2, (2008), 100.
- (3) M. Hashida, A. F. Semerok, O. Govert, G. Petite, Y. Izawa, and J. F. Wagner: Ablation threshold dependence on pulse duration for copper, *Appl. Surf. Sci.*, 197-198, (2002), 862.
- (4) J. Bonse, J. Kruger, S. Hohm, and A. Rosenfield: Femtosecond laser-induced periodic surface structures, *J. Laser Appl.*, 24, (2012), 042006.
- (5) G. Miyaji, K. Miyazaki, K. Zhang, T. Yoshifuji, and J. Fujita: Mechanism of femtosecond-laser-induced periodic nanostructure formation on crystalline silicon surface immersed in water, *Opt. Express*, 20, (2012), 14848.

	GaN	Sapphire	SiC	Si
	0.1W, 100kHz	4W, 1000kHz	0.5W, 1000kHz	0.075W, 100kHz
TEM				
結晶モデル				
周期	200-250 nm	200-300 nm	200 nm	650 nm

図8 各材料に形成したLIPSSのTEM像と結晶モデル

- (6) T. Tomita, R. Kumai, H. Nomura, S. Matsuo, S. Hashimoto, K. Morita, and T. Isu: Surface roughness assisted 100 kHz femtosecond laser induced nanostructure formation on silicon surface, *Appl. Phys. A*, 105, (2011), 89.
- (7) T. J. -Y. Derrien, T. E. Itina, R. Torres, T. Sarnet, and M. Sentis: Possible surface plasmon polariton excitation under femtosecond laser irradiation on silicon, *J. Appl. Phys.*, 114, (2013), 083104.
- (8) S. Sakabe, M. Hashida, S. Tokita, S. Namba, and K. Okamoto: Mechanism for self-formation of periodic grating structures on a metal surface by a femtosecond laser pulse, *Phys. Rev. B*, 79, (2009), 033409.
- (9) R. L. Harzic, D. Dörr, D. Sauer, F. Stracke, and H. Zimmermann: Generation of high spatial frequency ripples on Si under ultrashort laser pulses irradiation, *Appl. Phys. Lett.*, 98, (2011), 211905.
- (10) A. Borowiec and H. K. Haugen: Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, 82, (2003), 4462.
- (11) T. Kimoto and J. A. Cooper: *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., (2014).
- (12) 高橋清(監修), 長谷川文夫, 吉川明彦(編著): *ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス*, 森北出版, (2006).
- (13) 赤崎勇(編著): *III族窒化物半導体*, 培風館, (1999).
- (14) L. Liu and J. H. Edgar: Substrates for gallium nitride epitaxy, *Mater. Sci. and Eng. R*, 37, (2002), 61.
- (15) F. A. Ponce, B. S. Krusor, J. S. Major Jr., W. E. Plano, and D. F. Welch: Microstructure of GaN epitaxy on SiC using AlN buffer layers, *Appl. Phys. Lett.*, 67, (1995), 410.
- (16) R. Miyagawa, Y. Okabe, Y. Miyachi, M. Miyoshi, T. Egawa and O. Eryu: Selective growth of GaN on SiC substrates with femtosecond-laser-induced periodic nanostructures, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.*, 42(2), (2016), 155.
- (17) R. Miyagawa, Y. Ohno, M. Deura, I. Yonenaga, and O. Eryu: Characterization of femtosecond-laser-induced periodic structures on SiC, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57, (2018), 025602.

## フェムト秒レーザー光還元法による金属微細周期構造パターンニング

Periodic metallic nanostructures patterning by femtosecond laser-induced reduction

小野篤史\*, 鳥山誠也\*\*, 住吉真聡\*\*\*, ミゼイクスビガンタス\*

\*静岡大学 電子工学研究所

(〒432-8011 浜松市中区城北 3-5-1)

\*\*静岡大学 創造科学技術大学院

(〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

\*\*\*静岡大学大学院 総合科学技術研究科

(〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

Atsushi ONO\*, Seiya TORIYAMA\*\*, Masato SUMIYOSHI\*\*\*, and Vyngantas MIZEIKIS\*

\*Research Institute of Electronics, Shizuoka University

(3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8011, Japan)

E-mail: ono.atsushi@shizuoka.ac.jp

\*\*Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

(3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8561, Japan)

\*\*\*Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University

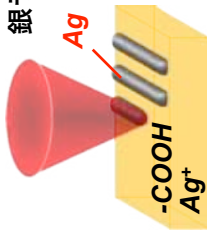
(3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8561, Japan)

フレキシブル基板上への金属微細構造パターンニング技術の確立を目的として、フェムト秒レーザー光還元法による金属ナノ構造作製技術を開発した。金属イオンを溶解した試料にフェムト秒パルスの近赤外レーザーを集光照射すると、多光子吸収によって焦点よりも小さな領域において光還元反応が起こり、金属が析出する。本研究では、フレキシブル基板として耐熱性・耐薬性に優れたポリイミドに着目し、ポリイミド前駆体に銀イオンを溶解した材料を用いた。偏光と照射パターンを工夫することによって、周期 100 nm の超微細金属周期構造がパターンニングされることを発見した。レーザー誘起光還元法は、マスクおよび金属蒸着プロセスを必要としない直接的金属パターンニング技術であり、本手法による超微細金属パターンニング技術は、ソフトマテリアルプラズモンデバイスへの創出や可視光応答性メタマテリアルの開拓のブレークスルーにつながると期待される。

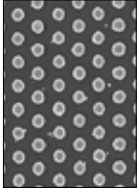
**Key words:** femtosecond laser, photo reduction, metal, polyimide, flexible, surface plasmon, metamaterial

**金属ナノ構造作製技術**

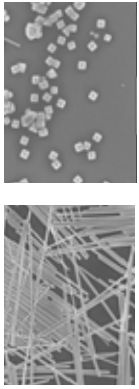
**レーザーリソグラフィ**



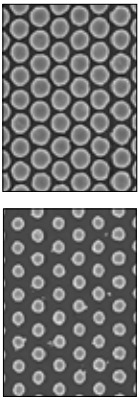
電子線リソグラフィ



**化学合成法**



銀ナノドットアレイ



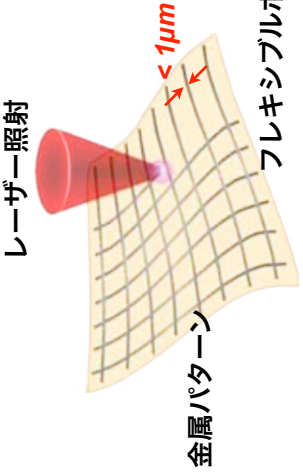
銀ライオン&スペース      結晶性銀ナノワイヤ, ナノキューブ

銀同心円凹凸ナノ構造

2

**研究目的**

レーザーリソグラフィによるフレキシブル基板への  
金属超微細構造作製技術の確立



レーザー照射

金属パターン

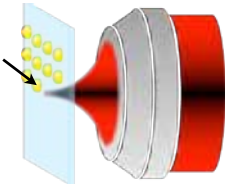
フレキシブルポリマー

レーザー走査により任意の金属構造を作製

フレキシブルデバイス, ウェアラブルデバイス等の  
電子デバイス金属微細配線への応用が期待される。

3

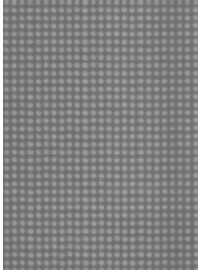
**レーザーキヤンによる任意の  
金属パターンニング技術を開発**



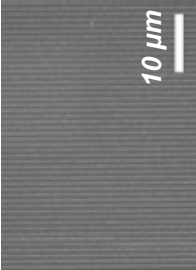
照射領域のみに  
金属ナノ構造体が  
形成される

Laser power 5 mW,  
Scan speed: 3 μm/sec,  
Line period: 1 μm

**銀ナノドットアレイ**

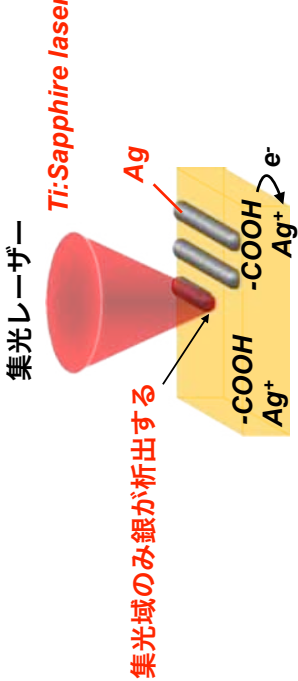


**ライン&スペース**



4

**本技術に用いられた基材および金属形成原理**



集光レーザー

Ti:Sapphire laser

集光域のみ銀が析出する

Ag

-COOH

Ag<sup>+</sup>

Ag<sup>+</sup> + e<sup>-</sup>

光還元を応用

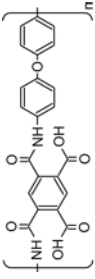
銀イオン含有ポリマー

ポリイミド前駆体 + AgNO<sub>3</sub>

光エネルギー

-COOH + e<sup>-</sup> → -COO<sup>-</sup> + e<sup>-</sup>

Ag<sup>+</sup> + e<sup>-</sup> → Ag




5

**ポリイミド基材**  
フレキシブル  
ポリマーの中で最大の耐熱性・耐薬性

メタサーフェス



電子回路



プラズマモニクデバイス




6

**フレキシブル基板への金属構造製作技術**

**ナノインプリント法**

**特徴**  
高い加工分解能 (~10 nm)  
大面積加工 (モールド径依存)

**課題**  
金属連続膜  
モールド耐久性  
パターン合わせ精度

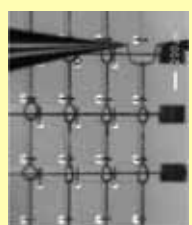


*B. S. Hyun, et al. Adv. Mater. 19 (2007).*

**金属ナノインクジェット法**

**特徴**  
プロセスが容易  
現像やレジスト除去が不要

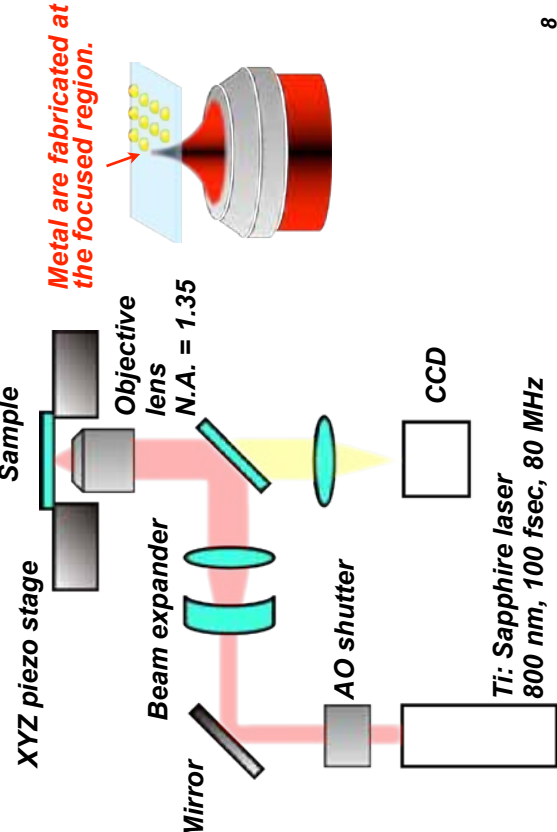
**課題**  
加工分解能 (1 μm)  
ノズル径による制限



*B. Y. Ahn, et al. SCIENCE 323 (2009).*

7

**2光子励起光還元法による金属ナノ構造作製**  
~100 nmの加工分解能・無蒸着プロセス



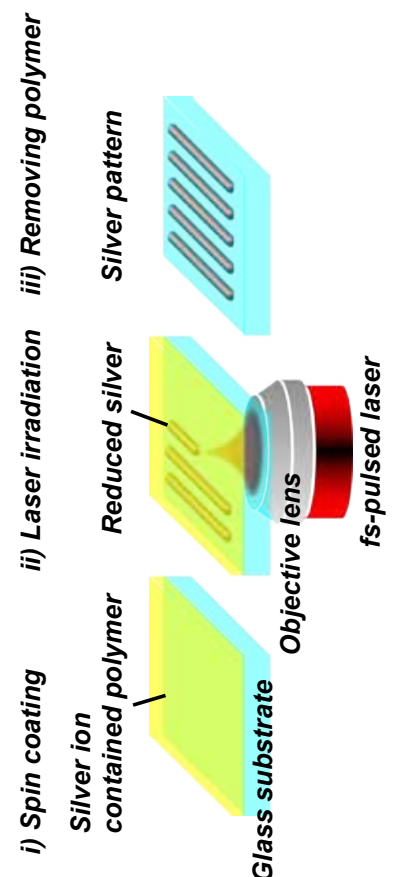
XYZ piezo stage    Sample    Objective lens N.A. = 1.35    CCD

Mirror    Beam expander    AO shutter    Ti: Sapphire laser 800 nm, 100 fsec, 80 MHz

*Metal are fabricated at the focused region.*

8

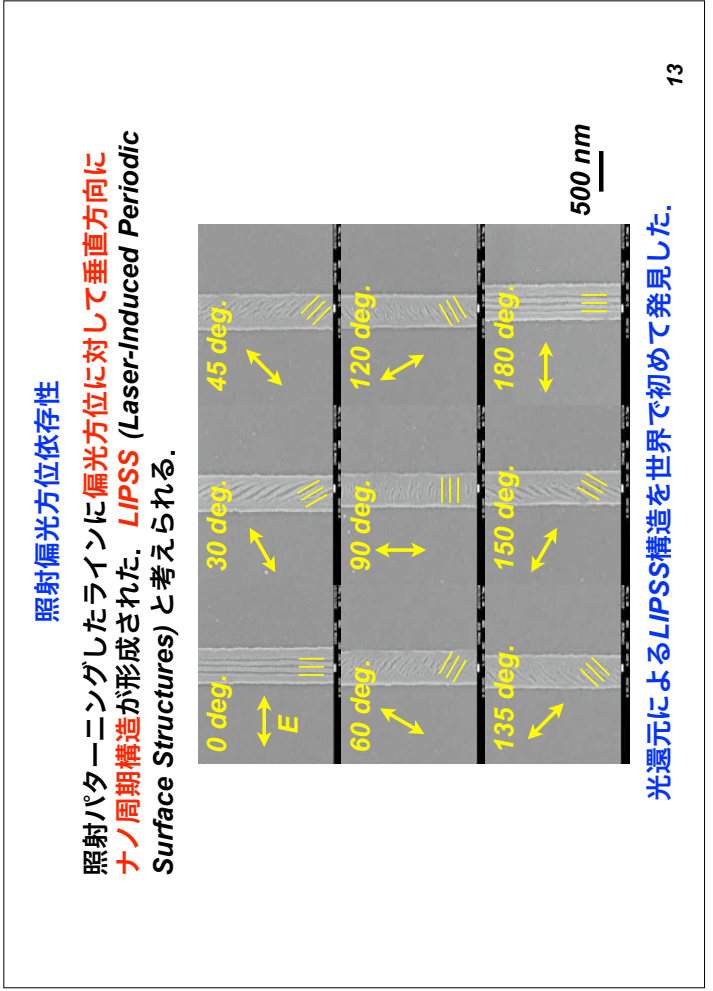
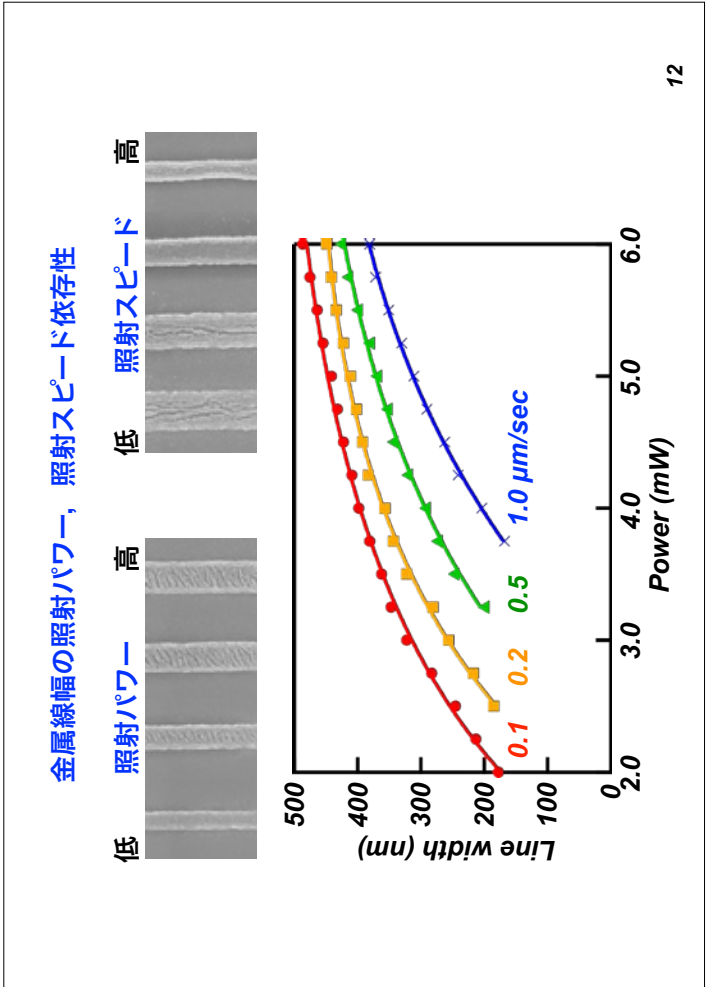
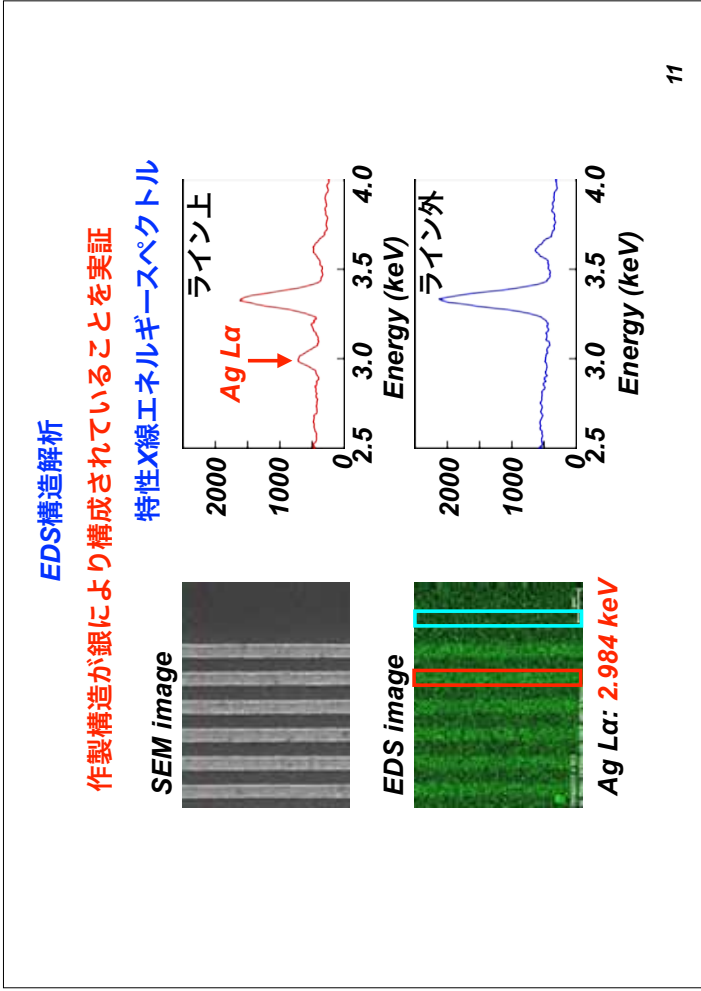
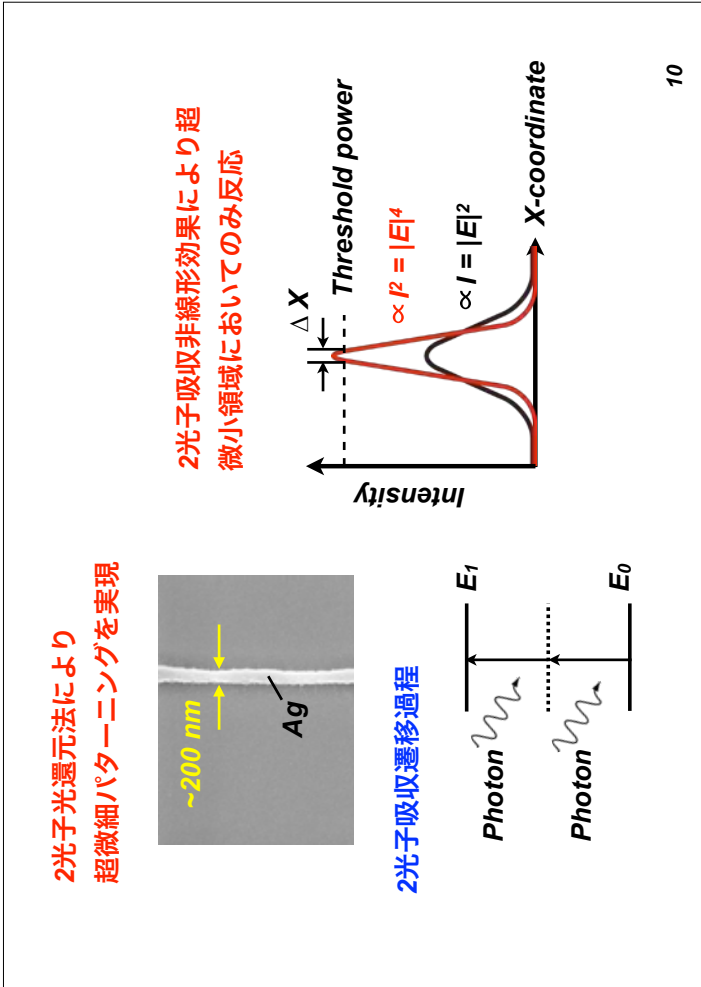
**Fabrication process**



i) Spin coating    ii) Laser irradiation    iii) Removing polymer

Silver ion contained polymer    Glass substrate    Reduced silver    Objective lens    Silver pattern    fs-pulsed laser

9



金属細線内に作製される溝構造の本数が照射パワーに依存して増える。

偏光方位: 0 deg.

Scanning speed: 0.5  $\mu\text{m}/\text{sec}$ .

14

LIPSSを利用した超微細金属周期構造の作製

偏光: 0 deg.

2光子励起光還元法により形成されるLIPSSを利用し周期100 nmの銀ナノグレーティングを作製した。

15

Considerable mechanism for LIPSS in photoreduction process

Pulse width: 100 fsec. Laser fluence:  $\sim 7.5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

Repetition rate: 80 MHz

Laser power:  $\sim 6 \text{ mW}$

Photo reduction

Photon energy

$$-\text{COOH} \xrightarrow{\text{Photon energy}} -\text{COO}^* + e^-$$

$$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$$

Laser induced plasmon

Periodic silver pattern

16

円偏光1点照射による銀ナノリングの作製

照射時間: 10 sec.

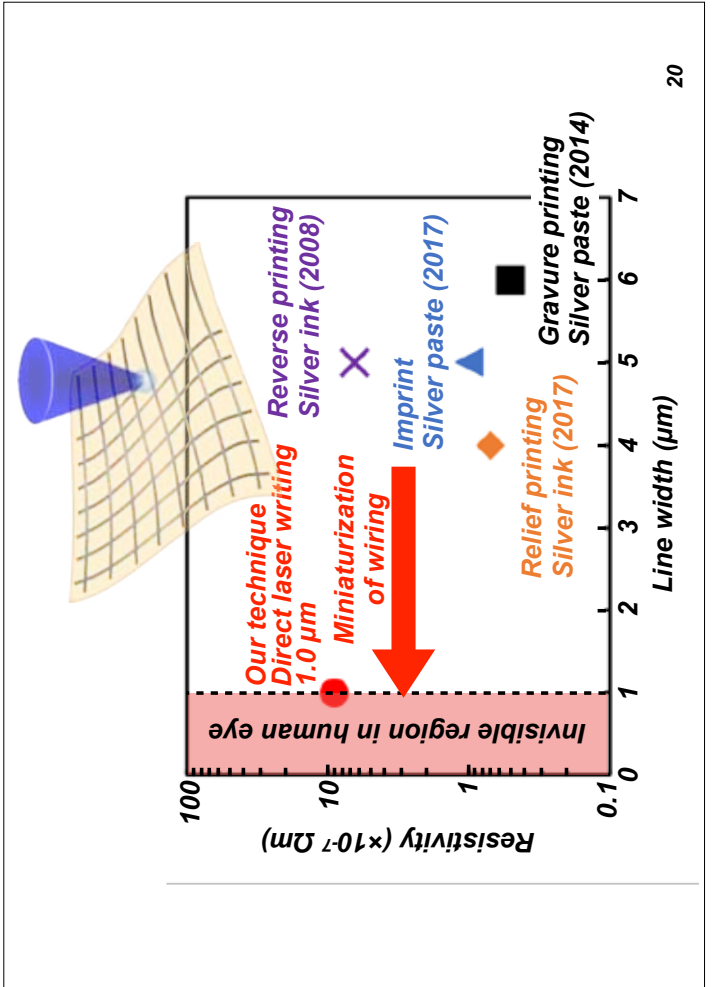
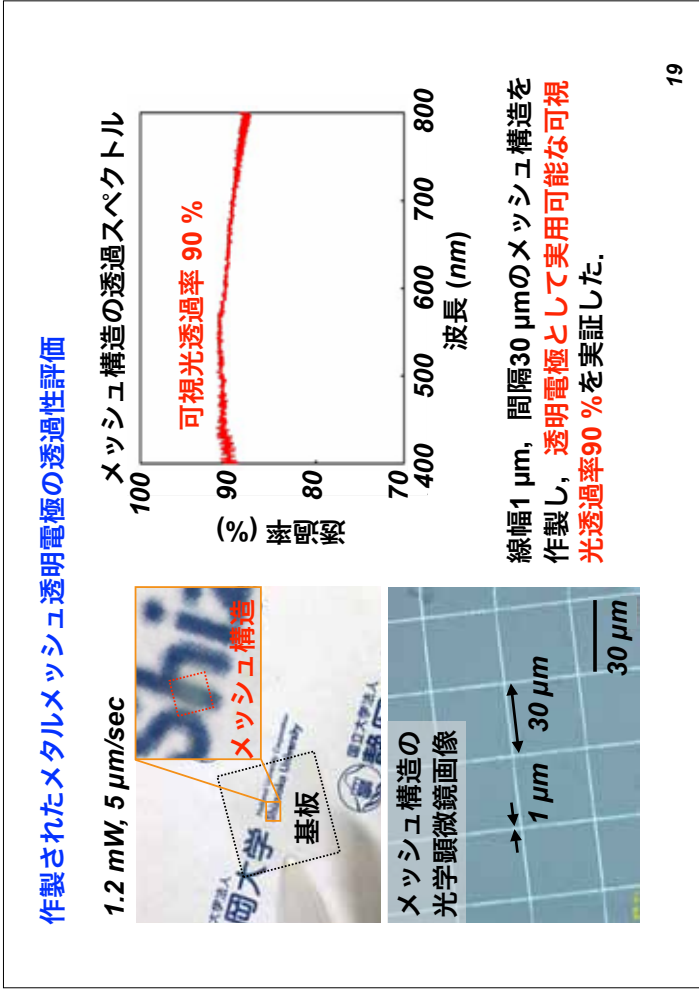
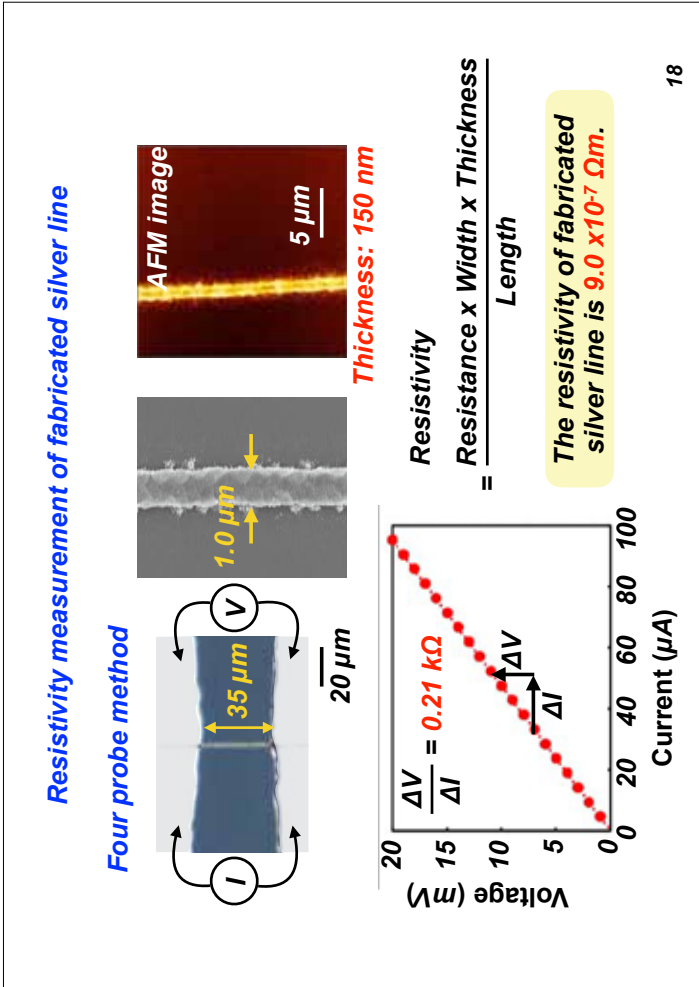
円偏光

リング径, 線幅のレーザーパワー依存性

銀ナノリング

円偏光照射によりドット中心部全方向にLIPSSが形成されたためと考えられる。

17



### 総括

円偏光1点照射により直径400 nmの銀ナノリングの作製に成功した。

銀イオンを含有したポリイミド前駆体ポリマーにフェムト秒レーザーを照射し, 光還元による銀ナノ構造作製技術を確立した。

光還元反応においてLIPSSが形成されることを世界で初めて発見した。

プラズモニクデバイスやメタマテリアルなどの作製要素技術となる他, フレキシブル電子デバイスへの応用が期待される。

21

# ポスター発表

平成30年12月10日

国立研究開発法人産業技術総合研究所  
臨海副都心センター別館 11F

# 亜音速旋回流を利用した減圧・吸引ノズルによるデブリの除去

The removal of debris by laser ablation using a suction nozzle with subsonic swirling flow

芦原 将彰 (福井県工業技術センター)

Masaaki ASHIHARA

(Industrial Technology Center of Fukui Prefecture)

## 1. 緒 言

短パルスレーザ加工は、高強度のレーザパルス光を照射することで照射部を蒸散させる加工プロセスであり、加工が完了するまでに非常に多くのレーザパルス光を照射する必要がある。ここで、短パルスレーザ照射により生じる蒸散物はプラズマの発生とともに高压で周辺に飛散するため、加工壁面に付着するデブリ付着が問題となる。減圧雰囲気下で短パルスレーザ加工を行うことで、レーザ誘起プラズマの飛散速度の増加およびアブレーションレートの増加が報告されており<sup>(1)</sup>、また加工壁面に付着するデブリの低減が期待できる。本研究では大気雰囲気中で局所的に減圧可能となる吸引型のレーザ加工ノズルの開発を目的とする。

## 2. 新型ノズルの局所減圧特性

掃除機のように吸引口が大気開放している系において、1次元流れ場では吸引力をいかに強くしても吸引口を通過する気体の速度が臨界状態に達すると、吸引口における圧力は臨界圧力となりそれ以下にならない。また、掃除機のような単純な吸引の方法では等方的な流れ場が形成されるため、ノズル中心にあたるレーザ光照射領域はよどみ点となり、流れの速度を速くしてもよどみ点の圧力は大気圧より低下し難い。大気雰囲気中で局所的な減圧領域を実現するためには、これらの課題を解決する必要がある。このため、Fig. 1 に示すようにノズル出口近傍に亜音速旋回流を形成することで上記の課題解決を図った。3次元流れ場となる旋回流では流れ中心でよどみ点が発生せず、亜音速の高速流れ場を形成することで渦中心の圧力を大きく低減することができる。

Fig. 1 の結果を実証するために、造形精度が高い光造形法による 3D プリンターを用い、CFD 解析時と同じ CAD データを基にしてノズルの作製を行い、減圧性能の評価試験を行った。評価結果を Fig. 2 に示す。図の横軸は吐出口での流速を表す無次元数(マッハ数)であり、縦軸は加工穴を模擬して形成した  $\Phi 0.3\text{mm}$  の穴内部の絶対圧力を示している。計測対象となる上記の穴は大気雰囲気下に設置されており、マッハ数が 0 の条件は吐出口からの流速がなく、単純な吸引を行った場合の結果であり、大気圧と同程度の値であるが、マッハ数の増加とともに圧力は低下し、ノズルの動作距離  $h$  が 2mm 以下で、マッハ数が 0.15 以上の条件のときに、大気中の臨界圧力である 53.5 kPa[abs] を超える高い減圧効果を示すことが明らかとなった。また、通常のレーザ加工ノズルの動作距離は 1mm 程度であることから、本ノズルはレーザ加工で使用するための十分な動作距離を有している。

## 3. レーザ加工結果

本研究で製作した減圧・吸引ノズルによりレーザ照射部を大気雰囲気下で局所的に減圧し、レーザ切断を行った結果を Fig. 3 に示す。同図はサブナノ秒レーザにより厚さ 0.1mm のステンレスを切断した断面であり、アシストガス無しでレーザ照射のみ行った場合 (Fig. 3(a)) には断面がデブリで覆われているが、本ノズルにより亜音速旋回流により局所減圧雰囲気下で加工を行った場合 (Fig. 3(b)) にはデブリ付着のない切断面を得ることができた。

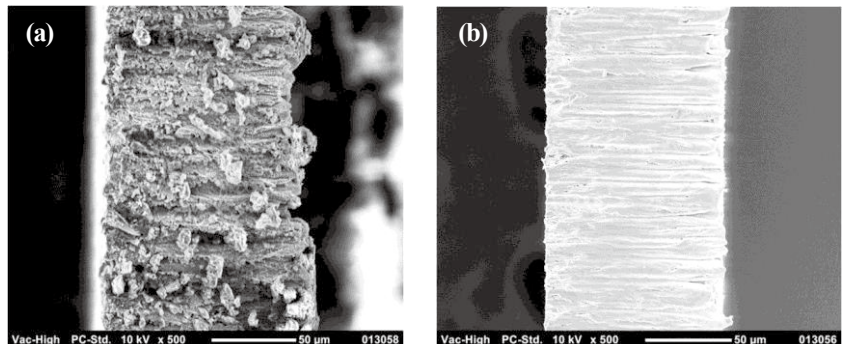


Fig. 3 Cross-sectional SEM images of 0.1mm thickness stainless steel cut by short pulse laser in the atmosphere

(a) without flow (laser irradiation only), (b) with swirling suction flow.

## 参 考 文 献

- (1) J. M. Vadillo, J. M. Fernandez Romero, C. Rodriguez and J. J. Lasema, "Effect of Plasma Shielding on Laser Ablation Rate of Pure Metals at Reduced Pressure", Surf. Interface Anal., Vol.27 (1999), pp.1009–1015.

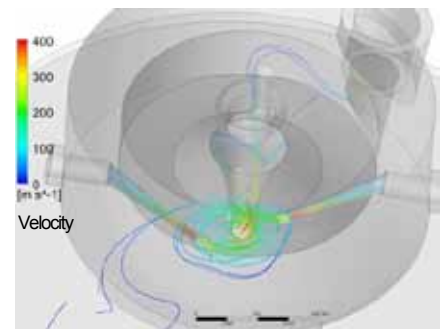


Fig. 1 flow distribution of developed suction nozzle (CFD result)

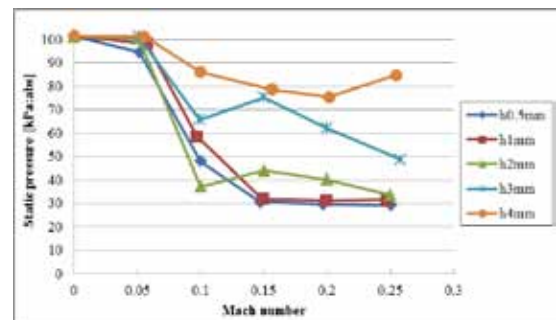


Fig. 2 The experimental results on decompression characteristics of developed suction nozzle

# 機械学習によるレーザ加工の知能化

## ～第1報 フェムト秒レーザによる焼結ダイヤモンド加工の予測～

Study on Intellectualization of Laser Processing with Machine Learning

～ Report 1: Prediction of Polycrystalline Diamond Ablation Processing by Femtosecond Pulse Laser ~

楠本利行, 森清和 (光産業創成大学院大学)

Toshiyuki KUSUMOTO and Kiyokazu Mori

(The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries)

### 1. 緒言

近年、深層学習(ディープラーニング)などの機械学習が、様々な分野のビッグデータ解析などに応用されている。レーザ加工分野においても、機械学習によりレーザ加工条件の推定やインプロセスモニタリングの知能化ができると考えられる。しかしながら、純銅におけるレーザマイクロスポット溶接の裏面溶融部直径<sup>(1)</sup>や、ステンレスにおけるレーザ溶融法の音波信号モニタリング<sup>(2)</sup>に対して適応した報告例があるものの、その適応例は少ない。

本研究の目的は、レーザ加工の条件、インプロセスモニタリングによる観測結果を機械学習にかけることにより、レーザ加工の効率的な知能化の手法を確立することである。本発表では第1報として、フェムト秒レーザによる焼結ダイヤモンドの除去量の予測を実施した結果を報告する。

### 2. 実験方法

レーザ加工用光源として、フェムト秒レーザ(Astrella、コヒレント製)を用いた。パルスエネルギーはアッテネータによって変化させた。ワーク走査は、5軸走査可能な卓上歯科用ミリングマシン(DWX-51D、Roland DG(現 DG SHAPE)製)を改造した装置を使用した。加工用ワークとして、焼結ダイヤモンド(PCD)を用いた。詳細な実験条件を表1に示す。表1の実験条件を組み合わせて、全426通りのフェムト秒レーザによる除去加工を行った。加工後のワークの横断面写真を図1に示す。除去された部分の面積を計測した。得られたデータの7割をトレーニングに、3割をテスト用として教育あり学習によって機械学習させた。

### 3. 実験結果および今後の展開

深層学習による機械学習により解析した結果を図2に示す。横軸が学習による予測結果、縦軸は実験結果である。すなわち、 $y=X$  の関数上にプロットできた場合、予測と実験が一致したことを意味する。今回のトレーニングデータ(青点)から得られた結果を用いて、テストデータ(赤点)をプロットしたところ、 $y=X$  の関数に対する $R^2$ 値は0.970であった。これは、今回の深層学習による機械学習により、実用に足る確からしきでフェムト秒レーザ除去加工量を予測できるモデルが作成できたことを意味する。今後、インプロセスモニタリング結果に対する機械学習による知能化を行う予定である。

### 4. 謝辞

本実験の一部は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(事業番号：S1511020L)によって行った。ここに記して感謝の意を表す。

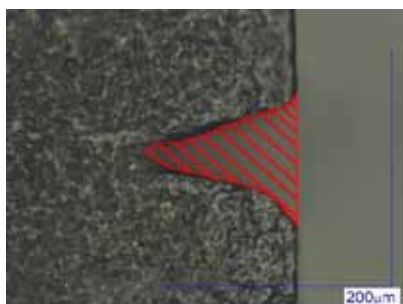


Figure 1 Microscopic image of PCD after ultrashort pulse laser processing

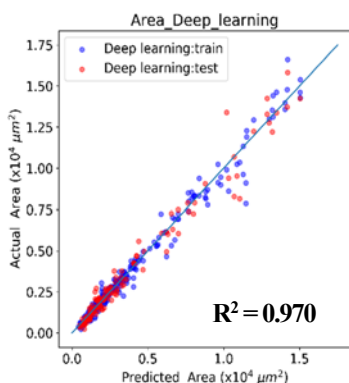


Figure 2 Relationship between predicted areas and actual areas

Table 1 Laser processing condition

Center of wavelength [nm]	800 (fixed)
Repetition rate [kHz]	1 (fixed)
Pulse width [fs]	100 (fixed)
Chirp (both of positively and negatively) [fs]	0 ~ 100
Pulse energy [μJ]	20 ~ 1000
Beam diameter [mm]	7.9, 9.2 and 11
Polarizability against scan direction	Vertical, Parallel, and Circular
Scan velocity [mm/s]	10 ~ 30
Focal length [mm]	50, 75, and 100
Inclination of work [°]	0 and 1
Assist gas (air) [MPa]	0, 0.02, and 0.04
Particle size of diamond in PCD [μm]	0.5 and 1
Manufacturer of PCD	3 companies

### 参考文献

- (1) 川人洋介, 船見浩司, 岡田俊治, 片山聖二: 純銅のレーザマイクロスポット溶接におけるインプロセスモニタリングと適応制御, レーザ研究, 31-3, (2003), 231.
- (2) Y. Dongsen, S. H. Geok, Z. Yingjie, Z. Kunpeng, Y. H. F. Jerry: Defect detection in selective laser melting technology by acoustic signals with deep belief networks, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 96-5-8, (2018), 2791.

## フェムト秒レーザー誘起周期的ナノ構造形成におけるポリマーを用いた周期制御

Periodic control using polymers in femtosecond laser induced periodic nanostructure formation

梶井省吾, 竹名啓輔, 塚本雅裕\*, 佐藤雄二\*

(阪大院工, 阪大接合研\*)

Shogo KAJII, Keisuke TAKENAKA, Masahiro TSUKAMOTO\*, Yuji SATO\*

(Graduate School of Engineering, Osaka Univ., \*Joining and Welding Research Institute.)

チタンは生体適合性に優れ, また鉄と比較して比強度が高い. 先行研究で, チタンにフェムト秒レーザーを照射すると周期的ナノ構造が形成され生体適合性の更なる向上が示唆されており<sup>1)</sup>, 表面改質におけるチタン材の付加価値の向上が注目されている. また, フェムト秒レーザーをチタン材に照射することで形成される周期的ナノ構造の周期は照射されるレーザー波長に依存することが知られている<sup>2)</sup>. レーザ波長は波長変換を用いて変化させることが出来るがその値は離散的であり, したがって形成される周期的ナノ構造の周期も離散的な値しか得られていなかった. 本研究では表面プラズモン・ポラリトン(SPP)励起によるチタン材への周期的ナノ構造形成メカニズムを, 実験結果を元に議論し, チタン材表面に密着させたポリマーの誘電率の変化が周期的ナノ構造の周期に与える影響を評価した.

## 【実験方法】

Ti 基板上への周期的ナノ構造形成のためのフェムト秒レーザー照射セットアップ概略図を Fig.1 に示す. Ti 基板上に設置したポリマー材を PET, PMMA と変化させることでポリマー材の誘電率の変化が周期に及ぼす影響を評価する. ポリマー材は固定用治具に取り付け, 950 kPa で密着させた. レーザは波長 775 nm で, パルス幅, 繰り返し周波数はそれぞれ 150 fs, 1k Hz である. エネルギー減衰器を用いてレーザー強度を  $2.0 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> に調整した. この状態でレーザーを Ti に掃引照射する. 掃引速度は 1.5 mm/s とした. レーザースポット径は  $1/e^2$  で 60  $\mu$ m に設定した. レーザ照射後の試料の表面に対し SEM 観察と AFM 観察を行った.

## 【実験結果】

SEM, AFM による画像観察の結果, 大気下, PET 透過, PMMA 透過ではそれぞれナノ周期構造の周期は 600 nm, 440 nm, 380 nm が得られた. SPP 励起によるチタン材への周期的ナノ構造メカニズムから予想される, レーザ波長, チタン材表面のポリマーの誘電率および周期的ナノ構造の周期の計算結果と実験結果を照らし合わせたグラフを Fig. 2 に示す. グラフより計算による予想と実験結果が概ね一致していることが分かった. 当日は実験によって得られたチタン材表面のナノ周期構造の SEM 観察画像と AFM 観察画像を併せて報告を行う.

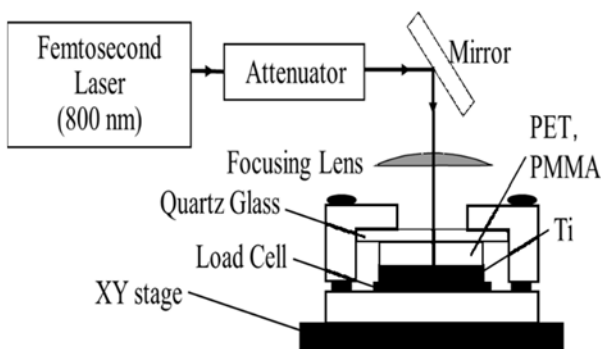


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up for Ti processing with femtosecond laser

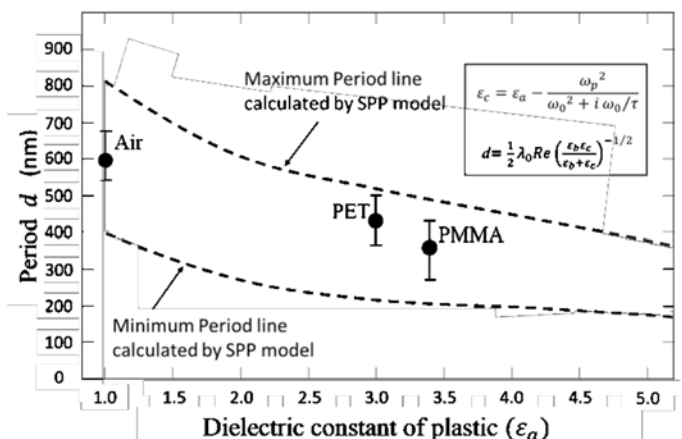


Fig.2 Comparison of experimental results and SPP model

## 参考文献

1. 篠永東吾: “生体適合性向上のための短パルスレーザー照射によるチタン材の表面構造制御に関する研究”, 博士論文 (2013), p. 78-93
2. 篠永東吾: “生体適合性向上のための短パルスレーザー照射によるチタン材の表面構造制御に関する研究”, 博士論文 (2013), p. 36-76

# サブナノ秒マイクロチップレーザ誘起衝撃波を利用した板曲げ加工

Sheet Metal Bending Using Shockwaves Induced by Sub-nanosecond Microchip Laser

驚坂芳弘, 川崎泰介\*, 平等拓範\*, 佐野雄二\*\*

(浜松工業技術支援センター, \*分子科学研究所, \*\*科学技術振興機構)

Yoshihiro SAGISAKA, Taisuke KAWASAKI\*, Takunori TAIRA\*, Yuji SANO\*\*

(Hamamatsu Technical Support Center, \*Institute for Molecular Science, \*\*Japan Science and Technology Agency)

## 1. 緒言

ImPACT プログラムにて超小型のサブナノ秒パルスレーザ (マイクロチップレーザ) が開発された. このレーザを水中で集光照射すると塑性加工にも利用可能な強さのレーザ誘起衝撃波を発生させられる. そこで, 本レーザの用途の一つとして, 衝撃波で金属板表面を叩いて照射面を凸とする方向に板を湾曲させるレーザピーンフォーミングへの適用を試みた. 本法の変形特性を把握するには, 最も簡単な変形である板曲げ(Fig. 1)の特性を調査することが適切である. そこで, 純アルミニウムについて, 基礎的な変形特性として, デフォーカスと水深による曲げ変形量の変化を調査した.

## 2. 実験方法

使用したレーザは増幅器付きのマイクロチップレーザで, 波長 1064nm, パルス幅 700ps, 繰返し周波数 10Hz である. レーザは焦点距離 100mm のレンズを用い, 水槽の上方から水面を通して水中で集光させた (Fig. 2). 試験片は板厚 1mm の純アルミニウムを 10mm×50mm に切断して使用し, 片端をクランプした状態で 3 軸ステージに固定した. 幅方向への線走査を自由端側から 100 $\mu$ m ピッチでずらしながら 40 回繰返して板曲げを行った. 走査速度は 1mm/s である. 走査後, 曲げ角  $\theta$  を測定した. 加工条件としてデフォーカス量  $z$  と水深  $D$  (Fig. 2) を変化させて加工し,  $\theta$  の変化を調べた.

## 3. 実験結果

各パルスエネルギー  $E$  での  $z$  に対する  $\theta$  の変化を Fig. 3 に示す. 集光点は水面下 35mm の位置とした. 通常  $z$  が小さくなってフルエンスが増大すれば  $\theta$  は増大するはずだが,  $E$  が高いとその傾向が現れず,  $\theta$  が一定となるようになった. さらに  $z$  が小さくなると  $\theta$  は急激に減少した. これは集光してフルエンスが増大すると, 途中で水に吸収されるエネルギーも増加し, 板表面でのフルエンスが見かけよりも低下するため, さらに集光点付近ではエネルギーのほとんどが水に吸収されてしまったためと考えられる. また総じて曲げ効率の良い  $z=6$ mm では  $E$  を増大させても  $\theta$  は飽和する傾向であった.

次に  $E=30$ mJ で比較的  $\theta$  の差が小さい  $z=6, 8, 10$ mm について水深  $D$  の影響を調べた. Fig. 4 に結果を示す.  $D$  が大きくなると, 光が水中を進む距離が延びて水に吸収されるため,  $\theta$  は緩やかに減少する. 一方,  $D$  が小さくなると  $\theta$  は急激に低下した.  $D$  が小さいと水面でプラズマが発生してエネルギーが低下し易いが, 走査中は水面での明確なプラズマの発生は確認できなかった. 一方で, レンズの裏に飛散した水滴が付着したり, 水面が波うつ現象が見られたことから, 水膜が薄くて衝撃波を十分抑え込めていなかったことや, 水面のうねりによる屈折や散乱が  $\theta$  の低下の原因と推定される.

謝辞: 本研究は総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです.



Fig. 1 Sample of bent aluminum sheet.

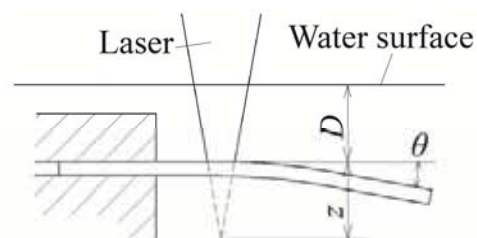


Fig. 2 Outline of experimental procedure.

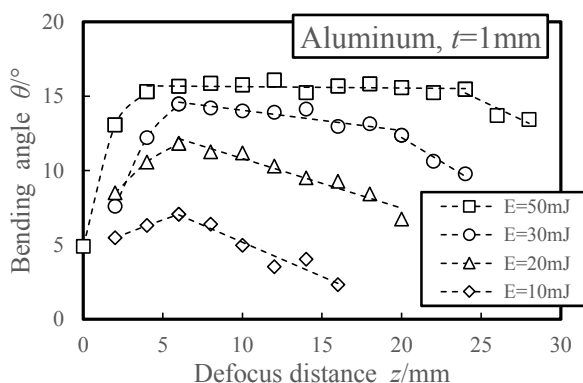


Fig. 3 Influences of defocus distance on bending angle.

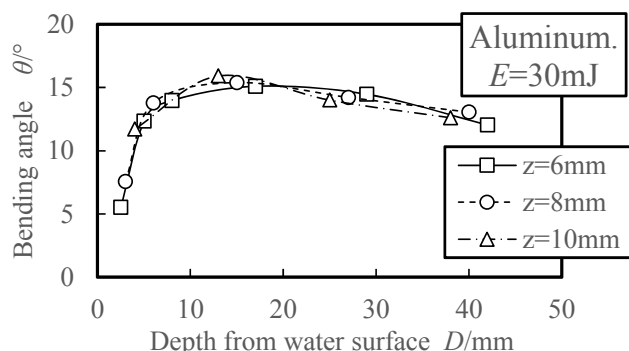


Fig. 4 Influences of water depth.

## 近・中赤外レーザーの波長に対する透明樹脂溶着の各種特性評価

Characteristic Evaluations of the Laser Welding of Transparent Resin on the Wavelength of the NIR and MIR laser.

真鍋武士<sup>A,B</sup>, 沖原伸一郎<sup>A</sup> (<sup>A</sup>光産業創成大学院大学, <sup>B</sup>株式会社レイコネクト)

Takeshi MANABE<sup>A,B</sup>, Shin-ichiro OKIHARA<sup>A</sup>

(The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, <sup>A</sup>Rayconnect Co.,Ltd. )

### 1. 緒 言

医療や美容産業などでは液体用透明樹脂容器において接着剤等を用いない溶着技術への要望が高い。樹脂接合においては従来から接着剤や超音波接合、熱溶着などが用いられているが、高い生産性の点からレーザーによる溶着技術が普及してきている。主流では、波長 808~940 nm の近赤外領域の半導体レーザー光源による透明樹脂と色付き樹脂の溶着法が用いられているが、透明樹脂同士のレーザー溶着も開発が進んでいるが、溶着表面の変形など様々な課題がある<sup>1-3)</sup>。我々は近赤外と中赤外領域間の光源が透明樹脂に対して比較的大きい吸収率があることに着目し、吸収材や中間材を用いないレーザー溶着手法について研究している。本報では、近・中赤外領域内の光源比較による溶着加工の評価結果について報告する。

### 2. 実験方法

近・中赤外領域内のレーザー光源として主に波長 1.47  $\mu\text{m}$  のファイバカップリング型半導体レーザー(Max 15 W)と波長 1.94  $\mu\text{m}$  のファイバレーザー(Max 200 W)を用いて溶着試験を行った。透明樹脂の標準ワークとして上板(厚さ 3 mm)と下板(厚さ 8 mm)の PET, PC, PMMA の 3 種類の板材を用いた。

評価試験光学系としてコリメートレンズと集光レンズによって構成し、波長 1.47  $\mu\text{m}$  半導体レーザー光学系では集光ビーム径計算値  $\phi 127 \mu\text{m}$ 、波長 1.94  $\mu\text{m}$  ファイバレーザー光学系では集光ビーム径計算値  $\phi 11 \mu\text{m}$  にレーザー光を集光させた。試験ワークである透明樹脂板は固定治具により 2 枚の板材を押しえつけるのみの機構とし、レーザー照射軸は固定としワークを XY 自動ステージで走査することにより溶着を行い、引張強度試験機を用いて引張破断強度を測定した。

### 3. 結果および考察

波長 1.47  $\mu\text{m}$  半導体レーザーではレーザーパワー 15 W によりワーク表面に対する焦点位置による溶着の引張強度試験、波長 1.94  $\mu\text{m}$  ファイバレーザーでは同様に焦点位置に対する溶着の引張強度試験とレーザーパワーに対する溶着の引張強度試験を行った。Fig.1 においてワーク PMMA と波長 1.47  $\mu\text{m}$  半導体レーザーによる焦点位置に対する引張強度試験結果を示す。この結果より焦点位置はワークの密着面より下方にあれば十分な密着強度が得られることがわかる。Fig.2 においてワーク PMMA と波長 1.94  $\mu\text{m}$  ファイバレーザーによるレーザーパワーに対する引張強度試験結果を示す。ここでワークの走査速度は 10 mm/sec と 25 mm/sec の 2 通りで行った。この結果よりレーザーパワーと引張破断強度には直線性が見られるが、レーザーパワーが強すぎるとワーク表面が大きく溶けて気泡が見られるようになる。

PMMA のレーザー光源の吸収率が波長 808~940 nm 半導体レーザーの%以下に対して、波長 1.47  $\mu\text{m}$  半導体レーザーでは 8% 程度、波長 1.94  $\mu\text{m}$  ファイバレーザーでは 40% 程度と比較的大きいため透明材同士でも十分にレーザー樹脂溶着が可能である。また、波長 1.47  $\mu\text{m}$  半導体レーザーにおける比較的低い吸収率から焦点位置に近い部分で溶着が行われるため厚みの大きい素材でも溶着が可能である。1.94  $\mu\text{m}$  ファイバレーザーでは吸収率が高いことにより高速な溶着が可能である。今後の課題としてはレーザー光が表面からの吸収が発生することと焦点位置の前後も樹脂の溶融が発生することで、ワーク表面の変形が起こることの抑制がある。

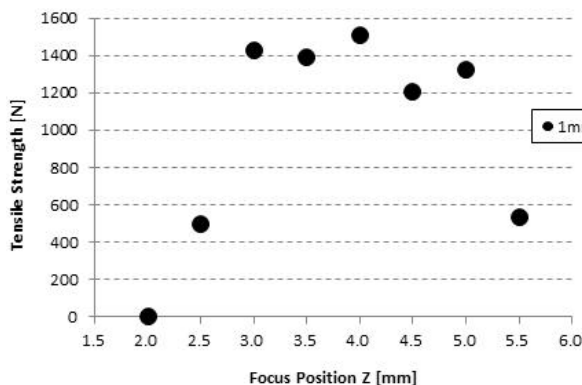


Fig.1 Tensile strength test (F.P.) on the 1.47  $\mu\text{m}$ -LD, PMMA.

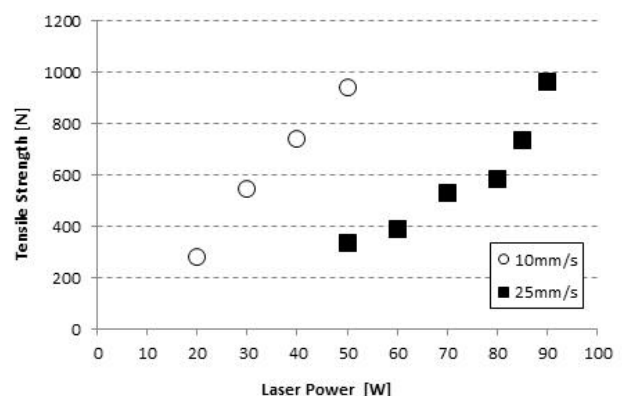


Fig.2 Tensile strength test (L.P.) on the 1.94  $\mu\text{m}$ -F.L., PMMA.

### 参 考 文 献

- (1) 松本聡, プラスチックエージ, 3 (2017).
- (2) 山本聡, レーザ協会誌, 44 (2015)2.
- (3) 山下清光, 岩崎清斗, 第 78 回レーザー加工学会講演会(2013), Dec, 13.

# Rheinberg 照明によるガラス内部構造変化の明視野像と暗視野像の同時取得

Simultaneous acquisition of bright-field and dark-field images of structural modifications in glass with Rheinberg illumination microscope

杉本 凌, 寺井 誠也, 小笠原 佑真, 本間 健太郎, 渡邊 歴 (立命館大学)

Ryo SUGIMOTO, Seiya TERAJ, Yuma OGAWARA, Kentaro HONMA, Wataru WATANABE (Ritsumeikan University)

## 1. 緒言

超短光パルスをガラス内部に集光すると、集光点近傍に構造変化を誘起することができる。構造変化の種類として屈折率変化、ボイド、散乱性ダメージなどがあり、レーザー因子、ガラスの種類、集光条件などにより構造変化の種類は異なる。このようなさまざまな種類の構造変化の可視化ならびに判別をするために、透過型光学顕微鏡、位相差顕微鏡、微分干渉コントラスト顕微鏡、暗視野顕微鏡などが用いられている。Rheinberg 照明顕微鏡は明視野照明と暗視野照明用の光源の照明パターンと色を変え、カラー撮像素子で撮影することにより、明視野像、暗視野像の同時取得が可能である<sup>1,4)</sup>。本発表では、LED アレイを用いた Rheinberg 照明により、ガラス内部に誘起された構造変化の明視野像、暗視野像の同時取得について報告する。

## 2. Rheinberg 照明顕微鏡

Rheinberg 照明顕微鏡では明視野照明の照明光と暗視野照明の照明光には異なる色を用いる<sup>1)</sup>。例えばフィルターの透過領域あるいは光源の点灯領域の中央部分を明視野照明に用い、輪帯部分を暗視野照明に用いる<sup>2,4)</sup>。2色の照明により、試料のコントラストの視覚的強調および明視野像と暗視野像の同時取得が可能である。

## 3. Rheinberg 照明顕微鏡によるガラス内部に誘起された構造変化の観察

加工用のレーザー光源にはチタンサファイアレーザー(中心波長: 800 nm, パルス幅: 100 fs, 繰り返し周波数: 1 kHz)を用いた。フェムト秒レーザーパルスを開口数 0.4 の対物レンズによりガラス内部(深さ 100  $\mu\text{m}$ )に集光し、試料を走査した<sup>3)</sup>。Rheinberg 照明顕微鏡を用いて構造変化を観察した。光源には LED アレイ(8 $\times$ 8 ドット)を用い、照明パターンと色を電気的に変更した。Fig. 1(a)に Rheinberg 照明の例を示す。中央部分の赤色 LED アレイによる照明が明視野照明となり周辺部分の緑色 LED アレイによる照明が暗視野照明となる。Fig. 1(b)にガラス内部に誘起した構造変化の Rheinberg 照明画像を示す。エネルギーは 18.4  $\mu\text{J/pulse}$  と 73.6  $\mu\text{J/pulse}$  である。Fig. 1(c), (d)に画像処理により赤色と緑色に色分解した結果を示す。この結果から Rheinberg 照明により LED アレイ中央の赤色部分は明視野、外周輪郭の緑色部分は暗視野として機能し、ガラス内部に誘起された構造変化の明視野像と暗視野像の同時取得が可能であることがわかる。

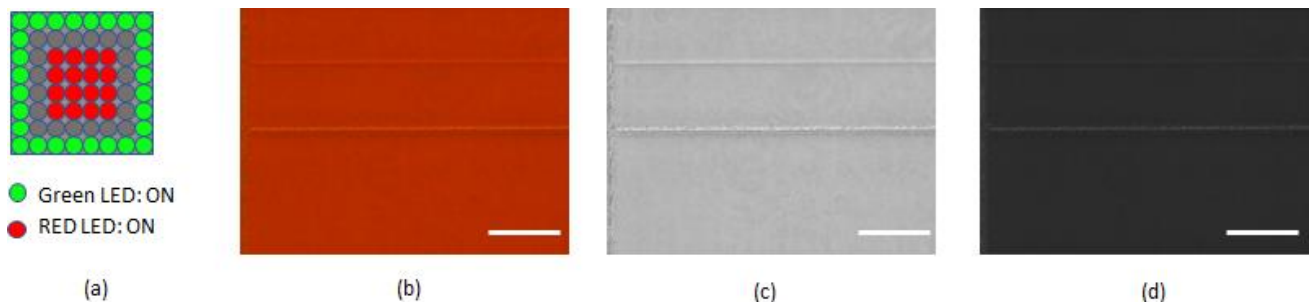


Fig. 1 (a) Schematic for LED array for Rheinberg illumination. A square of central 4 $\times$ 4 red LED arrays was illuminated for a bright-field image. Green LEDs at the edge of the array was illuminated for a dark-field image. (b) Rheinberg images. (c) A red channel image and (d) a green channel image after color splitting of the Rheinberg image by image processing. Scale bar: 100  $\mu\text{m}$ .

## 参考文献

- (1) M. W. Davidson and M. Abramowitz: Optical Microscopy, <https://doi.org/10.1002/0471443395.img074>.
- (2) E. C. Samson and C. M. Blanca: Dynamic contrast enhancement in widefield microscopy using projector-generated illumination patterns, *New. J. Phys.* **9** (2007) 363.
- (3) Y. Ogasawara, R. Sugimoto, R. Maruyama, H. Arimoto, Y. Tamada, and W. Watanabe: Mobile-phone-based Rheinberg microscope with a light-emitting diode array, *J. Biomed. Opt.* **24**(3) (2018) 031007.
- (4) D. Lee, S. Ryu, U. Kim, D. Jung, and C. Joo: Color-coded LED microscopy for multi-contrast and quantitative phase-gradient imaging, *Biomed. Opt. Express* **6**(12), 4922 (2015) 4912.
- (5) R. Yokoe and W. Watanabe: Multi-contrast imaging of femtosecond-laser-induced modifications in glass by variable illumination with a projector-based microscope, *Optik* **150** (2017) 48.

# レーザ焼結法による固体酸化物形燃料電池用セリア系電解質薄膜形成

Formation of Ceria-based Electrolyte Thin Films for Solid Oxide Fuel Cells Using Laser-sintering Method

石川悠太, 山崎和彦, 前川克廣 (茨城大学)

Yuta ISHIKAWA, Kazuhiko YAMASAKI, Katsuhiro MAEKAWA  
(College of Engineering, Ibaraki Univ.)

## 1. 緒論

日本国内における家庭用電力を作り出すため、火力発電所から年間約 45 億 t の二酸化炭素が排出されている。そこで、二酸化炭素排出量が少なく、電気エネルギーへの変換効率が高い燃料電池に注目が集まっている。燃料電池の中でも特に、小型でも高い変換効率を得られる固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の製造方法や評価方法に関する研究が行われている<sup>(1)</sup>。これまでに我々は、レーザ焼結法を用いた局所的な電極膜や電解質膜形成技術に取り組んできた。本研究では、緻密でクラックのない中低温動作向けセリア系電解質薄膜の形成に向け、電解質スラリーの塗布方法や、焼結用レーザ光と基板の吸収率などの影響について検討した。

## 2. 実験材料および方法

### 2.1 セリア系電解質スラリーの作製と塗布膜形成

セリア系電解質であるサマリアドープセリア粒子 (SDC, 平均粒子径 100 nm) とバインダであるエチルセルロース、有機溶媒のエタノールを混合してスラリーを作製した。基板には、電解質基板の 8 mol% イットリア安定化ジルコニア (8-YSZ, 吸収率 3.8% @ 1064 nm), および焼結性比較のためにブラックアルミナ基板 (吸収率 94.5% @ 1064 nm), 石英ガラスを使用した。作製した SDC スラリーを、スピコート法を用いて予備回転 500 rpm, 60 s (8-YSZ 基板), または 500 rpm, 120 s (ブラックアルミナ基板) から、本回転 1200 rpm, 60 s の条件でそれぞれの基板に塗布して仮乾燥を行った結果、それぞれ約 3.5  $\mu\text{m}$  (8-YSZ 基板), 約 18  $\mu\text{m}$  (ブラックアルミナ基板) の塗布膜が得られた。また、石英ガラス基板には膜厚 22  $\mu\text{m}$  のマスクによるスキージ法で塗布し、膜厚約 15  $\mu\text{m}$  の SDC 塗布膜が得られた。

### 2.2 レーザ焼結膜の形成および評価

焼結用レーザに、Nd:YAG レーザ (連続発振, 1064 nm), または短パルス Nd:YVO<sub>4</sub> レーザ (パルス幅 6~8 ns, 532 nm) を選択した。8-YSZ, ブラックアルミナ, 石英ガラス基板上のそれぞれの SDC 塗布膜に、大気中、走査速度 1 mm/s の条件で、Nd:YAG レーザ光を照射した。出力はブラックアルミナ基板の場合は 2.5~14.7 W, 石英ガラス基板では 24~29 W とした。また 8-YSZ 基板上の SDC 塗布膜に、Nd:YVO<sub>4</sub> レーザをデフォーカス +1 mm, 繰返し周波数 30 kHz, 出力 3.1 W と、繰返し周波数 40 kHz, 出力 2.0~22.7 W の条件で照射し、得られた焼結膜を比較した。

レーザ顕微鏡や走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて SDC 焼結膜の表面観察を行い、膜厚や焼結幅、クラックの有無などを評価した。SDC 焼結膜と基板との密着性は、綿棒による摩擦試験で評価した。

## 3. 結果と考察

図 1(a, b) に、石英ガラス基板上に形成した SDC 焼結膜の SEM 像を示す。膜表面には凹凸があり直径約 10  $\mu\text{m}$  のポイドが確認されるもののバルク膜である。膜厚はそれぞれ約 2.9  $\mu\text{m}$  (24.4 W), 約 1.1  $\mu\text{m}$  (29.3 W) で、ガラス基板との密着性も確認された。また出力 24.4 W で形成した SDC 焼結膜表面は繊維状の物質に覆われ、これは出力 29.3 W に増加した場合に観察されないことから、溶融後再凝固したバインダ材と推測される。

一方、8-YSZ 基板上の塗布膜に Nd:YAG レーザ光を照射すると塗布膜が飛散した。吸収率が高いブラックアルミナ基板では、出力 10.1 W で直径約 50  $\mu\text{m}$  の SDC の焼結粒の形成が確認されたが膜形成には至らず、出力 14.7 W 以上では基板が破損した。そこで 8-YSZ 基板上の SDC 塗布膜に高ピークパワーの短パルス Nd:YVO<sub>4</sub> レーザを集光照射したところ、基板と密着性のある SDC 焼結膜が形成された (図 1(c)~(e))。得られた膜厚は 1.1  $\mu\text{m}$ , 3.6  $\mu\text{m}$ , 3.4  $\mu\text{m}$  で、出力 3.1 W 以上で 8-YSZ 基板にクラックが発生した。Nd:YAG レーザ焼結膜と比較して低出力な焼結が可能となるが、焼結時のバインダ蒸発と体積減少によるクラック形成が顕著となった。

## 4. 結論

緻密でクラックのないセリア系電解質薄膜の形成に向けて検討し、石英ガラス基板上に塗布した SDC 塗布膜に Nd:YAG レーザ光を照射することで、ガラス基板と密着性のある膜厚 1.1  $\mu\text{m}$  を超える SDC 焼結膜の形成を確認した。一方 8-YSZ 基板においては、高ピークパワーの短パルスレーザ光の照射によって密着性のある膜厚 1  $\mu\text{m}$  を超える SDC 焼結膜が形成し、電解質基板への焼結膜形成のためのレーザ光源として活用できる。

## 参 考 文 献

- (1) たとえば, Fei Ye et al.: Spin-coating derived LSM-SDC films with uniform pore structure, *Thin Solid Films*, **516-6**, (2008), 5206-5209.

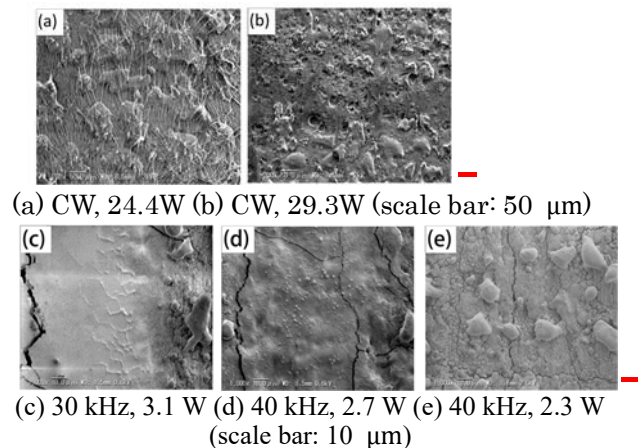


Fig. 1 SEM images of laser-sintered SDC films:  
(a, b) silica glass substrate and Nd:YAG laser irradiation  
(c-e) 8-YSZ substrate and Nd:YVO<sub>4</sub> laser irradiation

# リングビームレーザによるりん青銅端子への Sn 焼結膜形成技術

Technology for Forming Sn Sintered Films on Phosphor Bronze Terminal by Ring-beam Laser-irradiation

齋藤隆平, 御田護\*, 山崎和彦, 前川克廣\* (茨城大学, \*M&M 研究所)

Ryuhei SAITO, Mamoru MITA\*, Kazuhiko YAMASAKI, Katsuhiko MAEKAWA\*

(College of Engineering, Ibaraki Univ., \*M&M Research Laboratory)

## 1. 緒 言

電動化が進む自動車の内部には、電気接点用として多数の金属コネクタ端子が用いられている。金属コネクタ端子は、例えば直径  $\phi 1.0$  mm 程度の銅合金端子上に、厚さ 3~10  $\mu\text{m}$  の電気 Sn めっきを施すことで製造される。Sn は電気的特性やはんだ付け性などから端子用めっきとして有望であり、コスト面でも安価である。一方めっき代替技術として、金属ナノ粒子やマイクロ粒子ペースト塗布膜に、レーザ光を照射して金属焼結膜を形成するレーザ焼結法の研究が進んでいる。この手法は局所めっきが可能である上、ドライプロセスであるため低コスト化に優れる。またアキシコンレンズによりレーザ光を中空円状に整形したリングビームレーザを用いてガラスファイバーの側面など、平板以外の素材への焼結膜形成も可能となっている。そこで本研究では、リングビームレーザ焼結法を用いてりん青銅端子に純 Sn 焼結膜を形成する。得られた Sn 焼結膜の断面観察や EDX 元素分析により、Sn 焼結膜とりん青銅端子との密着性メカニズムの解明を行った。

## 2. 実験材料及び実験方法

### 2.1 Sn マイクロ粒子ペーストの作製

レーザ焼結用金属材料として粒径 2.5  $\mu\text{m}$  の Sn マイクロ粒子を選択した。Sn マイクロ粒子以外の材料を攪拌機で混合した後、窒素雰囲気中で Sn マイクロ粒子を添加して再度攪拌した。表 1 に Sn マイクロ粒子ペーストの組成を示す。

### 2.2 Sn 焼結膜の形成

脱脂処理および酸化膜を除去したりん青銅端子を、Sn マイクロ粒子ペーストに 10 s 間浸漬させて引上げ塗布し、仮乾燥後に厚さ約 10  $\mu\text{m}$  の塗布膜を得た。その後リングビームに整形した連続発振の Nd:YAG レーザ (波長 1064 nm, 出力 35~84 W, 焦点位置での光軸長さ約 2 mm) を、Ar 雰囲気中で Sn 塗布膜に照射した。このときリングビームを端子の根元側から先端方向に、走査速度 2 mm/s で走査しながら照射した。被めっき材には直径  $\phi 0.8$  mm, 長さ 40 mm のりん青銅端子 (C5191) を使用した。

### 2.3 焼結膜の評価

りん青銅端子に形成した Sn 焼結膜の表面を、アセトンに浸漬させた綿棒で拭きし摩擦試験を行った。また銅基板と Sn 焼結膜を形成したりん青銅端子を、はんだペーストで溶融接合した後、引張試験機で引張り、はんだ付け強度特性を評価した。さらに、Sn 焼結膜断面の SEM 観察と EDX 元素分析結果から Sn 焼結膜と端子との密着メカニズムを考察した。

## 3. 実験結果及び考察

仮乾燥後の Sn 塗布膜に、出力 35.0 W の低出力でレーザ照射した結果、Sn が溶融せず焼結膜は形成されなかった。次に、出力 52.6 W の中出力でビームを照射したところ、アセトンに浸漬させた綿棒による摩擦試験に耐える光沢のある Sn 焼結膜が形成された (図 1(a) 参照)。表面は Sn 焼結粒で覆われているが、端子露出部分が存在し焼結時の濡れ性が不十分であったと推測される (図 1(b) 参照)。さらに出力が 83.8 W と高出力になると、光沢がない灰黒色の Sn 焼結膜が形成された。これは Sn 焼結膜表面の酸化が原因と考えられる。

出力 52.6 W の照射で形成した Sn 焼結膜のはんだ付け性試験の結果、引張せん断強度は約 29.1 MPa となった。この値は、同時に測定した電気 Sn めっき膜の 32.0 MPa と比較してわずかに小さく、膜表面の不均一性の影響が考えられる。出力 83.8 W の場合の引張せん断強度は約 6.2 MPa となり、これは Sn 焼結膜の酸化や端子からの銅の拡散の影響が推測される。また、出力 52.6 W で得られた Sn 焼結膜の断面観察と EDX による元素マッピングから、Sn 焼結膜の膜厚は約 3.5  $\mu\text{m}$  であり、また Sn 層とりん青銅間に、Sn が 11.28 at%, Cu が 22.23 at% の層が確認された。この比率は  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ( $\eta$  層) や  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  ( $\epsilon$  層) と異なる<sup>(1)</sup>ため、これらの金属間化合物は形成されず、Sn 焼結膜とりん青銅端子の Sn-Cu 間の相互拡散層が形成されたと考えられる。この現象は、レーザ焼結時の Sn 焼結膜とりん青銅端子の密着性発現の要因と推測される。

## 4. 結 言

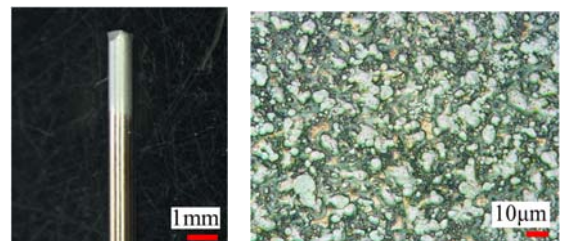
リングビームレーザ焼結法によったりん青銅端子へ Sn 焼結膜形成を行った結果、膜厚 3.5  $\mu\text{m}$  の密着性のある Sn 焼結膜が得られた。今後は、焼結時の濡れ性向上のために添加剤等のペースト組成の再検討によって焼結膜の均一化を図る。

## 参 考 文 献

- (1) Horváth. B., Illés. B., Shinohara. T; Growth of intermetallics between Sn/Ni/Cu, Sn/Ag/Cu and Sn/Cu layered structures, Thin Solid Films, **556**, (2014), 345-343.

Table 1 Composition of Sn microparticle paste

Chemicals	Amount [g]	Vol. ratio [%]
Tin microparticles, Sn	10.0	45.3
2-propanol	2.0	42.6
Decanol	0.6	12.0
Polyvinylpyrrolidone	0.01	0.13



(a) Appearance

(b) Micrograph

Fig. 1 Surface images of laser-sintered Sn films on terminal: laser power of 52.6 W and scan speed of 2 mm/s

# レーザー溶接におけるハブラニアンプロットと 重回帰分析を用いた溶込み深さの予測の比較

Prediction of Penetration Depth of Laser Welding by Hablani Plot and Multiple Regression Analysis  
 部谷 学, 舟山博人\*, 坪井昭彦\*, 田川正雄\*\* (大産大, \*光産創大, \*\*レーザーックス)  
 Manabu HEYA, Hiroto FUNAYAMA\*, Akihiko Tsuboi\*, and Masao TAGAWA\*\*  
 (Osaka Sangyo Univ., \*GPI, \*\*Laserx)

## 1. 緒 言

部谷らは、Hablani plot による溶込み深さの予測の精度について調べるために、レーザー発振器、スポット直径、溶接速度を変えた、ステンレス鋼 (SUS304) に対する約 1200 点の溶接結果を Hablani plot を用いて整理した<sup>(1)</sup>。その結果、Hablani plot では 3 次の多項式の近似曲線 (基準曲線とよぶ) で近似できること、その基準曲線を使って溶込み深さを予測できること、を明らかにした。本稿では、基準曲線を用いた溶込み深さの予測結果と従来使用されている重回帰分析を用いた予測結果を比較する。

## 2. 実験方法

次の 4 種類の CW 発振のレーザー発振器を用いた (4 機種の IPG 社製ファイバレーザー, 1 機種の Trumpf 社製ディスクレーザー, 4 機種の Trumpf 社製 YAG レーザ, 1 機種の Laserline 社製半導体レーザー)。溶接条件として、レーザー出力、溶接速度、集光レンズの焦点距離、スポット直径を変えてビードオンプレート溶接実験を行った。あるレーザージョブショップで受託加工の条件出しのために蓄積された、約 1200 点の溶接データを解析に用いた。なお、ステンレス鋼のレーザー溶接結果のみを解析に用いた。

## 3. 実験結果および考察

Fig. 1 に、本研究で取り扱う全溶接データを Hablani plot で整理した結果を示す。なお、図中の左上の傾き 1 の点線は、入射レーザーのエネルギーが全て金属に吸収され、熱伝導や熱輻射による熱的損失を無視した場合の Hablani plot である。+印のデータ点上にある実線は、3 次の多項式で近似した曲線 (Poly, 基準曲線) である。

Fig. 2 に、基準曲線からのずれをレーザー条件ごとに整理した結果を示す。たとえば、スポット直径 800  $\mu\text{m}$  の実験結果が基準曲線に対して上にあれば+, 下にあれば-として、それらの平均値を求めた。この場合、ほぼ 0 であったため、横軸と平行な黒い実線上の一番右側にプロットされている。スポット直径 400  $\mu\text{m}$  の結果は Laser parameters の数値が 0.5 (= 400/800) の箇所にプロットされている。

Fig. 2 より、スポット直径が変わったとしても、ずれ量はスポット直径に応じて変化せず、ほぼ 0 であることがわかった。これは、すべてのスポット直径のデータ点が、基準曲線上付近にあることを意味している。つまり、本実験の範囲内では、いずれのスポット直径に対しても基準曲線を使って溶込み深さを予測できる (レーザー出力、デリバリファイバのコア直径についても同様の結果を得た)。一方、溶接速度が 4.5 m/min 付近、焦点距離が 300 mm 付近でずれ量が最大となった。正のずれ量は熱伝導を抑えた溶接に近づいていることを意味している。また、溶込み深さが深くなると、ずれ量が大きく変化して負になり、熱伝導の効果が顕著となることが明らかとなった (同様の傾向がパワー密度についても観測された)。以上のように、溶込み深さが大きいデータ点は基準曲線の下に位置するため、より正確に溶込み深さを予測するには、浅い溶込み深さ (たとえば 4 mm 以下) と深い溶込み深さごとに基準曲線を求める必要があることがわかった。重回帰分析との比較については、ポスター発表に譲る。

## 参 考 文 献

- (1) 部谷学, 坪井昭彦, 社本英泰, 田川正雄: ステンレス鋼のレーザー溶接時の溶込み深さに対するハブラニアンプロットによる予測, レーザ加工学会誌, **21**, (2014), 21.

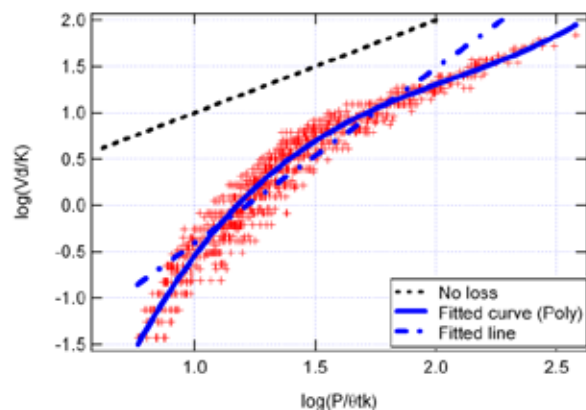


Fig. 1 Hablani plot results for all welding data

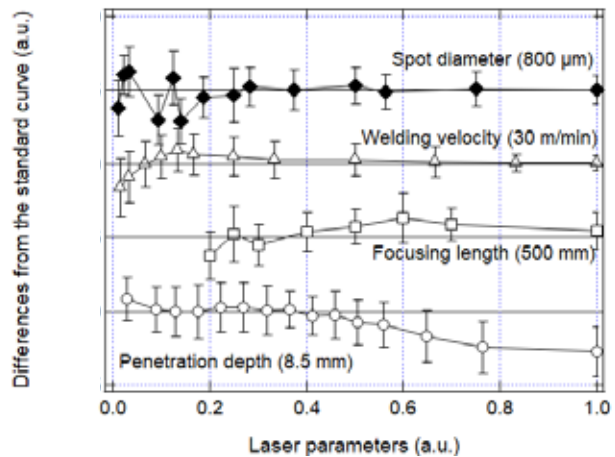


Fig. 2 Differences of each data point from standard curve as functions of laser parameters

# 純銅溶接における青色半導体レーザーインテンシティが溶込み深さに及ぼす影響

Thin pure copper plate welding with 100 W blue diode laser

森本健斗<sup>1, 2</sup>, 塚本雅裕<sup>3</sup>, 佐藤雄二<sup>3</sup>, 升野振一郎<sup>3</sup>, 阿部信行<sup>3</sup>, 林良彦<sup>2, 3</sup>, 安積一幸<sup>2, 3</sup>

(<sup>1</sup> 阪大院工, <sup>2</sup> 大阪富士工業, <sup>3</sup> 阪大接合研)

Kento MORIMOTO<sup>1, 2</sup>, Masahiro TSUKAMOTO<sup>3</sup>, Yuji SATO<sup>3</sup>, Shin-ichiro MASUNO<sup>3</sup>,

Nobuyuki ABE<sup>3</sup>, Yoshihiko HAYASHI,<sup>2, 3</sup> Kazuyuki AZUMI<sup>2, 3</sup>

(<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Osaka University<sup>2</sup>, Osaka Fuji Corporation,

<sup>3</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

## 1. 緒言

自動車のEV化に伴い、モーターやインバータ、リチウムイオン電池の需要が拡大している。その中でも純銅の高速、高効率で高品質なレーザー接合技術の開発が求められている。従来のファイバレーザー（波長：1.08 μm）を用いたレーザー溶接では、純銅の光吸収率は低く、スパッタやブローホールなど溶接欠陥が発生してしまい、これが溶接品質を下げる原因となっていた。そこで我々は、純銅に対する光吸収率が高い波長445 nmの青色半導体レーザーに着目した。本研究では、100 Wクラス青色半導体レーザーを用いて厚さ100 μmの純銅板にビードオンプレート溶接を行い、レーザー波長が溶接品質および溶融池形成に与える影響を明らかにした。

## 2. 実験方法

青色半導体レーザーを用いた溶接装置の実験概略図をFig. 1に示す。X-Yステージに厚さ100 μmの純銅を設置し、シールドガスを吹き付けながらレーザーを掃引照射した。シールドガスには、アルゴンガスを用い、流量15 L/minとした。レーザーは、波長445 nm、最大出力100 W、コア径100 μmの青色半導体レーザーを用い、集光ヘッドを用いて純銅表面でスポット径100 μmに調整した。溶融地の挙動は、レーザーと同期させたハイスピードビデオカメラで観察した。レーザー照射後の試料は、レーザー照射方向に対して垂直に切断し、溶接ビードの観察および溶込み深さを測定した。

## 3. 実験結果

青色半導体レーザーを用いて純銅薄板のビードオンプレート溶接をハイスピードビデオカメラで観察した結果、レーザー強度 $1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ では、いずれの掃引速度でもスパッタが発生しなかった。Fig.2に $1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、投入エネルギー $25 \text{ kJ/cm}^2$ での溶接ビードの断面観察結果を示す。内部にブローホール等の溶接欠陥は無く、熱伝導型の溶接ビードが得られた。さらにレーザーの投入エネルギーに依存して溶け込み深さが大きくなるのがわかった。

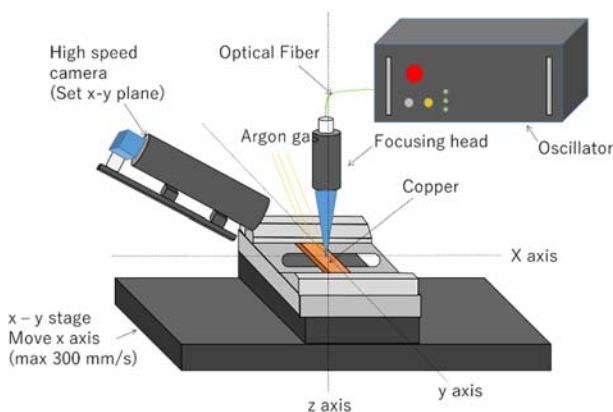


Fig. 1 溶接装置の実験概略図



Fig. 2  $1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  青色半導体レーザーを用いたときの溶接ビード断面

## 参考文献

- (1) Asano, K., Tsukamoto, M., Sechi, Y., Sato, Y., Masuno, S., Higashino, R., Hara, T., Sengoku, M., Yoshida, M., (2018) Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode lasers, Optics & Laser Technology, Volume 107, 291-296

## マルチレーザーコーティング法を用いた Co-Cr 合金の 3D 造形と金属組織評価

Experimental investigation on metallographic structure of Co-Cr alloy layer formed with blue diode laser induced multi laser coating system

平田侑希, 塚本雅裕<sup>A</sup>, 原隆裕<sup>B</sup>, 佐藤雄二<sup>A</sup>, 吉田実, 舟田義則<sup>C</sup>, 阿部信行<sup>A</sup>(近大理工,<sup>A</sup> 阪大接合研,<sup>B</sup> 阪大院工,<sup>C</sup> 石川県工業試験場)Yuki Hirata,<sup>A</sup> Masahiro Tsukamoto,<sup>B</sup> Takahiro Hara,<sup>A</sup> Yuji Sato, Minoru Yoshida,<sup>C</sup> Yoshinori Funada,<sup>A</sup> Nobuyuki Abe  
(Sch. of Sci. and Eng., Kindai Univ.,<sup>A</sup> JWRI, Osaka Univ.,<sup>B</sup> Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ.,<sup>C</sup> IRII.)

## 1. 緒 言

Co-Cr 合金であるステライト No.6 は Co を 64%, Cr を 28%, W を 4% 有する材料であり, 耐熱性, 耐摩耗性, 耐食性に優れている。高温でも高硬度を保持できるため, 耐熱機械材料部品のコーティング材として応用されている。一般的なステライト No.6 の皮膜形成技術としては, 溶射法やプラズマ粉末肉盛溶接法などが用いられている。これらの方法は皮膜形成効率が高いため, 広範囲に均一な肉盛ができる。利点がある一方で 皮膜の密着強度が低く, 皮膜中に空孔が形成されてしまう課題を抱えている。そこで, 我々はレーザーによるコーティング技術に着目した。レーザーは集光性, 操作性に優れ, 容易に入熱量を制御することができるため, 密着強度が高く, 緻密な皮膜形成が可能となる。しかし, 従来のレーザー波長が近赤外線領域のレーザーを用いたレーザーコーティングにおいては, 皮膜形成過程における熱歪みを小さくすることが課題であった。そこで本研究では, ステライト No.6 の光吸収率が近赤外線領域より高い, 波長 445 nm の青色半導体レーザーを用いた。今回は, マルチレーザーコーティング技術を用いて低歪みなステライト No.6 皮膜の形成を試み, 形成した皮膜の機械的特性とレーザーの投入エネルギーの相関を明らかにした。

## 2. 実験方法

青色半導体レーザーを用いたステライト No.6 のコーティング実験の概略図を Fig. 1 に示す。6 本の青色半導体レーザーを光ファイバにより加工ヘッドに伝送し, 屈折光学系を用いて加工点で重畳させた。加工ヘッド中心に配置した粉末供給ノズルから平均粒径 30  $\mu\text{m}$  のステライト No.6 粉末を基板に対して面直に供給し, 同時にレーザーを照射する。ここで, レーザーは 1 モジュール当たり最大出力 20 W, 集光点  $\phi 400 \mu\text{m}$  で, 加工点で最高出力 100 W に達する。本実験では低歪みかつ造形効率の良い条件を明らかにするため, 粉末の供給量と入熱量をパラメータに造形を行った。コーティングした試料は, 掃引方向に対して垂直に切断し, 断面観察の結果から皮膜形成重量を求め, レーザーの掃引速度に対するコーティング効率を算出した。

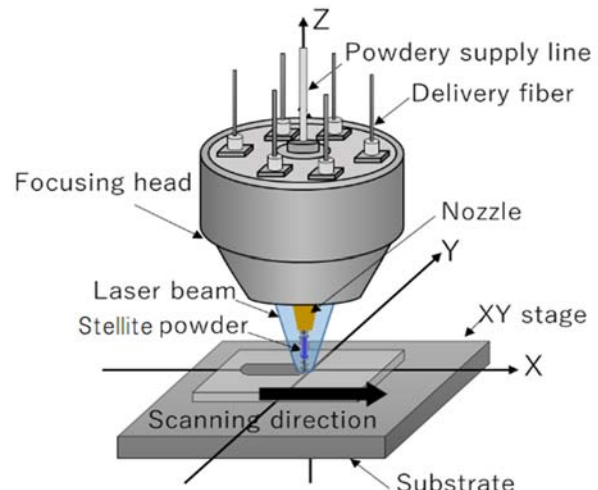


Fig 1. Laser coating system with blue diode laser

## 3. 結 言

Fig.2 に SUS304 基板上にステライト No.6 皮膜を形成した場合のレーザー掃引速度と皮膜重量の関係を示す。粉末供給量 23 mg/s において皮膜重量はほぼ一定であったが, 粉末供給量 57~109 mg/s においては, 皮膜重量が掃引速度に依存して減少していくことがわかった。出力 70 W, 掃引速度 5.0 mm/s, 粉末供給量 109 mg/s のとき, 皮膜重量 3.4 mg と最大となった。当日は硬度と膜厚の相関や資料の歪み量の測定の結果について併せて報告する。

## 4. 参考文献

1) K, ASANO. and M, TSUKAMOTO. et al. : Copper layer formation produced with 100W blue direct diode laser system, Proc. of ICALEO'16, (2016), Paper #P110.

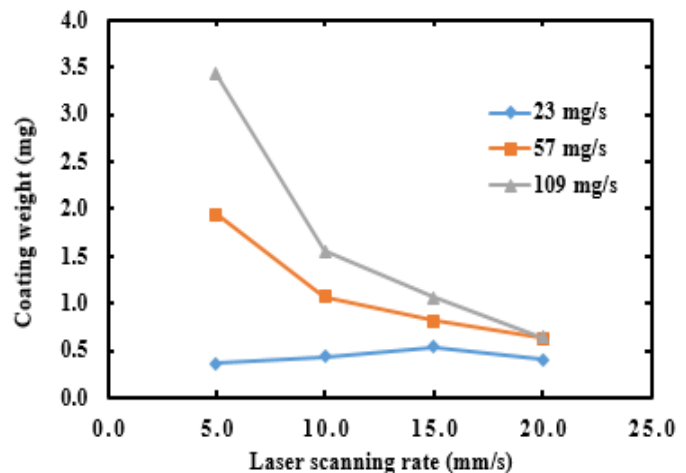


Fig 2. Coating weight dependent on laser scanning rate

# ポスター展示

平成30年12月10日

国立研究開発法人産業技術総合研究所  
臨海副都心センター別館 11F

# レーザービーム プロファイラ



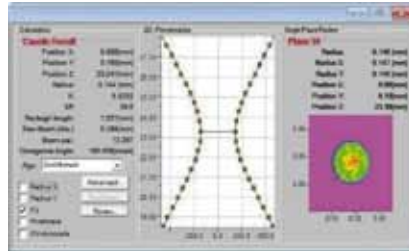
独国PRIMES社のビームプロファイラはレーザー溶接、切断、表面改質などの加工に使用する高出力レーザー用の計測器です。独自の計測手法により従来の計測器と比較して高精度に且つ高い再現性でビームプロファイル計測を行うことができます。

## ●ビームプロファイル計測

ビームプロファイラはレーザーの強度分布計測を行う装置です。レーザー加工の品質に大きく影響を与えるレーザービームの各種パラメータを計測します。モデルにより最大50kWまでのパワーレンジ、最小20μmまでの集光ビーム径に対応しています。専用ソフトウェアの使用により計測作業の自動化を可能にします。

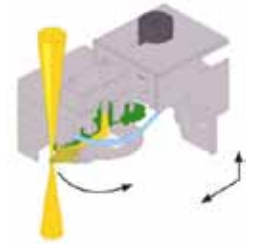
## ●主な測定パラメータ

- ・ビーム強度分布
- ・集光位置
- ・集光ビーム径
- ・発散角
- ・ビーム対称性
- ・パワー密度
- ・M2 / BPP
- ・平行ビーム径



## ●オプトメカニカルスキャン解析システム

約20μmのピンホールを持つ特殊な測定チップでビームをスキャンします。測定チップの微小径ピンホールでビームをサンプリングしてディテクタに誘導します。測定チップの高速回転により、高パワー密度の解析が可能になります。※計測手法はモデルにより異なります。



## ●専用ソフトによるデータ分析・機能制御

LaserDiagnosticsSoftware(LDS)により優れた解析機能を提供します。PCからの操作により全自動もしくはセミオートの計測制御が可能です。



## FocusMonitor (FM+)



高出力レーザープロファイル計測の業界標準！

パワーレンジ	30W~50kW
波長	0.4~12μm
ビームサイズ	150~3,000μm
測定時間	3秒、30秒(解像度による)
Z軸計測距離	120mm
計測手法	オプトメカニカルスキャン

FocusMonitor FM+は集光ビームの計測を行う装置です。オプトメカニカルスキャン解析システムにより、集光ビームのサイズやプロファイルだけでなく、集光過程・デフォーカス過程におけるプロファイル計測を行い、最大4レイリー長までのCausticの自動測定も可能にします。

最大50kWまでの高出力レーザーを減衰なしで計測が可能です。レーザー溶接、切断、表面加工などのアプリケーションに使用される連続発振レーザーの解析に最適です。



異なるZ位置でのフォールスカラー表示

## BeamMonitor (BM)

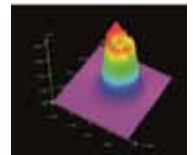


高出力、大口径ビームのプロファイル計測

パワーレンジ	50W~25kW
波長	1.06μm、10.6μm
ビームサイズ	5~70mm
ビーム発散角	<100mrad
測定時間	2秒~連続
計測手法	オプトメカニカルスキャン

BeamMonitorは高出力レーザー用コリメートビームのプロファイル計測装置です。ビームプロファイルだけでなく、ポジション、ビーム径、対称性の測定も行います。

最大25kWの高出力レーザーの計測が可能で、レーザー溶接、切断、表面加工などのアプリケーションに使用される連続発振レーザーの解析に最適です。ラインスキャン、近赤外波長レンジ測定用などのラインナップを揃えています。



パワー密度分布測定

## MicroSpotMonitor (MSM)

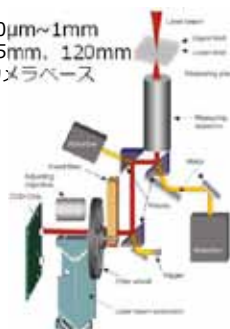


FM+では計測できない小さなスポット計測に

パワーレンジ	1mW~200W
波長	257~272、340~360、515~545、1030~1090nm
ビームサイズ	20μm~1mm
Z軸計測距離	35mm、120mm
計測方式	カメラベース

MicroSpotMonitorはカメラベース測定により、微細加工用レーザーの集光ビーム計測に最適な装置です。最小20μmのスポットビーム計測を行い、集光ビームのプロファイルや集光径の計測ができ、レーザー微細加工の最適化に役立ちます。

基本波(1μm)の他、2倍波(532nm)、3倍波(355nm)、4倍波(266nm)の波長に対応し、最大200Wまでのレーザー光測定が可能です。



カメラベース測定システム

## HighPower-MSM-HighBrilliance (HP-MSM-HB)

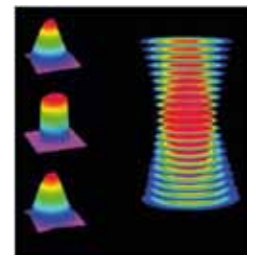


超高出力シングルモードレーザーのCaustic計測

パワーレンジ	10W~10kW
波長	1025~1080nm
ビームサイズ	20μm~1mm
Z軸計測距離	120mm
計測方式	カメラベース

HighPower-MSM-HighBrillianceは高出力・微細加工用レーザーの集光ビーム計測に最適な装置です。

最小20μmのスポットビーム計測を行い、集光ビームのプロファイルや集光径の計測ができ、レーザー微細加工の最適化に役立ちます。また最大10 kWパワーの高輝度シングルモードレーザーの焦点形状を測定することができます。



4kWファイバーレーザーのパワー密度分布

販売元：株式会社プロフィット  
〒330-0061 埼玉県さいたま市浦和区常盤3-1-13 KSビル浦和橋 4階  
TEL 048-826-7770 FAX 048-826-7771  
E-mail sales@profitet.com  
URL <http://www.profitet.com>



本カタログの仕様は予告なしに変更されることがあります。あらかじめご理解とご了承をお願い申し上げます。

# ワイヤレス レーザーパワーメーター BLUシリーズ

- ・ 表示器不要でケーブルがありません
- ・ 最大通信距離30m
- ・ スマートホンアプリ等で測定値を読取後、測定データを保存・転送
- ・ 長持ちバッテリー & USBで充電



# M2測定器 Beamage-M2

- ・ 測定時間は1分以内
- ・ 光軸はステアリングミラー2枚での簡単調整
- ・ NDフィルター3枚の組み合わせにより入力光量を調節可能
- ・ 測定結果はISO 11146及び13694に準拠
- ・ 対応波長範囲 350-1100nm



デモ等ご希望をお聞かせください。

当社はレーザー計測器の  
専門メーカーです。

- ・ レーザーパワーメーター
- ・ レーザーエネルギーメーター
- ・ ビームプロファイル測定器
- ・ THzパワーメーター
- ・ 特注カロリメーター 等

**Gentec-EO Japan合同会社**

〒114-0023 東京都北区滝野川1-1-1-101

TEL : 03-5972-1290

Email : [websalesjapan@gentec-eo.com](mailto:websalesjapan@gentec-eo.com)

# BLUE IMPACT™

Fiber-coupled blue direct diode laser

## ファイバ結合型高輝度 青色ダイレクトダイオードレーザ

100 Wタイプ



青色波長  
450 nm

Cu

Au

高反射材料加工に  
最適なレーザ光源

高輝度

ファイバコア径  
100 μm

高出力

100 W超

### アプリケーション例

#### APPLICATION

- 3Dプリンタ、コーティング、溶接

### ドライバ

#### DRIVER

- 光出力 (LD電流) 調整機能
- デジタル変調対応 (~10 kHz)
- LD部温度モニタリング可能



本製品は、NEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の研究成果に基づくものです。

株式会社 島津製作所 デバイス部 〒101-8448 東京都千代田区神田錦町1丁目3番

TEL : (03) 3219-5797 FAX : (03) 3219-5567 E-mail : sensor@group.shimadzu.co.jp URL : <https://www.shimadzu.co.jp/opt/>

最新情報はWebにてご確認ください。

# レーザー加工をダイレクトLDでスマートに

電化製品のように手軽なLD発振器でレーザー加工を。  
ダイレクトLD加工は、経済性、メンテナンス性、  
高信頼性でレーザー加工の可能性をひろげます。

高出力DDL発振器ならではのビーム整形性を生かした、  
“トリプルスポット技術/スポット・イン・スポット技術”による  
レーザー加工品質の向上をご提案します。



**高出力青色半導体レーザー**  
(キロワットクラス開発中・市場投入2019年)



## LDFシリーズ

○最大出力25kW ○ビーム4分岐 ○容易なビーム整形 ○他多数オプション

最大出力 (W)	7,000	8,000	15,000	20,000	25,000
ビーム品質 (mm mrad)	30	40	60	100	200
ファイバーコア径 (um)	600 NA0.1	400 NA0.2	600 NA0.2	1,000 NA0.2	2,000 NA0.2
最小スポット (@f=150mm, um)	450	600	900	1,500	3,000
波長範囲 (nm)	900-1,080				



## LDMシリーズ

○最大出力6kW ○19インチラックの超小型DDL

最大出力 (W)	1,000	2,500	3,500	5,000	6,000
ビーム品質 (mm mrad)	20	30	40	60	100
ファイバーコア径 (um)	400 NA0.1	600 NA0.1	400 NA0.2	600 NA0.2	1,000 NA0.2
最小スポット (@f=150mm, um)	300	450	600	900	1,500
波長範囲 (nm)	900-1,080				
寸法 (L×W×H)	636×483 (19") ×222 (5U) /672×483 (19") ×312 (7U)				

## LDFコンバーターシリーズ

○高輝度光 ○最大出力6kW (高出力化は応相談) ○リモート溶接他

## ハイブリッドDDLシリーズ

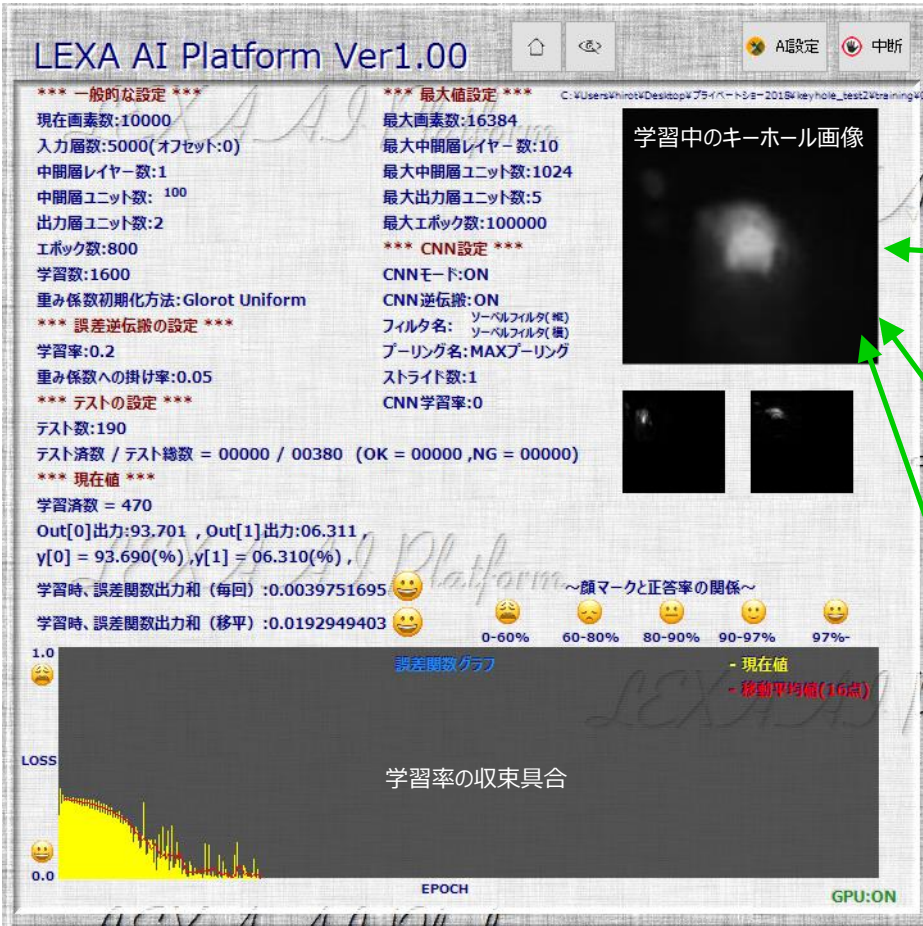
○高輝度光とDDLを1台に集約 ○最大出力4kW/12kW  
○同時照射によるハイブリッド溶接他

レーザーライン株式会社

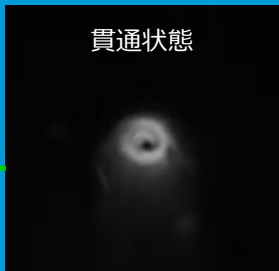
〒141-0031 東京都品川区西五反田7-25-5 西五反田7丁目ビル1階

Tel: 03-6417-4822 Fax: 03-6368-6185

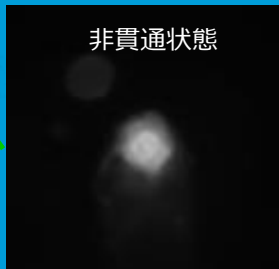
Email: info-japan@laserline.com URL: http://www.laserline.jp




溶接状態毎のキーホール画像



学習



学習



学習

# キーホール×ディープラーニング 溶接品質の AI 判定

## レーザー溶接の AI 学習

レーザー溶接中のキーホール画像を AI が学習し、溶接品質を合否判定するシステムを開発いたしました。

既存の AI プラットフォームを利用すると、学習・判定結果にブラックボックス化された領域が残ります。弊社では AI アルゴリズムをフルスクラッチで 1 から全て開発いたしました。ブラックボックス領域を無くし、判定の根拠など任意の内部状態を出力することができます。

取得した学習結果パラメータは弊社モニタリングソフト“LEXA VIEW”との連携で直ぐにインプロセス制御に使用でき、PID 制御によるレーザー出力のリアルタイムフィードバック制御が可能です。



- ・AI アルゴリズムの短縮・高速化により、インプロセスでの AI による合否判定・レーザー制御が可能。

- ・GUI による直観的な操作・設定。学習中の学習率の収束具合もリアルタイムにグラフで表示します。

前田工業株式会社



476-0002

愛知県東海市名和町

四ノ下 22 番地

TEL:(052)604-8650

FAX:(052)601-6353

URL:<http://www.maeda-kogyo.co.jp/>

# ポータブル型X線残留応力測定装置

**NEW** <sup>micro</sup> **μ-X360s**

誰でも  
使える!



**輸送用機器部品、**  
(自動車・鉄道・航空宇宙)  
**機械部品、金属材料**

**その課題!**  
**残留応力で解決できるかも!**



**溶接・加工の応力確認**

**熱処理・表面改質の効果確認**

**材料開発**

**工程管理・品質保証**

## 簡単操作、高速測定!

- ◎試料のセットが簡単
- ◎1回の計測時間:約60秒(フェライト系)
- ◎電源投入から2分で計測開始

### お預り計測、機器レンタルサービスも承っております!

**お預り計測**

測定物を弊社にお送りいただき、弊社の技術者が計測いたします。

**レンタルサービス**

装置一式を必要期間お貸出しします。計測点数の制約なく、存分に計測いただけます。

■仕様

測定項目	①残留応力②半価幅 ③残留オーステナイト(オプション)
計測方法	単一入射法(cosa法)
コリメータ径	標準:φ1.0mm(照射面φ約2mm)
X線管冷却方法	空冷
電源	AC100~240V,50/60Hz,130W

**PULSTEC** **パルステック工業株式会社**  
Create New Value

〒431-1304 静岡県浜松市北区細江町中川7000-35

お問い合わせは



営業部までお願いします。053-522-3611



FAX 053-522-5622



パルステック 検索 <http://www.pulstec.co.jp>



E-mail [sales@pulstec.co.jp](mailto:sales@pulstec.co.jp)

# 三菱パウダDED方式3次元金属積層造形機 LAMDA

常識を超えた高能率・高精度積層で製造方法を革新する

## エントリーモデル LAMDA200

積層ヘッドのみ搭載したコンパクトな機械構成で、ラピッドプロトタイピング・ニヤネット製造を実現します。



## Feature

独自のパウダDEDヘッドで高速造形



- 金属粉末の集積性を高めたノズル形状
- レーザフォーカスの最適化  
で高速高品位造形を実現しました

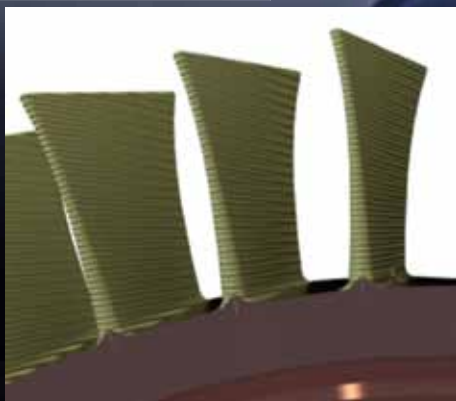
良好な接近性、清掃性を持つ広い室内  
DEDによる新しい造形技術の開発へ



- 積層ヘッドのみを搭載したコンパクトな機械構成
- 切削加工を後付けオプションとして準備

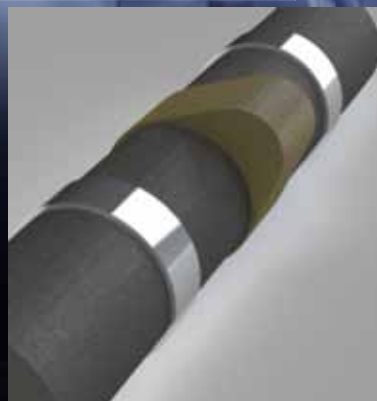
# Application

## タービン翼の造形



- タービン翼を直接造形することで、
- 材料のムダが少ないニヤネット造形
  - 結合部不要で軽量化

## 耐摩耗材料の肉盛り



- 必要箇所のみ特殊材料を肉盛りすることで、
- 高額材料のムダが少ない
  - 部品寿命アップ
  - 部品点数低減・軽量化

# Specifications

	形式	LAMDA200	LAMDA500	LAMDA2000
最大造形サイズ	mm	200×200×200	500×500×500	2500×1400×1500
積層ヘッド仕様				
レーザ出力	kW	1・2・4・6		
粉末供給ポット数		1 (オプションで最大2ポットまで対応)		
不活性ガスシールド		対応		
主軸仕様		NA		対応可能
NC2 軸テーブル			対応可能	
治具冷却			対応可能	

当社が参画する TRAFAM<sup>※</sup>では、世界最高水準の次世代型産業用3Dプリンタの開発を進めています。

※：TRAFAM：技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 (Technology Research Association for Future Additive Manufacturing) の略称です。



本製品は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の成果を活用しています。



お問い合わせ先



カスタマーサポート・営業本部 営業戦略業務部 微細加工システムグループ  
〒520-3080 滋賀県栗東市六地藏 130 TEL. 077-501-3822 FAX. 077-554-3193



# AAMS

Aichi's Additive Manufacturing Solutions

愛知産業の AM ソリューションは、  
不可能を可能に、さらに新しい価値を加えます



## 英国LPWテクノロジー社

SLM(セレクトティブ・レーザ・メルティング)、LMD(レーザ・メタル・デポジション)、EBM(電子ビーム・メルティング)用に開発されたメタルパウダーを、世界の有力金属3Dプリンター用に最適化し供給しています。それぞれ要望される厳しい条件に合わせて社内で調合し、徹底した品質管理を経て出荷しています。アルミ、コバルト、銅、ニッケル、チタン、タングステンカーバイト、モリブデン、Fe系など幅広い合金を取り扱っています。AS9120, AS9100 認証取得企業です。



## LPWテクノロジー社の先進的なパウダーマネジメントのノウハウ

**PowderSolve** : パウダーの化学組成、サイズ、形状、密度、流動性など固有情報を統合して管理するデータ管理システム。

**PowderWare** : 製造からユーザでの造形までの品質管理ウェア。パウダーの輸送中の品質管理とモニタリングシステム[**PowderTrace**]や、ユーザで造形前にパウダーの流動性などを検査するキット**PowderFlow**を提供。

**PowderLab** : パウダーの検査ラボ。最新の検査機器を用い化学・物性検査や認証試験を行います。

**PowderHub** : 経験ある技術者が、技術的課題にお応えする技術サポートハブ。

**PowderLife** : パウダーのライフサイクル全体の品質管理システム。パウダーを再利用する場合でも安心です。

## ● ドイツ SLMソリューションズ社

パウダーベッドフュージョン方式 金属3Dプリンター  
精密、高速で試作から量産まで幅広く対応、航空宇宙分野・自動車製造で実績



## ● オーストリア フローニアス社

CMT方式 高速・高品質溶接機  
アーク溶接による金属造形が可能、高速で低コスト



## ● 米国 サイアキー社

電子ビーム・ワイヤ添加方式  
航空宇宙分野で実績、高出力の電子ビームと溶接ワイヤにより、高速で大型部品の積層が可能



いつでも、世界の先端技術  
**AS** 愛知産業株式会社

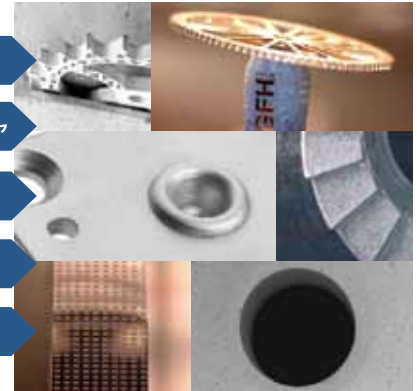


**世界最高レベルの高品質  
微細レーザー加工ソリューション**

**非熱加工  
バリや熱歪を低減**

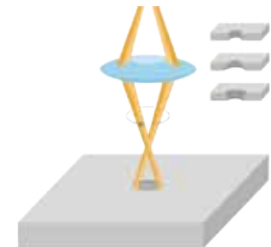


- 孔あけ
- マイクロストラクチャ
- 切断
- 切削
- 深掘り



世界最高レベル  
高品質を支える技術

- ・フェムト秒超短パルス・5軸制御加工
- ・固定工学系・スキャニング光学系
- ・高速トレパリング



超高速ビームローテーションでビームを制御

**時代の流れをリードする加工技術を追求め、  
最適な工法提案から生産システムまでをトータルサポート**

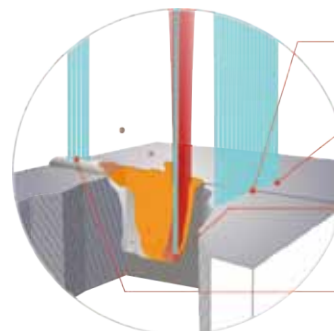
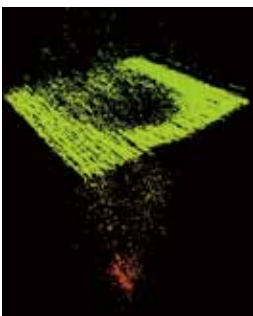


**キーホール深さ  
リアルタイムモニタリングシステム**

**品質管理  
レーザー溶接**

外乱光に強い  
モニタリング+3D計測

- ・外乱光に強いリアルタイムモニタリング(インライン)
- ・3D測定で測定位置の特定が容易
- ・内部欠陥の改善、溶け込み安定化など 溶接品質・品質管理の向上



溶接中のキーホール周辺

- シームポジション
- ワーク表面までの距離
- キーホール深さ
- ビード高さ



本社ショールーム 〒460-8338 愛知県名古屋市中区古渡町9番27号 TEL 052-323-2211  
 技術センターショールーム 〒481-0038 愛知県北名古屋市徳重御宮前1 TEL 0568-21-1465  
 東京・横浜・四日市・福井・浜松・京都・大阪・広島・北九州・北米・中国・タイ・インドネシア・メキシコ  
 URL : <http://www.nadex.co.jp/> E-mail : [info@nadex.co.jp](mailto:info@nadex.co.jp)

第 90 回レーザー加工学会講演会

開催日：平成 30 年 12 月 10 日，11 日

場 所：産業技術総合研究所 臨海副都心センター

第 90 回講演会実行委員会

- ・委員長 江畑恵司
- ・副委員長 大家利彦，塚本雅裕
- ・委員 石出孝，岡本康寛，木谷靖，佐藤正健，田中健一郎，  
長谷川智士，牧野吉延，三瓶和久，溝尻瑞枝，  
森清和，渡邊歴

第 90 回レーザー加工学会講演論文集

ISBN: 978-4-947684-91-2

平成 30 年 12 月発行

発行所 一般社団法人レーザー加工学会

編集代表者 石出孝

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1

大阪大学接合科学研究所気付

(06) 6879-8642

印刷所 大和写真工業株式会社

〒560-0043 大阪府豊中市三和町 4-3-1

(06) 6331-1807

---

本講演論文集に記載されているすべての記事内容は、  
レーザー加工学会の許可なく転載・複写することはできません。

---