

レーザーの多重反射と蒸発を考慮した レーザー穴あけ加工の熱流体解析

—第2報, レーザの多重反射と材料の蒸発を考慮したレーザー穴あけシミュレーション—

野口 暁* 大村 悦二* 平田 好則*

Thermohydrodynamics Analysis of Laser Drilling Considering Multiple Reflection of Laser and Evaporation
—2nd Report, Laser Drilling Simulation Considering Multiple Reflection of Laser and Evaporation—

NOGUCHI Satoru, OHMURA Etsuji and HIRATA Yoshinori

*大阪大学大学院 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
noguchi@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

(原稿受付 2006年12月13日)

In this paper, laser drilling was analyzed by considering multiple reflections and evaporation of material. In the keyhole formation process, the variation of the hole shape and the variation of the absorption of the laser power distribution in the wall were examined. The flow velocity distribution of the molten metal was also examined. Moreover, the effect of material on the hole shape was examined. The main results obtained are as follows: (1) At the stage where the depth of the hole is comparatively shallow, the power at the bottom of hole increases by the effect of multiple reflection. (2) When the hole becomes deep, the effect of multiple reflections becomes remarkable and the absorption factor increases. The absorptance increases due to multiple reflections to a value of about 0.75. (3) When the hole becomes deep, the flow field shows circulation of molten metal that rises near the walls of the keyhole and by surface tension, moves away from the keyhole at the surface, forming an eddy. (4) Because the thermal diffusivity of aluminum is larger than iron, the energy lost by thermal diffusivity increases, and the energy used to evaporate decreases. Moreover, the melting point of aluminum is lower than that of iron. Therefore, in case of aluminum, the molten pool broadens and the hole becomes narrow.

Key words: laser drilling, free surface, multiple reflection, evaporation, absorptance

1. 緒 言

高エネルギー密度でレーザー穴あけを行うと、母材溶融部にはキーホールが形成される。キーホールが形成されることでアスペクト比の大きな穴あけができる一方、ポロシティなどの欠陥の原因ともなる。そこで、レーザー穴あけ時のキーホール挙動を知ることが重要となる。実験的には、キーホール挙動および溶融金属の流れを、X線を用いて観察する研究^{1,2)}が見られるが、キーホールは材料内部で生じるため、キーホール観察は一般に難しい。そのため、キーホール挙動を理解し、加工穴形状を予測する有効な手段としてコンピュータシミュレーションがある。

これまでのレーザー溶接シミュレーションでは、キーホール壁面を固定した熱伝導計算^{3,4)}や、円柱のキーホールを仮定した熱流体計算⁵⁾などが行われている。しかし、キーホール形成時には、レーザーの多重反射、蒸発、蒸発反跳力による液面形状の変化、溶融金属の流れなどが生じる。自由表面でのレーザーの多重反射を考慮した溶接シミュレーションもあるが⁶⁾、多重反射の計算手法についてはまったく示されていない。そこで本研究は、レーザーの多重反射、材料の蒸発、蒸発反跳力を考慮して、レーザー穴あけにおける金属の溶融・蒸発現象を非定常で熱流体解析することを目的とした。

前報⁷⁾では、レーザー穴あけシミュレーションで不可欠であるレーザーの多重反射について、VOF法で表現された穴形状に対してレーザーの多重反射を光線追跡し、壁面のパワー分布を求める計算方法を述べた。

本報では、まず、金属のレーザー穴あけについて、レーザーの多重反射、蒸発反跳力、蒸発による質量の損失、自由表面の変化を考慮した解析モデルを構築し、支配方程式について述べる。構築したモデルに基づいた熱流体解析を行い、キーホール形成過程における穴壁面の吸収レーザーパワー分布の変化、溶融金属の流速分布の変化、材料の違いによる加工穴形状の違いなどを検討する。

2. 解析方法

2.1 熱流体の支配方程式

溶融金属は非圧縮性のニュートン流体と仮定する。支配方程式は、連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

ナビエーストークス方程式

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

エネルギー方程式

$$\rho \left[\frac{\partial H}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) H \right] = \nabla \cdot \left(\frac{K}{C_p} \nabla H \right) + w \quad (3)$$

の三式である。ここで、 \mathbf{v} は流速ベクトル、 p は圧力、 \mathbf{F} は体積力ベクトル、 ρ は密度、 μ は粘性率、 K は熱伝導率、 C_p は定圧比熱、 H はエンタルピー、 w は内部発熱である。内部発熱は前報⁷⁾で報告した光線追跡を用いたレーザの多重反射によって計算できる。

2.2 自由表面の計算法

2.2.1 VOF法と移流計算法

本研究では、表面形状の表現方法として、VOF法⁸⁾を採用している。VOF法は、空間を離散化したときに得られる領域 V の流体体積比率 F を用いて自由表面の形状を表現する手法である。定義から $0 \leq F \leq 1$ であり、ここでは $F=0.5$ の位置を界面とみなす。

各要素における物性値 ϕ は F を用いて次式のように表せると仮定する。

$$\phi = \phi_l F + \phi_g (1-F) \quad (4)$$

ここで、 ϕ_l は流体の物性値、 ϕ_g は気体の物性値である。本シミュレーションでは、気体を空気とした。

自由表面流れによる流体体積比率 F の移流方程式は、次式で表すことができる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (F\mathbf{v}) = 0 \quad (5)$$

移流量の計算にはMARS法⁹⁾を用いた。

2.2.2 表面張力の取り扱い

自由表面を有する流体を取り扱うには、表面張力を考慮する必要がある。表面を境界とする従来の方法では、境界条件の与え方や境界値の計算方法など、取り扱いが複雑になり、数値計算上負担となる。そこで、表面力である表面張力を体積力に換算し、ナビエーストークス方程式に組み込むCSF法¹⁰⁾を用いる。界面の法線ベクトル $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ と体積力ベクトル $\mathbf{F}_{sv}(\mathbf{x})$ は次式で表される。

$$\mathbf{n}(\mathbf{x}) = \frac{\nabla \rho(\mathbf{x})}{|\rho|} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{sv}(\mathbf{x}) = \sigma \kappa(\mathbf{x}) \mathbf{n}(\mathbf{x}) \frac{\rho(\mathbf{x})}{|\rho|} \quad (7)$$

ここで、 σ は表面張力係数、 κ は界面の曲率、 $|\rho| = \rho_l - \rho_g$ 、 $\langle \rho \rangle = (\rho_l + \rho_g)/2$ である。

2.3 蒸発モデルと蒸発反跳力

蒸発開始後、表面領域 S に多重反射で吸収されたレーザエネルギーは、材料内部への熱伝導と蒸発の二通りに使われる。微小時間 Δt 間の材料の蒸発質量 m_v は、次式で与えられる。

$$m_v = \frac{\int_t^{t+\Delta t} Q dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{S_m} \left[\frac{K}{C_p} \frac{\partial H}{\partial n} \right]_{S_m} dS dt}{L_v} \quad (8)$$

ここで、 Q は多重反射計算によって表面領域 S に与えられた吸収レーザパワー、 L_v は蒸発潜熱、 S_m は沸点に到達した領域の材料内部の境界面である。蒸発によって生じる蒸発反跳力 p_r は、クヌーセン層終端の気体の流速 v_T と単位

時間、単位面積当たりの蒸発質量 \dot{m}_v の積で表せる¹¹⁾。

$$p_r = \dot{m}_v v_T = \frac{m_v}{S \Delta t} v_T \quad (9)$$

$$v_T = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT_s}{\pi m_a}} \quad (10)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T_s は材料表面の温度、 m_a は原子1個の質量である。

蒸発反跳力も、2.2.2項で用いたCSF法によって体積力に変換してナビエーストークス方程式に組み込む。体積力ベクトル $\mathbf{F}_{pv}(\mathbf{x})$ は次式で表される。

$$\mathbf{F}_{pv}(\mathbf{x}) = p_r \mathbf{n}(\mathbf{x}) \frac{\rho(\mathbf{x})}{|\rho|} \quad (11)$$

2.4 計算アルゴリズム

流速、圧力の計算アルゴリズムには、速度修正法であるSMAC法¹²⁾を用いる。ナビエーストークス方程式(2)において、時間ステップを n 、時間分割幅を Δt とし、

$$\frac{\mathbf{v}^{n+1} - \mathbf{v}^n}{\Delta t} + (\mathbf{v}^n \cdot \nabla) \mathbf{v}^n = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v}^n + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}^n \quad (12)$$

で離散化する。式(12)の右辺には未知数 p^{n+1} が含まれているので、

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}^n - \left[(\mathbf{v}^n \cdot \nabla) \mathbf{v}^n - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v}^n - \frac{1}{\rho} \mathbf{F}^n \right] \Delta t \quad (13)$$

により、次の時刻の流速予測値 $\tilde{\mathbf{v}}$ を求める。

真の流速 \mathbf{v}^{n+1} を次式のように、流速の予測値 $\tilde{\mathbf{v}}$ と速度の補正量 $\delta \mathbf{v}$ の和として表す。

$$\mathbf{v}^{n+1} = \tilde{\mathbf{v}} + \delta \mathbf{v} \quad (14)$$

一方、式(12)、式(13)から、

$$\frac{\delta \mathbf{v}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \quad (15)$$

なる関係式が得られる。式(15)の両辺の発散をとった式と式(1)から、圧力 p^{n+1} に関するポアソン方程式

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \right) = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}} \quad (16)$$

が得られる。式(16)を解くことで圧力 p^{n+1} が求められることができ、式(14)、式(15)から得られる

$$\mathbf{v}^{n+1} = \tilde{\mathbf{v}} - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla p^{n+1} \quad (17)$$

で流速を補正することができる。

次に、本シミュレーションの計算フローチャートをFig.1に示す。まず、表面の法線ベクトルを式(6)から計算する。得られた法線ベクトルを用いて、表面張力や蒸発反跳力を換算した体積力 \mathbf{F}_{sv} 、 \mathbf{F}_{pv} をナビエーストークスの式へ代入し、SMAC法を用いて流速場 \mathbf{v}^{n+1} と圧力場 p^{n+1} を計算する。得られた流速場を用いて、式(5)の移流方程式によって、各要素の新しい F 値を計算する。

その後、新しい表面でレーザ光線の多重反射を光線追跡によって計算し、表面における吸収レーザパワー分布を計算する。得られたレーザパワー分布を用いて、エネルギー方程式を解き、材料のエンタルピー H を計算する。沸点を超えている要素があれば、式(8)で蒸発質量を計算し、式(9)から蒸発による蒸発反跳力 p_r を計算する。

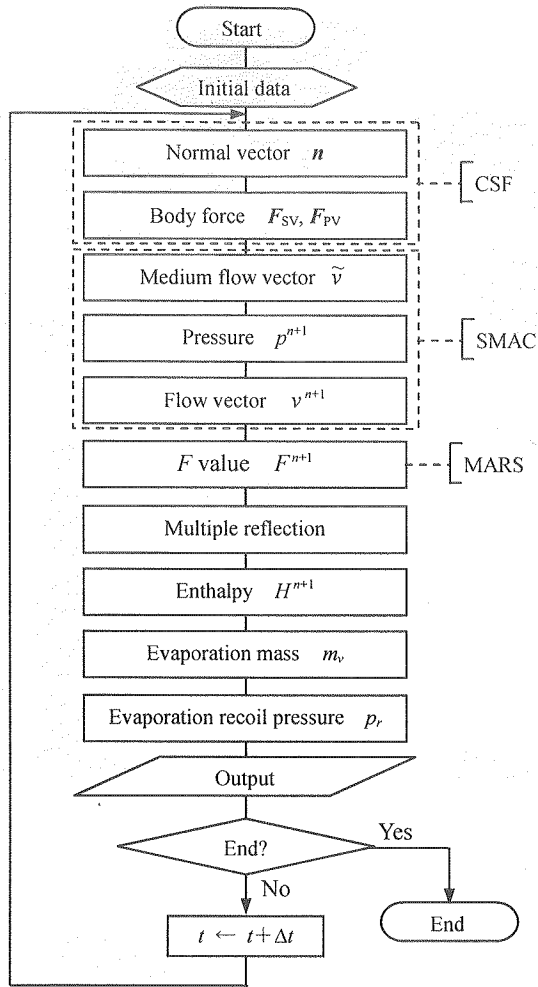


Fig. 1 Flowchart of laser drilling simulation considering multiple reflection

計算ステップを進めるときは、表面の法線ベクトル計算に戻る。

3. 解析結果

3.1 解析条件

数値計算には、有限要素法を用いた。解析領域は、 $141 \mu\text{m} \times 141 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$ で、 $z=0$ を初期表面として、正側に $30 \mu\text{m}$ 、負側に $105 \mu\text{m}$ とした。レーザの中心軸は z 軸と一致

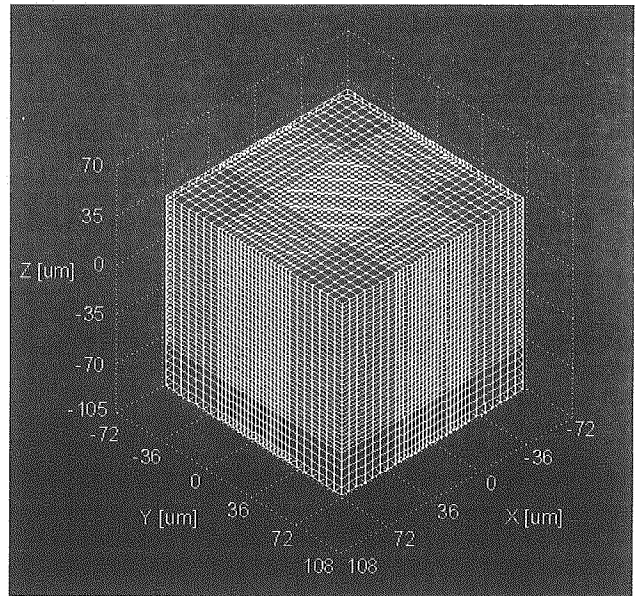


Fig. 2 Finite element meshes using hexahedron elements

するようにとった。解析領域は、六面体一次要素を用いて $33 \times 33 \times 40$ に分割した。解析領域を要素分割した図を Fig. 2 に示す。負側に配置された材料は純鉄であるとし、その物性値¹³⁾を Table 1 に示す。境界条件は、解析領域の周囲を流速 0 で断熱とした。また、 $F \geq 0.5$ で、融点より低い節点の流速を 0 とした。

照射するレーザは、Nd:YAG レーザやファイバーレーザのような波長 $1 \mu\text{m}$ 程度のレーザを想定した。この波長であれば、前報⁷⁾で報告したように、プラズマの影響を無視することができる。レーザ強度はガウシアン分布で平行ビームとし、初期表面に垂直にビームを照射した。 $1/e^2$ 半径は $20 \mu\text{m}$ 、レーザパワーは 250 W とした。反射率は、波長 $1 \mu\text{m}$ に対する鉄の反射率である 0.65 を用いた¹⁴⁻¹⁶⁾。総レーザパワーの 97% が含まれる半径 $26.5 \mu\text{m}$ の領域を含む $26.5 \mu\text{m} \times 26.5 \mu\text{m}$ の領域のビームを 210×210 の光線の束に分割して、それぞれの光線にガウシアン分布の強度を考慮してパワーを与えた。半径 $26.5 \mu\text{m}$ の外部に位置する光線のパワーは中央部のパワーと比較して十分に小さいため 0 とした。照射時間は $25 \mu\text{s}$ とした。

Table 1 Thermal and Physical properties of pure Fe

Property	Value
Melting point [K]	1809
Boiling point [K]	3160
Density [kg/m^3]	7870
Specific heat [J/kg]	460
Thermal conductivity [W/m K]	$83.5 - 4.57 \times 10^{-2} T (293 \leq T \leq 1273)$, $29.7 (1273 < T)$
Latent heat of melting [J/kg]	2.47×10^5
Latent heat of evaporation [J/kg]	6.29×10^6
Viscosity [$\text{N s}/\text{m}^2$]	$3.7 \times 10^{-3} \exp(4.14 \times 10^4 / 8.3144T)$
Surface tension coefficient [N/m]	$1.872 - 4.9 \times 10^{-2} (T - 1536)$

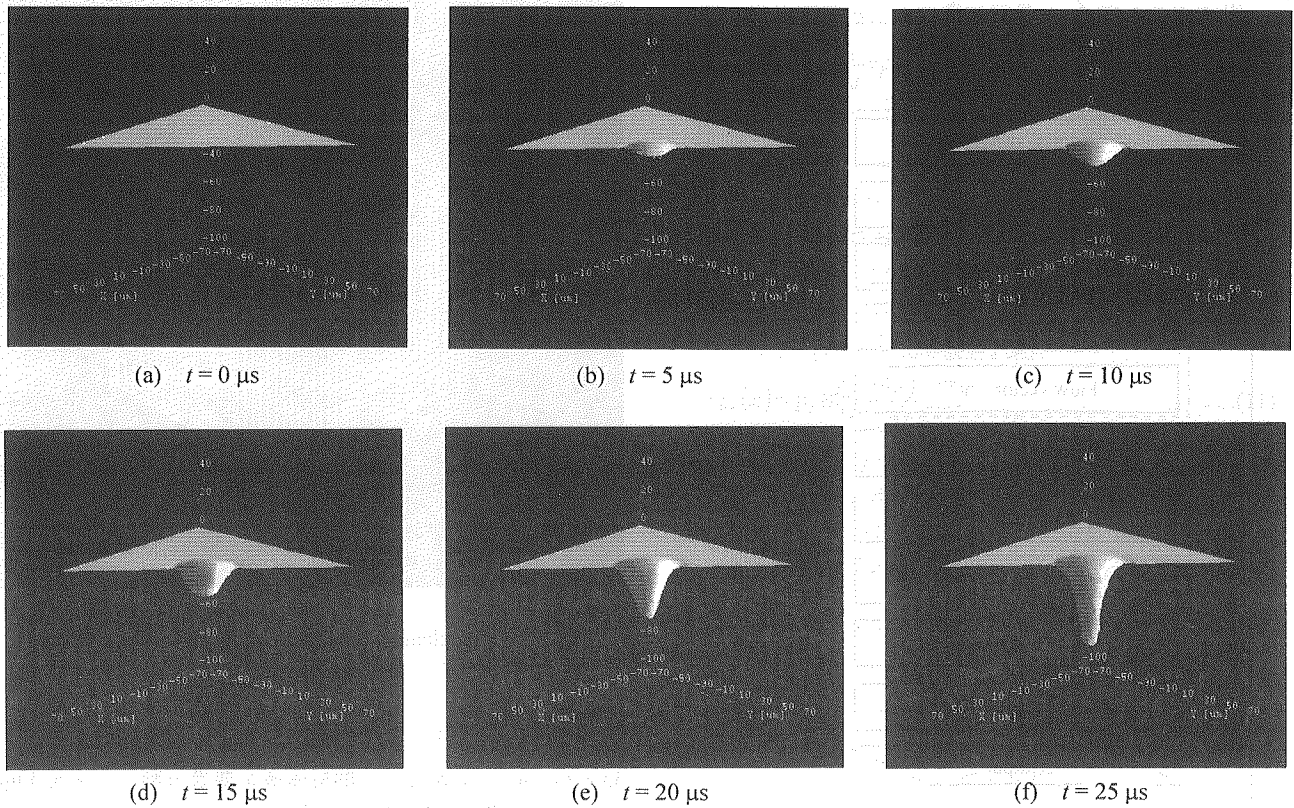


Fig. 3 Surface variation in laser drilling (laser power: 250W, $1/e^2$ radius: 20 μm)

3.2 加工穴の形成過程

レーザ照射中の表面形状の変化を Fig. 3 に示す. 照射開始後約 1 μs で表面がくぼみ始め, 時刻 5 μs では Fig. 3(b) に示すように, 表面に大きなくぼみが形成される. その後, 時刻 10 μs , 15 μs では穴深さが増すとともに, くぼみ自体が大きくなる(Fig. 3(c), (d)).

時刻 20 μs では, くぼみの中央部が下がり始め, キーホールの形成が始まる(Fig. 3(e)). その後, 時刻 25 μs では, Fig. 3(f)に示すようなキーホールが成長し, 約 60 μm のキーホールが形成されている.

3.3 壁面の吸収パワー分布の変化

Fig. 4 に光線の一部を取り出した図と xz 断面での穴壁面の吸収レーザパワー分布の結果を示す. 時刻 5 μs では, Fig. 4(b)左図に示すように, 穴深さが非常に浅いためレーザの反射回数は一回だけである. そのため, Fig. 4(a), Fig. 4(b)では吸収レーザパワーの最大値が同じである.

時刻 10 μs では, 二度の反射が起こっているものの, 吸収レーザパワーの最大値は変化していない(Fig. 4(c)左図). 穴の深さが浅いため, 光線は一回目の反射後, 反対側の穴壁面で反射した後, 穴外部へ出ていくためである.

しかし時刻 15 μs では, Fig. 4(d)に示すように, 穴底部の吸収レーザパワーの最大値は増加している. 穴壁面の勾配が大きくなり, 多重反射によって光線が穴底部に向かって進むためである.

時刻 20 μs では, 多重反射による穴底部のパワーの増加

が顕著に見られる (Fig. 4(e)). 時刻 25 μs では, Fig. 4(f)に示すように, 穴がさらに深くなり, 穴底部に到達するまでに反射回数が増加する. そのため, Fig. 4(e)と比較すると吸収レーザパワーの最大値が減少しているものの, Fig. 4(a)と比較すると, 約 4.4 倍になっている.

Fig. 5 に, 本シミュレーションにおけるレーザ照射時間と穴深さの関係を示す. 約 15 μs までは穴あけ速度は約 1.3 m/s であるが, 15 μs を超えると約 3.8 m/s に加速している. 15 μs は, 前述したように, 多重反射によって穴底部の吸収レーザパワーが増加し始める時刻である.

以上のことより, 穴の深さが比較的浅い段階でも, 多重反射の効果によって穴底部のパワーが増加する. このことが, 浅い穴をキーホールに成長させる要因になると考えられる. ただし, 穴が深くなるにつれて多重反射が顕著になり過ぎると, 穴底部のレーザパワーが減少して, キーホール成長速度が低下すると予想される.

3.4 穴深さと吸収率の関係

レーザ穴あけにおける穴深さとレーザの吸収率の変化について検討する. ここで, 吸収率 ε は,

$$\varepsilon = \frac{\text{材料に吸収されたレーザパワー}}{\text{入射レーザパワー}} \quad (18)$$

で定義した. 穴深さと吸収率 ε の関係を Fig. 6 に示す. Fig. 6 から穴深さが約 10 μm を超えると吸収率が増加し始め, その後急激に増加する. 穴深さが比較的浅い段階から多重反射の効果があることがわかる. しかし, 穴深さが 20 μm

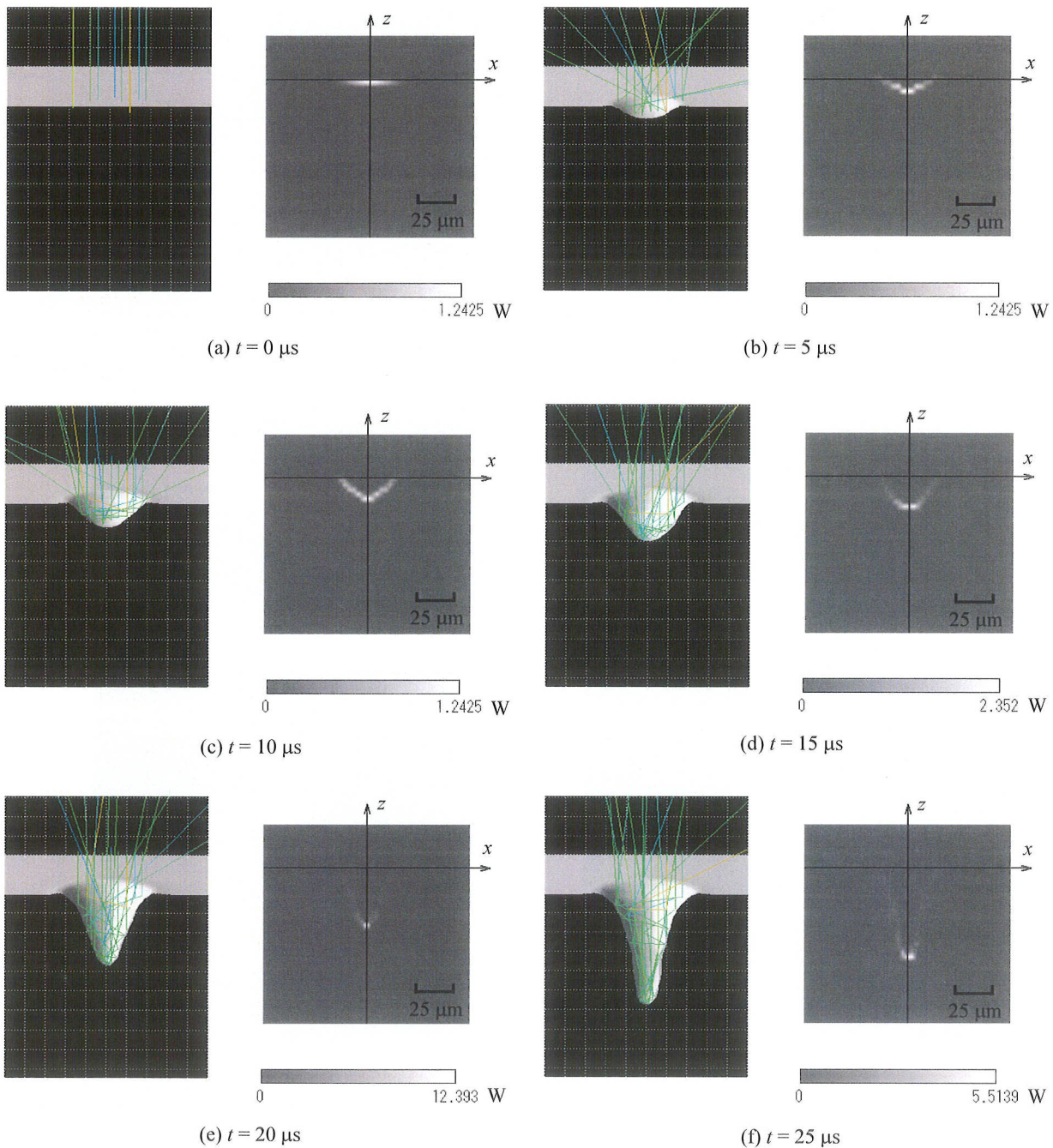


Fig.4 Relationship between hole shape and laser power distribution

を超えると吸収率の増加が緩やかになり、レーザの照射が終了する時刻 25 μs で穴深さが約 58 μm に達し、吸収率は約 0.75 まで上昇する。このことは、キーホールが長くなれば、多重反射が顕著になりレーザパワーの吸収効率が良くなることを示している。

3.5 加工穴の形成過程における流速分布の変化

時刻 5, 15, 20, 25 μs の xz 断面における表面形状と流速ベクトルについて俯角約 6 度から見た図をそれぞれ Fig. 7(a), (b), (c), (d) に示す。

時刻 5 μs では、蒸発反跳力によって表面が押し下げられて間もないため、穴中央部で表面を押し下げる流れが発生

しているものの、流速は約 0.04 m/s と大きくない (Fig. 7(a))。時刻 15 μs の段階では、Fig. 7(b) に示すように、Fig. 7(a) と比較して、穴中央部で表面を押し下げる流れは、蒸発反跳力によって約 0.33 m/s に加速されている。

ところが時刻 20 μs では、Fig. 7(c) に示すように、熔融池上部で表面から内部へ向かう渦が発生している。熔融金属の表面へ向かう流れは、表面張力により、熔融池内部へ向かう流れとなり、渦が形成されると考えられる。

時刻 25 μs では、渦流れはさらに顕著になっている (Fig. 7(d))。この渦流れによって熔融池形状がネイルヘッド型になると推定される。

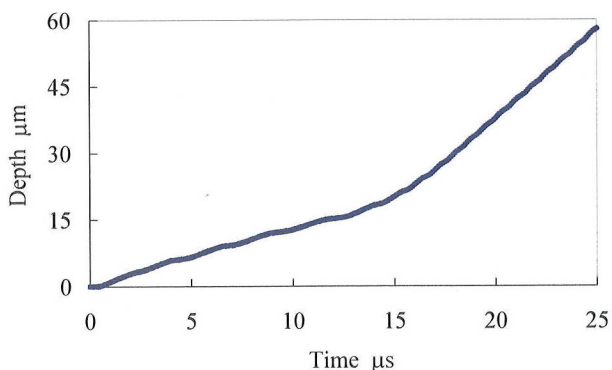


Fig. 5 Time variation of keyhole depth

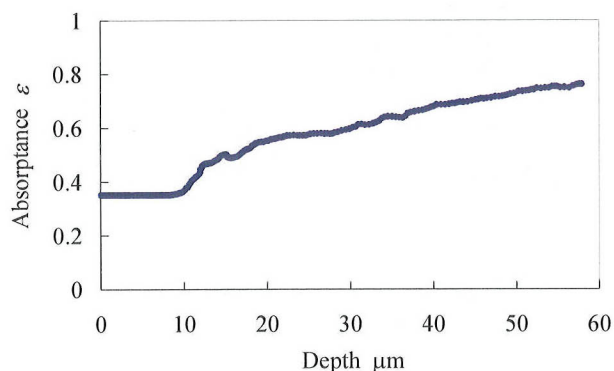


Fig. 6 Relationship between absorbance and keyhole depth

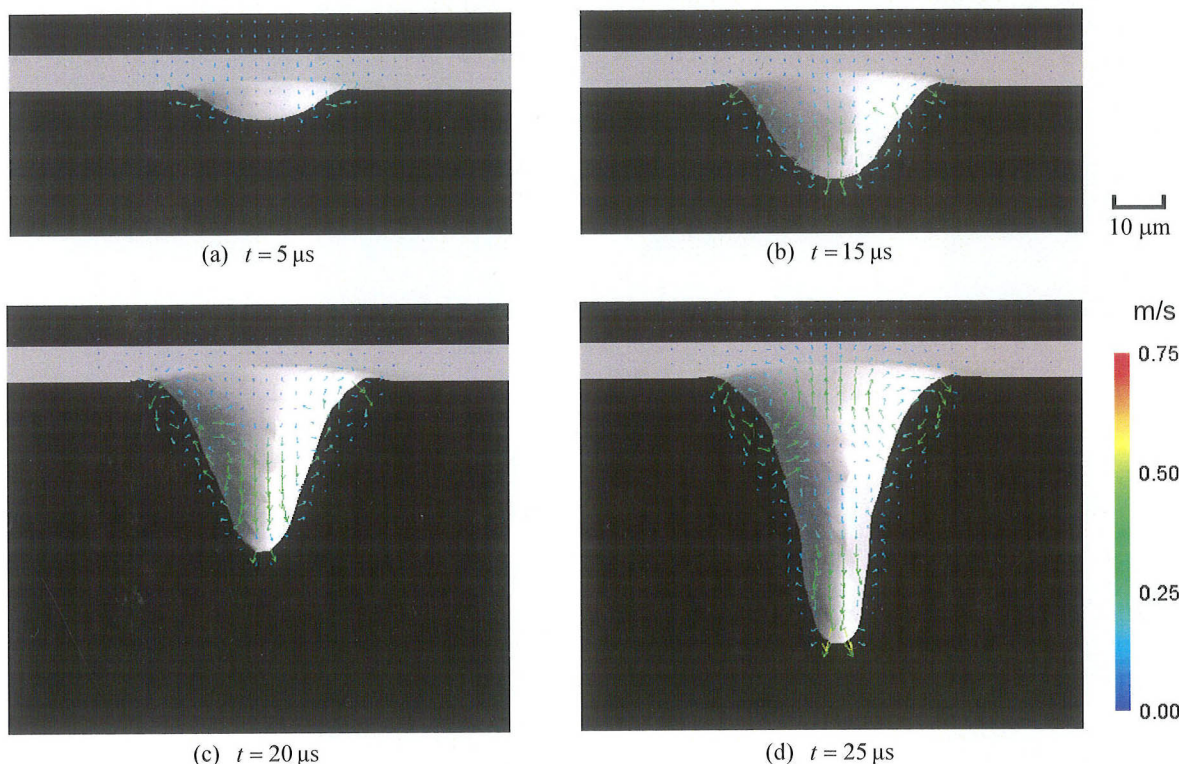


Fig. 7 Velocity vectors and hole shape during laser irradiation (material: iron, laser power: 250W, $1/e^2$ radius: 20 μm)

3.6 材料による穴形状の違い

材料による穴形状の違いを検討するために、材料をアルミニウムに変えて解析を行った。照射するレーザーは、鉄のシミュレーションの場合と同じで、波長 1 μm 程度のレーザーを想定した。波長 1 μm に対するアルミニウムの反射率は約 0.93 である¹⁴⁻¹⁶⁾。ここでは、材料の物性値の違いによる穴形状の違いに注目するために、アルミニウムの穴あけで用いたレーザーパワーは、初期表面にレーザーを照射したとき吸収するパワーが鉄の場合と一致するように 1.25 kW とした。また、照射時間は、鉄の場合と同じ 25 μs とした。時刻 25 μs における *xz* 断面における表面形状と流速ベクトルについて俯角約 6 度から見た図を Fig. 8 に示す。Fig. 7(d) と Fig. 8 を比較すると、アルミニウムの穴形状は鉄と比較して細くなっている。さらに、Fig. 7(d) と Fig. 8 の材料内部

における流速ベクトルを比較すると、鉄に比べてアルミニウムの方が、幅広く分布していることが分かる。これは、鉄に比べ、アルミニウムの溶融層が大きいことを示している。アルミニウムは鉄に比べ熱拡散率が良いために、吸収レーザーエネルギーが材料内部へ熱伝導し、蒸発に使われるエネルギーが減少する。一方、鉄の融点 1809 K に比べて、アルミニウムの融点は 933 K と低い。これらのことから、アルミニウムの方が穴は細くなるとともに、溶融池は広くなると考えられる。

4. 結 言

金属のレーザー穴あけについて、レーザーの多重反射、材料の蒸発、蒸発反跳力を考慮した熱流体解析手法を提案した。キーホール形成過程における穴壁面の吸収レーザーパワー分

ーション手法の有用性を検討していく予定である。

謝 辞

本研究は、平成 13、14 年度および平成 16、17、18 年度科学研究費補助金の交付を受けていることを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Arata, Y., Abe, N., Oda, T.: Fundamental Phenomena in High Power CO₂ Laser (Report II), Trans. JWRI, **14-2** (1985), 17.
- 2) Fujinaga, S., Takenaka, H., Narikiyo, T., Katayama, S., Matsunawa, A.: Direct observation of keyhole behavior during pulse modulated high-power Nd:YAG laser irradiation, J. Phys. D: Appl. Phys., **33** (2000), 492.
- 3) Lankalapalli, K. N., Tu, J. F., Leong, K.H., Gartner, M.: Laser Weld Penetration Estimation Using Temperature Measurements”, J. Manuf. Sci. Eng., **121** (1999), 179.
- 4) Simon, G., Gratzke, U., Kroos, J.: Analysis of heat conduction in deep penetration welding with a time-modulated laser beam, J. Phys. D: Appl. Phys., **26** (1993), 862.
- 5) Rabier, S., Medale, M., and Fabbro, R.: 3-D Numerical Modeling Laser Welding, Proc. ICALEO 2001, (2001).
- 6) Ki H., Mohanty, P. S., Mazumder, J.: Multiple Reflection and Its Influence on Keyhole Evolution, Proc. ICALEO2001 (2001).
- 7) Noguchi, S., Ohmura, E.: Thermohydrodynamics Analysis of Laser Drilling Considering Multiple Reflection of Laser and Evaporation –1st Report, Multiple Reflection Simulation of Laser Using Ray Tracing Technique–, J. Jpn. Laser Processing Soc. (in Japanese), submitted.
- 8) Hirt, C. W., Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comp. Phys, **39** (1981), 201.
- 9) Kunugi, T.: Direct Numerical Algorithm for Multiphase Flow with Free Surfaces and Interfaces, Trans. JSME, Series B, **63-609** (1997), 88.
- 10) Blackbill, J. U., Kothe, D. B., Zemach, C.: A Continuum Method for Modeling Surface Tension, J. Comp. Phys, **100** (1992), 335.
- 11) Semak, V. V., Hopkins, J. A., McCay, M. H., McCay, T. D.: A Concept for a Hydrodynamic Model of Keyhole Formation and Support During Laser Welding, Proc. ICALEO'94 (1994), 64.
- 12) Amsden, A. A., Harlow, F. H.: A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations, J. Comp. Phys., **6** (1970), 322.
- 13) 日本金属学会編: 金属データブック (1984).
- 14) Palik, E. D.: Handbook of Optical Constants of Solids II, Academic press, (1991), 385.
- 15) Araya, T.: Answer Your Question -From Technical Service Q&A Laser Process(4), Welding Technology, **53-8** (2005), 117.
- 16) 工藤恵栄: 分光学的性質を主とした基礎物性図表, (1972), 386.

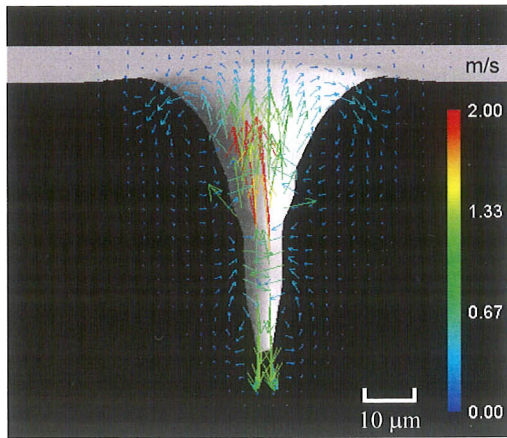


Fig. 8 Velocity vectors and hole shape at $t = 25 \mu\text{s}$ (material: aluminum, laser power 1.25 kW, $1/e^2$ radius 20 μm , reflectivity 0.93)

布の変化、溶融金属の流速分布の変化、材料の違いによる加工穴形状の違いなどを検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 穴の深さが比較的浅い段階でも、多重反射の効果によって穴底部のパワーが増加する。このことが、浅い穴をキーホールに成長させる要因になる。
- (2) 穴が深くなると多重反射によって吸収率は増加するが、多重反射が顕著になることで穴底部のレーザーパワーが減少する。本シミュレーションでは、吸収率は 0.75 程度まで増加した。
- (3) レーザ照射により加工穴が深くなると、溶融金属の表面へ向かう流れは、表面張力により溶融池内部へ向かう流れとなり、渦が形成される。
- (4) アルミニウムは鉄に比べ熱拡散率が大きいいため、吸収レーザーエネルギーが材料内部へより多く熱伝導し、蒸発に使われるエネルギーはその分減少する。一方、鉄の融点 1809 K に比べて、アルミニウムの融点は 933 K と低い。これらのことから、アルミニウムの方が穴は細くなるとともに、溶融池は広くなると考えられる。

本論文によって、レーザーの多重反射と材料の蒸発を考慮したレーザー穴あけのシミュレーションが可能になった。今後はレーザー穴あけ実験との比較を行って、本シミュレ