

ステンレス鋼のレーザ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

部 谷 学*, 坪 井 昭 彦**,***, 社 本 英 泰***, 田 川 正 雄***

*大阪産業大学 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

**光産業創成大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町 1955 番 1)

*** (株) レーザックス (〒472-0017 愛知県知立市新林町小深田 7 番地)

Prediction of Penetration Depth Using Hablanian Plot Based on Laser Welding Results for Stainless Steel

HEYA Manabu, TSUBOI Akihiko, SHAMOTO Hideyasu and TAGAWA Masao

(Received December 20, 2013)

In order to experimentally investigate the prediction accuracy of a penetration depth, we have organized numerous welding results of stainless steels (SUS304) using Hablanian plot. The lasers used were three fiber lasers, one disk laser, four YAG lasers, and one laser diode. These welding data obtained from bead-on-plate welding tests by the laser job shop consisted of about 1,700 data points. The following results were derived from the observations: (1) Hablanian plot results could be fitted using third-degree polynomial fitting but not linear fitting. (2) In the lower range of two dimensionless parameters, the effect of heat conduction into the adjacent material became remarkable. (3) Welding properties expressed by Hablanian plot showed similar properties even under the different welding conditions (such as the type of laser oscillator, welding speed, and power density), except for the focal length of focusing lenses used. Hablanian plot results for the different focal lengths could be expressed by the corresponding third-degree polynomial fitting curves. (4) A penetration depth could be precisely calculated by using the third-degree polynomial fitting curve in comparison with the linear fitting curve.

Key words : laser welding, Hablanian plot, dimensionless parameters, penetration depth, prediction, stainless steel

1. 緒 言

アーク溶接, スポット溶接等の溶接方法に対して, レーザ溶接は,

- ・溶接対象部材に物理的に接触せず溶接施工できる
- ・制御性が高く, 自動化が容易である
- ・極小領域にレーザエネルギーを集中することにより, 高いエネルギー密度で高アスペクト比(溶接ビード幅に対して深い溶込み)の溶接が実現できる
- ・熱影響層の狭い, 低歪溶接が実現できる

等の特徴をもつ。これらの特徴を活かして, 自動車・鉄道車輛等の輸送機器産業, 電気・電子産業, 医療機器産業, 鉄鋼・非鉄等の素材産業, 船舶・エネルギープラント機器等の重工業産業等, 幅広い産業領域で利用されている。また, レーザ溶接の対象材料もステンレス鋼, 耐熱鋼, Znめっき鋼板, 高張力鋼, 等の鉄鋼材料に限らず, Al合金, Ti合金, Ni基・Co基耐熱合金等の非鉄金属・合金にまで適用が広がっている。加えて, 樹脂, ガラス, 炭素繊維等の溶着にもレーザが利用されている。

実際の溶接施工に先立ち, 溶接条件の設定を含めた施工方法(生産技術)の検討が必須であり, この検討作業がレー

ザジョブショップに委託されるケースが多い。以下に溶接条件の検討フロー(3ステップ)の一例を示す。

① 溶接熱源の選定

要求仕様を満足させ得る溶接熱源を選定しなければならない。これには,

- ・レーザ以外の他の従来熱源も含めて何を選択するか
- ・波長, 出力範囲, CW・パルスの発振形態を考慮して, どのレーザ光源を選択するか

という二つの段階がある。コストも含めた顧客要求を満足する熱源としてレーザが相応しいかどうかとも判断しなければならない。レーザ溶接が選択された場合, 要求仕様(ビード幅, 溶込み深さ)を実現する溶接速度, 溶接品質が達成できそうなレーザ光源を選定する。

② 溶接治具の設計・製作

試作・開発段階では検討対象部品の構造が確定していないため, 施工中の製品の保持・拘束用の専用治具を準備せず, 簡易的な方法がとられる。試作・開発段階から量産検討・準備段階に進めば, 施工用治具の検討・設計・製作もレーザジョブショップが果たすべき重要な役割である。

③ 溶接パラメータの設定

①でレーザ光源が選定されたとしても, 実際に溶接施

工する上で、コントロールすべきパラメータは多い。CW 発振レーザーにおいてはレーザー出力、スポット直径、走査速度、シールドガスの種類・流量等がある。パルス発振レーザーの場合には、更にパルスエネルギー、パルス幅、繰り返し周波数、パルス波形等が加わる。レーザージョブショップの実際の作業現場においては、作業者の経験と勘から最初の条件が決められ、試験片を用いたビードオンプレート(メルトラン)試験を行い、溶込み深さ、ビード幅、欠陥の発生状況、溶接部最高硬さ等を確認しながらの試行錯誤でパラメータを最適化している。

以上のように、レーザージョブショップでは、顧客の様々な要求仕様(溶接対象材料、継手形状、溶込み深さ等)に対する対応が求められ、多くのレーザー溶接試験が行われる。この時、指定された溶込み深さを実現できるレーザー出力と溶接速度がおおよそわかれば、その後の詳細な条件出しを円滑に行うことができる。現状では、レーザー発振器と溶接対象材料の組み合わせごとに、制御パラメータ(レーザー出力、溶接速度、スポット直径)と溶接結果(溶込み深さ、ビード幅)との関係をデータベースとして作成している。そのデータベースから、要求仕様を満たすであろう、おおよその加工条件を求めている。新しいレーザー発振器が製品化される度に、データベースを作成するため、多くの時間とコストをかけなければならず、溶接対象材料やレーザー発振器に依存しないレーザー溶接のデータベースの構築が必要となっている。

このような背景の下、本論文では電子ビーム溶接で利用されている次元解析の一つである Hablanian plot^{1),2)}に着目する。Hablanian plot では、無次元化した二つのパラメータ (Vd/K , $P/\theta tk$) を使って溶接データを整理する。無次元パラメータを用いて実験結果を整理するため、溶接条件が異なる膨大なデータを簡易に整理できるメリットがある。ここで、 V は溶接速度[m/s]、 d はスポット直径[m]、 K は材料の熱拡散率[m²/s]、 P はレーザー出力[W]、 θ は材料の融点[K]、 t は溶込み深さ[m]、 k は材料の熱伝導率[W/mK]である。Hablanian plot では、スポット形状はトップハット型を仮定していることに注意されたい。

Vd/K は溶接速度 V を K/d で規格化した値であり、 $P/\theta tk$ はレーザー出力 P を θtk で規格化した値である³⁾。溶接速度が速くなるにつれて、 Vd/K は大きくなり、熱伝導による熱的損失が小さくなる。また、溶込み深さ t が浅いほど、 $P/\theta tk$ は大きくなり、熱伝導による熱的損失が小さくなる。つまり、溶接速度が速く、溶込み深さが浅い溶接結果は、 Vd/K , $P/\theta tk$ が大きい領域にプロットされる。文献3)には、 $P/\theta tk$ が 100(対数表示で 2)を超えると熱伝導の影響は小さく無視でき、反対に $P/\theta tk$ が 100 よりも十分小さければ熱伝導による損失が大きくなると報告されている。つまり、 $P/\theta tk$, Vd/K が小さい領域では、熱伝導による熱的損失が顕著になる。

CO₂ レーザ^{3)~5)}やファイバレーザー⁶⁾を使ったレーザー溶接の結果を Hablanian plot で解析した研究が報告されている。しかしながら、使用したレーザー発振器や条件(スポット直

径、溶接速度、レーザー出力、集光レンズの焦点距離等)が限られており、Hablanian plot による溶込み深さの予測の精度を定量的に評価するには不十分であった。そこで、本論文では、受託加工の条件出しに多用される被溶接金属の一つであるステンレス鋼(SUS304)の溶接結果に対し、レーザー発振器、スポット直径、溶接速度を変えた膨大な溶接結果を Hablanian plot を用いて整理する。そして、Hablanian plot 結果の近似曲線を用いた溶込み深さの予測について検証する。なお、解析に用いた溶接データは、あるレーザージョブショップで蓄積された受託加工の条件出しのための、約 1,700 点のビードオンプレート試験の溶接結果である。

2. 実験方法

2.1 レーザー発振器

Table 1 に使用した CW 発振のレーザー発振器の仕様を示す。ファイバレーザーとして、IPG 社製の YLR-5000(定格出力 5 kW, マルチモード), YLR-2000(定格出力 2 kW, マルチモード), YLR-300(定格出力 300 W, シングルモード)を使用した。ディスクレーザーとして、Trumpf 社製の HLD 1001.5(定格出力 1 kW)を用いた。YAG レーザとして、Trumpf 社製の HL353D(定格出力 350 W), HL1003D(定格出力 1 kW), HL4006D(定格出力 4 kW), HLD3504(定格出力 3.5 kW)を用いた。半導体レーザー(LD)として、Laserline 社製の LDF400-4000(定格出力 3.6 kW)を用いた。レーザー発振波長については、ファイバレーザーが 1,070 nm, ディスクレーザーが 1,030 nm, YAG レーザが 1,064 nm, LDF400-4000 が 967 nm であり、いずれも 1,000 nm 近傍にあるため、本論文ではレーザー発振波長の違いが溶接特性に及ぼす影響を無視した。

Table 1 Type of the lasers used and the welding conditions examined.

Type of laser (Core diameter of fibers [μm])	Output power [W]	Welding speed [m/min]	Focal length of focusing lens [mm] (Focal length of collimate lens [mm])	Spot diameter [μm]
Fiber laser (IPG)				
YLR-5000 (φ200)	250-5,000	0.5-30	125/250/375/500 (125)	200/400/600/800
YLR-2000 (φ100)	100-2,000	0.5-20	125/250/375/500 (125)	100/200/300/400
YLR-300 (φ9)	10-300	0.5-20	100/200/300 (100)	9/18/27
Disk Laser (Trumpf)				
HLD1001.5 (φ150)	50-1,000	0.5-30	100/150/200 (200)	75/112.5/150
YAG laser (Trumpf)				
HL353D (φ300)	100-350	0.5-10	100/150/200 (200)	150/225/300
HL1003D (φ300)	100-1,000	0.5-10	100/150/200 (200)	150/225/300
HL4006D (φ600)	500-4,000	0.5-30	100/150/200 (200)	300/450/600
HLD3504 (φ400)	500-3,500	0.5-30	100/150/200 (200)	200/300/400
LD (Laserline)				
LDF400-4000 (φ400)	1,000-3,600	1-5	100/150 (100)	400/600

2.2 溶接条件および使用材料

Table 1 に溶接条件(レーザー出力, 溶接速度, 使用したレンズの焦点距離, スポット直径)を示す. レーザ出力, 溶接速度については, 変化させた範囲を記載した. レーザ発振器ごとに, レーザ出力, 溶接速度, スポット直径の組み合わせを変えてビードオンプレートのレーザー溶接実験を行った. 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 1,700 点の溶接データを解析に用いた. なお, ステンレス鋼(SUS304)のレーザー溶接結果のみを解析に用いた. 本論文で使用した SUS304 の物性値は次のとおりであった⁷⁾. 熱伝導率 16.2 W/m K, 融点 1,723 K, 熱拡散率 $4.05 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. ここで, スポット直径は, 実測値ではなく, 式(1)を用いて求めた. ここで, d_s はスポット直径[μm], d_{core} はファイバのコア直径[μm], f_i は集光レンズの焦点距離[mm], f_c はコリメートレンズの焦点距離[mm]である.

$$d_s = \frac{f_i}{f_c} d_{\text{core}} \quad (1)$$

3. 実験結果

Fig. 1 にファイバレーザー(レーザー出力 5 kW, スポット直径 0.4 mm), LD(レーザー出力 3.6 kW, スポット直径 0.4 mm)を用いた溶接結果の一例を示す. 溶接速度が速くなるにつれて, 溶込み深さは浅くなった. なお, Fig. 1 中の上段および下段の写真はファイバレーザーおよび LD の溶接ビードの断面形状であり, それぞれの溶接条件での溶接ビードの断面形状がわかりやすいように異なる空間スケールで表示している. Fig. 1 の断面写真中に示した白線の長さが 1 mm に対応している. なお, 溶接実験結果にはキーホール型と熱伝導型の両方の溶接結果が含まれており, 本論文ではこれらを区別せず, Hablanian plot を用いて整理する.

Fig. 2 に Hablanian plot 結果と溶接ビード断面形状を対

応させた結果の一例を示す. Fig. 2 中にある溶接データは, Fig. 1 で示した 5 kW のファイバレーザーおよび 3.6 kW の LD の溶接結果である. スポット直径はともに 0.4 mm であった. 右上に行くほど ($P/\theta tk$, Vd/K が大きいほど), 熱伝導による損失が少ない, 溶込み深さが浅い溶接となる. 一方, 左下に行くほど ($P/\theta tk$, Vd/K が小さいほど), 熱伝導による損失が顕著な, 溶込み深さが深い溶接となる. なお, Fig. 2 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 Hablanian plot である. 損失がない場合, 無次元パラメータである $P/\theta tk$, Vd/K は一致し, 傾き 1 の直線となり³⁾, 点線のように表すことができる. また, Fig. 2 の断面写真中に示した白線の長さは 1 mm に対応している.

Fig. 3 に本論文で取り扱う全溶接データを Hablanian plot で整理した結果を示す. +印のデータ点上にある実線(曲線)と一点鎖線は, 3 次の多項式で近似した曲線(Poly)と近似直線(Line)である. 多項式で近似した結果を見ると, 右上 ($\log(P/\theta tk)$ が 1.7 以上, $\log(Vd/K)$ が 1.0 以上)の領域では, 直線に近く, その傾きは無損失の場合の傾き 1 とほぼ一致することがわかった. 一方, 左下 ($\log(P/\theta tk)$ が 1.2 以下, $\log(Vd/K)$ が 0 以下)の領域では, 傾きが 1 よりも大きくなることが実験的に明らかとなった. 先行研究では, Hablanian plot で整理した溶接結果は, 曲線ではなく直線で近似できるという報告があるが^{3),5)}, 本論文では 3 次の多項式を用いて膨大な溶接実験結果を曲線近似できることが明らかとなった. 以下に近似曲線と近似直線を式(2), 式(3)にそれぞれ示す. なお, 溶込み深さが 0.5 mm 以下のデータはこのプロット図から削除した. 溶込み深さ 0.5 mm 以下のデータが得られる条件は, 低出力かつ, または高速度の溶接条件である. この条件下では, 溶込み深

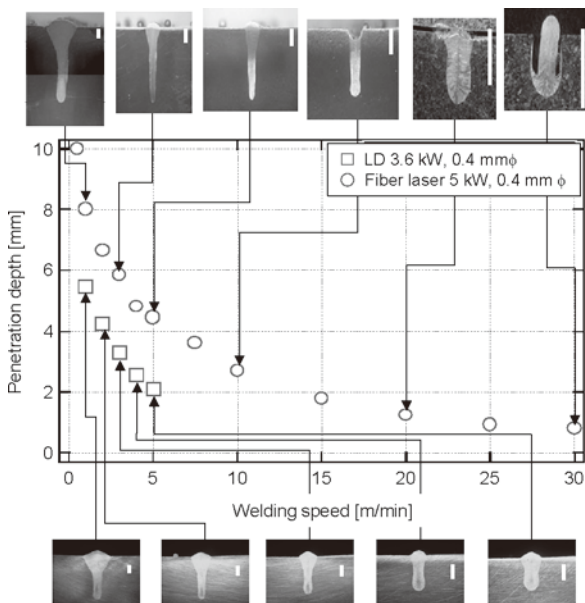


Fig. 1 Typical welding results for a 5-kW-fiber laser and a 3.6-kW-LD.

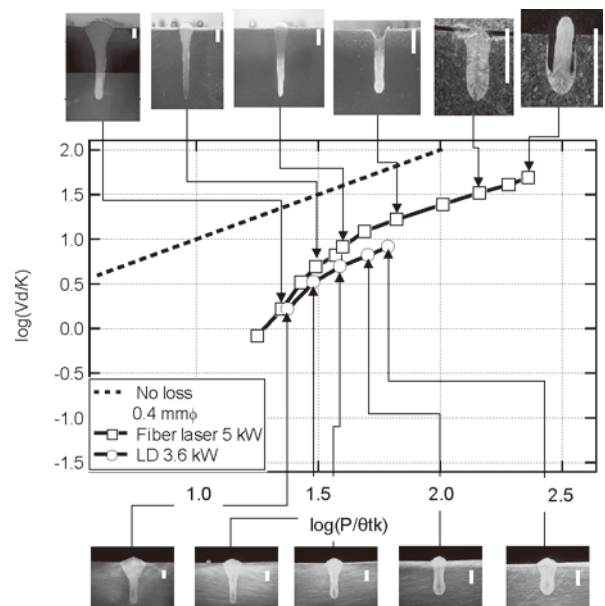


Fig. 2 Relation between welding bead shapes and Hablanian plot results for the welding data (as shown in Fig. 1) with a spot diameter of 0.4 mm.

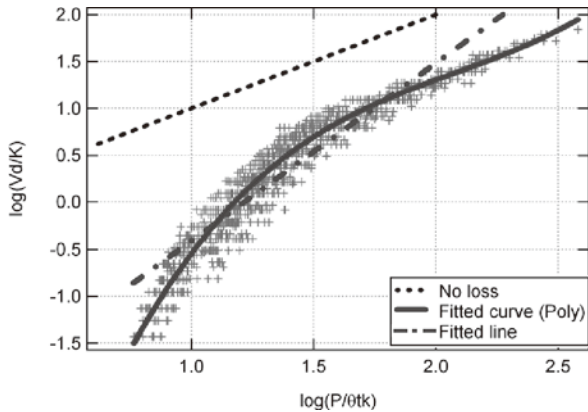


Fig. 3 Hablanian plot results for all welding data.

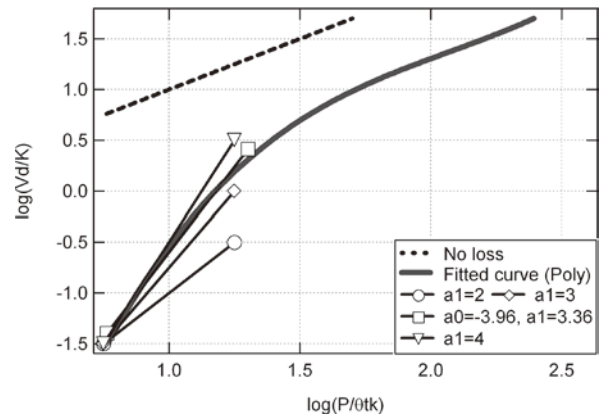


Fig. 4 Estimation of the slopes of the fitting curve for Hablanian plot results in the lower $P/\theta tk$ and Vd/K ranges.

さは結果的に浅く、またビードも不安定であり、溶接結果の再現性が低い。このような溶接条件は、製造現場では実際に使用しないため、解析データから 0.5 mm 以下のデータを削除した。

$$y = -7.103 + 10.38x - 4.548x^2 + 0.7311x^3 \quad (2)$$

$$y = -2.230 + 1.891x \quad (3)$$

ここで、 $y = \log(Vd/K)$ 、 $x = \log(P/\theta tk)$ である。

4. 考 察

4.1 熱伝導の影響

熱伝導が顕著になる領域 ($P/\theta tk$ 、 Vd/K が小さい左下の領域)では、Hablanian plot で表示した場合の直線の傾きが 1 よりも大きくなることが報告されている^{1),3)}。この領域における直線の傾きを調べるために、Fig. 4 中に傾き (a1) が 2, 3, 3.36, 4 の直線を示した。なお、 a_0 は傾き $a_1=3.36$ の直線の y 切片の値である。溶接データを再現するには、傾きが 3.36 程度となることが明らかとなった。これは、 $P/\theta tk$ 、 Vd/K が小さい左下の領域においては、 $P/\theta tk$ と Vd/K の間に式(4)の関係があることを意味している。ここで C は定数である。

$$\frac{P}{\theta tk} = \left(\frac{1}{1.096 \times 10^{-4}} \frac{Vd}{K} \right)^{-3.36} + C \quad (4)$$

文献3)での定格出力 20 kW の炭酸ガスレーザーを用いたレーザー溶接実験では、傾きが 1.8 程度になることが報告されている。この実験は $\log(P/\theta tk)$ が 1.7 程度、 $\log(Vd/K)$ が 1.2 程度での実験であり、本論文で傾きが大きくなった領域 ($\log(P/\theta tk)$ が 1.2 以下、 $\log(Vd/K)$ が 0 以下の領域)と比較して、比較的熱伝導の影響が小さい領域である。すなわち、本論文で傾きが大きくなった領域は、文献3)よりも熱伝導が顕著であり、そのため、傾きも 1.8 よりも大きい 3.36 になったと考えられる。

以上のことから、Hablanian plot 結果は直線近似ではなく曲線(本論文では 3 次の多項式)で近似する必要があること、熱伝導の影響が大きい領域では $P/\theta tk$ と Vd/K 間の傾きが 1 より大きくなること、が明らかとなった。

4.2 レーザ発振器の影響

Fig. 5, 6, および 7 は、Fig. 3 に示した全溶接データを、ファイバレーザー、YAG レーザ、および YAG レーザ・Disk レーザ・LD ごとに近似曲線を用いて整理した結果である。各近似曲線は、対応するレーザー発振器ごとの溶接データに対して 3 次の多項式で近似した結果である。レーザー発振器ごとのすべての近似曲線が、全溶接データに対する近似曲線上にほぼ位置することがわかった。これは、今回得られた全溶接データに対する近似曲線が、異なるレーザー発振器に対しても同じ近似曲線を適用できることを意味している。

4.3 焦点距離、パワー密度、および溶接速度の影響

Fig. 8 は、Fig. 3 に示した全溶接データを、使用した集光レンズの焦点距離ごとの近似曲線を用いて分類した Hablanian plot 結果である。Fig. 8(a) に $P/\theta tk$ 、 Vd/K が比較的小さい、溶込み深さが深い領域を、Fig. 8(b) に $P/\theta tk$ 、 Vd/K が比較的大きい、溶込み深さが浅い領域を表示している。Fig. 8 中の f100 は焦点距離 100 mm の集光レンズを使用した溶接結果であることを意味している。各近似曲線は、対応する焦点距離ごとの溶接データに対して 3 次の多項式で近似した結果である。近似曲線で溶接結果を表しているため、Fig. 3 よりもばらつきが小さく表示されていることに注意されたい。

Fig. 8(a) から、焦点距離が 100 mm の近似曲線は全溶接データのそれよりも右側に位置し、焦点距離が 125, 150, 200 mm の近似曲線は全溶接データのそれとほぼ一致し、焦点距離が 250 mm 以上の近似曲線は全溶接データのそれよりも左側に位置することがわかった。すなわち、3 次の多項式の異なる近似曲線で焦点距離ごとの溶接結果を分類でき、長焦点レンズの使用によって溶込み深さが深くなる傾向が本実験で確認できた(損失を無視した場合の直線からのずれが小さいほど溶込み深さが深いことを意味する)。また、この領域においては、集光レンズの焦点距離ごとに溶接結果を整理することが溶込み深さのより正確な予測に繋がると期待できる。ただし、本実験で観測された傾向は、ファイバの直径・NA、コリメートレンズの集光距離の組み合わせによって影響を受ける可能性があることを付記し

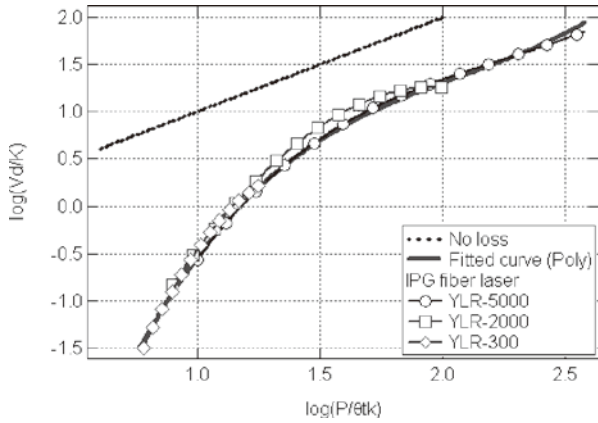


Fig. 5 Hablanian plot results for fiber lasers.

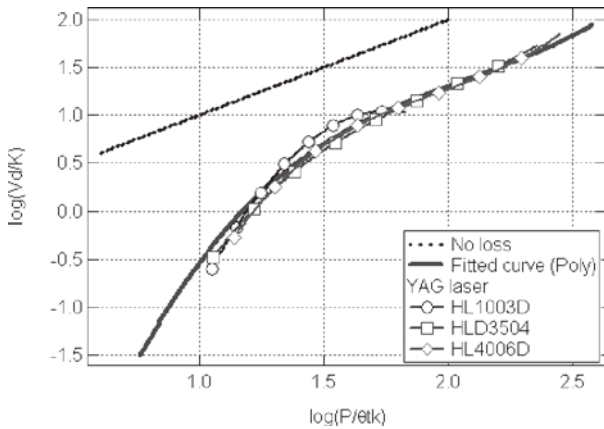


Fig. 6 Hablanian plot results for YAG lasers.

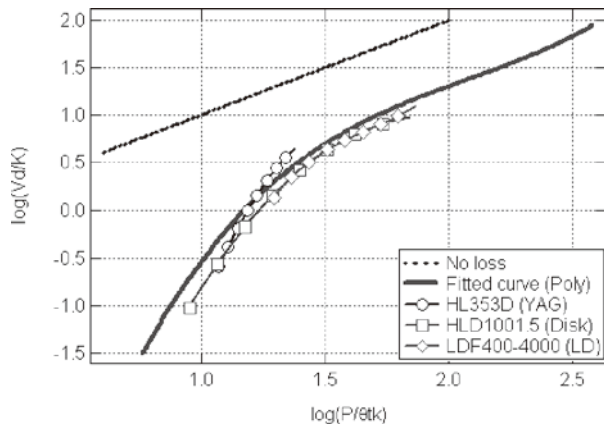


Fig. 7 Hablanian plot results for various lasers.

ておく。

一方、溶込み深さが浅い領域を表示した Fig. 8(b)からは、焦点距離 150 mm と 500 mm の近似曲線を除き、すべての近似曲線が全溶接データの近似曲線に近づくことがわかった。この要因の一つとして、溶込み深さが浅いため、集光レンズの焦点距離ごとの集光特性の違いによる溶接への影響が現れなかったことが推測される。なお、 $f=150, 500$ mm のデータが全溶接データの近似曲線と一致しなかった原因については不明であり、今後の研究課題の一つ

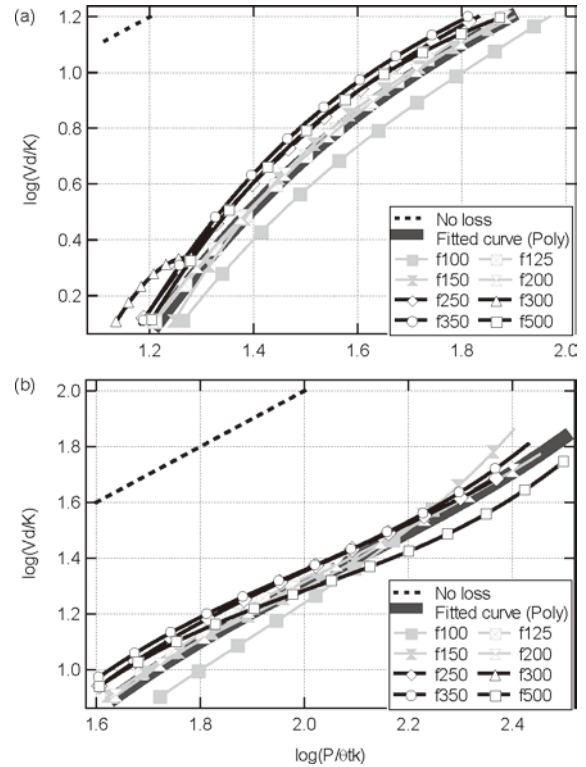


Fig. 8 Hablanian plot results for the focal lengths of focusing lenses used in the (a) lower and (b) higher $P/\theta tk$ and Vd/K ranges.

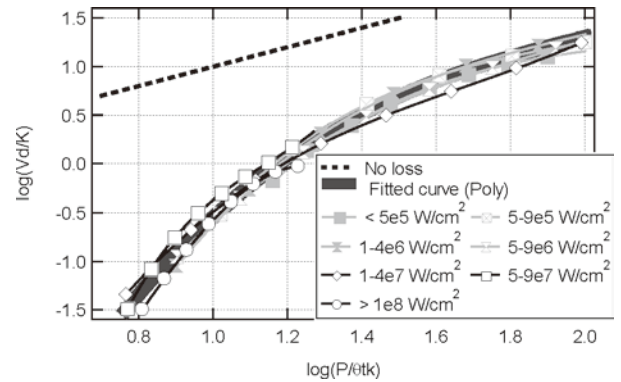


Fig. 9 Hablanian plot results for power density.

である。また、Fig. 8(a)にある $f300$ のデータは他のデータと比べて無損失の場合の直線に近づいた。この条件下でのレーザー溶接は、レーザー出力が小さく (10~300 W 程度)、スポット直径が数十 μm 程度で溶込み深さが 1 mm 以下の微細な溶接である。微細な溶接において特異な挙動を示した要因の解明についても今後の課題の一つである。

Fig. 9 および Fig. 10 は、Fig. 3 に示したデータを、パワー密度、溶接速度ごとに近似曲線を求めて、分類した Hablanian plot 結果である。パワー密度は $5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 未満、 $5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 以上 $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 未満、 $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 以上 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 未満、 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 以上 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 未満、 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上 $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 未満、 $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 未満、 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以上の七つのグループに分類し、

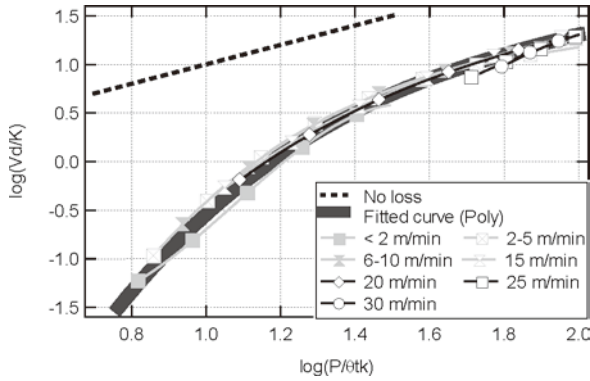


Fig. 10 Hablanian plot results for welding speed.

溶接速度は 2 m/min 未満, 2 m/min 以上 5 m/min 以下, 6 m/min 以上 10 m/min 以下, 15 m/min, 20 m/min, 25 m/min, 30 m/min の七つのグループに分類した. 各パワー密度, 各溶接速度の近似曲線は, 対応するデータに対して 3 次の多項式で近似した結果である. パワー密度および溶接速度ごとの近似曲線が, Fig. 5, Fig. 6, および Fig. 7 と同様に, 全データに対する近似曲線上にほぼ位置することがわかった. これは, 今回得られた全データに対する近似曲線が異なるパワー密度, 溶接速度においても適用できることを意味している.

4.4 溶込み深さ予測精度の評価

Fig. 11 に全溶接データに対する Hablanian plot 結果を用いて計算した溶込み深さ t_{cal} と実測した溶込み深さ t_{mea} の関係を示す. Fig. 11 (a) および (b) に, Fig. 3 に示した 3 次の多項式の近似曲線を用いた予測 (Polynomial), 近似直線を用いた予測 (Line) に対する t_{cal} と t_{mea} の関係をそれぞれ示す. 近似曲線 (Polynomial), 近似直線 (Line) を用いた計算では, 式 (5), 式 (6) を使って溶込み深さ t_{cal} をそれぞれ評価した. 実際測値と計算値が一致する場合には, Fig. 11 の実線の上にプロットされる.

$$t_{cal} = \frac{P}{\theta k} 10^{-(1.173 + 0.3358a + 0.1379a^2 + 0.05342a^3)} \quad (5)$$

$$t_{cal} = \frac{P}{\theta k} 10^{-(1.236 + 0.4608a)} \quad (6)$$

ここで, $a = \log(Vd/K)$ である.

Fig. 12 (a) および (b) に, 多項式近似曲線 (Polynomial) と近似直線 (Line) を用いた予測誤差と Vd/K の相関をそれぞれ示す. 予測誤差 0 が計算値と実測値が一致することを意味している. 近似直線を用いた予測では, $\log(Vd/K)$ が -1 以下および 1 以上の領域において, 予測誤差が大きくなることが明らかとなった. これは, Fig. 3 から推測できる. 直線近似では Vd/K が小さい領域と大きい領域において, 近似誤差が大きくなる. 一方, 3 次の多項式近似曲線を用いた予測では, 直線近似予測と比較してその誤差は小さく, 予測誤差の平均値, 標準偏差をそれぞれ求めると, 多項式近似予測では $1.50 \pm 17.7\%$, 直線近似予測では $4.65 \pm 34.6\%$ であった.

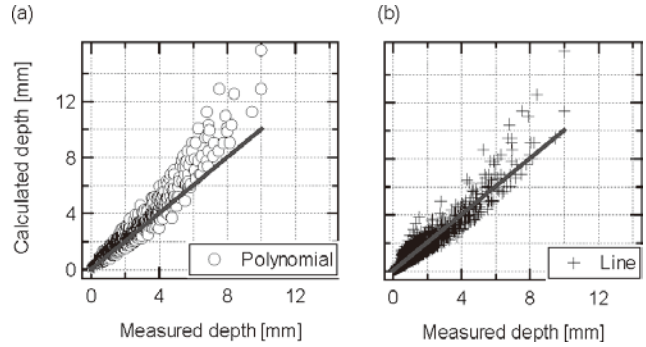


Fig. 11 Prediction of a penetration depth using (a) polynomial-fitting and (b) linear-fitting curves.

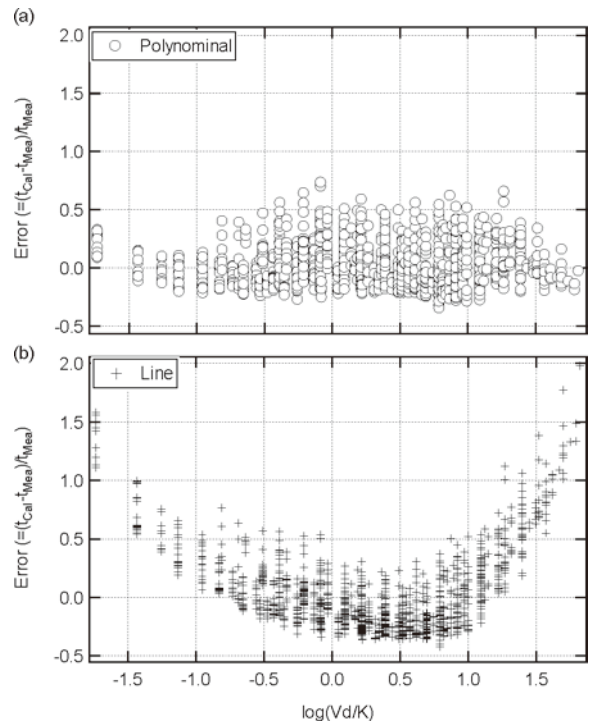


Fig. 12 Dependence of Vd/K on a prediction error using (a) polynomial-fitting and (b) linear-fitting curves.

本論文のレーザ溶接実験を行ったレーザジョブショップでは, レーザ発振器ごとに溶接データを蓄積している. 本論文では, Hablanian plot を用いて溶接データを表示し, レーザ発振器に依存しない, 溶接データの整理の有効性を確認した. その際, Hablanian plot で表示した膨大な溶接データの近似としては, 直線近似ではなく, 近似誤差の小さい多項式近似を用いることが望ましい. 近年, 顧客が求める溶込み深さの範囲も数 mm 程度から十数 mm までと幅広くなっている. 今後, レーザ発振器の高出力化や周辺機器の高性能化を背景として, 要求仕様がさらに広範囲に拡大することが予想される. 直線近似が適用できる範囲は限られており, 幅広い要求仕様に対応する上では, 多項式近似予測を用いたレーザ溶接の条件出しがより効率的であると考えられる.

以上より, 3 次の多項式の近似曲線を用いた予測は従来

提唱されてきた近似直線を用いた予測よりも精度よく溶込み深さを予測できることがわかった。なお、Fig. 8 に示したように、集光レンズの焦点距離ごとに3次の多項式の近似曲線が若干変化するため、より精度良く溶接特性を予測するためには、焦点距離ごとに溶接結果を整理することが望ましい。

5. 結 論

Hablanian plot による溶込み深さの予測精度を検証するために、ステンレス鋼(SUS304)の溶接結果を用いて、レーザー発振器、スポット直径、溶接速度を変えた膨大な溶接結果を Hablanian plot を用いて整理した。使用したレーザー発振器はファイバレーザー3台、ディスクレーザー1台、YAG レーザ4台、LD 1台であった。解析には、あるレーザージョブショップに蓄積された受託加工の条件出しのための、約1,700点のビードオンプレート試験の溶接データを用いた。実験的に明らかになったことは以下の通りである。

(1) 直線近似ではなく、3次の多項式の曲線近似によって膨大な溶接実験結果を近似できた。

(2) $\log(P/\theta tk)$ が 1.7 以上、 $\log(Vd/K)$ が 1.0 以上の領域では、近似曲線は直線に近くその傾きは無損失の場合の傾き(傾きは1)とほぼ一致した。

(3) 一方、 $\log(P/\theta tk)$ が 1.2 以下、 $\log(Vd/K)$ が 0 以下の領域では、近似曲線の傾きが1よりも大きくなり、熱伝導の影響が顕著になった。

(4) 全溶接データに対する3次の多項式の近似曲線は、レーザー発振器の種類、パワー密度、溶接速度ごとに分類してもほぼ同じ近似曲線となるが、集光レンズの焦点距離ごとに分類すると、集光レンズの焦点距離ごとに3次の多項式の近似曲線が若干変化した。

(5) 3次の多項式の近似曲線を用いることにより、従

来提唱されてきた直線近似を用いた予測よりも予測誤差が小さくなった。

今後、反射率や熱伝導率が異なる溶接対象材料の溶接結果について Hablanian plot を用いて整理し、異なる溶接材料に対する予測精度について評価する必要がある。加えて、Fig. 8 に示した特異的な挙動の要因解明に、今後、取り組んでいく予定である。

謝 辞

レーザー溶接結果の整理および結果の考察に関して、貴重な助言を頂いた、武田信秀氏、内海 徹氏、戸苅康成氏、真鍋武士氏、内山文宏氏、沖原伸一朗氏に、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Hablanian, M.H. : A Correlation of Welding Variables, Proc. of 4th Symp. Electron Beam Technology, (1962), 262.
- 2) Lowry, J.F., Fink, J.H. and Schumacher, B.W. : A Major Advance in High-Power Electron-Beam Welding in Air, J. Appl. Phys., **47**, (1976), 95.
- 3) Locke, E.V., Hoag, E.D. and Helia, R.A. : Deep Penetration Welding with High-Power CO₂ Lasers, IEEE J. Quantum Electron., **8**, (1972), 132.
- 4) Baardsen, E.L. and Schmatz, D.J. : High-Speed Welding of Sheet Steel with a Carbon Dioxide Laser, Proc. of IEEE Conf. Laser Eng. Appl., Washington D.C., May, 1971.
- 5) Metzber, E.A. : Penetration Depth in Laser Beam Welding, Welding Research, (1993), 403-s.
- 6) Quintino, L., Costa, A., Miranda, R. and Yapp, D. : Welding with High-Power Fiber Lasers — A Preliminary Study, Material & Design, **28**, (2007), 1231.
- 7) Washko, S.D. and Aggen, G. : Metals Handbook, ASM International, (1990), 841.