技術論文

0.01-10 kW の CW ファイバレーザ溶接におけるハブラニアンプロットを用いた溶込み深さの予測

部谷　学*, 舟山博人**,***, 坪井昭彦***, 田川正雄****

*大阪産業大学工学部（〒 574-8530　大阪府大東市中垣内 3-1-1）
**㈲アイテックインターナショナル（〒 462-0844　愛知県名古屋市北区清水 3-8-5）
***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）
****㈱レーザックス（〒 472-0017　愛知県知立市新林町小深田 7 番地）
heya@eic.osaka-sandai.ac.jp

Prediction of Penetration Depths with CW Fiber Lasers of 0.1-10 kW Using Hablanian Plot

HEYA Manabu, FUNAYAMA Hiroto, TSUBOI Akihiko and TAGAWA Masao

（Received June 28, 2019）

In order to prove the validity of prediction of penetration depths using Hablanian plot, experimentally-obtained penetration depths with CW fiber lasers of 0.01～10 kW were compared with those predicted by Hablanian plot. The experimental results with ～900 data points for stainless steel plates were obtained from bead-on-plate welding tests performed in the laser job shop. Laser power, welding speed and spot diameter were varied as laser conditions. The experimental results expressed by Hablanian plot with two dimensionless parameters ($\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ and $\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$) were fitted by the 3th-degree polynomial fitting curve (standard fitting curve). The fitting difference ($\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/\theta tk)$) between the standard fitting curve and the corresponding experimental result was larger at deeper penetration depths, and resulted in the error of prediction. This fitting difference at a given $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ was calculated and obtained as a function of laser power. The error of prediction after correction for fitting difference was lower than that before correction. Thus, we showed that correction for fitting difference was essential for accurate prediction of penetration depth using Hablanian plot.

Key words : stainless steel, dimensionless parameter, standard fitting curve, fitting difference, correction

1. 緒　言

次元解析の一つである Hablanian plot[1-3] 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．二つの無次元パラメータ Vd/K，$P/(\theta tk)$ を用いて実験結果を整理するため，溶接条件および金属材料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．CO_2 レーザ[4-6] やファイバレーザ[7] を用いたレーザ溶接の結果を Hablanian plot で解析した研究が報告されている．さらに，これらの無次元パラメータには金属材料の物性値である，材料の融点，熱拡散率，熱伝導率も含まれているため，異なる金属材料であったとしても溶接結果を一つのグラフに整理できる．ここで，V (m/s) は溶接速度，d (m) はスポット直径，K (m^2/s) は材料の熱拡散率，P (W) はレーザ出力，θ (K) は材料の融点，t (m) は溶込み深さ，k (W/mK) は材料の熱伝導率である．

部谷ら[2,3] は，Hablanian plot を用いた溶込み深さの予測の精度について調べるために，ステンレス鋼 (SUS304) の溶接結果に対して，4 種類の異なるタイプのレーザ発振器，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．その結果，全溶接結果に対する 3 次の多項式の近似曲線 (以降，基準近似曲線とよぶ) によって膨大な溶接結果を近似できることを明らかにした．この基準近似曲線は，無次元パラメータである $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ を縦軸に，$\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を横軸にとって表される．溶接条件や金属材料が決まれば縦軸である $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ を計算できる．あらかじめ求められている基準近似曲線を用いて，この近似曲線上にある $[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$, $[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta t_s k))]_s$ から溶込み深さを予測できる (添え字の s は standard の頭文字である)．つまり，金属材料 (K, k) および溶接条件 (V, d, P) が決まれば，基準近似曲線に対応する溶込み深さ t_s として溶込み深さを予測できる．

文献 2 では，3 次の多項式の基準近似曲線を使って溶込み深さを予測できることを示した[2]．しかしながら，文献 2 ではレーザ出力が 5 kW 以下の溶接結果に限られており，10 mm を超える溶込み深さの予測の妥当性については十分に調べることができなかった．そこで，本稿では 5 kW を超えるレーザ出力の溶接結果を加えて，0.01～10 kW の連続発振のファイバレーザを用いた，約 900 点の溶接結果を Hablanian plot を用いて整理する．これらの全溶接結果に対する Hablanian plot 結果を 3 次の多項式で近似した基準近似曲線を用いて，溶込み深さ t_s を求める．また，基準近似曲線を求める際の近似誤差を求め，近似誤差を補正して予測した溶込み深さ t_c' を計算する．そして，t_s と t_c' を比較して，近似誤差の補正を取り入れた基準近似曲線による溶込み深さの予測方法の妥当性について調べる．

2. 実 験 方 法

本稿では，文献 2 で解析した，CW ファイバレーザを用いた溶接結果に，IPG 社製のファイバレーザ（YLR-10000）を用いて得られた 5～10 kW の溶接結果を加えて解析した．**Table 1** に使用した溶接条件（レーザ出力 P，溶接速度 V，集光レンズの焦点距離 f_f，スポット直径 d，など）を示す．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溶接実験をおこなった．これらの溶接結果は，あるレーザ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，ステンレス鋼（SUS304）に対するレーザ溶接結果である．シールドガスは窒素ガスであった．なお，マクロ溶接については溶込み深さ 0.5 mm 以下の溶接結果を解析対象から除外した．マクロ溶接において 0.5 mm 以下の溶込み深さが得られる条件は，低いレーザ出力または速い溶接速度といった溶接条件である．このような条件下では，溶込み深さは結果的に浅く，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．ただし，スポット直径が 30 μm 以下のマイクロ溶接においては，0.5 mm 以下の浅い溶込み深さの溶接が使用されているため，このような溶接データは解析に含めた．

使用した CW ファイバレーザ発振器（仕様）は，IPG 社製の YLR-10000（定格出力 10 kW，マルチモード），YLR-5000-S（定格出力 5 kW，マルチモード），YLR-2000-S（定格出力 2 kW，マルチモード），YLR-300-SM（定格出力 300 W，シングルモード）であった．また，本実験で使用した SUS304 の物性値は次の通りである．熱伝導率 16.2 W/mK，融点 1723 K，熱拡散率 4.05×10^{-6} m^2/s[8]．スポット直径は，実測値ではなく，$d=(f_f/f_c)\,d_{core}$ を用いて求めた．ここで，d はスポット直径 [μm]，d_{core} はデリバリファイバのコア直径 [μm]，f_f 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．

3. 実 験 結 果

Fig. 1 に全溶接結果を Hablanian plot 表示した結果を示す．＋印，●印，×印は，それぞれ，6 kW 以上のマクロ溶接結果（YLR-10000 を用いた溶接結果），0.25 から 5 kW のマクロ溶接結果（YLR-5000-S，YLR-2000-S を用いた溶接結果），0.01 から 0.3 kW のマイクロ溶接結果（YLR-300-SM を用いた溶接結果）を示している．なお，**Fig. 1** の左上の傾き 1 の一点鎖線は，入射レーザがすべて金属に吸収され，熱伝導や熱輻射による熱的損失などを無視した場合の Hablanian plot である．無損失の場合，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[4]，一点鎖線のように表すことができる．また，Hablanian plot において，各パラメータの単位は V（m/s），d（m），K（m^2/s），P（W），θ（K），t（m），k（W/mK）を用いた．本稿では，現場で多用される単位（たとえば，溶接速度の m/min）も用いている．

Fig. 1 中の実線は，約 900 点のすべての溶接結果に対して，3 次の多項式で近似した近似曲線（基準近似曲線）である．図中の a0 から a3 は，$\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ から $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ を求めるときの 3 次の多項式の係数である．一方，b0 から b3 は，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ から $\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を求めるときの 3 次の多項式の係数である．添え字は次数を意味しており，0 は 0 次の係数を意味している．Hablanian plot を用いて溶接結果を表示すると，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ ごとに異なる $\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の値を持つ．たとえば，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が約 0.2 のときには，$\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ は約 1.2 から約 1.6 の間でばらついた．また，$\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ が約 2 以上，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が約 1.5 以上の右上の領域では実際のデータと基準近似曲線の差が小さい一方で，左下の領域ではこの差が大きくなった．この差が近似誤差につながる．

Fig. 2 に **Fig. 1** で示した基準近似曲線を用いて計算した溶込み深さ（t_s，＋印）と実験結果（t_{exp}）との比較を示す．計算結果と実験結果が等しい場合は，傾き 1 の破線上にプロットされる．溶込み深さにおける実験結果が約 4～5 mm 以下では計算結果と実験結果の差は小さかった．一方，溶込み深さが深くなるにつれて，計算結果が実験結果よりも大きくなった．**Fig. 3** に予測誤差とレーザ出力の関係を示す．予測誤差は実験結果に対する実験結果と予測結果の差をパーセント表示したものである．基準近似曲線を用いた場合の予測誤差（＋印）は約 1000 W 以上で大きくなることがわかった．

Table 1　Welding conditions examined in this study.

Type of laser	Output power (W)	Welding speed (m/min)	Focal length of lens used (mm)	Spot size (μm)
Fiber laser (CW mode)				
YLR-10000	6000-10000	0.5-30	250/400/500	400/640/800
YLR-5000-S	250-5000	0.5-30	125/250/350/500	200/400/600/800
YLR-2000-S	100-2000	0.5-20	125/250/350/500	100/200/300/400
YLR-300-SM	10-300	0.5-20	100/200/300	9/18/27

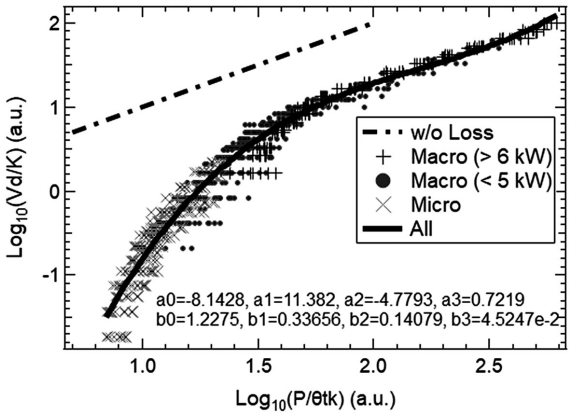

Fig. 1　Hablanian plot results for all welding data. A solid curved line and a dotted line show the standard fitting curve and the Hablanian plot results for laser welding with no losses, respectively. Symbols ＋, ●, and × show Hablanian plot results using YLR-10000（6～10 kW），YLR-5000-S and YLR-2000-S（0.25～5 kW），and YLR-300-SM（0.01～0.3 kW），respectively.

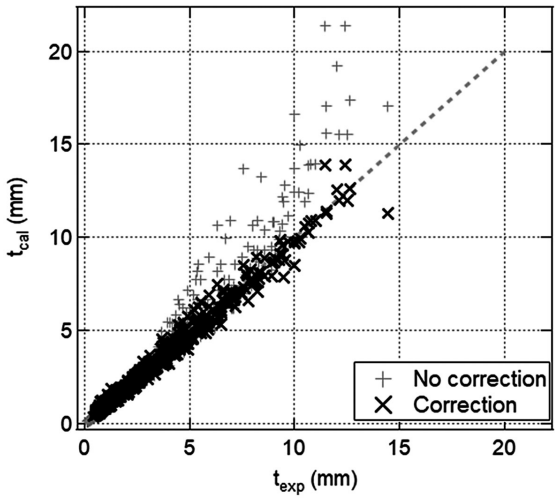

Fig. 2　Comparison between experimental penetration depth (t_{exp}) and predicted one (t_{cal}). Symbols ＋ and × show the results predicted by the standard fitting curve and by the standard fitting curve with the correction of $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$, respectively.

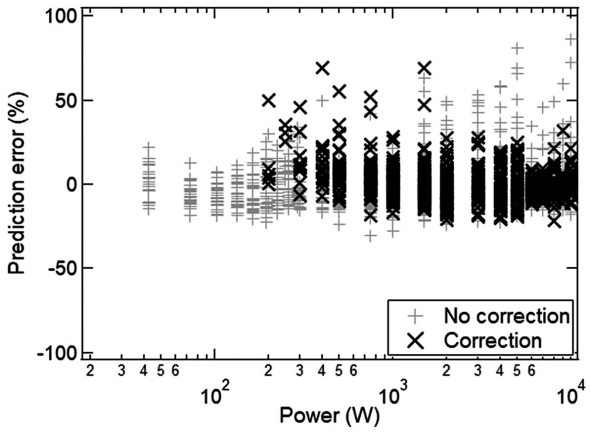

Fig. 3　Prediction errors for calculation using standard fitting curve with no correction (＋) and with correction (×) as a function of laser power.

4. 考　　察

4.1　基準近似誤差からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の計算

Fig. 4 に **Fig. 1** を拡大したグラフを示す．既述したように，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が 0.2 付近において，実験結果が黒い実線で示した基準近似曲線の両側にばらついていることがわかる．このように，ばらついている実験結果を 3 次の多項式で近似して得られた曲線が基準近似曲線である．つまり，基準近似曲線上にある点 A ($[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta t_s k))]_s$, $[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$) は，このばらついた実験結果の平均的な数値とみなせる．基準近似曲線をあらかじめ求めておけば，金属材料 (K, k) および溶接条件 (V, d, P) から，$[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$ に対応する $[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta t_s k))]_s$ や t_s を予測できる．しかしながら，実際の実験結果は基準近似曲線からずれている．点 D を例にとると，横軸は基準近似曲線から $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ だけずれた点 E$[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta t_c' k))]_e$ に対応する (添え字 e は experiment の頭文字である)．したがって，実際の溶込み深さ t_c' は予測結果である t_s よりも小さくなり，基準近似曲線を用いた予測結果は過大見積もりとなってしまう．これが **Fig. 3** で示した高いレーザ出力領域で予測誤差が大きくなった主な理由である．このように，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ が正の場合 (実験結果が基準近似曲線より右側にある場合) は過大見積もりになる一方，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ が負の場合 (実験結果が基準近似曲線より左側にある場合) は過小見積もりになってしまう．なお，ある $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ ($V\times d$ が同じ場合) において，レーザ出力 P と溶込み深さ t が比例して変化する場合，$\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ は一定値となる．

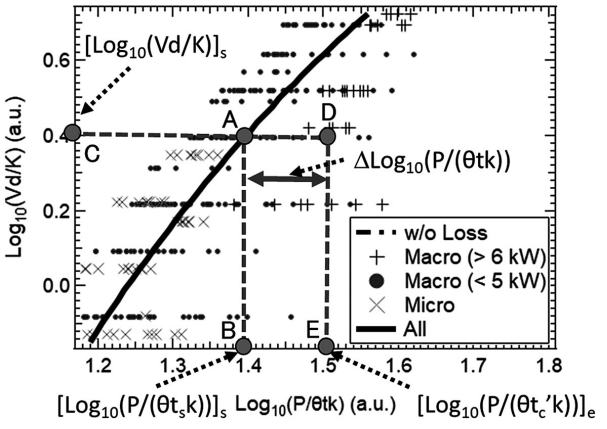

Fig. 4　Correction method for prediction of penetration depth using standard fitting curve expressed by Hablanian plot.

Fig. 5 に，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ ごとのレーザ出力 P を変えた場合の $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ (基準近似曲線からのずれ) の変化の様子を示す．レーザ出力が 1000 W 以上の領域において，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が −0.65 (○印) のときには $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ はマイナスからプラスに急に変化した．$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が 0.15 (△印) のときには $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の変化は緩やかになり，レーザ出力が大きくなるにつれて $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ は飽和する傾向が得られた．$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が 0.95 以上になると $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ は 0 に近づいた．このように，基準近似曲線からのずれである $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ はレーザ出力 P に強く依存する傾向があることがわかった．この傾向はレーザ出力と溶込み深さの関係から説明できる．溶接速度，スポット直径を固定してレーザ出力を大きくしていくと，熱伝導損失が増えて溶込み深さは飽和するため，P/t も増加する．この結果，レーザ出力が大きくなると，$[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta t_c' k))]_e$ は $[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta t_s k))]_s$ より大きくなり，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ はプラスになる．溶接速度 V が速くなると熱伝導損失が小さくなるため，V が速い $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が大きい領域では，P が増加しても $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の変化は小さくなると考えられる．

Fig. 4 に示したように，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ が大きい場合，基準近似曲線から予測できる t_s と実際の溶込み深さの差が大きくなる．**Fig. 1** に示したように，基準近似曲線は 3 次の多項式として実験的にあらかじめ求めることができる．$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ もあらかじめ

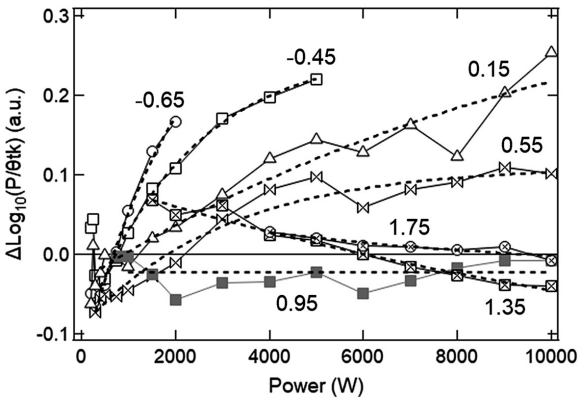

Fig. 5　$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ as a function of laser power at different values of $\mathrm{Log}_{10}(Vd/\theta)$.

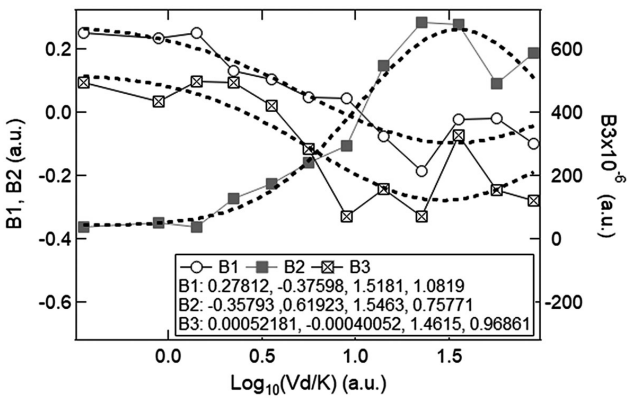

Fig. 6　Fitting coefficients B1, B2, and B3 as a function of $\mathrm{Log}_{10}(Vd/\theta)$.

実験的に求めて補正することで，溶込み深さをより正確に予測できる．具体的には，金属材料 (K, k) および溶接条件 (V, d, P) が決まると基準近似曲線から $[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta_s k))]_s$, $[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$，そして $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ が決まる．これによって，$[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta_c' k))]_c$ が決まり，ずれ補正後の t_c' を計算できる．

Fig. 5 に示したように，Hablanian plot の縦軸である，ある $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ において $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ と P の間には相関があるため，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ ごとに P を変数として指数関数でフィッティングした．**Fig. 5** に示した破線はその近似曲線である．近似式は $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk)) = \mathrm{B1}+\mathrm{B2}\exp(-\mathrm{B3}\times P)$ で表される．**Fig. 6** に $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ に対する近似係数 B1, B2, B3 の変化を示す．これらの結果を近似した正規分布曲線 (= C1+C2exp(-((x-C3)/C4)^2)) を破線で示す．**Fig. 6** に示した B1, B2, B3 ごとの四つの数値は, それぞれに対応した C1, C2, C3, C4 である．**Fig. 5** に，例として七つの $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ における $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の変化を示す．指数関数を用いたフィッティングは，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ について-0.7 から 2.0 までの 12 の範囲に分けて，それらに対応する 12 本の近似曲線を求めた．これらの 12 本の近似曲線の係数 B1, B2, B3 をプロットしたものが **Fig. 6** である．なお，-0.7 以下の $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ について解析していないのは，ここでの解析対象をマクロ溶接結果のみにしたためである．$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が-0.7 以下はマイクロ溶接の溶接結果のみであり，これらの溶込み深さは 4 mm 以下であるため，補正なしの基準近似曲線を用いた予測の妥当性は **Fig. 2** および **Fig. 3** で確認している．

Fig. 6 に示した正規分布曲線を用いて，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ ごとの B1, B2, B3 が求まる．この B1, B2, B3 を使って，任意の P および $\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ に対する，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ をあらかじめ求めることができる．このようにして，金属材料 (K, k) および溶接条件 (V, d, P) が与えられれば，**Fig. 1** の基準近似曲線を使って $[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta_s k))]_s$, $[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$ を，C1, C2, C3, C4 を使った **Fig. 6** の正規分布曲線から B1, B2, B3 を，そして，B1, B2, B3 を使った **Fig. 5** の指数関数から基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を計算できる．なお，**Fig. 5** で示した指数関数はレーザ出力が 1000 W 以上のデータに対しての近似曲線である．

4.2　$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ 補正後の溶込み深さの予測

基準近似曲線を用いて溶込み深さを予測した場合，**Fig. 2** および **Fig. 3** に示したように，溶込み深さが約 4〜5 mm 以上，レーザ出力が 1000 W 以上の領域で，予測誤差が大きくなった．この原因の一つとして，**Fig. 1** および **Fig. 4** に示した基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を考慮に入れていないことが考えられる．**Fig. 5** および **Fig. 6** に示した二つの近似曲線を用いれば，金属材料 (K, k) および溶接条件 (V, d, P) に対する $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を計算で求めることができる．計算で求められた $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を溶込み深さの予測に取り入れることで，**Fig. 4** に示したように $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ 補正後の溶込み深さ t_c' を計算できる．

Fig. 2 に $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ 補正後の溶込み深さ t_c' と実験結果 t_{exp} を比較した結果を×印で示す．また，**Fig. 3** にレーザ出力に対する予測誤差を示す．$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の補正をほどこすことによって，溶込み深さ約 4〜5 mm 以上，1000 W 以上での予測誤差は小さくなった．しかしながら，200 から 1000 W の領域では予測誤差が大きくなる場合もあった．これは **Fig. 5** に示した低レーザ出力領域では指数関数で近似できなかったことが原因の一つとして考えられる．なお，このような低レーザ出力領域の溶込み深さは 4 mm 以下であるため，補正なしの基準近似曲線を用いた予測をおこなうことが適切であると考えられる．

このように，**Fig. 5** および **Fig. 6** に示した二つの近似曲線 (指数関数，正規分布関数) を用いて，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を求め，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を補正することで，より正確に溶込み深さを予測できることを示した．なお，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を求めるときには，近似誤差が小さければ，指数関数，正規分布関数以外の関数でフィッティングすることも可能である．

4.3　ディスクレーザ溶接結果に対する予測

Fig. 5 で求めた $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の補正を考慮した予測手法の妥当性を確認するために，レーザジョブショップで取得した，ディスクレーザを用いたステンレス鋼の溶接結果に対して溶込み深さの予測をおこなった．ディスクレーザはトルンプ社製の HLD4002 で，レーザ出力は 1〜4

kW，溶接速度は 0.5～12 m/min，スポット直径は 0.2～0.6 mm で変化させた．**Fig. 7** に示したように，**Fig. 2** と同様，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の補正を考慮した予測結果（×印）が，基準近似曲線による予測結果（＋印）と比べて，実験結果をより再現できることがわかった．なお，溶込み深さの予測に必要なデータとして，**Fig. 1** の基準近似曲線と **Fig. 5** および **Fig. 6** の $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ に関するデータの二つがある．これらのデータはファイバレーザ溶接実験から取得されたものであるが，次の理由から異なるレーザ発振器の溶接結果にも適用できると推測される．レーザ発振器から出力されるレーザ光は，デリバリファイバを介して集光レンズに導光されるため，レーザのビーム品質が溶接結果に及ぼす影響を無視できると考えられる．

5. 結　　論

Hablanian plot を用いた溶込み深さの予測の妥当性について調べるために，0.01～10 kW の CW ファイバレーザを用いた，ステンレス鋼（SUS304）に対する約 900 点の溶接結果を Hablanian plot で整理した．これらの溶接結果を 3 次の多項式で近似し，基準近似曲線，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を求めた．基準近似曲線を用いて $[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta_s k))]_s$, $[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$ を求めた．そして，$[\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)]_s$ に対する $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を計算することによって，$[\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta_c' k))]_e$ を導出し，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の補正を考慮した溶込み深さ t_c' を求めた．補正後の t_c' と補正前の t_s を比較し，基準近似曲線からのずれの補正を取り入れた Habanian plot による溶込み深さの予測方法の妥当性について考察した．その結果，以下の事項があきらかとなった．

1）3 次の多項式で近似した基準近似曲線と Hablanian plot 表示した溶接結果を比較すると，$\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ が約 2 以上，$\mathrm{Log}_{10}(Vd/K)$ が約 1.5 以上の右上の領域では両者の差が小さい一方で，左下の領域ではこの差が大きくなった．

2）補正前の予測結果 t_s と実験結果 t_{exp} を比較すると，実験結果である溶込み深さが約 4～5 mm 以下，あるいはレーザ出力が 1000 W 以下では，計算結果と予測結果の差は小さくなる一方，溶込み深さが深くなる，あるいはレーザ出力が大きくなるにつれて，予測結果 t_s は実際の実験結果 t_{exp} よりも大きくなった．

3）ファイバレーザ溶接の実験において，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ の補正を考慮した予測結果 t_c' は，補正なしの予測結果 t_s と比べて，実験結果 t_{exp} をよく再現できた．ディスクレーザ溶接の実験結果についても，同様の解析結果が得られた．

以上のように，0.01～10 kW という広範囲なレーザ出力における溶込み深さの予測において，基準近似曲線からのずれ $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を補正することが適切であることを示した．また，溶込み深さが約 4～5 mm 以下では，$\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$ を補正せずに，基準近似曲線から求めても溶込み深さを予測できることを示した．今後は，ほかの金属材料の溶接結果について，Hablanian plot を用いた予測方法の妥当性について調べていく予定である．

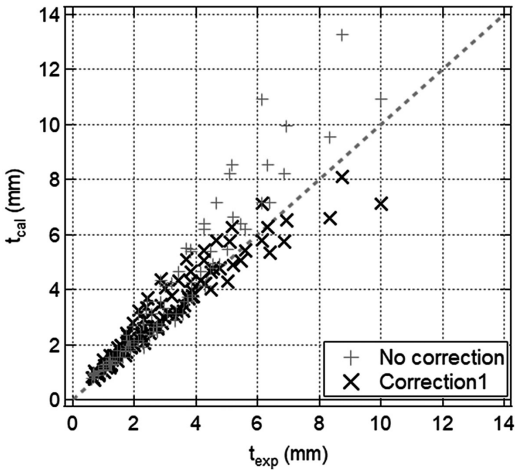

Fig. 7　Comparison between experimental penetration depth (t_{exp}) and predicted one (t_{cal}) in laser welding using disk laser (HLD4002, Trumpf). Symbols ＋ and × show the results predicted by the standard fitting curve and by the standard fitting curve with the correction of $\Delta\mathrm{Log}_{10}(P/(\theta tk))$, respectively.

参 考 文 献

1）Hablanian M. H.: A Correlation of Welding Variables, Proc. of 5th Symp. Electron Beam Technology, (1962) 262.

2）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，**21-3**, (2014) 44.

3）部谷　学，坪井昭彦，田川正雄:ステンレス鋼のファイバレーザ溶接におけるハブラニアンプロット結果に関する考察，電気学会論文誌 A, **137**, (2017) 271.

4）Locke E. V., Hoag E. D., and Helia R. A.: Deep Penetration Welding with High-Power CO_2 Lasers, IEEE J. Quantum Electron., **8**, (1972) 132.

5）Baardsen E. L. and Schmatz D. J.: High-Speed Welding of Sheet Steel with a Carbon Dioxide Laser, IEEE J. Quantum Electron., **9**, (1973) 651.

6）Metzbwer E. A.: Penetration Depth in Laser Beam Welding, Welding Rereach, (1993) 403s.

7）Quintino L., Costa A., Miranda R., and Yapp D.: Welding with High-Power Fiber Lasers - A Preliminary Study, Material & Design, **28**, (2007) 1231.

8）Washko, S.D. and Aggen, G.: Metals Handbook, ASM International, (1990) 841.