高エネルギービームによる溶接特性 (第1報)*

— 電子ビームによる各種金属の溶込み形成 —

大 峯 恩** 池 田 正 幸***

Welding Characteristics by High Energy Beams (1st Report)

— Penetration of Various Metals by an Electron Beam —

Megumi OHMINE and Masayuki IKEDA

As the first report of serial studies on welding by high energy beams, penetration mechanisms by an electron beam for mild steel, stainless steel, aluminum and copper were discussed. Bead-on-plate tests at flat welding position were carried out under various conditions. The cross sectional shapes of the welds were estimated, and their melting efficiencies were compared with the theoretical values calculated by heat conduction models. The results obtained are as follows: (1) Deep penetration is dependent not only on a depth but an opening of key hole to promote molten metal outflow. Effective beam diameter to keep the opening can be approximated to penetration width. (2) Melting efficiency of welding is expressible by the equation with beam power, welding speed, penetration depth and average width. Then it can be calculated on the basis of the heat conduction theory assuming moving heat source models. (3) The theoretical melting efficiency of a wedge type volume heat source model, substituting penetration depth for the height and width for the base, is similar to the melting efficiency of actual welds by an electron beam.

Key words: electron beam welding, penetration, industrial metals, melting efficiency, heat conduction models

1. 緒 言

高エネルギービーム熱源による溶接においては、パワー密度が数十 kW/mm²以上に達すると金属材料は瞬時に熔融、蒸発してキーホールが形成され、表面から内部までビームで直接加熱されるので、特有の狭幅深溶込みが得られる。このため継手開先は不要で、低ひずみ、高エネルギー効率、高速度で極めて品質のよい溶接が可能になる。

電子ビーム溶接法は個別の対象ごとに実践的なデータを積み上げて既に実用化されているが、ガス分子との衝突や散乱による電子ビームのエネルギー損失を防止するため真空雰囲気が必要であり、小形部品あるいは特殊な大形厚肉部品の溶接などに用途がほぼ限られている。

他方、炭酸ガスレーザビーム溶接法は、材料へのビーム吸収、溶接中のプラズマとレーザの相互作用などレーザビーム固有の問題の解明が優先的に検討され、種々報告¹⁾されているが、レーザ溶接機構についてはまだ十分に解明されておらず、実用可能な対象材料なども限られている。

このように、溶接雰囲気という点を除けば、両者は共に高エネルギービーム溶接法として、その目的、施工方式、適用対象などに本質的な差がないにもかかわらず、それぞれのビームの利用技術の成熟度がその溶接性能と適用範囲を制限している状況にある。

本研究の目的は、高エネルギービーム溶接法の工業的利用範囲を拡大するため、電子ビーム溶接と炭酸ガスレーザ溶接の溶込み形成機構の比較を通じて、溶接の基本特性を理解することにある。

本論文では、代表的工業用金属材料の軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウムおよび銅に対する電子ビーム溶接実験により検討した溶込み形状の形成機構を基に、高エネルギービーム溶接特性の評価指標を熱伝導論的に導いた。

* 原稿受付 平成9年4月14日

** 正会員 三菱電機(株)生産技術センター(尼崎市塚口本町8-1-1)

*** 正会員 北海道大学工学研究科(札幌市北区北13条西8丁目)

2. 実験の方法

2.1 実験材料と熱定数

試料寸法は、板幅100 mm以上、長さ250 mm以上、板厚が溶込み深さの120~130%とし、材質はステンレス鋼 SUS 304、一般構造用鋼(軟鋼) SS 41、工業用純アルミニウム A 1100、および純銅(タフピッチ銅 T Cu またはりん脱酸銅 D Cu)を採用した。材料の熱定数を表1に示す。

Table 1 Thermal constants of the metals, used

Materials	c	ρ	k		α	T_m	H_F
			20℃	M.P.	M.P.		
Mild steel	0.46	7.9	0.543	0.293	0.08	1500	270
Stainless steel	0.50	7.9	0.167	0.293	0.07	1460	270
Copper	0.38	9.0	3.93	3.34	1.14	1083	207
Aluminum	0.92	2.7	2.22	2.22	0.91	660	395

表中、c: 比熱(J/g·K), ρ : 密度(g/cm³), k: 熱伝導度(J/cm·K·s),

α : 熱拡散率(cm²/s), T_m : 融点(℃), H_F : 溶融潜熱(J/g)

2.2 実験装置と条件

溶接実験には、加速電圧90 kV型の電子ビーム溶接機(加工距離: 16.4 cm, 溶接室真空度 p: 0.133 Pa)と60 kV型の電子ビーム溶接機(加工距離: 20 cm, 溶接室真空度 p: 1.33 Pa)を使用した。脱脂処理を施し、溶接の直前に室温に管理した試料に対して、いずれの場合も電子ビームを上から照射して(下向き姿勢)、電子ビーム溶接のパラメータとして溶接速度、電子ビーム電力(加速電圧×電子ビーム電流)およびビーム焦点位置(ビーム集束レンズ電流)を変化させて、ビードオンプレート実験を行った。

2.3 溶込み形状の定義と測定

電子ビーム溶接部の断面は図1に示すように、材料内部での電子ビームの直接加熱による幅の狭い溶融部と表面での溶融金属の対流による幅の広い二次溶融部を合成した、いわゆるワインカップ形状になる。

ビードオンプレート後、溶込み断面形状パラメータとして、溶込み深さ h_p (cm)、表面ビード幅 w (cm) および溶融断面積 s (cm²) を測定した。

なお、 h_p/w を溶込み比、 s/h_p を平均溶融幅 d (cm)、そして h_p/d をアスペクト比と定義する。

Fig. 1 Cross-sectional shape of weld

3. 結果と考察

3.1 溶込みに及ぼすビーム制御因子の影響

3.1.1 ビームの焦点位置、加工距離と溶込み形状

電子ビームは電磁レンズが形成する磁界を使って、その軌道を曲げるにより集束される。最も細く絞られた部位をビーム焦点（ビームウエスト）、レンズ中心部からビーム焦点までの距離を焦点距離と呼ぶ。集束レンズ電流 I_f と焦点距離 f の関係は、一般につきの近似式で表される。

$$f/r = 98 V / (N \cdot I_f)^2 \quad (1)$$

ここで、 f ；焦点距離 (cm)、 I_f ；集束レンズ電流 (A)、

r ；集束レンズ内径 (cm)、 V ；加速電圧 (V)、

N ；集束レンズのコイル巻数 (ターン) である。

電子ビーム断面のエネルギー強度分布はほぼ軸対称で中心部が高く周辺部が低いガウス分布になる。溶融に寄与する実効的電子ビームの直径は、例えば楕円試験片にビームを照射する AB テスト法²⁾による、60～90 kV (36～45 kW) のビームウエスト部の直径の測定値は 0.2～0.3 cm と報告されている³⁾。

ステンレス鋼について、集束レンズ電流 I_f および加工距離 W_d が溶込み深さ h_p と表面ビード幅 w に及ぼす影響を図 2 に示す。なお、ここでは加工距離を、レンズ中心部から材料表面までの距離と定義する。

集束レンズ電流を一定にして加工距離を変えていくと、 h_p は徐々に増加し、最大値を経て再び減少する。また、加工距離を一定にして集束レンズ電流を変化させても、 h_p は徐々に増加し、最大値を経て再び減少する。

一般に焦点位置は、加工距離と焦点距離の比 (W_d/f)、すなわち Ab 値で表されるが、最も深い溶込みが得られる焦点位置は

Fig. 2 Influence of focusing lens current (I_f) and working distance (W_d)

on penetration depth (h_p) and bead width (w) for stainless steel

SUS 304 : $V = 60$ kV, $I = 100$ mA, $v = 0.48$ cm/s

ビームスポット径が最も小さい材料表面 ($Ab = 1$) ではなく、表面から数 mm ～ 十数 mm 内部 ($Ab < 1$) になる。

加工距離が長くなると、最大溶込み深さを得る集束レンズ電流値が小さくなると共に溶込み深さは浅くなり、それに対応した表面ビード幅は逆に広がる。これは電子ビームの飛行距離が長くなると、雰囲気ガス分子との衝突により、ビームの運動エネルギーが失われるとともに、電子の相互反発力によりビーム径が太くなるためである。

3.1.2 電子ビーム電力と溶込み深さ

電子ビーム電力は加速電圧とビーム電流の積になるが、電圧、電流が変化するとつぎの Schwarz の式⁴⁾に従って、電子ビームのスポット径が変化する。

$$\phi = S (I/V)^{3/4} \quad (2)$$

ここで、 ϕ ；ビームスポット径 (cm)、 V ；加速電圧 (V)、

I ；ビーム電流 (A)、 S ；電子銃固有の定数 である。

このため、同じ電力でも加速電圧とビーム電流の組合せが変わると、ビームスポット径、すなわちパワー密度が変わるので溶込み深さが異なることがある。

例えばステンレス鋼の場合、図 3 (a) に示すように、加速電圧が一定でビーム電流を変化させると、電子ビーム電力 E の増加に従って溶込み深さ h_p は単調増加するが、増加勾配はやがて鈍化する。加速電圧をさらに高くすると、溶込み深さの増加は再び急勾配になるが徐々に鈍化する。また図 3 (b) に示すように、ビーム電流を一定にして加速電圧を変化させても、電子ビーム電力と溶込み深さとの関係は同様の傾向になる。

(a) at constant voltages

(b) at constant currents

Fig. 3 Effect of beam power (E) on penetration depth (h_p) for stainless steel

SUS 304 : $v = 0.555$ cm/s, $W_d = 8$ cm, $Ab = 1.0$

図 3 の結果から、電子ビーム電力、加速電圧、ビーム電流および溶込み深さの間にはつぎの実験式が得られる。

$$E = V \cdot I / 1000 = 0.43 \exp \{ 0.014 I + 1.9 h_p \exp (-0.013 I) \} \quad (3)$$

ここで、 E ；電子ビーム電力 (kW)、 V ；加速電圧 (kV)、

I ；ビーム電流 (mA)、 h_p ；溶込み深さ (cm) である。

h_p をパラメータとして式 (3) を図 4 に表わす。同じ溶込み深さを得るのに必要な電子ビーム電力は電圧と電流の組合せにより異なっている。そして最小の電力で所期の溶込み深さが得られる組合せは、

式 (3) にて $dE/dI = 0$ とすると、

$$h_p = 0.567 \exp(0.013 I) \quad (4)$$

これを、式 (3) に代入すると、

$$V \cdot I / 1000 = 0.43 \exp(0.014 I + 1.07) \quad (5)$$

となる。これも併せて図 4 に示す。

Fig. 4 Relation between accelerating voltage (V), beam current (I) and penetration depth (h_p) for stainless steel

SUS 304: $v = 0.555$ cm/s, $W_s = 8$ cm, $Ab = 1.0$

一般に、加速電圧により高い運動エネルギーを与えられた電子ビームは、材料を蒸発してキーホールを形成しつつ内部まで侵入するが、定常状態ではキーホールは蒸発の反発力、蒸気の静圧、熔融池前部と後部との温度差による表面張力流などのキーホールを広げる力と、熔融金属の重量などのキーホールを埋める力との平衡関係で維持されると考えられている⁵⁾。

図 4 の結果から、単に加速電圧を高めるだけでは、パワー密度が上がって深いキーホールが形成されるものの、ビーム径が細いためキーホール径も小さくなるので、内部に滞留する熔融金属に妨げられて、電子ビームを底部まで到達させるのは困難になる。その場合は、むしろビーム電流を増やして太いビーム径でキーホールの開口部を広げることにより、熔融金属の排出を促進する方が、溶込み深さを大きくするのに効果的であると言える。

なお、加速電圧とビーム電流の組合せが溶込み深さに及ぼす影響は、軟鋼の場合はステンレス鋼と同様に顕著であるが、アルミニウムや銅の場合はあまり認められない。

3.2 溶接速度と溶込み断面形状パラメータ

電子ビーム電力が一定のとき、溶接速度の増加に反比例して材料の単位表面積当りの照射エネルギーが減少するので熔融断面は当然減少するが、その傾向は溶込み深さ、表面ビード幅、および平均溶融幅ではそれぞれ異なる。

3.2.1 溶込み深さおよび表面ビード幅の速度依存性

ステンレス鋼に対し、ビーム出力を 9 kW 一定で溶接した場合の、溶込み深さ h_p 、表面ビード幅 w および溶込み比 (h_p/w) と溶接速度の関係を図 5 に示す。

図 5 から、溶込み深さ h_p と溶接速度 v との間には、

$$0.5 < v < 4.83 \text{ cm/s にて, } h_p \propto v^{-0.85}$$

の関係が成立する。

しかし、表面ビード幅 w と溶接速度 v との間では、

$$v < 1.67 \text{ cm/s にて, } w \propto v^{-0.85}$$

$$v > 1.67 \text{ cm/s にて, } w \propto v^{-0.42}$$

の関係になる。

このように速度範囲によって、表面ビード幅の速度依存性が変化するので、溶込み比 (h_p/w) は、溶接速度の増加に従って大きくなるが、1.67 cm/s 以上では今度は小さくなる。

Fig. 5 Influence of welding speed (v) on penetration parameters for stainless steel

SUS 304: $E = 9$ kW, $Ab = 1.0$

軟鋼の場合も同じ速度範囲では、ステンレス鋼と同様に、溶込み深さおよび表面ビード幅は溶接速度の累乗と比例関係になり、その冪指数もほぼ同じになる。ただし溶込み比の極大値はステンレス鋼よりも少し低速度側の 0.83 cm/s になる。

表面ビード幅が低速度で著しく広がる理由は、キーホールから流出した高温の熔融金属による二次溶融が促進されるためである⁶⁾。すなわち溶接速度が遅くなると、電子ビームによる熔融池が側方に広がりやすいことに加えて、電子ビームの滞留時間が長くなるため、エネルギー強度の低いビーム周辺部も材料表面の溶融に寄与し、実質的に太いビーム径で加工したのと同等になることが原因である。

3.2.2 平均溶融幅およびアスペクト比の速度依存性

軟鋼に対して、ビーム出力 22.5 kW にて最大の溶込み深さが得られる条件で溶接した場合の、溶込み深さ h_p 、平均溶融幅 d およびアスペクト比 (h_p/d) と溶接速度 v との関係を図 6 にまとめて示す。

溶接速度の遅い領域では、 h_p は指数が -0.15 と小さいが、 d は指数が -0.9 と大きく速度依存性が強いので、アスペクト比 (h_p/d) は速度の増加に従い大きくなる。一方、溶接速度の速い領域になると、 h_p は指数が -0.8 と速度依存性が強くなるが、 d は指数が -0.1 と小さく速度依存性が弱くなるので、(h_p/d) は速度の増加に従い小さくなる。そして、 $1.0 < v < 2.0$ cm/s、すなわち中間の速度領域は、 h_p と d の指数はともに -0.5 で、速度依存性がほぼ同じ程度になるため、溶接速度にかかわらず (h_p/d) は一定で、しかも極大になっている。

軟鋼に対する図 6 の実験結果から、低速度領域ではキーホール内の熔融金属により、溶込み深さの増加は妨げられるが、熔融金属からの伝導熱により平均溶融幅は急拡大される。高速度領域になると、熔融金属の滞留が起きにくい上に、ビーム周辺部が溶融に寄与せず実質的にエネルギー強度の高い中央部だけ

の小さいビーム径になるので、平均溶融幅はあまり変わらないが、単位表面積当りの照射エネルギーの減少により、溶込み深さが急減する。

中間の速度領域でアスペクト比が一定かつ極大になる理由は、その速度における溶融に必要なエネルギー強度に限った、実効的ビーム径に対応したキーホールの開口径がキーホールの深さと釣り合い溶融金属が円滑に排出されるためと考えられる。

Fig. 6 Influence of welding speed (v) on penetration parameters for mild steel

SS 41: $E = 22.5$ kW, $Ab = 0.8$

また、中間の速度領域 $0.5 < v < 3.33$ cm/s において純アルミニウム (A1100) および純銅 (D Cu) に対し、ビーム出力 22.5 kW にて最大溶込み深さの得られる条件で溶接した場合の、溶込み深さ、平均溶融幅およびアスペクト比の溶接速度依存性を比較し、結果を図7に示す。

純アルミニウムの場合は、溶込み深さと平均溶融幅に対する指数がともに -0.35 となり、軟鋼と比較していずれも溶接速度依存性が小さいが、アスペクト比はほぼ一定である。また純銅の場合は、指数がともに -0.2 となって溶接速度依存性がさらに小さいが、純アルミニウムと同様に、アスペクト比がほぼ一定である。

図7の結果で、純アルミニウムや純銅の溶込みの溶接速度依存性が軟鋼よりも小さい理由は、材料の熱伝導性がよいためと

Fig. 7 Influence of welding speed (v) on penetration parameters for A1100 aluminum and D Cu copper

A 1100 (○, △, □), D Cu (●, ▲, ■): $E = 22.5$ kW, $Ab = 1.0$

考えられる。すなわちキーホール内に溶融金属が滞留しやすい上に、実質的なビーム径も小さくなって速度依存性が小さくなるためである。

このように中間速度領域では、各種金属材料の溶込み深さと平均溶融幅の溶接速度依存性がほぼ同等になり、アスペクト比は速度に依存せずほぼ一定になる。

3.3 電子ビーム溶接の溶融効率

3.3.1 溶融効率の定義

材料を溶融させるのに必要な熱量 Q_m と実際に材料が吸収した熱量 Q との比 η は溶接における溶融効率と定義される¹⁾。

$$\eta = Q_m / Q \times 100 (\%) \quad (6)$$

表1の材料の熱定数を使用して η はつぎの理論式で表される。

$$\eta = s \cdot v \cdot c \cdot \rho (T_f + H_f/c) / Q \times 100 (\%) \quad (7)$$

ここで、 T_f ; 融点 T_m と初期温度 T_0 の差 (K), Q ; 入熱 (J/s), s ; 溶融断面積 (cm^2), v ; 溶接速度 (cm/s) である。

式(7)の右辺は前項、後項を変形して、無次元量の積として表すことができる。すなわち、

$$\eta = (h_p \cdot k \cdot T_m / Q) \cdot (v \cdot d / \alpha) \times 100 (\%) \quad (8)$$

ここで、 h_p ; 溶込み深さ (cm), d ; 平均溶融幅 (cm),

$$T_m = T_f + H_f / c \quad \text{である。}$$

式(8)により、溶接の入熱条件と溶込み断面形状パラメータを関係付けることができる。

3.3.2 移動熱源モデルと熱伝導論的计算

溶接プロセスは、熱源が一定速度で移動する間に被溶接材に対して熱を与え、昇温、溶融、冷却、凝固するものであり、物体中の熱伝導の問題として理論的に取り扱われ、材料の単位体積に対して、単位時間に流入する熱量と流出する熱量との差が昇温または冷却になる。

著者らは今までの実験結果から、中間の速度範囲では平均溶融幅 d が溶込み深さに比例し、溶接速度の累乗にも比例するので、これを便宜的に実質的な電子ビーム半径とみなし、溶接線に垂直の断面が、表面での幅 $2d$ 、深さ h_p の逆三角形になるクサビ形の体積熱源が金属材料中を移動することにより溶接が行われるというモデルを仮定した。

ところで橋本らは電子ビーム溶接の溶込み形状などから、表面幅をビーム流径と同じ大きさの ϕ 、深さを h_p とする逆三角形の断面を有し、溶接線方向の長さが ϕ である立体（三角柱）を考えこの立体がビームにより瞬間的に溶融したときに起きる熱収支を考察している⁹⁾。そして、電子ビームの吸収効率 100%、蒸発熱 2.5% と見積り、初期温度を 0°C として、入熱のほとんど全てが溶融と熱伝導になるとしたつぎの近似式を導いている。

$$V \cdot I / v \approx (1/2) \cdot h_p \cdot \phi \cdot [(c \cdot \rho \cdot T_m + \rho \cdot H_f) + 5k \cdot \{(1/\phi) + (v/2\alpha)\} \cdot T_m \cdot (1/v)] \quad (9)$$

そこで著者らは式(9)を引用して、クサビ形移動熱源モデルに対応した式(8)の形の溶融効率式をつぎのように導出した。

$\phi = 2d$, $T_m = T_f + T_0$, $T_0 = T_f + H_f/c$ と置き換えて、

$$(h_p \cdot k \cdot T_m / Q) \cdot (v \cdot d / \alpha) = 1 / [1 + 2.5 \cdot \{(\alpha / v \cdot d) + 1\} \cdot (T_f / T_m)] \quad (10)$$

このモデルの場合、右辺のパラメータ T_f/T_m は材料物性および材料の初期温度に依存する量で、実際上 0.4 ~ 0.8 の範囲になる。

また、Adams は二次元、および三次元の熱伝導の場合の材料の最高到達温度分布の近似式を求めている¹⁾。著者らはこの結果を引用して、最高到達温度 $T_p = T_m + H_f/c$ になる点が溶融池と母材との境界点になると仮定し、溶込み形状を想定す

ることにより、式(8)の形の熔融効率式をつぎのように導出した。すなわち、

$$T_p - T_0 = (Q \cdot v / 2\pi \cdot k \cdot \alpha \cdot e) / [2 + (v \cdot R / 2\alpha)^2] \quad (11)$$

表面点熱源モデルの場合、半径 R の半球形溶込みになるので、深さ $h_p = R$ 、平均溶融幅 $d = \pi R / 2$ と想定して、

$$(h_p \cdot k \cdot T_m / Q) \cdot (v \cdot d / \alpha) = 1/e - 2\pi^2 \cdot (h_p \cdot k \cdot T_m / Q) \cdot (\alpha / v \cdot d) \quad (12)$$

二次元の熱伝導の場合の最高到達温度分布の近似式は、

$$T_p - T_0 = (Q \cdot \alpha) / (k \cdot g \cdot v \cdot R \cdot \sqrt{2\pi e}) \quad (13)$$

線熱源モデルの場合、半径 R 、長さ h_p の円柱形溶込みになるので、深さ $h_p = g$ 、平均溶融幅 $d = 2R$ と想定して、

$$(h_p \cdot k \cdot T_m / Q) \cdot (v \cdot d / \alpha) = \sqrt{2/\pi e} \quad (= 0.4839 \dots) \quad (14)$$

各熱源モデルによる熔融効率式(10)、(12)および(14)をそれぞれ熔融効率曲線 η_v 、 η_p 、および η_l として図8に表す。

Fig. 8 Melting efficiency η of moving sources

3.3.3 各種金属の熔融効率

各種材料について種々条件を変えて電子ビーム溶接を行い得られたデータを、入熱条件として電子ビーム電力と溶接速度を、溶込み断面形状パラメータとして深さと平均溶融幅を採用し、表1の材料熱定数を用いて無次元化処理したものを、前述の熱源モデルによる理論曲線と併せて図9に示す。なお便宜上、初期温度は0℃とし、熱伝導度 k の値は温度によって大きく異なるが、本論文では融点付近の値を使用してデータを処理した。

入熱条件が変わると熔融効率 η は変化するが、その傾向はいずれの金属の場合も、クサビ形体積熱源モデルによる理論曲線 η_v とよく一致している。

例えば、軟鋼の場合は材料パラメータ T_r/T_m が0.7の曲線によく一致しており、熔融効率 η は30%弱に収まる。ステンレス鋼の場合は T_r/T_m が0.4の曲線と割合一致するが、 $v \cdot d / \alpha$ が小さくなるに従い T_r/T_m が0.7の曲線に近づき、 η は50%から20%まで低下する。純アルミニウムの場合は $v \cdot d / \alpha$ が小さいので、 η は34%から15%の範囲とやや低いが、 T_r/T_m がやや低いが、 T_r/T_m が0.4～0.6のときの曲線と一致する。純銅の場合は $v \cdot d / \alpha$ が小さい範囲では η が5～15%程度で低いが、 T_r/T_m が0.4の曲線と合致している。しかし $v \cdot d / \alpha$ が大きくなると理論曲線から外れ、 η はむしろ低下する傾向になる。

Fig. 9 Melting efficiency η of electron beam welding
SS 41 (○), SUS 304 (●), A 1100 (○), T Cu (▲)

4. 結 言

本論文で、つぎのような結論が得られた。

- (1) 電子ビームによる深溶込みはキーホール開口が深さと均衡して溶融金属の排出を促進することにより形成される。キーホール開口の維持に寄与する実効的な電子ビーム径はビーム出力（加速電圧、ビーム電流）、溶接速度、材質などにより異なるが、便宜的に平均溶融幅で近似できる。
- (2) 電子ビーム溶接の熔融効率は、移動熱源モデルを仮定した熱伝導論的計算から、材料の熱定数、入熱（ビーム出力と溶接速度）、および溶込み断面形状パラメータ（溶込み深さと平均溶融幅）を用いた式で表現できる。
- (3) 溶込み深さを高さ、平均溶融幅の2倍を底辺とする逆三角の断面形状を有するクサビ形熱源モデルを仮定して、熱伝導論的に導出した熔融効率式は、各種金属の電子ビーム溶接の結果とよく一致することから、高エネルギービームによる溶接特性を評価する有効な指標になる。

参 考 文 献

- 1) 宮本 勇, 森 清和, 丸尾 大: 薄板のCO₂レーザ溶接時に誘起されるプラズマブルームの性質, 溶接学会論文集, **13**, 2 (1995) 211.
- 2) Y. Arata, M. Tomie, K. Terai, H. Nagai and T. Hattori: Shape Decision of High Energy Density Beam, Trans. JWRI, **2**, 2 (1973) 130.
- 3) 奥田満夫, 大峯 恩, 小林 実, 安永政司: 厚板の電子ビーム溶接に関する研究, 溶接学会電子ビーム溶接研究委員会資料 EBW-170-77 (1977)
- 4) H. Schwarz: Electron Beam Processes at Different Voltages, Trans. 2nd Int. Congress on Vacuum Science and Technology, **2** (1962) 699.
- 5) 橋本達哉, 松田福久: 電子ビーム溶接時の溶融池の溶融金属に働く力の検討と穿孔穴の維持に関する考察, 溶接学会誌, **33**, 12 (1964) 18.
- 6) 入江宏定, 塚本 進, 稲垣道夫: 電子ビーム溶接におけるビーム特性と溶込み形状 (第1報), 溶接学会誌, **51**, 11 (1982) 941.
- 7) 溶接学会溶接アーク物理研究委員会編: 溶接プロセスの物理, 第3章熱輸送とビード形成の機構, (1995) 116.
- 8) 橋本達哉, 松田福久: 電子ビーム溶接ビードの溶込み深さに関する熱伝導論的計算と検討について, 溶接学会誌, **33**, 9 (1964) 38.
- 9) C. Adams, Jr.: Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, Weld. Res. Suppl., May (1958) 210s.