高エネルギービームによる溶接特性 (第2報)*

—— 大出力炭酸ガスレーザによる鉄鋼材料の溶込み形成 ——

大 峯 恩** 平 本 誠 剛*** 池 田 正 幸†

Welding Characteristics by High Energy Beams (2nd Report)
— Penetration of Steels by High Power Carbon Dioxide Gas Laser —

Megumi OHMINE, Seigo HIRAMOTO and Masayuki IKEDA

As the second report of serial studies on welding by high energy beams, penetration mechanisms by carbon dioxide gas laser for steels were discussed. On the basis of systematic bead-on-plate tests, the fundamental welding characteristics of laser beam were estimated in comparison with that of an electron beam. The results obtained are as follows: (1) As an inevitable consequence that the laser beam in the key hole is mainly absorbed at the side wall, input power density to the bottom and aspect ratio of penetration by laser beam are lower than those by an electron beam. A depth and an opening of the key hole are in the state of equilibrium at any welding speed, then, the aspect ratio is almost constant independently of the speed. (2) The welding speed for the laser is not restricted at higher side by an ability of penetration which declines in proportion to the involution of speed but by an outbreak of humping bead, similar to the electron beam. (3) The penetration formation mechanisms for steels of a laser and an electron beam can be treated equally by using the wedge type volume source model based on the heat conduction theory.

Key words: CO₂ laser beam welding, penetration, steel, melting efficiency, heat conduction model, electron beam welding

1. 緒 言

高エネルギービーム熱源の中で電子ビームは、自動車などの精密機械部品に対する必要不可欠の高エネルギー溶接手段に位置付けられ、既に数多く導入されているが、真空を必要とするのが難点である。そこで大気圧雰囲気で大出力ビームを利用できる炭酸ガスレーザの適用が期待されている。

金属に対して、種類を問わずほぼ100%吸収される電子ビーム¹⁾に比べて、波長10.6 μmの炭酸ガスレーザビームの金属面に対する吸収率は一般に低い。純アルミニウムや銅は吸収率が数%以下で溶融そのものが困難であるが、鉄鋼のように吸収率が10%近くになると、集束ビームにより表面が溶融蒸発して形成されたキャビティによって、さらにビーム吸収量が增大するので²⁾、深い溶込みが得られる可能性がある。

通常、新溶接法の実用に際してはその時の技術水準を基に、溶接品質の安定性、溶接コストなどについて比較して、採否が判定される。炭酸ガスレーザビーム溶接法と電子ビーム溶接法との間には、ビーム固有の特性の違いに加えて、現時点では技術的成熟度に差がある。とくにレーザビーム溶接機構についての知見がまだ不十分なため、正当な評価が困難な状況にある。

本論文では、鉄鋼材料に対するレーザビーム溶接実験の結果を、前報¹⁾の電子ビーム溶接特性と比較し、また熱伝導論的に導出した溶融効率曲線を用いて評価することにより、大出力炭酸ガスレーザビーム溶接の基本的特性を明らかにするとともに、溶融効率式の実効性を検証した。

2. 実験の方法

2.1 実験装置

溶接実験に使用した大出力炭酸ガスレーザは、無声放電を補

助放電とした直流グロー放電励起方式の3軸直交形発振器である³⁾。長時間にわたって安定したビーム品質と出力を確保するため、耐光強度が弱い半透過鏡が不要な正分岐共焦点形共振器の不安定形共振器を採用している³⁾。

取り出されるビームはリングモードビームになるが、ビームの外径 D_2 と内径 D_1 の比 (D_2/D_1)、すなわちビーム拡大率 (M 値) は共振器のビーム取出し用穴付きミラーの交換により変えられる構造になっている。

ビームの集束には ZnSe ($f: 25$ cm) または KCl ($f: 40$ cm, 60 cm) レンズを採用した。レンズへの入射ビームの直径 D は一定 (6.5 cm) で、レンズ交換により F 値 (f/D) が変わる。

2.2 実験材料と実験条件

表面を酸洗処理したステンレス鋼 SUS 304 (板厚 2.5 cm) に対して、レーザビームを上から照射して (下向き姿勢)、ビーム出力、溶接速度、 M 値および F 値を変化させて、ビードオンプレート実験を行った。溶接中の表面ビードの酸化防止と金属プラズマの昇温抑制のため、試料表面の 0.5 cm 上方に設置したビームと同軸のノズル ($\phi 0.5$ cm) から、ヘリウムガス (流量 80 L/min) を溶融部に吹き付けた。

なお、低温のプラズマはレーザの透過性がよく⁴⁾、ビーム出力が大きいと溶融部に十分エネルギーが供給されるので、サイドガスによるプラズマ除去はとくに行わなかった。また、ビーム出力は試料の上に設置したパワーメータを使用して、溶接試験の直前に毎回計測した。

前報¹⁾と同様ビードオンプレート試験後、溶込みの断面形状パラメータとして、表面ビード幅 w 、溶込み深さ h 、および平均溶融幅 d を測定した。

3. 結果と考察

3.1 溶込みに及ぼすパワー密度の影響

3.1.1 レーザビームと電子ビームの溶込み形状

鉄鋼材料の炭酸ガスレーザビーム溶接の場合も、電子ビーム溶接の場合と同様、ビームを集束してパワー密度を高めること

* 原稿受付 平成9年4月14日

** 正会員 三菱電機㈱生産技術センター (尼崎市塚口本町8-1-1)

*** 三菱電機㈱技術研究所 (三田市あかしあ台2-2-1)

† 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)

により幅が狭く深い溶込みが得られる。

ステンレス鋼に対する炭酸ガスレーザービーム溶接（LBW）と電子ビーム溶接（EBW）の溶込み断面形状を図1に示す。溶接条件は同等で、出力 10 kW、速度 1.67 cm/s、焦点距離 25 cm、焦点位置は試料表面から約 0.6 cm 内部に設定した。

Fig. 1 Comparison of penetration shapes between LBW and EBW for stainless steel
SUS 304 : 10 kW, $v = 1.67$ cm/s, $f = 25$ cm

電子ビームの場合は真空雰囲気中で、またレーザービームの場合はヘリウムシールドで溶接が行われたため、どちらもプラズマの影響がほとんどなく、狭い幅で深い溶込み形状を示している。電子ビームの場合は溶融金属の対流による二次溶融により表面ビード幅が広がる¹⁾が、溶込み深さと平均溶融幅との比、すなわちアスペクト比は 17.1 である。これに対してレーザービームの場合は表面ビード幅がやや広くさび形の溶込みになり、アスペクト比は 7.2 と小さく、さらに溶接条件を種々変えても、10 を超えることはなかった。

深溶込みを得るにはキーホール底部でのエネルギー吸収を確保する必要がある。したがってレーザービーム溶接のアスペクト比が電子ビーム溶接よりも小さい理由は、単にパワー密度の差によるのみならず、キーホール内部でのビームの吸収機構、とくにビーム吸収部位の相違に基づく材料の単位面積（または単位体積）当りの単位時間での吸収エネルギー、すなわち入熱密度も大きく関係していると考えらるべきである。

金属への吸収率がほぼ 100 % である電子ビームは、間欠的に流動するキーホール内壁の溶融金属⁶⁾にはビームの進路を遮る場合にだけ吸収されるが、キーホールの内部に充満する金属蒸気またはそのプラズマ中をエネルギーはある程度減衰しながらも直進するので、底部に到達するビームの入熱密度は比較的高く、キーホールが深くなる。一方、炭酸ガスレーザービームは金属への吸収率が低いのでキーホール内では金属蒸気で散乱され、また溶融金属で反射・吸収を繰り返して壁面で吸収される²⁾ので、キーホールは径が広がるがあまり深くない。

3.1.2 M 値と溶込み断面形状パラメータ

リングモードビームの M 値の溶込み断面形状パラメータに及ぼす影響を、ステンレス鋼について検討した結果を図2に示す。ビーム出力 10 kW、溶接速度 1.67～16.7 cm/s、焦点距離 25 cm の条件で、 M 値を 1.5, 2.0 および 2.5 と変えて、ビードオンプレート実験を行って得られた溶込み断面形状である。なお、焦点位置は溶込み深さが最大になるように、速度 1.67 cm/s の場合は試料表面から 0.6 cm 内部とし、これよりも高速になるに

Fig. 2 Effect of beam magnification factor (M) on penetration parameters for stainless steel
SUS 304 : 10 kW, $f = 25$ cm,
 $v = (\bigcirc: 1.67, \bullet: 5, \square: 8.33, \blacktriangle: 16.7)$ cm/s

従い予備実験の結果を基に少しずつ上方にずらして調整した。

図2の結果から、 M 値が大きくなるに従い、溶込み深さが増加し、溶融幅がやや狭くなる傾向が見える。しかし M 値による溶込み深さの増加傾向には、溶接速度によってとくに有意差が認められない。

リングモードビームの焦点面での径方向のエネルギー強度は、回折現象により、中心部に鋭いピークをもつ減衰振動分布形態になり、 M 値により大きく変化する。そのため光学的なビーム径はその定義次第で異なるが、ピーク強度 I_0 は M 値、 F 値を変数とするつぎの関数で表現される⁷⁾。

$$I_0 = (P \cdot \pi / 4 \lambda^2 \cdot F^2) \cdot (1 - 1/M^2) \quad (1)$$

ここで、 P ; ビーム出力 (kW), λ ; レーザ波長 (cm) である。式(1)から、 M 値が増加するとビームのピーク強度が高くなる。

軟鋼に対して出力 1～5 kW、溶接速度 1.67～25 cm/s の条件で M 値 1.5 と 2.0 の溶込み深さを比較した以前の研究結果⁷⁾でも、 M 値が大きい方が溶込みが深くなる傾向が認められた。そして出力 5 kW の場合、速度が 3.33 cm/s 以下で溶込み深さが 0.7 cm 以上のときは、 M 値による差はほとんどないが、速度が大きくなるに従い徐々に差が広がった。またビーム出力が小さくなるに従い、 M 値による溶込み深さの差はさらに広がった。

ビーム出力が小さく高速度の溶接条件の下で、溶込み深さまたはキーホールが浅い場合に、ピーク強度の増加により溶込みが深くなる理由は、底部での入熱密度が上がるためと解釈できる。しかしビーム出力が大きく低速度の溶接条件の下で、溶込み深さまたはキーホールが深い場合に、溶込み深さのピーク強度への依存度が低くなる傾向は前報の電子ビームの場合と同様であるが、その理由は異なると考えられる。

すなわち、キーホール内をほぼ直進する電子ビームの場合は、キーホール底部までビームを到達させて深溶込みを得るには、多少パワー密度は下がるがビーム径を適度に広げて溶融金属の流出経路を確保する方が効果的であった¹⁾。一方、レーザービームの場合は、ピーク強度を高めてもキーホール内ではビームは散乱されるので、底部での入熱密度がピーク強度にあまり依存しないと考えられる。

3.1.3 F 値と溶込み断面形状パラメータ

レーザビームの F 値の溶込み断面形状パラメータに及ぼす影響を、ステンレス鋼について検討した結果を図3に示す。ビーム出力 10 kW, 溶接速度 1.67~16.7 cm/s の条件で、焦点距離を 25 cm, 40 cm, および 60 cm と変えてビードオンプレート実験を行って得られた溶込み断面形状である。 F 値に換算すると、それぞれ 3.85, 6.15 および 9.23 になる。

Fig. 3 Effect of F number on penetration parameters for stainless steel
SUS 304: 10 kW, $M = 2.5$,
 $v = (\bigcirc: 1.67, \bullet: 5, \square: 8.33, \blacktriangle: 16.7)$ cm/s

溶接速度 1.67 cm/s での溶込み深さは F 値に無関係にほぼ一定であるが、表面ビード幅は F 値が大きくなると広がる。また溶接速度が 5 cm/s 以上の各速度での溶込み深さは、 $F = 3.85$ と $F = 6.15$ を比べてもあまり違いが認められないが、 $F = 9.23$ になると急に浅くなり、その代わり平均溶融幅が広がる傾向が見える。

軟鋼の場合、ビーム出力 3~5 kW, 溶接速度 1.67~25 cm/s の条件で得られた結果では、ビーム出力が同じでも F 値が 3.6 から 5.7 に増加しただけで溶込み深さが急減することが明らかになっている⁷⁾。

焦点でのビーム断面積は F 値の 2 乗にほぼ比例する⁷⁾ので、これに逆比例してパワー密度は低下する。図3の結果の中で、 F 値の増加により溶込みが浅くなるのはパワー密度の低下によるものと解釈できるが、溶接速度や材質によって F 値への依存度が異なるのはレーザビームの吸収機構が溶接条件によって変化することに起因すると推定される。

電子ビーム溶接の場合¹⁾は、 F 値が大きくなるに従い、溶込み深さは単純に減少し、表面ビード幅が広がる傾向にあった。これは F 値の増加によりビームスポット径が大きくなってパワー密度が低くなった分が、そのままキーホール底部での入熱密度の低下となり溶込み深さが減少したものと解釈される。

炭酸ガスレーザビーム溶接の場合はキーホールが浅いと、あまりエネルギーを減衰せずにビームは底部まで到達できるので、キーホール底部での入熱密度はビームのパワー密度に依存すると考えられる。したがって高速度でキーホールが浅い場合に、 F 値の増加によりパワー密度が限界値以下になると、キーホール底部での入熱密度が低下してさらにキーホールが浅くなるため、溶込み深さが著しく減少すると考えられる。

なお、電子ビーム溶接の場合は焦点位置の変化によって徐々に溶込み深さが変化するのに対して、レーザビーム溶接の場合

は焦点位置が材料表面近傍の一定領域内にあるときは深溶込みが得られるが、領域外になると溶込みが急激に浅くなるという傾向がある。これはパワー密度が限界値以下に低下することにより起因する「ビードの遷移現象」として既に報告されている²⁾。本実験の、溶接速度が増加したときあるいは F 値が増加したとき、それらが限界を超えると溶込み深さが大幅に浅くなるという変遷傾向は、これと同様の理由によるものと推論される。

3.2 溶込みに及ぼす溶接速度の影響

3.2.1 溶接速度と溶込み断面形状パラメータ

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ビームエネルギーが減少するため、溶融断面積は減少する。しかし前述のようにレーザビームの吸収機構が、キーホール深さにより変遷するので、パワー密度と入熱密度とは必ずしも一致しない。

図4はステンレス鋼のレーザビーム溶接における、溶接速度と溶込み断面形状パラメータとの関係を示したものである。

Fig. 4 Relation between welding speed (v) and penetration parameters for stainless steel

SUS 304: 10 kW, $M = 2.5$, $f = 25$ cm

図4からビーム出力一定のとき、溶込み深さ h_p , 平均溶融幅 d および表面ビード幅 w は溶接速度 v の累乗に比例する。すなわち、

$$h_p \propto v^{-n}, \quad d \propto v^{-m}, \quad w \propto v^{-l} \quad (2)$$

限られた速度範囲では、これらのべき指数はほぼ一定であるが、 $v = 8.33$ cm/s 付近を境界として h_p と w の冪指数は変化する。すなわち、低速度領域では $n = 0.45$, $l = 0.5$, また高速度領域では $n = 1$, $l = 0.75$ になる。このため溶込み比 (h_p/w) は速度の増加に従って大きくなり、8.33 cm/s 付近で極大になって再び減少する。

しかし d のべき指数 m は、ほぼ全領域にわたってほぼ一定の 0.45 であり、低速領域では h_p の冪指数 n と同じ値になるので、アスペクト比 (h_p/d) はほぼ一定で 7 前後になる。速度が 8.33 cm/s 以上になるとアスペクト比は減少していくが、25 cm/s の高速においても 3.0 以上の値をもつ深溶込み形状が得られる。

このように炭酸ガスレーザビーム溶接は、溶接速度が遅くなるに従ってほぼ一定のアスペクト比を維持しながら溶込みが増加するという傾向を示す。同じ速度範囲で比較すると、溶接速度が遅くなって溶込み深さが増加するに従いアスペクト比も大きくなるという電子ビーム溶接の場合の傾向¹⁾とは、大きく異

なっている。レーザービーム溶接の場合にアスペクト比が速度に無関係にほぼ一定になる理由は、レーザービームの吸収機構がキーホール形状に依存していることによるものと思われる。

アスペクト比は、ほぼキーホールの深さと開口の比に相当する。レーザービームはキーホール内で散乱されるので、溶接速度が遅くなると入熱が増加して、ある程度は底部で吸収されてキーホール深さの増加に寄与するものの、大部分は壁面での吸収によりキーホール径の拡張に費やされる。逆に、速度が速くなり入熱が減少すると、キーホールは浅くなるので、壁面での吸収量も減少して径が狭くなる。このような機構でキーホールの深さと開口が各速度で自然に均衡するため、アスペクト比がほぼ一定になると考えられる。

なお、もっと高速度になるとキーホールが浅くなってレーザービームの吸収効率が低下するので、底部での入熱密度が極端に減少して溶込み深さが急減する。

3.2.2 表面ビード形成の速度限界

前項の結果から、炭酸ガスレーザービーム溶接ではビームを集束してパワー密度を高くすることにより、25 cm/s を超える高速度においても深溶込み形成が可能であった。しかし溶接速度が大きくなると表面ビードは、幅が周期的に変動したハンピングビードと呼ばれる凹凸の激しい形態になり、ときにはビード側部に鋭い切込みのアンダカットを伴うことがある。図5は、SUS 304 ステンレス鋼のレーザービーム溶接における、ハンピングビードの外観を示したもので、比較のため電子ビーム溶接の結果もあわせて示してある。ハンピングビードは溶接部品質の信頼性が劣るため、一般に実用できない欠陥ビードとされる。

Fig. 5 Humping beads of LBW and EBW for SUS 304 stainless steel

ハンピングの原因は、例えば大電流高速アーク溶接の場合はアークそのものの電磁力に起因する電磁圧力の作用を受けて溶融池から排除された溶融金属が、十分還流できないまま凝固することによると説明される⁸⁾。レーザービームや電子ビームによる溶接の場合は溶融池から溶融金属を排除するような圧力は発生しないが、高速になると溶融池が後方に延びて表面では細長い液柱になるので、表面張力の作用により途中でくびれて凝固することが原因と考えられる。

図6はSUS 304 ステンレス鋼のレーザービーム溶接のハンピング発生限界条件を示したもので、比較のためステンレス鋼および軟鋼の電子ビーム溶接の結果もあわせて示す。

レーザービーム溶接のハンピング限界は M 値によって異なる。ビーム出力 10 kW の場合、 M 1.5 では 16.7 cm/s、 M 2.0 では 13.3 cm/s、 M 2.5 では 8.33 cm/s 付近になり、出力 15 kW の場合、 M 1.5 では 13.3 cm/s、 M 2.0 では 8.33 cm/s 付近にと低速側

に移行する。そして M 値にかかわらず 23~25 cm/s 以上ではアンダカットを伴うハンピングが発生する。

電子ビーム溶接のハンピング限界は、ステンレス鋼の場合、ビーム出力 10 kW では 8.33 cm/s、20 kW では 5 cm/s 付近になるが、アンダカットを伴うハンピングになっている。軟鋼の場合もビーム電流(出力)を上げて深溶込みになるほど、ハンピング限界速度は低速側に移行し、例えばビーム出力 10 kW において 5 cm/s、20 kW において 2.5 cm/s でハンピングが発生し、これより少し高速側でアンダカットを伴うと報告されている⁹⁾。

Fig. 6 Boundary conditions of humping bead formation

LBW for SUS 304 (○: M2.5, ◇: M2.0, □: M1.5, ×)
EBW for SUS 304 (△) and for SS 41 (▲)

このように、ハンピングの発生の限界速度はビーム出力が大きくなるほど低速側に移行するが、軟鋼よりもステンレス鋼の方が高速側になる。また、電子ビーム溶接と比較してレーザービーム溶接の方が、とくに M 値が小になるほど、限界速度は高速側になるという結果から、ハンピングは表面ビード幅が狭い、または溶込みが深い条件の場合に発生しやすい傾向がうかがえる。いずれにせよ、高密度エネルギービーム溶接においては、キーホールが形成されて深溶込みが得られる速度領域内でハンピング欠陥が発生し、実用可能な溶接速度を制限している。

3.3 炭酸ガスレーザービーム溶接の溶融効率

3.3.1 溶融効率の評価

高エネルギービーム溶接の溶融効率は、前報の結果から、くさび形体積熱源モデルを基に、熱伝導論的に導出されたつぎの理論式によく合致している¹⁾ので、比較の基準とした。

$$(h_p \cdot k \cdot T_m / Q) \cdot (v \cdot d / \alpha) = 1 / [1 + 2.5 \cdot \{(\alpha / v \cdot d) + 1\} \cdot (T_f / T_m)] \quad (3)$$

ここで、

h_p ; 溶込み深さ (cm), d ; 平均溶融幅 (cm),

Q ; 材料への入熱 (J/s), v ; 溶接速度 (cm/s),

α ; 熱拡散率 (cm^2/s), k ; 熱伝導度 ($\text{J}/\text{cm} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$),

T_f ; 融点と初期温度の差 (K), $T_m = T_f + H_f / c$,

H_f ; 溶融潜熱 (J/g), c ; 比熱 (J/g·K)

である。

炭酸ガスレーザービーム溶接データを、入熱条件としてビーム出力(入熱 Q に代用)と溶接速度を、溶込み断面形状パラメータとして溶込み深さと平均溶融幅を採用し、前報¹⁾の材料の熱定数を用いて無次元化処理したものを、電子ビーム溶接のデータと比較した。なお、本論文では実用的視点から、蒸発熱損失やプラズマの影響が無視できる条件での溶接を取り扱うこととし、また便宜上、材料の初期温度は 0℃と仮定した。

3.3.2 鉄鋼材料の熔融効率

図7はステンレス鋼に対して得られたレーザビーム溶接データと電子ビーム溶接データ¹⁾を式(3)に基づく熔融効率曲線 η_v とあわせて示したものである。

Fig. 7 Comparison of melting efficiency η between LBW (●) and EBW (Δ) for SUS 304 stainless steel

図7から、電子ビーム溶接の熔融効率 η が30%を中心に20~50%の範囲に分布するのに対し、レーザビーム溶接の η はほぼ40~50%の範囲に集中している。これは理論曲線の熔融効率が $v \cdot d / \alpha$ の増加に従い大きくなることから、電子ビーム溶接データが比較的低速度で溶融幅が狭いのと比べ、レーザビーム溶接データが比較的高速度で溶融幅が広いと解釈される。両ビームによる溶接データはプロット領域が離れているが、くさび形体積熱源モデルから導出された理論曲線 η_v の上に明らかに乗っている。

また、軟鋼に対する溶接の結果²⁾に基づくデータを同様に処理して、理論曲線とあわせて図8に示す。

図8から、電子ビーム溶接の η が20~40%の範囲で分布し、平均30%弱であるのに対して、レーザビーム溶接の η はほぼ30%強に集約されている。ステンレス鋼と比較して軟鋼のレーザビーム溶接部は溶融幅が狭くなるので、両ビームによる溶込み形状の差は少なく、溶接データのプロット領域が近接してい

Fig. 8 Comparison of melting efficiency η between LBW (●) and EBW (Δ) for mild steel

る。そしていずれのビームの場合も、くさび形体積熱源モデルの理論曲線 η_v とはよい一致を示す。

以上の結果から、炭酸ガスレーザビームによる溶込み形成機構は、熱伝導論的視点から電子ビームの場合と同一に取り扱うことができる。例えば、炭酸ガスレーザビームによる鉄鋼材料の深溶込み溶接時のビーム吸収効率は、電子ビームと同様、最大でほぼ100%になると報告されている³⁾が、レーザビームの吸収効率を100%と仮定してプロットしたデータが理論曲線にほぼ一致するという、図7および図8の結果はこのことを裏付けている。なお高速で広幅の溶込みが得られやすい炭酸ガスレーザビーム溶接は、電子ビーム溶接と比べて熔融効率が高くなる。

4. 結 言

本論文で、鉄鋼材料の炭酸ガスレーザビーム溶接特性に関して、つぎのような結論が得られた。

- (1) 炭酸ガスレーザビーム溶接の溶込み深さは、ビームの吸収効率に依存するので、キーホール深さへの依存度が強い。また、キーホールが浅いときの溶込み深さは、ビーム出力、溶接速度、ビームのパワー密度またはピーク強度への依存度が強くなる。
- (2) 炭酸ガスレーザビーム溶接のアスペクト比は、ビームがキーホール内部で散乱して壁面で吸収され、底部での入熱密度が高くないので、同じ出力では電子ビーム溶接と比べて小さいが、各速度でキーホールの深さと開口とが均衡する結果、速度に依存せずほぼ一定になる。
- (3) 炭酸ガスレーザビーム溶接の溶込み深さは、電子ビームと同様、速度の累乗に比例して低下する。しかし実用性から見た溶接速度の高速限界は、ビームの溶込み形成能力よりも表面ビードのハンピング欠陥発生によって定まる。
- (4) 炭酸ガスレーザビーム溶接では、溶接速度が速い条件でも溶融幅が広いと熔融効率が高くなるが、くさび形体積熱源モデルを用いることにより熱伝導論的に、溶込み形成機構を電子ビーム溶接と同様に取り扱うことができる。

参 考 文 献

- 1) 大峯 恩, 池田正幸: 高エネルギービームによる溶接特性(第1報)ー電子ビームによる各種金属の溶込み形成ー, 精密工学会誌, **63**, 11 (1997) 1558.
- 2) 荒田吉明, 丸尾 大, 宮本 勇, 川端文丸: 金属材料のレーザ溶接(第1報), 溶接学会誌, **49**, 10 (1980) 687.
- 3) 秋葉稔光, 永井治彦, 大峯 恩: 20 kW CO₂ レーザとその応用, 工技院大プロ超高性能レーザー応用複合生産システムの研究開発成果発表会資料, (1985) 295.
- 4) 宮本 勇, 丸尾 大: レーザ溶接における蒸発特性, 溶接学会論文集, **13**, 4 (1995) 544.
- 5) 塚本 進, 入江宏定, 稲垣道夫, 橋本達哉: ハンピングビード形成に及ぼすビーム電流の影響, 溶接学会誌, **51**, 10 (1982) 61.
- 6) 塚本 進, 入江宏定: 電子ビーム溶接時の溶融過程と溶融金属の流動挙動, 溶接学会論文集, **9**, 3 (1991) 348.
- 7) 高浜 亨, 森安雅治, 深田 篤, 平本誠剛, 星之内 進, 大峯 恩, 名井康人: リングモード5 kW CO₂ レーザの溶接性能, レーザ研究, **13**, 4 (1985) 339.
- 8) 溶接学会編: 溶接・接合便覧(1990), II編, 第3章アーク溶接法の基礎, 201.
- 9) 松廣克之, 稲葉洋次, 黄地尚義, 村上英次: 高エネルギー密度ビーム溶接におけるキーホール形成限界について, 溶接学会論文集, **13**, 2 (1995) 218.