



高エネルギー密度ビームによる溶接

荒田吉明*

High Energy Density Beam Welding

Yoshiaki ARATA

1. はじめに

通常、溶接エネルギー（あるいは熱源）の選択は、「溶接体」としての構造体あるいは部品の形状や材質、さらには経済性を考慮しながら決定される。また、同じ溶接エネルギーを同じ溶接体に適用する場合でも、その適用の仕方はいろいろ考えられ、実際には、この適用技術の問題が重要となる。すなわち、このようないろいろの問題を含めて、現実に活用できる新しい溶接法が開発される。

さて、制御可能なエネルギー源は、すべて溶接熱源として活用できる可能性をもっている。現在、工業的に利用されている主要なエネルギー源を大別すると、電磁氣的エネルギー、機械的エネルギー、化学反的エネルギー、結晶エネルギーなどであり、いずれも溶接熱源として適所に利用されている。これら各種のエネルギー源のうち、電磁氣的エネルギーを利用した熱源は、その特性を制御することが、他のエネルギー源と比べて格段に容易であり、エネルギーの集中化をはかりやすい長所を備えている¹⁾。

電磁氣的エネルギーを溶接熱源として利用する溶接法は、実用溶接法のほとんどがそれに含まれるくらいに数多くあるが、そのエネルギーの具体的な利用形態は、アーク熱、高温プラズマ流の保有熱、抵抗発熱、電子（あるいはイオン）ビームの運動エネルギー、光またはレーザー光の輻射エネルギーなどがあげられる。

アーク熱はアーク溶接の熱源として最も広く用いられている。この場合、陰極、陽極へ輸送されるエネルギーが使用されるわけであるが、それはアークプラズマの熱化したエネルギーだけではなく、他の、電極近傍で荷電粒子が加速されて得る運動エネルギー等が比較のおおきな割合を占めている。これに対し、プラズマ溶接などではアーク放電におけるプラズマ柱部分の熱化したエネルギーを積極的に利用しており、高エネルギープラズマ流の発生がその輸送効率をあげるための重要な要素となっている。抵抗加熱は電熱器の原理そのものの応用であ

り、金属接合面に直接通電し加熱溶融させる抵抗溶接法と、導電性の熔融スラグを流れる電流の抵抗熱を利用してアーク溶接に似た手法で溶接するエレクトロスラグ溶接法の2つの形式が実用されている。また、このほかにフラッシュバット溶接などのようにアーク熱と抵抗熱の両方を併用する溶接法もいくつか実施されている。

さて、このような熱源ないしは熱エネルギーの発生方法は、他の機械的、化学反的エネルギー源もふくめて、制御可能とはいえ、エネルギーの集中度という点からはおのずから限界がある。しかし、加速電子流の衝突発熱を活用する電子ビーム溶接法や、炭酸ガスレーザー光線の照射方式をとるレーザービーム溶接法は、そのエネルギー密度を極めて高いレベルにまであげることが可能で、Table 1に示すように、通常の溶接アークの10万倍にも達するエネルギー密度を得ることができる。このような高エネルギー密度ビームは、溶接のみならず、熱処理、熱切断等の熱加工に対しても、他の熱源では考えられないほどの新しい機能を発揮する。とくに溶接におけるその最も重要な特徴はエネルギー集中度の高いことによる¹⁾狭くて深い溶け込み現象を示すことであり、

Table 1. Energy densities of various heat sources.

Heat source		Energy density [kW/cm ²]
Gas flame	Oxygen-Acetylene flame	≈1
	Oxygen-Hydrogen flame	≈3
Light beam	Sun light beam	(1.6~3.6)×10 ⁻⁴
	Sun light condensed beam (1~1 000 kW)	1~2
	Arc light condensed beam (Xenon lamp~10 kW)	1~5
Arc	Open arc (Argon arc, 200 A)	≈15
	Plasma arc	50~100
	Point arc	≈1 000
Electron beam	Pulse beam	10 000~
	Continuous beam	1 000~
Laser beam	Pulse beam	10 000~
	CW beam	100~
Black body radiation (n=0, 1, 2, ...)		10 ⁿ⁺¹
T=6 500×1.7 ⁿ [K] [Ex.] T=1.5×10 ⁶ [K], at n=5		10 ⁶

昭和 57 年 5 月 10 日受付 (Received May 10, 1982) (依頼解説)

* 大阪大学溶接工学研究所 工博 (Welding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka Ibaraki 567)

したがって(2)高速度の溶接, (3)熱変形を極少に抑える溶接を可能とすることにある。

物質の結合エネルギー以上のエネルギー密度が集中すれば, それは瞬間的に蒸発し, 照射点は穿孔される。材料によつて異なるが, 鋼材の溶接に必要な実用的エネルギー密度は, 連続照射で 600 kW/cm^2 以上あればよく, 実際に使用されている電子ビーム溶接機は 1000 kW/cm^2 前後のものが多い。この程度のエネルギー密度では, 材料の加熱, 溶融はもちろん生じるが, そのエネルギー入力が強大のため, 物質のスパッタリングや蒸発も激しい勢いで生ずる。この激しい蒸発現象や, その蒸気の圧力は溶融金属を周辺部に押しやり, 結果として狭くて深い, いわゆる, 「ビーム孔」が形成される。溶接の定常状態では, エネルギーはこのビーム孔の底, および側面を通じて物質に輸送される。これが, これらの高エネルギー密度ビームが「深溶け込み溶接」を可能にする理由であり, したがって, このビーム孔が安定に形成され得るか否かが, 熱の輸送の安定性に関係することになる。ビーム孔の幾何学的形状が不規則に変動するような場合には, その周囲の溶融金属の流れにも変動が生じ, これらは溶接部に種々の欠陥を生じやすい²⁾。

このようなビーム孔がどのように形成されているかはビームの形成と材料特性に依存する。ビーム特性の点からは, Fig. 1 に示すように収束されたビームの焦点, およびその近傍の特性が, ビームの加工機能を基本的に支配する因子であり, $a_b (=D_0/D_F)$ 値はなかでも, 最も重要なパラメータである³⁾。他方, 材料特性の面では, その化学的組成, 特に含有ガス(酸素, 窒素など)や, 蒸発しやすい元素(Mn, Mg, Zn など)をどの程度含むかということと, 溶融金属の粘性などが重要な要素となる。

筆者らは, この点に関連して, 溶接中のビーム孔の挙動を高速度撮影し, それを中心に「What happens in high energy density beam welding and cutting?」と題して映画にまとめた。これは国際溶接学会においてゴールドシュミット賞を受賞したが, 興味ある向きは一見していただきたいと思う。また, 前に本誌に掲載された拙文に, 電子ビーム溶接, レーザービーム溶接の溶接装置の開発, 溶接法の基礎について述べている⁴⁾。本稿では, 高エネルギー密度ビームを用いた溶接や熱切断の基本的熱源特性について, 別の観点からまとめてみたい。

2. ビーム特性と溶接現象

電子ビーム溶接ではエネルギーの運び手は電子流であり, したがって, 通常 10^{-4} Torr よりも低圧の真空チャンバー内で作業が行われる。一方, レーザービームは電子ビームに比べるとX線の発生もなく, また大気中で光の減衰がほとんどないので, 作業は大気中で行え

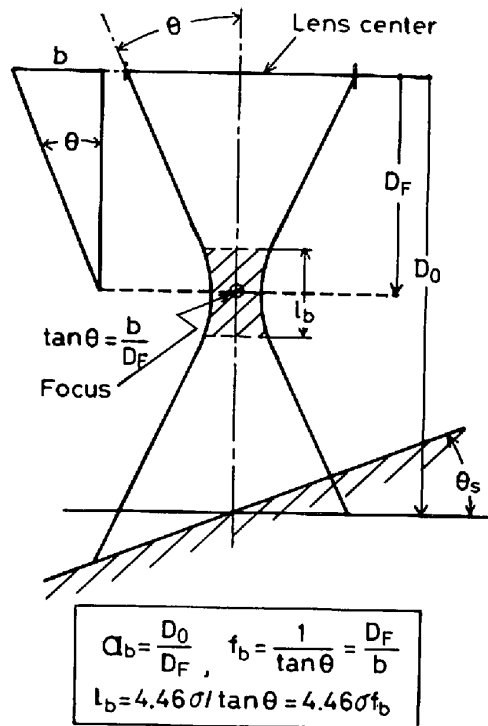


Fig. 1. General view of high energy density beam and its parameters.

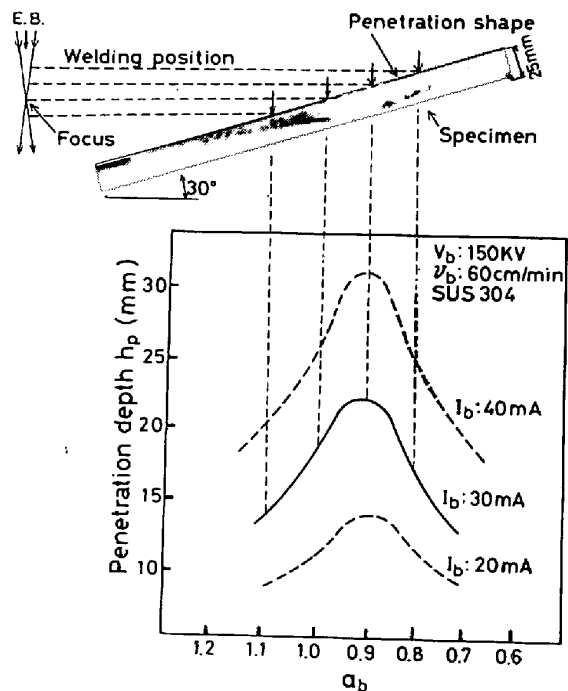


Fig. 2. Relation between active parameter a_b and penetration depth h_p for various current I_b .

る。このことは, それぞれの作業性能に差異をもたらしているが, それ以外に溶接過程ではいくつかの点で基本的な相異がある。

先に述べたように高エネルギー密度の電子ビームやレーザービームは, 一般に Fig. 1 に示すような収束ビ-

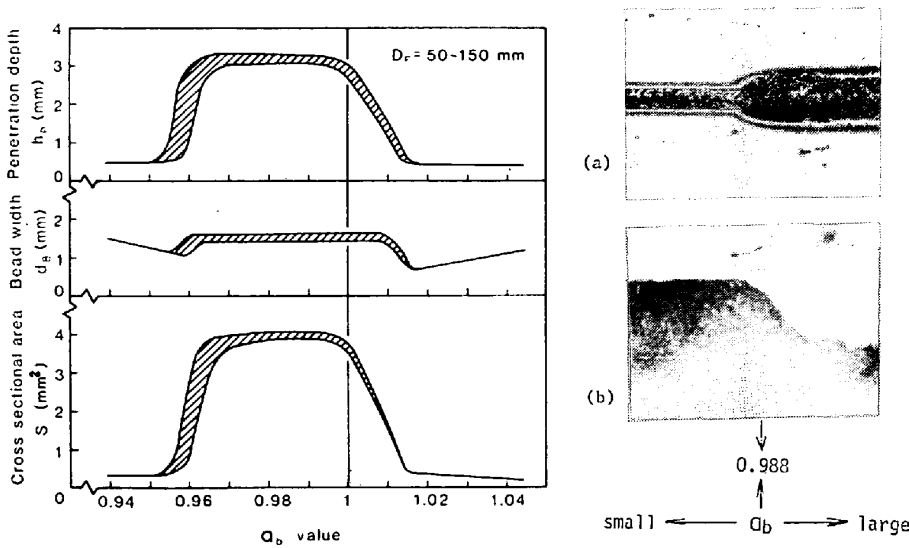


Fig. 3

Fig. 3. Variation in penetration depth h_p , bead width d_B and cross section S with a_b values in laser welding. Photographs in the right side of the figure represent the changes in bead width (a) and penetration depth (b) due to the variation in a_b value.

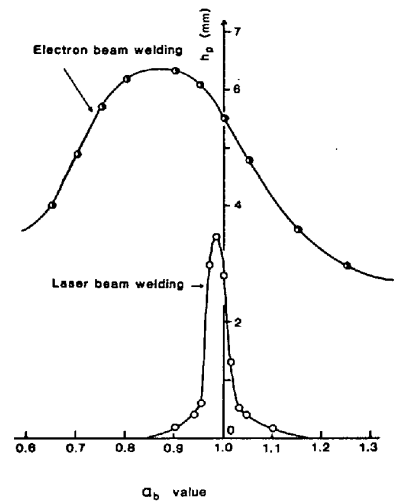


Fig. 4

Fig. 4. A comparison of laser welding with electron beam welding for h_p - a_b relation.

ムとして用いられる。このビームの焦点近傍(図中斜線部)がエネルギー密度の高い領域(ビーム活性域)であり、この部分が溶接部のどの深さに位置するかが重要な問題である。これは a_b 値で表すことができるが、例えば Fig. 2 に示すように電子ビームの a_b 値を連続的に変化させると溶け込み深さ h_p は、連続的に大きく変化する。しかしレーザービームを用いた場合、その溶け込み深さや溶け込み幅(ビード幅) d_B は、 a_b 値の変化によつて不連続的とも思えるくらいに急激に変化する(ビード遷移現象)⁵⁾。これは、Fig. 3 に示すように焦点位置と試料面とのわずかな位置的“ずれ”によつてビード形態に急激な変化の生じることを表しており、レーザービーム溶接の場合特に留意すべき問題である。電子ビーム溶接の場合、このような現象は存在しない。したがつて、レーザービームを熱源として用いる場合の a_b 値の“ずれ”の許容度 $\pm \Delta a_b$ は Fig. 4 に示すように、電子ビームと比較して非常に小さい。

さて、Fig. 1 に示すようなビーム形状を求めて、焦点位置やビーム活性域を知ることが a_b 値を正確に設定

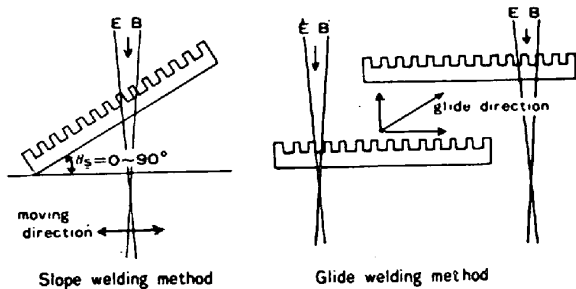


Fig. 5. Schematic drawing of AB test methods.

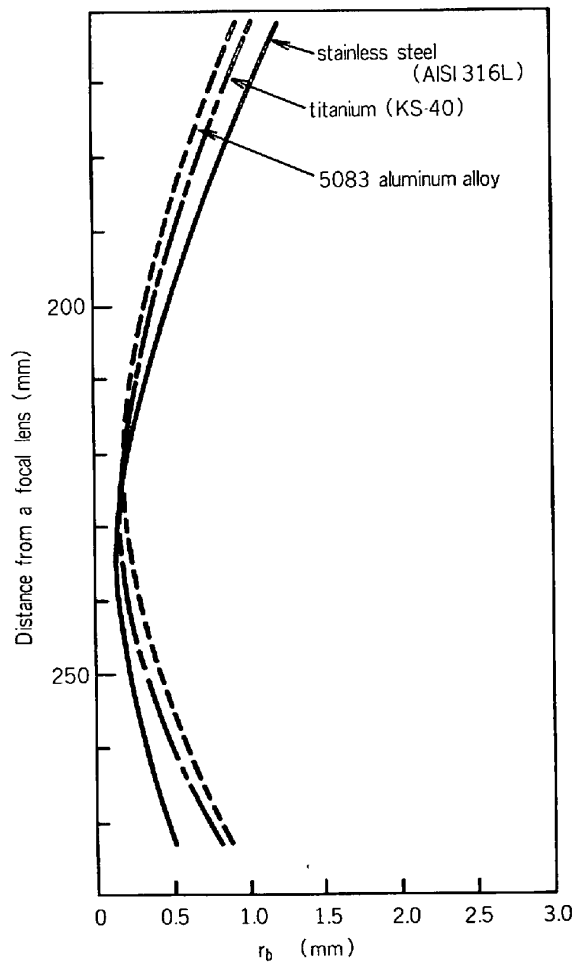


Fig. 6. Summarization of proper beam shape for several kinds of materials, which are obtained with AB test method.

するには必要なことであるが、このようなエネルギー密度の極めて高いビームでは、それを厳密に測定することはそれほど容易ではない。筆者らは、もつと簡単に便利な実用的方法として Fig. 5, 6 に示した方法 (AB テスト) を電子ビームに対して用いている⁶⁾。すなわち、図に示すような鋭い歯を持つた細長い金属片を電子ビームに対して高速度で移動させ、ビームと資料とが接した部分で生じる熔融の痕跡をしらべる方法である。この方法は、ビームの出力に応じてテストする金属材料と試料の移動速度を適当に選ぶことが必要であるが、ビーム形状を極めて簡便に把握できる。Fig. 6 には、材料によるその変化の一例を示す。

レーザービームのビーム活性域断面でのエネルギー分布は通常、ガウス分布である。Fig. 7 に炭酸ガスレーザーでの測定例を示すが⁷⁾、この場合ビーム出力 1kW, スポット径 0.17 mm で、中心でのエネルギー密度は 5000

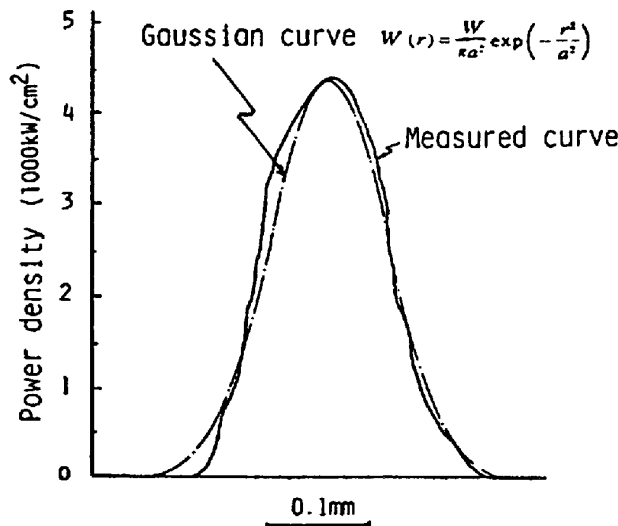


Fig. 7. Power density distribution of laser beam at focal point.

kW/cm² にも達する。しかし、レーザービームの場合、焦点深度は極めて浅く、焦点から 1 mm ずれると中心でのエネルギー密度は焦点でのその 1/2 に減少する。したがってレーザー溶接の場合、ビーム活性域は狭く、また焦点位置を厳密に測定し、試料面を焦点位置に対して、より厳密に設定する必要がある。

前に少し述べたように、電子ビームは質量を持つた加速電子流であり、レーザービームは質量を持たない電磁波である。このことは両者の熱源としての特性が、エネルギー密度が高いという共通点と同様、いくつかの点ではかなり異なつた現象を呈することを意味する。炭酸ガスレーザー光をよく磨かれた種々の金属面に照射したときのエネルギー吸収率 A_b をその物質の比抵抗 η に対してプロットすると Fig. 8 を得る⁸⁾。この関係は Hagen-Rubens equation によつて表され⁹⁾

$$A_b = 112.2\sqrt{\eta} \dots \dots \dots (1)$$

である。この結果から種々の金属面をその融点 T_M にまで加熱するのに必要な最小のレーザーパワー W_{bM} を見積ることができる。すなわち、

$$W_{bM} = 1.58 \times 10^{-2} \kappa d_b T_M \sqrt{\sigma_M} \dots \dots \dots (2)$$

で、その値を図示したものが Fig. 9 である (ただし、 κ は熱伝導率、 σ_M は融点での導電率を表し、図中斜線部は吸収率を 100% とした場合を示す)。これらの図からわかるように、吸収率は多くの金属で 15% 以下という低い値であり、500 W 程度のレーザー出力での溶接では吸収率を上げるための面処理が必要であることを示している。しかし、レーザー出力をあげて、そのエネルギー密度が数百 kW/cm² 以上になると、電子ビームの場合と同様に「ビーム孔」が形成される。ひとたびビーム孔が形成されればレーザー光は孔の側面、底面で反射をくり返すことにより、その見掛け上の吸収率は飛躍的に増大し、電子ビームの場合と同様、深溶け込みが実現される¹⁰⁾。

ところが一方、ビーム孔より的高温蒸気の噴出や、レーザー光自身によるプラズマの造出がそのエネルギー密度の高い領域で生じる。これは出力の増大とともに激しくなる。もちろん電子ビームの場合も、真空チャンパー内の残留ガスや金属蒸気に電子が衝突してプラズマを発生はするが、高速に加速された電子はこれを容易につき抜けビーム孔の中へ入る。レーザーの場合はこのビーム孔の入口近傍のプラズマによるレーザーエネルギーの吸収が大きくビームが溶接部まで有効に到達しなくなる傾向が強くなる¹¹⁾。そのため、強いガス流を吹きつけてプラズマを吹き飛ばしたり¹²⁾、逆にビーム孔の中へプラズマを押し込めたり¹³⁾ というような試みが種々なされているが、レーザー溶接の場合、電子ビームに比べて溶け込み深さがかなり小さく、早急に解決を必要とする問題である。

さて、電子ビームの場合にはビーム出力をあげて深い

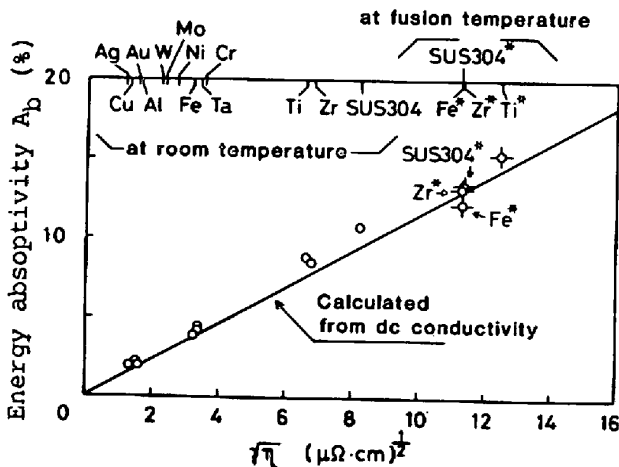


Fig. 8. Energy absorptivity of metals at room temperature and fusion temperature related with the dc resistivity η . Those at fusion temperature are marked with symbol *.

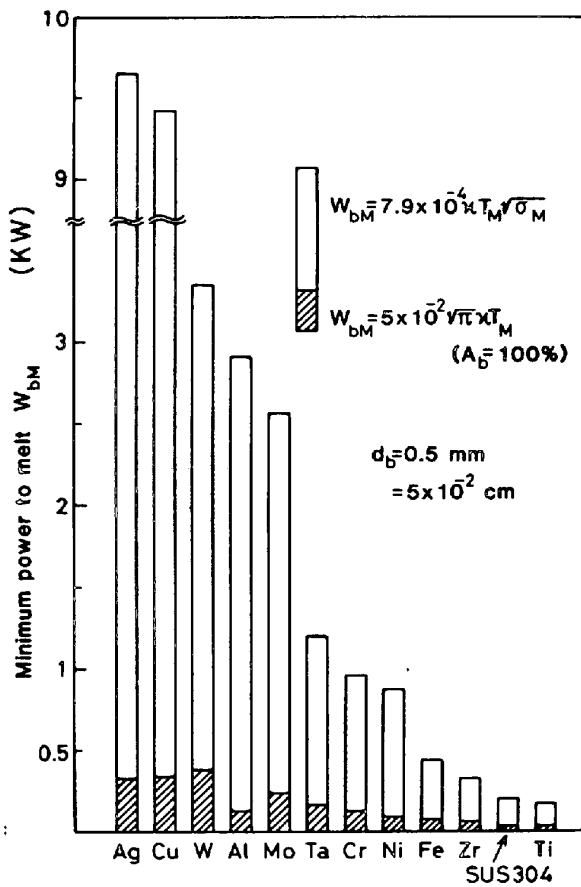


Fig. 9. Minimum laser power required to melt various metals with infinite thickness under the condition that laser beam power is constant and the power distribution is gaussian distribution with beam diameter $d_b=0.5$ mm. σ_M represents dc conductivity at fusion temperature.

ビーム孔を形成することが可能であるが、材料板厚の増大につれてビーム孔を安定に維持することが難しくなる。これを解決するためには種々の方法がとられているが、筆者は次のように問題を3つに分けて考えている。(A) 溶接電子銃の開発(ビームを90°偏向させる偏向ビーム銃の開発¹⁴⁾、横向電子銃の開発、ビーム孔の形状を制御するためのタンデム電子銃の開発¹⁵⁾、(B) 溶接条件特にビーム条件の制御 (a_b 値の選択、ビーム振動条件の設定、最適ビームパワーの検討、貫通溶接の場合のビーム貫通比の検討)、(C) 材質の改善(ガス成分特に酸素、窒素量の低減、揮発性元素 Mn, Mg, Zn などの制御)である。ビーム孔が最も安定に維持される最適溶接姿勢は、貫通溶接の場合「直向上進溶接法」であるが、種々の溶接欠陥特にポロシティの発生を抑えるにはビーム振動は効果がある。溶接方向をX軸、その直角方向をY軸にとれば、一般にX方向の振動は鋼材のような熱伝導度の低い材料に適し、Y振動はアルミニウムのような熱伝導度の高い材料に適している。溶接欠陥とビーム振動との関連については、ここではこれ以上触れな

いが多い研究報告がある⁴⁾。

3. レーザーガス切断¹⁰⁾

前章では高エネルギー密度ビームの溶接への適用について、特にビーム特性と溶接現象の関連について主として述べたが、ここでは、レーザービームによる熱切断の特徴について述べる。

熱的エネルギーを用いて材料を高精度に切断するいわゆる熱切断法は、従来よりガス炎のエネルギーを利用したガス切断、アークのエネルギーを利用したアーク切断、プラズマジェットによるプラズマジェット切断、プラズマジェットとアークのエネルギーを重畳したプラズマアーク切断法などがあり、広く利用されている。このような熱切断法はコストがあまり高くなく、さらにはかなりの厚板材に対しても適用可能であり、広く普及している。しかし、高精度、高品質、高速切断という立場からは、じゅうぶんな機能を有しているとはいえ、レーザーの高出力化の実現とともにレーザービームによる熱切断法の開発が、それらの機能を発揮しうるものとして期待されている。レーザーガス切断法は集光レーザービームにガスジェットを併用する新しい熱切断法であるが、従来の切断法に比べて(1)カーフ幅、熱影響部の狭い、精度の高い高速切断が可能であり、(2)通常の酸素切断で切断困難なステンレス鋼など高合金鋼の切断が可能であり、(3)酸化反応の有無、および金属、非金属の差異を問わず、多様な材料に対する適用性が高い等の特徴としている。

レーザービームのみを用い、主として蒸発によつて行う切断は多大の蒸発潜熱を必要とするためごく薄い金属材料とか木材、布、プラスチックなど非金属材料に限定されている。これに対し、収束レーザービームにガスジェットを重畳し、熔融部を機械的に吹き飛ばす熔融切断では、その性能が向上するのみならず適用範囲も大きく広がる。特に材料が強い酸化熱を発生するような酸化性のガスを用いるとその化学反応エネルギーをレーザーエネルギーに付加して利用できるので、その切断能率はいつそう高いものとなる。これは両者のエネルギーの単純な重畳のみならず、レーザービームと反応部の相乗効果を含んでいるためである。すなわち、酸素を用いて切断すると、酸化部は同時にレーザービームのエネルギー吸収率を著しく高めるとともに酸化熱を発生し、ビーム照射点が急速に加熱熔融され、そのため全エネルギーの集中する領域が非常に狭い照射点領域に局所化することになる。

Fig. 10 は軟鋼切断の場合レーザー出力および切断速度をパラメータとしたドロスフリーの高品質切断の領域を示す。また Fig. 11 は切断厚さと切断速度をパラメータとした場合の高品質領域の一例で、図中斜線の部分が高品質領域を表す¹⁷⁾。

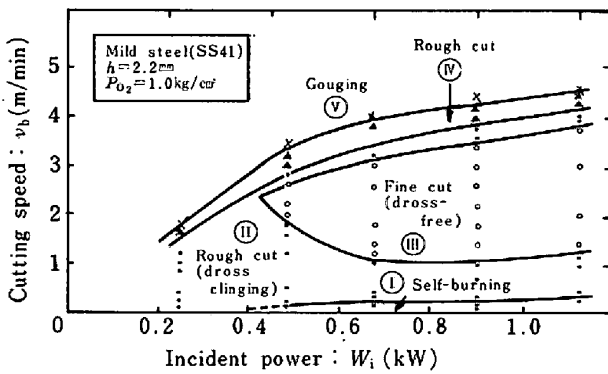


Fig. 10. Dross free region of cutting condition with laser gas cutting machine for mild steel.

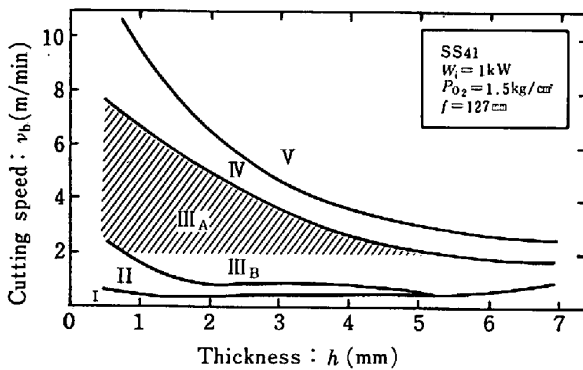


Fig. 11. Proper condition region of cutting condition for mild steel.

レーザーガス切断法は、このようなすぐれた性質をもっているにもかかわらず、筆者らの開発(1966)以来、最近まで実用化の歩みはゆつくりしている。これは、実用機の開発が比較的遅れたことを理由の1つとしてあげることができるが、他方において、多様な適用性と高性能性に対する工学的研究も不十分な点があるためと考えられる。

4. レーザー熱処理¹⁹⁾

高エネルギー密度ビームによる溶接や熱切断は、これらのビームを実効的にはビーム孔に沿って伸びた線状熱

源として用いているとみる事ができる。しかし、適当にビームの断面でのエネルギー密度分布を制御し、金属表面を適当な高速度で照射することによって、表面熱源的に用いることができる有効な熱処理法の一つとすることが可能である。特にレーザー焼入れ法は複雑な形状での部品をほとんど熱ひずみなしに選択硬化できること、その硬化領域の形状や、大きさ、深さなどを自由に制御できるなど従来考えられなかつたほどの大きな機能をもっている。

Fig. 12 に示すように通常用いられるエネルギー分布は3つのタイプ、すなわちガウス分布、ただし断面は楕円が多い(G熱源)、また、矩形分布(R-熱源)、さらに、矩形-ガウス分布(R-G熱源)に分けられる。これらの分布はレーザーの発振モードを利用するだけではなくミラー等の光学系や、ビーム振動等を利用することによつても得られる。先にも少しふれたように、レーザービームエネルギーが金属表面で反射される割合は電子ビームの場合とは比べものにならないくらい大きい。そこで酸化物などの比較的比抵抗の大きな物質を表面に機械的あるいは化学的に薄くコーティングすることによつてエネルギー吸収率を高くする方法がとられる。例えば通常の鋼材ではリン酸塩皮膜をつけることでエネルギー吸収率を非溶融の状態でも50~90%にまであげることができる。Photo. 1はR-G分布をもつた1kWレーザーによるSK-5工具鋼の硬化領域の一例で、Fig. 13はそのビームの移動速度をパラメータとした硬度分布である。水による焼入れよりHV=100程度高い値が示されており、残留オーステナイトはほとんどない。この場合、800°Cから400°Cまでの冷却時間は非常に短くそれはFig. 14に示されている。また、加熱による到達最高温度と硬度に一定の関係があり、硬化を生じる硬化開始温度 T_{Hs} と最高硬度を得るために必要な加熱温度 T_{Hm} は材料を与えれば決まる。Fig. 15はこの T_{Hs} 、 T_{Hm} と炭素量との関係を示しているが、この一例からわかるようにレーザー熱処理は極めて優れた機能を持っているといえる。今後大いに発展し実用化が期待される。

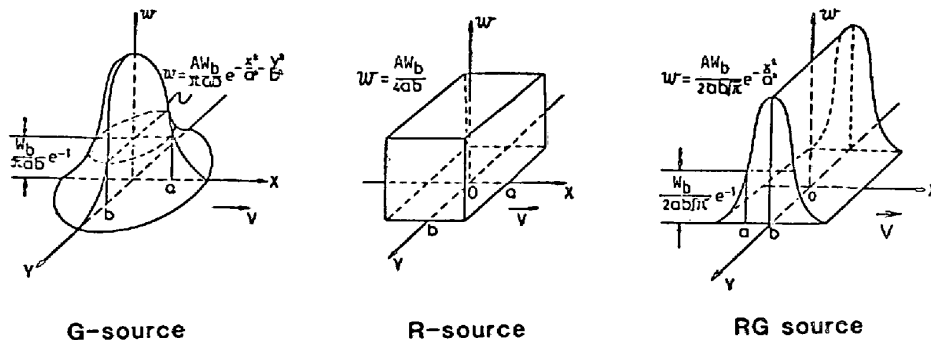


Fig. 12. Intensity distribution of surface heat source.



Photo. 1. Cross section of laser hardened SK-5 (Case depth=0.25 mm).

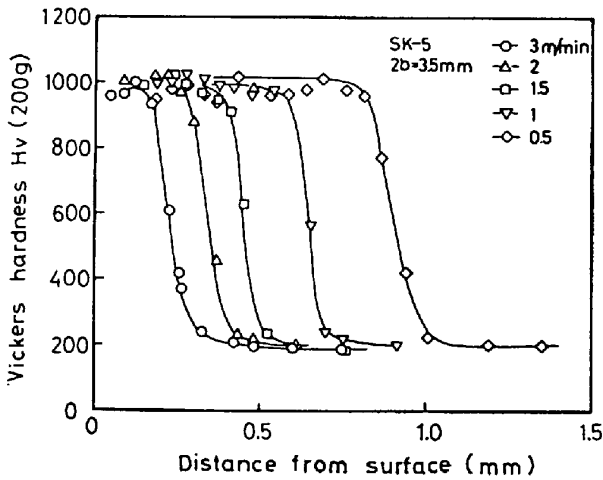


Fig. 13. Hardness distribution of SK-5.

5. おわりに

高エネルギー密度溶接熱源として、本報では電子ビームおよびレーザービームを取り上げた。さらに溶接熱源としてだけではなく、レーザービームのエネルギー密度の制御を利用して、切断、熱処理の熱源として極めて有効であることを示した。これらの両ビームは、加工熱源としては共通した特性と、相異なつた特性との両方を有しているため、その特徴を生かした開発、研究が望まれる。先に述べたように共通した特性はそのエネルギー密度の大なることであり、急速加熱冷却効果（熱処理）や急速蒸発・穿孔現象（溶接、切接、ガウジング、スクライビング、蒸着など）を示し、これらは他の熱源とは全く異なる機能である。相異点は、エネルギーの担い手が異なること、ビーム発生効率が電子ビームでは極めて高いことであろう。電子ビームは真空中で用いられるのが普通であり、厚板材の溶接には適している。一方、エネルギー密度の制御のしやすさ、大気中で処理可能であるというレーザービームの使用は、切断や熱処理に極めて有効であると思われる。

最後に、これらのビームを用いた溶接部の機械的、金属的諸特性については紙数の関係上述することができなかつた。末尾の文献で補足していただければ幸いです。

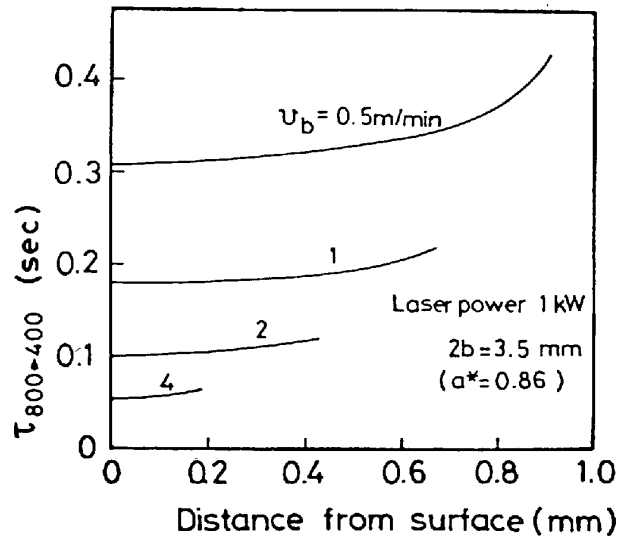


Fig. 14. Cooling time from 800°C to 400°C ($\tau_{800-400}$).

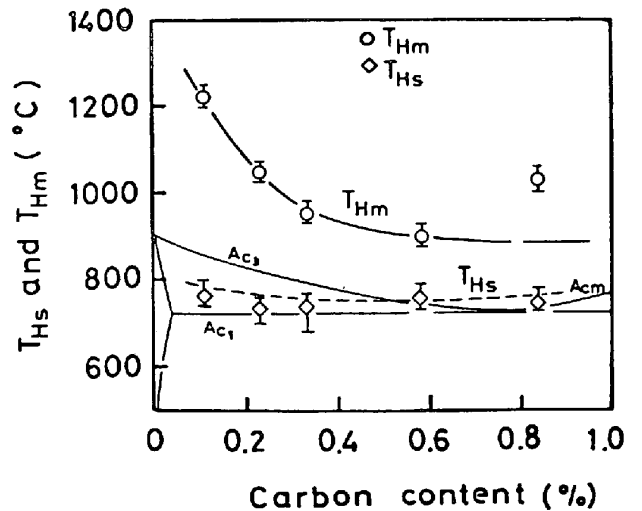


Fig. 15. Effect of carbon content on T_{Hm} and T_{Hs} .

文 献

- 1) 荒田吉明編著：溶接工学（1980），p. 2 [朝倉書店]
- 2) Y. ARATA, E ABE, and M. FUJISAWA: Proc. 2nd Int. Symp. of JWS (1975), 1-1-(7)
- 3) 荒田吉明，富江通雄：溶接学会誌，46（1977），p. 429
- 4) 荒田吉明：鉄と鋼，65（1979），p. 148
- 5) Y. ARATA, I. MIYAMOTO, and H. MARUO: Proc. Int. Conf. on Welding Research in the 1980's (1980), Session A p. 103
- 6) Y. ARATA, M. TOMIE, H. NAGAI, and T. HATTORI: Trans. JWRI., 2-2(1973)
- 7) 荒田吉明，宮本 勇：溶接学会誌，39（1970），p. 1307
- 8) Y. ARATA and I. MIYAMOTO: Trans. of JWS, 3-1(1972)
- 9) E. HAGEN and H. RUBENS: Ann. Physik, 11（1903），p. 873

- 10) Y. ARATA and I. MIYAMOTO: Trans. JWRI, 2-2(1973), p. 175
- 11) M. C. FOWLER and D. C. SMITH: J. A. P., 46 (1975), p. 138
- 12) E. V. LOCKE, E. D. HOAG, and R. A. HELLA: IEEE Journal of Quantum Electronics, 8-2 (1972), p. 132
- 13) 南田勝宏, 桜井 浩, 山口重裕, 高藤英生: 溶接学会全国大会講演概要, 第 29 集 (1981), p. 36
- 14) 荒田吉明: 溶接学会誌, 41 (1974), p. 88
- 15) Y. ARATA and E. NABEGATA: Trans. JWRI, 7(1978), p. 101
- 16) 荒田吉明, 宮本 勇, 竹内貞雄: 高温学会誌, (1978), p. 122
- 17) Y. ARATA, H. MARUO, I. MIYAMOTO, and S. TAKEUCHI: Trans. JWRI, 8-2(1979), p. 175
- 18) Y. ARATA, H. MARUO, and I. MIYAMOTO: IHW. Doc. IV-241-78 (1978)

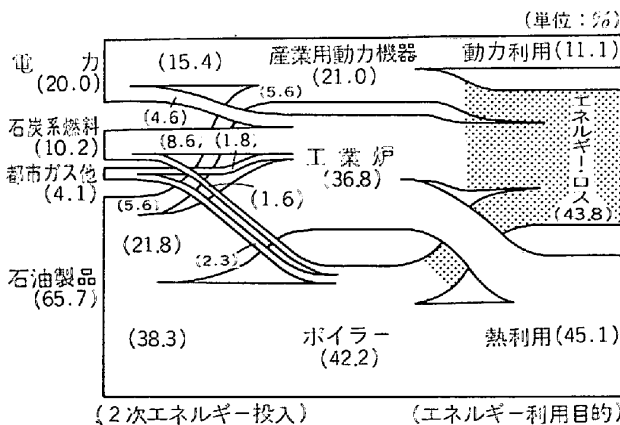
統 計

産業部門のエネルギーフロー

昭和 53 年から昭和 65 年 (予想) にかけての産業部門エネルギーフロー変化の中で特徴的な点をひろつてみると,

1) 2 次エネルギー投入の中に占める石油製品割合の低下 (脱石油化) と, 石炭系燃料+都市ガス他の割合の増加

昭和 53 年度産業部門のエネルギーフロー

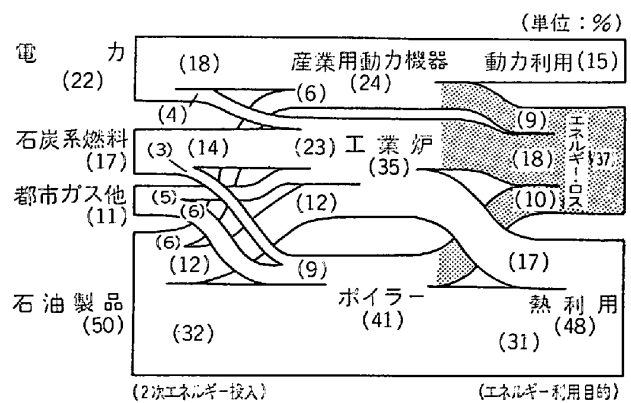


(注) 本エネルギーフローは (第1—2—1図の産業部門 (エネルギー部門及び原料の利用を除く.) を拡大して表わしたものであり, 発電ロス等を除いた 2 次エネルギー投入を 100 としている。

2) エネルギー損失の低下 (省エネルギー),
3) エネルギー利用目的の中に占める動力利用割合の増加

である。通産省産業構造審議会では上記 3) の傾向は今後のエネルギー需要が, 次第に動力需要の大きい加工組立産業へ移つてくること, 公害防止等の増エネルギー傾向が電力を中心とする動力需要を惹起するからであるとしている。

昭和 65 年度産業部門のエネルギーフロー推計図



(注) 本エネルギーフローは第1—3—1 図の産業部門 (エネルギー部門及び原料の利用を除く.) を拡大して表わしたものであり, 発電ロス等を除いた 2 次エネルギー投入を 100 としている。

出所: 80年代の産業構造の展望と課題 (通産省)