技 術 資 料

溶 融 効 率 の 適 用 と そ の 問 題 点*

岡

田

明**

Application of Melting Efficiency in Welding and its Problems*

by Akira Okada**

1. ま え が き

一定の熱量で金属の一部を局部的に溶融するとき、その部分に時間をかけて徐々に熱を与えるよりも、瞬時にいっぺんに与えるほうが、局部的な溶融に対しては熱損失が少なく熱が有効に使われることはいうまでもない。

溶融効率とは与えた熱量がいかにも有効に溶融に使われたかを表わすもので、能率的な溶接を考える場合には検討に値する。さらに溶融効率は熱伝導的に溶融現象を取扱うときの考え方として有益であり、また実測することによって入熱形態や溶融形態の観察における尺度にもなり興味ある問題である。

ここではこの溶融効率の適用とその問題点について、いままで公表されている資料をもとに若干の検討を加えまとめてみた。

2. 溶融効率の定義

溶融効率をどのように定義するかはいろいろ考え方があり統一されているわけではないが、ここではいままでに報告されている主なもので表現上差異のある二つの定義について列挙する。

(1) 主に C.E. Jackson²⁻⁴⁾ によって提唱されているもので

$$Z_m = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{単位長さの溶接ビードを溶融} \\ \text{するに必要なエネルギー} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{単位長さ当りの全アークエネルギー} \end{array} \right)} \times 100$$

$$= \frac{(S_A + S_B) \cdot \rho \cdot \Delta q}{EIv} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S_A : 余盛断面積 (cm^2), S_B : 母板溶融断面積 (cm^2), ρ : 密度 (gr/cm^3), E : アーク電圧 (V), I : 溶接電流 (A), v : 溶接速度 (cm/sec), Δq : 溶融金属の実際の平均温度に加熱するに必要な 1 gr 当りの熱量 (J/gr), 鋼の場合は $\Delta q = 1495.3^{4)}, ***(\text{J}/\text{gr})$.

*原稿受付 昭和51年10月21日

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

***文献 (2), (3) ではそれぞれ 1384.3 J/gr, 1393.5 J/gr としている。

(2) A.A. Wells⁵⁾ によって熱伝導論的に検討されたもので

$$M = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{母板に与えた熱量} \\ \text{母板溶融部を融点に上昇させるに必要な熱量} \end{array} \right)}{Q}$$

$$= \frac{Q}{vc\rho S_B(T_f - T_0)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Q : 母板へ与えた熱量 (cal/sec) ($Q = 0.24\eta EI$, η : 熱効率), c : 母板の比熱 ($\text{cal}/\text{gr}^\circ\text{C}$), T_f : 母板の融点 ($^\circ\text{C}$) T_0 : 母板の初温度 ($^\circ\text{C}$)

なお溶融効率と呼ぶにはこの M 値の逆数を取り

$$\eta_M^{6)} = \frac{1}{M} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表現するほうが適切であろう。

以上 (1) では溶接ワイヤの溶融も含めた溶融効率に関するものであり、(2) は母板の溶融のみを考慮したいわゆる母板溶融効率である。これらの値は実際にビードを置いて余盛断面積 S_A や母板溶融断面積 S_B を測定すれば、(1) あるいは (2) の定義にしたがって求めることができる (Δq や η の値を正確に得ることは容易でなく、普通は概算値を用いて算出する)。

3. 母板溶融効率の熱伝導的算定

前章 (2) で定義したいわゆる母板溶融効率は熱伝導理論上どの程度の値になるかを算定することができる。これは溶融現象を熱伝導的に考えるときや溶融効率がどのような因子によって影響を受けるかを検討するときに役立つ。

(2) 式の M 値についてはアーク熱源を移動線熱源と仮定してすなわち二次元熱伝導の場合について解かれている⁵⁾。また安藤は移動点熱源 (三次元熱伝導) をも含めて Christensen のオペレーティングパラメータ $n^{7)}$ と関連づけて算出している^{1, 8)}。以上これらの文献を参照されれば十分理解できることであるが、ここでは解説という役目からこの M 値と溶接条件を表わすパラメータ n などとの関係についてその要点を簡単に説明する。

(2) 式から熱伝導的に M を算出するためには、母板へ与えられた熱量 Q によって母板が溶融する範囲す

なわち T_f となる最大距離を知らなければならず、移動線熱源および移動点熱源による最高到達温度分布式を必要とする。しかしこれらの式は複雑な関数が介入し簡明に表わすことはできない。そこでこれらの近似式をつくるかあるいは直接数値を代入して計算して求めるほかはない。

移動線熱源の最高到達温度分布式については Wells が次のような近似式を求めている。

$$q \approx 8K(T - T_0)[(vr_m/2\alpha) + 1/5] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 q ：母板単位厚さ当りの入熱 (cal/sec·cm) ($q=Q/h$, h ：板厚), K ：母板の熱伝導率 (cal/sec·cm·°C), α ：温度拡散率 (cm²/sec) ($\alpha=K/c\rho$), $2r_m$ ：温度 T の等温線の最大幅 (cm)

いま $T=T_f$ とすると $2r_m$ は溶融幅に相当し, $S_B=2r_m h$ であるので (2) 式と (4) 式から移動線熱源のときの M 値は

$$M_L \approx 2 \left(\frac{1}{5(vr_m/2\alpha)} + 1 \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらの近似式は $0.1 < (vr_m/2\alpha)$ のとき $-6\% \sim +1\%$ の範囲の精度で求められる。

次にオペレーティングパラメータ n は次のように入熱と溶接速度に関する式で表わされる無次元量である。

$$n = \frac{Q}{2\pi K} \cdot \frac{v}{2\alpha} \cdot \frac{1}{(T - T_0)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

よって M_L と n との関係は、(4)～(6) 式から

$$M_L \approx 2 \left(\frac{1}{(5\pi/4)(n/vh/2\alpha) - 1} + 1 \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表わせる。

このように溶融効率 $\eta_M (= (1/M) \times 100)$ は n と r_m との関係すなわち与えた入熱と溶融距離との関係がわかれば求まり n , あるいは r_m のいずれによって表わし得る。

次に移動点熱源の場合であるが、この最高温度分布式の近似式は C.M. Adams⁹⁾ によって求められているが、 $4 \ll (vr_m/2\alpha)$ という制限があり溶接速度 v が小さい場合やアルミニウムや銅などの温度拡散率 α の大きい場合は適用できない。そこでもっと適用範囲の広い近似式をつくるかあるいは少しめんどうでも直接計算するしかない。移動点熱源の場合 $S_B = \pi r_m^2/2$ であるので (2), (6) 式から M 値は

$$M_p = 2n/(vr_m/2\alpha)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。ここで n と $(vr_m/2\alpha)$ との関係を Christensen の温度分布式から引用すると

$$n = \rho_m \exp \left(\frac{\rho_m}{1 + \rho_m} \right), \quad \frac{vr_m}{2\alpha} = \frac{\rho_m \sqrt{1 + 2\rho_m}}{1 + \rho_m} \quad \dots\dots\dots (9)$$

でありそれぞれ ρ_m^* を介して表わされているので、 ρ_m

に適当な数値 (0.1~10) を入れ計算し n と $(vr_m/2\alpha)$ との関係を求めれば (8) 式により M_p を求めることができる。しかしこれらの関係を簡単に表わせないのは不便である。そこで Wells にならって近似式で表わすことを試みた結果**), 次のような簡単な式を得た。

$$M_p \approx e \left(1 + \frac{0.65e}{2n} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

また M_p と $(vr_m/2\alpha)$ との関係は上式と (8) 式から

$$M_p \approx \frac{e}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2.6}{(vr_m/2\alpha)^2}} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

これらの近似式は $0.2 \leq (vr_m/2\alpha)$ において $\pm 6\%$ の範囲の精度で算出できる。

表 1 は移動線熱源および移動点熱源における近似式の適用範囲外の n , $(vr_m/2\alpha)$ および $\eta_M (= 100/M)$ の数値例を示した。また図 1 は $(vr_m/2\alpha)$ の値に対する η_M の変化を示したもので、 η_M の最大値は移動線熱源の場合 $\sqrt{2/\pi e} \times 100 = 48.4\%$, 移動点熱源の場合は $(1/e) \times 100 = 36.8\%$ である。

表 1 近似式の適用範囲外の n , $(vr_m/2\alpha)$ および M の関係

移・動 線熱源	$vr_m/2\alpha$	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02
	$n/(1+h/2\alpha)$	0.4	0.38	0.34	0.3	0.25
	$\eta_M (= 100/M_L)$	15.8	13.5	11.3	8.5	5.1
移・動 点熱源	$vr_m/2\alpha$	0.2	0.15	0.1	0.05	—
	n	0.24	0.17	0.11	0.052	—
	$\eta_M (= 100/M_p)$	8.3	6.5	4.5	2.4	—

図 1 溶融幅を表わす無次元パラメータ $(vr_m/2\alpha)$ と溶融効率 (点線は近似式による値)

4. 溶融効率の適用とその問題点

溶接効率の適用を考えてみると次のようなものがある。

- 1) 能率的な溶接条件の選定のめやす
- 2) 各溶接法の能率の比較

* ρ_m は移動点熱源から溶融池の幅が最大となる位置までの距離の無次元量 (文献 7 参照)

**文献 (10) の (16) 式の結果にもとづくもので、 E_{ff} は e/M , $(\lambda vr_m/2\alpha)^2$ は $2n/e$ に相当する。

- 3) アルミニウム、銅材などの溶接における溶接条件 (入熱量) の決定のめやす
- 4) 母板の溶融形態の変化の観察
- 5) 移動熱源による最高到達温度分布の検討

以上のような適用に際しては溶融効率の性格を十分に把握する必要があり、とくに 2) での能率の比較ということについてはいろいろと問題があるように思われる。そこで溶融効率の一般的な性格および問題点を検討しながら上記の適用について概略を述べる。

4.1 熱効率と余盛量の取扱いについて

(1) 式や (2) 式の溶融効率の定義にしたがって溶融効率を求める場合、当然物理定数など適正な値を選ぶとともに厳密には潜熱を考慮する必要がある。(2) 式の母板溶融効率の場合は、母板に吸収された熱量を求めなければならず正確な溶融効率を得るためにはこの量も実測する必要があるが、普通は適当な熱効率 η を選定してこれによって算出する。

熱効率 η の値で問題だと思われるものに TIG アーク溶接の場合がある。例えば溶融現象を熱伝導的に取扱った Christensen の論文⁷⁾では $\eta=21\sim48\%$ と示されているし、また最近の Jackson の溶融効率に関する論文⁸⁾の中でも $\eta=30\sim60\%$ 程度の値が示されている。著者も 50% 前後であろうと思い込んでいたが、たまたま研究室で実測したところ 77~82% (DCSP, アーク長 2~4mm) の高い値が求まった。この 80% 程度の値は目新しいものではなく従来このような値を測定した例は以外に多い⁹⁾。TIG アークの場合は水冷した電極に吸収される熱損失があるので比較的低い値に思われやすいが、この熱損失は以外と小さく電極前面の発生熱はかなりプラズマ気流によって母板へ熱輸送されるものと考えられる。ここでは正確な η の値を定めるだけの詳細な測定はしていないので差し控えるが、このように測定されている熱効率には大きな開きがあるので、この選定にあたっては十分注意する必要がある。

(1) 式と (2) 式の大きな相異は余盛量と熱効率を含むか含まないかの違いであり、すなわち (1) 式の Z_m は分子に余盛量を含み分母は熱効率を含まないのに対して (2), (3) 式によって表わされる η_M はその逆である。

表 2 は各種アーク溶接における若干の溶接条件についての溶融効率を概算したもので、全て比較的厚い鋼板上にビード置きした場合のデータである。これは板が薄い場合には板厚の影響が表われすべて二次元熱流に近くなり各溶接法の特徴が不鮮明になる可能性があるからである。

この表からわかるように溶接条件において電流や速度

表 2 各種アーク溶接における溶融効率の例 (比較的厚い鋼板上ビード置きの場合)

溶 接 法	板 厚 (mm)	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/min)	S_v (mm ²)	S_a (mm ²)	η (%)	Z_m (%)	P (mm)	P/J (J/mm ²)
(η=75%)										
被覆アーク AC, 4φ (D4301)	30	135	28	14.5	18	9	7	16	0.9	6
	"	157	"	"	"	24	13	9	1.3	8
	"	170	"	"	"	26	17	11	2.1	8
TIG アーク DCSP, 3.2φ (Th-W)	10	122	10.3	15	—	4	8	6	1.3	26
	"	153	11.4	"	—	7	11	8	1.7	24
	"	185	12.4	"	—	13	16	12	1.9	21
MIG アーク DCSP, 1.6φ	30	465	32	25	56	57	18	27	7.6	21
	"	"	33	50	30	38	24	32	5.6	30
	"	478	32	25	75	53	16	30	6.6	18
(η=75%)										
CO ₂ アーク DCSP, 1.6φ	30	460	37	30	75	93	28	42	10.7	31
	21	480	36	45	41	70	31	41	6.4	28
	30	470	36	120	22	29	35	52	5.3	63
CO ₂ ショートアーク DCSP, 1.6φ	30	180	20	20	31	12	11	34	2.4	22
	"	"	"	40	14	9	17	37	2.3	43
(η=80%)										
サブマージアーク AC, 4.8φ	30	630	33	40	48	53	18	31	5.4	19
	"	810	35	"	68	101	25	38	9.4	25
	"	1050	40	41	70	159	28	36	14.6	26
"	"	1310	43	40	107	215	27	36	19.3	25
(η=90%)										

(注) 全て $C_p T_f = 2067 \text{ cal/cm}^2$ とし算出。また Z_m の算出にあたって $0.24 \rho_d q$ を便宜上 $C_p T_f$ として求めた。

を大きくするほど溶融効率はある程度大きくなる。また溶接の能率の点から見た場合母板溶融効率 η_M だけでは十分でなく、この点余盛量を加えた Z_m のほうがより明確である。とくに CO₂ ショートアーク溶接などはクローズアップされる。他に比較して CO₂ アーク溶接が η_M , Z_m とともに大きい。これに対して MIG アークは以外と低くとくに比較的低い電流範囲例えば 275 A (1.2φ), 32 V, 40 cm/min の条件では $\eta_M=11\%$, $Z_m=21\%$ 程度であり、 η_M の値は TIG アークの場合より小さくなることもある。TIG アークはアーク電圧が一般に低いことに強みがあり、 η_M は案外大きい値となる。ただし溶着量は零であるので Z_m は小さいが、これもフィラーワイヤを挿入することである程度増大できる。なお P/J は溶込み深さを溶接入熱 ($60EI/v$) で割った値で母板溶融効率 η_M と比較するために示したものである。この表からはこの二つの傾向の差異はあまり認められないが後述する電子ビーム溶接の場合と対応するとその違いが明確になる。

以上 η_M や Z_m は適用目的によって区別したほうがよく、溶接の能率の評価や実用的な見地から Z_m はのほうが適しているようであり、母板の溶融のみに着目する場合には η_M のほうが適切である。

4.2 熱源の集中度と溶融幅の熱伝導的影響

溶融効率の熱伝導的な値は 3 章で検討したように一定の母材に対しては熱源の与え方や溶融量によって定まる

が、これをわかりやすく説明するために少し極端な例をとって考察する。図2のような薄板の溶接について溶融効率を考えた場合どれがいちばん大きい値になるであろう。いま比較のために溶接速度をどれも一定とすると、これらは同じ二次元熱伝導でも、熱源の与えかたや溶融幅により溶融効率は違ってくる。図の(a)は TIG アークのような熱源が比較的分散している場合であるが、いまアーク熱が溶融部分全体に均一に与えられているとすると溶融部の中央付近での溶融においては熱伝導による母板への熱損失はあまりなく、したがって熱源を分散させ溶融幅を大きくすればするほど移動線熱源の溶融効率より大きくなる。(b)、(c)は電子ビームのような集中熱源を想定した場合で移動線熱源の場合に相当し、この溶融効率 η_M は(5)式からわかるように溶融幅 $2r_m$ が大きくても最大50%程度であり、また(b)と(c)とでは入熱量のいかんにかかわらず溶接速度が一定であれば溶融幅の大きい(b)のほうが大となる。すなわち図2での溶融効率は(a)>(b)>(c)である。では図3のように板厚が異なった場合はどうであろう。入熱量 Q および溶接速度 v を一定とすると(7)式から当然 $n/(vh/2\alpha)$ の大きい(c)のほうが溶融効率が大きくなり、(c)>(b)である。すなわち入熱および速度を一定にして板を裏面まで溶接する場合は、板厚が厚いものほど言い換えれば溶込みが深いものほど熱伝導的な溶融効率は小さくなる。

図2 薄板の溶接における溶融効率の比較 (溶接速度一定)

図3 移動線熱源における板厚の影響 (入熱量 Q 一定)

次に図4のように二次元熱伝導と三次元熱伝導の場合の溶融効率の比較である。当然二次元熱伝導のほうが母板への熱損失が少なく溶融効率は大きくなると思われるかもしれないが、図3で検討したように二次元熱伝導で板厚 h を大きくしていくと溶融効率は減少し図4(d)の三次元熱伝導すなわち移動点熱源の溶融効率よりも小さくなる場合もあり得る。図5は入熱と速度に関するパラメータ n に対しての移動点熱源と移動線熱源の溶融効率を比較したもので、 $vh/2\alpha$ が大きいほど n の大きい値

図4 移動線熱源と移動点熱源との比較 (入熱量 Q , 溶接速度一定)

図5 移動線熱源と移動点熱源との溶融効率の逆転

で溶融効率の値の大きさが逆転する。いま一定の n の値に対して移動点熱源と移動線熱源との溶融効率が等しくなるような $vh/2\alpha$ の値は、(7)式と(10)式の近似式で $M_P = M_L$ とすると

$$\left[\frac{vh}{2\alpha} \right]_{M_P = M_L} \approx \frac{n(n+3.3)}{(n+1)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

である。すなわち $vh/2\alpha$ が上式の値を越えると移動点熱源のほうが移動線熱源より溶融効率は大きくなる。このような条件は電子ビーム溶接ではあり得ることである。

最後に図6のような場合はどうであろう。(e)の場合の母板への損失熱は主に下方へのみ流れるが、(f)の場合は主に左右両方へ流れ、(e)(f)とも溶融部の形状がほぼ等しいとすれば(e)のほうが溶融効率は大きくなる。言いかえと(e)は熱源からの溶融幅は $2r_m$ 、(f)の場合

図6 板幅方向と板厚方向の分布熱源における η_M の比較 (溶接速度一定)

は r_m であり溶接速度が一定であれば溶融幅の大きいほうが溶融効率は大となる。すなわち溶融面積が同じでも形状が縦長か横長かによって溶融効率は異なる。

表3はきわめて厚い板上に電子ビーム溶接したときの溶融効率の測定結果¹¹⁾を示したものである。ここで興味あることは溶融効率 η_M が表2のアーーク溶接のそれとあまり変わらずかえって低い場合さえあることである(アルミニウム, 銅のアーーク溶接については図11, 図12参照)。そこで溶込み深さと溶接入熱との比 P/J 値をみるとアーーク溶接の場合に比しきわめて大きい値を示す。電子ビーム溶接の溶融効率が移動線熱源の最大値である50%程度に達せず比較的低いのは, 入熱量に対して溶込み深さが大きいため $n/(vh/2\alpha)$ の値(表3は十分に厚い板に電子ビーム溶接をした場合であるので $n/(vp/2\alpha)$ の値)が比較的小さくなることに原因があるのであろう。

表 3 電子ビーム溶接の溶融効率の測定例¹¹⁾

材 質	速度 v (cm/min)	入熱 J (J/cm)	η_M (%)	P (mm)	$n/(vp/2\alpha)$	P/J ($10^{-6} \text{cm}^3/\text{J}$)
銅 (SM50)	47.1	4936	34	6.6	1.46	134
	128.4	1811	39	3.5	2.77	193
アルミニウム (IS)	47.1	4936	10	8.5	0.58	172
	128.4	1811	20	5.1	0.97	282
純 銅	47.1	10510	2.7	10.6	0.31	101
	128.4	3855	4.4	3.2	1.03	83

以上極端な例での考察では, 熱伝導的な母板溶融効率はビード幅が狭く溶込みの深いものほど不利であり, すなわちわれわれが能率的であると考えているものほど小さい値になる場合もあり得る。これは溶融効率が溶融部の形状にかかわらずただ入熱量に対しての溶融量の割合で定められるところに問題があり, 母板溶融効率の平均的な数値だけを見て各溶接法(とくに溶込み形状が大きく異なる場合)の能率を容易に判断することは危険で溶融効率の性格を十分に把握した上で評価することが必要である。

4.3 溶融効率におよぼす溶接条件因子

3章での熱伝導的な検討すなわち η_M と n との関係からその概略がわかる。移動線熱源の場合には(7)式から η_M は $n/(vh/2\alpha)$ により定まり, $n/(vh/2\alpha)$ は $Q/2\pi Kh(T_f - T_0)$ で表わされるので η_M は入熱量 $Q(=0.24\eta EI)$ と板厚 h だけに係り溶接速度 v は関係しない。ただしこの場合は溶融量を定めない場合である。実際の施工においては必要な一定溶融量を得ることが目的であり, 溶融量 r_m を定めた場合には(5)式からもわかるように溶接速度 v が大きいほうが η_M は大きくなる。移動点熱源の場合は n によって定まりすな

わち Q と v とが影響する。なおアーーク電圧 E は常にアーーク熱効率 η と対応させて考える必要がありアーーク電圧に対して熱効率の値が適正でないと正確な Q は得られない。

以上は熱伝導的な検討であるが, 溶融がアーークによるガウジング作用や溶融金属の挙動によって大きく影響を受けることはいうまでもない。図7は電極を傾斜したときの結果¹²⁾を示したもので角度がプラスの場合はアーーク直下の溶鋼が溶融池後方へ移動しガウジング作用が効果的に行なわれ溶融効率は高い。またこの場合溶接速度がある値以上になると溶融効率は逆に低下する傾向になる(4.5章参照)。

図 7 電極の傾斜の影響¹²⁾
(サブマージアーーク溶接)。

図8はTIGアーーク溶接の場合で電極先端角度によって影響を受けることを示している。また図9のように鋼種によっても異なりこれはわずかな成分変化による溶融金属の挙動の変化に起因するのであろう。シールドガス成分によっても当然変化する。

図 8 TIG アーク溶接における
電極先端角度の影響¹⁾

図9 シールドガス成分、鋼種の影響⁴⁾

なお溶接条件を変化すれば溶込みが変わり、これによって板厚の影響が表われることもあるので注意を要する。例えば一定板厚に対して溶接電流を増加し溶込みが大きくなると熱流は二次元的になり溶融効率は増加する。溶接速度を増加し溶込みが小さくなるような場合には三次元的になり溶融効率は逆に低下する場合もある。

4.4 アルミニウム、銅材などの溶接における溶接条件の選定について

鋼に比して熱伝導率や温度拡散率大きいアルミニウムや銅などは、局部的な溶融に対してきわめて不利で当然溶融効率は大きく低下する。アルミニウムや銅などの溶接を鋼の場合と同様に扱うとほとんどビードにならなかったり、また薄板では溶融するが厚板では表面すら溶融しないことがよくある。このような場合入熱量や予熱温度をどの程度に選んだら熱伝導的に適切かを知り得れば溶接条件の選定の目やすになる。

溶接条件を選定する場合与えられた板に対する必要な溶融量が前提条件となるので、まず η_M と r_m との関係式を適用して必要溶融量に対する η_M を求める。図10は表4の物理定数を用いてこれらの関係を求めたものである。ここで横軸には溶接速度と溶融距離 r_m との積 vr_m をとっており、必要な母板溶融断面積（移動点熱源の場合は $\pi r_m^2/2$ 、移動線熱源の場合には $2r_m h$ 、 h ：板厚）が与えられ、溶接速度を定めれば図から溶融効率 η_M が求まり、溶融効率の定義（2）、（3）式から入熱量 Q や予熱温度 T_0 を算定できる。図10でアルミと銅の溶融効率の差はあまりないが、入熱量は（2）式の $C\rho(T_f - T_0)$ の値で定まり、予熱をしない場合、銅はアルミの約倍程度の入熱量を必要とする。なおここで溶接速度につ

図10 鋼、アルミニウムおよび銅の溶融効率の比較

表4 物理定数

	熱伝導率K (cal/cm ² ·°C·S)	比熱C (cal/g·°C)	密度ρ (g/cm ³)	温度拡散率α (cm ² /S)	融点T _f (°C)	CρT _f (cal/cm ²)
鋼	0.10	0.17	7.9	0.075	1539	2067
アルミニウム	0.45	0.25	2.7	0.66	660	446
銅	0.88	0.11	8.9	0.93	1084	1061

いては温度拡散率大きいものほど速くしたほうが有利である。これは η_M が $vr_m/2\alpha$ で定まり、 r_m および η_M を一定とすると v は α に比例するからである。例えばアルミニウムの溶接では鋼の溶接速度の $\alpha_{Al}/\alpha_{steel} \approx 11$ 倍にしないと同一入熱量で鋼と同一の溶融量（溶融効率）は得られないことになる。

すでに安藤ら¹³⁾は熱伝導における相似法則からアルミニウムの場合の溶接速度は鋼の場合の $\alpha_{Al}/\alpha_{steel}$ 倍にすべきであると指摘している。

もちろん溶接欠陥の発生などにより溶接速度の増大には限度があり、計算どおり溶接速度を大にすることは不可能であるが、可能なかぎり溶接速度を大きくするほうが能率的である。

図11はアルミニウムのMIGアーク溶接における $M (=100/\eta_M)$ と $B (=2 \cdot (vr_m/2\alpha))$ との関係¹⁴⁾、図12は銅のMIGアーク溶接における M と n との関係¹⁵⁾の実測値と理論値を比較したデータである。これらは大電流で溶接しているのできわめて安定であるが、比較的低い入熱量すなわち n あるいは $vr_m/2\alpha$ が小さいとき

図11 アルミニウムの大電流 MIG アーク溶接における M 値¹⁴⁾ ($=100/\eta_M$)

図12 銅の大電流 MIG アーク溶接における M 値¹⁵⁾ ($=100/\eta_M$)

には入熱形態のわずかな変化などで溶融が大きく影響を受ける。例えばアルミの薄板(2mm)の TIG アーク溶接 DCRP で Ar ガスシールドで溶接を行なうと陰極点が母板表面を走り回り入熱は分散し、50 A, 25cm/min の溶接条件ではほとんどが溶融しない。しかしシールドガス中に He かあるいはきわめてわずかな O_2 を

添加すると陰極点の動きの範囲が狭まり同一条件で母板は裏面まで十分に溶融し溶接が可能となる。

4.5 入熱形態や溶融形態の観察

すでに検討したように母板溶融効率の値は熱源の与えかたや溶融形状などによって影響を受ける。そこで母板溶融効率を実際に測定することによって逆にその溶接法の入熱形態や溶融形態の挙動をある程度調べることができる。ここではこれらに関しても公表されているデータを紹介する。

図13は溶融効率と溶融金属流の変化の關係に着目したもので、溶融池前方より後方へ急速な溶融金属流が生じている場合や上り坂溶接においては溶融効率は低下し、逆に溶融金属流が抑制される場合には溶融効率が向上することを明らかにしたものである¹⁶⁾。またこの図は MIG アーク溶接の場合であるが溶融効率の最大となる溶接速度が連続ビードの得られる限界速度と一致すると報告されている。また図14は目視観察のできないサブマ

図13 溶融効率に影響を与える溶融金属の挙動¹⁶⁾ (MIG アーク溶接)

図14 アンダカットの発生と溶融効率の変化¹²⁾ (サブマージアーク溶接)

ージーク溶接での溶融池挙動の推定に溶融効率を調べた¹²⁾もので溶融効率の急増部でアンダーカットが発生することを明らかにしたものである。

図15はプラズマアーク溶接における溶融効率を示した

図15 プラズマアーク溶接における移動線熱源の理論値と実測値の比較¹⁷⁾

(a) 移動線熱源の場合

(b) 移動点熱源の場合

図16 溶融効率の変化とビード形態¹⁸⁾

もので作動ガス流量と溶接速度を増加するほど移動線熱源に近づくことを明らかにしている¹⁷⁾。さらにこの溶接法を詳細に溶融形態の挙動も含めて検討したデータ¹⁸⁾が図16(a)であり、(b)のTIGアーク溶接の場合と比較することによりプラズマアークの線熱源的性質を明らかにするとともに、溶融効率の局部的変化をそれぞれ区間にわけ溶融金属流による溶融形状の変化と対応している。すなわち図の(a)でA-B区間のワインカップ状のナゲット形状からB-C区間では切断溝形に変遷し、C-D区間は高速溶落ちビード、E-F区間ではノンキーホール状態となり点熱源的な性格になる。

また図17はプラズマアーク切断について溶融効率を調べたもので、図の(a)は熱量 q を溶込み深さ P で割った母板単位厚さ当りの入熱量での線熱源理論で整理したもの(b)は面熱源理論に基づき入熱密度 q/b (b :実質アーク半径)で整理したもので、これらを比較することによって切断進行前面の入熱特性が面熱源的であることを明らかにした¹⁹⁾ものである。

(a) 移動線熱源理論による整理

(b) 面熱源理論による整理

図17 プラズマアーク切断における入熱形態¹⁹⁾

4.6 最高温度分布式との関連

熱伝導論的に算出した溶融効率 η は、母板の溶融に関する場合だけのものではなく母板の所定の位置にある温度に上昇させるための効率であるといってもよいと思われる。すなわち溶融効率は、ある熱量を有する特定の熱源を与えたとき考察位置での最高到達温度とその熱量を考察位置範囲内に均等に分布投与したときの温度との比で表わし得る²⁰⁾。

いま (2) 式で T_f を最高到達温度 T_m と置きかえれば次のように表わせることはいうまでもない。

$$T_m - T_0 = \frac{Q}{vc\rho S_B} \cdot \frac{1}{M}$$

ここで M の値は 3 章における近似式を適用できる。

例えば移動点熱源の場合 M 値に (11) 式の近似式を適用すると、距離 r_m における最高温度 $T_m - T_0$ は $S_B = \pi r_m^2$ であるから

$$T_m - T_0 \approx \frac{Q}{\pi c p v r_m^2 e} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 + 2.6/(v r_m/2\alpha)^2}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

また (10) 式の近似式を適用すると温度 T_m に到達する最大距離 r_m は

$$r_m^2 \approx \frac{2Q}{\pi c p v (T_m - T_0) e} \cdot \frac{1}{1 + 0.65e/n} \quad \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる。

5. あ と が き

局所的な溶融をいかに能率的におこない、かつ望ましい溶融形状に制御することを目的とした溶融現象の研究において溶融効率に関する問題は重要である。

現在では、従来における溶融現象の定性的な検討から一歩進んで、個々の溶接法における入熱形態や溶融形態を詳細に検討する時期にきている。本稿はこのような過程において一つの区切りをつける意味で従来からの溶融効率に関する報告を基にまとめてみたもので、第39回溶接アーク物理研究委員会での解説に供した資料である。

今後詳細な溶融現象の検討に十分対応できるような新

しい溶融効率の考え方やその手法についての研究が期待される。

参 考 文 献

- 1) 安藤、長谷川：溶接アーク現象、産報 (1962)
- 2) Jackson, C.E. and Goodwin, W.J. : Effect of Variations in Welding Technique on the Transition Behavior of Welded Specimens, Weld. J., Vol. 27 (1948), 253s
- 3) Jackson, C.E. and Shrubbsall, A.E. : Energy Distribution in Electric Welding, Weld. J., Vol. 49 (1950), 231s
- 4) Niles, R.E. and Jackson, C.E. : Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process, Weld. J., Vol. 54 (1975), 25s
- 5) Wells, A.A. : Heat Flow in Welding, Weld. J. Vol. 31 (1952), 263s
- 6) 西口、田代、日納：プラズマアーク溶接におけるビード形成機構について、溶接学会全国大会講演概要、第4集 (1969) 189
- 7) Christensen, N., Davies, L. and Gjermundsen, K. : Distribution of Temperatures in Arc Welding, Brit. Weld. J. (1965), 54
- 8) 安藤：アークを移動点熱源と仮想した場合の溶融池の温度および保有熱量についての計算考察、本誌, Vol. 36 (1967), 252
- 9) Adams, C.M. Jr. : Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, Weld. J., Vol. 37 (1958), 210s
- 10) 稲垣、岡田：移動点熱源による最高到達温度分布式について、金属材料技術研究所研究報告, Vol. 10 (1967), 216
- 11) 金属材料技術研究所入江宏定氏提供資料
- 12) 坪井、赤秀、阿草：サブマージアーク溶接での溶融効率について、第29回アーク物理研究委員会資料 (72-181) (1972)
- 13) 安藤、西口：板厚あるいは材質が異なる場合のアーク溶接条件の熱伝導の考察、第10回溶接アーク物理研究委員会資料 (66-51) (1966)
- 14) 木谷、脇野：アルミニウム合金厚板の溶接について (第7報)、溶接学会全国大会講演概要、第9集 (1971) 259
- 15) 渡辺、脇野、河野、藤平：銅合金厚板の大電流 MIG 溶接について (第1報)、溶接学会全国大会講演概要、第16集 (1975) 132
- 16) 安藤、西川、井上：高電流・高速 MIG 溶接における溶融池現象に関する研究、本誌 Vol. 40 (1971), 307
- 17) 岡田、西口、丸尾、難波、西本：プラズマアーク溶接における溶接ビード形成機構の熱伝導論的考察、第18回溶接法研究委員会資料 (1968)
- 18) 西口：プラズマ溶接、本誌 Vol. 40 (1971), 1206
- 19) 西口、松山：プラズマアーク切断現象に関する基礎的研究、第36回溶接アーク物理研究委員会資料 (74-242) (1974)
- 20) 安藤、大津：薄い母板の温度上昇についての瞬間発現の直線熱源と移動点熱源との比較考察、本誌 Vol. 43 (1974), 1093.

MIT 夏 期 セ ミ ナ ー

主 催 : Massachusetts Institute of Technology

期 間 : 6月27~7月1日

概 要 : 1. electron beam and laser welding
2. computer applications
3. the systematic reliability-analysis of welded structures

※セミナーの詳細については下記へ直接問合せ下さい。

Director of the Summer Session, Room E-19-355, Cambridge,
Massachusetts 02139