溶融池の対流現象のモデリング*

—ティグ溶接の溶込み形成プロセスの解析(1)—

平田 好則**, 廣瀬 成一***, 大垣 信二****, 浅井 康広*****, 黄地 尚義**

Modeling of Heat and Fluid Flow in Weld Pool by Stationary Gas Tungsten Arc

—Analytical Study of Penetration Process in GTA Welding (1)—

by Yoshinori HIRATA*, Shigeichi HIROSE**, Shinji OGAKI***, Yasuhiro ASAI*, and Takayoshi OHJI*

A numerical study of time-dependent penetration processes in stainless steel with convective forces by stationary gas tungsten arc is described. The numerical solution technique based on finite-difference method was adopted in the development of mathematical models for investigating heat transfer problem in the weld pool. The computational model consists of the transport equations and considers driving forces of fluid flow; electromagnetic force, surface tension force, and plasma stream shear stress. Surface tension data depending on temperature and sulfur concentration were given in the calculation. It is shown that both of the penetration shape and the surface temperature distribution are affected by convective flow in the weld pool.

Key Words: Modeling, Weld penetration, Gas tungsten arc welding, Weld pool convection, Heat and fluid flow, Computational fluid dynamics, Electromagnetic force, Surface tension

1. 緒 言

溶接継手の品質は多くの因子によって支配されるが、第1番目の必要条件は開先部を含めた継手母材部の溶融確保である。このような観点から、生産現場ではアーク溶接をはじめとするさまざまな溶融溶接法について、溶込み形状と溶接条件、材質、継手形状などとの関係が実験的に調べられ、それをデータベースとして製作設計の一部ともいえる溶接施工要領 (WPS) の決定などに利用してきた。しかし、溶接構造物には種々の材質、板厚が使用されており、継手の組み合わせは無限にあるともいえるため、すべてを網羅するようなデータベースの構築は不可能である。そのため、データベースの補完的役割としてシミュレーションソフトの登場が期待されているが、現状では計算パラメータの設定が複雑で、結局、溶接現象を理解しているものに

しか扱えないなど不満が多く、むしろ教育用として整備されつつある¹⁾。使いやすく、精度のよいソフトとして完成させるためには、理論モデルと実際の溶接現象との照合が必要であり、因果関係とその内部構造を明らかにすることが望まれる。

母材の溶込み形状の予測は、現在も広く理論ツールとして用いられている熱伝導論に基づいた移動熱源による温度分布を求める問題からスタートした²⁻³⁾。フーリエ変換やグリーン関数など数学的な手法を用いて、点熱源と線熱源を対象とした解析解が導出され、クリステンセンによる入熱の無次元量 n 値の提案にいたって、溶接条件と楕円形のプール形状、溶込み断面積、溶融池の体積・平均温度などとの関係が、おおまかではあるが定量的に扱えるようになった⁴⁾。その後、実際の溶込み形状に近づけるため、潜熱や熱源分布の影響を考慮するなどが行われてきた^{5,6)}。一方、コンピュータの進歩にともない、数値解析手法の適用⁷⁾が活発になり、開先を含むような複雑な境界条件に対応した計算も行うことができるようになり、実用的には熱伝導論でかなり対応できるような段階にきている^{8,9)}といえる。

さて、溶込み形状として認識されるものは溶融池の固液界面 (境界) であり、プール内は液体金属であるため、何らかの力が作用すると流体運動が生じる。実際、溶接プールを観察すると溶融金属の流れや振動などが発生しており、溶込み形成や欠陥発生などと深く関係している。このような流れの問題に対して、パラフィンや水銀を用いたモデル実験が行われたり^{10,11)}、溶接中に流速を直接計測する¹²⁾ ことなど実験的なアプローチが行われ、溶接アークの

*原稿受付 平成12年1月25日 平成9年度秋季全国大会で発表 平成11年5月溶接アーク物理研究委員会で発表

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Osaka University, Graduate School of Engineering

*** 大阪大学大学院 (現: トヨタ自動車㈱) Graduate Student, Osaka University (Present Address: Toyota Motor Co.)

**** 大阪大学大学院 (現: 日立造船㈱) Graduate Student, Osaka University (Present Address: Hitachi Shipbuilding and Engineering Co.)

***** 大阪大学大学院 Graduate Student, Osaka University

範囲で電磁力や表面張力などの駆動力が流れにどの程度作用し、溶込みを変えるのか定性的に明らかにされてきた。一方、理論的なアプローチとしては1970年頃から欧米を中心にプラズマ気流や溶融池の流動など動的な現象を理解するために流体解析が行われるようになり、さらに、数値シミュレーションの発展とともに熱輸送も考慮した熱流体解析の取り組みが活発になった。特に1980年代になって、鋼中の硫黄(S)や酸素(O)などの微量元素による溶込み変化が実験的に明らかにされ^{13,14)}、表面張力対流の効果がクローズアップされた¹⁵⁾ことがきっかけとなり、そのメカニズムの解明を目的としたモデル化が進められた。とりわけ、横谷、松縄らは溶接溶融池における対流熱輸送の数値解析に関して、先駆的な研究を行なっている。すなわち、ティグ溶接溶融池の対流駆動力として、電磁力、表面張力、プラズマ気流及び浮力を設定し、これらの各因子が溶込み形成に及ぼす効果を整理するとともに、駆動力が複合的に作用する場合について予測した¹⁶⁾。

しかしながら、溶込みを支配する対流駆動力はアークから溶融池へ流入する電流密度や母材の表面張力の温度依存性などによって変化するものであり、アーク電流や溶接速度などの溶接パラメータで一義的に整理することはできない。実用的なモデルとして精度とともに汎用性を高めていくには、溶接現象の観測や温度などの物理量の計測が不可欠である。近年、A-TIG溶接などに見られるように母材へ活性フラックスを塗布することにより、深溶込み溶接を達成できることが示されており^{17,18)}、各分野で実用化への検討が行われている¹⁹⁾。溶込みが深くなる理由として、フラックスの成分がアークを集中させている、あるいは、溶融金属と作用し、表面張力や粘性などを変えているなど議論されているが、実験データを定量的に評価する手段がなく、上述の微量元素の影響とともにその機構は明らかになっていないといえない。

本研究ではこのような現状を踏まえ、動的な溶接現象の計測・観測結果と対応させながら、溶込み形成過程を解析し、メカニズムを明らかにすることを目的とする。本報告では静止ティグアークによる溶融池を対象にモデル化を行い、電磁力と表面張力、プラズマ気流が作用したときの流れの形成過程を数値計算により調べ、それによる対流熱輸送が溶込み形成や溶融池表面温度に及ぼす影響を理論的に検討している。

2. 対流熱輸送の非定常計算モデル

溶融池の対流現象は、複数の因子が複雑に絡み合って引き起こす現象であるため、一つの因子を取り上げて独立して論じることが困難である。数値計算は適切な境界条件を与えることができれば、各因子の複合的な影響を検討することが可能となり、溶接条件と母材の物性値から溶融形状を推定できることになる。

2.1 仮定と基礎式

本研究ではFig.1のような静止ティグアークによる溶融池の形成過程を計算モデルの対象とする。モデルの仮定は以下の通りである。

- ①溶融現象を軸対称問題とみなし、計算には円筒座標系を用いる。また、 θ 方向の流動、熱伝導、対流熱輸送は生じないものとする。
- ②溶融池表面は平坦で、変形や振動は生じないものとする。
- ③母材表面および側面から雰囲気への熱伝達、放射による熱損失はなく、母材底部は293(K)に保持されているものとする。

次に、本モデルで用いた熱流体の基礎式を以下に示す。非圧縮粘性流体の運動を表現するため、連続の式とナビエ・ストークスの式(密度、粘性一定)を適用する。また、エネルギー方程式においては粘性散逸項や膨張圧縮などによる仕事は無視している。

(連続の式)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

(ナビエ・ストークスの式)

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \eta \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} + \frac{1}{\rho} \vec{F} \quad (2)$$

(エネルギー方程式)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) H = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot (-K \nabla T) \quad (3)$$

P : 圧力 (Pa) $\vec{u} = (u, 0, v)$: 速度ベクトル (m/s)

T : 温度 (K) $\vec{F} = (F_r, 0, F_z)$: 外力ベクトル (N/m³)

H : エンタルピー (J/kg)

$\vec{g} = (0, 0, g)$: 重力加速度ベクトル (m/s²)

ρ : 密度 (kg/m³)

η : 動粘性係数 (m²/s)

K : 熱伝導率 (J/msK)

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model of molten pool by stationary TIG arc.

Table 1 Physical properties of stainless steel (SUS304) used.

ρ : Density (kg/m ³)	8.0×10^3
T_m : Melting point (K)	1672.0
K : Thermal conductivity of liquid (J/msK)	28.0
K : Thermal conductivity of solid (J/msK)	$1.4 \times 10^{-2}T + 11$
c : Specific heat (J/kgK)	6.45×10^2
L : Latent heat of melting (J/kg)	2.5×10^5
η : Kinematic viscosity(m ² /s)	0.1×10^{-5}

Fig. 2 Calculation mesh used.

本研究では(1)~(3)式を差分化して数値解を得ている。Fig. 2は計算領域を差分格子で表示している。軸対称としているので、溶融池の中心軸を含む右半分を計算領域としている。計算モデルで想定している母材はステンレス鋼(SUS304)で、その大きさは半径20(mm)、厚さ10(mm)としている。差分格子サイズは0.2(mm)×0.2(mm)で、境界条件を表現するために各方向に境界セルと呼ばれる仮想格子を設けている。また、仮定③に従い、母材の上面(z=0 mm)、側面(r=20 mm)および対称軸(r=0 mm)における境界条件は熱絶縁としている。

入熱部の条件としては、熱源からの入熱量が表面(z→+0)での熱伝導による熱流束と等しくなるので、熱源部の格子点に対して次式で与えている。

$$q = -K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (4)$$

計算モデルで用いたステンレス鋼(SUS304)の物性値をTable 1に示す。熱伝導率は温度依存性を持たせている。

2.2 計算方法

アークやレーザなどによる溶融現象は、まず熱源から母材に熱が流入して加熱され、融点以上になった領域は溶融し、液体となる。液体になると、いくつかの駆動力によっ

Fig. 3 Flow chart of numerical calculation for heat transport of molten pool by stationary TIG arc.

- : Temperature and Pressure
 ⇨ : Velocity

Fig. 4 Field variables.

Fig. 5 Enthalpy of stainless steel as a function of temperature.

て流動が生じ、流れによって熱が運ばれる対流熱輸送が起こる。したがって、手順として時刻 $t=0$ においては、エネルギー方程式の熱伝導計算から処理し、形成された溶融池に対して各種駆動力が作用したときの流れ場を計算する。具体的には式(1)(2)(3)を円筒座標系に変換し、差分式で表現したものを数値計算している。運動方程式とエネルギー方程式は、計算対象の物理量がそれぞれ流速とエンタルピー(温度)であり、これらは時間とともに変化する。式(2)(3)の

Fig. 6 Boundary condition of fluid velocity at solid-liquid interface.

差分化にあたっては、時間に対して前進差分を行う、いわゆる陽解法のスキームとしている。ただし、溶融池内の流動計算においては式(1)(2)を連立させ、各時間ステップにおいて連続の式を満足するように圧力(もしくは速度)を修正する収束計算を行っている。これはMAC法の系統で発展してきた多くの流体計算スキームで行われている手法である²⁰⁾。計算フローチャートをFig. 3に示す。

Fig. 4は計算セルにおける各変数の定義を示している。スカラーの温度と圧力はセル中心で、ベクトルの流速はセル境界で定義している。温度勾配が生じると熱伝導によってセルの各境界から熱が流入、流出し、さらに流れが存在すると熱が流体の移動にともない運ばれる。このようにして各セルに含まれる熱量を求め、Fig. 5に示す温度とエンタルピーの関係から、次の時間ステップの温度を決定するとともに、その相状態が固体か液体かを判断している。なお、固液境界ではFig. 6に示すように流速をゼロとし、その他の必要な速度成分はノンスリップ条件によって求めている。

2.3 対流駆動力のモデル化

(1)電磁力

電磁対流は溶融池を流れる電流とそれにより誘起される磁界によって発生する電磁力を駆動力とする流れである。Fig. 7に電磁力による流動機構を模式的に示す。電磁力は次式で表せるので、軸対称の溶融池では求心力となる。

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (5)$$

ここで、 $\vec{F}$: 電磁力 (N/m^3)、 $\vec{J}$: 電流密度 (A/m^2)、 $\vec{B}$: 磁束密度 (Wb/m^2) である。

これは体積力としてプール内の各要素に作用し、電流密度の高いプール表面中心部で強くなり、内向き対流を駆動する。なお、電流密度分布はラプラス式から求めた電位分布に基づいて算出している。このため、溶融池も含めた母材内部の導電率が均等で、温度などによって変化せず一定

Fig. 7 Schematic representation of electromagnetic force induced by weld current.

Fig. 8 Electrical boundary condition for calculation of electromagnetic force.

としている。Fig. 8は電気的な境界条件を示している。アークとの界面で、溶融池表面からアークに電流が流出する領域（アノード）の電位を $V=V_i$ 、母材底面および側面の電位を $V=0$ としラプラス式の境界条件を与えている。

(2)表面張力およびプラズマ気流によるせん断力

表面張力対流は、溶融池表面の表面張力が場所によって異なる場合に発生する流れである。表面張力の大きい部分が小さい部分を引っ張るように作用し、流れを誘起する (Fig. 9)。すなわち、溶融金属の粘性係数を $\mu(\text{kg/ms})$ とおくと、溶融池表面にせん断力 $\tau(\text{N/m}^2)$ が半径方向に作用した場合、 r 方向成分の流速に関して溶融池表面から深さ方向への速度勾配は次式により与えられる。

$$\tau = -\mu \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (6)$$

溶融池の表面張力が変化すること、表面張力の温度依存性や溶融金属の化学組成が局部的に異なることなどが考えられているが、ここでは前者のみを取り上げている。一般に純金属の場合、表面張力は温度が高くなるとともに低下する。アークによって形成される溶融池の表面温度は、定性的にはアーク直下の中心部が最も高い温度となり、溶

Fig. 9 Convection driven by surface tension gradient at pool surface.

Fig. 10 Relationship between temperature coefficient of surface tension and temperature.

融境界が融点直上と考えられる。従って、純金属の溶融池の表面張力は、アーク直下よりも周辺部の方が大きく、溶融池を上から見たとき外向きの流れを発生する駆動力となる。

鋼中にSやOなどが含まれると、温度が高くなるとともに表面張力が大きくなる場合がある。従って、このような材料をアークで溶融すると、溶融金属の駆動力の方向が上述とは逆の内向きになる。本研究ではFe-8%Ni-18%Cr-S合金系の文献値²¹⁾を参考に、温度 $T(\text{K})$ と表面張力 $\gamma(\text{N/m})$ の温度係数 $\frac{d\gamma}{dT}(\text{N/mK})$ との関係を図. 10で与えている。図の縦軸は表面張力の温度係数であるが、これが正(+)の場合、温度が高くなると表面張力が増加することを意味する。S濃度が低い10(ppm)の場合、温度係数は1700(K)以上で負(-)となっており、外向きの流れになると予想できる。しかしながら、S濃度が増加すると、例えば80(ppm)の場合、融点から2200(K)までの温度領域で温度係数は正(+)の値をとり、2200(K)を超える温度になると負(-)になるので、表面張力による駆動力は溶融池の温度分布によって大きく変化すると考えられる。

Fig. 11 Convection driven by drag force of plasma stream.

プラズマ気流による対流は、溶融池表面に沿って流れるプラズマ気流と溶融池との界面に働く粘性摩擦応力によって生じる (Fig. 11)。したがって、溶融池の流れを駆動する機構は表面張力対流と同様、せん断力であり、(6)式が成り立つ。陽極表面上におけるプラズマ気流の r 方向速度成分を計測することは難しく、本研究では計算モデルに基づいて、実験的に得られたアーク外観とアーク圧力を対応させながら求めており、詳細は次報で述べる。

なお、溶融金属は温度が高くなると膨張し、その密度が低下するために、溶融池内の温度が一定でない場合、浮力が働き、いわゆる熱対流が生じる。50~100(A)程度を超えるアーク溶接の溶融池内では電流経路にも依存するが、体積力として電磁力が支配的になるため、本研究では密度を温度によらず一定として浮力の影響を無視している。

3. 溶融池の温度場と速度場

3.1 熱伝導による温度場

熱源から母材に流入する領域が一定の場合、入熱量が増加すると溶融池の体積が大きくなる。入熱量が一定の場合、入熱領域が大きくなると母材表面の広い範囲が溶融するが、入熱密度が小さくなるために溶込みは浅くなる。ここでは、まず流れのない熱伝導のみによる温度場に及ぼす入熱分布の影響を述べる。Fig. 12 に示すような入熱量 1000(W) の円形均一熱源の入熱半径 $[r_q]$ を 1~4(mm) に変えて計算した。Fig. 13 は $r_q=1(\text{mm})$ と $r_q=3(\text{mm})$ について、入熱開始 5 秒後における溶融池内の温度分布を 200(K) 間隔の等温線で示している。入熱半径 1(mm) では入熱密度が $3.2 \times 10^8 (\text{W}/\text{m}^2)$ と非常に高く、計算上の最高温度は溶融池表面中心で 10,000(K) となり、沸点をはるかに超えている。入熱半径を大きくすると溶融池形状は広く浅くなり、Fig. 14 に示す溶融池表面の温度分布からも分かるように、 $r_q=4(\text{mm})$ で最高温度も 2540(K) まで低下している。

Fig. 12 Distribution of heat input density used for calculation. (Total heat input: 1000W)

(a) Heat input radius: 1 mm

(b) Heat input radius: 3 mm

Fig. 13 Temperature field and penetration formed by heat conduction.

(Heat input: 1000W, Arc time: 5s)

3.2 電流分布が溶融現象に及ぼす影響

母材が溶融し液体となったとき、力が働くと流動する。言うまでもなく、ティグ溶接の場合、溶融池表面の陽極領域にアーク電流が集中し、電磁力が発生する。ここでは、

Fig. 14 Effect of heat input radius on surface temperature of molten pool by heat conduction.

Fig. 15 Distribution of current density used for calculation.

溶融池表面におけるアーク電流の電流分布を Fig. 15 に示すように円状で均一として計算している。Fig. 16 は母材を加熱する入熱条件として、入熱量を 1000(W)，入熱半径 $[r_q]$ を 3(mm) とし、電磁対流の駆動力を与える条件として、アーク電流を 100(A)，陽極部半径 $[r_f]$ を 2(mm) とした場合について、溶融池内の流れ場と温度場の時間的変化を示している。右半分は溶融池内の温度分布を示し、左半分は溶融池内の各位置での流れの様子を流速ベクトルで表現している。点弧直後 1 秒では流れもほとんどなく、等温線もほぼ等間隔で熱伝導が支配的な溶込み形状にみえる。3 秒後あたりから溶融池中心に向かう流れが目立つようになり、これにともない電極直下の高温金属が溶融池底部に運ばれるため、溶込み深さが増加している。また、溶融池表面の温度分布に注目すると、時間とともに中心部温度が低下していることが分かる。アークの電流値と陽極部半径によって、溶融池表面の温度分布は Fig. 17 に示すように変化する。図は点弧後 5 秒の計算結果を示しており、溶融池中心部の最高温度に注目すると、熱伝導だけで計算した Fig. 14 の $r_q=3(\text{mm})$ の場合、3,500(K) 以上あるのに対し

Fig. 16 Time-change of temperature field and velocity field in molten pool.
(Heat input: 1000W, Heat input radius: 3 mm, Arc current: 100A, Anode radius: 2 mm)

て、電磁対流が生じると低くなる。また、この温度低下は電流密度を大きくするほど顕著となり、流れによるプール攪拌作用のため表面温度がほぼ一様な分布に近づいている。

このような流体の熱輸送現象に対して、対流と熱伝導のどちらが支配的な機構として働いているのかを知る指標として、ペクレ数 ($Pe = UL_0 / (K/c\rho)$) がある。定性的にはペクレ数が 10 以上になると対流の寄与率が大きくなり、熱伝導のみで予測した温度場からずれてくるものと考えられる。ちなみに、プール半径 L_0 を 5(mm) とし、溶融ステンレス鋼の熱伝導率、比熱、密度から、 $Pe=10$ となる流速を求めると、 $U=0.01(\text{m/s})$ となる。言いかえると、直径 10(mm)

程度の溶融池においては、流速が $0.01(\text{m/s})$ を超えると、対流熱輸送の影響が現れてくることになる。Fig. 18 は電流密度と溶融池内流速の最大値(点弧後 5 秒)との関係をプロッ

Fig. 17 Effect of current density on surface temperature of molten pool.
(Heat input: 1000W, Heat input radius: 3 mm)

Fig. 18 Relationship between current density and maximum velocity in molten pool.

Fig. 19 Relationship between maximum velocity and penetration ratio D/W calculated.

トしたものである。図から、流速は母材の電流流入部における電流密度が $3 \sim 4 \times 10^6 (\text{A/m}^2)$ を超えると $0.01(\text{m/s})$ 以上となり、電流密度とともに大きくなることが分かる。なお、電磁対流だけの場合、溶融池中心軸上で表面から底部に向かう下向き成分が最大流速となる。次に、溶融池における対流熱輸送の効果をみるために、最大流速と溶込み形状との関係をプロットした。Fig. 19 に示すように流速とともに溶込み比 D/W は増加するが、この場合 $0.15 \sim 0.2(\text{m/s})$ の流速で飽和する傾向を示している。すなわち、アーク直下で高温に加熱された液体は、内向きの電磁対流によって溶融池底部を侵食溶融し、溶込み比 D/W を大きくする。しかし、さらに流速が大きくなって攪拌が進むと、定性的には溶融池の温度が低下するとともに一様になるの

(a) 10 ppm

(b) 40 ppm

(c) 80 ppm

Fig. 20 Influence of sulfur concentration on temperature field and velocity field.
(Heat input: 1000W, Heat input radius: 3 mm)

Fig. 21 Relationship between sulfur concentration and penetration ratio D/W calculated.

で、その効果は飽和傾向を示すものと考えられる。

3.3 表面張力の温度依存性の影響

ここでは、S含有量が10~240(ppm)の5種類の材料について、Fig. 10に示す表面張力の温度依存性を与え、数値解析した結果を示す。Fig. 20は点弧後5秒における温度場と速度場を比較したものである。いずれも入熱量1000(W)、入熱半径3(mm)で、電流はゼロとしている。S量によって溶融池内の流れの方向や大きさが異なることが分かる。おおまかにはS量が少ない場合、溶融池表面で外向きの流れが形成され、S量が多くなると内向きの流れとなり、溶込み形状が流れのパターンにともなって変化することが分かる。溶込み比 D/W はFig. 21に示すように、S量が40(ppm)から80(ppm)の間を境界として大きく変化しており、浅い溶込みから深い溶込みに遷移している。このように計算上S濃度が高くなると、内向き流が活発になることが示されるが、もとより、溶融池表面の温度分布が表面張力の大きさを決定するので、表面張力対流は入熱分布や流れ自身によって時々刻々と変化する。したがって、これらの溶融現象を解析するためには、実験的に溶込みの時間変化を求めることと、溶接中の温度分布を正確に計測することが必要となる。

4. 結 言

計算モデルを用いてステンレス鋼の溶融現象に影響を与える溶融池内の対流熱輸送を定量的に検討した。実際の溶接において対流駆動力は複合的に作用するが、本報告では

その影響因子として、入熱分布、電流分布、硫黄(S)含有量を別々に取り上げた。計算結果を要約すると、以下の通りとなる。

- (1) 母材に流入する熱は総熱量に加えて、入熱分布が溶融現象に大きく影響する。
- (2) アーク電流を大きくしたり、溶融池表面の電流流入部を小さくすることで、電流密度を高くすると、溶融池内には内向きの電磁対流が発生し、溶込みが深くなる。
- (3) 溶融金属中に含まれるS含有量によって、表面張力の温度係数が異なる。表面張力による対流駆動力はS含有量とともに溶融池表面の温度分布によって変化する。その結果、S濃度の高い材料では内向き対流を、S濃度の低い材料では外向き対流を引き起こす。
- (4) 溶融池寸法が10 (mm)程度の場合、流速が0.01 (m/s)のオーダーを超えると、対流現象による攪拌効果が現れてくる。

参 考 文 献

- 1) 沓名：溶接学会論文集，Vol. 17 (1999) No. 1, pp. 155-161.
- 2) 田中：溶接学会誌，Vol. 13 (1943) pp. 347-359.
- 3) Rosenthal, D: Welding J., Vol. 20 (1941) pp. 220s-234s.
- 4) Christensen, N: British Welding J., Vol. 12 (1965) pp. 54-75.
- 5) 牛尾, 石村, 松田, 荒田：溶接アーク物理委資料，ア物 77-362 (1977).
- 6) 平岡, 村松, 岡田：溶接アーク物理委資料，ア物82-505(1982).
- 7) 西口, 黄地, 古賀, 北側：溶接アーク物理委資料，ア物 80-440 (1980).
- 8) 榎谷, 宮坂, 黄地：溶接学会論文集，Vol. 13 (1996) No. 2, pp. 649-653.
- 9) 立川, 里中：溶接アーク物理委資料，ア物87-669 (1987).
- 10) 石崎, 村井, 神戸：溶接学会誌，Vol. 36 (1967) No. 4, p. 36.
- 11) Woods, R.A. and Milner, D.R.: Weld. J., Vol. 50 (1971) pp. 163s-173s.
- 12) Mori, N. and Horii, Y: 溶接アーク物理委資料，ア物 70-105 (1970).
- 13) Lancaster, J.F. and Mills, K.C.: IIW Doc. 212-796-91 (1991).
- 14) Mills, K.C. and Keene, B. J.: Intl. Materials Reviews, Vol. 35 (1990) No. 4, p. 185-
- 15) Heiple, C.R. and Roper, J.R.: Weld. J., Vol. 61 (1982) No. 4.
- 16) 横谷, 松縄：溶接学会論文集，Vol. 2 (1984) No. 3, pp. 404-411.
- 17) Ostrovskii, O.E. et al: Welding Production (1977).
- 18) Lucas, W. and Howse, D.: Weld. & Metal Fab., (1996).
- 19) 豊田, 松林, 鴨, 三宅：溶接アーク物理委資料，ア物 99-1065 (1999).
- 20) Anderson, D.A., Tannehill, J.C. and Pletcher, R.H.: "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", McGraw-Hill Book Co. (1984).
- 21) McNallan, M.J. and Debroy, T.: Metall. Trans. B, Vol. 22B (1991) pp. 557-560.