

図2 さまざまなガスメタルアーク溶接法

するので、ワイヤ端から溶滴が離脱するたびに、アーク長やアーク発生位置が断続的に変化する。従って、移行する溶滴の大きさや形、移行頻度はアークの安定性を支配することから、ガスメタルアークはティグアークに比べると時間的・空間的に変動する熱源であると言え、移行現象の安定性は溶接品質と作業性に直結している。すなわち、電極棒端から移行する溶滴サイズが、大きすぎたり、ふぞろいになったりすると、溶滴移行にともなうアーク長の変動が大きくなり、アークが不安定になる。また、溶滴の移行がスムーズでないと、溶接棒端や溶融池からの溶融金属の飛散するスパッタ現象が激しくなる。このため、世界各地の溶接機メーカーをはじめ、溶材メーカーやガスメーカー、大学・研究所などが、電源性能ならびにシールドガス組成、ワイヤ化学成分に注目して、生産性や品質の改善に寄与する溶接法を開発してきた。これらは、メーカーによってそれぞれ独自の名称をつけられ、その特長をアピールしながら、市場に投入され、製品や継手の種類、施工現場のニーズに応じて、その役割を果たしてきている³⁾⁻⁹⁾。図2はこれまでに開発されたガスメタルアーク溶接法のいくつかを電流・電圧条件上にプロットしたものである。これらプロセスのキャッチフレーズは、溶滴移行・アークの安定化、スパッタフリー、溶着量の増大、溶込み深さの増大、アークの指向性向上、溶込み形状・余盛形状の改善など多岐にわたっており、実際の施工現場に導入したときに、具体的にどのような効果が発揮されたのか明らかでない。これには、溶接機に付随する溶接プロセスを売るための商品戦略もあるが、本質的には溶滴移行などの溶接現象が定性的な理解にとどまっていることが最も大きな要因と考えている。

3. 溶滴移行形態

溶極式アークの発生状態や溶滴移行の状況はサブマージアーク溶接を除いて、直接目で見るができる。IIW (国際溶接学会) では、移行形態を図3のように溶滴の形や大きさ、移行状況など外観的な特徴をもとに分類し、統一された用語でもって、同じ現象に対して世界中の技術者・研究者が共通の認識を持てるように実務や研究の便宜を図っている¹⁰⁾。溶滴移行形態には大別すると、①自由移行：溶滴がアーク柱内を移行する（アーク長が長く、

アーク電圧が高い）と、②橋絡移行：溶融ワイヤ端部が母材溶融池と接触・橋絡し、移行する（アーク長が短く、アーク電圧が低い）がある。さらに、自由移行においては、溶滴の大きさがワイヤ径よりも大きい場合をグロービュラー移行、ワイヤ径と同じかそれよりも小さい場合をスプレー移行と呼んでいる。そして、グロービュラー移行のなかで、溶滴の形状が球状に近いものをドロップ移行、炭酸ガス溶接で見られるような溶滴形状が変動しているような移行形態を反発移行と呼んでいる。一方、ガスメタルアーク溶接においては、溶滴と溶融池が接触する場合、同時に電気回路の短絡が生じているので、短絡移行とも呼ばれている。これらの移行形態は溶接法や溶接条件（電流、電圧）、極性、シールドガス、ワイヤの材質・種類（ソリッド、コアード）、ワイヤ径、母材など多くの操作因子によって変化する。（注：パルスアーク溶接などの電流波形・ワイヤ送給を制御するミグ/マグ溶接法が現在、世界各地で普及しているので、IIWでは溶滴移行形態の分類を見直す方向で検討が進められている。）

ソリッドワイヤのガスメタルアーク溶接では、シールドガスを定めると、図4のように溶接電流とアーク電圧（アーク長）によって移行形態が変化する。ミグ溶接やマグ溶接などアルゴンガスの混合比が高いシールドガスを適用すると、或る臨界電流値を超えると、グロービュラー移行からスプレー移行に遷移する。図5は一定電流のミグ溶接における溶滴の移行回数と電流との関係を示す¹¹⁾。1.2mm径の軟鋼ワイヤでは約230A（スプレー化の臨界電流）を超えると移行回数が急激に増加する。溶接電流とともに電極ワイヤの溶融量も多くなるが、それにも増してワイヤから移行する溶滴の数が増加するので、溶滴1個当たりの体積が小さくなるスプレー移行の状態になることを示している。図から例えば、350Aの場合、1秒間に約500個の溶滴が離脱・移行するわけであるから、原理的には溶滴1個当たり2msの期間、350Aの電流を与えてやればよいことになる。したがって、図6¹²⁾に示すようにピーク電流に応じたパルス幅のパルス電流を適用すれば、平均電流値を低くしても1パルス当りに1回溶滴が離脱・移行する1パルス1溶滴移行が実現できることになる。1パルス1溶滴移行では、溶滴サイズがそろった規則正しい移行が行われ、極めて安定なアークが得られ、スパッタの発生も少ない。

マグガスは日本国内ではAr80%-CO₂20%組成の混合ガスが一般的であるが、海外も含めて用途に応じて、種々の組成比が使用されている。アルゴンガスと炭酸ガスの混合比によって、溶滴サイズとスパッタの発生量がどのように変化するかを電流値300Aについて実験的に調べたものを図7¹³⁾に示す。図から、炭酸ガスの混合比が増加するとともに、溶滴サイズが大きくなり、これに伴って、スパッタの発生量も増加することが分かる。また、炭酸ガスの混合比を25%程度よりも少なくすると、溶滴サイズがワイヤ径よりも小さくなり、スプレー化することが分かる。しかしながら、移行形態の遷移が生じる電流・電圧の値が、何によって決定されるのか、また、シールドガスや母材・ワイヤ中の合金元素が移行に対して、どのような影響を及ぼすのかについては十分に明らかで

IIW分類による溶滴移行形態 (IIW Doc.XII-636-76,1976)

移行形態名	溶接法(例)
1. 自由移行 1.1 グロビュラー移行 1.1.1 ドロップ移行 1.1.2 反発移行 1.2 スプレー移行 1.2.1 プロジェクト移行 1.2.2 ストリーミング移行 1.2.3 ローテーティング移行 1.3 爆発移行	低電流GMA CO ₂ アーク 中間電流域GMA 中電流GMA 大電流GMA SMA(被覆棒)
2. 橋絡移行 2.1 短絡移行 2.2 連続橋絡移行	ショートアーク フィラーワイヤ添加時の溶接
3. スラゲ-プロテクト移行 3.1 壁面移行 3.2 その他のモード	サブマージアーク SMA, コアードワイヤ, エレクトロスラグ

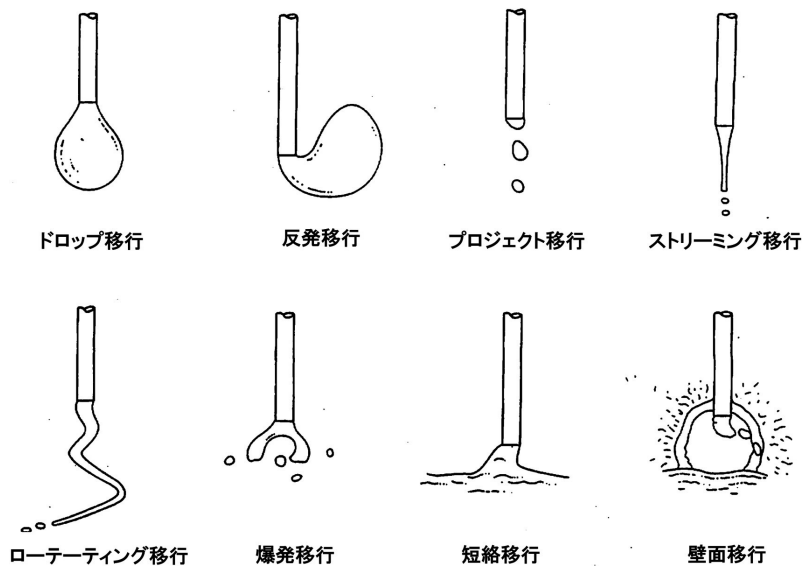


図3 溶滴移行形態の分類

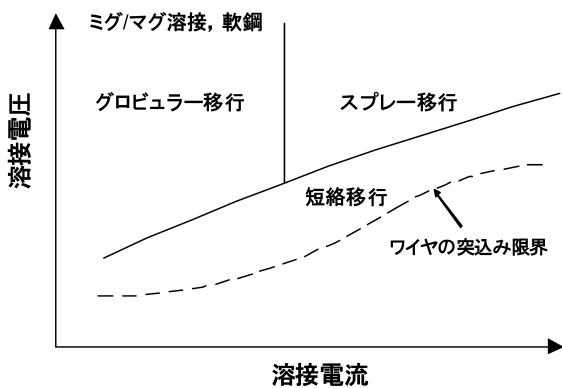


図4 ガスメタルアーク溶接における電流・電圧条件と移行形態

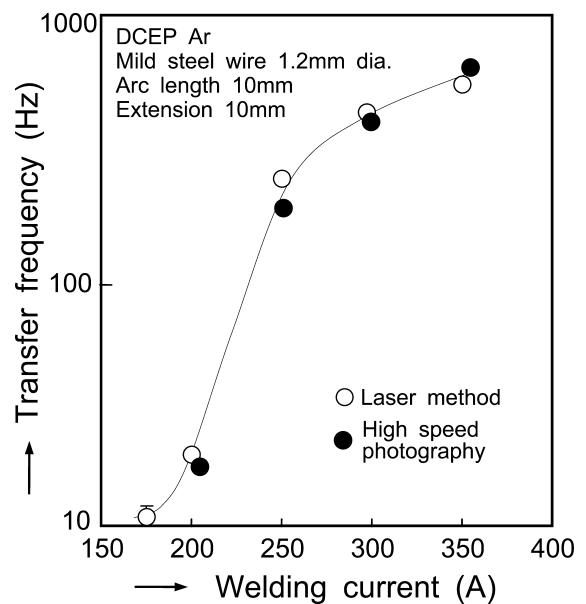


図5 ミグ溶接における電流と溶滴移行回数との関係

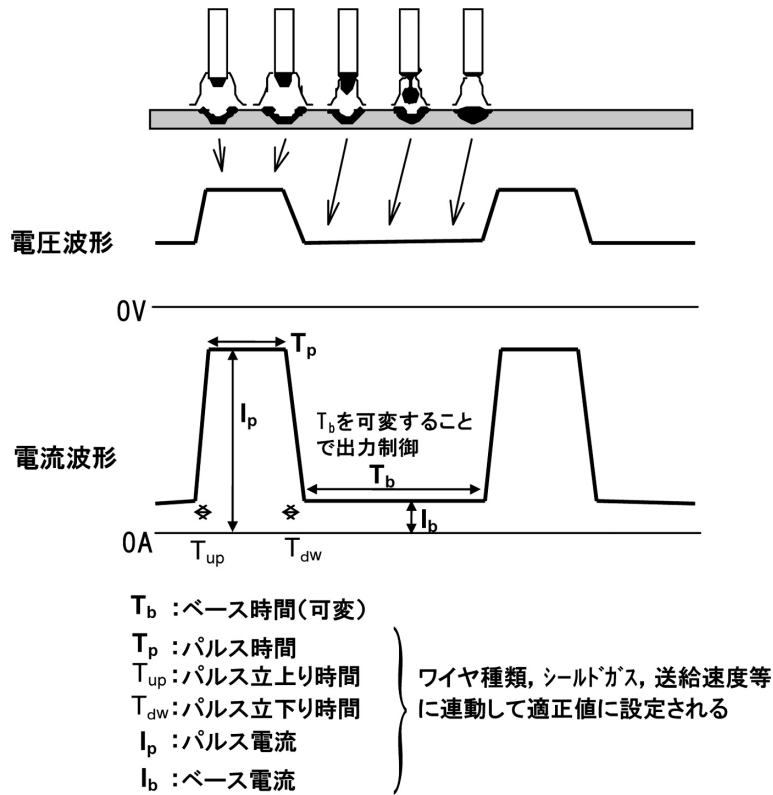


図6 1パルス1溶滴移行

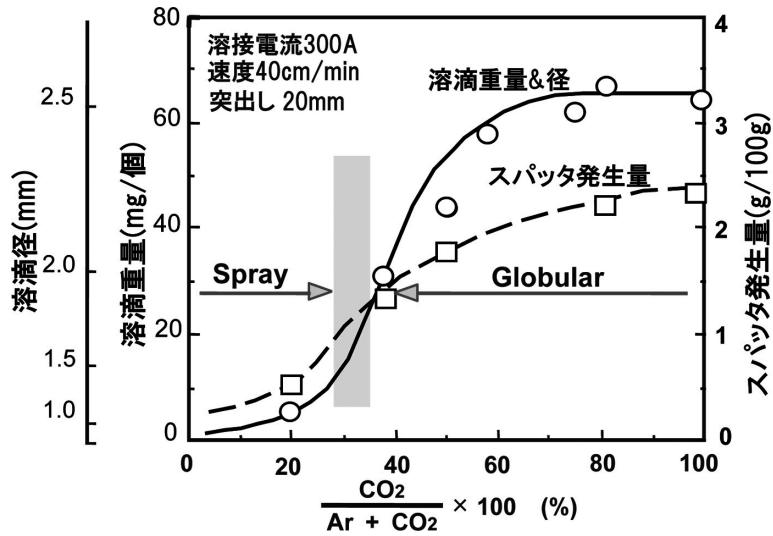


図7 ガス組成と溶滴重量およびスパッタ発生量の関係

はなく、後述するようなシミュレーションを併用しながら、基礎的な研究が進められている。

4. 液滴と橋絡液柱

液体の表面には表面張力が働いている。溶滴のように、表面をもつ液体の大きさがミリメートルオーダー以下の場合、表面張力は液体の形状や流動に対して大きく影響する。

4.1 表面張力による圧力

まず、もっとも簡単な場合として、雨粒のような球状の液滴に働く力を考えてみよう。液面が平面のときには、

表面張力は面に引っ張り合う力として働き、液体内の圧力はそれに接触している雰囲気圧に等しい。しかし、液面が曲面になると、液面に働く表面張力と曲面の形状・曲率によって、液体内部の圧力と雰囲気圧との間に差異が生じる。この表面張力による圧力は、次のラプラスの式を用いて表わすことができる。

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

ここで、 ΔP : 液体の内圧と雰囲気圧との差 [Pa], γ : 液体の表面張力 [N/m], R_1, R_2 : 液体表面の二つの主曲率半径 [m] である。例えば、直径2mmの水滴(水の表面張

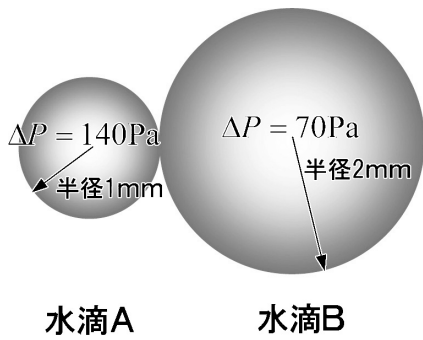


図8 表面張力による水滴の内圧

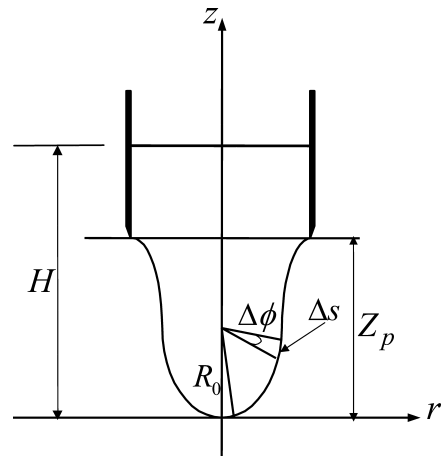


図9 懸垂液滴形状を計算する座標系

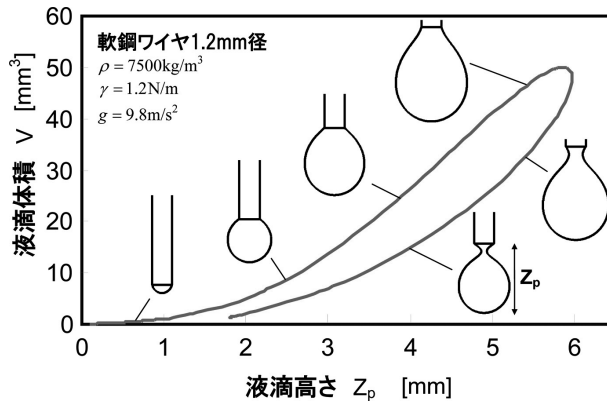


図10 懸垂液滴の高さと体積の関係

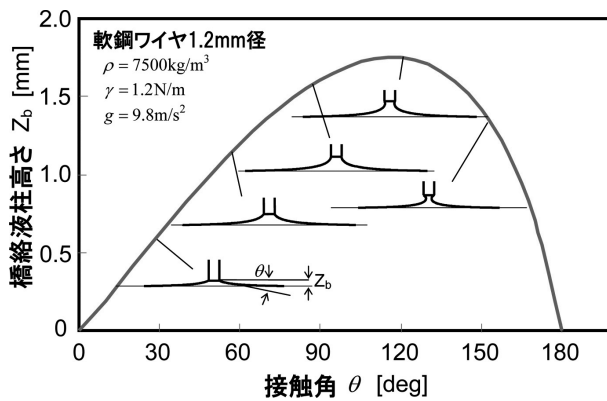


図11 橋絡液柱の高さと接触角の関係

力 0.07 N/m) の内圧は、曲面が球体であるので $R_1 = R_2 = 0.001 \text{ m}$ から、 $\Delta P = 140 \text{ Pa}$ となり、雰囲気圧（大気圧）より、140 Pa だけ高くなっている。いま、図8に示すように、大きさの異なる水滴が接触したときを考えよう。サイズの大きい水滴 B の内圧は 70 Pa であり、接触部においては、小さいサイズの水滴 A のほうがその内圧が高くなる。したがって、内圧が高い水滴 A から水滴 B に向かって、液体が流れ込むことになり、液滴は一体化する。そのほかの力が働いていない場合、表面張力による内圧が流れを駆動する力になる。

4.2 懸垂液滴

図9に示すようなガラス管中の液体が垂れ下がるような状態を考えよう。液滴底部では高さ $H[\text{m}]$ 分の重力に

よる静水圧 $\rho g H[\text{Pa}]$ が加わっており、これと表面張力による内圧 ΔP とつりあっている。したがって、液滴の各位置に対しては次式が成り立つ。

$$\gamma \left(\frac{d\phi}{ds} + \frac{\sin\phi}{r} \right) = \rho g (H - z) \tag{2}$$

ここで、 $\rho g H = 2\gamma / R_0$ 、 R_0 ：液滴底部の曲率半径 [m]、 ρ ：液体密度 [kg/m^3] である。液滴底部の曲率半径 R_0 もしくは等価液柱高さ H を変えて数値計算すると、図10に示すようにさまざまな液滴形状が得られる。図はその液滴の体積と液滴高さとの関係を示しているが、液滴の体積 V は液滴高さ Z_p に対して、最大値をとるまで単調増加し（この範囲では液滴にはくびれがない）、それよりも液

滴を長くしようとしても、体積は急激に減少する。そして、くびれが大きくなり体積 V は液滴高さ Z_p とともに減少する。したがって、ワイヤの溶融などのように時間とともに溶滴の体積が増加する場合、最大体積が安定限界となり、液滴長さの上限 Z_{pmax} も規定されることになる。言い換えると、電磁力など他の力が働いていない場合、液滴の質量（体積）が表面張力による保持限界を超えると棒端付近から離脱することを意味し、いわゆる自由移行が起こる。

4.3 橋絡液柱

丸棒をプールに浸してから、静かに引き上げると棒端と液面との間に橋絡液柱が形成される。ラプラスの式から計算で求めた橋絡液柱の高さ Z_b と丸棒端部での接触角 θ との関係を図11に示す。接触角の大きい領域では液柱の形状にはくびれ部があり、振動などの外乱に対して不安定である。また、ブリッジが形成される高さには、最大値が存在することがわかる。つまり、これ以上の長さの橋絡部を形成しようとしても、橋絡部は破断することを示している。この最大高さ Z_{bmax} は液体の種類（表面張力、密度）や棒径によって異なる。

5. 溶滴移行における電磁力の役割

電極ワイヤ端の溶融金属には、表面張力と重力に加えて電磁力やプラズマ気流による摩擦力などが複雑に作用している。とくにワイヤ端には電流が集中しているので、移行現象におよぼす電磁力の影響が大きい。

まず、電流が溶滴やアークの内部を流れることによって、どのような力が発生するのかについて考えてみよう。図12に示すように平行においた2本の金属線内に電流が流れるとき、それぞれの金属線に流れる電流により磁界が発生し、その磁界と電流との間に電磁力が働く。電磁力の方向は、フレミングの左手の法則に従い、電流の向きが同じ場合、互いに吸引力として働く。いま、アークや溶融金属などの導電性の流体に電流が流れるとき、流体の断面形状が円形ならば、その力は図13 (a) のように中心部に向かう。このため、流体中心部では外周部より圧力が高くなる（電磁誘導圧力）。電磁圧力 P_{em} [Pa] は電流 I [A] と電流密度 J [A/m²] の積に比例し、次式で与えられる。

$$P_{em} = \frac{\mu_0}{4\pi} J \cdot I \tag{3}$$

ここで、半径 R [m] の円柱状の導電性流体に働く圧力を考える。流体であるので、液柱内部には (1) 式で表現される表面張力による圧力が働いている。さらに電流 I [A] が流れると (3) 式による電磁圧力が加わるので、液柱の中心圧力 P [Pa] は次式のようになる。

$$P = P_0 + \frac{\gamma}{R} + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 R^2} \tag{4}$$

ここで、 P_0 : 雰囲気圧力 [Pa] である。図13 (b) のように液柱にくびれが生じると電流通路が狭くなるため、定性的には (4) 式から圧力が高くなることが理解できる。い

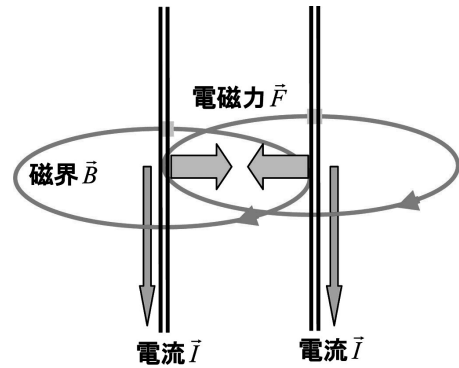


図12 電磁力の発生

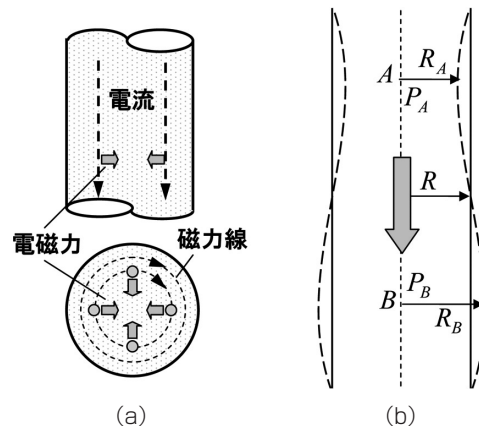


図13 導電性液体円柱に働く電磁圧力

ま、液柱表面がわずかに変位し、破線で示すようにくびれ部（半径 R_A ）と膨れ部（半径 R_B ）が形成された場合を考える。(4) 式から $R_A < R_B$ のとき、くびれ部 A 点の圧力 P_A は膨れ部 B 点の圧力 P_B よりも高くなる。したがって、軸方向に圧力勾配が生じるので、くびれ部から膨れ部に向かう流れを駆動することになり、くびれ部の液体はますます膨れ部に移動し、結果として液柱を分離、破断することになる。ワイヤ端の溶滴が球状の場合、このような機構によって溶滴が離脱すると考えてもよい。

6. シミュレーションによる移行プロセスの理解

ここ数年の間に、コンピュータの性能が格段に向上し、複雑な溶接現象をモデル化し、シミュレーションできる環境が整ってきた。ここでは筆者らにより開発した計算モデルを通して得られた知見について、簡単に述べることにする。

6.1 短絡移行

ガスマタルアーク溶接の短絡移行においては、ワイヤ端と溶融池との間に橋絡部が形成されるので、上述した表面張力による圧力に加えて、短絡電流による電磁ピンチ力が作用する。解析対象としては、最近のインバータ電源による電流波形制御溶接を想定し、図14に示すような移行状況をモデル化している。つまり、①アーク電流でワイヤ溶融量を制御して、特定の大きさの溶滴をワイ

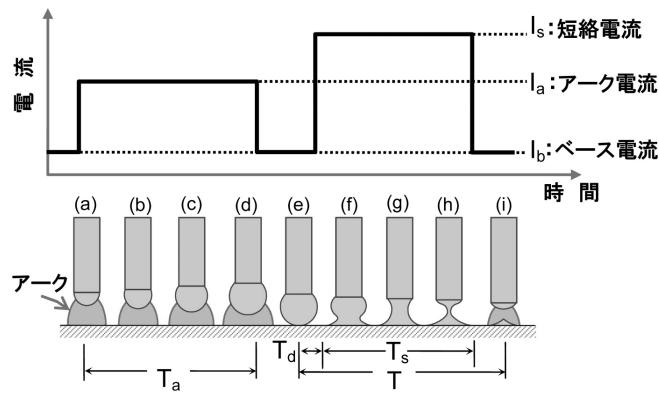


図14 短絡移行プロセスの電流波形制御

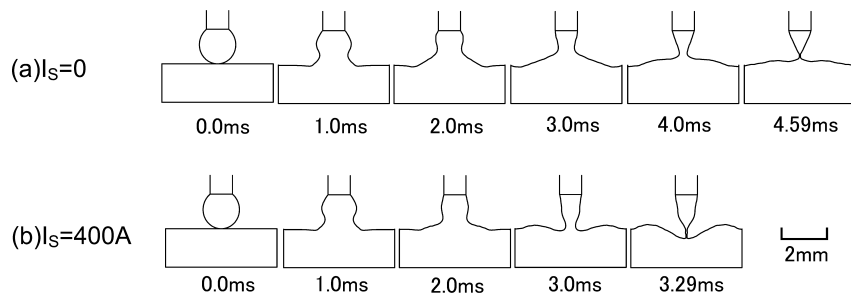


図15 短絡移行現象のシミュレーション (軟鋼ワイヤ 1.2 mm 径)

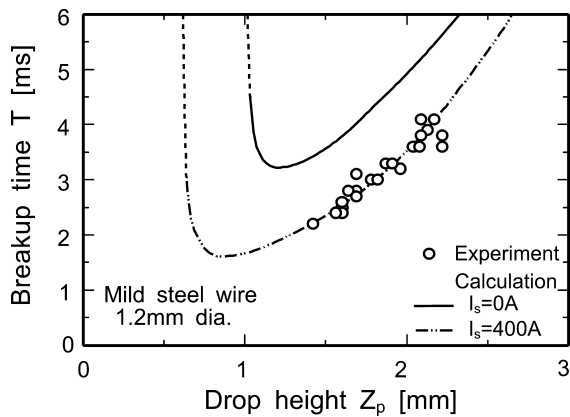


図16 溶滴高さ と 破断時間の関係

ヤ端に形成し、②電流値を低くした後、溶滴とプールとを静かに接触させて、毛管現象を利用してある程度移行させたのち (接触してから T_d 時間の時間おくれを持たせて)、③短絡電流 I_s を T_s 時間通電し、電磁ピンチ力で橋絡部を強制的に絞り、橋絡した状態で一旦電流値を下げ、④ブリッジの破断は慣性力を利用して、低電流で再点弧させる。このような波形制御は再点弧時などのスパッタ発生を抑制することを目的としている。ワイヤ径 1.2 mm の軟鋼溶滴が溶融池に接触してから、橋絡を形成した後、破断するまでの溶滴の挙動を図15に示す。ここでは、溶滴が溶融池に接触してから 1 ms 後に 400 A の短絡電流を通电している。図16は溶滴サイズと破断時間の関係を示したものである。接触前のワイヤ端の溶滴サイズが大きいくほど、橋絡部を破断する時間が長くなっており、実験

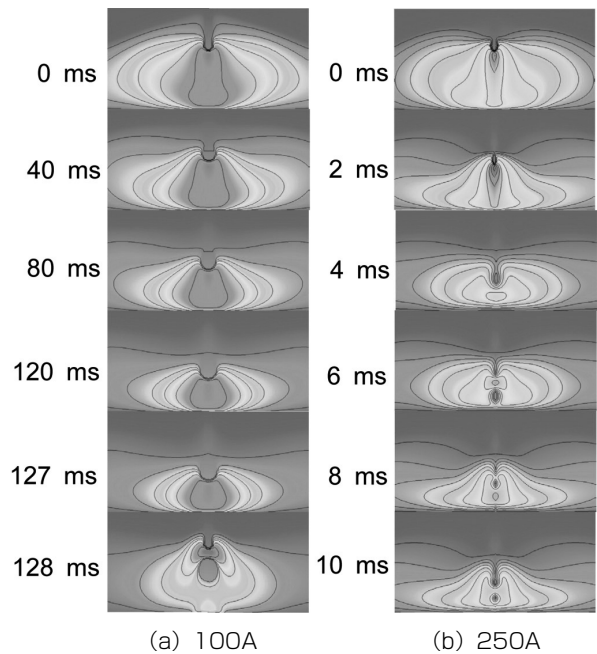


図17 ミグ溶接の自由移行のシミュレーション (軟鋼ワイヤ 1.2 mm 径)

結果とよく一致している^{14,15)}。

6.2 自由移行

図17はミグ溶接の自由移行プロセスを数値シミュレーションした結果である^{16,17)}。電流値が低い場合、電磁力は表面張力や重力に比べるとかなり小さく、ワイヤ端の溶滴は図10に示すような形状をとりながら大きくなる。そして、溶滴はワイヤ径よりも大きくなって、離脱する、

いわゆるグロービュラー移行となる。このとき、溶滴移行に伴ってアークプラズマの形状や大きさが変化することが分かる。一方、電流値を高くすると、ワイヤ溶融速度が大きくなるので、蛇口から水が流出するように、溶融金属はワイヤ端から流れる。同時に、強い電磁ピンチ力の作用により溶融金属は細く絞られながら、軸方向に引き伸ばされるようにして、小さな溶滴が離脱するスプレー移行形態となる。また、溶滴移行に伴うアークプラズマの変動も小さいことが分かる。

このワイヤ端の溶融金属の形状や離脱する溶滴の大きさは、液体金属の流動性だけに注目すると、溶融金属の粘性や表面張力が大きく支配するが、より深く考えると、ワイヤはアークによって溶かされ、離脱力となる電磁力は電流経路が支配するので、プラズマガスの熱伝導率や導電率などが大きく影響することになり、シールドガスの種類によってワイヤ溶滴や移行状態を変えることができる。このように、溶滴移行に伴うガスメタルアークの形状変化、すなわち、母材にとっての熱源の大きさや熱量、アーク圧力なども予測できるようになりつつある。

7. おわりに

ミグ/マグ溶接は、プロセスの構成要素であるワイヤ・シールドガス・電源について、それぞれの性能を向上させるとともに、その組み合わせのありかたを追求することで、さらなる進化をする可能性がある。そのポイントはアークの安定性と溶接品質、作業性を支配する溶滴移行をいかに制御するかということであり、そのためにはワイヤ溶融・溶滴移行現象の本質を見極める必要がある。現在、統合モデルと呼ばれている「溶滴移行－アーク放電－溶融池」を包括的に理解するモデルの開発が国内外で進められており、今後、その知見に基づいた新しいプロセスが開発されるものと期待している。

本稿では溶滴移行現象に焦点を絞って解説してきたが、溶接プロセスという観点からのミグ溶接・マグ溶接の特徴については紙数の関係で割愛している。これらについては、溶接学会が刊行しているテキストや本稿の引用文献などを参考にいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 溶接学会編：溶接・接合技術特論，第1章，産報出版(2003)。
- 2) 溶接学会編：溶接・接合技術概論，第1章，産報出版(2002)。
- 3) 中野，松田：アーク溶接のスパッタレスと高品質溶接への取り組み，溶接技術 Vol.53 (2005) No.8。
- 4) 三田：わが社のイナートガスアーク溶接機の現状と将来展望，軽金属溶接 Vol.43 (2005) No.4。
- 5) 濱本，川本，米森，印南：デジタルアーク溶接機の開発，溶接法ガイドブック5「溶接プロセスの高効率化」(2004) II-99，溶接学会溶接法研究委員会編。
- 6) 全，上山，原田：最近のデジタル制御イナートガスアーク溶接機の進展，軽金属溶接 Vol.43 (2005) No.4。
- 7) 古川：欧州におけるイナートガスアーク溶接機，軽金属溶接 Vol.43 (2005) No.4。
- 8) G. Huisman: Introduction of a new MIG process - Advantage and possibility, IIW Doc.212-952-99 (1999)。
- 9) K. Himmelbauer: The CMT-Process - A revolution in welding technology, IIW Doc. XII-1875-05 (2005)。
- 10) Classification of metal transfer on arc electric welding processes, IIW Doc. XII-636-76, 1976。
- 11) 丸尾，平田，野田：パルス MIG 溶接における溶滴移行とビード形成におよぼす電流波形の効果，溶接学会論文集，Vol.2 (1984) No.1。
- 12) 山本：レビュー&トレンド「アーク溶接電源」，溶接学会誌 Vol.66 (1997) No.8。
- 13) 片岡，池田，安田ほか：溶接法研究委員会資料，SW-2893-03 (2003)。
- 14) 平田，長村，恩田，安藤，黄地：短絡移行プロセスのモデル化，溶接学会論文集 Vol.22 (2004) No.2。
- 15) Y. Hirata, N. Ando, T. Osamura, M. Onda and T. Ohji: 3D Numerical Model of Short-Circuiting Transfer Process in GMA Welding, Mathematical Modelling of Weld Phenomena Vol.7 (2005)。
- 16) Y. Hirata, T. Ohji, and M. Ushio: Material Transfer in Gas Shielded Metal Arc Welding, Proc., 7th International Aachen Welding Conference, Vol.1 (2001) 253-268。
- 17) Y. Hirata, K. Ohnishi, K. Hiraiwa and T. Ohji: Numerical Model of Arc plasma with Metal Transfer in Argon Gas Shielded Metal Arc Welding, IIW Doc. 212-1076-05 (2005)。