

# 溶接プロセスのシミュレーション・可視化技術

Visualizations and Numerical Simulations in Welding Processes

田中 学 大阪大学  
Manabu Tanaka 接合科学研究所  
教授

## 1 はじめに

溶接技術は、自動車・造船などの輸送機器分野をはじめ、石油化学分野、エネルギー分野、建築分野などのものづくり産業における組立て・製造工程の基盤技術として世界中で利用されている。溶接施工技術の範囲には、継手品質の確保はもとより、溶接前後の材料調達から曲げ・成形加工、機械加工、熱処理、仕上げの精度なども含まれるため、ものづくり産業の各分野においては、これまでのデータベースやノウハウを駆使しながら、製造工程全体にわたる品質レベルと生産性の向上に努めてきたと言える。しかしながら、スマートフォンなどに代表されるように質の高いIT技術が普及しつつあり、生産効率を高めるため、各方面で生産のIoT化が推進されている。このような中で溶接技術もCAD/CAM、自動化・ロボット化に対応してきたが、要の溶接プロセスそのものに未解明な部分が多く、生産のIoT化にこたえるべく完璧に予測できる技術にまで未だ完成されていないのが現状である。

他方、ものづくりのグローバル化が進められる中、ものづくりの基盤技術としての溶接技術に求められるものが変化してきている。これまで、溶接プロセスにおける高効率化・高機能化などが技術開発における重要な課題の一つとして取り組まれてきたが、更なる次世代の溶接プロセスを創造するためには、今までの視点とは違う位置から現象をとらえ、その本質を理解し、まったく新しい発想で技術開発に取り組む姿勢が必要となってきた。

以上のような背景の下、溶接技術に残された数々の課題を解決するためには、現象面からの解析を深化させる可視化技術と、本質をモデル化するためのシミュレーション技術が極めて有効である。すなわち、溶接現象を詳細に観察するとともに、その機構を理論的に解析することを通して、これまで定性的な理解にとどまっていた現象を科学的な視点から定量的に明らかにすることが肝要である。本稿では、溶接技術の中

でもアーク現象にスポットライトをあて、アーク現象の先進可視化・シミュレーション技術を活用しながら溶接アーク現象の本質に迫ろうとする、昨今の取り組みについて紹介する。

なお、本稿は、第229・230回西山記念技術講座の講演内容をもとに執筆した。

## 2 溶接アーク現象の可視化

アーク溶接プロセスでは、アークプラズマからの入熱が母材の溶込み形状等を直接的に支配するため、プラズマの温度分布の可視化がプロセスの最適化を図る上で重要な鍵となる。これに加え、高温となった溶融池や、とりわけ消耗電極式のミグ溶接の場合には電極ワイヤ先端に形成される溶滴の表面から発生する金属蒸気の混入によって、光放射係数や電気伝導率等のアークの物性値が大きく変化するため、これがアークの温度低下等を引き起こし、更には母材への入熱を低下させることが予想される。したがって、溶接プロセスにおけるアーク現象を正しく理解するためには、数値計算シミュレーションとともに、アーク現象を可視化し、現象の本質を解き明かすための工夫が必要である。

### 2.1 高速度イメージ分光システムによるミグ溶接プロセスの可視化

高速度デジタルビデオカメラや計測機器に代表されるように、アーク溶接プロセスで生じる現象の「可視化」技術の進展は著しい。今まで見えなかったものが見えるようになったときのインパクトは極めて大きく、現象を支配している自然法則を瞬間的かつ直感的に捉えることができる可能性を秘めている。

今までミグ溶接におけるアークを見て、アーク中心に「芯」のようなものの存在を感じたことはないだろうか。図1はミグ溶接におけるアークの典型的な写真であるが、その「芯」

の部分の温度は、当然ながら、周囲の薄いフレームの温度より明らかに高い、と考えてきたことと思う。しかしながら、最近の高速デジタルビデオカメラを駆使した可視化技術の進歩は、そのような常識さえも覆すものである。

図2は高速イメージ分光システムの外観である。本システムの特徴は、3台の回折格子分光器と3台の高速デジタルビデオカメラによって、ミグアークのイメージをシールドガスのアルゴン (696.5 nm) と電極ワイヤから蒸発する鉄 (537.1 nmならびに 538.3 nm) の3つの線スペクトルイメージで同時に撮影できることである。分光の波長分解能は0.4 nmであり、撮影速度は毎秒2,000コマである。それぞれの線スペクトルイメージをプラズマ診断することにより、ミグ溶接中の動的なアーク温度分布と鉄蒸気分布が実験的に可視化できるようになった。

図3は、このシステムを用いて、軟鋼のミグ溶接における動的なアークを可視化した例である<sup>1)</sup>。(a) は電極ワイヤ端

で溶滴形成が始まったタイミングを0 msとしたものであり、その後、(b) は2.0 ms後、(c) は4.0 ms後の状態を示している。各図の左側からプラズマ温度分布、鉄蒸気濃度分布、アルゴン (Ar I) の線スペクトルイメージ、鉄 (Fe I) の線スペクトルイメージを示している。なお、実験条件は、溶接電流が270 A、アーク電圧が37 V、シールドガスがアルゴンである。この実験結果が示す重要なポイントは、アーク中心のプラズマ温度が周囲のプラズマ温度に比べて5,000 Kほど低下している点である。すなわち、図1に見るように、視覚的には最も輝度の高い中心部で温度が低く、輝度が明らかに低い周囲で温度が高くなっていることを意味している。

人類がアーク放電を発見して約200年になるが<sup>2)</sup>、当然ながらアークの中心が最も温度の高い部分であると考えられてきた。実際、従来の静的なアーク放電、すなわち非消耗電極式のティグアークに対するプラズマ診断の結果は、中心部にピークを有する正規分布状の温度分布になっている<sup>3)</sup>。

ここで、アークプラズマが局所熱平衡 (Local Thermodynamic Equilibrium, LTE) 状態である場合、輸送係数など各種物性値の温度依存性を知ることが可能になる<sup>4,5)</sup>。加えて、プラズマを構成している電子、イオン、原子や分子の個々の性質を塗りつぶしてプラズマ全体を一つの流体として捉え、アークプラズマに電磁流体力学 (magnetohydrodynamics, MHD) 近似<sup>6)</sup>を仮定すれば、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \rho (v \cdot \nabla) v = -\nabla P + \eta \nabla^2 v + J \times B + \rho g \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \rho C_p (v \cdot \nabla) T = \kappa \nabla^2 T + J \cdot E - U_{arc} \dots\dots\dots (3)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \dots\dots\dots (4)$$



図1 ミグ溶接におけるアークの典型例

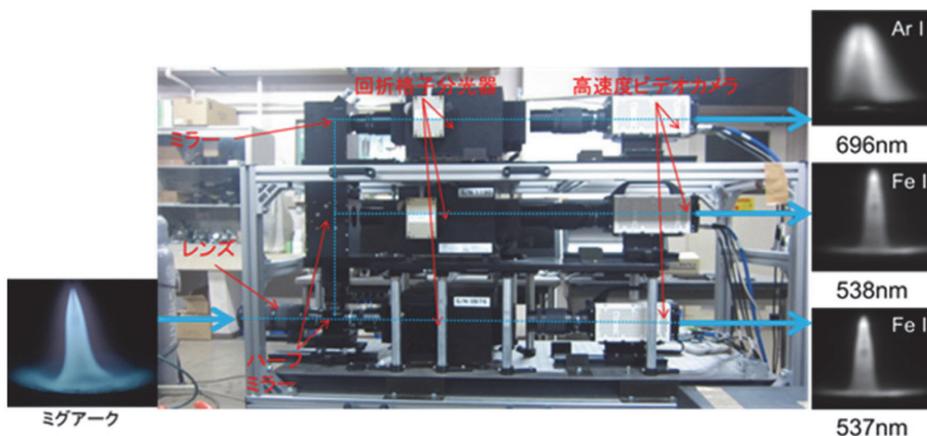


図2 高速イメージ分光システムの外観

$$J = \sigma E \dots\dots\dots(5)$$

$$\nabla \times B = \mu J \dots\dots\dots(6)$$

の質量保存式、運動量保存式(ナビエ・ストークス方程式)、エネルギー保存式、電流保存式、オームの法則、マクスウェル方程式をそれぞれ連立して解くことにより、プラズマ全体

にわたる速度、圧力、温度、電界強度、電流密度、磁束密度など実験による測定が難しい物理量を得ることができる。ここで、 $\rho$ は密度、 $v$ は流速、 $P$ は圧力、 $\eta$ は粘性係数、 $J$ はアーク電流密度、 $B$ は磁束密度、 $g$ は重力加速度、 $C_p$ は定圧比熱、 $\kappa$ は熱伝導率、 $E$ は電界強度、 $\sigma$ は電気伝導率、 $\mu$ は透磁率、 $t$ は時間である。

図4は、軸対称2次元のミグアークを数値解析モデルの対

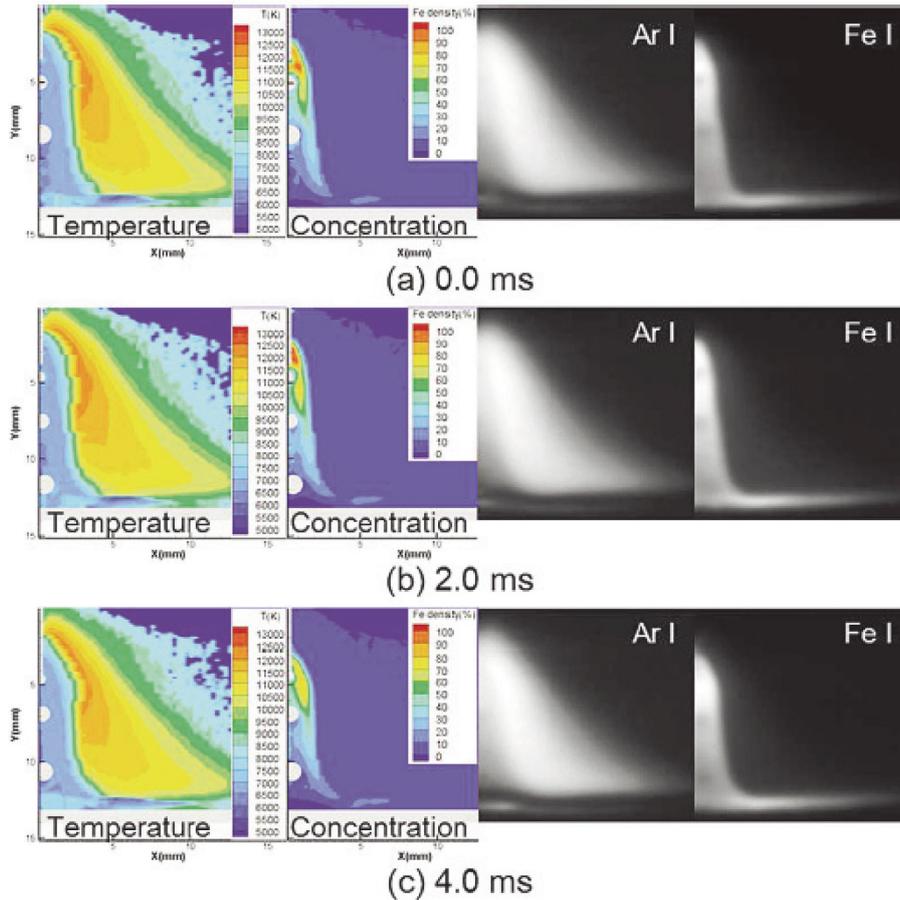


図3 ミグ溶接におけるプラズマ温度分布および鉄蒸気濃度分布、ならびにアルゴンの線スペクトルイメージおよび鉄の線スペクトルイメージ<sup>1)</sup>

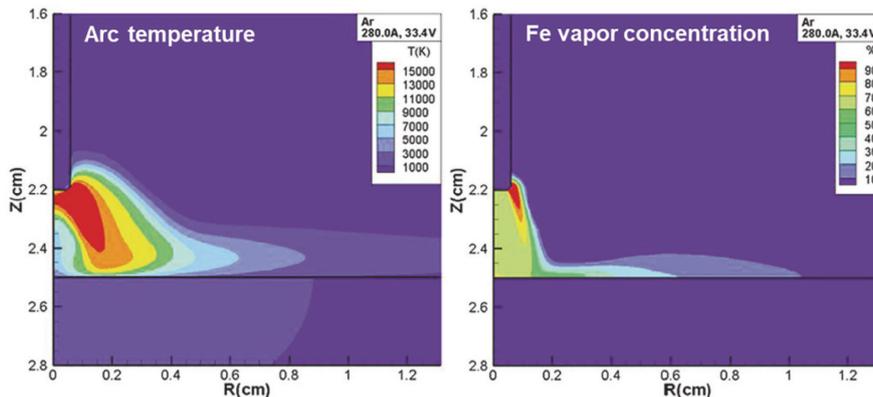


図4 ミグ溶接の数値シミュレーションによるアークプラズマ温度分布および鉄蒸気濃度分布<sup>7)</sup>

象とした場合の計算結果である<sup>7)</sup>。本モデルの特徴は、陰極や陽極で生じる現象を考慮するために、以上のMHD方程式をアークプラズマのみに適用するのではなく、「電極ワイヤ(陽極)-アークプラズマ-母材(陰極)」に亘って適用して同時に解くことである。すなわち、(1)～(6)の6つの方程式は各空間に分けて解かれるのではなく、まったく対等に、各種物性値を変化させることで同じ連立方程式を用いて統一的に数値計算の解が求められることになる。ただし、「陽極-アークプラズマ」系と「アークプラズマ-陰極」系では、それぞれ次のエネルギーバランスの式<sup>8,11)</sup>を追加して解くことになる。

$$q_A = J \left( \frac{5 k_B T}{2 e} + \frac{\phi_A}{e} + V_A \right) + |k \nabla T| + U_{arc} - U_A \dots\dots\dots (7)$$

$$q_K = J_i \left( \frac{3 k_B T}{2 e} + \frac{\varepsilon_i - \phi_K}{e} + V_K \right) - J_e \frac{\phi_K}{e} + |k \nabla T| + U_{arc} - U_K \dots\dots (8)$$

ここで、 $J$ はアーク電流(陽極近傍ではほぼ全てが電子電流)密度、 $e$ は電気素量、 $\phi_A$ は陽極材料の仕事関数、 $V_A$ は陽極降下電圧、 $U_A$ は陽極材料の光放射エネルギー損失である。

他方、 $J_i$ 、 $J_e$ はそれぞれイオン電流密度および電子電流密度、 $\varepsilon_i$ はガス分子の電離エネルギー、 $V_K$ は陰極降下電圧、 $U_K$ は陰極材料の光放射エネルギー損失である。なお、アーク電流密度 $J$ に対して $J = |J_i| + |J_e|$ の関係があり、陰極表面近傍におけるイオン電流の割合は数%から50%であると言われている<sup>8,9)</sup>。

コントロールボリューム法(SIMPLE解法)<sup>12)</sup>によって、式(4)及び(5)よりアーク電流密度と電界強度が計算された後、式(6)より磁束密度が計算され、その後式(1)及び(2)より流速と圧力が計算されて対流項が確定し、式(3)より温度が計算される。この一連の計算を繰り返すことにより収束解が得られる。

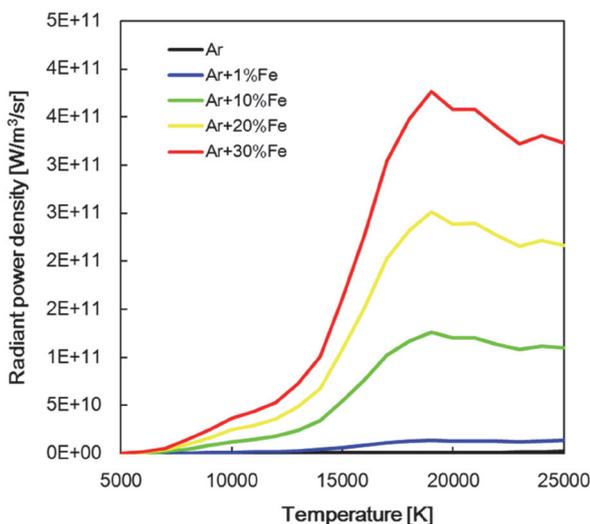


図5 Arアークプラズマの光放射係数に与える鉄蒸気の影響<sup>13)</sup>

さて、図4に話を戻そう。この図はアーク中心部の温度が低下する理由を明快に示している。すなわち、電極ワイヤ先端から発生した金属(Fe)蒸気がプラズマ気流によってアーク柱の中心部に輸送され、その結果、金属蒸気プラズマ領域が形成されるとともに、その領域のプラズマ温度が低下することが数値シミュレーションによっても予測された。また、そのプラズマ温度が7,000 K程度であり、実験結果とよく一致している。この温度低下の理由は、図5に示すとおり<sup>13)</sup>、金属蒸気の混入によって光放射係数が大きくなり、光放射エネルギー損失によってプラズマ温度が低下するためである。図6は、この時のミグアークにおける全エネルギーバランスを定量的に示したものである<sup>7)</sup>。9,352 W(溶接電流280 A、アーク電圧33.4 V)の投入エネルギーに対して母材に輸送されたエネルギーは5,516 Wであり、熱効率は約59%である。一方、アークの光放射によって散逸されたエネルギーは3,810 Wであり、投入エネルギーの実に約41%に達している。この光放射エネルギー損失は、ティグアークの光放射エネルギー損失<sup>14)</sup>の10倍以上にも達し、アーク柱の中心部に形成された金属蒸気プラズマ領域の温度を低下させている。

ティグ溶接では電位勾配による拡散(電気泳動)によって金属蒸気(金属イオン)がアークプラズマに混入するのに対して<sup>15)</sup>、ミグ溶接では主にプラズマ気流によって金属蒸気がアークプラズマに輸送される。また、それによって、金属蒸気領域とシールドガス領域の二つに分離され、ミグアークが二重構造という非常にユニークな形態を呈するのである。このミグアーク特有の現象については、Ar+5% CO<sub>2</sub>、Ar+10% CO<sub>2</sub>、Ar+15% CO<sub>2</sub>、Ar+20% CO<sub>2</sub>までの混合ガスを用いたマグアークについても同様の現象が存在することが実験的に確認されている<sup>16,17)</sup>。

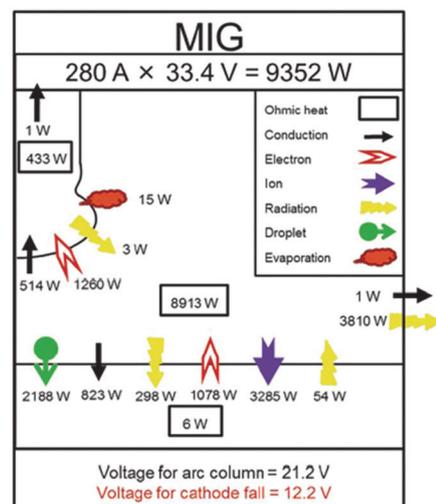


図6 ミグアークの「電極ワイヤ-アークプラズマ-母材」系のエネルギーバランス<sup>7)</sup>

## 2.2 ミグ溶接と炭酸ガスアーク溶接におけるアークプラズマの違い

さて、前節は純アルゴンシールドガスのミグ溶接の場合である。ミグ溶接では、高電流域においてスプレー移行となり、スパッタの少ないスムーズな溶滴移行が達成される。一方、純CO<sub>2</sub>シールドガスを使用する炭酸ガスアーク溶接（マグ溶接の一種）の場合はどうであろうか。炭酸ガスアークは熱的ピンチ効果によってアークが緊縮し<sup>18)</sup>、アークルートが溶滴下面に形成されるため溶滴移行が妨げられる。この結果、高電流域においてもスプレー移行形態に遷移せずにグロービュール移行（反発移行）形態のままになる。スパッタが多くなる要因の一つである<sup>19)</sup>。この炭酸ガスアークの状態はミグアークに比べて違うのであろうか。

図7は、ミグ溶接と同様に、炭酸ガスアーク溶接における動的なアークを可視化した例である<sup>20)</sup>。図の左側からプラズマ温度分布、鉄蒸気濃度分布、酸素（O I, 777.3 nm）の線スペクトルイメージ、鉄（Fe I, 537.1 nm）の線スペクトルイメージである。実験条件は、溶接電流が300 A、アーク電圧が33.5 V、シールドガスが100% CO<sub>2</sub>である。ここで注目していただきたいポイントは、酸素の線スペクトルイメージと鉄の線スペクトルイメージがほとんど同じで差違のないことである。ミグ溶接（図3）では、アルゴンと鉄のそれぞれの線スペクトルイメージに明らかな差違があり、鉄蒸気とアルゴンガスとの分離がなされていることが一目瞭然であった。逆に、炭酸ガスアーク溶接（図7）では、酸素と鉄のそれぞれの線スペクトルイメージに差違が見られないということは、炭酸ガスと鉄蒸気が分離されることなく十分に混ざり合っている明らかな証拠と言えよう。プラズマ温度は7,000 K~8,000 Kでほぼ均一した緩やかな温度分布であり、同様に鉄蒸気濃度も局所的に高濃度化することなく緩やかな濃度分布を示している。この主因は、炭酸ガスの熱的ピンチ効果によって緊縮したアークから電極ワイヤ先端へのエネルギー輸送の増加に伴い

溶滴表面温度が上昇し<sup>21)</sup>、金属蒸気が多量に発生するため、かえってアークルートが拡がることになる。その結果、緊縮したアーク柱と相まってアーク柱内での圧力勾配が低下し、誘起されるプラズマ気流の流速が抑制され、金属蒸気がアーク中心部に局所的に輸送されるメカニズムが弱まるため、と推察される。

## 3 現象解明に基づくアーク溶接技術開発の最前線

以上のミグ・マグ溶接におけるアーク現象の可視化により、溶滴移行形態とアークプラズマ形態との関係が明らかになりつつある。大電流域におけるスプレー移行の出現には、電極ワイヤ先端部での電磁ピンチ力のみならず、アークプラズマ形態がミグアークのような二重構造になっていることが必要条件であることがわかってきた。プラズマ温度と金属（Fe）蒸気濃度がわかれば、プラズマ物理学的にアーク柱の電気伝導率分布を導くことができる<sup>5)</sup>。その結果、図8に示すような溶接電流の分布が推測された<sup>22)</sup>。ミグ溶接では、低温化したアーク中心部よりも高温の周辺部に電流が流れやすくなる<sup>16)</sup>。その結果、大電流域において、電極ワイヤ先端部の側

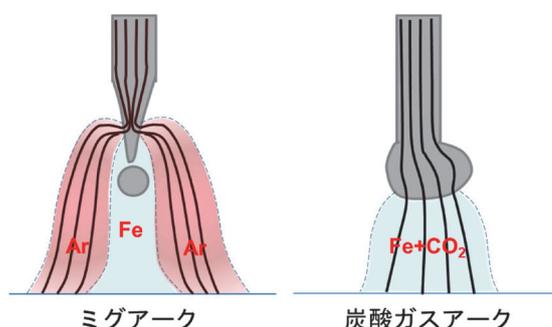


図8 ミグ溶接と炭酸ガスアーク溶接におけるアーク現象と電流経路の違い(推測)

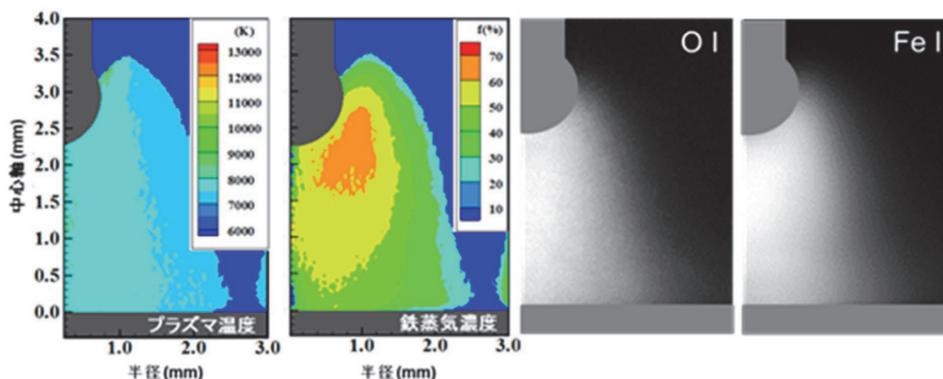


図7 炭酸ガスアーク溶接におけるプラズマ温度分布および鉄蒸気濃度分布、ならびに酸素の線スペクトルイメージおよび鉄の線スペクトルイメージ<sup>20)</sup>

面で電磁ピンチ力が効果的に働くとともに溶滴下部での電磁ピンチ力が弱まるためスプレー移行となる。逆に、炭酸ガスアーク溶接では、アーク中心部にも電流経路が存在するため溶滴下部での電磁ピンチ力が大きくなり、スムーズな溶滴移行が妨げられる。その結果、スプレー移行形態に遷移せずにグロービュール移行形態のままになるものと考えられる。スプレー移行のようなスムーズな溶滴移行形態の発生には、アーク中心部における電流経路の出現を抑制することが必要であることを意味している。

さて、炭酸ガスアーク溶接において、希土類元素を添加した電極ワイヤを正極性で使用した場合、100% CO<sub>2</sub>雰囲気でありながらも、大電流域においてスプレー移行形態が出現することが明らかになっている<sup>23)</sup>。Methongらは、正極性の希土類元素添加ワイヤを用いた炭酸ガスアークについても同様のイメージ分光分析を実施している<sup>20)</sup>。その結果、そのアークプラズマ形態は、まさにミグアークのような二重構造になっていたのである。Methongらの実験結果は図8の推測を支持するものである。

溶接電流の大きさやシールドガスの種類によってミグ・マグ溶接における溶滴移行形態が大きく変化することは古くから知られており、また、溶接技術者用の教科書においても明記されている<sup>19)</sup>。しかしながら、そのメカニズムについては、溶接アーク物理として取り扱いが極めて難しく、いま、その解明の端緒に着いたところである。最新の数値シミュレーション技術では、電極ワイヤ先端に形成される溶滴とアークプラズマとの相互作用を考慮に入れた数値モデル化が進み、複雑な溶滴移行形態の予測が行えるところまで到達しつつある<sup>24,25)</sup>。荻野らは、この数値モデルを応用して、ミグアークと炭酸ガスアークにおける溶滴移行形態の違いを数値シミュレーションによって解き明かそうとしており、その結果は図8を支持している<sup>26)</sup>。今後の詳細なメカニズム解明が待たれる。

## 4 おわりに

周知のとおり、近年のデジタル技術の進歩は目覚ましい。本稿でも紹介したように、溶接プロセスで生じる現象の「可視化」技術には目を見張るものがある。今まで見えなかったものが見えるようになったときのインパクトは極めて大きく、現象を支配している自然法則を瞬間的かつ直感的にとらえることができる可能性を秘めている。溶接プロセスに携わる研究者や技術者は、日常の観察や計測を通じて、対象とするプロセスのメカニズムや現象の本質に迫る仮説を持っている。今まで見えなかったものが見えるということは、パズルの最後のピースを埋めるかのように、仮説から真実への一步を後押ししてくれる。あるいは、考えてもいなかった自然法

則の美しさに出会う機会も与えてくれるだろう。

最後に、アーク研究の開拓時代に目を向けてみたいと思う。それは、ハータ・エアトン (1854-1923年, 英国) による著書「The Electric Arc」である<sup>2)</sup>。彼女は英国電気学会の女性初の会員になったアーク放電の研究者であり、この著書は世界で初めて系統的にアーク放電現象を纏めた本である。その本の中にはアーク放電現象に関する数多くの図がある。それらは、エアトンが実験観察を通じて自身の目で捉えて描いた精緻な白黒のスケッチであり、その横には、それぞれの領域の発色の違いが理解できるように色が言葉で示されている。その一例を図9に示す。アーク中心部では「Violet」、アーク外周部では「Green」、アークと電極のルート部では「White」、それ以外の電極領域では「Yellow」や「Dark Yellow」などが記載されている。これは、まさに1902年当時の現象の可視化である。彼女はこの著書の中で次のような言葉を残している。「実験はアークを支配している神秘的な自然法則を見出すための自然への問いかけである。そして、自然はそれに対して時間を掛けて控えめに答えてくれる。」

いつの時代においても、物事の本質を見極める力が必要である。そこには、忍耐強い観察と重厚な思考に基づく弛まない努力が含まれる。加えて、未来に胸を膨らませて夢を描ける心が必要であろう。「可視化」は各々のエキスパートがそれぞれの視点から物事の本質を見極める機会と、それぞれの夢を織りなす機会を生み出してくれることも魅力である。これまで個々の企業や個々の研究機関等で進めてきた保有の知識や蓄積技術をマッチングさせることを容易にしてくれる。「可視化」は「1+1」が2ではなく、3にも4にも広がる大きな可能性を秘めている。先進可視化技術で溶接科学の未踏領域を切り拓き、未来に輝く革新的な溶接技術の開発に繋げる。溶接分野の枠を越えて、学協会、大学、中立研究機関、企業の

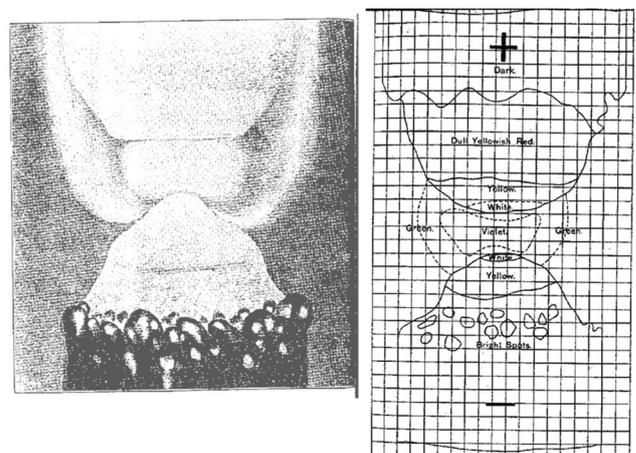


図9 1900年初頭のアーク放電のビジュアル化—著書「The Electric Arc」より—<sup>2)</sup>

夢が縦糸と横糸を織りなし、オールジャパンで日本のものづくりの発展に繋がることを期待している。

#### 参考文献

- 1) 辻村吉寛, 田中学 : 溶接学会論文集, 30 (2012) 4, 288.
- 2) H. Ayrton : The Electric Arc, The Electrician Printing & Publishing, London, (1902)
- 3) 平岡和雄, 塩飽孝至, 黄地尚義 : 溶接学会論文集, 14 (1996), 641.
- 4) 田中学 : 溶接技術, 44 (1996), 122.
- 5) 神沢淳 : プラズマ伝熱, 信山社サイテック, (1992)
- 6) 赤崎正則, 村岡克紀, 渡辺征夫, 蛭原健治 : プラズマ工学の基礎, 産業図書, (1987)
- 7) 辻村吉寛, 田中学 : 溶接学会論文集, 30 (2012) 1, 68.
- 8) M. N. Hirsh and H. J. Oskam : Gaseous Electronics, Chapter 5 Electric Arcs and Arc Gas Heaters by E. Pfender, Academic Press, New York, (1978)
- 9) 安藤弘平, 長谷川光雄 : 溶接アーク現象 (増補版), 産報出版, (1973)
- 10) J. F. Lancaster : 溶接アークの物理, 溶接学会, (1990)
- 11) 黄地尚義 : 溶接・接合プロセスの基礎, 産報出版, (1996)
- 12) スハス・パタンカー : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, (1985)
- 13) M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamamoto, K. Yamazaki, K. Suzuki, A. B. Murphy and J. J. Lowke : J. Phys. D : Appl. Phys., 43 (2010), 434009 (11pp) .
- 14) M. Tanaka and J. J. Lowke : J. Phys. D : Appl. Phys., 40 (2007), R1.
- 15) H. Park, M. Trautmann, K. Tanaka, M. Tanaka and A. B. Murphy : J. Phys. D : Appl. Phys., 51 (2018), 395202 (15pp) .
- 16) 茂田正哉, 中西省太, 田中学, A. B. Murphy : 溶接学会論文集, 33 (2015) 2, 118.
- 17) T. Methong, M. Shigeta, M. Tanaka, R. Ikeda, M. Matsushita and B. Poopat : Sci. & Tech. Welding & Joining, 23 (2018), 87.
- 18) 田中学, 田代真一 : 溶接学会論文集, 25 (2007), 336.
- 19) 溶接・接合技術総論, 溶接学会・日本溶接協会編, 産報出版, (2015)
- 20) T. Methong, T. Yamaguchi, M. Shigeta, M. Tanaka, R. Ikeda, M. Matsushita and B. Poopat : Weld World, 61 (2017), 1039.
- 21) 山崎圭, 山本恵理, 鈴木啓一, 興石房樹, 和木謙治, 田代真一, 田中学, 中田一博 : 溶接学会論文集, 26 (2008) 3, 214.
- 22) 田中学 : 溶接技術, 65 (2017) 2, 40.
- 23) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則 : 溶接学会論文集, 26 (2008), 37.
- 24) 荻野陽輔, 平田好則 : 溶接学会論文集, 34 (2016), 35.
- 25) 荻野陽輔, 平田好則, 木花翔吾, 新田夏規 : 溶接学会論文集, 36 (2018), 94.
- 26) Y. Ogino, Y. Hirata and S. Asai : Numerical simulation describing influence of the shielding gas on the metal transfer phenomena in GMAW, IIW Doc.212-1490-17, Shanghai, (2017)

(2019年1月9日受付)