

50周年記念式典記念講演 アーク溶接の見える化技術について

About the visualization technology of the arc welding

田 中 学*
Manabu Tanaka*



1. はじめに

近年、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「見える化」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。ここでは、アーク溶接の見える化の最前線を紹介しながら、アーク溶接技術の将来について探りたい。

2. アーク溶接における物理

アーク溶接は、元々、絶縁体であった気体が二つの電極間で絶縁破壊し、電気が流れるようになった気体放電の一つ、「アーク放電」を応用したものである。電気が流れる気体はプラズマと呼ばれ、1立方センチメートルあたり約10の17乗個（百万個の一千億倍）という天文学的な数のイオンや電子がそれぞれ高速で移動し、電流の役割を果たすとともに、電極ワイヤや母材に流入してエネルギーを効率よく運ぶ重要な仕事を担っている¹⁾。もう少し視野を広げて見ると、アークプラズマという1万℃を超す高温の電離気体からの熱伝導加熱によっても電極ワイヤや母材へエネルギーが供給される。イオン・電子の入射や熱伝導によって表面からエネルギーを供給された母材は、その融点以上で液体となり、溶融池を形成する。溶融池内には対流が発生し、アークから供給されたエネルギーは対流と熱伝導の双方によって輸送され、溶融池の大きさや形状が変化する。

以上、少し紙面を割かせていただいたが、これらはすべて、長年にわたる先人達の研究成果として導かれたアーク溶接物理の一端である。アーク溶接プロセスで生じる個々の現象を支配する自然法則を発見し、それらを整理して体系化することにより、アーク溶接プロセスで生じる様々な

現象の理解に結びつけることがアーク溶接における物理と言えよう。

3. アーク溶接物理の重要性と「見える化」のアドバンテージ

生じる現象の観察は、自然の法則性を発見し、その現象を理解する第一歩である。物理から技術への展開には、現象の根幹をなす法則を抽出し、その現象を工学モデルに置き換えることが必要である。その際、工学モデル化の精度が技術のレベルや内容に大きく影響を及ぼす。

先程も述べたように、最近の観察・計測機器や数値計算シミュレーション技術の進歩は著しい。古くは、点在した情報や現象終了後の情報を有機的に結びつけ、点と点の間、あるいは、現象の途中と終了後の間を推察で埋めることにより「頭の中」で系統立てて理解することが必要であった。例えば、ステンレス鋼のティグ溶接において、硫黄含有量の少ない場合と多い場合で溶込み深さが大きく異なる場合を図1に取り上げよう²⁾。溶接終了後に溶込みが大きく異なるという情報を元に、どうしてこのような違いが生じるのかを考えた場合、溶接中の現象を観察することになる。古くから多くの研究成果によって、タングステン電極温度、プラズマ温度、プラズマ気流速度、アーク圧力、溶融池温度、溶融池対流速度、表面張力など、それぞれが個別に観察・計測されて点と点の情報として与えられていた。これら点と点の間、溶接中と溶接後の間を推察で埋めることにより、溶接中の現象を支配する法則性を見出すことになるが、なかなか難しい。

しかし、最近の観察・計測機器および数値計算シミュレーションの進歩は、現象のその場観察を容易にし、現象の見える化を大いに発展させた。この見える化の進展は、誰もが直感的に現象を支配する自然法則を捉えて、系統立てて整理・理解することを容易にした。もちろん、現象の理解を容易にしたばかりでなく、従来、発見できなかった法則性を新たに見出し、より精緻な物理をもって現象をより精度の高い工学モデルに置き換えることを可能にしたとも言えよう。

* 大阪大学接合科学研究所
Joining and Welding Research Institute, Osaka University
原稿受付：2012年11月21日

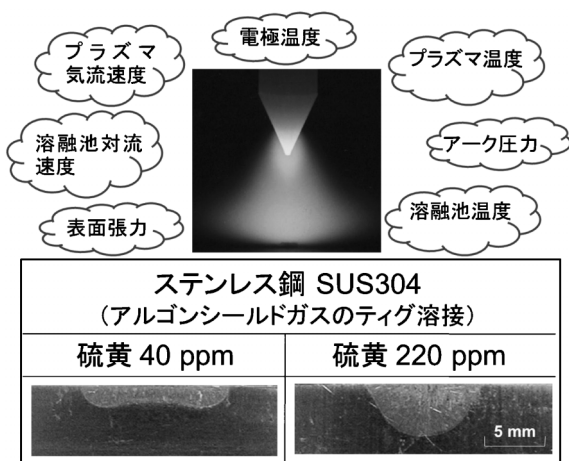


図1 ステンレス鋼のティグ溶接における硫黄含有量の違いによる溶込み形状の変化

コンプレックスな現象であるが故に、アーク溶接プロセスの見える化は、より一層の意義がある。繰り返しになるが、見える化は、現象を支配する自然法則の直感的な発見という点でアーク溶接物理の発展に大きく貢献し、ひいては、アーク溶接現象のより正確な理解を導き、現象的を射た工学モデル化を通じて、アーク溶接プロセス技術の進化に寄与する。

4. 見える化の最前線

(1) 数値計算シミュレーション

図2は、シールドガスがヘリウムの場合であるが、図1で取り上げた例に関する数値計算シミュレーション結果とそれぞれのアーク溶接写真である²⁾。上述のように個々の要素がコンプレックスに絡み合う現象の法則性を抽出して理解するには、最近のシミュレーション技術の進歩が多なる貢献を果たしている。タングステン電極は3,500 Kで動作し、プラズマの最高温度が19,000 K、プラズマ気流の最高速度が秒速314メートルに達しており、この気流が溶融池からの金属蒸気を外部へ吐き出し、プラズマ中の金属蒸気はモル濃度で7パーセントに達している。溶融池は最高温度2,500 Kまで加熱され、プラズマ気流によるせん断力とマランゴニ力（表面張力差によって発生する力）を駆動力として溶融池内の液体金属が秒速59センチメートルで高速流動している、というように今まで点と点の情報でしかなかったものが面の情報となり、視覚的に現象を捉えることができるようになってきた。ティグ溶接プロセスの可視化により、硫黄含有量の違いによって温度に対する表面張力の勾配が逆転し、マランゴニ力を駆動力として誘起される溶融池対流の流動方向の違いがアークからのエネルギーの輸送方向を変えて、結果的に溶込み深さに違いの生じることが理解された²⁾。

(2) プラズマ分光解析

今までミグ溶接におけるアークを見て、アークの中心に

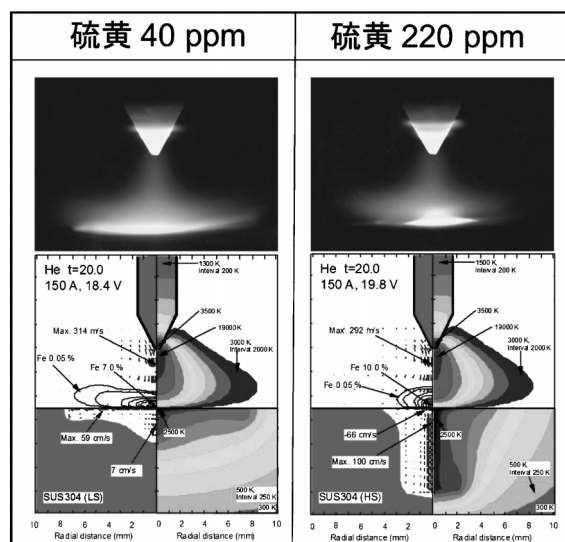


図2 数値計算シミュレーションによるティグ溶接プロセスの見える化

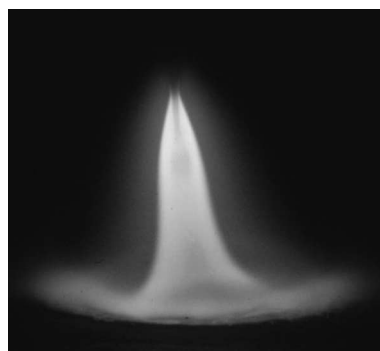


図3 ミグ溶接におけるアークの典型例

「芯」のようなものの存在を感じたことはないだろうか？図3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。著者も、もちろん、そのように信じてきた。最近の高速度デジタルビデオカメラを駆使した見える化技術の進歩は、そのような常識さえも覆すものである。

図4は、著者の研究室で作製した高速度イメージ分光システムの外観である。本システムは、対物レンズ、ハーフミラー、2台の回折格子分光器（回折格子2400本/mm、焦点距離300 mm, SP-2357, Acton）、2つの結像レンズ、2台の高速度デジタルビデオカメラ（nac, MEMRECAM GX-1）、ならびに画像処理用パソコンによって構成されている。分光の波長分解能は0.6ナノメートルであり、今回の撮影速度は毎秒2,000コマとした。2台の分光器と2台のビデオカメラを使用する理由は、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）と溶接ワイヤから蒸発するアルミニウム（669.6 nm）の2つの線スペクトルイメージで同時に観察するためである。それぞれ

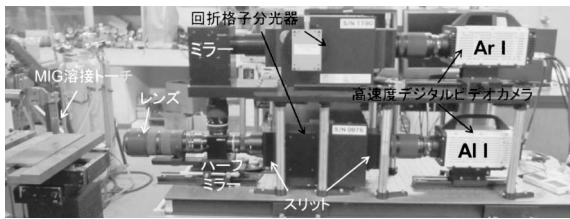
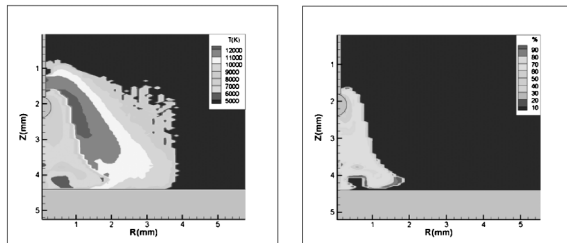


図4 高速度イメージ分光システムの外観



(a) プラズマ温度 (b) アルミニウム蒸気濃度

図5 アルミニウムのミグ溶接におけるプラズマ温度分布ならびにアルミニウム蒸気濃度分布

の線スペクトルのイメージをプラズマ診断することにより、アルミニウムのミグ溶接中の動的なアーク温度分布とアルミニウム蒸気分布が実験的に見える化できるようになった。

図5は、高速度イメージ分光システムを用いて、アルミニウムのミグ溶接における動的なアークを見る化した例である。(a)はプラズマ温度、(b)はアルミニウム蒸気濃度分布である。なお、実験条件は、溶接電流が220 A、CTWDが25ミリメートル、シールドガスがアルゴン、溶接ワイヤ及び母材がA1070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6千℃ほど低下している点である。すなわち、図3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、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³⁾。アーク中心部の温度が低下する理由は、電極ワイヤ端に形成される溶滴から蒸発するアルミニウム蒸気が高速のプラズマ気流によってアーク中心部に輸送される結果、アルミニウム原子やイオンからの光の放射損失が多くなり、プラズマ温度が低下するためである⁴⁾。

図6は、静的なティグ溶接と動的なミグ溶接の典型的な写真である。ティグアークでは、固体電極であるため熔融金属が母材のみに存在し、金属蒸気源がプラズマ気流の下流域にしか存在しない。このため、毎秒数百メートルに達する高速のプラズマ気流が金属蒸気をアーク外周に吐き出

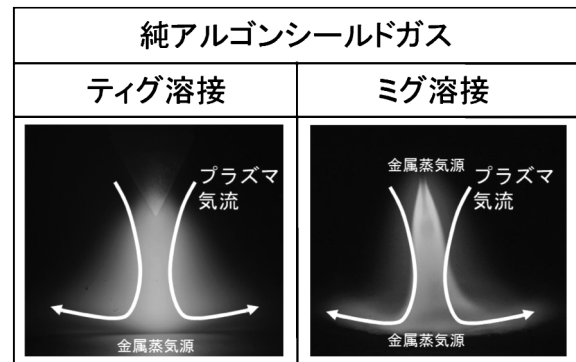


図6 ティグ溶接とミグ溶接の大きな違いとは？

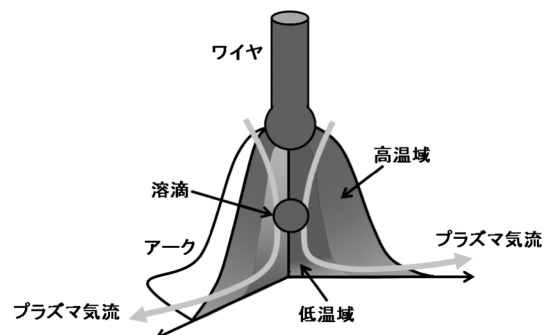


図7 二重構造のミグアーク

し、金属蒸気がアーク中心部に進入することはない。しかしながら、ミグアークでは、溶融電極であるため熔融金属がプラズマ気流の上流域にも存在することになり、金属蒸気がプラズマ気流の流れに載ってアーク中心部へ輸送されるのである。この結果、アーク中心部での光の放射損失が多くなり、視覚的には最も明るく輝いている部分が低温になる。したがって、ミグ溶接におけるアークは、図7に見るように、中心部がアルミニウム蒸気の豊富な低温プラズマ、周囲がシールドガスの高温プラズマから構成される二重構造を呈していることが明らかになってきた。ティグ溶接に比べてミグ溶接では、アークの輝度が圧倒的に大きくなる経験をもっている方々が多いと思うが、それはアークの中までアルミニウム蒸気が混入した結果であり、明るく見えるということは、その分だけ投入した電力が光のエネルギーとして散逸しているということを意味しているのである。

(3) 二色放射温度計測

CCDカメラ(撮影速度、画素数、ダイナミックレンジ、有効波長帯域他)などの観察・計測機器の著しい進歩により、アーク溶接プロセスにおいて困難とされてきた二色放射温度計測が簡単で手軽に行えるようになってきた。ここでは、著者の研究室で取り組んでいるアーク溶接プロセスの熔融金属温度場の二次元可視化に関する研究成果を例に取り上げよう⁵⁾。

高速度二色放射温度計測システムの概略図とその外観を

図8に示す．対物レンズから入射した高温物体の熱放射光を小型の市販画像分光器（Photron, Multi-Spectral-Imager）によって2分割し，それぞれが異なる2つの波長の干渉フィルター（中心波長950 nm, 980 nm）を通過して，1つの高速度デジタルビデオカメラ（Photron, FASTCAM-512PCI）の素子表面で結像して録画される．高速度デジタルビデオカメラで撮影された二波長の画像データは，画像解析ソフト（DITECT, Dipp-Macro）を用いて表計算ソフト（Microsoft, Excel）に写され，二波長の画像データの相対輝度比からプランクの放射則を通じて温度データとして導出される．図9は，炭酸ガスアーク溶接における電極ワイヤ端の溶滴表面温度の見える化の一例である．炭酸ガスアーク溶接ではアークが熱的ピンチ効果により緊縮しているため⁶⁾，入熱密度が高くなり，溶滴下端のアークルート部において局所的高温部が存在する．その温度は

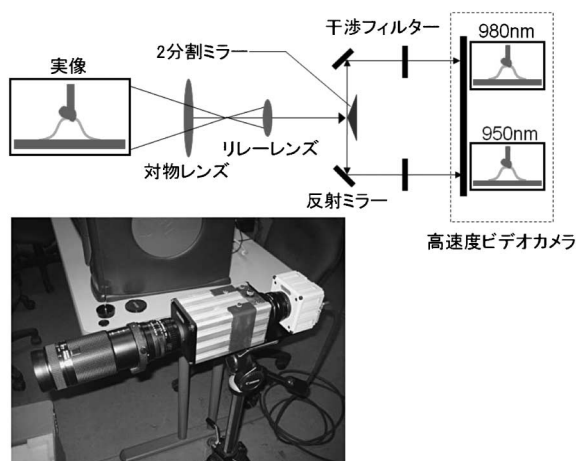


図8 高速度二色放射温度計測システムの概略図とその外観

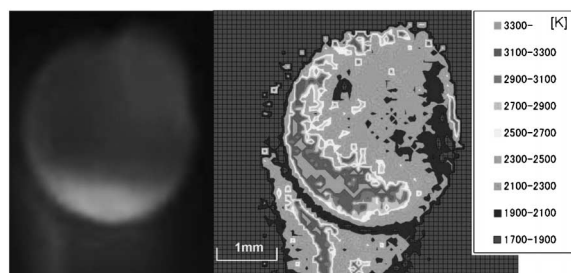


図9 炭酸ガスアーク溶接における溶滴の表面温度

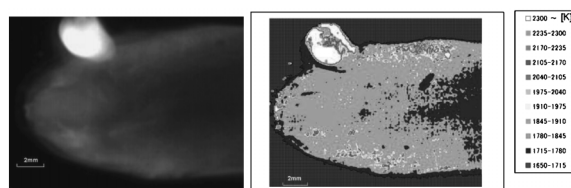


図10 炭酸ガスアーク溶接における溶融池の表面温度

2,900～3,300 Kであり，鉄の沸点に近い．一方，溶滴上方部は2,100～2,300 Kと溶滴下端部と比較して低く，800～1,000 Kもの温度差がわずかに直径2.0～2.5ミリメートルの溶滴内部に存在することが明らかになった．次に，電極（陰極）として機能している溶融池についても，溶滴（陽極）の場合と同様に，温度場の見える化を行った結果を図10に示す．溶融池の表面温度は，1,800～1,900 K程度で比較的均一に分布しており，溶滴の表面温度に比べて明らかに低い．これは，溶融池表面および内部での対流速度が大きく，アークから輸送されたエネルギーが高速流動により溶融池後方へ素早く輸送されるためである．

5. 見える化による技術開発の実践例

図11は，厚さ0.3ミリメートルのアルミニウム合金（A3004）をティグ溶接法で突合せ溶接した結果の一例である．写真のように曲げても溶接部は母材と同等にしなやかに曲がるし，静的な引張強度も母材と同等（192 MPa）である．これは，通常のティグ溶接法では難しい溶接と言えるが，狭窄ノズルを用いたティグ溶接法では，毎分2メートルの溶接速度で実現可能である．狭窄ノズルとは，通常のシールドガスノズルの内側にノズルを設け，タングステン電極の表面に沿って高速ガス流を生成させるものである（図12参照）⁷⁾．

この技術的アドバンテージの科学的根拠が「見える化」によって解りつつある．図13は，その一例であるが，数値計算シミュレーションによって狭窄ノズルの効果が確かめられた．狭窄ノズルによってアーク空間に輸送されるアル



図11 狭窄ノズルを用いたティグ溶接法による厚さ0.3 mmのアルミニウム合金の突合せ溶接例

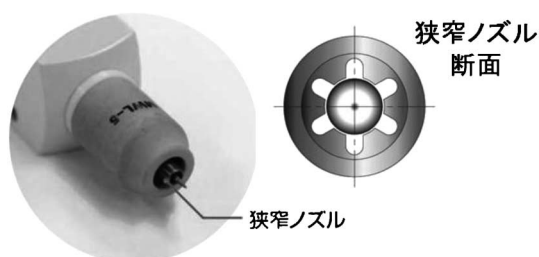


図12 狭窄ノズルの一例

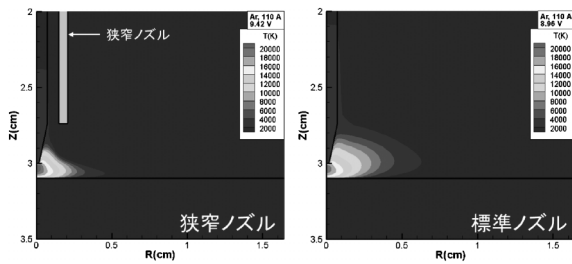


図13 数値計算シミュレーションの見える化による狭窄ノズルの効果

ゴンガスが高速化され、その結果、熱的ピンチ効果によりアークが明らかに緊縮していることが解る。母材への入熱密度が約15%アップされるとともにプラズマ気流速度が約50%アップされ、アーク熱源の安定化（硬直性）と入熱密度の向上に貢献していることが見えてきた。

6. アーク溶接技術の将来

以上のように、溶接プロセスの見える化は日進月歩で進化している。それに合わせて、アーク溶接物理も年々進歩している。見える化の進展は、より多くの研究者・技術者が直感的に現象を捉えることを可能にし、系統立てて整理・理解することを容易にした。すなわち、アーク溶接物理を解明し、アーク溶接現象の根幹をなす法則を抽出して、その現象を工学モデルに置き換え、予測・制御ができるアーク溶接技術へと展開するまでに要する時間が大幅に短縮されつつある。

他方、アーク溶接現象や挙動を正確に解明することで、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

の蓄積技術をマッチングさせることが容易になってきた。「見える化」は、相互技術をうまく融合させる機能も併せ持っており、「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。従来のようなプロセス、材料、力学など個々の学問が深化するだけでなく、相互が連携し、縦糸と横糸を織りなすような科学との調和が必要であり、それこそが日本の最も得意とするところであろう。軽金属溶接協会が中心的な役割を果たし、他の学協会、大学、中立研究機関、企業を結びつけ、オールジャパンで日本のものづくりの発展に貢献されることを期待している。

(図5、図9、図10、図13は、グラビアページにも掲載)

参 考 文 献

- 1) 溶接アーク物理研究委員会編：溶接プロセスの物理，溶接学会，(1996)。
- 2) M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamamoto, K. Yamazaki, K. Suzuki, A. B. Murphy and J. J. Lowke: Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding, J. Phys. D: Appl. Phys., 43 (2010), 434009.
- 3) 平岡，塩飽，黄地：各種分光法によるアークプラズマの温度評価，溶接学会論文集，14-4 (1996)，641-648。
- 4) 辻村，田中：数値計算シミュレーションによる金属蒸気挙動を考慮した GMA 溶接の熱源特性解析，溶接学会論文集，30-1 (2012)，68-76。
- 5) 田中：アーク溶接における熔融金属温度場のビジュアル化，高温学会誌，34-5 (2008)，215-219。
- 6) 田中，田代：溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察，溶接学会論文集，25-2 (2007)，336-342。
- 7) http://www.mwl.co.jp/products/metal/pdf/techreport_kyosaku.pdf