

可視化による溶接アーク現象の理解とその応用



特集
接合科学研究所
産学連携シンポジウム

大阪大学 接合科学研究所 エネルギー制御学分野
教授 田中 学 氏

1. はじめに

イメージ計測機器や数値シミュレーションによって溶接アーク現象を可視化することは、溶接分野における今日の研究トレンドである。可視化によって得られた直感的かつ定量的な情報を巧く活用することにより複雑な諸現象の本質を紐解くことができるからである。本質の理解は、新しい技術開発のヒントを導き、進むべき方向性を示唆してくれる。本稿では、最新の研究成果を紹介しながら溶接アーク現象の可視化とその応用について解説する。

2. 現在の可視化最前線

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。ここでは、その一例を紹介しよう。

今までミグ溶接におけるアークを見て、アークの中心に「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。筆者も、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1 ミグ溶接におけるアークの典型例

図2は、筆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。本システムの特徴は、3台の回折格子分光器と3台の高速度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 (696nm) と溶接ワイヤから蒸発する鉄 (537nm ならびに 538nm) 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 ナノメートルであり、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

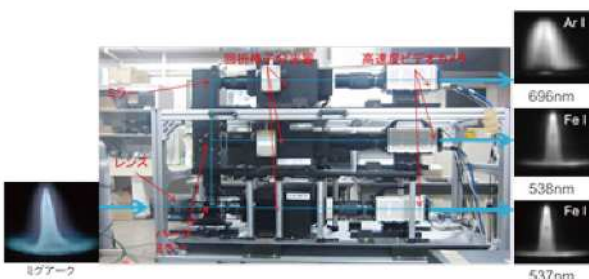


図2 高速度イメージ分光システムの外観

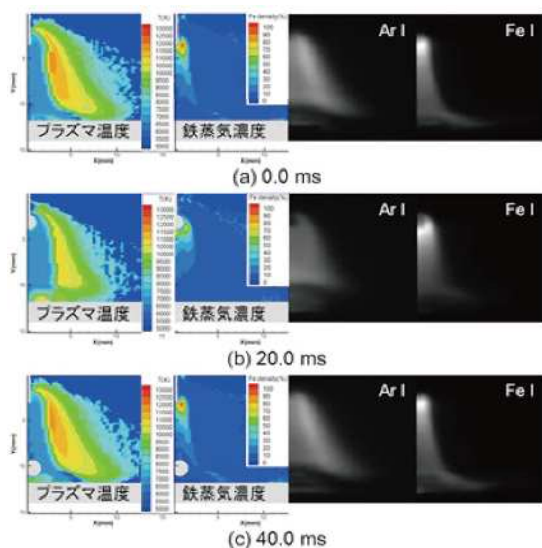


図3 ミグ溶接におけるプラズマ温度分布および鉄蒸気濃度分布、ならびにアルゴンの線スペクトルイメージおよび鉄の線スペクトルイメージ

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 [1]。(a)は溶接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20 ms 後、(c)は40 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220 A、アーク電圧が33 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5千℃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、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、ティグアークのような金属蒸気の影響が少ない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 [2]。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鉄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、鉄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 [3]。すなわち、アークが眩しく光を放つということは、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たのである。

3. 現象解明に基づくアーク溶接技術開発の最前線

以上、アーク現象の可視化技術の一例を紹介したが、アーク現象の可視化によって、高温かつ高速度で複雑な挙動を伴うアーク現象の解明が進んできた。さらには、それらの解明が新しい溶接技術の開発に繋がっている実例も現れてきている。ここでは、その一例を紹介したい。

厚さ0.3ミリメートルのアルミニウム合金 (A3004) の突合せ溶接は、通常のティグ溶接では難しいと言えるが、狭窄ノズルを用いたティグ溶接では、毎分2メートルの溶接速度で実現可能である。狭窄ノズ

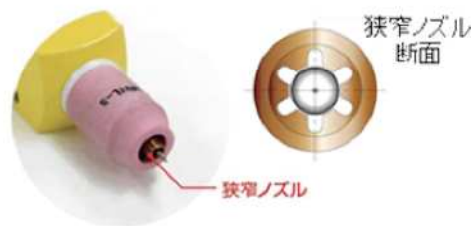


図4 狭窄ノズルの一例

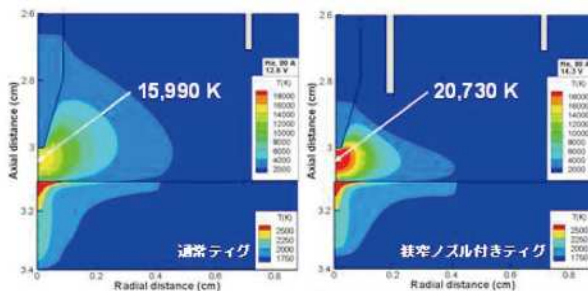


図5 数値シミュレーションによる予測結果 (プラズマ温度分布)

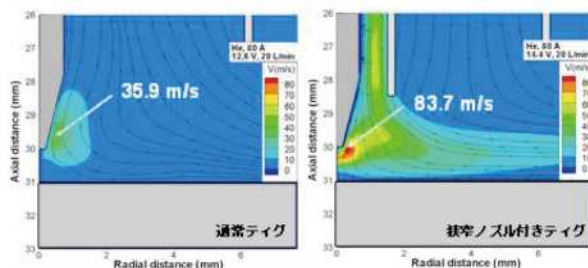


図6 数値シミュレーションによる予測結果 (流れと流速分布)

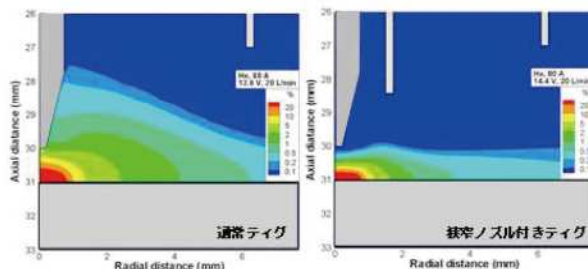


図7 数値シミュレーションによる予測結果 (金属蒸気濃度分布)

ルとは、図4に示すように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 [4]。

この技術的アドバンテージの科学的根拠が「可視化」によって解ってきた。図5は、その一例であるが、数値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 [5]。狭窄ノズルによってアーク空間に輸送されるシールドガスが高速化され、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。図6はこの場合の流速分布を示したものであるが、狭窄ノズルの影響によってプラズマ気流の最高速度が2倍以上に高まっている。これは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は当然ながら、より重要なポイントが見えてきた。それは図7に示すように、溶融池から蒸発する金属蒸気濃度分布の違いである。通常のティグ溶接では金属蒸気がタングステン電極に高濃度で触れているが、狭窄ノズル付きの場合、高速のプラズマ気流が効率よく金属蒸気をアーク外周へ吐き出すため、金属蒸気がタングステン電極にほとんど触れていないことがわかる。3千℃に達する高温のタングステン電極は金属蒸気に触れると簡単に化合物を形成し、電極の融点が低下して、電極の消耗が著しくなる。もちろん、電極が消耗すると、アークそのものが不安定になるため、健全な溶接ビードを得ることは難しい。とりわけ、ごく薄板の溶接を実行するためには、熱源であるアークの入熱密度を高める必要があり、1ミリメートル以下の極めて短いアーク長が要求される。このような極短アーク長においては、溶融池からの金属蒸気を無視することができず、アーク不安定化の大きな要因となる。本技術は、精密な「ジャスト・メルト」という観点に加えて、「タングステン電極の保護」と、その結果として「アーク安定性の維持」という観点も併せ持っており、アーク現象の解明によって進化する次世代のアーク溶接技術と言えるのではないだろうか。

4. おわりに

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] 辻村ら：溶接学会論文集，30-1（2012），288-297.
- [2] 平岡ら：溶接学会論文集，14-4（1996），641-648.
- [3] 辻村ら：溶接学会論文集，30-1（2012），68-76.
- [4] 村田ら：軽金属溶接，51-2（2013），56-59.
- [5] 小西ら：溶接学会論文集，32-2（2014），47-51.

