

ミグ溶接のアークの中心温度は低い!?

大阪大学接合科学研究所
田中 学

1. はじめに

近年、高速度ビデオカメラやデジタル計測器に代表されるように、アーク溶接現象の「可視化」の進展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い。

これまで、ミグ溶接におけるアークを見て、アークの中心に「芯（しん）」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。その「芯」の部分の温度は周囲の薄いフレームの温度より明らかに高い、と当然のように考えてきたことと思う。そう言う筆者も、もちろん、そのように信じてきた。しかし、最近の高速度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してきている。

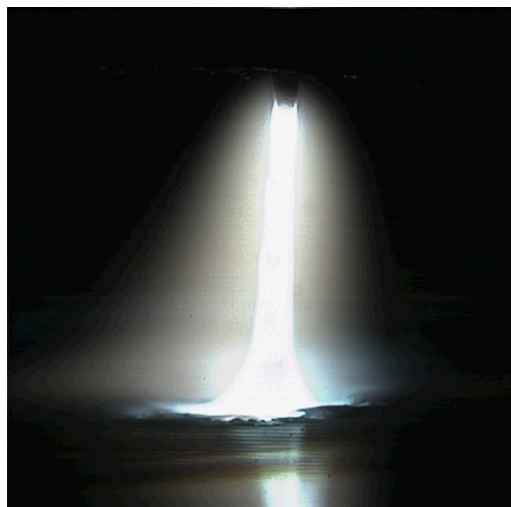


図 1

2. 計測システム

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¹⁾。本システムは、対物レンズ、ハーフミラー、3台の回折格子分光器、3つの結像レンズ、3台の高速度ビデオカメラ、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 0.4 ナノメートルであり、撮影速度は毎秒 2,000 コマである。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観察できるように、3台の分光器と3台のビデオカメラを同期させた。それぞれの線スペ

クトルのイメージを基にプラズマ診断することにより、ミグ溶接中のダイナミックなアーク温度分布と鉄蒸気濃度分布の可視化に成功した。

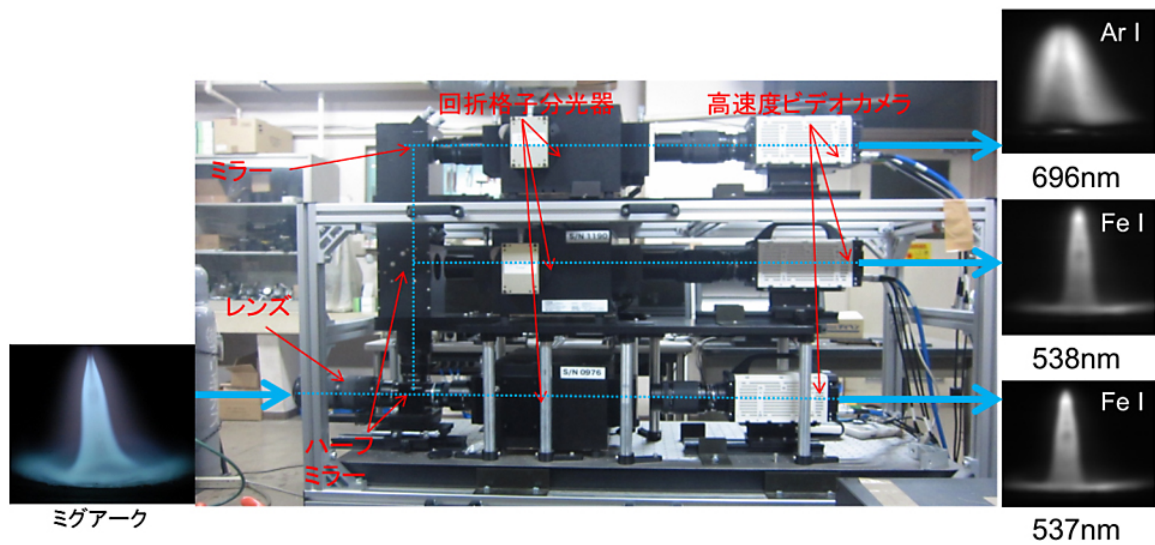
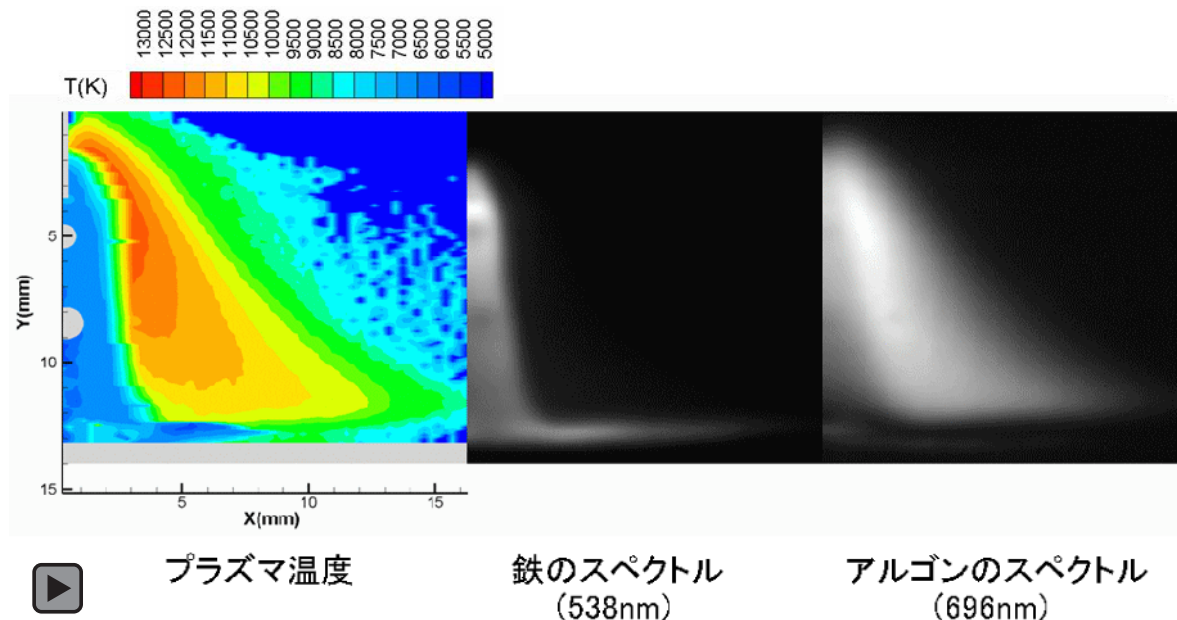


図 2

3. アークの秘密を解き明かす

早速、炭素鋼のミグ溶接におけるダイナミックなアークの可視化を紹介しよう。じっくり **動画 1** を見ていただきたい。

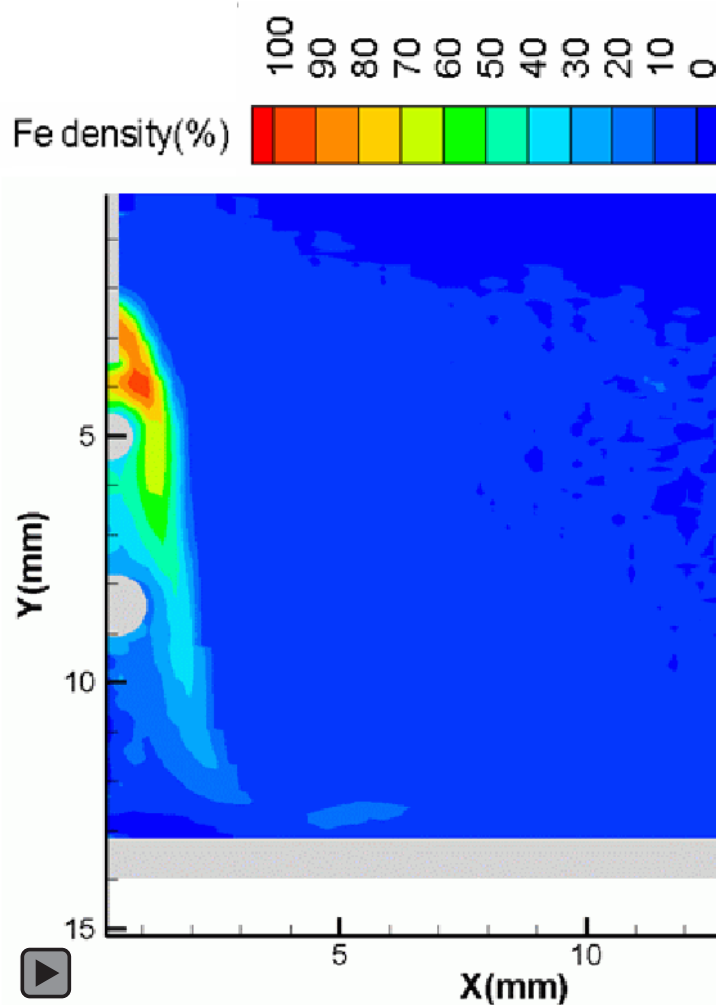


動画 1

動画の左側からプラズマ温度分布、鉄の線スペクトルイメージ、アルゴンの線スペクトルイメージをそれぞれ示している。実験条件は、溶接電流 270A、アーク電圧 37V、CTWD（コンタクトチツ

プと母材間距離) 25 ミリメートル、そしてシールドガスは純アルゴン、溶接ワイヤは純鉄 (試作) 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°Cほど低下している点、すなわち、アークの「芯」の部分の温度は約7千°C、周囲の薄いフレームの温度は約1万2千°Cで、その差が5千°Cにも達している点である。図 1 に置き換えると、視覚的には最も明るく輝いている「芯」の部分で温度が低く、明るさがはっきりと低い周囲で温度が高くなっていることを意味している。

動画 2 は、同じミグアークの鉄蒸気濃度分布である。ワイヤ先端近傍で濃度が高く、溶融池に近づくにつれて濃度が低下している。最も高濃度な部分で80~100%の鉄蒸気濃度に達している。



動画 2

さて、人類がアーク放電を発見して約 200 年。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、ティグ溶接のアークに対するプラズマ診断の結果は、中心部がピークとなる正規分布状の温度分布になっている²⁾。教科書でもよく見かける温度分布である (図 3 参照³⁾)。

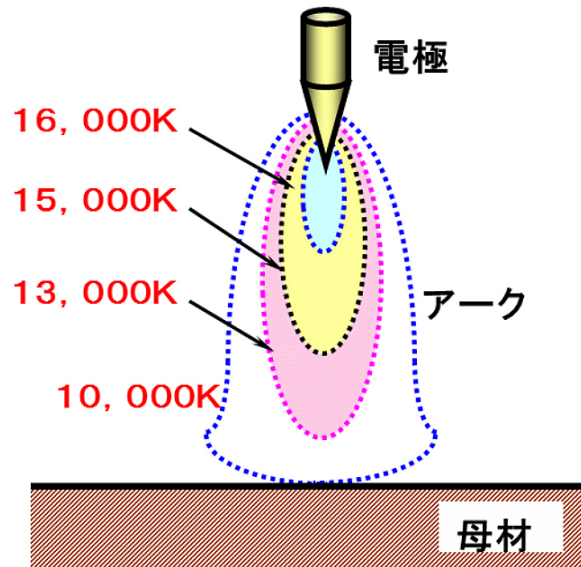


図 3

教科書でよく見るティグアークの温度分布と新しく発見されたミグアークの温度分布の違いはどこから生まれるのだろうか？その主要因は鉄蒸気にある。電極ワイヤ端に形成される溶滴から蒸発する鉄蒸気は高速のプラズマ気流によってアーク中心部に運ばれる。アークプラズマ中での鉄蒸気は鉄の原子やイオンになっているが、鉄の原子やイオンは励起エネルギーが低いためたくさんの光を放射することになり、それが大きなエネルギーの損失となってプラズマ温度を低下させるという仕組みである⁴⁾。

ここで、もう少し考察を加えてみよう。図 4 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。

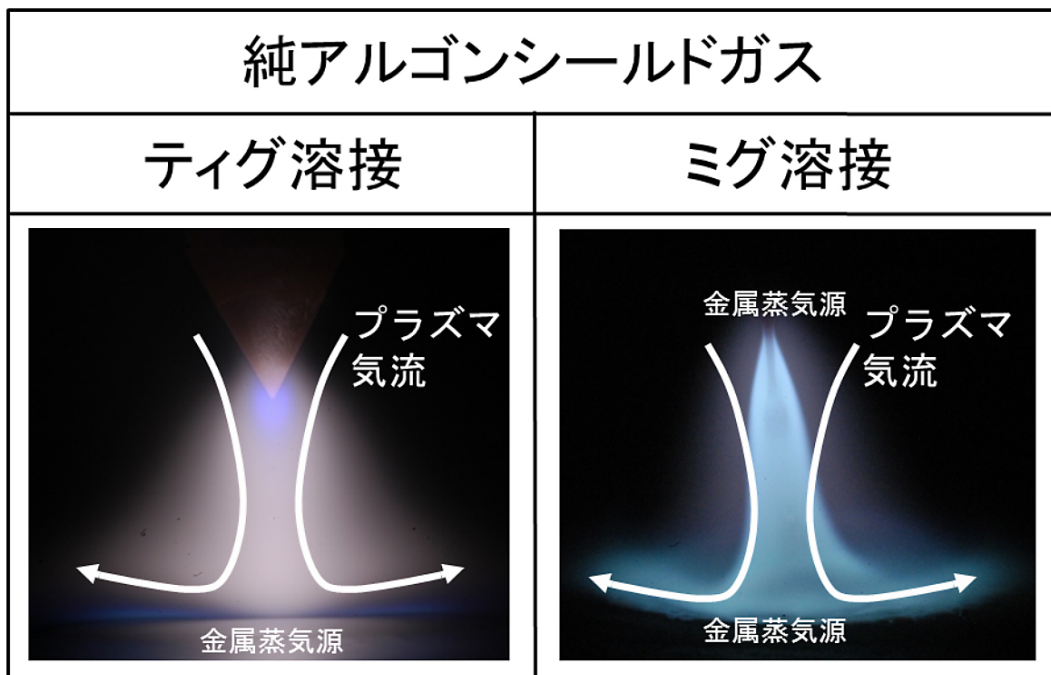


図 4

ティグアークでは、固体電極であるため溶融金属は母材のみに存在し、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し、金属蒸気がアーク中心部へ入り込めないわけだ。ところが、ミグアークでは、溶融電極であるため溶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運ばれる。この結果、アーク中心部での光の放射損失が多くなって、視覚的には最も明るく輝いている部分が低温になる。つまり、ミグ溶接におけるアークは、**図 5** に見るように、中心部が鉄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になっ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、アークの輝きが圧倒的に強くなることを我々は経験的に知っている。それはアークの中まで鉄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の意味していたのである。

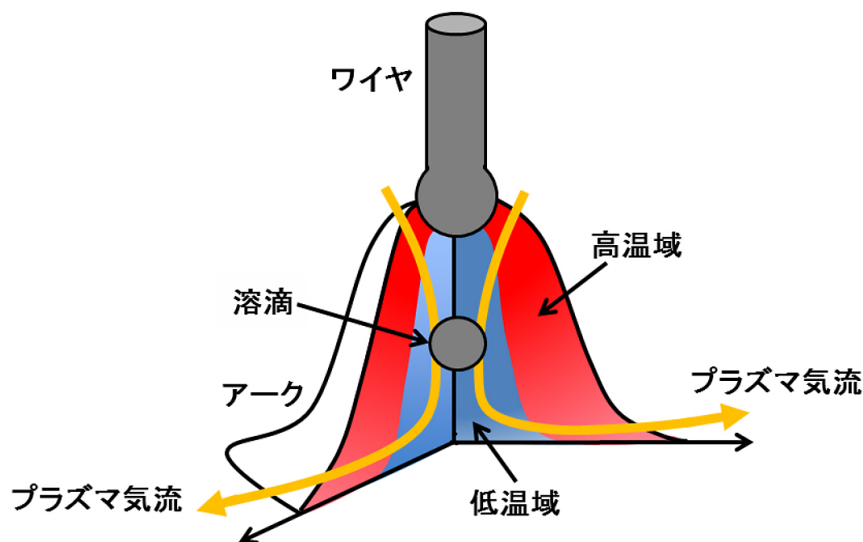


図 5

4. おわりに

ミグアークは、結局のところ、中心がクールで周囲がホットな熱源である。つまり、母材に対して、まるで「ドーナツ」を押しつけたような入熱分布になっている。そんな奇異な熱源でありながら、溶接ビードの断面を観察すると、ちゃんと中央で溶込みが深くなっている。これはどういうことか？ミグ溶接では、ティグ溶接と異なり、電極の溶融部がワイヤ先端から離脱して溶融池へ移行する。いわゆる「溶滴移行」だ。溶滴移行は単なる金属の充てん材の役割を果たすのみではなく、「熱」も同時に運んでいるのである。数値計算シミュレーションによると、その熱量は実に約 2,200 ワットに達している⁴⁾。それもワイヤ径（直径 1.2 ミリ）程度のサイズで溶融池中央に運ぶ。ドーナツの真ん中の空いたところに溶滴が熱を運ぶのである。

知っていたつもりになっていたミグアークの一大事である。ミグアークの思ってもいなかった特徴が顔を出した瞬間だ。最近の可視化技術の進歩によって、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実に大きい。ちょうどいま、「知っているつもりで、制御しているつも

りであったアーク」から「正確な理解によってよく制御されたアーク」への変革の入口に入ったところである。可視化は、当たり前だと思っていることを改めて正しく認識させてくれる絶好のチャンスと言える。今後、クールなアーク溶接技術の新展開が期待される。

参考文献

- 1) 辻村ら: ミグ溶接の溶滴移行現象を伴うアークプラズマ状態の挙動解析, 溶接学会論文集, 30-4 (2012), 288-297.
- 2) 平岡ら: 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.
- 3) 溶接学会編: 新版 溶接・接合技術入門, 産報出版, (2008).
- 4) 辻村ら: 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.

<略歴>

1992年 大阪大学大学院工学研究科溶接工学専攻
修士課程修了

1992年 大阪大学 助手 溶接工学研究所

2000年 工学博士 (大阪大学)

2008年 大阪大学 教授 接合科学研究所 現在に至る