特集

溶接プロセスの可視化・シミュレーション技術—溶接法ガイドブック7より—

アーク溶接における可視化技術の ステート・オブ・ジ・アート*

田中 学**, 田代 真一**

田中 学

田代 真一

State-of-the-art technology in visualization of arc welding process*

by TANAKA Manabu** and TASHIRO Shinichi**

キーワード

高速度ビデオカメラ, 画像分光, コンピュータ・トモグラフィ, その場観察, 線スペクトル, アーク温度, 溶滴温度, 溶融池温度, 金属蒸気

1. はじめに

アーク溶接プロセスの最適化のためには、電極—アーク—母材間における熱輸送現象の解明が不可欠である。昨今の測定機器の性能向上により、GTA 溶接現象、あるいは GMA 溶接における熱輸送現象が定量的に可視化され、それらの現象解明が進んできている。例として、溶融池の温度場測定の場合、古くから行われてきた熱電対のような接触式温度プローブを用いた測定では、測定対象の温度場や対流の擾乱が問題となることがある¹⁾。正確な温度を測定するためにはセンサと測定対象とが熱平衡となるのを待たなければならないため、高い時間分解能での測定が困難である。また、センサは点での測定となることから、温度分布を知るためには、多数の測定点が必要となるうえ、測定点の間隔により空間分解能が制限されることとなる。一方、1 万度以上にも及ぶプラズマの温度場測定では、プローブを直接プラズマに挿入しての測定が困難であるため、古くから光学的手法により温度場の測定が行われてきたが、多くの場合、測定機器の制限から空間のある一点での測定に限られていたため、空間変化と時間変化の分離が困難であった²⁾。これらに対して、近年の 2 次元画像分光器と高速度ビデオカメラを用いた光学的手法を用いた可視化による測定の場合、非接触であるため温度場や対流の擾乱が生じないほか、高い時間分解能と空間分解能で情報を得ることが可能となる長所がある。本稿では、電極現象にはじまり、アーク現象、溶融池現象、凝固現象に到るアーク溶接プロセスに関する一連の現象を対象とし、特に熱輸送現象の解明の重要な手がかりとなる温度場の可視化技術に関する最新の研究成果を紹介する。

2. 電極現象

GTA 溶接に代表される非消耗電極で見られる電極現象は、主に熱電子放出機構によって支配されており、それには電極の表面温度に加え、電子放出の促進を目的に添加される電子エミッターの仕事関数や融点といった物理的特性が重要な要素になっている。これらの要素の違いが電極先端におけるアークルート部を支配し、電極近傍のアーク電流密度を変化させ、結果的にアークプラズマ温度やプラズマ気流速度に強く影響を与える。このため、可視化技術を用いた電極現象の解明が試みられている。

図 1 は、電子エミッターを 2%La₂O₃ としたタングステン電極を用い、シールドガスをアルゴン、溶接電流を 200 A

図 1 アークルート部外観写真、タングステン電極表面温度分布及び波長 980 nm 分光画像

*原稿受付 平成 24 年 11 月 27 日

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

図2 切断用酸素プラズマトーチにおける Hf 電極の表面温度

とした時の、アークルート部外観写真，タングステン電極表面温度分布及び波長 980 nm 分光画像である．アークからの放射をできるだけ低減させる目的で波長 950 nm と 980 nm の赤外域を選定し，これらの波長に対するバンドパスフィルターを利用した画像分光高速デジタルビデオカメラによる二色放射温度測定法³⁾により温度測定を実施した．同時に撮影される 950 nm と 980 nm の二つの輝度分布を重ね合わせて算出した強度比から温度を導き出している．また，波長 980 nm 分光画像から電極表面における電子エミッターの挙動が可視化され，作動中タングステン電極において，表面温度がエミッター物質の融点 (La_2O_3 の場合 2490 K) を上回る領域で，電子エミッター物質が液化し電極表面をごく薄く覆っている様子が観察されている．この領域では電子エミッター物質により実効仕事関数が低下するため⁴⁾，熱電子放出が容易となり，アークルート部が形成されやすくなるものと推測される．

また，同じ非消耗電極であっても，プラズマ溶接やプラズマ切断における電極は，ノズルで内包されており直接的に外部から観察することは出来ない．電極の長寿命化のためには，電極上で起きているアーク物理現象を解析することが必要となる．

山口らは，切断用酸素プラズマトーチの電極損耗現象を検討するため，観測窓及び圧力測定ポートの付いたノズルを試作し，カラー高速カメラによるアーク発生中のハフニウム（以下 Hf）電極の動作状況の撮影と，ノズル内側の圧力測定を実施している⁵⁾．同時に，高速カメラの RGB カラー画像から二色放射温度測定法を応用し Hf 電極上の温度分布も推定している．図 2 にアーク点弧直後における Hf 電極上の温度分布の測定結果を示す．アーク点弧時，高周波高電圧により電極とノズルの最短部で発生したパイロットアークの陰極点は，作動ガスの旋回流により螺旋軌道を描きながら，電極の銅ホルダ部より Hf 電極の周辺部へと移動する．その後，周辺部を周回することにより，同領域はリング状に温度が上昇し，その一部が溶融し陰極点がそこに固着し高温域が広がっている様子が観測された．さらに詳細な解析により，アーク点弧 1 ms 後の時

図3 GMA 溶接における溶滴表面温度分布

点で陰極点が Hf に到達し，金属 Hf の沸点である 4547 K を越える，5000 K に及ぶ高温域が形成され，これが Hf の損耗を引き起こしていることが明らかとなった．

消耗電極を用いる代表的な溶接法である GMA 溶接においては，溶滴がワイヤ先端から離脱し，溶融池へと移行していく過程の温度場の動的変化についても可視化が試みられている．溶滴により溶融池へもたらされる熱量は，溶込み深さやビードのぬれ性にも強く影響を及ぼすため，溶滴温度は GMA 溶接の熱輸送を理解する上で不可欠な情報となる．

山崎らは赤外線（波長 950 nm 及び 980 nm）の二色放射温度法により，GMA 溶接の溶滴温度測定を行った³⁾．測定結果の一例として，マグ溶接及び炭酸ガスアーク溶接における溶滴表面温度分布を図 3 に示す．ここでは，アークからの放射を除去するため，測定には電流値を瞬間的に 40 A 以下に低下させている．炭酸ガスアーク溶接ではアークが緊縮しているため，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域が存在することがわかる．その温度は 2900～3300 K であり，鉄の沸点に近い．一方，溶滴上部は 2000～2400 K と溶滴下端部と比較して低く，わずか 2.0～2.5 mm の溶滴内部に 800～1000 K もの温度差が観察されている．なお，溶滴下方の溶滴が存在しない箇所にも高温域が測定されているが，これは溶滴からの放射光がヒュームにより散乱された結果であると推定されている．マグ溶接では炭酸ガスアーク溶接と比較して

溶滴の大きさは小さく、アークが溶滴全体を覆うため炭酸ガスアーク溶接のような溶滴の局所的高温部は少なく、2300 K 程度の比較的均一な温度分布となることが示されている。

一般的に電極現象は非常に狭い領域内で発生する複雑な現象であるため、観察には高い空間分解能での測定が必要となるが、近年の非常に高度な可視化技術により、観察を通じて従来技術では得られなかった新たな知見が得られるようになりつつある。

3. アーク現象

アーク溶接プロセスにおいては、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。またこれに加え、高温となった溶接ワイヤの溶滴や溶融池の表面から発生する多量の金属蒸気の混入によって、電気伝導度等のアークの物性値が著しく変化するため、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知られている。したがって、アーク溶接プロセスにおける熱輸送現象を正しく理解するためには、金属蒸気が溶接プロセスに及ぼす影響の解明も不可欠となる。

田中らはこの影響の検討のため、アークの温度分布及び金属蒸気の濃度分布の可視化を行っている⁶⁾。金属蒸気の濃度分布を測定するために、アークから発せされる放射の二つの波長の線スペクトル強度について、2次元分布を同時に撮影可能な実験装置を構築した。具体的には、アークからの光の放射をスプリッターにより二つに分離して、それぞれ回折格子を用いて分光し、高速度ビデオカメラで撮

影する。これらのうちの一つでシールドガス原子または金属原子の線スペクトル強度を測定し、Fowler-Milne 法⁷⁾によりアークの温度分布を求め、もう一つで金属原子の線スペクトルを測定し、温度分布のデータに基づき金属蒸気の濃度分布を算出する。なお、ここでは簡便さから軸対象分布を仮定し、アーベル変換処理を通じて観測視線方向の積分光量から単位体積あたりの線スペクトル強度に変換している。図4に測定結果を示す。母材を純鉄としたアルゴン-ヘリウム混合ガス GTA 溶接時に溶融池から発生する鉄蒸気の相対的な濃度分布と、これがプラズマに混入することによるプラズマ温度場の変化を可視化した結果、特に溶融池近傍において鉄蒸気濃度が高くなり、プラズマ温度の低下が顕著となることを明らかにした。また、純鉄ワイヤ及び純鉄母材を用いたアルゴン GMA 溶接時のプラズマ温度場及び鉄蒸気濃度分布についても可視化が試みられている。測定の結果、数十 Hz に及ぶ溶滴移行に伴うプラズマ温度分布及び金属蒸気濃度分布の複雑な時間変化をとらえることに成功している。特に、溶接ワイヤの下部において鉄蒸気濃度の増加が見られ、同領域ではプラズマ温度が大きく低下し、温度分布は低温の金属プラズマと、その周囲の高温のシールドガスプラズマのリング状二重構造となることが明らかとなった。

上記の結果は簡単のため溶接ワイヤ及び母材の組成を純鉄としたが、金属蒸気種が異なる場合、それらの物性の違いからプラズマ中でのそれらの挙動が異なる可能性が考えられる。そこで、ステンレス鋼を母材としたヘリウム GTA 溶接において、溶融池表面から蒸発してアークプラズマ中に混入した金属原子およびイオンの動的挙動が可視化されている⁸⁾。図5にアーク外観写真及び金属蒸気の線スペクトル強度分布を、図6にタングステン電極表面温度及び EDS による同電極表面の元素分析結果を示す。特

図4 プラズマ温度分布及び金属蒸気濃度分布

図5 アーク外観写真及び金属蒸気線スペクトル強度分布

図6 タングステン電極表面温度及び同表面の元素分析結果

に、ステンレス鋼を溶接した場合には、合金元素である鉄、クロム、マンガン等が溶融池表面から同時に蒸発してプラズマ中に混入するが、その動的挙動をそれぞれの元素ごと、かつ、原子とイオンを分離して観察した結果、ステンレス鋼の溶接においては、溶融池表面から主として鉄、クロム、マンガン等が蒸発するが、クロムとマンガンはプラズマの旋回流動によってアーク柱を迂回しながらタングステン電極まで到達し、その後プラズマ気流によってプラズマ中心部に輸送されることが明らかになった。また、金属蒸気の一部は電極表面に付着するが、先端付近に存在する表面温度がその沸点よりも高い領域では再蒸発するため検出されない。一方、鉄はクロムやマンガと比較して蒸発量が少なく、そのほとんどがプラズマ気流によってアーク外周辺へ吐き出され、プラズマの旋回流動によってタングステン電極の方へ輸送されないことが示されている。以上により、シールドガスに純ヘリウムを用いた場合では、ステンレス鋼をGTA溶接した際に発生する金属蒸気がアークプラズマ内へ進入するものの、元素の種類によってアークプラズマ中で分離されることが金属蒸気挙動の可視化を通じて明らかになった。

図4の様に、プラズマの温度分布を測定している多くの研究では、簡便さから2次元軸対象を仮定し、アーベル変換処理を通じて温度分布を算出している。しかしながら、実際の生産現場における溶接は、様々な継手形状に対して行われたり、高効率化を目指して複数の電極により溶接が

適用されたり、溶接線に沿って動かされたりすることから、アークの形状が非軸対象となるものが数多く存在する。

そこで小西らは、誘導結合プラズマ等の熱プラズマを対象とした測定⁹⁾等で実績のある手法である医療用CT (Computed Tomography) スキャンの原理を応用し、GTAの3次元温度分布を測定した¹⁰⁾。カスプ型磁場を用いることでアークを楕円形状化し、非軸対象となったアークの3次元温度分布の測定結果の一例を図7に示す。ArI線スペクトル (波長 696.5 nm) を測定し、Fowler-Milne法を用いて温度を算出している。測定結果より、150 Aのアークでは磁気制御により最高温度が約 2,000 K 程度低下することが明らかとなった。

4. 溶融池現象

アークから溶融池へともたらされた熱は、溶融池対流により溶融池内を輸送され、最終的な母材の溶け込み形状が決まることとなる。溶融池対流の主たる駆動力としては、アークのせん断力やマランゴニ力、電磁力、浮力等が挙げられる。この中でもマランゴニ力は駆動力として支配的であり、溶融池表面温度の非均一性により生じる表面張力勾配による力である。このため、溶融池の表面温度分布を知ることが、溶融池内での熱輸送現象を理解する上でも重要

図7 アークの3次元温度分布

図8 GMA 溶接における溶融池表面温度分布

なポイントとなる。

山崎らは、950 nm および 980 nm の赤外領域を用いた二色放射测温法により、GTA および GMA 溶接における溶融池の表面温度分布を測定した¹¹⁾。GTA 溶接については、硫黄含有量を変化させたステンレス鋼 SUS304 を母材とし、シールドガスをアルゴン及びヘリウムとした場合について検討している。ヘリウム GTA において、HS (硫黄量多) の溶融池表面温度は、中心部で 2900 K 程度であり、わずか 1~2 mm 程度外側に離れると約 1900 K まで温度が低下した。一方、LS (硫黄量少) の中心部は、2300 K 程度と HS と比較して低く、周辺に向かうに伴い緩やかに温度が低下していた。アルゴン GTA においては、ヘリウム GTA と比較して溶融池中心部の表面温度が低く測定された。また、アルゴン GTA の HS では、溶融池中心部よりも外側 1~2 mm 程度の部分が高温となる特徴的な温度分布が測定された。母材中の硫黄含有量によって溶融池表面流の方向が変化し、これとプラズマ気流による外向きのせん断力とのバランスにより、溶融池表面温度分布や溶込み形状が変化することが推定され、桜井らによる、直径 0.1 mm 程度のジルコニア粒子をトレーサとして用いた溶融池表面の流動測定の結果¹²⁾と良く一致することが確認された。図 8 にマグ溶接及び炭酸ガスアーク溶接における溶融池表面温度分布を示す。GMA 溶接においては、溶融池表面温度は比較的均一に分布しており、同一系で測定した溶滴温度と比較

して明らかに低くなる。また、ビード後方の両側に高温部があり、アーク直下であったと推定される部分の温度は、これよりも低くなることが明らかとなった。これはアークから輸送されたエネルギーが高速流動によって溶融池後方へと素早く輸送されるためと推定される。炭酸ガスアーク溶接の溶融池温度はマグ溶接と比較して若干高くなる傾向が得られた。これは熱的ピンチ効果により、アークが緊縮していることに起因しているものと考えられる。

5. 凝固現象

近年、溶接中での非平衡状態での相変態・析出過程を観察し、その可視化を試みた研究成果が報告され注目を集めている¹³⁾。約 50℃/s の冷却速度の GTA 溶接における過共析鋼の変態挙動が観察された。観測装置は主に放射光による相変態の in-situ 観察システムと高温レーザ顕微鏡システムから構成されている。前者は第 3 世代の放射光施設である「SPring-8」に設置されているアンジュレータビームラインを用いて回折データを高時間分解能で記録可能なシステムである。本システムにより相の同定が行われる。後者は共焦点レーザ顕微鏡 (LSCM) と赤外線集光イメージ加熱炉 (IIF) からなるシステムである。図 9 に連続冷却中の過共析鋼の形態の in-situ 観察結果を示す。初晶の結晶粒

図9 連続冷却中の過共析鋼の形態の in-situ 観察結果

界に第二相が生成、成長し、その後マルテンサイト変態が起きるという、溶接の冷却過程における相変態による形態変化の可視化が可能となった。

6. おわりに

電極現象にはじまり、アーク現象、溶融池現象、凝固現象に到るアーク溶接プロセスに関する一連の現象に対して可視化技術を利用し、主に熱輸送現象の解明に取り組んだ最新の研究成果を紹介した。

現状は多くの場合、上記の各現象について個別に可視化がなされているが、今後、電極－アーク－母材間における熱輸送現象を解析するためには、各現象の相互作用の理解が不可欠になる。すなわち、本稿で紹介した手法で溶滴温度分布やアーク温度分布を求めることにより溶融池への入熱特性を評価し、この入熱特性に基づき溶融池温度分布やトレーサ追跡により得られる溶融池流動から溶融池内での熱輸送を検討するといった具合に、熱輸送の上流側から下流側への複数の現象に亘る同時可視化が必要になってくるものと考えられる。

他方、アーク溶接現象や挙動を正確に解明することで、これまで各々の企業や研究機関等で蓄えてきた固有の技術をマッチングさせることが容易になってきた。なぜなら、可視化は、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からである。したがって、可視化は、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にも広がる可能性を秘めている。従来のように、一企業や一研究機関のみで技術開発を推し進めるだけでなく、あるいは、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技術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。進化する可視化技術を最大限に活用しながら、学協会、大学、中立研究機関、企業が連携し、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) 橋本 他：溶融金属の温度測定法と測定例について，溶接学会誌，34 (1965) 654.
- 2) 平岡 他：アルゴン-水素混合ガスアークにおける種々の分光スペクトルからのプラズマ状態評価，溶接学会論文集，15 (1997) 259.
- 3) 山崎 他：赤外線二色放射测温法による GMA 溶接の溶滴温度測定，溶接学会論文集，26 (2008) 214.
- 4) M. Tanaka et al: In situ measurements of electrode work functions in free-burning arcs during operation at atmospheric pressure, J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) 29.
- 5) 山口 他：切断用酸素プラズマトーチの電極現象の実験的考察，溶接学会論文集，29 (2011) 10.
- 6) M. Tanaka et al, Visualizations and Predictions of Welding Arc, Proc. IIW Int. Conf. Global Trends in Joining, Cutting and Surfacing Technology, (2011), 492.
- 7) 平岡 他：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 (1996) 641-648.
- 8) 田中 他：ティグ溶接における金属蒸気挙動の可視化，溶接学会論文集，30 (2012) 164-170.
- 9) A. Okigawa et al, Three dimensional optical emission tomography of an inductively coupled plasma, Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 4605.
- 10) 小西 他：TIG アークプラズマの三次元温度計測，溶接学会論文集，29 (2011) 274.
- 11) 山崎 他：赤外線二色放射测温法による溶融池表面温度測定，溶接学会論文集，27 (2009) 34.
- 12) 桜井 他：TIG 溶接における溶融池表面挙動の可視化と計測，日本機械学会第11回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集，(2003) 11.
- 13) 小溝 他：過共析鋼溶融溶接過程における相変態の in-situ 観察，溶接学会論文集，24 (2006) 57.