



ミニ特集・6

高度溶接技術

アーク溶接現象の観察と解析

Observation and Analysis of Arc Welding Process

小川洋司
Yoji Ogawa産業技術総合研究所 ものづくり先端技術
研究センター 加工技術研究チーム

① はじめに

溶接プロセスや変形及び組織のシミュレーションモデルを開発することと、溶接現象の観察と解析を行うことは、表裏一体の関係にあり、実際の現象を良く理解することが、効率の良いモデルを構築するために重要となる。アーク溶接現象は局所的な領域で溶融と凝固とが短時間で生じること、また周囲のアークからの強い光が観察を妨害することから、溶接状態の観察と解析には研究すべき要素が多く残っていた。経済産業省の重要地域技術研究開発プロジェクト「溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発」¹⁾において、アーク溶接のモデル化に必要な情報を取得するために、アーク溶接現象の観察手法の開発とそれを用いた解析を実施してきた。このプロジェクトで得られた成果²⁾をティグ(Tungsten Inert Gas) 溶接を中心に紹介する。

② 研究項目と実施機関

プロジェクトでは、研究開発を効率的に実施するために、項目ごとに担当を決めて協力して研究を行った。「溶接状態の観察」は、阪大、接合研、川崎重工、産総研が担当し、高速度カメラやX線透過法など各種の観察システムを用いて、溶融池全体の流れの定量化や溶込み特性と湯流れの関係および温度測定について、観察手法の開発を行うとともに開発した装置を用いた詳細観察と解析を行ってきた。また、溶融池内の対流現象とその駆動力を明らかにする目的で、微小重力実験を行い、溶融池に働く力の要素因子の比較検証とマイナーエレメントの効果についての研究を行った。「欠陥生成機構の解明」は、接合研、神戸製鋼、ニッケイ加工、産総研が担当し、欠陥の生成観察や、流れシミュレーションによる欠陥生成機構を研究するとともに、プロセス及び変形シミュレーションの開発に必要なデータとして欠陥データベースの構

築を図った。

③ アーク溶接現象の特徴と計測に関する課題

溶接アークは最高温度が約3万度までになる非常に高温のプラズマであり、電離と再結合および励起状態から基底状態へ戻る際の発光など特徴的なスペクトルが現れる。これらのスペクトル分布を測定することにより、プラズマ内の温度分布や密度分布が測定でき、各元素がどのように放電に関与しているのか、あるいは電極や母材からどのような元素がプラズマ内に混入しているのかについてのデータが得られる。シミュレーションモデルの構築においては、溶融池の形状と、内部の温度分布および流れ速度分布の計測が重要であるが、プラズマからの発光が強力であり、相対的に暗い領域となる母材や電極表面では、光学機器による観察には困難が伴う。また、プラズマと母材および電極との界面では、数千度の大きな温度差があり、電位差も存在する。これらは溶接効率に大きく影響する因子であり、母材および電極に含まれる微量元素が大きく影響する反応でもある。界面および溶融池の挙動や温度分布を如何に正確に観察・計測し、モデルの構築に有用な定量データを取得し現象の解明に結び付けていくのが、現象解明グループの中心課題であった。

図1に無重力状態における横向き下進ティグ溶接の映像と、中心軸上の温度と電圧の大まかな傾向を示す。この映像は露出オーバーの条件で撮影しており、プラズマ中心部は明るく飽和した映像となっており、中心部の輝度差はこの映像からは判別できない。しかし、周辺部の金属イオンからの発光部は明瞭に撮影できている。この部分は、アルゴンアーク中心部が飽和しない条件で撮影するとほとんど識別できない明るさの領域である。通常のCCDカメラで撮影が可能な明るさの範囲は約30dBであり、100dB以上も輝度差のあるア

ーク現象の撮影にはダイナミックレンジが不足している。

4 溶接状態の観察

4.1 観察手法の開発

溶接現象の解析あるいは溶接状態の監視のためには、カメラを用いて溶接中の状態を撮影し、撮影した画像を加工処理して必要な情報を抽出することになる。撮影という行為は、3次元の奥行きを持つ光情報を2次元の輝度情報に写像することである。注意すべきことは、見たい領域全体が見渡せ、かつ、個別要素が必要な大きさで明瞭に見えること、その領域で起きている現象の変化に追従できることである。アーク溶接の場合には、光の波長分布そのものに重要な情報が含まれており、精密な解析を行うためには、光のスペクトル分解が必要となる。また、溶接現象のように時間的な変動が大きい現象は、時々刻々と変化する映像を連続的に取得して、解析する必要がある。時間的な変動は無視できるが、空間的な広がり情報やスペクトル情報が解析に重要な意味を持つ場合には、焦点位置を連続的に変化させたり或いはカメラを移動させたりして連続的に静止画像を取得して解析することになる。いずれの場合にも、3次元の輝度情報（＝動画像）を取り扱うことになる。意味のある動画像を取得すると言う事は、空間軸（3次元）と光波長軸（1次元）及び時間軸（1次元）の合計5次元の事象を、3次元の的確な輝度情報に写像することに等しい。

一方、アーク溶接現象の特徴の一つは、3. で述べたように対象各部の輝度差（明暗）が甚だしいことにある。このアーク溶接現象を明瞭な動画像として撮影する手段を検討し、

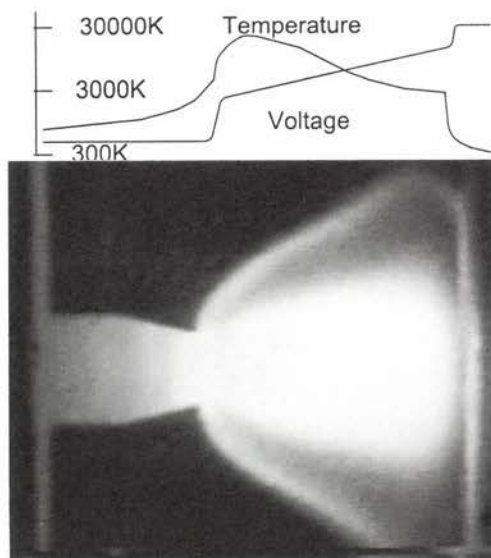


図1 溶接アークと温度、電圧特性

アークの発光スペクトルを遮断する狭帯域の干渉フィルターの使用やパルス照明による短時間露光と同期させてレーザ照射時間のみ映像を取得することによりS/Nを向上させる実用的な観察手法を開発してきた³⁾。

溶接自体は非常に狭い領域で実施され、拡大観察が必要となる。実際の距離では非常に小さい移動速度でも観察系の視野範囲では大きな速度となる。このため、高速度での撮影が必然的に要求される。データ処理の際には、デジタルデータとして処理するが、このデジタルデータのビット数（データ深度）も解析処理の精度に大きく影響してくる。溶融池サイズの計測など自動化を目的とした画像認識処理では6ビット程度で実行可能であるが、温度計測などではデータの性質上少なくとも12ビット程度が必要となる。明度分解能は、カメラ（撮像素子）のダイナミックレンジとデジタルデータのビット数の性格の異なる両者のうち、能力の低い因子で規制されることに注意が必要となる。

4.2 スペクトル分布の観察

アークや溶融部からの光はそれぞれ固有の波長分布を有しており、解析すべき対象ともなっている。カラーカメラによる撮影は、アーク溶接現象の色情報を含むことから、全体像を把握するのに有用な手段となる。しかし、カラーカメラは通常、風景を人間が自然と感じるように分光感度が調整されており、離散的なスペクトルを主成分とするアーク光を撮影する場合には、カメラにより色調が大きく異なることに注意が必要となる。一方、特定の現象を詳細に観察するためには、特定の波長の光（単色光）だけを撮影することが有効になる場合が多い。適切な光波長を選定するためには、波長分布特性を理解しておく必要がある。図2aに、ImSpectorと呼ばれる分光プリズムを撮像系に装着して、400 nm から



図2 ティグアークのスペクトル分布
シールドガス=Ar (2L/min) + He (18L/min)、アーク電流100A、
溶接速度20cm/min、SUS304を溶接

1,000 nmの光波長範囲のスペクトル強度情報の電極軸方向分布を取得し、擬似カラー表示した例を示す。図2bは同一のレンズからプリズムで分岐し780 nmの狭帯域干渉フィルターを用いて撮影した結果である。カメラは両画像共に1280×1024画素、データ深度12ビットのカメラを用いて毎秒十駒で同時に撮影し、時間的な変動を調べた。波長分解能(横軸)は1画素あたり0.5 nmとなり、空間分解能(縦軸)は1画素あたり13 μm となる。異なるスペクトルの強度比や広がりからプラズマ温度が類推でき、各部位でのスペクトル分布からプラズマ内に存在する要素(元素)がわかる。例えば、アーク部分ではアルゴンの輝線スペクトルが多く、ヘリウムの輝線スペクトルは電極直下部に集中する。また溶融池表面に近いアーク部ではクロムや鉄などの金属蒸気による発光スペクトルが多く存在する。電極および溶融池表面からは連続波長の光(熱)放射があり、レンズ系も含めた撮像素子の分光感度特性を補正して、放射波長分布の頂点となる波長から電極表面温度が推定できる。図2bの単色画像からは、プラズマの空間的な特徴と、電極表面温度分布の推定が可能となる。正確な温度分布の測定には周辺のプラズマからの発光強度補正と酸化物部分の放射率の校正が必要となる。

4.3 温度分布の観察

温度分布の測定では、半値幅の狭い特定波長の映像(単色もしくは2色画像)を用いて測定することになる。ティグ溶接における溶融池温度分布の測定では、プラズマからの光と溶融池表面で反射する電極の映像および溶融金属とスラグの放射率が異なることが正確な温度測定の妨害因子となる。この解決策として、アークを停止すると同時に電極を撮影視野範囲外に移動させて観察する手法を開発し、アーク消去直後の溶融池温度分布と冷却過程の測定を実施した⁴⁾。

溶融金属とスラグの放射率が異なる現象を解決する方法として、放射率の違いによる誤差が小さい紫外領域の波長を利用する温度計測法⁴⁾と、異なる波長帯の映像から温度を測定する2色法とを検討した。紫外領域の測定では、放射強度そのものが非常に小さいために、光電子増倍管を用いた光増幅が必要となる。2色法では、異なる波長の強度比を利用して温度を測定するために、放射率の違いによる誤差は吸収され、スラグの有無による測定誤差が少なくなる。この方法では、2枚の映像の各対応画素を一致させることと、各対応画素での感度校正を確実に行うことが、重要となる。

図3に紫外領域の放射光(350 nm)を利用して、SUS304裏面の温度分布を高速度ビデオにより毎秒360駒で計測した結果の一例を示す。350 nmの波長では、放射率が3割に低下した場合の測定誤差は2000Kに対して、5%程度となる。これは赤外領域(4000 nm)での誤差40%に比較して、非常

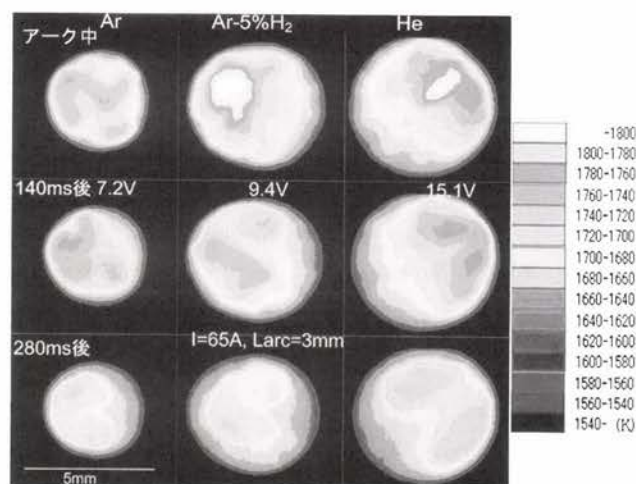


図3 紫外線領域を利用したSUS304裏面の温度分布計測結果

に高い精度となる。裏面からの撮影では、アーク光と電極の影響を排除できるために、溶接中から溶接終了後の温度分布の状況を連続的に計測できるという利点がある。電圧が低く入熱の小さいアルゴンシールドと、アルゴンに5%の水素を混ぜて入熱密度を増加させた場合、および電流が中心に集中し電圧の高いヘリウムについて、静止アークの温度分布を比較した。いずれの場合にも温度分布は円柱対象とはならず、時間的に大きく変動した。アルゴンシールドの場合には溶融幅は小さく、1600-1700Kの低温域は小さく、1750K程度の温度領域が比較的大きい。アルゴンに5%の水素を混ぜた場合には、溶融池幅は広がり、1800K以上の領域が現れる。電圧がアルゴンの約2倍となるヘリウムシールドの場合には、溶融池面積もアルゴンの場合の約2倍となり、1800K以上の温度領域も現れる。入熱の少ないアルゴンに5%の水素を混ぜた場合に最高温度が高くなっており、溶融池面積が小さく冷却も早いことから、ヘリウムシールドよりアークが緊縮し、内部の対流も活発なことが推察できる。

4.4 流れの観察

溶融金属の表面流れの計測では、パルスレーザ照明法、干渉フィルター利用法など測定目的に応じて各種の方法を適用し、スラグあるいはジルコニアなどのトレーサ粒子の流れパターンを高速度撮影して表面流れの定量化を行い、モデルとの対比を行った。静止アークにおいても複雑な流れ挙動を示すが、モデルと定量的によく一致した表面流れパターンの計測が実施できた。溶融金属の湯流れを解析するためには、内部の湯流れの観察が不可欠であり、X線を用いた観察が必要となる。接合研の開発した装置では、側面厚さの薄い部材に対して、側面から約10 mm平方の微小領域に、160 kV-1 mAのX線を放射し、反対側で透過してきたX線を明瞭に

映像化している⁵⁾。固体部と液体部との密度差は無視できるほど小さいため、内部の湯流れを測定するためには溶融金属内部の気泡を利用するか、或いは密度の異なるトレーサを投入することになる。

図4にタングステン粒子を挟み込んだ部材を溶接している状態を撮影した例を示す。陰極固定で、母材を右から左に移動させて溶接を実施している。動画像を1枚の静止画像に重ね表示をし、溶融金属内部のタングステン粒子が溶融金属の流れに乗り、時計方向に大きく3回転した後、凝固し回転が停止した状況を示す。

4.5 影響因子の分解

シミュレーションの利点として、仮想的にいろいろな条件で計算できること、特にある一つの影響因子を取り出してその影響を評価できることがある。現象解析の立場からは、溶融池に作用する電磁気力、表面張力、プラズマ気流や重力の影響を明らかにすることとモデルの妥当性の検証を目的として、影響因子を独立に計測する実験手法を検討した。一つは、落下実験施設を用いた、溶融池内の対流現象に及ぼす重力の影響の評価である。また、アーク溶接のみでなく電子ビーム溶接やレーザー溶接あるいはそれらの複合化溶接を実施して、各因子が、溶融池内の湯流れと溶け込み現象にどのような影響を及ぼすかについて検討した。

溶融金属の形状が重力の有無により大きく影響される条件では、アークの形状も大きく変化する。重力が作用している場合には、溶融金属は下方に垂れ下がり、重力が開放されると表面張力が主要な力となり、溶接線後方に急速に溶融金属が引き上げられる。重力変化による形状の変形速度はかなり速く、0.1秒以下の短時間で変形が終了した。また、成分の異なる部材を異なる条件下で突合せ溶接した後、元素の混ざり具合を詳細に解析することにより、内部の対流に各因子がどのように作用するのかについても明らかにした。結果を表1に示す。100A、アーク長3mm、シールドガスアルゴンの

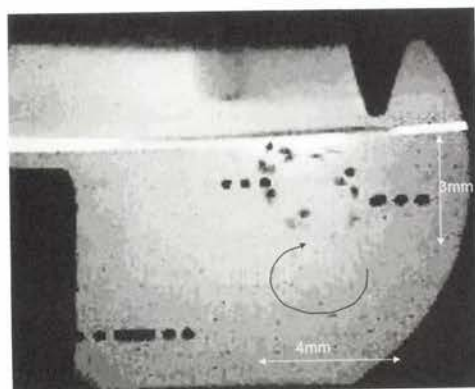


図4 X線透過法による溶融池内のタングステン粒子の挙動観察

場合には、電磁気力とプラズマ気流による対流は、逆向きで釣り合う。このような条件下では密度差による対流が顕著となる。

4.6 微量元素の影響

活性フラックスや金属に含まれる硫黄量など微量な元素が、溶接結果に大きく影響することは良く知られており、これらの要素が、どのように溶融金属の挙動やアークに影響するかについて検討することは、モデル化にも有意義な情報が得られる。本プロジェクトでは、硫黄の含有量とシールドガス中の酸素量が、溶融金属の挙動と溶け込み形状にどのような影響を与えるのかについて重点的に調査した。アークの集中や、金属蒸気発生量の変化、溶融金属の湯流れ状態の変化、あるいは電極表面近傍での金属蒸気・イオンの挙動変化など、物理的に興味深い現象を多く観察し、解析を実施した。図5に典型的な例として、シールドガスとしてヘリウムを毎分20リットル供給して、硫黄濃度20ppmのSUS304を100Aで溶接している状況を示す。溶融池表面では金属蒸気が多く発生し、アノード部分は大きいのに対して、活性フラックスを塗布すると金属蒸気の発生は抑制されアノードも集中する。溶け込み深さは活性フラックスを塗布すると2倍程度深くなった。

5 欠陥生成機構の解明

深溶け込みでかつ電磁氣的な力の作用しないレーザー溶接を取り上げて、溶融池にトラップされた気泡の挙動やスラグ巻

表1 TIG溶接における対流に及ぼす影響因子の関係

溶接パラメータ	各因子による対流の方向と大きさ			
	電磁気力	プラズマ気流	表面張力	重力(密度差)
電流値が増加すると	内向き増加	外向き増加	温度に依存	増加
アーク長が伸びると	内向き減少	外向き減少	温度に依存	減少
ヘリウムシールドではアルゴンに対して	やや増加	外向き減少	内向き	やや増加

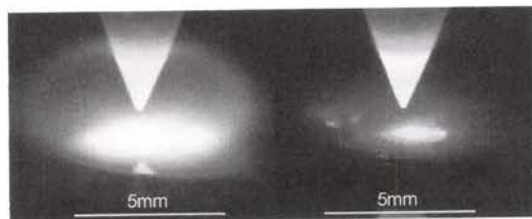


図5 活性フラックス添加によるアーク状態の変化 (ヘリウムシールド、17V100A、20cm/min、左：SUS304上のアーク、右：SUS304に活性フラックスを塗布した場合)

き込みを予測する流れシミュレーションに着手し、流動パターン、温度分布、溶融池形状、気泡の軌跡などのシミュレーションを行い、この結果とX線透視観察による実験結果との比較から、気泡状況解析、欠陥生成原因と欠陥生成機構を解析した。レーザ溶接部に発生しやすい溶接欠陥の主要な原因がシールドガスの巻き込みであることを明らかにするとともに、窒素ガスを用いた溶接施工方法を提示し溶接欠陥防止に効果があることを確認した。例として、SM490鋼をYAGレーザを用いて、5kW連続波、溶接速度1m/minで溶接した場合、アルゴンシールド(20L/min)では、溶接長50mm当たり15-35個のブローホールが発生するのに対して、同量の窒素でシールドした場合の発生数は5個未満であった。

さらにレーザ溶接金属の組織変化をミクロな視点から調査して、窒素の溶解性により欠陥が抑制されることをヒントに溶接金属部の「欠陥」と「靱性劣化」の両方を防止する設計コンセプトを提案している。また、高圧チャンバ内において環境雰囲気圧力とガス成分とを変化させて、溶融金属の流動現象を高速度ビデオで観察し、溶接条件と欠陥生成の関連を検討し、周辺空気の巻き込みによるシールド条件不良が欠陥生成に大きく影響することを明らかにした。

欠陥データ収集に関しては実際の生産、製造現場にて溶接施工時の溶接欠陥の発生状況を調査し、溶接欠陥に関するデータを収集するとともに、幾つかの代表的な溶接欠陥について、継手形状、溶接条件などを変化させた溶接実験を行い、溶け込み特性と溶接欠陥発生に及ぼす影響を調査し、欠陥発生防止のための基礎データを収集した。特に、アルミパイプおよび板材の隅肉円周溶接実験を行い、溶接不良が発生しやすいオーバーラップ部溶接条件と溶け込み状況を調査し、プロセスシミュレーションおよび変形シミュレーションに必要

なデータを測定して、モデル化の妥当性を示した。

6 おわりに

アーク溶接時現象を観察・解析する手法について紹介した。近年のマルチメディア機器の急速な発展は、アーク溶接現象の観察・解析とそのデータベース化に有力な追い風となっており、プロジェクトの遂行により現象を理解するために有用な手法の開発と多くのデータを得ることができた。本研究成果を利用しやすい形でデータベース化するべく活動を始めている。

参考文献

- 1) <http://www.nedo.go.jp/iinkai/hyouka/hyouka/6/4-2-4.pdf>
- 2) 野城清 他：溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発，NEDOプロジェクト成果報告会要旨集，日本鉄鋼協会創形創質工学部会 接合・結合フォーラム，(2004.9)
- 3) <http://www.aist.go.jp/RIODB/RIO77/>
- 4) 岡垣内俊成 他：TIG溶接技におけるプール表面温度の計測，溶接学会論文集，22(2004.2)1，21.
- 5) S. Katayama and M. Mizutani：Elucidation of Laser Welding Phenomena and Porosity Formation Mechanism，Proc. 30th Anniversary International Symposium. JWRI，(2003.3)，167.

(2004年11月15日受付)