

TIGアーク溶接の熱流体解析

構造物の接合や近年では3D造形の熱源^{*1)}として、アーク溶接が使われている。アーク溶接は工業的に使用されるほとんどの金属を溶接することができる一方、急速加熱の接合法で材質が変化し、変形、膨張収縮、残留応力によるき裂発生等の溶接欠陥が問題となっている。

それらの問題に対するために、適切な溶接施工法や溶接条件を検討する必要があるが、この検討には高度な技術的判断が要求されるとともに施工法に関する広範な知識が必要とされる。それらは、数多くの施工の中での試行錯誤によって培われるため、近年の若手技術者への技術継承、育成の観点からも、経験からだけでなく理論的なアプローチでアーク溶接現象から施工時の問題の解決ができるような手法の開発が望まれている。

中でも有効な手段となるのが、数値解析によるアーク溶接現象の可視化手法の確立である。近年では、コンピュータの高速化にともない、溶接時のアークプラズマ現象や溶融金属の挙動に関する溶接物理の研究^{*2)}が進められるようになってきた。しかし、アーク溶接では、溶接棒-プラズマ-母材間で複雑に影響し合っているため、実際に起きている現象をいかにモデル化するかということが課題となっている。

そこで当社では、アーク溶接現象の数値解析モデルの研究・構築を進め、学会発表を行ってきた^{*3)} ^{*4)} ^{*5)}。本稿では、アーク溶接現象の熱流体解析、中でもTIG溶接に適用した例を紹介する。また、解析結果の妥当性を検討するために実施した二色放射測温法を用いた溶融池表面の温度測定についてもあわせて紹介する。



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
CAE・実験評価部 解析技術室
野口 暁



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
CAE・実験評価部 試験技術室
延谷 義晴



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
CAE・実験評価部
福元 裕彦

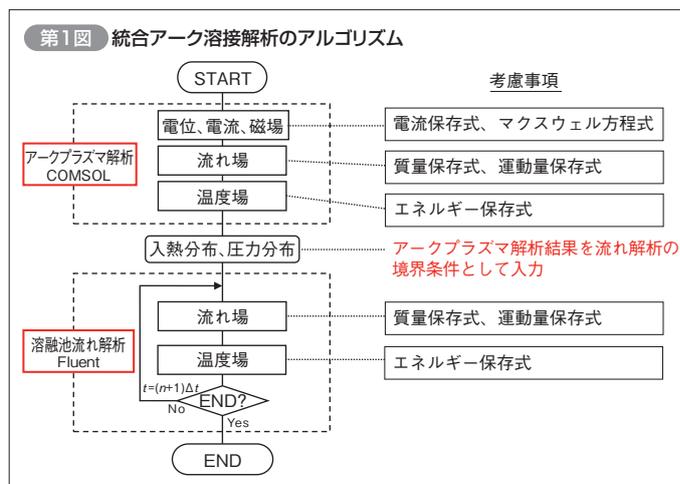
E-1 アーク溶接現象の熱流体解析

アーク溶接では、プラズマアークによる母材への入熱とプラズマジェットが発生、それともなう母材の溶融と溶融金属の流れが発生する。これらの現象を数値解析しようとする、熱流体解析が欠かせないが、溶接棒-プラズマ-母材間で複雑に影響し合っているため、モデル化や計算手法に工夫が必要となる。ここでは、プラズマアーク解析と溶融池-溶融池流れ解析を分け、二つの解析の間の架け橋となるUDF (User Defined Function) を作成することによって統合アーク溶接解析モデルを構築した。そのアルゴリズムを第1図に示す。

ここでは、溶融池形成にアークからの入熱とアーク圧力のみが作用していると仮定している。アークプラズマ解析は定常解析で行い、解析結果から入熱分布とアーク圧力分布を抽出し、得られた分布を溶融池流れ解析の境界条件として与えるように橋渡しできるUDFを組み込むことで溶融池流れ解析を行った。溶融池表

面の形状変化によってアーク形状が影響を受けないという仮定をすることで、溶融池流れ解析を非定常で解き進めた。ここで、プラズマアーク解析については二次元軸対称定常解析とし電極の溶融は考慮していない。

次節より、アルゴリズムの各要素であるアークプラズマ解析、溶融池流れ解析についてそれぞれ示す。



参考文献

- *1) 笹原 弘之ほか: 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.775-776
- *2) 平田好則ほか: 溶接学会誌, vol.84 (2015), pp.19-24
- *3) 野口暁ほか: 溶接学会全国大会講演概要, vol.2012f (2012), 331
- *4) 野口暁ほか: 溶接学会全国大会講演概要, vol.2013f (2013), 132
- *5) 野口暁ほか: 溶接学会全国大会講演概要, vol.2014f (2014), 302
- *6) 山本健太郎ほか: 溶接学会論文集, vol.25 (2007), pp.443-449
- *7) 田中学ほか: J. Plasma Fusion Res., vol.87 (2011), pp.522-527

E-2 アークプラズマ解析^{*6)}^{*7)}

TIG溶接で発生するアークプラズマは最高温度が | 数万度に達し、ガス種にもよるが流速が数百m/sに

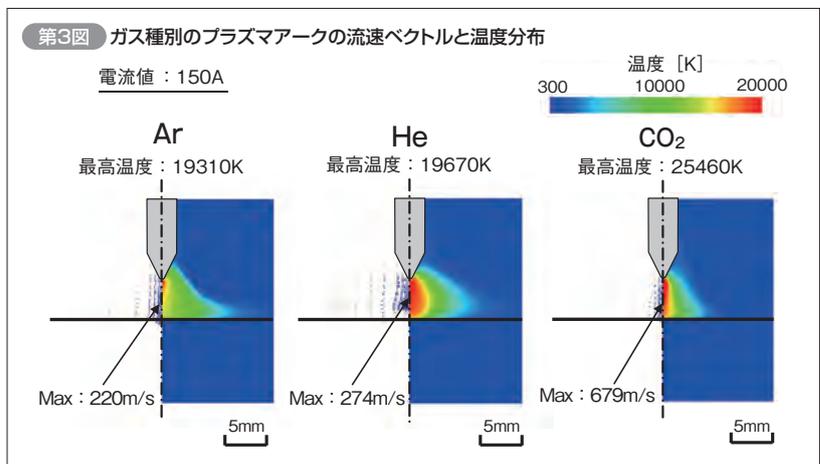
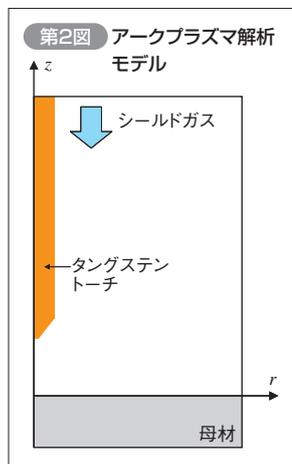
達する。また、気体分子は原子、イオン、電子に電離している。そのため、アークプラズマの挙動を精緻に解析するには乱流の電磁熱流体を解析する必要があり、計算時間がかかる。そこで、以下の仮定を置きモデルを簡素化することで、モデルの精度を損なうことなく、計算時間の短縮を図った。

層流および非圧縮性の電磁流体を仮定し、定常状態におけるアークプラズマ特性を解析する

- ・プラズマは光学的に薄く、準中性条件を満たすものと仮定する
- ・プラズマは化学（電離）非平衡状態にあるものとし、その組成は電離反応と拡散を考慮する
- ・プラズマ組成としては原子、1価イオン、電子の3成分を仮定する
- ・プラズマの熱非平衡性を考慮するために、プラズマ温度は重粒子（原子およびイオン）と電子の2温度に分けて解析する

モデルは第2図に示すように軸対称とし、用いた支配方程式は、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、電流保存式、マクスウェル方程式である。使用したソフトウェアはCOMSOL Multiphysicsである。

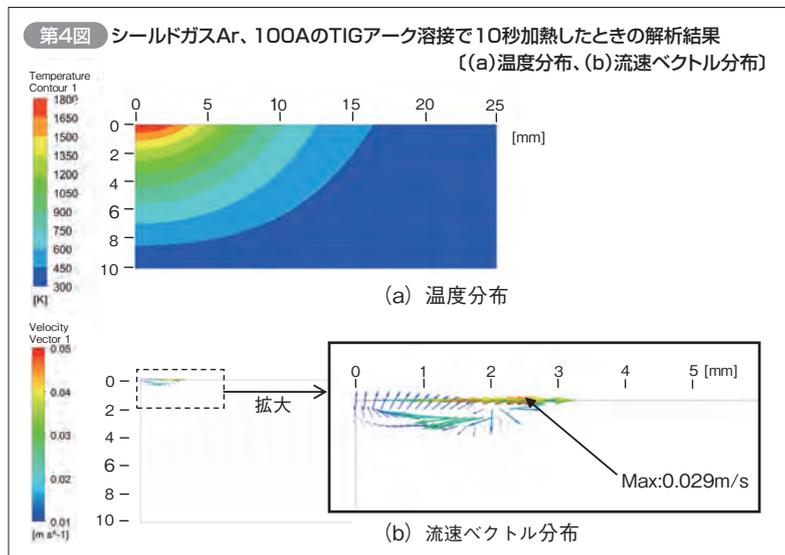
第3図にガス種をAr、He、CO₂にした場合のプラズマアークの流速ベクトルと温度分布の解析結果を示す。ガス種によってアーク形状や温度分布が異なることがわかる。Heガスの場合、Arの場合に比べてアーク軸近傍の温度上昇が見られる。これは、Heの持つ高い電離電圧の影響が顕著となり、特に低温域において電気伝導度が大幅に低下し、アークプラズマ中の電流経路はアーク軸近傍に緊縮するためである。また、ガスがCO₂の場合については比較的幅の狭いアークになる。これは、アーク中でシールドガスとして炭酸ガスなどの2原子分子（活性ガス）があると、それらが解離するときに熱を奪い、アークの表面積を小さくしようとするためである。



E-3 溶融池流れ解析

アークプラズマによって生じた熱は母材へと輸送され、母材を溶かして溶融池を形成する。溶融池内部では、アークのプラズマジェットの影響などによ

って流れが生じる。そこで、前述のアークプラズマ解析より得られた母材表面上の熱流束分布とアーク圧力分布を用いて、溶融池の流れ解析を行った。母材の



溶融・凝固を考慮し、溶融金属については、非圧縮性ニュートン流体として取り扱った。使用したソフトウェアはANSYS Fluentである。

ここでは1例として、シールドガスAr、100AのTIGアーク溶接で10秒加熱したときの二次元軸対称モデルの解析結果を第4図に示す。この解析では溶融池表面の形状変化は考慮していない。この結果から、溶融池内部ではプラズマジェットによるせん断流による溶融池外側へ向かう流れが発生していることがわかる。

E-4 二色放射测温法を用いた溶融池表面温度測定^{*8)}

解析結果の妥当性を検討するためにも、溶融池温度の実測というのが重要になる。しかし、アークプラズマが発生しているのに加え、溶融池は融点を越える高温であるため、溶融池を直接測定する手法として熱電対を使用することは難しい。

そこで溶融池の温度測定は、異なる2波長の光を選択し、それぞれの放射強度比から温度を求める二色放射测温法を使用する。この方法は、第5図に示す光学系を使用し、対象物から放射される任意の2波長、 λ_1 、 λ_2 を選択して、その相対輝度比から温度を算出する方法である。温度計算式は次式に示すとおりである。

$$T = \frac{C_b(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{1}{\ln(I_1 \lambda_1^5 / I_2 \lambda_2^5)}$$

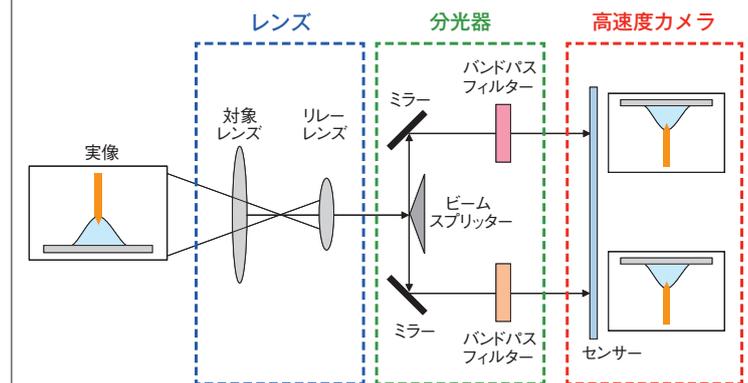
ここに、 T : 温度 [K]
 I : 光の強度 [W/(m²sr)]
 λ : 光の波長 [m]
 C_b : 定数 [mK]

第6図に静止TIGアークの溶融池表面の温度を計測した例を示す。波長は950nmと890nmを選択した。第5図に示すように、高速度カメラで撮影した画像は実物の上下反転した像となっている。溶融池中央部の表面温度は平均約2100℃であることがわかる。

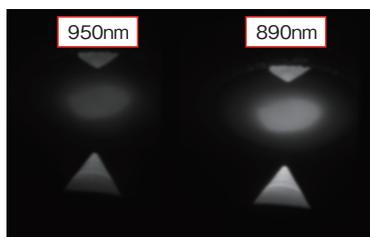
参考文献

*8)
 山崎圭ほか: 溶接学会論文集
 Vol.27 (2009), pp.34-40

第5図 二色放射测温法の光学系

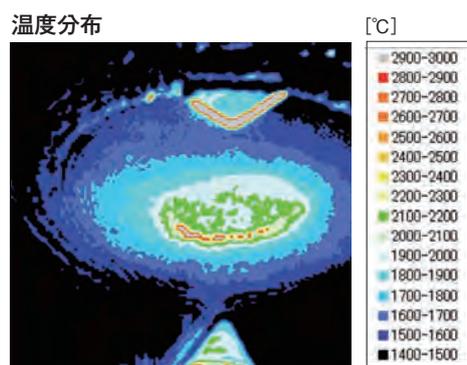
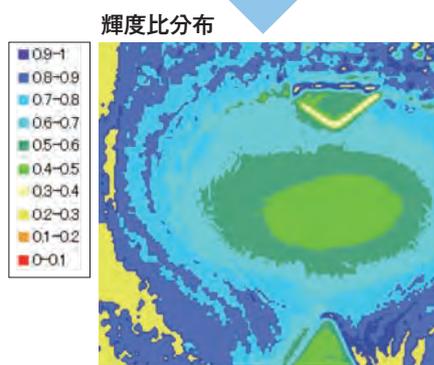


第6図 静止TIGアークの溶融池表面温度を計測した例



実際の測定画像

電流: 100A
 フレームレート: 2000fps



本稿では、TIGアークの温度分布やプラズマジェットの流れの様子、溶接時の母材温度分布や溶融池内部の流れの様子が数値解析によって可視化できるようになったことを示した。これらの手法を駆使することで溶接プロセス中の見えなかったものが見えるようになる可能性があり、変形、膨張収縮、残留応力による亀裂発生等の溶接欠陥の問題を溶接現象の面から検討でき

る可能性が広がった。

今後は、TIGアーク溶接だけでなく、MIG溶接等に対象を広げて技術開発、検証を続けていく。

本技術に関して大阪大学 接合科学研究所 田中 学教授にご指導いただいた。この場を借りてお礼申し上げます。