

1-1 アーク及びティグ溶接*

田中 学**



Arcs and TIG Welding*

by TANAKA Manabu**

キーワード

アーク溶接, プラズマ, 熱輸送, 熱効率, シールドガス, 電磁ピンチ効果, 熱的ピンチ効果, ティグ, 溶融池, 対流

1. はじめに

19世紀初頭に英国のデイビー卿が電気アーク放電を発見してから約200年¹⁾, 周知のように, 電気アーク放電は熱源としての安定性および制御性に優れ, また関連装置の安価なことから様々な工業技術に応用されてきた. その中でも, 電気アーク放電を利用したアーク溶接技術は, 素材から製品の組み立てに至るものづくりの中核を成す生産加工プロセスとして, 自動車, 車両, 船舶, 機械, 建築, 橋梁, エネルギープラント等あらゆる製造業分野に浸透し活用されている. アーク溶接という生産加工プロセスは, 高々1立方センチメートルという空間の中で「電極-アークプラズマ-溶融金属-母材」という固相, 液相, 気相, プラズマの4つの状態が混相して干渉し合う複雑な高温プロセスである. アーク溶接プロセスに関わる技術者は, この点を十分に理解し, 効率とコストを考慮しながら接合部, ひいては組み立てられる部材や製品に至るまで, その安全性および信頼性を保証しなければならない.

本稿では, 溶接技術に携わる技術者を対象として, アークの基本について解説する. 特に, ティグ溶接法を例に取り上げ, 加熱・溶融・凝固・冷却という一連の過程をたどり接合部を形成していくアーク溶接プロセスにおいて, 投入したエネルギーがどのような熱源として発生し, その熱源からどのようにして材料にエネルギーが伝達され, そのエネルギーが材料中をどのように輸送されるのか, という溶接プロセスの中でも最も基本的な現象について解説する. 本稿が溶接技術者にとって溶接アークのより明快な理解の一助になれば幸いである.

2. アーク放電の発生とプラズマ

大気圧中のガスは, 一般的に, 室温において電氣的に素晴らしい絶縁体である²⁾. 一方, 水 (H_2O) は, 零℃以下では固体の水であるが, 零℃から100℃の間は液体の状態³⁾で, 100℃を越すと気体(ガス)の水蒸気になる. このように物質は温度変化によってその状態を変化させるが, さらに水蒸気を加熱すれば H_2O 分子が解離・電離してガス中にイオンや電子といった電気を帯びた粒子が発生し, 絶縁体が導電体になる. 電気を流すガスは固体, 液体, 気体とは異なった性質を示すことから, 第四の状態であると言われている³⁾. この状態をプラズマと呼び, プラズマでは電子の数とイオンの数が等しくなり, 全体的には電氣的に中性になる⁴⁾.

先程も述べたように, ガスは室温において電氣的絶縁体であるが, 例えば, 大気圧空気には室温においても1立方センチメートルあたり1~100個というごくわずかな電子が存在している^{2, 3)}. 図1のように, ガスで満たされた陰極と陽極の間に高電界(大気圧のアルゴンで5kV/cm程度)を印加することにより電界で加速されたごくわず

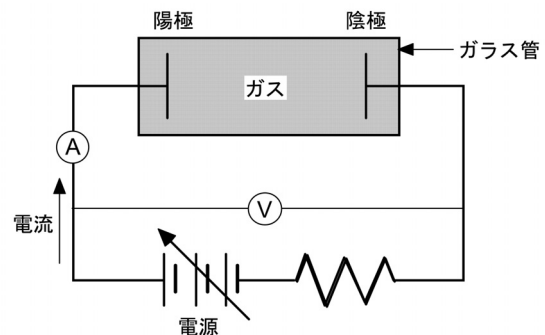


図1 直流放電の電気回路

*原稿受付 平成20年2月12日

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University

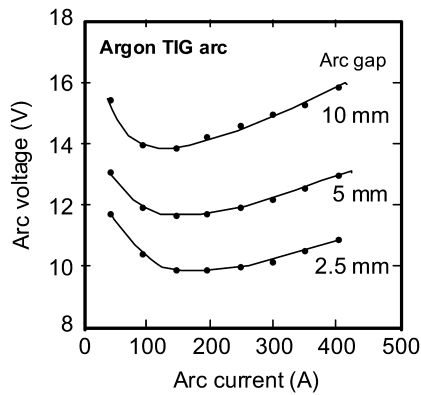


図2 大気圧アルゴンティグアークの電流-電圧特性⁹⁾

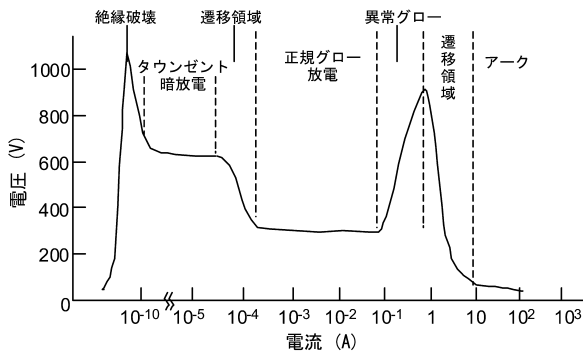


図3 直流放電の放電モードと電流・電圧の関係

かな電子が空間中のガス分子を次々に衝突電離させ、電子やイオンが急激に増殖される。このようにして、瞬間的にガスの導電性が上昇すること（すなわち、絶縁破壊）により両電極間で連続的に電流が流れるようになる。これを気体放電と呼び、その一つがアーク放電である。もちろん、そのガスの状態はプラズマになっている。

ところで、ガス分子の電離反応は吸熱反応であり、エネルギーを必要とする。アーク放電によって発生したプラズマをアークプラズマと呼ぶが、アークプラズマを維持しているエネルギーは、アークプラズマという電気抵抗体を流れるアーク電流によって生ずるジュール加熱とすることができる⁹⁾。図2に大気圧アルゴンのティグアークの電流・電圧特性を示す⁹⁾。アーク長によって抵抗体の長さが異なってくるのでそれに合わせてアーク電圧も変化するが、概ね10V~20V程度でありアークの消費電力（電流×電圧）としては1kW~10kW程度になる。このエネルギーが数ミリメートル程度の陰極-陽極両電極間に投入されるため、ガスが十分に加熱され高温のプラズマ状態になる。なお、アークプラズマの温度については、過去に多くの研究者によって測定されているが⁷⁾、特に平岡によって各種計測方法を用いて精力的に測定されている⁸⁻¹⁰⁾。アーク電流やシールドガスにもよるが、平岡の結果によると、アーク電流100A、アーク長5mmの大気圧アルゴンのティグアークにおいて最大で約17,500Kとなり⁹⁾、同時に約 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の電子密度が示されている¹⁰⁾。

話を元に戻すが、気体放電には、図3に示すように、アーク放電ばかりではなく、グロー放電を代表とした幾

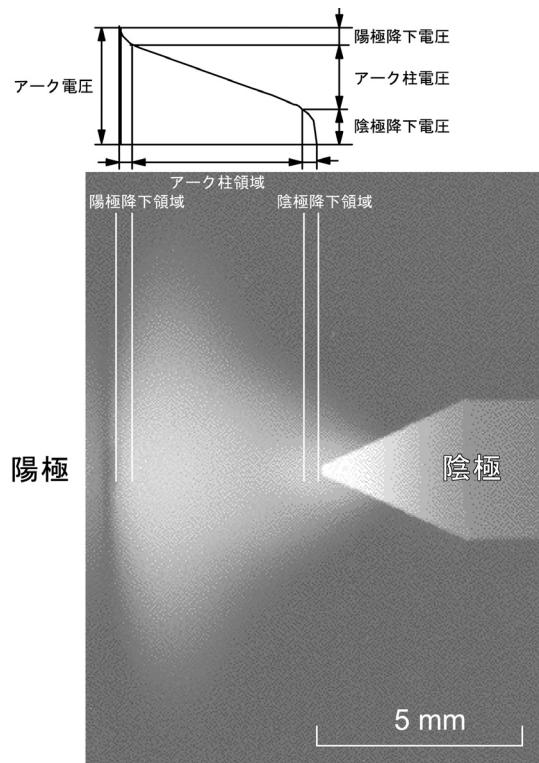


図4 ティグアークにおける空間電位分布

つかの放電モードが存在する²⁾。アーク放電と他の放電モードを明確に区別する定義はないが、アーク放電は他の放電と比較して①比較的高い電流密度（グロー放電では $1 \sim 10 \text{ mA/cm}^2$ 、アーク放電では $>100 \text{ A/cm}^2$ ）、②低い陰極降下電圧（グロー放電では100V以上、アーク放電では数V~10V）、③高い光輝度、といった特徴を持っており²⁾、放電電流が図3に示すように概ね1A程度を最小値とした放電モードである。

気体の直流放電では、その内部構造として一般的に3つの領域に分けて考えられる場合が多く、それらをティグアークの典型的な写真と合わせて図4に示す。アーク空間は陰極降下領域、アーク柱領域、陽極降下領域の3つの領域で構成されており、それぞれの領域には陰極降下電圧、アーク柱電圧、陽極降下電圧と呼ばれる電位差が存在し、それらの総和がアーク電圧として定義される⁹⁾。また、それぞれの空間的厚みの総和はアーク長として定義される。先程の説明のように、アーク放電を特徴づける一つとして「低い陰極降下電圧」が挙げられたが、放電電圧は図2に示されるように電極間距離（アーク長）によっても大きく依存するので、放電電圧に比べて陰極降下電圧の方が放電モードを特徴づけるのに適切な指標になる。

3. プラズマの輸送係数

1万度に達する高温のプラズマでは、プラズマを構成する電子、イオン、中性粒子（原子や分子）が熱運動を行いながら相互に衝突を繰り返し、その運動量やエネルギーを交換している¹¹⁾。現実には、アークプラズマは高輝度で特徴づけられるように強い光を放っており、また空

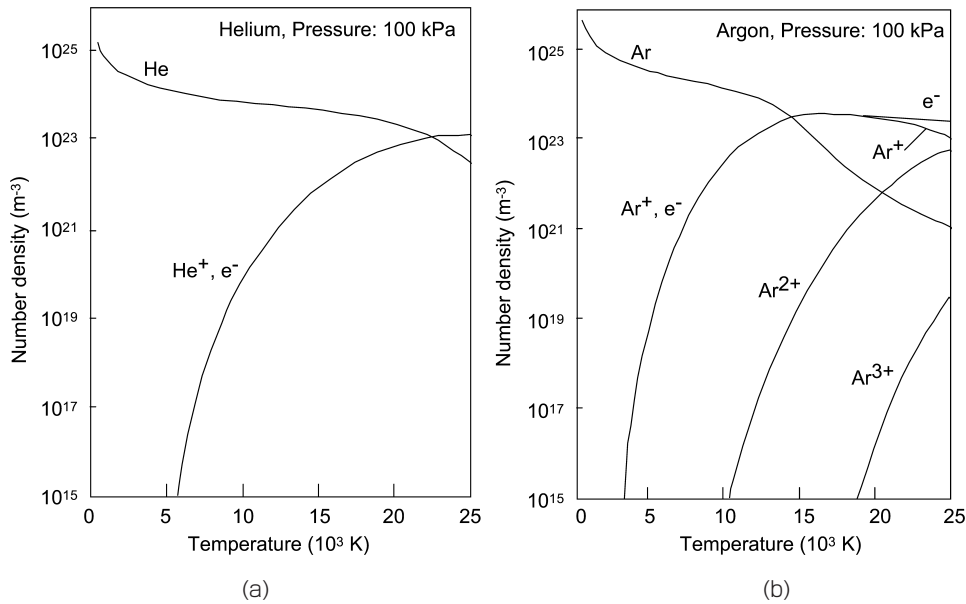


図5 大気圧下における (a) ヘリウムと (b) アルゴンのプラズマ平衡組成図

間的に大きな温度勾配が存在するが、頻繁で十分な衝突の結果、局所的な空間に限定すれば光子を介した反応が他の粒子間衝突による反応に比べて無視できるほど小さく、電離・解離と再結合がほぼ平衡し粒子の数密度や熱運動の挙動が変化しないと見なし得る場合には近似的に熱平衡が成立していると考えてもよく、このような状態を局所熱平衡 (Local Thermodynamic Equilibrium = LTE) という^{11, 12)}。LTE 状態であるプラズマは熱プラズマと呼ばれる¹³⁾。LTE を満たすクライテリオンは、大気圧のアルゴンプラズマの場合、電子密度が $n_e > 10^{17} \text{cm}^{-3}$ を満足することであると考えられている¹⁴⁾。前述のように、平岡が実測した大気圧アルゴンのティグアークにおける電子密度¹⁰⁾はこのクライテリオンを満たしており、大気圧ティグアークプラズマは熱プラズマであると仮定することができよう。

アークプラズマが熱プラズマである場合、図5のように温度ごとのプラズマ組成が熱力学的に既知となり¹⁵⁾、さらには電気伝導率、熱伝導率、比熱、粘性などのプラズマ輸送係数も温度ごとに導くことができるようになる¹⁶⁾。図6はヘリウムとアルゴンの電気伝導率を示したものである。プラズマ中の電子密度は、前に触れたように、アーク放電の電気抵抗率 (換言すれば、電気伝導率) に直結していることから図5より簡単に想像されるが、10,000 K 以下の温度領域でのヘリウムの電気伝導率が著しく小さいことがわかる。これは、ヘリウムとアルゴンの電離エネルギーがそれぞれ 24.58 eV, 15.76 eV であり¹⁷⁾、ヘリウムの電離エネルギーがアルゴンのそれに比べて 1.5 倍以上も大きい、すなわち、ヘリウムの方がアルゴンに比べてイオンになりにくいことに起因している。一方、図2のアルゴンティグアークの電流-電圧特性において、アーク長にかかわらず概ねアーク電流 100 A 程度を境に低電流側では電流とともに電圧が下がる負抵抗特性を示し、逆に高電流側では正抵抗特性を示すことがわかる。これを図6のプラズマの電気伝導率と比較すると、小電

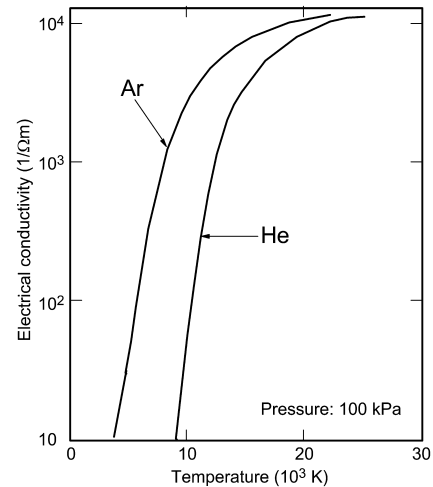


図6 ヘリウムとアルゴンの電気伝導率

流域では投入電力が小さいためにアークプラズマの温度が低く電気伝導率が小さい。しかしながら、アーク電流の増加とともにプラズマ温度が上昇して電気伝導率も上昇する。これが図2の負抵抗特性に相当する。一方、図6に示すように 15,000 K 以上の高温領域ではプラズマの電気伝導率が漸近的に一定値に近づくが、高電流側では投入電力が大きいためプラズマ温度がその領域付近になり、電気伝導率の上昇が小さくなる。電気伝導率の変化が小さければアーク放電の電流-電圧特性はオームの法則に従って、図2にみるように、電流とともに電圧が上昇する正抵抗特性を示すのである。実際には、電子を放出するタングステン電極での陰極現象も同時に関係しているのこのように簡単に説明することはできないが¹⁸⁾、プラズマの輸送特性とアーク放電特性を関連づけて巨視的に理解するには差し支えないだろう。

プラズマの輸送係数には、もちろん、ガス分子の電離エネルギーのみが影響を与えるわけではない。ガス分子の質量、ガス分子が多原子分子であるならば解離エネル

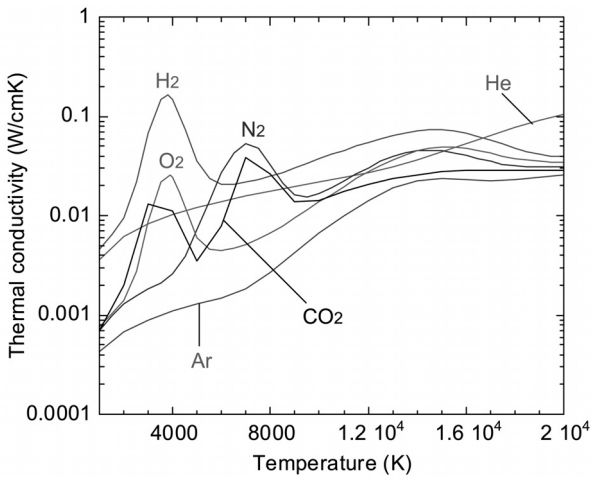


図7 各種ガスの熱伝導率

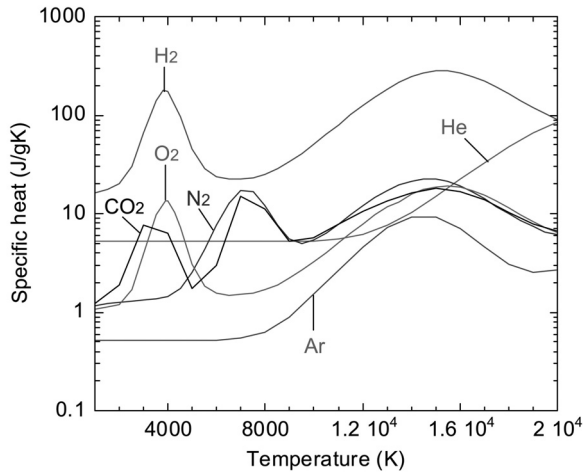


図8 各種ガスの比熱

ギー，原子数や分子構造なども重要な因子になる¹⁹⁾．参考までに，各種ガスの熱伝導率および比熱をそれぞれ図7，図8に示す．水素 (H_2) は，解離 (4,000 K 付近) を伴う上に解離後の原子 (H) の質量および半径が小さいため熱速度と平均自由行程が大きくなり，熱伝導率が極めて大きくなる．一方，比熱においては，ヘリウムは質量が小さいために見掛けの比熱が大きくなっているが，溶接用シールドガスとしてポピュラーな炭酸ガス (CO_2) に代表されるように，単原子分子に比べて多原子分子は解離反応の他に分子の振動や回転のエネルギーも加わるため比熱が大きくなり¹⁹⁾，加熱されにくく熱拡散の小さいガス特性を示すことになる．

4. 水冷銅板上のティグアーク

アーク電流 150 A，アーク長 5 mm，タングステン電極 (陰極) 先端角度 60° ，シールドガスをアルゴンとし，母材 (陽極) を水冷銅板とした場合の数値計算シミュレーションの結果を図9に示す²⁰⁾．(a) は温度場と電子密度場，(b) は圧力場と速度場である．タングステン電極の最高温度は先端部で約 3,300 K，アークプラズマのそれは電極近傍で約 17,000 K，銅母材のそれは中心部で約 600 K である．電子密度では，アーク柱中心部において $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ を越えていることがわかる．アーク電流の条件は異なるが，プラズマ温度と電子密度ともに前項で示した平岡の実験結果^{9, 10)}に非常によく一致している．一方，速度場を見ると，アークプラズマ領域においてタングステン電極領域からアーク中心部を通過して母材表面に向かって強く流れるプラズマ気流が示されており，その最高速度は 217 m/s に達している．この気流は，図10に示すように，電極近傍での電流路の収縮がローレンツ力 ($j \times B$) による強い電磁ピンチを起こしてアークプラズマを緊縮させ，結果として図9 (b) の圧力場に見るように電極近

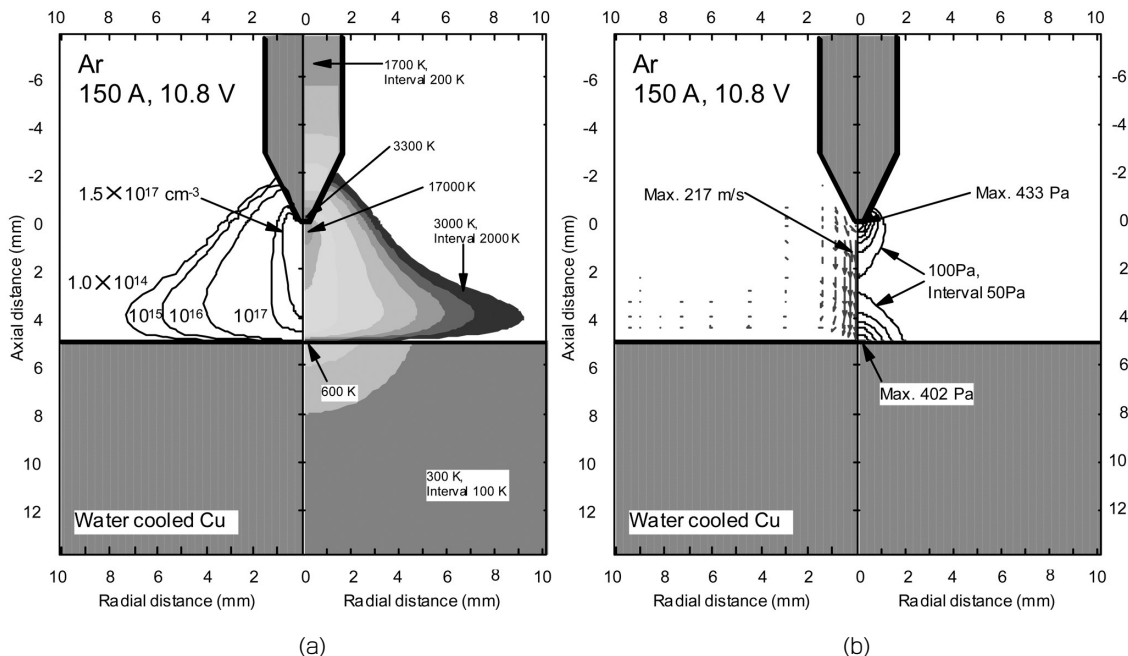


図9 水冷銅板上のアルゴンティグアークの (a) 温度場と電子密度場，(b) 圧力場と速度場

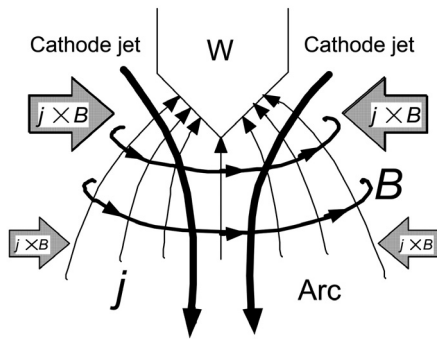


図10 アーク電流とその自己誘導磁場によるローレンツ力 ($j \times B$) およびプラズマ気流の概念図

傍からアーク中心部にかけて圧力勾配が生じ、それが駆動力となって発生したプラズマの強い流れである。プラズマ気流は母材の表面で外周方向（半径方向）へと向きを変えるが、この時の慣性力がアーク圧力として働く。シミュレーションでは、陽極前面の中心部において402 Paの最大アーク圧力になっている。

5. エネルギーバランスと熱効率

図11は、図9に示したティグアークの全エネルギーバランスを数値的に表したものである。タングステン電極、アークプラズマ、母材のそれぞれにおいて41 W, 1579 W, 0 Wのジュール発熱が生じており、ティグアークにおける熱の約97%はアークプラズマにおけるジュール発熱によって発生することを示している。このように生じた熱は電極や母材へ輸送される他、外部への熱損失として失われる。具体的には、タングステン電極への熱伝導加熱として482 Wおよびイオン流加熱として256 Wが輸送され、一方、母材への熱伝導加熱として530 Wが輸送される。また、アークプラズマからの放射損失および周囲ガスへの熱伝導損失として、それぞれ309 Wおよび2 Wが失われている。タングステン電極におけるエネルギーバランスとしては、上述のアークプラズマからの加熱に対して、電子放出、電極上端への熱伝導、および放射による熱損失がそれぞれ675 W, 70 W, 34 Wになってバランスしている。一方、母材におけるエネルギーバランスとしては、上述のアークプラズマからの熱伝導加熱の他に電子流入射による加熱675 Wが加わり、逆に放射および母材周辺への熱伝導による損失がそれぞれ0.1 Wおよび1205 Wでバランスしている。このように、図9(a)で示した温度場は以上のエネルギーバランスによって形成されている。

アークの電力（アーク電流×アーク電圧）に対して、母材へ輸送される熱量（入熱量）の割合を熱効率と呼ぶ²⁰。図11では、アーク電流150 A、アーク電圧10.8 Vであるので、アークの電力は1620 Wになる。この場合の熱効率を計算すると74%である。この数値は、過去に実測された結果とよく一致している^{21, 22)}。非消耗電極でありながらティグアークにおける熱効率が比較的大きいのは、図11に見るように、タングステン電極へ輸送されたエネルギーの大部分が、見掛け上、陰極から陽極への電子の移動

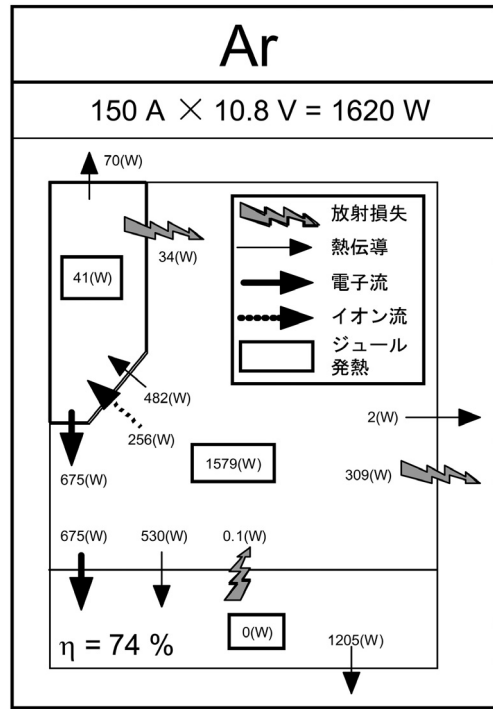


図11 ティグアークの「タングステン陰極－アークプラズマ－水冷銅陽極」系のエネルギーバランス

（電子流）によって皆く母材（陽極）へ輸送されているところにあると言える。すなわち、アーク放電を溶接プロセスに応用した場合に熱効率の高い理由は、電極特有のエネルギー輸送にあると言えよう。

6. シールドガスと溶接アークの熱的ピンチ効果

溶接アークにおける熱的ピンチ効果は、国際的な学術用語ではないが、アークが緊縮する一つの効果としてよく使用される用語である²³⁾。例えば、マグ溶接において観察される溶滴移行形態（スプレー移行）と炭酸ガスアーク溶接において観察される溶滴移行形態（グロービュール移行）との違いが生じる理由を説明する際によく引き合いに出される²⁴⁾。ここでは、数値計算シミュレーションによる仮想実験をとおして、溶接アークにおける熱的ピンチ効果について解説する。

まず、空想のシールドガスを考えてみよう。一つは比熱のみ大きいアルゴンガス、もう一つは熱伝導率のみ高いアルゴンガスである。前者の比熱は9,000 K以下をヘリウムの比熱、9,000 K以上を炭酸ガスの比熱に等しくさせた（図8参照）。一方、後者の熱伝導率はヘリウムのそれに等しくさせた（図7参照）。なお、密度、電気伝導率、粘性などの他の物性値はアルゴンのままである。図9は通常アルゴンの温度場と流れ場、図12は(a)比熱のみが高い場合、(b)熱伝導率のみが高い場合の温度場と流れ場を示している。アーク電流150 Aおよびアーク長5 mmはともに一定とし、母材に水冷銅板を想定した。

仮想実験により、比熱が高い場合にアーク柱が著しく緊縮していることがわかる。図9の通常アルゴンアー

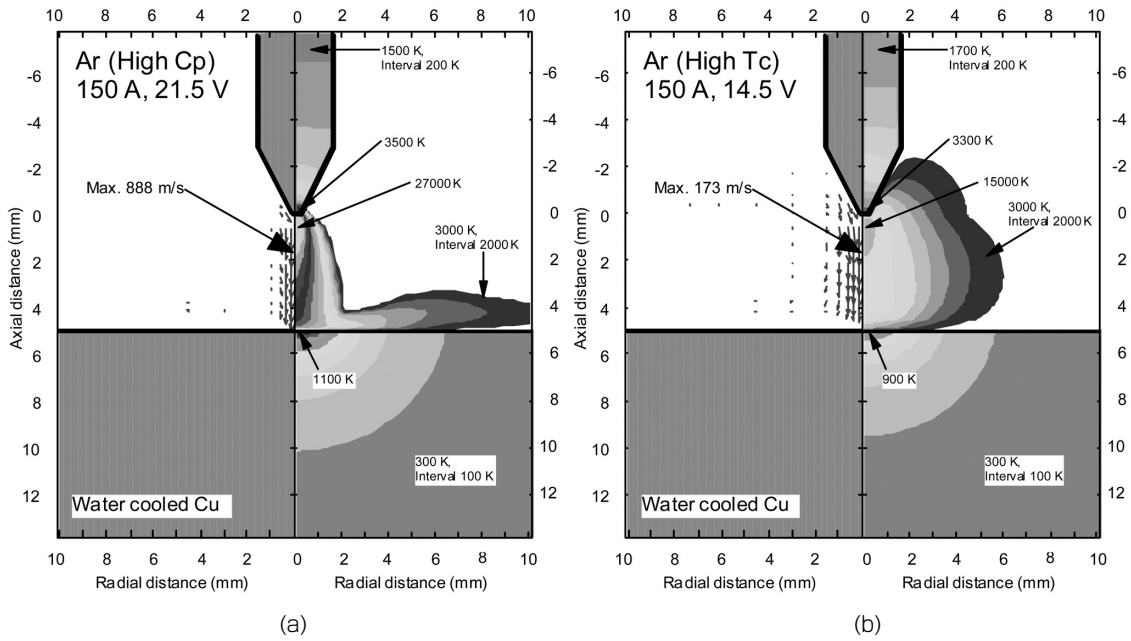


図12 空想のアルゴンをシールドガスに使用したティグアークの仮想実験. (a) 比熱のみが高い場合, (b) 熱伝導率のみが高い場合の温度場と流れ場

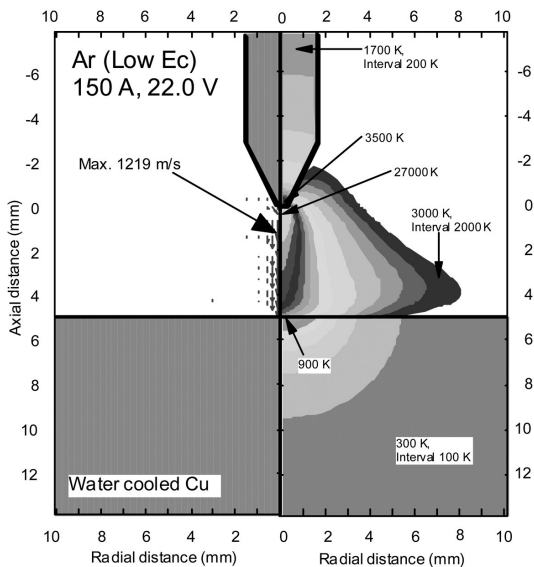


図13 空想のアルゴンをシールドガスに使用したティグアークの仮想実験. 電気伝導率のみが低い場合の温度場と流れ場

クでは、プラズマの最高温度が17,000 K、タングステン電極からアーク中心部を通って銅母材表面に向かって流れるプラズマ気流の流速が最大で217 m/sになっている。また、陰極先端より2 mmの位置におけるアーク柱径(3,000 Kの等温線に相当)は約10 mmである。同じ位置での図12 (a) のアーク柱径は約3.5 mmとなる。アークが緊縮した分、プラズマ気流速度と中心部のプラズマ温度が上昇し、流速は最大で888 m/sに達するとともに温度は27,000 Kに達している。一方、熱伝導率が高い場合、アーク柱は逆に膨張していることがわかる。同様に図12 (b) の陰極先端より2 mmの位置におけるアーク柱径は約12 mmになっている。アークが広がった分、プラズマ気

流速度と中心部のプラズマ温度が低下し、速度は173 m/sに低下するとともに温度も15,000 Kに低下している。

以上、数値計算シミュレーションによる仮想実験でわかるように、溶接アークにおける熱的ピンチ効果は、主として、シールドガスが有する物性の中で熱伝導率よりも比熱の大きさに関わることがわかる。比熱が大きい場合、アーク周辺への熱拡散が小さくなるためにアーク電流の通電経路がアークプラズマの高温部に制限される。このため、電磁ピンチ効果が大きくなり誘起されるプラズマ気流が増大し、高速流によるアークの冷却が促進される。この結果として、アーク柱の緊縮が生じるが、それが熱的ピンチ効果の本質である²⁵⁾。一方、シールドガスの熱伝導率の高さは、外方向へのアークの拡がりの他にタングステン電極先端部における高温部の拡がり、すなわちアークルート部の拡がりを導くことから電磁ピンチ効果が弱くなり、結果的にプラズマ気流の運動量が小さく、またアーク圧力が小さいソフトな熱源を生む働きをすると考えられる。

アーク溶接において溶込み深さや溶接速度といった溶接能率の向上を狙ってシールドガスにヘリウムがよく使われる。図7に示したように10,000 K程度までの温度範囲でみると、ヘリウムの熱伝導率はアルゴンに比べて明らかに大きい。ヘリウムの比熱は単位モルあたりに換算するとアルゴンの比熱とほぼ同じである。ヘリウムシールドのティグアークを用いて溶接能率の向上が見られるのは、主として図6に示したように、ヘリウムの電気伝導率がアルゴンに比べて著しく小さいことに起因している。電気伝導率が低い場合も、比熱が高い場合と同様に、プラズマ中央部の高温領域にのみ十分な電子が存在可能となり、結果的にアーク電流が中央部に集中して母材への入熱密度が増加する。図13は、図12と同じ要領で、電気伝導率のみが低い空想のアルゴンガスをシールドガ

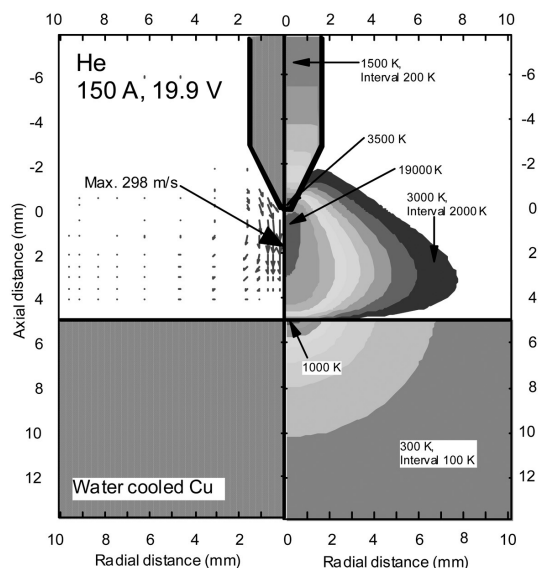


図14 現実のヘリウムをシールドガスに使用したティグアークの温度場と流れ場

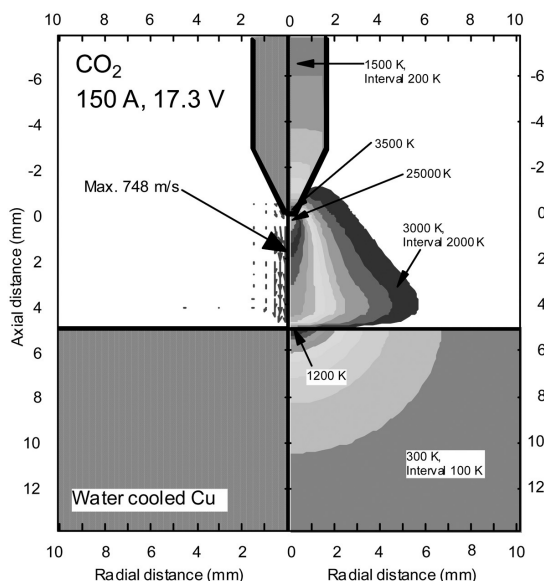


図15 現実の炭酸ガスをシールドガスに使用したティグアークの温度場と流れ場

スに使用した場合のアーク形態を仮想実験したものである。なお、電気伝導率は図6に示したヘリウムのそれに等しくさせた。図に見るように、アーク柱の中心部全域にわたって高温域が母材近傍まで到達し、その最高温度が27,000 Kに達していることがわかる。図14は、現実のヘリウムをシールドガスとして使用した場合のティグアークの数値シミュレーション結果である。ヘリウムアークについては、イオン化しにくいという広義な意味での熱的ピンチ効果によって、アークの通電経路が緊縮し、高い熱伝導率によってアークプラズマのフレームが拡がっている、ということが出来る。なお、ヘリウムアークのアーク圧力が小さいことは実験的によく知られていることである²⁶⁾。

図15は、比熱の大きい炭酸ガスをシールドガスとして

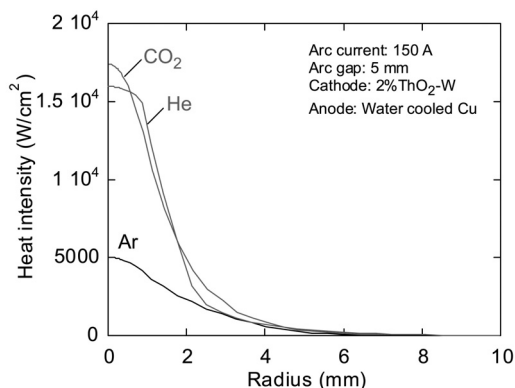


図16 アルゴン、ヘリウム、炭酸ガスのティグアークによる母材表面における入熱密度分布

使用した場合のティグアークの数値シミュレーション結果である。炭酸ガスはCO₂からCOとOへの解離、さらにCOからCとOへの解離があるので、それぞれ3,000 K付近と7,000 K付近に熱解離頻度のピークが存在する。このため、図8に見るように、それぞれの温度域に比熱のピークが現れる。この比熱の大きさが、図15に示すように、通常のアーク（図9）に比べてアークを明らかに緊縮させる。プラズマ気流速度は最大で748 m/sに達するとともにプラズマ最高温度も25,000 Kに達している。図16は母材表面における入熱密度分布を示したものである。図から明らかなように、炭酸ガスシールドのティグアークにおける入熱密度は、アルゴンのそれに比べて中心部に集中して大きくなっており、またその値はヘリウムシールドのそれと同等である。しかしながら、この炭酸ガスアークは図12(a)の比熱のみが高い空想のシールドガスを使用したティグアークに比べて熱的ピンチ効果が小さい。この主たる理由は、図7と図8に見るように、現実のガスにおいて比熱の大きいものは熱伝導率も大きくなるためである¹⁶⁾。図12(b)に示したように、ガスの熱伝導率の高さは外方向へのアークの拡がりを助長するため、比熱の大きさによるアークのピンチ効果との相互バランスによって炭酸ガスアークのフレームが形成されている。当然ながら、現実的には炭酸ガスが3,500 Kに達する高温のタングステン電極を著しく酸化させ、安定なアークを形成することはできないので、図15も実質的には仮想実験と言える。しかしながら、二重シールドトーチを利用してインナーノズルに少量のアルゴン、アウターノズルに主シールドガスとして炭酸ガスを供給させるティグ溶接法が著者の研究グループによって開発されている²⁷⁾。タングステン電極の酸化を抑制しながら炭酸ガスの熱的ピンチ効果を利用する本手法では、明らかなアークの緊縮が実験的に示されている。

7. ティグ溶接における溶融池形成の基本

ティグ溶接プロセスは「電極-アークプラズマ-溶融池」の密接なエネルギーバランスにより成り立っている。一方、溶融池の形成にはアークから運ばれるエネルギー輸送も重要であるが、その後の溶融池内でのエネルギー輸送も極めて重要である。鋼のティグ溶接では、熱伝導

よりも対流によるエネルギー輸送が支配的になるため²⁸⁾、溶融池における対流現象の違いによって溶接部の溶込み形状が大きく違ってくる。ティグ溶接における溶融池内での対流の駆動力として、図17に示すように、従来から4つが考えられている²⁹⁾。すなわち、アークによって発生したプラズマ気流（陰極ジェット）によるせん断力、溶融池内での密度差に起因する浮力、溶融池内を流れる電流に起因する電磁気力、溶融池の表面張力差に起因する

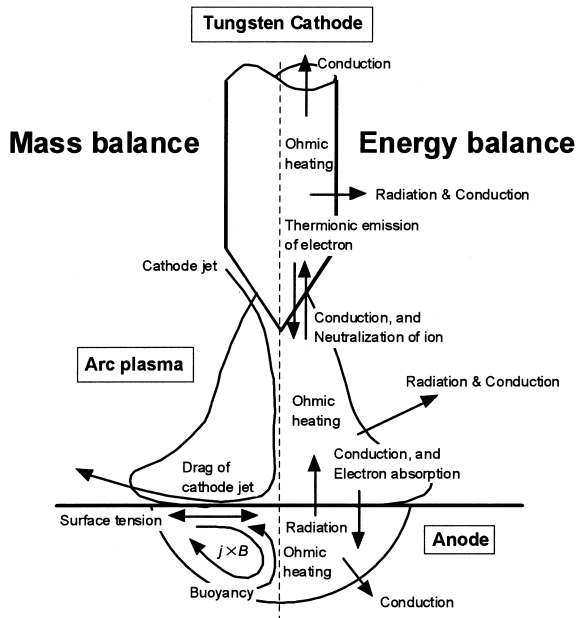


図17 ティグ溶接におけるエネルギーおよび力のバランス

マランゴニ力である。これらを駆動力として次のような向きの溶融池内対流が発生すると考えられる。すなわち、プラズマ気流によっては中心から外向き、浮力によっても（下向き溶接の場合）外向き、電磁気力によっては逆に中心へ内向き、表面張力によっては場合によって外向きにも内向きにもなる。ここで、表面張力において二通りの対流が発生する場合のある理由は、この対流が溶融池の表面張力差を駆動力としているため表面張力の温度変化が正か負で対流方向が逆転することにある。図18に示すように、酸素（O）やイオウ（S）などの表面活性元素が不純物微量元素として母材に比較的高い濃度で存在する場合、溶込みが深くなることは古くから知られている^{30, 31)}。そのメカニズムがマランゴニ対流の変化に他ならない³²⁾。

以上の4つの駆動力の微妙なバランスによって溶融池内のマクロな対流が決定され、その対流による熱輸送に

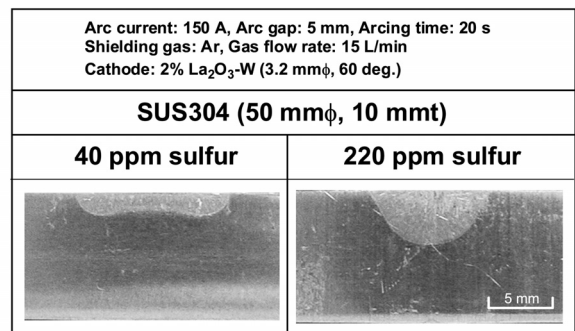


図18 20秒間のステンレス鋼のアルゴン静止ティグ溶接による溶込み断面形状

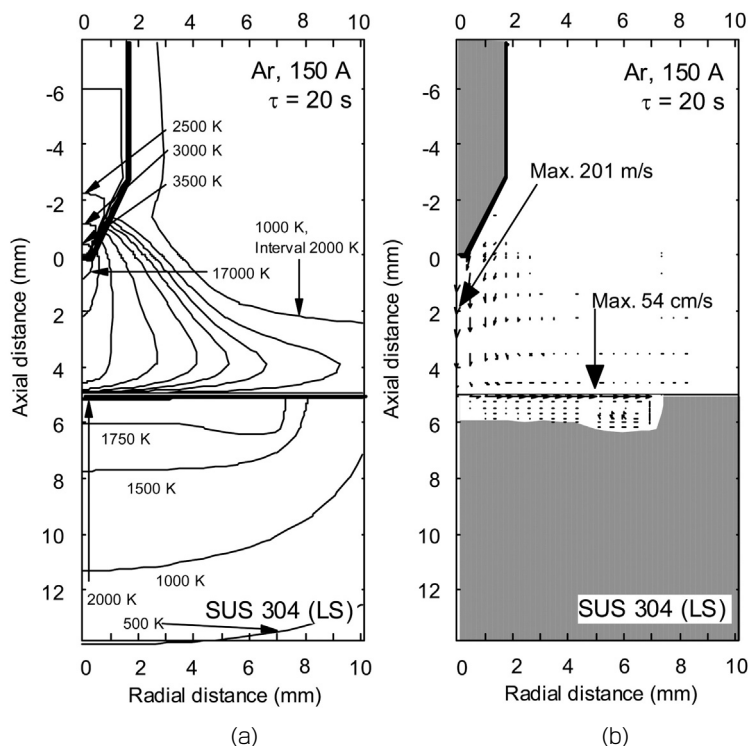


図19 20秒間のステンレス鋼（LS）の静止ティグ溶接（アルゴン、150 A）における (a) 温度場と (b) 速度場

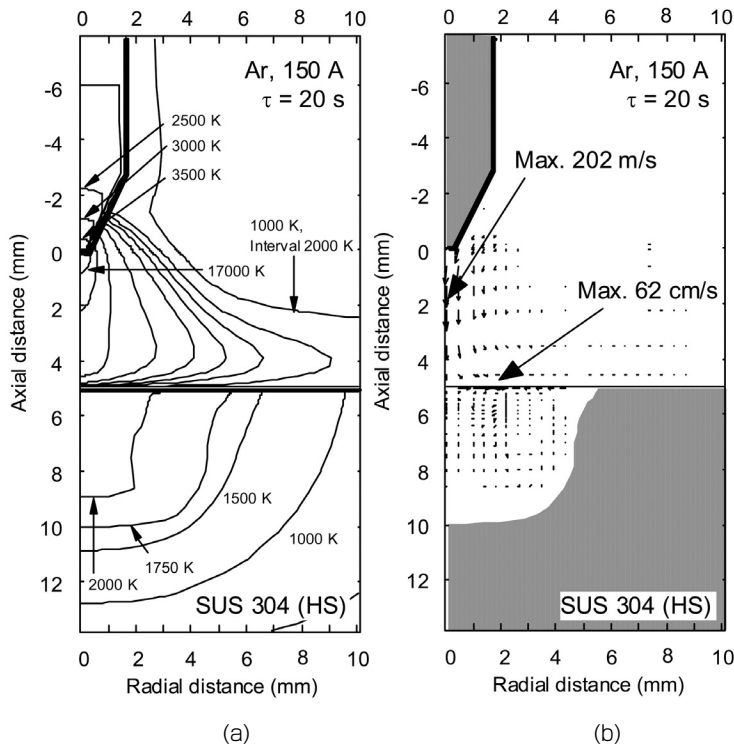


図20 20秒間のステンレス鋼 (HS) の静止ティグ溶接 (アルゴン, 150A) における (a) 温度場と (b) 速度場

よってティグ溶接における溶融池形成が支配されている、と言える。シールドガスをアルゴン、アーク電流を150Aとしてステンレス鋼を20秒間静止ティグ溶接した場合の数値シミュレーション結果を図19および図20に示す。図19は低S量ステンレス鋼 (LS) の場合、図20は高S量ステンレス鋼 (HS) の場合である。ともに (a) は温度場、(b) は速度場である。なお、シミュレーションに与えられたステンレス鋼の表面張力を図21に示す。図19と図20を比較すると、タングステン電極やアークプラズマ領域においてほとんど変化がないにもかかわらず、ステンレス鋼の溶込み形状に大きな違いが見られることに気付く。この数値シミュレーションと同じ条件で静止ティグ溶接した実験結果が図18であるが、双方ともよく一致し、低S量ステンレス鋼では幅が広く浅い周辺溶込み形状となり、一方、高S量ステンレス鋼では幅が狭く深い溶込み形状になっていることがわかる。

溶融池内対流の駆動力の主な支配因子についての理解を助けるために、上記の4つの駆動力を別々に分離し、それぞれの力のみが働く場合を想定して計算した。その結果を図22に示す。プラズマ気流によるせん断力では溶融池内の流速が最大で47 cm/sに達している。また、マランゴニ力でも最高速度が18 cm/sに達している。一方、浮力では最高速度が1.4 cm/sしかなく、また電磁気力でも最高速度が4.9 cm/sしかない。このことは、アルゴンシールドのティグ溶接の場合、ステンレス鋼における溶融池内対流の駆動力としてプラズマ気流による溶融池表面のせん断力と表面張力差によるマランゴニ力が他の2つの駆動力に比べて明らかに支配的であることを示している。このことより、図19の低S量ステンレス鋼では、

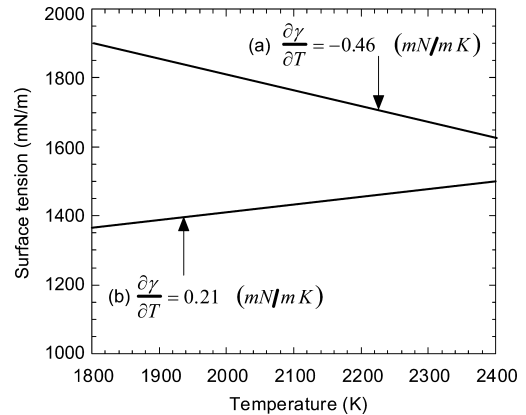


図21 数値計算シミュレーションで仮定されたステンレス鋼の表面張力の温度変化 (a) 低S量ステンレス鋼, (b) 高S量ステンレス鋼

マランゴニ力による外向き方向の駆動力にプラズマ気流の外向きのせん断力が加わるため、溶融池表面での最高速度が54 cm/sにも達する非常に速い外向き方向への溶融池内対流が発生し、この強い外向きの対流がステンレス鋼中の熱輸送現象を支配して幅広で浅い溶込み形状になっている、と説明できる。

一方、図20の高S量ステンレス鋼の場合では、マランゴニ力が内向きに逆転するため、それとプラズマ気流による外向きのせん断力との複雑な干渉によってマクロな対流が決定されている。すなわち、溶接開始20秒後の図20では、プラズマ気流のせん断力を主駆動力とした外向きの小さな循環流が溶融池中央部表面付近に残るだけで、

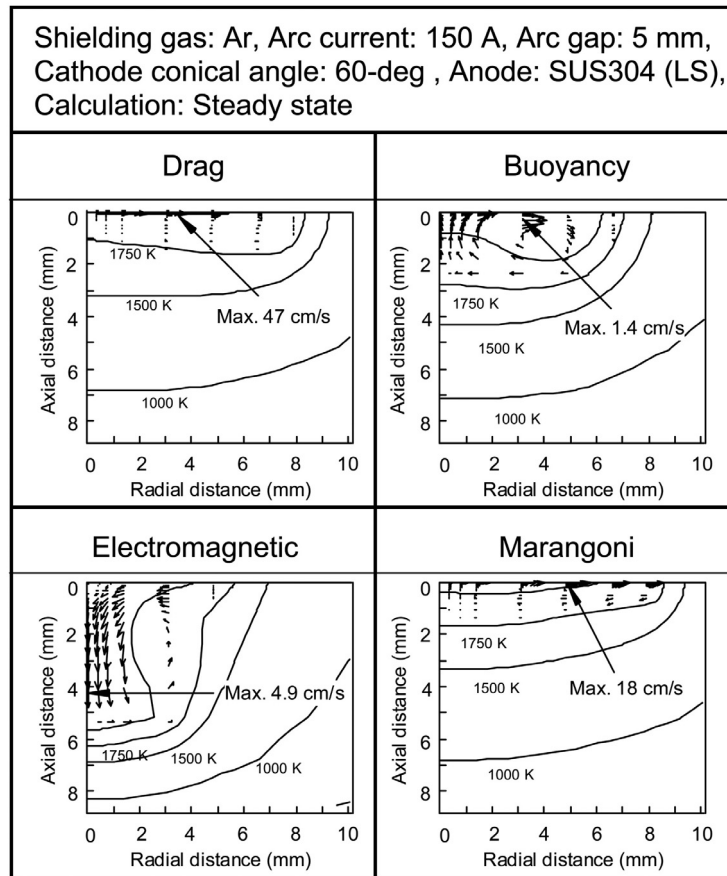


図22 アルゴンティグ溶接における溶融池内での対流駆動力

マクロな対流は溶融池端部におけるマランゴニ力を駆動力とした内向きの大きな循環流として形成されている。これが高S量ステンレス鋼の場合に幅が狭く深い溶込み形状を形成するのである。

8. ま と め

アーク溶接プロセスの熱源であるアーク放電とそのプラズマ現象、ならびにプラズマと材料のエネルギー及び力のバランスからみた溶融池形成のメカニズムについて、ティグ溶接を例に取り上げて解説してきた。アーク溶接現象は「電極-アークプラズマ-溶融池」がエネルギー的にも力的にも密接に相互作用し合って形成されているものである。アーク放電を溶接プロセスに応用した場合、母材はそれ自身がアーク放電の一方の「電極」として機能することになる。アーク放電はガス中の電子やイオンといった荷電粒子の流れによって形成されており、アーク溶接プロセスの熱効率の高さは、まさにこの荷電粒子を介した電極特有のエネルギー輸送にあると言える。一方、ティグ溶接における溶融池形成は、「プラズマ気流によるせん断力」、「浮力」、「アーク電流に起因する電磁気力」、「表面張力勾配によるマランゴニ力」の4つの微妙な力のバランスによって溶融池内のマクロな対流が決定され、その対流による熱輸送によって支配されている、と結論づけられる。これもまた電極特有の現象を多く含んでいる。アーク電流、アーク電圧（アーク長）、シールドガスといったような溶接パラメータを変化させること

は、エネルギー的にも力的にも上記の微妙なバランスを変化させて、溶接部の溶込みボリュームや形状を変化させている、と言えよう。

「アークとティグ溶接」という大きなテーマの中で主として熱源の発生と熱輸送をやさしく解説することに重心をおいてきたが、紙数の関係で多くの重要な事項が抜けている。本稿で挙げた引用文献や溶接学会が刊行している種々のテキストを参考にされるようお願いしたい。

参考文献

- 1) H. Ayrton, The Electric Arc, The Electrician Printing & Publishing, London, (1902).
- 2) M.N. Hirsh and H.J. Oskam: Gaseous Electronics, Academic Press, New York, (1978), Chapter 5 "Electric Arcs and Arc Gas Heaters" by E. Pfender.
- 3) 提井：現代のプラズマ工学，講談社，ブルーバックスB-1158 (1997).
- 4) 赤崎，村岡，渡辺，蛸原：プラズマ工学の基礎，産業図書，(1987).
- 5) 溶接アーク物理研究委員会編：溶接プロセスの物理，溶接学会，(1996).
- 6) 溶接学会編：溶接・接合便覧，丸善，(1990).
- 7) J.F. Lancaster：溶接アークの物理（溶接学会溶接アーク物理研究委員会訳），溶接学会，(1990).
- 8) 平岡：混合ガスシールドアークプラズマの発光分光特性とその解析，溶接学会論文集，11 (1993), pp.68-74.
- 9) 平岡，塩飽，黄地：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), pp.641-648.
- 10) 平岡：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), pp.259-266.
- 11) 牛尾：プラズマ利用技術の基礎 (I), 溶接学会誌, 60 (1991), pp.182-187.
 - 12) M.I. Boulos, P. Fauchais and E. Pfender: Thermal Plasmas, Plenum Press, New York, (1994).
 - 13) 武田, 北村：熱プラズマの利用と局所熱平衡, までりあ, 33 (1994), pp.1142-1148.
 - 14) H.R. Griem: Plasma Spectroscopy, McGraw-Hill, New York, (1964).
 - 15) 田中：サハの式について, 溶接技術, 44 (1996), pp.122-123.
 - 16) 神沢：プラズマ伝熱, 信山社サイテック, (1992).
 - 17) W.L. Wiese, M.W. Smith and B.M. Glennon: Atomic Transition Probabilities, National Standard Reference Data Series, National Bureau of Standards (NBS), Washington, D.C., (1966).
 - 18) 安藤, 長谷川：溶接アーク現象 (増補版), 産報出版, (1973).
 - 19) J.S. Chang, R.M. Hobson, 市川, 金田：電離気体の原子・分子過程, 東京電機大学出版局, (1989).
 - 20) 田中：アークプラズマの基礎現象, 溶接学会誌, 73 (2004), pp.113-118.
 - 21) W.H. Giedt, L.N. Tallerico and P.W. Fuerschbach: GTA welding efficiency: calorimetric and temperature field measurements, Welding J., 68 (1989), pp.28s-32s.
 - 22) 平岡, 佐久間, ザイブ：混合ガスアークにおける熱輸送特性に関する実験的検討, 溶接学会論文集, 15 (1997), pp.459-466.
 - 23) 溶接学会溶接用語委員会編：溶接・接合用語集, 産報出版 (2004), 243.
 - 24) 日本溶接協会溶接棒部会編：マグ・ミグ溶接 Q&A, 産報出版 (1999), 32.
 - 25) 田中, 田代：溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察, 溶接学会論文集, 25 (2007), pp.336-342.
 - 26) 平岡, 岡田, 稲垣：TIG アークにおける He ガスのアーク特性に及ぼす影響, 溶接学会論文集, 3 (1985), pp.241-246.
 - 27) M. Tanaka, S. Tashiro, T. Kashima, J.J. Lowke and A.B. Murphy: A CO₂ Gas Shielded Gas Tungsten Arc and Its Application to Welding of Steel Sheets, Materials Sci. Forum, 539-543 (2007), 3926-3930.
 - 28) 平田, 廣瀬, 大垣, 浅井, 黄地：溶融池の対流現象のモデリング, 溶接学会論文集, 18 (2000), pp.540-548.
 - 29) 松縄：アーク溶接におけるマランゴニ効果, までりあ, 34 (1995), pp.412-419.
 - 30) A.M. Makara, et al: The effect of refining on the penetration of metal in arc welding, Avt. Svarka, No.9 (1977), pp.7-10.
 - 31) 黄地, 三宅, 田村, 井上, 西口：アーク溶接現象に及ぼす微量元素の影響, 溶接学会論文集, 8 (1990), pp.54-58.
 - 32) 田中：A-TIG 溶接におけるアーク現象, 溶接学会誌, 74 (2005), pp.113-119.