The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

J. Plasma Fusion Res. Vol.88, No.5 (2012) 276‐280

講座 アークプラズマによる接合プロセス

1．アーク溶接におけるプラズマの特性

田代真一，田中　学
大阪大学接合科学研究所

(原稿受付：2012年4月12日)

アーク溶接は高融点金属であるタングステンまたは溶接ワイヤを電極として用い，これと材料との間に発生するアーク放電を介してアークプラズマを生成し，これを熱源として母材を溶融接合するプロセスである．本講座ではアークプラズマによる接合プロセスと題して，アーク溶接におけるプラズマの熱源特性の制御のための基本となる，プラズマ特性や電極現象，ならびに材料に生じる溶融池の現象について解説するとともに，プラズマと電極及び溶融池間での熱的・力学的相互作用等についても述べる．

Keywords:
Joining, Welding, Arc plasma, Thermal plasma, Heat source, Transport property

1.1 はじめに

金属の接合法は，その機構によってリベットやボルト締めなどを使って部材をつなぐ「機械的締結」，のりや樹脂などによる「接着」，および材質的結合である「溶接」に大別される．溶接は金属同士を連続的に一体化する接合法であり，継手構造が簡単，材料の節減が可能で経済的，優れた機密性・水密性等の利点から，現在，接合技術の主流になっている．

アーク溶接はコストや汎用性の高さから最も広く用いられている溶接プロセスであり，非消耗電極を用いる Gas Tungsten Arc (GTA) 溶接と消耗電極を用いる Gas Metal Arc (GMA) 溶接に大別される．GTA 溶接は高融点金属であるタングステンを陰極として用い，陽極となる母材との間に発生するアーク放電を介してプラズマを生成し，これを熱源として母材を溶融接合するプロセスである．一方，GMA 溶接では，溶接ワイヤを陽極とし母材を陰極とする．アークプラズマにより溶接ワイヤは溶融し，ワイヤ端には溶滴が形成される．この溶滴が外力を受けてワイヤ端を離脱し，母材へと移行することにより溶接が行われるので，熱源となるプラズマの状態は，時間的・空間的に激しく変化することになる．この溶滴移行現象はアークプラズマの安定性を支配し，溶接品質にも強く影響を及ぼす．このため，アーク溶接プロセスの更なる高能率化および高品質化をめざし，アークプラズマの熱源特性の制御を目的とした研究が盛んに行われている．

本講座ではアークプラズマによる接合プロセスと題して，アーク溶接におけるプラズマの熱源特性の制御のための基本となる，プラズマ特性や電極現象，ならびに材料に生じる溶融池の現象について解説するとともに，プラズマと電極および溶融池間での熱的・力学的相互作用等についても述べる．以下に本講座の構成を述べる．

1回目ではアーク溶接におけるプラズマの特性について述べる．溶接施工時に溶接金属に窒素が混入した場合，ブローホールと呼ばれる気泡の発生や溶接金属の靭性低下といった問題が生じることから，アーク溶接では多くの場合，シールドガスと呼ばれるガスにより，大気からアークプラズマ及び溶融金属を遮へいしており，溶接金属の品質を確保する上で重要な役割を果たしている．これはプラズマの雰囲気ガスとなるため，アークプラズマの特性はこのシールドガスの物理的性質に強く依存することとなる．ここでは，アークプラズマの熱源特性を把握する上で不可欠な情報となるプラズマの温度分布の測定法について説明する．またこれに加えて，アークプラズマの熱源としての集中性等に強い影響を及ぼす熱的ピンチ効果[1]について触れるとともに，シールドガスの熱力学・輸送特性が熱源特性に及ぼす影響等についても述べる．

2回目ではこのアークプラズマへの金属蒸気混入がプラズマ特性に及ぼす影響に焦点を絞り解説をする．アーク溶接では溶融池や溶接ワイヤ端に形成される溶滴から多量の金属蒸気が発生し，これがアークプラズマ中に混入することによりプラズマの電気伝導率や放射強度等が大きく変化し，プラズマ温度の低下をもたらすこととなる．その結果，材料への入熱特性にも強い影響を及ぼすことが明らかとなり[2]，近年特に注目を集めている．まず，金属蒸気濃度の計測法について説明し，続いてアークプラズマ中での金属蒸気の輸送現象ならびに金属蒸気の混入により生じるプラズマの温度低下等について述べる．また，金属蒸気がアークプラズマから周囲空間へと輸送される際に，冷却に伴い形成されるヒューム（ナノ・マイクロメータサイズの微粒子）についても併せて紹介する．

Joining Process with Arc Plasma
1. Plasma Properties in Arc Welding
TASHIRO Shinichi and TANAKA Manabu
corresponding author's e-mail: tashiro@jwri.osaka-u.ac.jp

©2012 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research
NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

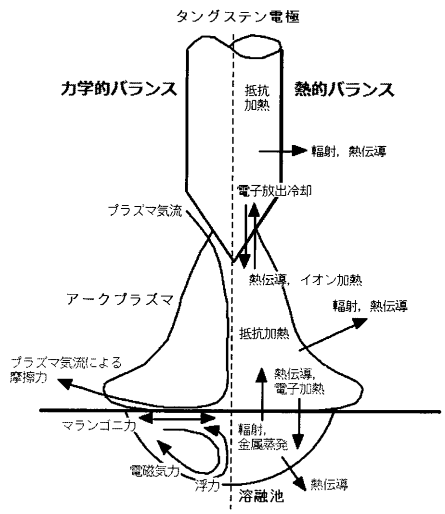

図1　GTA 溶接における力学的・熱的バランス．

3回目では電極および溶融池の現象ならびにこれらとアークプラズマとの相互作用について述べる．**図1**はGTA 溶接における力学的・熱的バランスの概要を示したものである．非消耗電極を用いるGTA溶接では，アークプラズマとの熱的バランスにより，電極の表面温度や実効仕事関数等が決まる[3]．これらは陰極点の熱電子放出特性に影響し，プラズマ中の電流密度の変化を通じて，プラズマの温度ならびに陰極先端近傍での電磁ピンチ力を駆動力としたプラズマ気流の速度に影響する．一方，消耗電極では特にワイヤ端の溶滴が離脱し材料へと移行する溶滴移行現象の安定性が重要となる．この溶滴の離脱は，プラズマ気流によるせん断力やアーク圧力等を介したアークプラズマとの力学的なバランスに影響を受け，シールドガスの物性や電流値等にも強く依存する．材料の溶け込み形状は，プラズマからの入熱に加え，溶融池対流による熱輸送現象に依存する．この溶融池対流の主な駆動力は，電磁力やマランゴニ力，プラズマ気流によるせん断力や浮力等であり[4]，中でも電磁力やせん断力（摩擦力）はプラズマの電流密度やプラズマ気流速により決まるため，要求される溶け込み形状を得るためにはプラズマ特性のコントロールが不可欠となる．近年では，以上のようなアークプラズマと電極および溶融池との相互作用についての数値シミュレーションによる研究が盛んに行われているため，これらも交えて紹介する．

1.2　アーク溶接におけるプラズマ温度分布測定

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け込み形状等を直接的に支配するため，アークプラズマの温度分布の把握がプロセスの最適化を図る上で重要な鍵となる．

アーク溶接プロセスでは，アークプラズマと電極や材料表面間の遷移領域等を除いたアーク柱の大部分において，プラズマは局所熱平衡近似が成立するものと考えられており，プラズマの温度分布等の測定や電磁流体モデルを用いた解析には，負荷軽減のため，多くの場合この近似が用いられている．局所熱平衡近似とは，プラズマ中のすべての反応速度が無限大と仮定でき，局所的に熱平衡が成立すると仮定するものである．この場合，電子温度，ガス温度などの温度がすべて等しいとすることができるほか，プラズマの輸送特性や熱力学特性，放射強度等は，温度と圧力のみの関数として扱うことができる．

アーク溶接でのプラズマ温度分布の測定にはFowler-Milne 法や二線相対強度比法，Boltzmann plot 法等が一般的に用いられている．ここではこれらの中から，局所熱平衡を仮定し，単一のスペクトルにより高温から低温領域まで比較的安定に温度測定が可能な測定法であるFowler-Milne 法について，アルゴンアークを例にとって説明する．

まず，**図2**に示す様にSahaの熱電離平衡式からプラズマの粒子組成を温度の関数として求める[5]．そして，アルゴン原子密度から線スペクトル放射強度（ArIを利用する場合には波長 696.5 nm 等）を温度の関数として算出する．**図3**は正規化した単位体積あたりの放射強度を温度の関数として示したものであるが，約 15,000 K に放射強度のピークが生じることがわかる．これは，約 15,000 K 以下では温度の上昇に伴い一原子あたりの線スペクトル放射強度が増加するが，これ以上の温度では電離が進行し原子の数密度が低下するため放射強度が減少し，結果として約 15,000 K で放射強度がピークとなる．そして，測定した放射強度分布を正規化し，最大値である1となるポイントを見つけ，そのポイントでの温度が 15,000 K であるという仮定のもと，**図3**の関係から温度を決定していくことができる．

例として，我々の研究グループで実施したアークプラズマの温度分布の測定結果を紹介する[6]．前述のように，

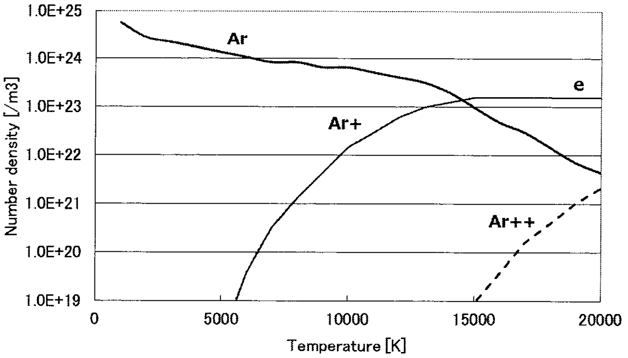

図2　アルゴンアークプラズマの粒子組成．

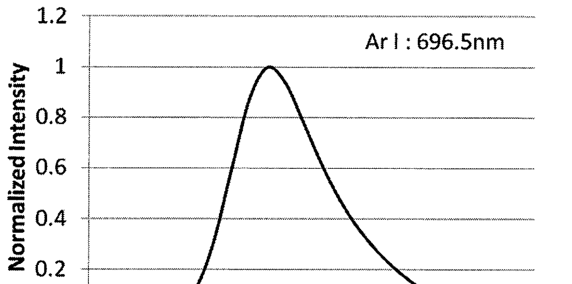

図3　アルゴン原子による放射強度の温度依存性．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

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プラズマへの混入によって，電気伝導度等の物性値が著しく変化する．これがアークの温度低下等を引き起こし，さらには母材への入熱を低下させると考えられている．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が不可欠となる．この影響の検討のため，アークの温度分布および金属蒸気の濃度分布の測定を行った．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光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ている．具体的には，アークからの放射光をスプリッターにより二つに分離して，それぞれを回折格子を用いて分光し，高速度ビデオカメラで撮影した．これらのうちの一つで原子の線スペクトルを測定し，Fowler-Milne法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した．**図4**にシールドガスとして純アルゴンを用いたGMA溶接における，プラズマ温度分布および金属蒸気濃度分布の一例を示す．ここでは簡便さから軸対称分布を仮定し，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放射強度に変換し，温度分布および濃度分布を算出している．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およ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．溶滴が溶接ワイヤ先端から離脱し母材へと移行していく過程において，特に溶接ワイヤの下部において金属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．これは溶滴からの金属蒸気の混入がプラズマ温度の低下を介して母材への入熱に強い影響を及ぼしていることを示唆している．

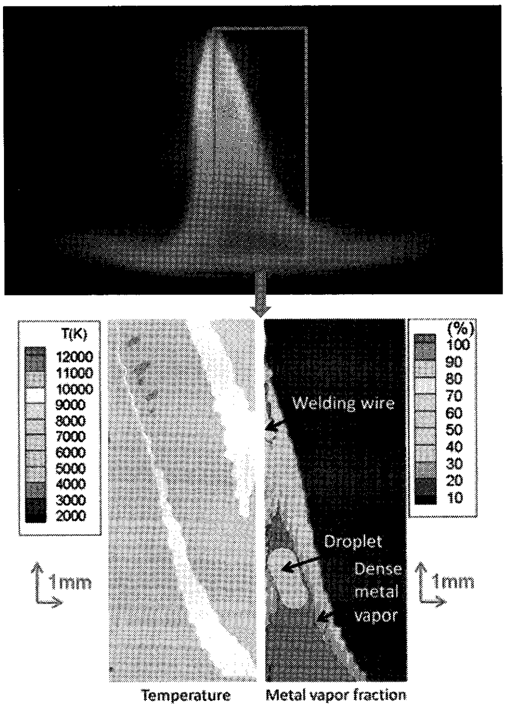

図4　GMA溶接における温度分布および金属蒸気濃度分布測定．

上記のように，多くの研究では簡便さから軸対称分布を仮定している．しかしながら，実際の生産現場における溶接は，様々な複雑な継手形状に対して行われるほか，高効率化をめざして複数の電極により溶接が適用される等，アークの形状が非軸対称分布となるものが数多く存在する．

そこで小西らは，医療用CT（Computed Tomography）スキャンの原理を応用し，GTAの三次元温度分布を測定している[7]．これは，アーク軸に対して垂直な面上を検出器が走査し，多方向からの積分放射光量を計測し，逆問題として求めたい放射強度分布を再構成する手法である．**図5**に，カスプ型磁場を用いることでアークを楕円形状化し，非軸対称となったアークの三次元温度分布の測定結果の一例を示す．楕円形状化によりアーク溶接の高能率化を実現している．ArI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．

これらの例に見られるように，近年の測定技術の進歩により，複雑な空間構造を持ち激しく時間変化するようなアークプラズマに対しても温度分布の評価が可能となりつつある．

1.3　シールドガスの熱力学・輸送特性がアークの熱源特性に及ぼす影響

溶接施工時に溶接金属に窒素が混入した場合，ブローホールと呼ばれる気泡の発生や溶接金属の靭性低下といった問題が生じることから，アーク溶接では多くの場合，シールドガスにより，大気からアークプラズマおよび溶融金属を遮へいしている．これはプラズマの雰囲気ガスとなるため，アークプラズマの熱源特性は使用するシールドガスの熱力学・輸送特性に強く依存することとなる．

アーク溶接において，施工能率の向上を実現するためには，シールドガス組成の最適化を通じて熱的ピンチ効果（アークが緊縮する効果）を発現させ，熱の集中性の高いアークを生成することが求められる．シールドガス種としては，主にアルゴン，ヘリウム，水素，二酸化炭素等が用い

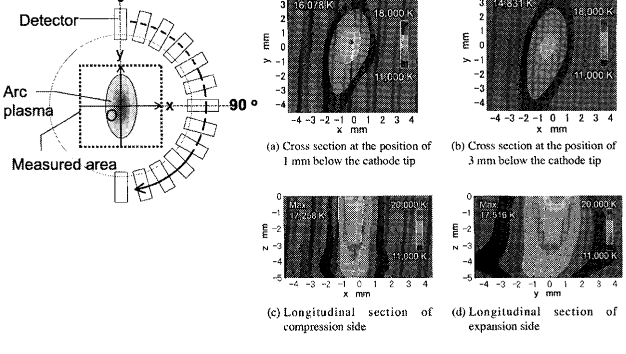

図5　カスプ型磁場による非軸対称GTAの3次元温度分布測定[7]．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

られている．ここでは，シールドガス組成の最適化のための指針を得るために，数値シミュレーションによる仮想実験を通じて，シールドガスの熱力学・輸送特性がアークの熱源特性に及ぼす影響について検討した結果を紹介する．

ここでは，熱力学・輸送特性の中で比熱，熱伝導率および電気伝導率が熱源特性に及ぼす影響を個別に検討するため，我々の研究グループによるガスタングステンアークの軸対称2次元定常数値解析モデルを利用して，比熱のみが高い空想のアルゴンガスと熱伝導率のみが高い，または電気伝導率のみ低い空想のアルゴンガスをシールドガスに使用した場合のアーク形態を仮想実験により観察してみた．用いた支配方程式，仮定，境界条件，繰り返し計算手法等の数値解析方法については，文献に詳しく説明されているため[4]，本講座では省略する．

図6は大気圧における各種ガスの(a)比熱と(b)熱伝導率，(c)電気伝導率の温度依存性を示したものであり，ともに文献値をもとに整理してまとめたものである[5]．ガスの熱力学・輸送特性にはガス分子の電離電圧が大きな影響を与えるが，それ以外にもガス分子の質量，ガス分子が多原子分子であるならば解離電圧，原子数や分子構造なども重要な因子になる．

アーク溶接の最も一般的なシールドガスであるアルゴンと比較すると，熱伝導率では，水素とヘリウムが大きいが，主として分子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ることに起因している．

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，炭酸ガス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る．比熱と熱伝導率を10,000 K程度までの温度範囲でみると，アルゴンに比べて，比熱では炭酸ガスの場合に最大で約10倍，熱伝導率では水素の場合に最大で約100倍になることがわかる．

ヘリウムの電気伝導率はアルゴンばかりでなく，他の多原子分子ガスの電気伝導率に比べても圧倒的に小さいことがわかる．この理由は，ヘリウムの電離電圧が24.48 eVであり，他の分子の電離電圧（例えばアルゴンでは15.76 eV）に比べて非常に大きく，ヘリウムが電離しにくいことに起因したものである．

図7は空想した(a)比熱と(b)熱伝導率を示したものである．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．熱伝導率はヘリウムのそれに等しくさせた．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8はそれぞれ(a)通常のアルゴンおよび(b)比熱のみが高い場合，(c)熱伝導率のみが高い場合，(d)電気伝導率のみが低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．通常のアルゴンアークでは，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陽極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．同じ位置での比熱が高い場合の

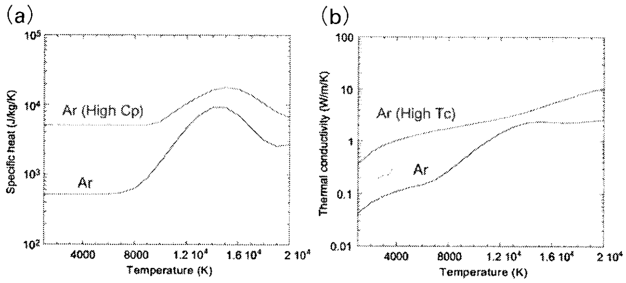

図7　仮想プラズマの熱力学・輸送特性.

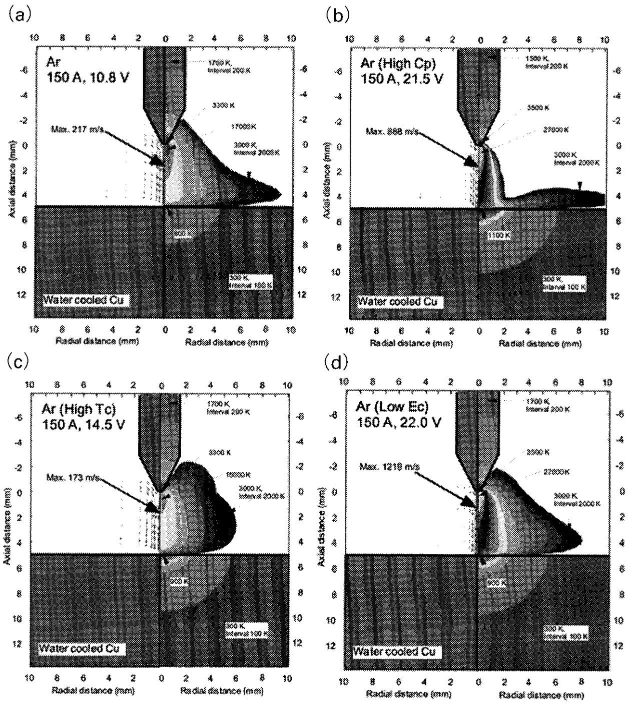

図8　仮想プラズマの温度・速度分布[1].

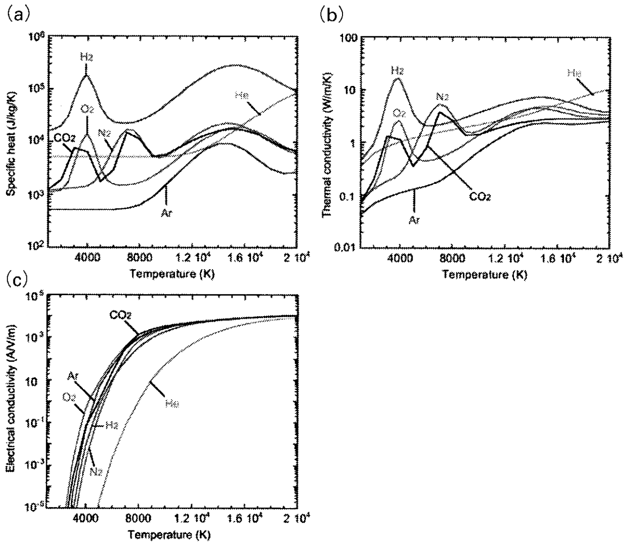

図6　各種プラズマの熱力学・輸送特性.

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

アーク柱径は約3.5 mmとアークが緊縮し，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．アークが拡がった分，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．

以上のように，数値計算シミュレーションによる仮想実験を通じた簡単な考察によると，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高温となるアークプラズマの中心付近に制限される．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，対流に伴う熱損失によるアークプラズマ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，と整理することができる．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をもたらす．このため，電極先端部の熱電子放出が可能な面積が増加することによりアークのルート部が拡大し，電極近傍での電流密度が低下することから電磁ピンチ効果が弱くなる．結果的にプラズマ気流の運動量が小さくなり，アーク圧力すなわちアークから母材への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．

続いて，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スに使用した場合のアーク形態を仮想実験した．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陽極近傍まで到達し，その最高温度が27,000 Kに達していることがわかる．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熱の集中性が高くなる．

図9はそれぞれ，現実の(a)ヘリウムおよび(b)炭酸ガスをシールドガスとして使用した場合のガスタングステンアークの数値計算結果である．

ヘリウムアークについては，電離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，ということができる．なお，ヘリウムアークの場合，アーク圧力が小さくなることが実験的によく知られている．

比熱の大きい炭酸ガスをシールドガスとして使用した場合，炭酸ガスはCO_2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6**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，通常のアルゴンアークに

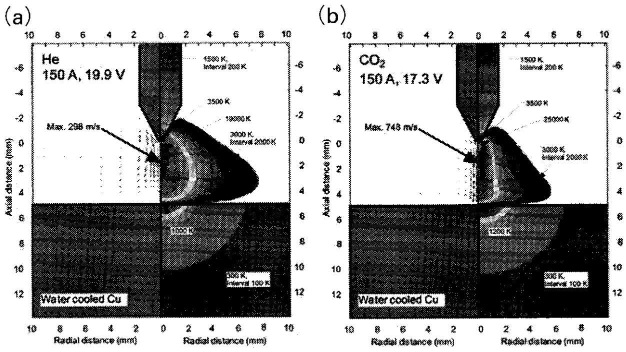

図9　ヘリウムおよび炭酸ガスプラズマの温度・速度分布．

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．しかしながら，この炭酸ガスアークは比熱のみが高い空想のシールドガスを使用したガスタングステン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6**に示す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．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．

さて，いわゆる熱伝導型の熱的ピンチ効果は，プラズマアークやプラズマジェットで観察されるように，ガスではなく固体の水冷ノズルによって器壁安定化された場合である．また，アークプラズマ中への金属蒸気の混入によって放射損失が増加するが，混入率によっては放射によるアークプラズマの熱損失が非常に大きくなり，アークが緊縮する場合のあることが同様の仮想実験により指摘されている[2]．これは放射型の熱的ピンチ効果として捉えることができる．

以上のように，数値シミュレーションによる仮想実験を通じて，シールドガスの熱力学・輸送特性のうち，特に比熱が大きい場合および電気伝導率が小さい場合，アークが熱的ピンチ効果により緊縮し，その熱の集中度が上昇することが確認された．2011年の本誌小特集[8]では，本知見に基づいて，混合ガス組成の設計を行った例について紹介しているので，そちらについても参考にしていただきたい．

参考文献

[1] 田中　学，田代真一：溶接学会論文集 **25**, 336 (2007).
[2] S. Tashiro *et al.*, Science and Technology of Welding and Joining. **12**, 208 (2007).
[3] M. Tanaka *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **38**, 29 (2005).
[4] M. Tanaka *et al.*, Plasma Chemistry and Plasma Processing **23**, 585 (2003)
[5] M.I. Boulos, P. Fauchais and E. Pfender, *Thermal Plasmas*, Vol. 1 (Plenum Press, New York, 1994).
[6] M. Tanaka *et al.*, 64th Annual Assembly of Int. Inst. Welding (IIW), (2011), IIW Doc. 212-1194-11.
[7] 小西貴也　他：溶接学会論文集 **29**, 274 (2011).
[8] 田中 学，田代真一：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 522 (2011).

NII-Electronic Library Service