



Title	混合ガス雰囲気におけるガスタングステンアークのプラズマ特性とその分光学的研究
Author(s)	平岡, 和雄
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129181
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

混合ガス雰囲気場におけるガスタングステンアークの
プラズマ特性とその分光学的研究

平成8年11月

平岡和雄

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 混合ガス雰囲気下におけるアーク現象の特徴	7
2.1 緒 言	7
2.2 混合ガス雰囲気下におけるアーク電圧特性の特徴	7
2.2.1 混合組成変化に伴うアーク電圧および電位傾度	8
2.2.2 アルゴン-ヘリウム混合ガス組成と電極近傍電位との関連	9
2.3 混合ガス雰囲気下におけるアーク圧力特性の特徴	11
2.3.1 アーク圧力の基本的な特性	11
2.3.2 アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気下におけるアーク圧力 特性の特徴	14
2.4 混合ガス雰囲気における熱輸送現象の特徴	16
2.4.1 アルゴン-ヘリウム混合ガスシールドアークにおける電極への 熱輸送特性	17
2.4.2 アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるエネルギー損失	20
2.5 混合ガス雰囲気における陽極溶融・蒸発現象の特徴	21
2.5.1 アルゴン-ヘリウム混合ガスシールドアークにおける入熱密度 分布特性	22
2.5.2 混合ガスシールドアークにおける陽極金属蒸発特性	23
2.6 結 言	25
第3章 発光分光法による混合ガスアークプラズマの温度評価と問題点	27
3.1 緒 言	27
3.2 発光分光計測方法	27
3.2.1 アーク発生装置	27
3.2.2 分光分析装置	28
3.2.3 アークプラズマの放射光量計測	28
3.3 種々の発光分光分析法における温度分布	30
3.3.1 Fowler-Milne 法による温度分布	32
3.3.2 異なる状態にある粒子からの相対強度比法 (Ar II /Ar I 二線 強度比法) による温度分布	34

3. 3. 3	同状態にある粒子からの相対強度比法（ボルツマン プロット法）による温度分布	36
3. 4	結 言	40
第4章	質量分析法による陽極母板面上のプラズマガス組成の評価	43
4. 1	緒 言	43
4. 2	実験方法	43
4. 2. 1	T I Gアーク発生装置	43
4. 2. 2	ガス分析装置	44
4. 2. 3	ガス組成の評価法	45
4. 3	混合ガスアークにおける水冷銅陽極板上のガス組成	46
4. 3. 1	アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるプラズマ ガス組成の特徴	46
4. 3. 2	プラズマガス組成に及ぼすアーク長の影響	50
4. 3. 3	窒素微量添加によるプラズマガス組成分布の変化	52
4. 4	結 言	53
第5章	混合ガスアークプラズマにおけるガス組成と温度の状態解析	
-	発光分光法による混合ガスアークプラズマの状態解析	55
5. 1	緒 言	55
5. 2	各種ガス混合雰囲気におけるアークプラズマの輝線スペクトル 強度分布特性	55
5. 2. 1	アルゴン-ヘリウム混合ガスアークのスペクトル強度分布の特徴	55
5. 2. 2	水素混合ガスアークにおけるスペクトル強度分布の特徴	57
5. 3	混合ガス雰囲気下におけるプラズマの状態解析	59
5. 3. 1	混合ガスアークプラズマの状態解析のための構成方程式	59
5. 3. 2	構成方程式の解法	60
5. 3. 3	アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気下における局所プラズマの 温度とガス組成	63
5. 3. 4	アルゴン-水素混合ガス雰囲気下における局所プラズマの 温度とガス組成	66
5. 4	アルゴン-水素混合ガスアークにおける広範囲プラズマ領域の状態解析	68
5. 5	結 言	72

第6章 混合ガスアークプラズマの電子密度分布と陽極形態	
- プラズマの状態とアーク現象との相関に関する検討	75
6.1 緒言	75
6.2 混合ガスアークにおける電子密度分布	75
6.2.1 電子密度の計測方法	75
6.2.2 アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおける電子密度分布と 放射エネルギー	77
6.2.3 アルゴン-水素混合ガスアークにおける電子密度分布	81
6.3 混合ガスアークにおける陽極面の電流密度分布	84
6.3.1 水冷銅陽極における電流密度分布と陽極近傍プラズマの状態	84
6.3.2 熔融陽極における電流密度分布と陽極近傍プラズマの状態	86
6.4 蒸発金属を含む多成分粒子混合アークプラズマ中の金属粒子の 分布状態	89
6.5 結言	92
第7章 総括	93
謝辞	97
参考文献	99
本論文に関する著者の発表論文	103

第1章 緒論

アークは、古くから現在に至るまで溶接熱源として広く利用され、多くの研究者によって、アーク溶接プロセスにおける現象解析や制御技術に関する研究がなされてきた。これらの成果は、溶接アーク現象として、1962年に安藤、長谷川¹⁾、1983年には Lancaster²⁾によって集約されている。溶接アーク現象は、一般にアークプラズマ現象、溶滴移行現象、溶融池現象に大別して議論されるが、これらの現象のうちでは、溶滴移行現象と溶融池現象に関する研究が大半を占めており、アークプラズマ現象に関する研究は少ない。また、アークプラズマ現象に関する研究においても、その大半がアルゴンガスシールドアークを対象としている。

最近では、単一ガス雰囲気のみならず種々の混合ガス雰囲気下でのガスタングステンアーク (gas tungsten arc, GTA) やガスマタルアーク (gas metal arc, GMA) 溶接の利用が急増してきた。溶滴移行現象や溶融池現象およびアークプラズマ現象は、混合ガスの種類やそれらのガス組成によって大きく変化する。しかしながら、アークプラズマの現象解析が容易でないため、どのようなガスの組み合わせによってプラズマがどのように変化し、諸現象とどのように係わっているのか等の問題の解決は充分になされていない。

混合ガス雰囲気でのアークの特徴やその利用について具体的に述べると、アーク外観において、アルゴンガスアーク (ガスシールドアークをガスアークと略す) が、白緑色の釣り鐘状の形状を示すのに対し、アルゴン-水素混合ガスアークやアルゴン-ヘリウム混合ガスアークは赤色や淡赤色であり、またアルゴンガスアークの形状と比較すると、アーク柱全体が緊縮した形状に観察される。この観察結果は、通常熱的ピンチ効果 (thermal pinch effect)¹⁾ によるとされており、以下のように考察されている。アルゴンガスアークに熱伝導度や拡散係数の大きいヘリウム、水素ガスを混合した場合にアーク柱からの熱エネルギー損失が増加する。そこでこのエネルギー損失を最小限にするために、アーク柱が緊縮する。この結果アーク柱の電流密度が増加し、アークプラズマの温度も上昇すると考察されている。

アークが緊縮して集中的な熱源に観察されることから実溶接時において、ヘリウムガスアークあるいはアルゴン-ヘリウム混合ガスアークは、熱伝導度の大きいアルミニウム、銅などの溶接に適用される。また、アルゴン-水素混合ガスアークは、ステンレス鋼板などで深溶け込みを得るためにしばしば利用されている。

逆に、雰囲気の擾乱等により大気中の窒素をアーク中に僅かに巻き込んだアルゴン-窒素混合雰囲気下では、溶接部にブローホールと呼ばれる溶接欠陥が発生する^{3) 4)}。

以上のような現象において、異種ガスの混合がなぜアークプラズマ現象および溶融現象に大きく影響を及ぼすのか、また異種ガス混合によってアークプラズマの状態がどのように変化するのか等の基礎的、定量的な現象説明は未だなされていない。

また、アルゴンガスアークに水素を混合した場合に溶融金属の蒸発速度が急増する現象を利用した超微粒子の製造⁵⁾ や、アルゴン-水素-メタン混合ガス雰囲気でのダイヤモンド合成⁶⁾

等の材料創製プロセスなど溶接以外のより広い分野で、混合ガスアークプラズマが適用されている。そして、今後とも種々の元素を混合した雰囲気における反応・合成の場としてアークプラズマの利用が進むと考えられ、混合ガス雰囲気でのアーク現象の解明とともに、プラズマの状態モニタリング技術の開発が重要かつ急務となりつつある。

一方、混合ガス雰囲気でのアーク放電プラズマの物理現象の研究としては、1960年代に混合ガスアークの外炎部を対象とした Maccker や Frie^{7) 8)}の研究や、混合ガス雰囲気の詳細長いガラス管中に発生されたアーク放電プラズマ（カスケードアークと呼ばれる）を対象にした Richter⁹⁾等の研究がある。特殊なアークではあるが、彼らは、雰囲気中のガス組成とプラズマ中のガス組成が異なることを報告している。

プラズマ中でガス組成が変化する原因として、分子粒子の解離や反応にともなう拡散過程あるいは両極性拡散に関連した mass separation と呼ばれる現象^{8)・10)}が提案されているし、また、Chapman, Cowling の混合ガス雰囲気中の輸送現象理論¹¹⁾からも、ガス組成が不均一になることが予測されている。すなわちこの輸送現象論においては、通常の濃度拡散以外に温度勾配に支配される熱分離拡散や圧力勾配に支配される圧力拡散等があり、これらは、組成の均一化を妨げる結果を生じさせる。

溶接アークにおいては、急激な温度勾配や圧力勾配が生じており、ガス組成を不均一化する要因が存在する。このようなことを認識して混合ガス雰囲気場におけるアーク現象を検討する必要がある。しかし、溶接アークの研究では、ほとんどガス組成の不均一性については無視され、アークプラズマ中のガス組成は均一であるという前提のもとにアーク現象の考察やプラズマ状態解析がなされている。

数少ない一例として、混合雰囲気下での溶接アークプラズマの特性を研究した最近のものに、Key ら¹²⁾によるプラズマの温度計測があるが、発光分光分析法により評価した彼らの温度分布の結果は、アーク中心部が必ずしも最高温度とならないなど理解し難いものである。

このような背景のもとに、本研究においては、まず雰囲気ガス中に異種ガスを混合した場合に、溶接アーク現象がどのように変化するか、またこのときアークの陰極、プラズマ柱あるいは陽極領域のどの領域に異種ガス混合の影響が強く現れるのかを明らかにする。これら雰囲気ガス組成によるプラズマの状態変化を計測するために、分光分析を行い、このときに生じる種々の問題点を明確にする。次いで、これら問題点を解決するために、混合ガス雰囲気下におけるプラズマ中のガス組成に注目しながら新たに種々の定量的プラズマ状態計測、解析手法を開発する。この解析手法により、プラズマの温度や各ガス粒子および電子の分布状態を明らかにし、これらの結果がアーク現象とどのように関わっているのかを考察する。

本論文は、混合ガスアークプラズマの状態特性を明らかにすることと、このためのプラズマ状態計測技術を確立することを主たる目的とした研究であり、以下に述べる7つの章から構成されている。研究の流れの概略を、Fig. 1. 1 に示す。

第1章は、緒論であり、本研究を行う背景と必要性並びに本研究遂行のための方針を述べた。

第2章は、アルゴンガスアークへのヘリウム混合にともなうアーク諸現象の変化の特徴を明らかにすることを目的として検討した。まず最も基本的なアルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるアーク電圧特性を調べ、混合されたヘリウムが、陰極近傍領域の電位に強く影響を及ぼし、アーク柱や陽極領域にはほとんど影響を及ぼさないことを明らかにした。

この結果をもとに、陰極近傍の現象に依存するプラズマ気流特性をアーク圧力の計測によって検討し、ヘリウム混合によりアーク圧力が急激に低下することを明らかにし、陰極近傍プラズマの状態解明の必要性を指摘している。

次いで、熱輸送特性について検討し、ヘリウムの混合によって陽極への熱伝導・熱伝達等によるエネルギー輸送が増大すると同時に、アーク柱からの放射エネルギー損失が減少するため、陽極への熱輸送効率（熱効率）が高くなることを明らかにし、アークプラズマ柱の状態解明の必要性を指摘している。

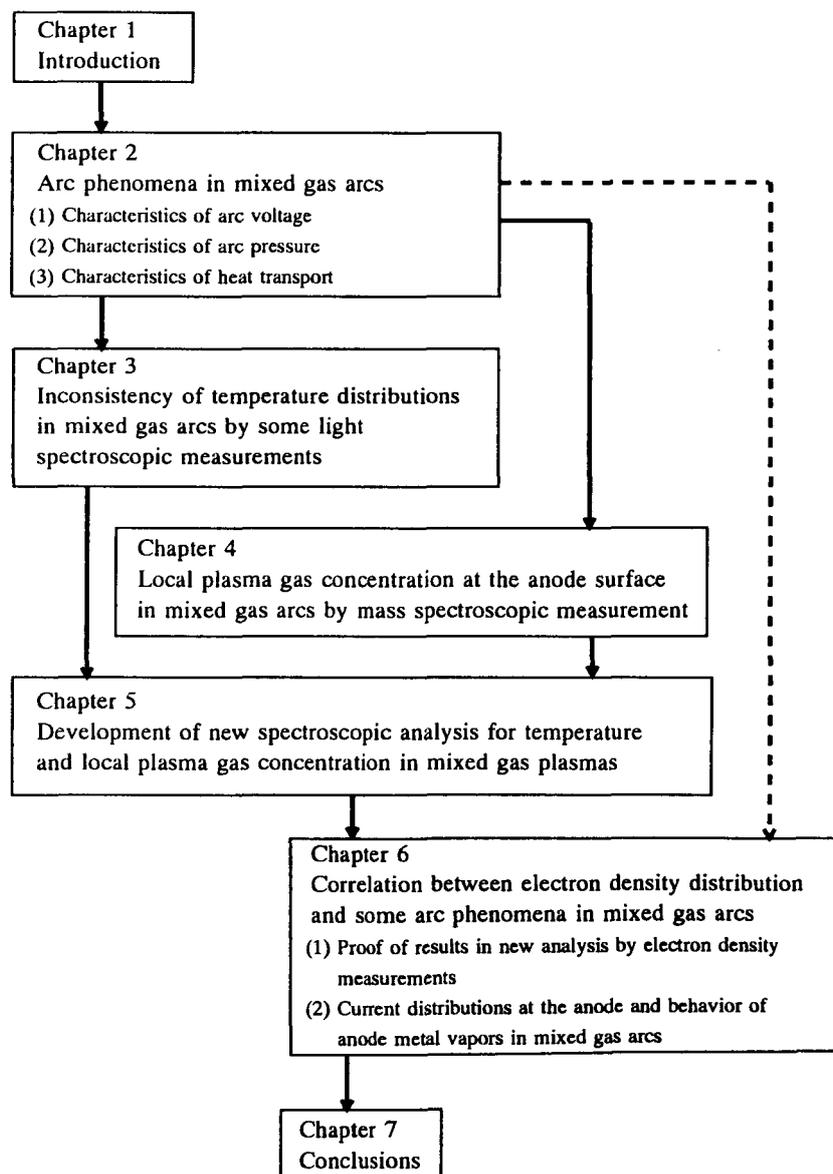


Fig. 1. 1 Flow chart of the thesis

さらに、陽極現象を取り上げ、ガス組成による局部溶融・蒸発特性を検討し、ガス組成と熱源の集中性との相互関連を明らかにし、陽極近傍プラズマの状態解明の必要性を指摘している。

前章でのアーク諸特性に及ぼす雰囲気ガス組成の影響を解明するためにはプラズマの状態解析が必要である。したがって、第3章では、アークプラズマの状態計測法としてアークに擾乱を与えない発光分光分析法を採用してプラズマ診断を行った。しかし、従来までに報告された種々の発光分光分析法によるプラズマの温度分布の計測結果には、多くの問題点が指摘されている²⁾。このため、種々の発光分光分析法によるアークプラズマの温度分布の計測結果の問題点がどこにあるのかを調べ、混合ガス雰囲気下のプラズマの状態解析への分光分析法の適用の可否を検討した。

アルゴンガスアークの場合において、種々の発光分光法によるプラズマの温度分布での従来の問題点を解決し、同時に計測温度に対しての種々の発光分光法の特性を明らかにした。しかし、これら分光分析法での計測結果の特性を踏まえた上でも、混合ガス雰囲気下でのプラズマの計測温度は、分光分析法によってそれぞれ異なり、多くの問題点が存在することを明らかにした。すなわち、混合ガスアークの放射特性には、未解明な現象が残されていることを示した。

第4章では、前章の混合ガス雰囲気下のアークプラズマの分光分析における問題点から、プラズマ中のガス組成に着目し、このガス組成を明らかにする目的で、陽極面上のプラズマガスを直接採取してその場ガス分析する手法を開発した。

アルゴン-ヘリウム混合ガスアークを主たる対象として検討し、アークが発生した状態において、ヘリウムが陽極面上のアーク中心軸部で濃縮することを明らかにした。このことから、陰極領域やプラズマ柱領域においても不均一なガス組成分布になっていると推察した。

第5章では、第4章の結果を踏まえて、プラズマ中のガス組成は不均一であるとし、局所熱平衡を仮定して混合ガス雰囲気におけるプラズマの組成、温度場を未知数とするプラズマ状態の分光分析法を開発した。すなわち、第3章での温度分布の評価において多くの問題を生じた分光計測データのうちの2つの輝線スペクトルの強度（アルゴン原子スペクトル強度とアルゴン電離スペクトル強度、またはアルゴン原子スペクトル強度と水素原子スペクトル強度）の相関関係を利用して、ガス組成と温度を決定する二線強度相関分光分析法を提案した。

この手法により陰極近傍のプラズマの状態評価を行い、アルゴンガスシールドアークに水素やヘリウムを混合した場合に、水素、ヘリウムともアークの陰極近傍で濃縮することを明らかにし、同時にこれによって、第3章における問題点を解決した。

第6章では、局所熱平衡を仮定しない電子密度計測によって、ガス組成が不均一な状態にあるアルゴン-ヘリウム、アルゴン-水素混合ガスアークプラズマの電離特性を検討すると同時に、陽極板上の電位分布計測から陽極面の電流密度分布を推定し、第2章でのアーク特性および第5章で得られたプラズマ状態（ガス組成、温度）との相関を明らかにした。また、以上の検討結果から、アルゴンガスアークにヘリウムや水素ガスを混合した場合に、従来アーク現象において考察されていたような熱的ピンチ効果が生じていないことを明らかにした。同時に、局所熱平衡を仮定した二線強度相関法の有効性を示した。

さらに、陽極金属からの蒸発粒子が混合する多成分粒子混合雰囲気におけるプラズマ状態解析を行い、蒸発金属粒子の分布を明らかにし、蒸発金属粒子は容易にプラズマ中に混合されないことを明らかにした。

第7章は、総括であり、本研究によって得られた新しい知見を総括している。

第2章 混合ガス雰囲気下におけるアーク現象の特徴

2.1 緒言

GTAにおいてシールドガス種が、アーク現象に影響を及ぼすことは知られているが、一般的にアルゴンガスがシールドガスとして利用されるため、その他のガスを用いた場合のアーク現象は、アルゴンガスアークほど詳細には検討されていない。アーク電圧におけるアルゴンガスアークとの相異^{13) 14) 15) 16)}やアーク外観上での色やアーク径の相異、あるいは陽極材料の溶融特性の相異¹⁷⁾などについて若干検討されているにすぎない。

そこで本章では、静止 GTAにおいて、異種ガス混合にともなうアーク現象の変化の特徴について検討する。具体的には、まず、アークの諸特性のうち、最も基本的なアーク電圧特性を解析し、この結果を踏まえながら、次いで陰極領域の状態と強い相関を持つアーク圧力特性、および陽極への熱輸送特性ならびに陽極での入熱密度分布特性を取り上げ、シールドガス中への異種ガスの混合が、これら諸特性に対してどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

なお、本章では、電離電圧が最も高いヘリウムガスと比較的電離電圧の低いアルゴンガスとの不活性ガス混合雰囲気下のアーク現象を主たる対象として検討した。

2.2 混合ガス雰囲気下におけるアーク電圧特性の特徴

アルゴンガスアークを基準とし、これにヘリウムガスを混合した場合のアーク電圧の特性変化を検討する。本実験に使用した装置の概略図をFig. 2.1に示した。陰極には、3.2mmφの2%トリヤ入りタングステン電極を、陽極には板厚1.5mmの水冷銅板を使用した。シールドガスには、熱線式マスフローメータにてアルゴン、ヘリウムそれぞれの流量を設定した後、ガス混合器（パイプミキサー）にて十分に混合したものを用いた。また、シールドガスの混合ガス組成は、これらのガス流量比で表示した。アーク長は、電極-母板間距離とし、ダイヤルゲージを用いて所定のアーク長に設定した。アーク電圧は、デジタルマルチメータ及びペン書き記録計を用いてトーチコレット部と水冷銅板間で計測し、アーク放電条件を変化するときには、電圧が十分に安定した後に計測した。

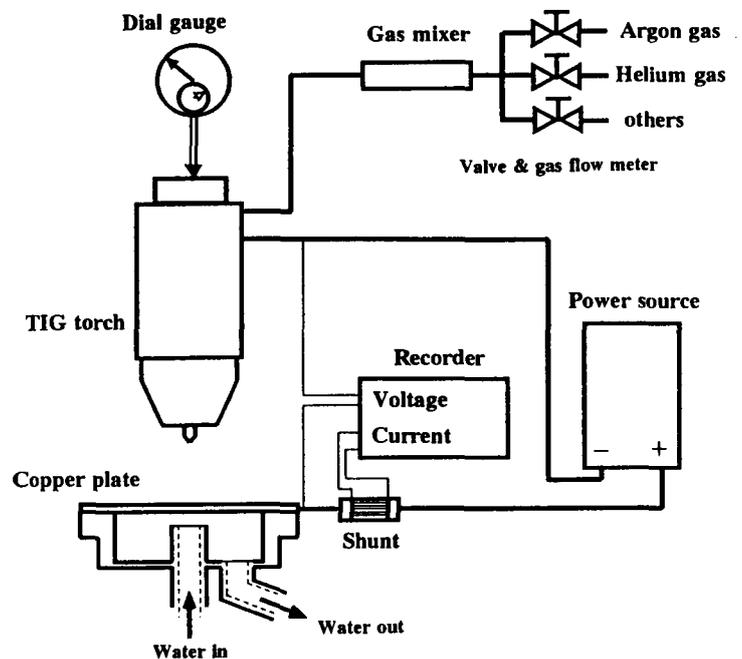


Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental system

2. 2. 1 混合組成変化に伴うアーク電圧および電位傾度

Fig. 2. 2 は、アーク電流 200A、アーク長 5mm、電極先端角 45° の条件で、純アルゴンから純ヘリウム雰囲気までガス組成を変化した場合のアーク電圧の計測結果である。アルゴンガスアークへのヘリウムの混合にともないアーク電圧は増大し、純ヘリウム雰囲気に近づくとき急増する。この電圧特性は、すでに計測されている結果¹⁵⁾と同様で、ヘリウムの混合におけるアーク電圧の増加の理由は、ヘリウムがアルゴンに比較して、電離電圧が高いことおよび拡散速度が大きいいためアークからの損失エネルギーが大きくなり、これを補うために、より多くの供給エネルギーが必要になるためと考えられている¹⁾。

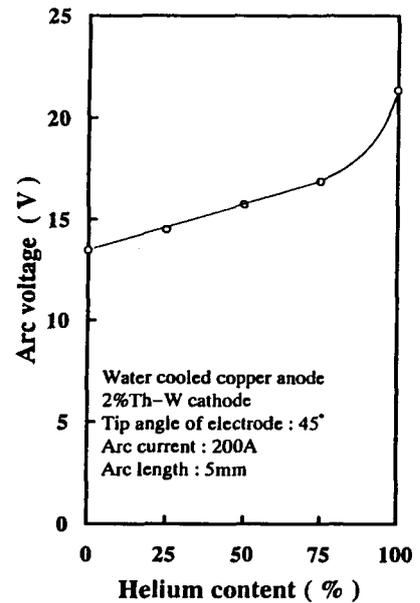


Fig. 2. 2 Effect of helium content on arc voltage in Ar-He mixed gas arcs

Fig. 2. 3 は、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおいて、アーク長を変化した場合のアーク電圧の計測結果である^{*1)}。100%Ar、75%Ar-25%He、50%Ar-50%He 及び 25%Ar-75%He 組成でのアーク電圧を各アーク長において比較すると、いずれのアーク長においてもヘリウム濃度の増加によってほぼ一様に増大する。

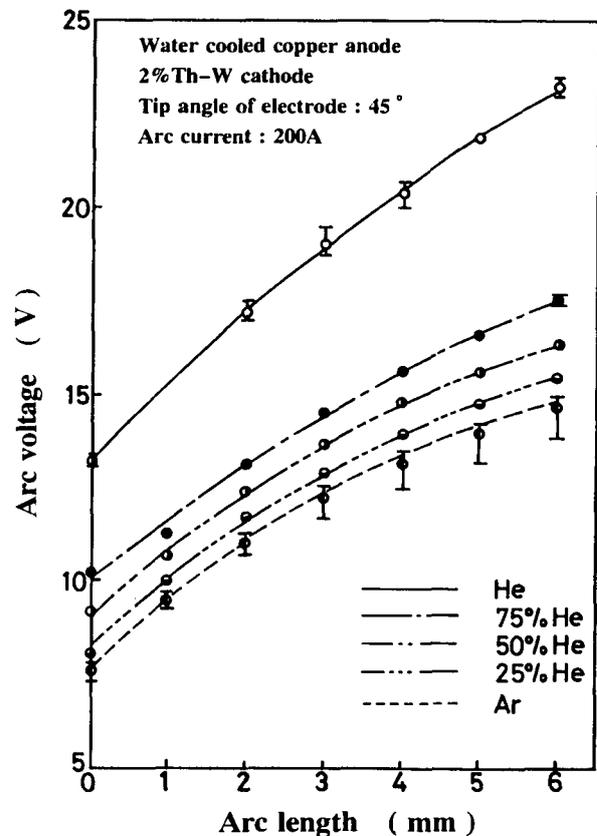


Fig. 2. 3 Effect of arc length on arc voltage in Ar-He mixed gas arcs

Fig. 2. 3 から、アーク長変化に対するアーク電圧の変化をアーク柱電位傾度として算出したのが Fig. 2. 4 である。この図には、アーク長 2mm の位置におけるアーク電圧の勾配から求めた各ガス組成での電位傾度を示した。電位傾度は、ヘリウム濃度が 75% までほとんど一定で、アルゴンガスアークの電位傾度を維持し、純ヘリウム組成に近づくときに急増する。

アルゴンガスアークにヘリウムを混合してもアーク柱電位傾度がほぼ一定であることから、Fig. 2. 2 におけるヘリウムの混合にともなうアーク電圧の増加は、電極（陰極およ

*1) アーク長 0mm におけるアーク電圧は、水冷銅陽極とタングステン陰極を瞬時に短絡させる時に得られる電圧変化の短絡直前の電圧である。

び陽極) 近傍域の電位の増大によることがわかる。

2. 2. 2 アルゴン-ヘリウム混合ガス組成と電極近傍電位との関連

アルゴンガスアークへのヘリウムの混入が陰極、陽極のどちらの電極領域のプラズマ電位に影響を及ぼしているかを明確にするため、ヘリウム混合にともなう陽極近傍の電位変化をラングミュア探針法により計測した¹⁸⁾。

Fig. 2. 5 は、ラングミュアプローブの寸法・形状と探針法の実験概略図である。このとき陽極面から1.5mm陰極側の平行な面上で、アーク中心軸をかすめて1.3m/sの速度で掃引するように、プローブ先端を設置した。

なお、探針用電源電圧を種々に設定して、プローブを掃引したときのプローブ電圧およびプローブ電流を、サンプリング時間143 μ sでコンピュータに記録した。

Fig. 2. 6 には、アーク電流100A、アーク長10mmのアルゴンガスアークプラズマの中心軸上におけるプローブと陽極との電位差並びに陰極との電位差を計測した結果を示した。陽極面上1.5mmのアーク中心軸でのプラズマ電位は、陽極に対して約-4V、陰極に対しては約9Vと計測できた。因みにこの

ときのアーク電圧は13.4Vであったことから、電位計測結果に大きな誤差がないと判断できた。

Fig. 2. 7 は、各アルゴン-ヘリウム混合ガス組成における陽極面上1.5mm位置での陽極に対するプローブ電圧とプローブ電流の関係を計測した結果である。ヘリウムガスアーク以外の結果では、プローブ電圧 -

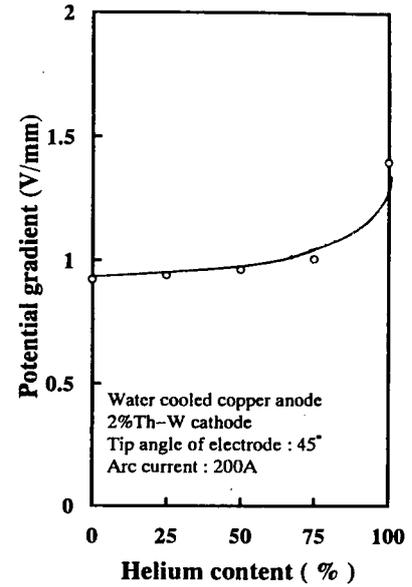


Fig. 2. 4 Effect of helium content on potential gradient in Ar-He mixed gas arcs

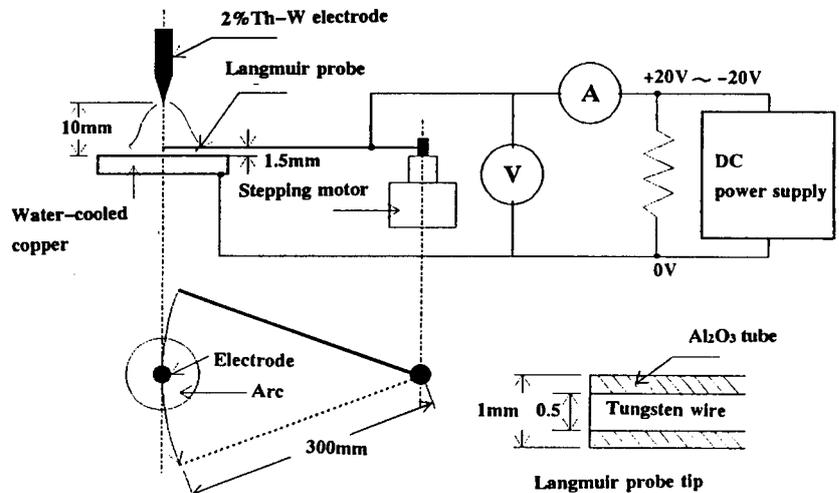


Fig. 2. 5 Setup for Langmuir probe measurement

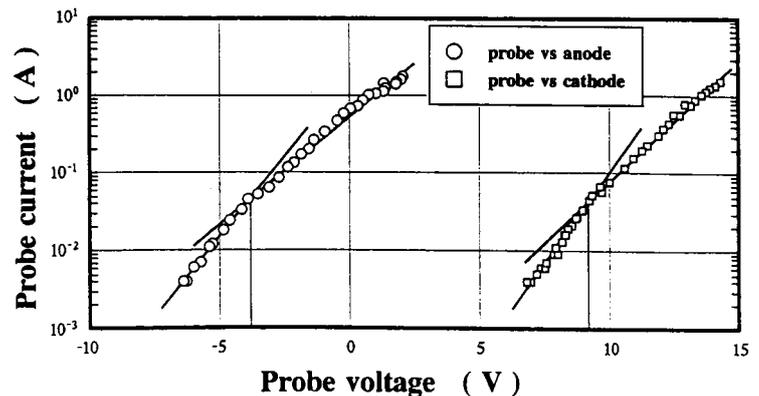


Fig. 2. 6 Determination of plasma potential with regard to anode and cathode in 100%Ar arc

プローブ電流の関係は、ほぼ同一である。この図から陽極に対するプローブ位置のプラズマ電位を評価した結果がFig. 2. 8である。アルゴンガスアークに75%までヘリウムを混合しても、陽極近傍の電位にはほとんど影響を及ぼさず一定値で、ヘリウムガスアークで急増することがわかる。Fig. 2. 9に、これらの結果とアーク電圧特性の結果をまとめた。陽極近傍の局部電位 V_A (図中の○印)とは、プローブ位置から陽極までアーク長が変化した場合のアーク電圧差 ($= V_{l=10} - V_{l=8.5}$)を、Fig. 2. 8の結果から差し引いたものである。陰極近傍の局部電位 V_C (図中の●印)とは、アーク長 0mm へ外挿した場合のアーク電圧 $V_{l=0}$ (図中の△印)から陽極近傍の局部電位 V_A を差し引いたものである。アルゴンガスアークへヘリウムを混合するにともなって、アーク電圧 $V_{l=0}$ は上昇する。このとき、陽極近傍の電位 V_A は、ヘリウムを混合してもほぼ一定で、100%ヘリウム組成で急増している。これに対して、陰極近傍での電位 V_C は、ヘリウムの混合にともない増大し、75%以上のヘリウム濃度ではほぼ飽和する傾向にある。すなわち、アルゴンガスアーク中へヘリウムを

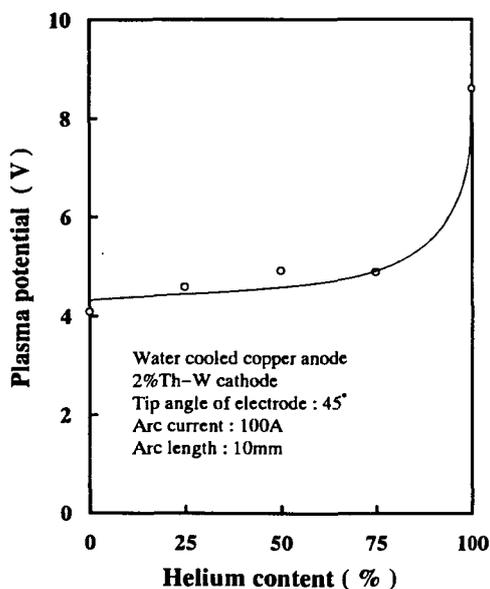


Fig. 2. 8 Effect of helium content on plasma potential with regard to anode for probe at 1.5mm from anode

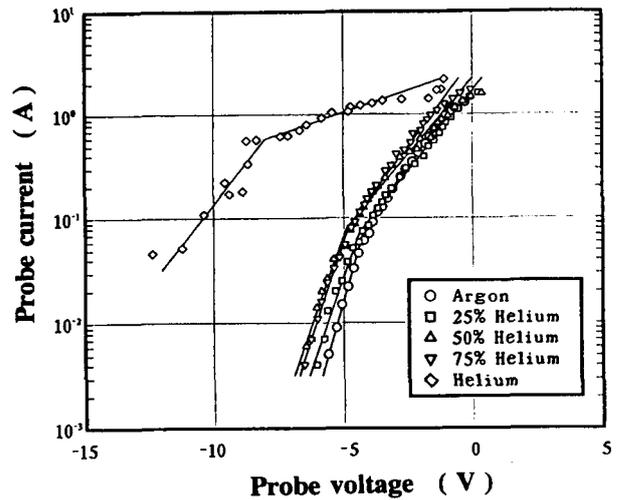


Fig. 2. 7 Probe current vs. probe voltage in Langmuir probe measurement (Arc current: 100A)

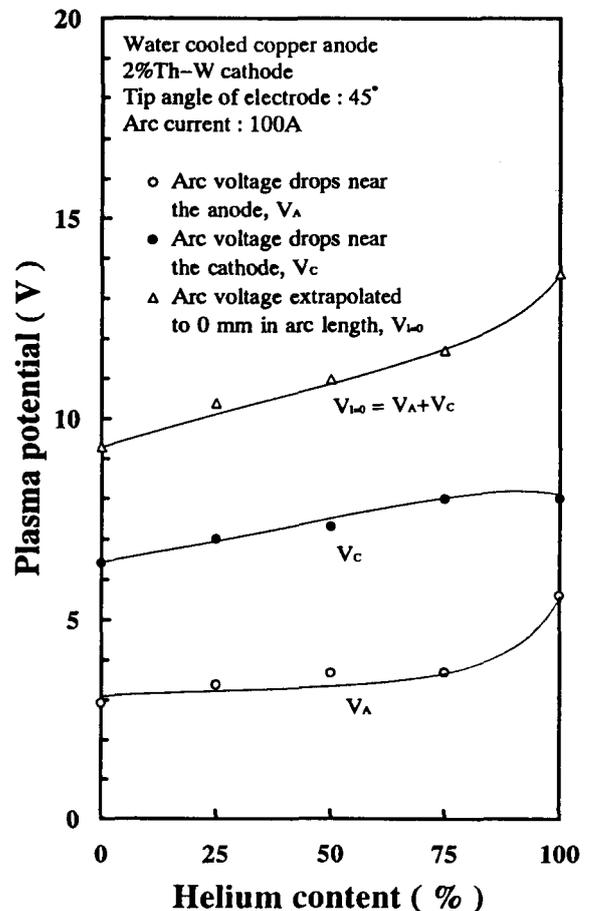


Fig. 2. 9 Arc voltage extrapolated to 0 mm in arc length and voltage drops near anode and cathode

混合していく場合に、ヘリウムガスの影響は、陰極領域のプラズマ電位にのみ現れる。そして、100%ヘリウム組成に近づいた場合にのみ、陽極近傍でのプラズマ電位が急増する。

2. 3 混合ガス雰囲気下におけるアーク圧力特性の特徴

アルゴンガスアークへヘリウムを混合するとき、陰極近傍電位にヘリウム混合の影響が現れることから、陰極近傍の状態が反映されるアーク現象を取り上げて検討する。このような現象として、Maecker¹⁹⁾が電極先端での電流密度が主因子となることを示したプラズマ気流があげられる。そこで、このプラズマ気流を母板陽極上の淀み点でアーク圧力として計測し、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるアーク圧力特性を検討する。

2. 3. 1 アーク圧力の基本的な特性

本項では、まず、陰極形状の変化によってアーク圧力がどのくらい影響を受けるかをアルゴンガスアークにて基本的に検討する。

アーク圧力は、Fig. 2. 10に示す水冷銅陽極中央に開けた1mm径の圧力測定孔を通じて、マンノメータで測定した。その圧力は、水柱高さで計測した。なお、アーク中心のアーク圧力を最大アーク圧力として表示した。

Fig. 2. 11は、タングステン電極径3.2mmφ、先端角45°、アーク長5mmで、陽極での電流分布を強制的に変化させたときのアーク圧力の相違を調べた結果である。図中に示す通常

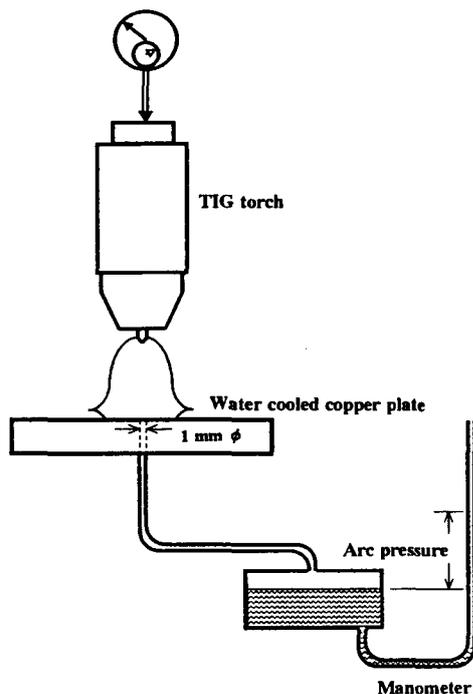


Fig. 2. 10 Schematic diagram for arc pressure measurement

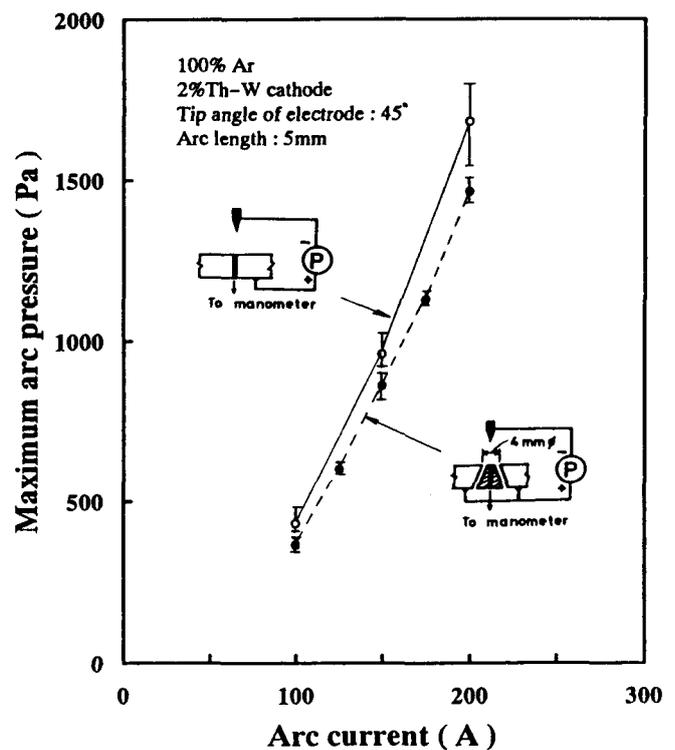


Fig. 2. 11 Relationship between maximum arc pressure and current distribution at the anode

の水冷銅板陽極と、図中に示した4mm径のアーク中心域内に絶縁材を挿入し、アーク電流がその周辺部の水冷銅板にのみ流れるように細工した陽極とで比較した。結果は、いずれの陽極の場合でも最大アーク圧力に大きな差はなく、陽極の電流分布がアーク圧力の重要な影響因子ではないことを示している。

次に、Fig. 2. 12は、陰極電極の先端角度を種々に変化させた場合の最大アーク圧力を示したものである。先端角45°近傍で最大アーク圧力は極大となる。また図中には電極先端を1mmφに切頭化した場合のアーク圧力を破線で示した。電極先端部の切頭化によりアーク圧力は低下し、とくに先端角45°前後でアーク圧力の低下が著しい。この結果として電極先端角の影響がほとんどなくなる。このようにアーク圧力は電極先端局部の形状に極めて敏感であることがわかる。

この結果に関しては、Macckerが示したプラズマ気流の発生機構から、陰極での電流密度がアーク圧力の主因子となるはずであり、先端角45°の場合に、陰極での電流密度が最も高くなったと考えられる。

Fig. 2. 13は、図中に示すアーク消弧後の電極先端部の変色領域の寸法を測定した結果である。一様な変色域は特定温度以上に上昇した領域と考えられる。また、この変色領域では熱電子放出が盛んであったと考えられる。この変色領域の面積は、先端角45°のとき最小となることから、陰極面での電流密度が先端角45°で最大になったと推察され、この結果は、アーク圧力の計測結果ともよい対応を示している。また、電極先端角によるこの特徴的なアーク圧力特性が1mmφに切頭化することによってなくなることは、逆に1mmφまでの円錐状電極先端の電流密度分布がアーク圧力に強く影響することを示唆している。

次に、ヘリウムガスアークにおけるアーク圧力特性について検討したのが Fig. 2. 14で

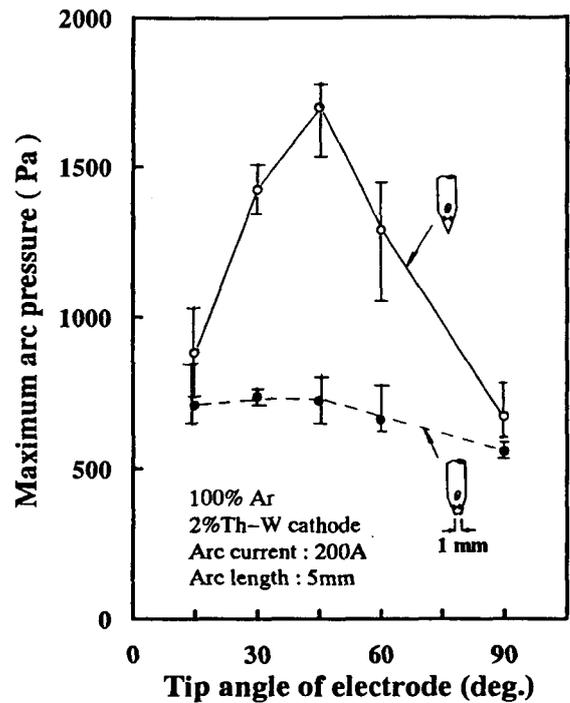


Fig. 2.12 Effect of electrode tip geometry on maximum arc pressure in Ar arcs

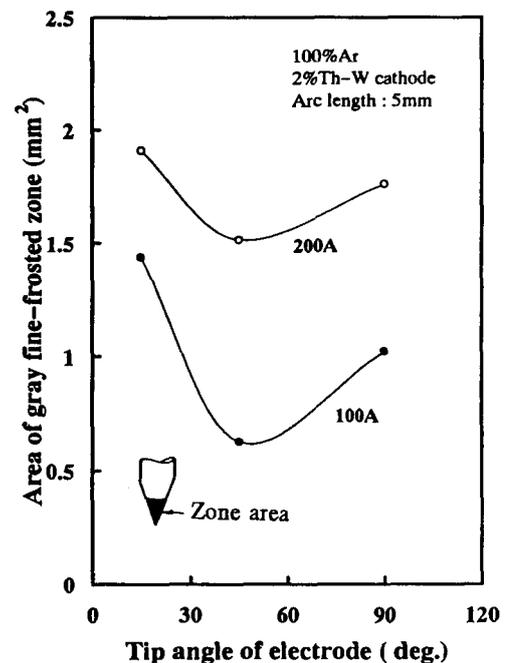


Fig. 2.13 Change of area of gray fine-frosted zone at electrode tip

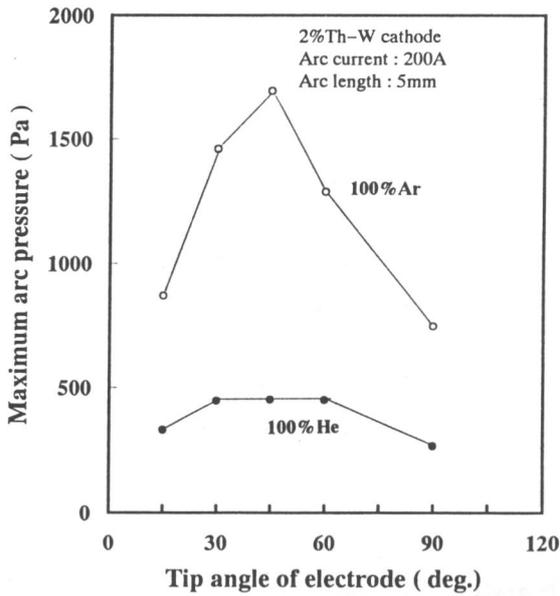


Fig. 2. 14 Effect of shielding gas on maximum arc pressure in Ar (○) and He (●) arcs

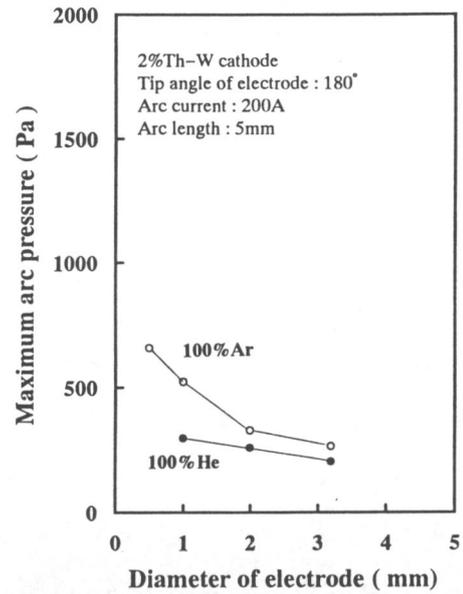
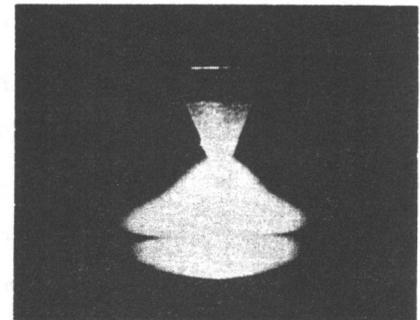


Fig. 2. 15 Effect of diameter of electrode with flat end on maximum arc pressure in Ar (○) and He (●) arcs

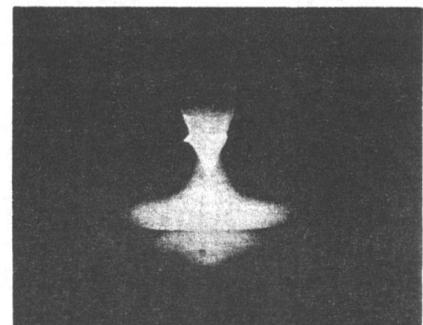
ある。アルゴンガスアークでのアーク圧力に対して、ヘリウムガスアークでのアーク圧力は、いずれの電極先端角においても著しく低い。また電極形状の影響も明確に現れない。この傾向は、Fig. 2. 12の破線で示した電極先端を切頭化した場合のアーク圧力特性の傾向と類似している。ヘリウムガスアークのアーク圧力が低くなる原因の1つとして、電極先端局部での電流密度の低下が考えられる。

Fig. 2. 15は、先端角度180°で電極径を増加した場合（電極先端部のアークの拡がりが増加させた場合）のアーク圧力の変化である。電極径を増大することによってアルゴンガスアーク、ヘリウムガスアークとも電極前面でアークが拡がり電流密度が低下するため、アーク圧力が低下すると考えられる。ただし、ヘリウムガスアークのアーク圧力の低下はアルゴンガスアークに比して僅かである。ただし、太径となって電流密度が十分に低下した場合にはアルゴンガスアークとヘリウムガスアークでのアーク圧力の差がほとんど無くなる。このことは、ヘリウムガスアークが電極先端で、もともと拡がり易い傾向にあることを暗示している。

Fig. 2. 16は、アルゴンガスアークとヘリウムガスア



(a) Ar arc



(b) He arc

Fig. 2. 16 Difference between arc appearances in Ar and He arcs

ークの外観写真である。外観から、アルゴンガスアークとヘリウムガスアークでは陰極先端部のアーク形状に大きな差異が観察される。アルゴンガスアークでは陰極から円錐状にプラズマが広がるように観察されるのに対して、ヘリウムガスアークでは陰極近傍のプラズマは円柱状に観察される。そこで、ヘリウムガスアークでのアーク圧力が低くなるもう1つの原因として、陰極へ流れ込む電流経路の拡がり角 ϕ (Fig. 2. 17の図を参照)の影響について検討する。プラズマ気流は、陰極先端のプラズマ領域での電磁圧力勾配によって加速される。今アーク軸に垂直な面での電流密度分布が一様であると単純化すれば、電磁圧力勾配は、Fig. 2. 17に示すようにプラズマから陰極へ流れ込む主電流経路の拡がり角 ϕ と関連づけられる¹⁾。図において拡がり角の低下は電磁圧力勾配の減小を示しており、陰極近傍のプラズマの形状から見てアルゴンガスアークよりヘリウムガスアークでの拡がり角 ϕ の方が小さく、ヘリウムガスアークにおいてはプラズマ気流が加速され難いと推察される。

以上のように、上記2原因の相乗効果によって、ヘリウムガスアークのアーク圧力はアルゴンガスアークよりも著しく低下したものと考えられる。

本項においては、陰極電極先端の僅かな変化がアーク圧力に著しい影響を及ぼすこと、またアルゴンガスアークとヘリウムガスアークのアーク圧力特性の基本的な差異を明らかにした。

2. 3. 2 アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気下におけるアーク圧力特性の特徴

Fig. 2. 18は、電極先端角 45° 、アーク電流200A、アーク長5mmで、アルゴンとヘリウムの混合ガス組成を変化させた場合の最大アーク圧力特性である。アーク圧力は、アルゴンガスアークへのヘリウムの混入によって急減し、純ヘリウムガスアークで最小のアーク圧力に至ることがわかる。

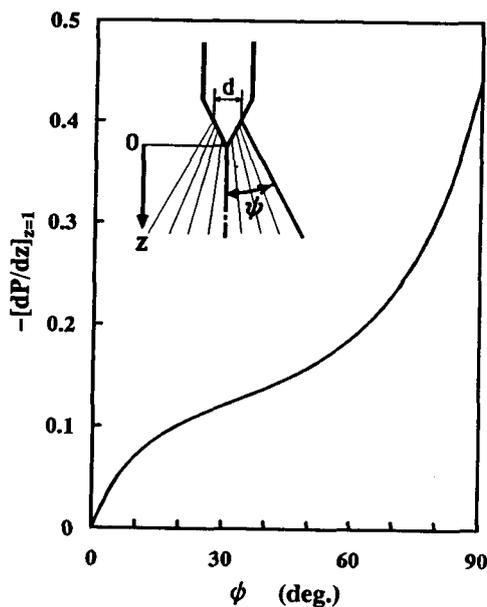


Fig. 2. 17 Effect of spreading angle (ϕ) of current flowing to cathode tip on magnetic pressure gradient at 1mm below the tip

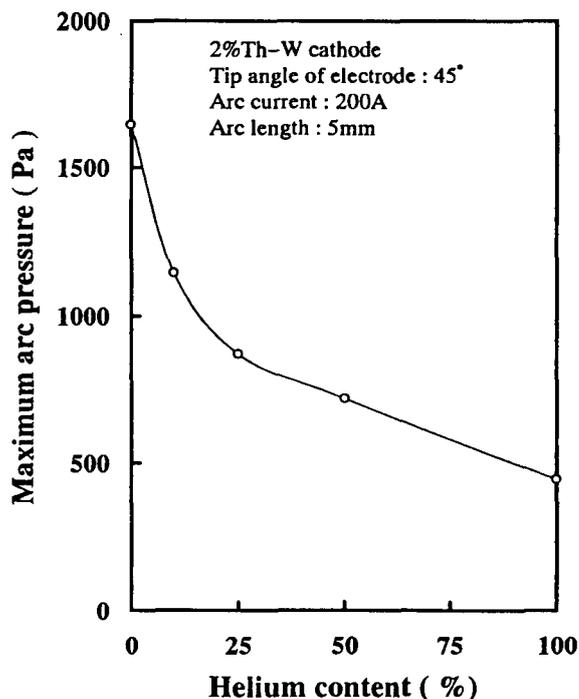
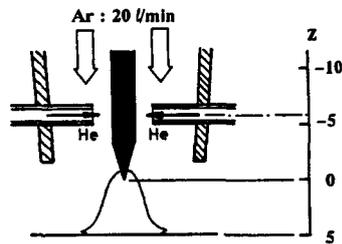
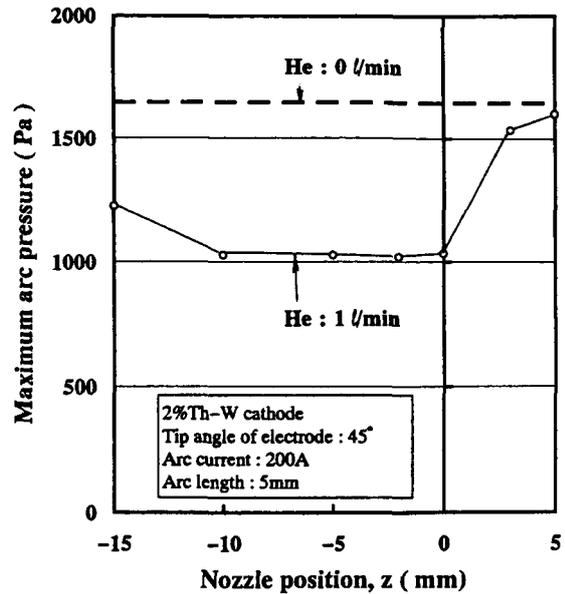


Fig. 2. 18 Effect of helium content on maximum arc pressure in Ar-He mixed gas arcs



(a) Illustration of shield cup with nozzles



(b) Effect of nozzle position on maximum arc pressure

Fig. 2. 19 Illustration of shield cup with nozzles introducing helium gas into argon arc and effect of nozzle position on maximum arc pressure

アルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合の陰極近傍のプラズマの形状が、アルゴンガスアークの形状とほぼ同様の円錐状に観察されることから、アルゴン-ヘリウム混合時のアーク圧力低減の主因(2. 3. 1項参照)は、陰極近傍での電流密度の低下にあると考えられる。

そこで、アルゴンガスアーク中の局部へ、ヘリウムガスを強制的に添加する手法によって、ヘリウムガスの挙動を検討した。アークへの局部ガス添加手段として、Fig. 2. 19(a)に示すシールドカップを試作した。溶接時と同様に20l/minのアルゴンガスをシールドガスとして流しながら、カップの側方に設けたアーク中心軸と対向する2本の細径パイプ(内径1.5mm)からヘリウムガスを添加した。

Fig. 2. 19(b)は、陰極電極の先端位置を基準($z = 0$)にして、ヘリウムガスの添加位置とそのときのアーク圧力の関係を示したものである。なお、図中の破線で示すアーク圧力のレベルは、アルゴンガスアークにおけるものである。電極先端を基準にして、正の添加位置は、アーク柱への添加であり、この領域にヘリウムを添加してもアーク圧力はほとんど変化しな

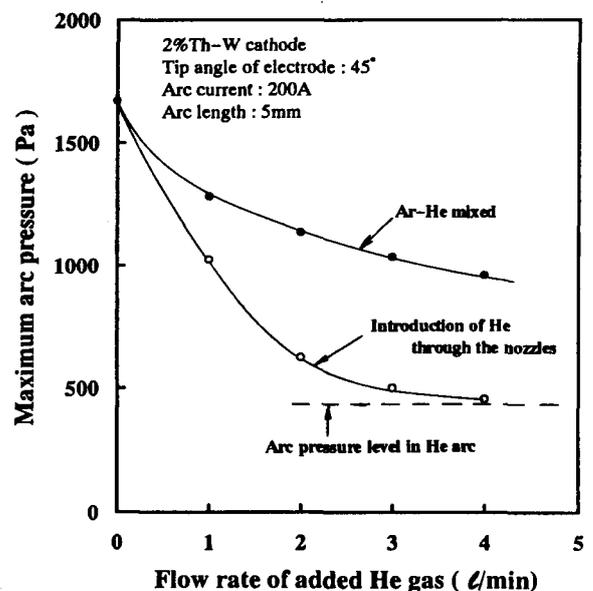


Fig. 2. 20 Effect of helium gas flow rate introduced into argon arcs through the nozzles on maximum arc pressure

い。一方、陰極先端から上方の負の10mmまでの領域に微量ヘリウムを添加する場合には、アーク圧力は顕著な低下を示す。Fig. 2. 20は、アルゴンガスアークに局部添加 ($z = -5\text{mm}$) するヘリウムガス流量を変化した場合のアーク圧力の変化 (○印) と、予めアルゴンガスに局部添加時と同量のヘリウムガスを混合してシールドガスとして用いた場合のアーク圧力の変化 (●印) を併記したものである。図中の破線はヘリウムガスアークでのアーク圧力レベルを示しており、僅か3~4ℓ/minのヘリウムの局部添加によって、アーク圧力はヘリウムガスアークにおけるアーク圧力レベルにまで低減することがわかる。

以上のことから、陰極上方のプラズマ気流のガス補給路にヘリウムを添加するとき、陰極前面近傍部にヘリウムが補給されて、ヘリウムガスアークの特徴的な低アーク圧力を示すものと考えられる。

上述の実験とは逆に、ヘリウムガスアークにアルゴンを局部添加 ($z = -5\text{mm}$) した結果が、Fig. 2. 21である。アルゴンガス流量を4ℓ/minまでノズル添加してもアーク圧力は全く変化せずヘリウムガスアークの圧力を維持し、アルゴンガスアークの特徴的な高いアーク圧力を示さないことがわかる。

これらの結果から、陰極部上方 ($z < 0\text{ mm}$) のプラズマ気流のガス補給路に存在するアルゴンとヘリウムガスのいずれもが同等に、陰極先端部に侵入するのではなく、ヘリウムガスがより効率よく陰極前面近傍部に侵入し易いため、ヘリウムガス雰囲気でのアーク圧力特性が顕著に現れたものと推察される。この推察によれば、電離電圧の高いヘリウムの電離の影響が、陰極近傍の電位の増加として計測されるはずであり、前項での Fig. 2. 9のアーク電圧特性においてヘリウム混合により陰極近傍での電位が、確かに増加している。

2. 4 混合ガス雰囲気における熱輸送現象の特徴

雰囲気ガスがアークに及ぼす現象として、熱的ピンチ効果¹⁾が知られている。これは、水素やヘリウム等の熱伝導度が高くかつ拡散速度が大きいガスを混合すると、それらのガスによってプラズマからの熱損失が増大するため、アーク柱を緊縮して熱損失をできるだけ抑制しようとする現象である。したがって、アルゴンガスアークにヘリウムや水素を混合した場合には、アークのエネルギーバランスが変化することが考えられる。また、この現象は次節での熱源の集中性とも関連している。そこで本節では、アルゴン-ヘリウム混合ガス組成が、アーク熱源か

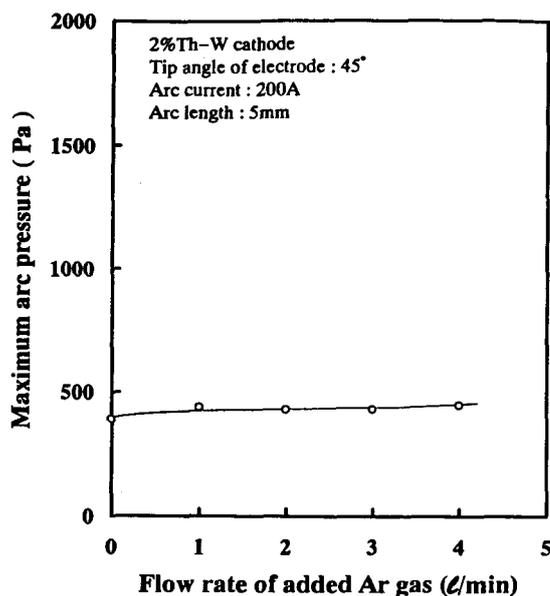


Fig. 2. 21 Effect of argon gas flow rate introduced into helium arcs through the nozzles on maximum arc pressure

ら陽極、陰極へ輸送されるエネルギーと、それらのいずれにも輸送されなかったアークからの損失エネルギーに及ぼす影響について検討する。

2. 4. 1 アルゴン-ヘリウム混合ガスシールドアークにおける電極への熱輸送特性

陽極での熔融、蒸発現象を検討するための最も基本的なものは、陽極への熱輸送量（母板の吸収熱量）である。本項では、まず陽極及び陰極での吸収熱量を計測して、その特性を検討する。

アーク発生装置は前節までと同様で、陰極には径 3.2mm ϕ の 2% トリヤ入りタングステン電極を用いた。また陽極試験片寸法は、40×40mm の板厚 1.5mm の銅板を用いた。陰極および陽極には Fig. 2. 22 に示すような水冷式の熱量計を設計して用いた。熱量を冷却水に吸収させて測定するもので、定量ポンプで供給される冷却水の入口及び出口温度を標準温度計およびサーミスタと併用して計測し、その温度差と水量から吸収熱量を求めた。

また、前節までと同様に電極コレット外部端と銅試験片間でアーク電圧を測定し、アーク電流とともにレコーダに記録した。また熱量測定データを二次回帰分析によって処理した。

Fig. 2. 23 は、種々のアルゴン-ヘリウム混合組成でアーク長を変化した場合の陽極吸収熱量(a)および熱効率(b)である。なお、このときのアーク電圧は Fig. 2. 3 と対応している。(a)図の陽極での吸収熱量は、ヘリウムの混合によるアーク電圧の増加と対応して増大する。

陽極へ供給されるエネルギー（陽極吸収熱量）の内訳をみると、基本的には、(1)電子流によるエネルギーと(2)アークからの熱伝導、放射および対流熱伝達によるエネルギーの2因子が挙げられる²⁾。

このうちの電子流による陽極への供給エネルギーは、陽極降下電圧による電子の加速された運動エネルギーおよび電子温度に対応する熱エネルギーと陽極材料へ電子が侵入するときのポテンシャルエネルギー（材料の仕事関数）に大別される。

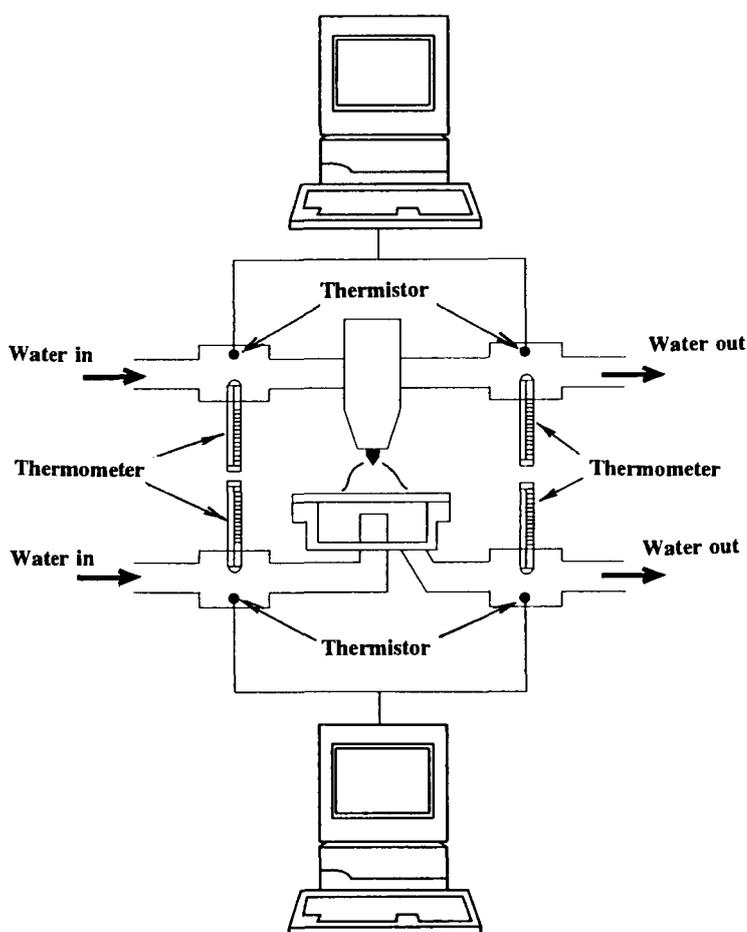


Fig. 2. 22 Schematic diagram of calorimetry system

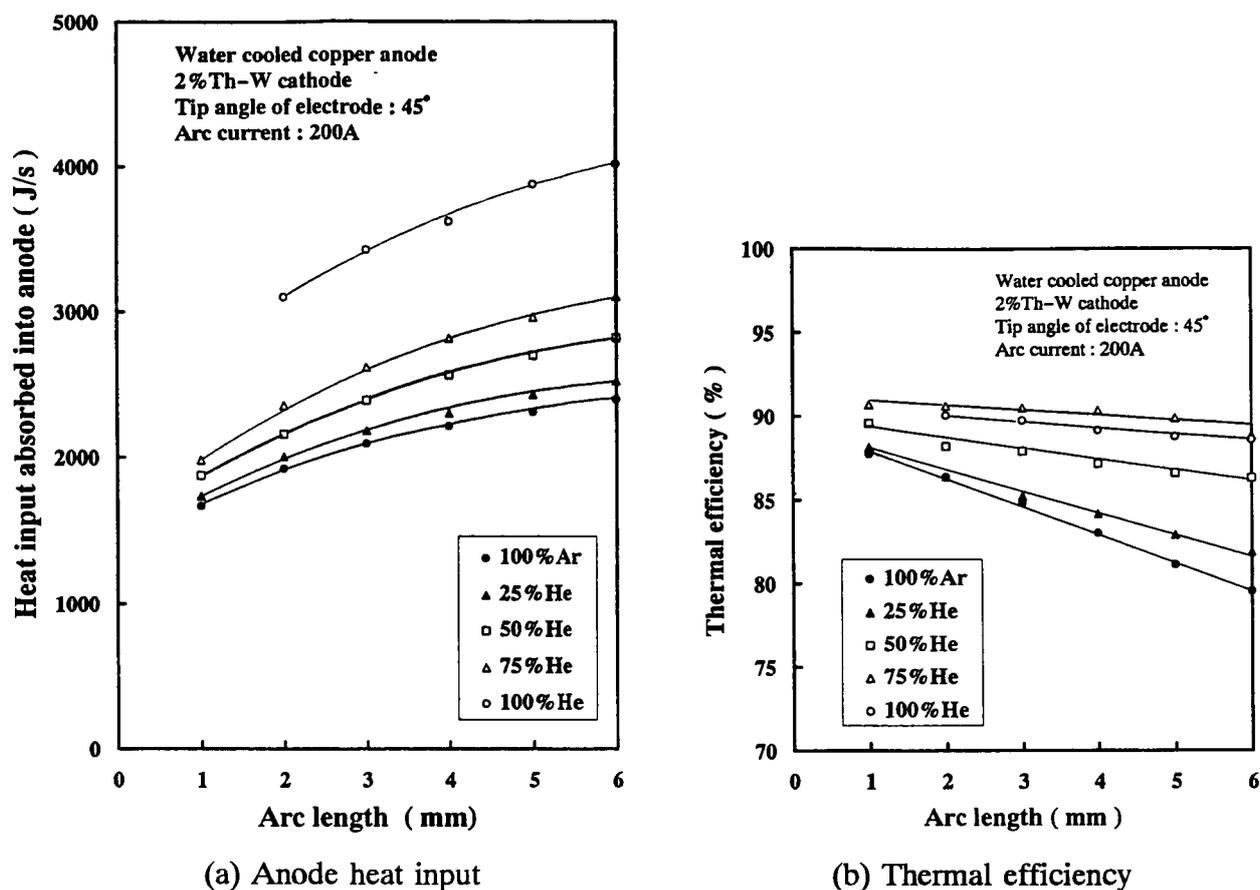
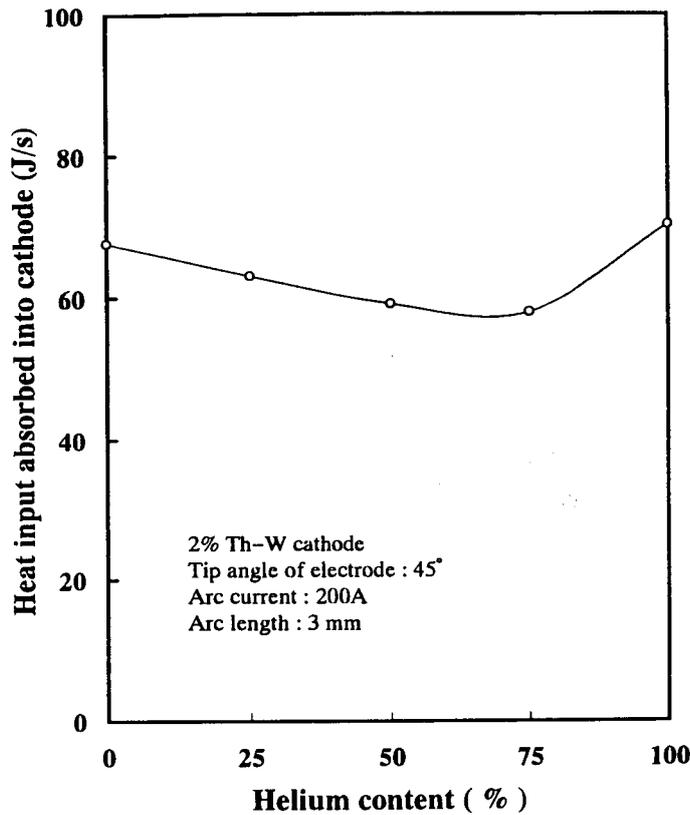


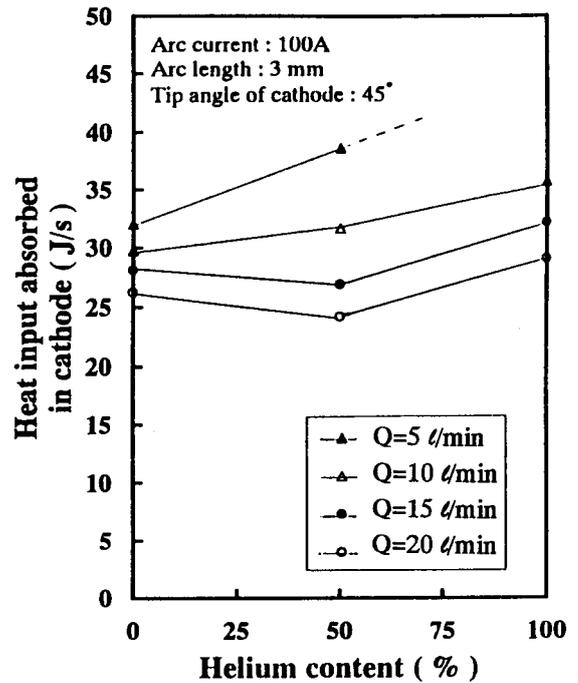
Fig. 2. 23 Anode heat input and thermal efficiency as a function of arc length in Ar-He mixed gas arcs

陽極材料は同一（水冷銅陽極面の温度場もほぼ一定であろう）であるのでポテンシャルエネルギーは一定である。したがって、(a)図におけるヘリウム濃度の増加にともなう陽極吸収熱量の増大は、陽極降下電圧か電子温度が増加したことを示しているようにみえる。しかし、Fig. 2. 9の陽極電位計測結果からわかるように、100%ヘリウムガスアークの場合を除いて、陽極近傍電位はほとんど変化していない。また、Fig. 2. 7のラングミュア探針計測の結果において、屈折点より低プローブ電圧側の急峻な勾配から電子温度が得られるが、ヘリウム濃度75%までの計測データはほとんど同一の勾配を示しており、電子温度もほとんど変化していない。これらのことから、ヘリウム濃度の増加にともなう陽極吸収熱量の増加は、電子流によるものではなく、因子(2)のプラズマからの熱伝導、熱伝達等による熱輸送量が増大したためと考えられる。

次に(b)図の熱効率の特徴について述べると、ヘリウムの混合とともにアーク電力は高効率に陽極へ熱輸送される結果となっている。しかし、100%ヘリウムガスアークにおいては、(a)図に示すように陽極吸収熱量が急増している²⁰⁾が、熱効率としては、75%ヘリウム混合の場合とほとんど変わらないか、逆に低下する傾向を示す。また、ヘリウム混合による熱効率の特徴は、アーク長の増加とともに、アルゴンガスアークでは熱効率が低下するが、ヘリウムを混



(a) Cathode heat input
(Shielding gas flow rate: 20 l/min)



(b) Effect of shielding gas flow rate
on cathode heat input

Fig. 2. 24 Cathode heat input as a function of helium content

合した場合には熱効率がほとんど変化しなくなることである。このことは、アーク長を増加してもアーク柱領域からの熱損失があまり増大しないことを示している。

一方、Fig. 2. 24 (a)は、シールドガス流量 20 l/min で、ガス組成を変化させた場合の陰極での吸収熱量である。陽極の吸収熱量の特性とは異なり、ヘリウムの混合にともない陰極の吸収熱量は若干低下し、ヘリウムガスアークで増加する傾向を示すが、60～70J/sでほとんど変化がない。また陰極の吸収熱量は、陽極に比較して極めて少なく、効率的にはアーク電力の3%以下である。

陰極吸収熱量は、陰極電極の仕事関数、陰極降下電圧やプラズマ温度によって支配される。このうち、陰極降下電圧は、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおいてはFig. 2. 9に示したようにヘリウム混合とともに増大する可能性がある。したがって、ヘリウム混合によって陰極吸収熱量が増加する傾向にあると推察される。しかしながら、Fig. 2. 24 (a)の結果においては、ヘリウム混合によって陰極吸収熱量が増加する傾向にはない。

次に、シールドガス流量を変化した場合の陰極での吸収熱量特性をFig. 2. 24 (b)に示した。シールドガス流量を減少すると、各ガス組成においても陰極吸収熱量は増大し、かつヘリウム濃度の増大とともに単調に陰極吸収熱量が増大する特性を示すようになる。この結果は、

ヘリウム混合にともなう陰極近傍電位等の増加による陰極吸収熱量の増大を反映している。

このような結果から、電極上方から流れる冷たいガス流によって、3,000℃以上に高温化したタングステン電極の表面から多くの熱が奪われ、その熱量はプラズマ気流によって陽極へ伝達されると考えられる。したがって、アークから陰極へ輸送されたもとの熱量は、一般的なシールドガス流量時の計測値 (Fig. 2. 24 (a)参照) より多いものと考えられる。

2. 4. 2 アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるエネルギー損失

ヘリウムの混合にともなう損失エネルギー (陽極および陰極のいずれにも吸収されなかった熱量: アーク電力から陽極および陰極吸収熱量分を差し引いた量) について検討する。

Fig. 2. 25 は、ヘリウム混合にともなう損失エネルギーの変化を示したものである。アーク長が長い場合において、損失エネルギーは、ヘリウムの混合によって減少し、ヘリウム濃度 75% で損失量が極小になり、100%ヘリウムにおいて再び急増する。一般に損失エネルギーは、アーク柱からの放射、熱伝導・対流等によって生じると考えられている²⁾。また、Allum²¹⁾、Evansら²²⁾やCram²³⁾は、アーク柱からの放射による損失が損失エネルギーのうちの多くを占めていると報告している。

そこで、アーク柱からの放射エネルギー損失を放射パワーメータ (感度波長域: 300nm ~ 30,000nm) により計測するための装置レイアウト図を Fig. 2. 26 に示す。Fig. 2. 27 は、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークプラズマからの放射エネルギーを計測した結果である。ヘリウムの混

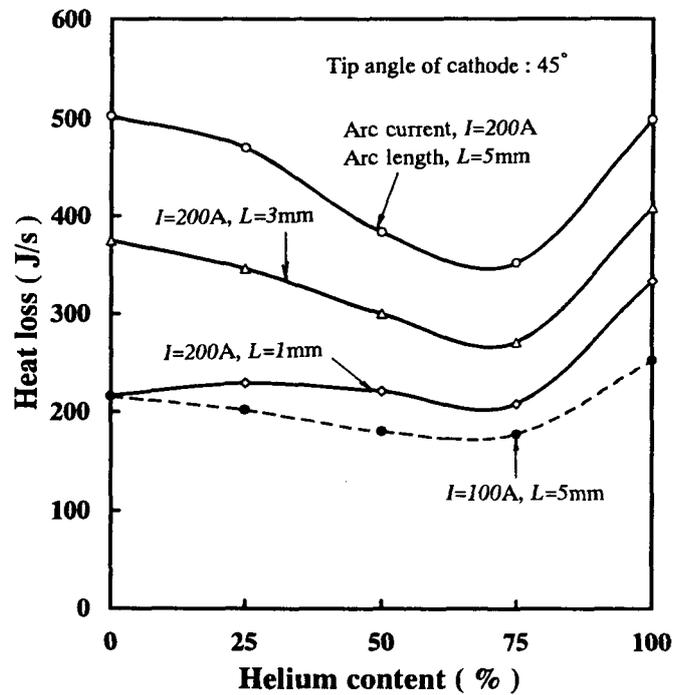


Fig. 2. 25 Effect of helium content on total heat loss in Ar-He mixed gas arcs

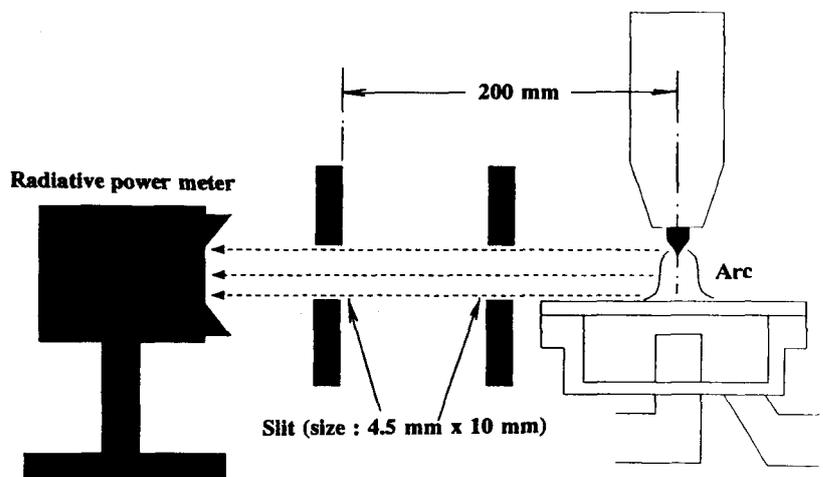


Fig. 2. 26 Schematic illustration for measurement of power radiated from arc column

合によって、プラズマからの放射エネルギーが急激に低下することがわかる。この計測された放射エネルギーが全方位へ放射したとして換算した放射エネルギー損失（●印）と、Fig. 2. 25の損失エネルギー（○印）を併せて示したのが Fig. 2. 28である。また、△印は、損失エネルギーから放射エネルギー損失を差し引いたもので、熱伝導、対流等によるエネルギー損失である。放射エネルギー損失は、ヘリウムの混合とともに単調に減少するが、熱伝導等によるエネルギー損失はヘリウム混合によって増大し、ヘリウムガスアークにおいて急増する。

このことから、ヘリウムの混合にともなう損失エネルギーの減少の主たる原因が、アーク柱からの放射損失の減少にあることがわかる。すなわち、アークプラズマの電離状態がヘリウムの混合によって大きく影響を受けていると考えられる。

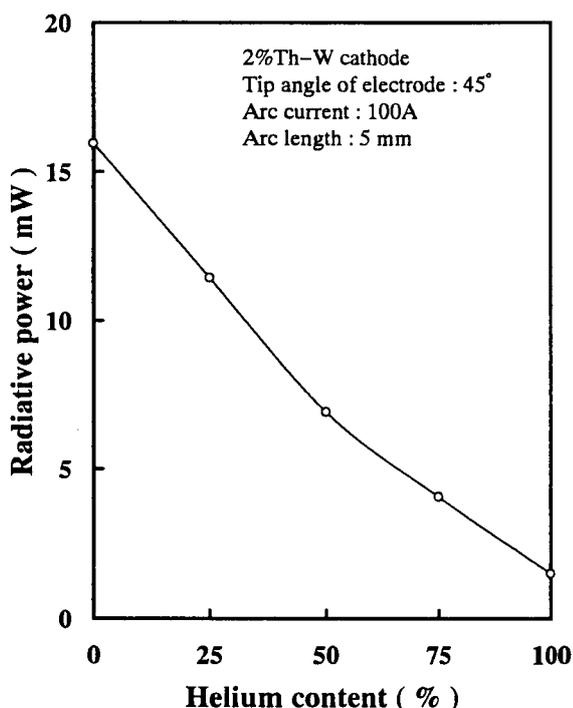


Fig. 2. 27 Radiative power as a function of helium content

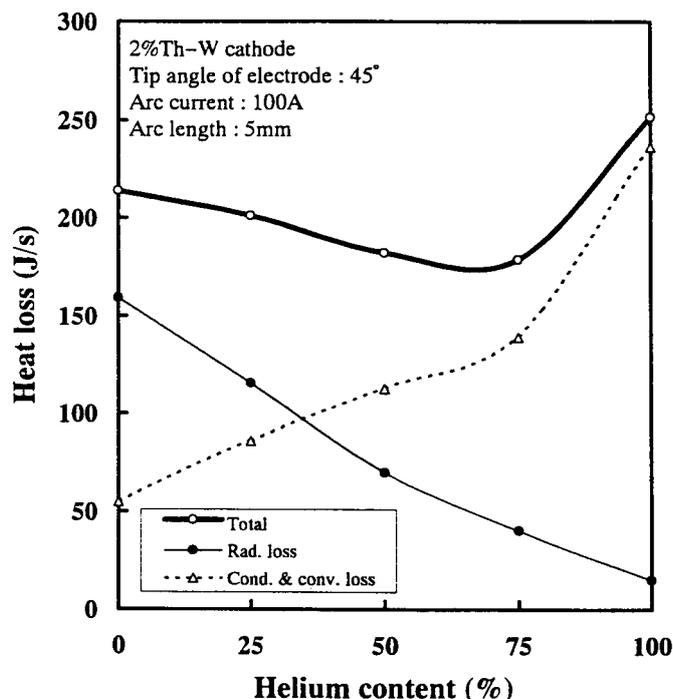


Fig. 2. 28 Relationship between radiative power loss and conduction / convection heat loss in total heat loss

2. 5 混合ガス雰囲気における陽極溶融・蒸発現象の特徴

大野²⁴⁾が、水素をシールドガス中に添加した場合に陽極材料の蒸発が急速に加速されることを見い出しているように、シールドガス中への異種ガス添加によって陽極溶融・蒸発現象が変化することが考えられる。これらの現象に関しては、陽極への総入熱量より入熱密度分布が重要になる。

本節では、陽極の溶融・蒸発特性を陽極の入熱密度分布と関連させながら検討し、雰囲気ガス組成が溶融・蒸発現象に及ぼす影響を考察する。

2. 5. 1 アルゴン-ヘリウム混合ガスシールドアークにおける入熱密度分布特性

前節での陽極へ輸送される総熱量の結果を踏まえて、本項では、陽極面での入熱密度分布について検討する。また、水冷銅陽極の結果と対応して検討するために、陽極が溶融していない場合を基準として検討する。

入熱密度分布を実験的に把握するための手法について述べる。

まず、アーク直下の陽極表面温度と入熱分布の関係を熱伝導論的に予備的に検討する。今、入熱密度分布がガウス分布で与えられると仮定すると、入熱密度 J は、近似的に次式で与えられる。

$$J(r) = \frac{I}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \quad (2. 1)$$

I : 総入熱量

a : 熱源半径の 1/2

この入熱密度分布を用いて、熱源半径を変化した場合の材料表面の最高到達温度が融点になる速度 v_{cr} (溶融開始速度と以下称す) を熱伝導計算によって求めた一例が、Fig. 2. 29 である。この図は、軟鋼板に総入熱 2,000J/s を投与した場合の例で、熱源半径が縮小すると、溶融開始速度は急増する。この計算結果の傾向から、入熱密度分布が熱源移動速度に依存しないものとするれば、溶融開始速度が熱源の集中性を評価するパラメータになり得ると判断できる。

以上の検討結果を踏まえて、溶融開始速度で入熱密度分布特性を評価する。実験の概略図を、Fig. 2. 30 に示す。なお、陽極材料として平面研削盤で表面処理した板厚 20mm の軟鋼 SM490 を用いた。

Fig. 2. 31 は、アルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合の溶融開始速度の実験結果である。Fig. 2. 23 (a) に示したようにヘリウムの混合にともない陽極での総入熱量が増大したにもかかわらず、溶融開始速度は、アルゴンガスアークの場合とほとんど同じで変化しないことがわかる。しかしヘリウムガスアークでは、溶融開始速度は急増する。この結果は、アルゴンにヘリウムを混合した場合に、入熱密度分布はアルゴンガスアークの場合とほとんど変わらないか、または入熱の増加した分だけさらに分散した分布となったことを示している。

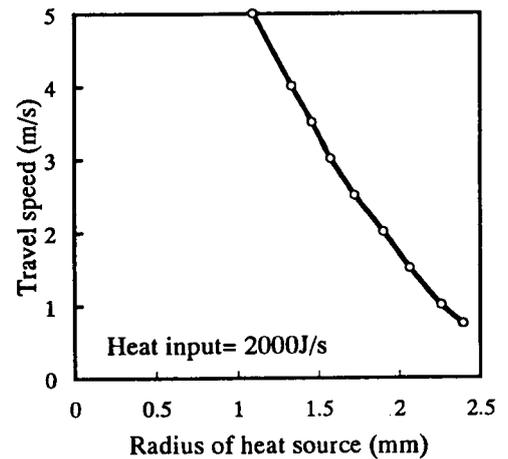


Fig. 2. 29 Calculated relationship between radius $2a$ of heat source and critical travel speed v_{cr}

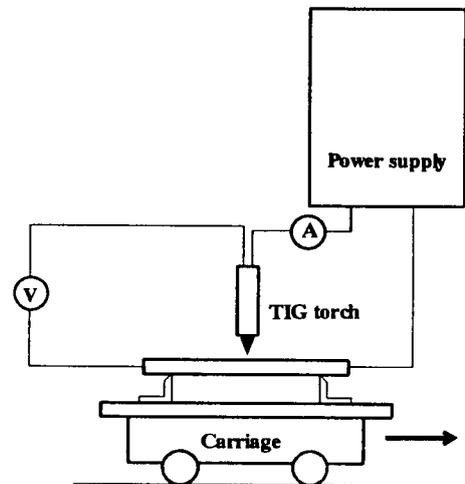


Fig. 2. 30 Experimental setup

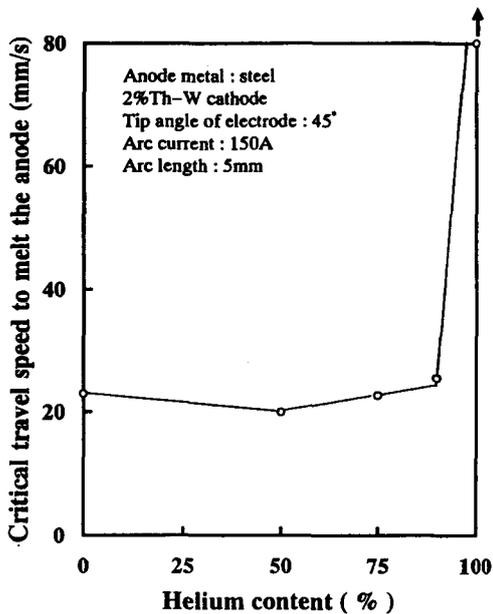


Fig. 2. 31 Critical travel speed v_{cr} as a function of helium content in Ar-He mixed gas arcs

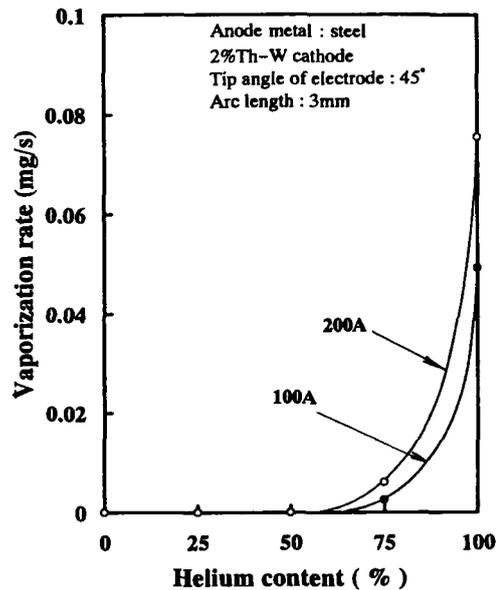


Fig. 2. 32 Vaporization rate as a function of helium content in Ar-He mixed gas arcs

一方、ヘリウムガスアークの場合では、極めて集中的な入熱分布になることがわかる。

すなわち、陽極が溶融しない状態において入熱密度分布をガウス分布と仮定できれば、アルゴンガスアークにヘリウムを混合しても、アークの陽極面での入熱密度分布は、アルゴンガスアークより集中することはなく、分散的であると判断される。

2. 5. 2 混合ガスシールドアークにおける陽極金属蒸発特性

本項では、静止アークで陽極を十分に溶融した場合の蒸発現象を検討する。

実験は、Fig. 2. 22 に示した装置を用いた。但し、水冷陽極材料には、3.5mm 厚の軟鋼 SM490 を用いた。一定時間アークを点弧したときの陽極材料の消耗量を電子天秤を用いて計測し、これを陽極金属の蒸発量とした。

Fig. 2. 32 は、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークの場合の鋼板陽極の蒸発速度特性である。図中にはアーク電流 100A と 200A での結果を示した。アルゴンガスアークにヘリウムを混合した雰囲気においては、アーク電流を 100A、200A と変化させて陽極への供給熱量を大きく変化しても、蒸発量はほとんど計測できないほど微量であるが、純ヘリウム雰囲気に基づく場合には、蒸発速度が急増する。

この結果は、陽極が溶融する場合でも、アルゴン及びアルゴン-ヘリウム混合ガスアークでの陽極面での入熱密度分布は分散的であり、純ヘリウムガスアークにおいて陽極面での入熱密度分布が集中的になることを示している。この傾向は、前項での Fig. 2. 31 の溶融開始速度における結果と同じである。

次に、アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気下の蒸発現象と、アルゴンに水素を混合した場合

の陽極蒸発現象を比較する。アルゴン-水素混合ガスアークでの蒸発特性は、既に大野、宇田⁴⁾によって明らかにされているが、Fig. 2. 3 2の結果と比較するために、Fig. 2. 3 3に同じ実験条件で陽極蒸発量を計測して示した。ヘリウム混合時と異なり、15%以上水素をアルゴンガスアークに混合した場合に、蒸発速度が著しく増加することがわかる。

なお、Fig. 2. 3 4 (a)にアルゴン-ヘリウム混合ガスアークの場合の溶融した鋼板陽極における吸収熱量を計測した結果(実線)を示す。図中の破線は水冷銅陽極での結果である。鋼板、銅板陽極いずれにおいても、ヘリウム混合にとともなう吸収熱量の変化傾向に大きな差異はない。また、Fig. 2. 3 4 (b)に、アルゴン-水素混合ガスアークにおける溶融鋼板陽極(実線)および水冷銅陽極(破線)の吸収熱量の計測結果を示した。15%の水素濃度での陽極吸収熱量は、100Aにおけるヘリウムガスアークや200Aのアルゴン-ヘリウム混合ガスアーク(Fig. 2. 2 3を参照)の場合に比べて、同等か逆に少ない。しかし、15%の水素濃度においては、蒸発が顕著に生じる。

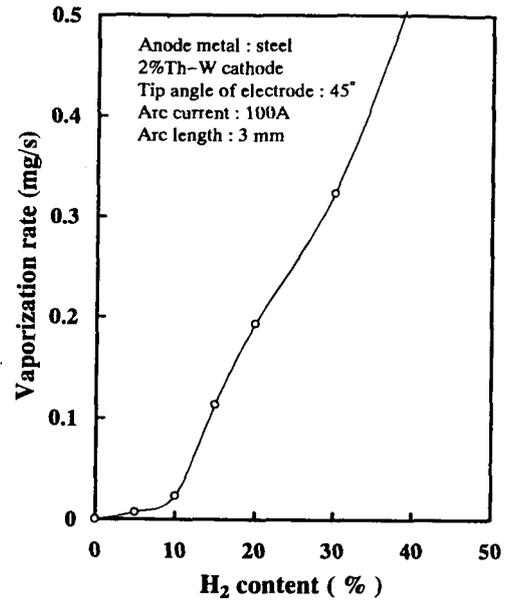
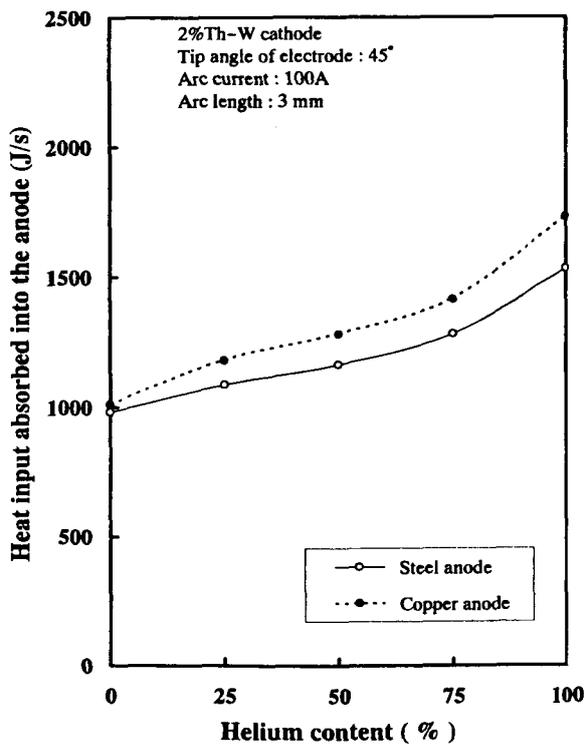
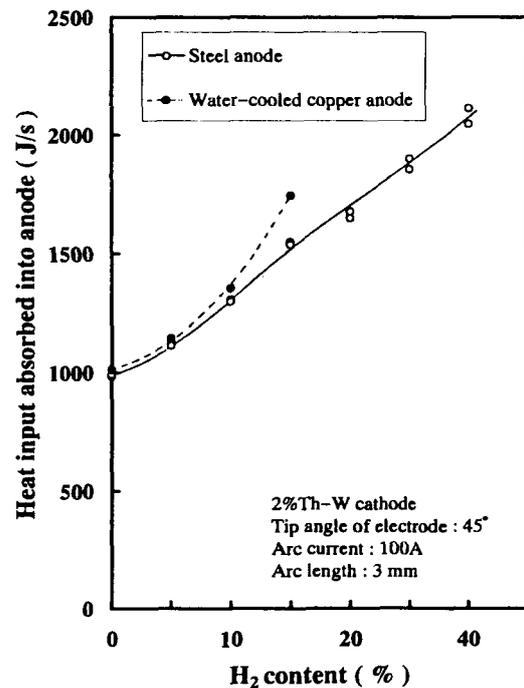


Fig. 2. 33 Vaporization rate as a function of hydrogen content in Ar-H₂ mixed gas arcs



(a) in Ar-He mixed gas arcs



(b) in Ar-H₂ mixed gas arcs

Fig. 2. 34 Heat input absorbed into melting steel anode in Ar-He or Ar-H₂ mixed gas arcs

したがって、アルゴンガスアークにヘリウムを混合しても入熱密度分布は集中しないが、水素を混合する場合には、低濃度の水素雰囲気においても入熱密度分布は集中的になると推察される。このような結果から、高濃度にまでヘリウムを混合してもアークは緊縮せず、熱的ピンチ効果が現れないが、一方、水素を混合する場合には低濃度の水素混合によってアークは緊縮し、熱的ピンチ効果による影響がアークに現れるように推察される。

以上の現象解析のためには、混合ガスアークプラズマの温度または電離状態の定量的な計測および解析が、不可欠である。

2. 6 結 言

本章では、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークのアーク電圧、アーク圧力、熱輸送および陽極入熱密度特性から、ヘリウム混合の影響がアーク熱源の陰極領域、アーク柱領域、陽極領域の三つのいずれの領域に関わる現象に顕著に現れるのかについて検討した。以下に得られた結果を要約する。

- (1) アルゴンガスアークへアルゴンより電離電圧の高いヘリウムを混合するにともなってアーク電圧は増大し、ヘリウムガスアークで急増する。このときの陰極領域、アーク柱領域、陽極領域における電位の変化は以下の通りである。
 - ・ヘリウムの混合にともない陰極領域での電位は増加し、ヘリウム濃度 75% 以上ではほぼ一定値に収れんする。
 - ・アーク柱の電位傾度はヘリウムを混合してもアルゴンガスアークの場合とほとんど変化せず、ヘリウムガスアークで電位傾度は増大する。
 - ・陽極領域での電位は、ヘリウムを濃度 75% まで混合してもアルゴンガスアークとほぼ同じで変化しない。しかし、ヘリウムガスアークにおいて、陽極領域での電位は急増する。
- (2) アルゴンガスアークにヘリウムを混合するにともないアーク圧力は急激に低下し、ヘリウムガスアークで最も低い圧力となる。ヘリウムの混合による陰極領域での電流密度の低下がアーク圧力低下の主因であると考えられる。
- (3) 陰極上方に細径ノズルを設置してアルゴンガスアークに微量のヘリウムを添加した場合、アーク圧力は急減し、ヘリウムガスアークなみの低いアーク圧力に近づく。
逆にヘリウムガスアークに細径ノズルを通してアルゴンを添加してもアルゴンガスアークの特徴である高アーク圧力特性は現れず、ヘリウムガスアークでの低いアーク圧力を保持する。
これらのことは、アルゴンよりもヘリウムが効率よく陰極近傍の領域に輸送されるためと考えられる。
- (4) 陽極の吸収熱量（陽極への総輸送熱量）は、アルゴンガスアークへのヘリウムの混合とともに増大し、ヘリウムガスアークで一層急増する。

このような結果は、ヘリウムの混合にともない熱伝導、熱伝達等によるエネルギー輸送量が増大するためであり、純ヘリウムガスアークでは陽極領域での電位（陽極降下電圧）の増加による影響がさらに追加されるためである。

- (5) 陰極および陽極にも吸収されなかった損失エネルギーは、ヘリウムの混合にともない減少し、75%ヘリウム組成で最低となり、100%ヘリウムガスアークでは再び増加する。

このヘリウムの混合にともなう損失エネルギーの低下は、アーク柱からの放射エネルギーの減少によるものであり、ヘリウムガスアークでの損失エネルギーの増加は、熱伝導、対流等による損失エネルギーの急増によるものである。

- (6) 陽極での吸収熱量特性を踏まえて、陽極での入熱密度分布特性を、陽極の熔融開始速度および陽極金属の蒸発速度特性から評価すると、純ヘリウムガスアークの場合は、アルゴンガスアークの場合より明らかに集中する。しかし、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおける陽極面での入熱密度分布はアルゴンガスアークより集中的にならない。

これに対しアルゴンガスアークに水素を混合する場合は、10%以上水素を混合するだけで、集中的な入熱密度分布になる。

第3章 発光分光法による混合ガスアークプラズマの 状態評価と問題点

3. 1 緒言

前章において、異種ガス混合によってアーク現象が大きく影響を受けることを示したが、これらの現象解明には、陰極から陽極近傍にいたるアークプラズマの状態がどう変化したかということが重要となる。

従来、アルゴンガスアークに熱伝導率の高い水素やヘリウムガスを混合した場合には、熱的ピンチ効果¹⁾によってプラズマの温度が上昇すると考えられている。そこで、本章では、異種ガスを混合した場合のアークプラズマの温度分布を定量的に評価することを試みた。

プラズマの温度計測には、電氣的、分光的、粒子的な計測法が提案されている^{2,6)}。しかし、異種ガス混合がプラズマ温度に及ぼす影響を明らかにすることを本章での目的としていることから、例えばプローブ等を挿入してプローブ材の蒸発物質が不純物として混入するような計測法は適切ではない。したがって、プラズマに擾乱を与えない非接触な診断法として発光分光法が極めて有用であると判断した。

しかしながら、Lancaster²⁾が指摘しているように、多くの研究者による分光的な計測データは相互に矛盾しているように思える。例えば、Fowler-Milne法^{2,6)}では高い温度の計測値を与え、相対強度比法(ボルツマンプロット法)^{27) 28)}では低い温度の計測値を与えるとしている。これらの結果は、計測に際して用いられる「アークプラズマが局所熱平衡状態にある」という仮定に関する本質的な問題か、あるいはそれぞれの研究者の分光計測技術に依存する問題なのかが、十分にはわかっておらず、国際溶接学会(IIW、SG212委員会)でも現在重要課題として議論されている。

そこで、本章では、同一条件下のアークプラズマを、同一光学系を用いて計測し、種々の発光分光分析法により決定されるアークプラズマの温度分布を比較することによって、上記の問題点の原因を明らかにし、定量的なプラズマの温度計測の可能性を検討する。

3. 2 発光分光計測方法

3. 2. 1 アーク発生装置

アークの発生には、前章までと同様の直流電源を用い、陰極には2%トリア入りタングステン(3.2mm径、先端角度45°)、陽極には水冷銅板を用いた。なお、アーク発生条件としては、アーク長を5mm、アーク電流を100Aとした。ここでは、全ての実験をアルゴン置換した大気圧雰囲気チャンバー内で行い、通常のGTA溶接の場合と同様にシールドガスを流しながらアークを発生させた。シールドガスには、アルゴンを基本にアルゴンにヘリウムまたは水素を混合したガスを使用した。

3. 2. 2 分光分析装置

Fig. 3. 1は、本実験に用いた分光計測システムの集光系である。焦点距離200mmの凸レンズ、絞り(立体的なアークという光エネルギー放射体に対しての被写体深度を大きくとるため、絞り径を6mmとした)およびレンズから800mm離れた位置に採光孔を持つ結像スクリーンで構成される。これらを一体化してx-z軸可動パルスステージ上に設置した。なお、スクリーン上には約3倍に拡大されたアークが結像される。

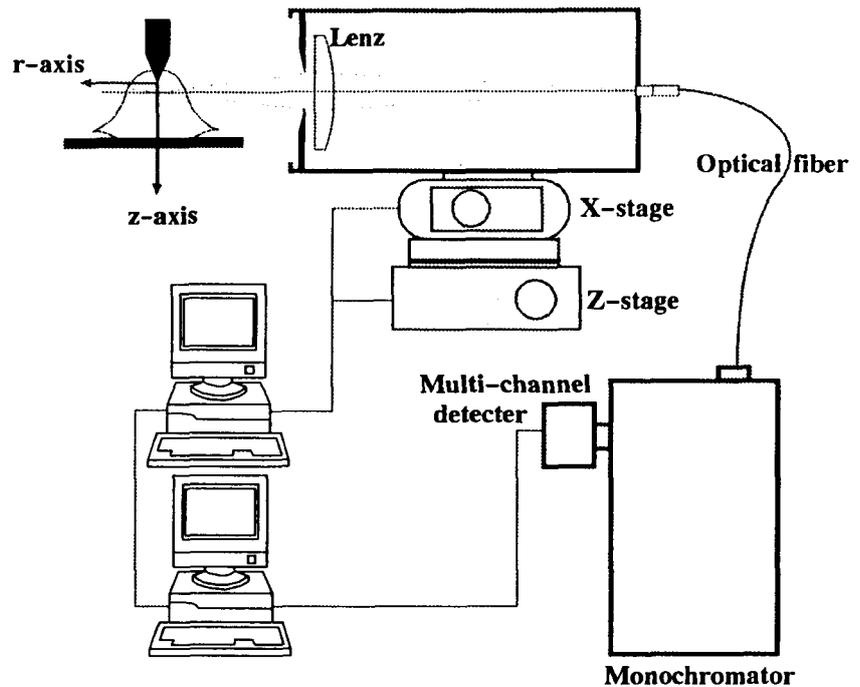


Fig. 3. 1 Schematic diagram of plasma spectroscopic system

集光は、常にレンズ系の光軸位置にあるスクリーン上の採取孔で行い、その光を光学ファイバーで分光器に導き分析を行った。また、x軸パルスステージは、コンピュータによって、図中の水平方向に最低移動量0.08mmで走査させた。

スペクトル分析系では焦点距離1000mmの分光器(Jobin Yvon製THR-1000MSL)を、回折格子には、330nmブレイズ波長の1200本/mmグレーティング(分散:8Å/mm)を用いた。分光器の入射スリット巾を100μm、スリット高さを10mmと設定して計測した。出射スリットには、素子数1024のダイオードアレイヘッド(素子ピッチ:0.025mm/0.2Å)により16nmの波長範囲間を同時計測できるマルチチャンネル検出器を使用して、スペクトル波形を計測し、コンピュータで処理した。このとき計測系での波長による感度補正を標準ハロゲンランプを用いて行った。また輝線スペクトルは、バックグラウンド強度に重畳して計測される。このため、バックグラウンド強度を差し引いて輝線スペクトル波形を抽出し、輝線スペクトルの波形の面積をもって強度を決定した。

3. 2. 3 アークプラズマの放射光量計測

プラズマの放射光量を採取する領域の寸法について検討する。アークプラズマの側方から放射光量を計測するため、プラズマの厚み部分からの積分光量を計測したことになる。そこで、その積分放射光量の分布を計測し、その分布の軸対称性が確認できたデータに対してアーベル変換²⁹⁾処理を施し、空間分解する。

本研究での分光計測・処理の精度を吟味するために、アーベル変換する放射光量分布をFig. 3. 2 (a)の実線で示すようなモデル分布（実際測定される最も急峻な分布を持つ Ar II スペクトルに近いガウス分布）で与えて検討した。この分布が真の積分光量分布 I_{integ} であるとし、この分布を用いて光量採取領域（その直径 d ）から得られるプラズマ積分光量を計算し、モデルによる計測積分光量分布を得る。この分布を、中心から半径方向に強度が 0 に落ちる位置までの領域内で 120 分割し、アーベル変換（60 分割以上でのアーベル変換においては、99% 以上の精度で単位体積当たりの放射強度が求まる）を施して、単位体積当たりの放射強度分布を求める。Fig. 3. 2 (b)は、採取領域径 d を変化したときのプラズマ中心におけるアーベル変換評価強度 I_s と真値 I_t （真値は 600 分割でのアーベル変換結果である）との比率を示している。採取領域径の増加によって中心での評価値が大きく低下することがわかる。真値の 3% 以内の精度を維持するためには、 $d < 0.25\text{mm}$ の条件が必要であることを示している。

以上の検討結果を踏まえて、本研究では、光学系のスクリーン上の採取孔径は、アークプラズマが 3 倍に拡大されて投影されることから、 0.6mm とした（実際のプラズマの計測領域径で 0.2mm ）。なお、実際の計測においては、計測強度分布に変動やノイズが発生するため、二次回帰分析によって計測データのスムージング処理を施した。また、アーベル変換による誤差を確認するため逆アーベル変換を実施して、計測データとの誤差が十分小さいことを確認しながら解析を行った。

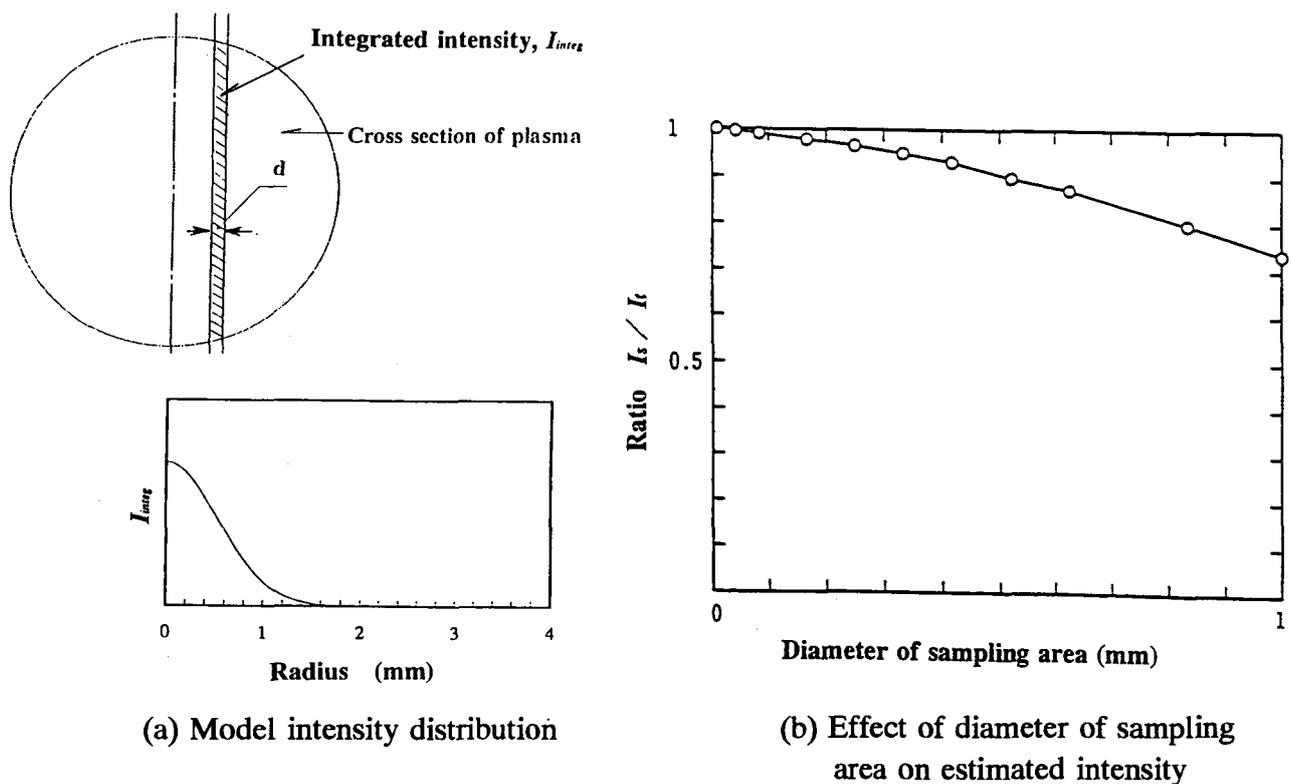


Fig. 3. 2 Intensity distribution of model light source and effect of diameter of sampling area on estimated intensity after Abel inversion

3. 3 種々の発光分光分析法における温度分布

プラズマの分光学的温度計測には輝線スペクトルを利用する発光分光法が最も一般的である。今、 k 価の X イオン粒子 ($k=0$ のときは原子粒子) の振動数 ν (波長 $\lambda = c / \nu$: c は光速) の輝線スペクトルの相対強度 I_x は、次式^{27) 30)} によって与えられる。

$$I_x = A_{xnm} h \nu N_x \frac{g_n \exp\left[-\frac{\epsilon_{xn}}{kT}\right]}{Z_x(T)} \quad (3. 1)$$

A_{xnm} : k 価の X イオン粒子の電子軌道エネルギー準位 n から準位 m に遷移する確率 (遷移確率)

N_x : k 価の X イオン粒子密度

ϵ_{xn} : k 価の X イオン粒子の準位 n のエネルギー

$Z_x(T)$: k 価の X イオン粒子の内部分配関数

g_n : k 価の X イオン粒子のエネルギー準位 n の統計重価

T : 温度

k : ボルツマン定数

h : プランク定数

この式を基に種々の発光分光分析による温度測定を行う。

Table 3. 1 Transition probability and pertinent data on some lines

	Wavelength nm	Paschen	g	ϵ cm^{-1}	Transition probability $10^8 / \text{s}$			
Ar I	415.86	1s ₅ - 3p ₆	5	117183	0.0066a	0.0115b	0.0167e	0.0145g
	425.94	1s ₂ - 3p ₁	1	118871	0.0246a	0.0330b	0.0397c	0.0415g
	430.01	1s ₄ - 3p ₆	5	116999	---	0.0032b	0.0036c	0.00394g
	696.54	1s ₆ - 2p ₂	3	107496	0.0531a		0.087f	0.067g
	842.47	1s ₄ - 2p ₆	5	105617	0.194a	0.167c	0.107f	0.233g
Ar II	460.96	4s' ² D - 4p' ² F _o	8	170531	0.906a	1.07d		
	480.69	4s' ⁴ P - 4p' ⁴ P _o	6	155044	0.786a	0.788d		
H α	656.28		18	97492				4.410g
H β	486.13		32	102824				0.8419g
He I	587.6		15	186102				0.706g

(a)Olsen³⁴⁾, (b)Gericke³⁴⁾, (c)Doherty³⁴⁾, (d)Garstang³⁴⁾, (e)Drawin³⁴⁾,
(f)Thorne & Chamberlain³⁴⁾, and (g)NBS(NIST)^{35, 36)}

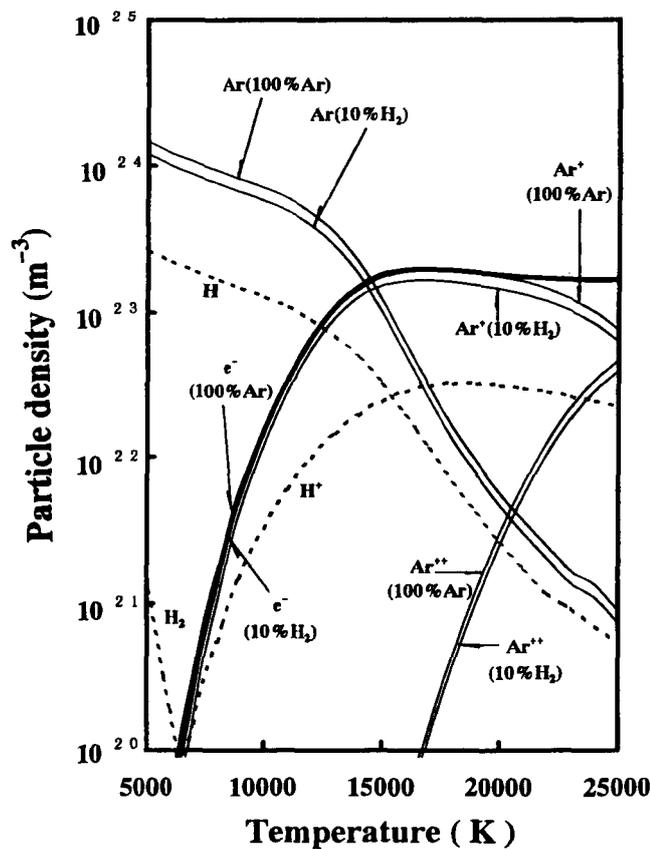
本章では、Fowler-Milne法（Off-Axis最大放射係数法、Larentz法）、Ar II / Ar I 二線強度比法^{28) 31)}（同種・異状態粒子間の相対強度比法）およびボルツマンプロット法（同種・同状態粒子間の相対強度比法）によるアークプラズマの温度評価を行う。

なお、陰極境界近傍 1mm 未満の領域³²⁾や 10,000K 以下の領域³³⁾では、局所熱平衡の仮定に明らかに矛盾するデータが示されており、本章においては、この領域を除き、Ar I（アルゴン原子のスペクトル）と Ar II（アルゴンイオンのスペクトル）の両強度を安定計測・評価できる陰極から 1mm の位置（ $z=1\text{mm}$ ）での半径方向への温度分布を対象として検討する。

また、各スペクトルの分光データ^{34) 35) 36)}を Table 3. 1 に示した。表中の遷移確率データに注目すれば、多くの研究者による報告値に極めて大きな差異があり、これらの差異が分光法による温度計測の誤差の原因となることが予想される。

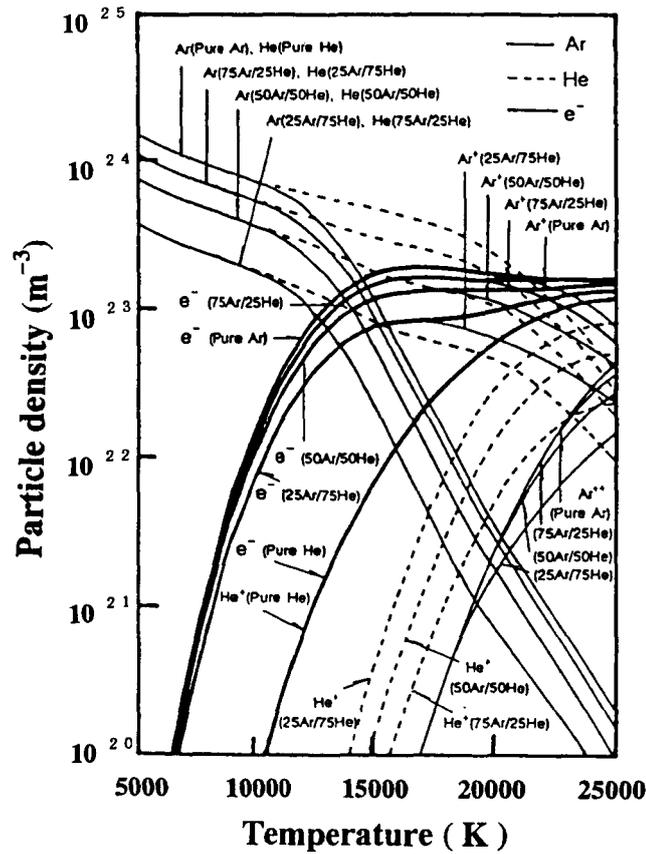
本研究では、Ar I、水素原子の励起スペクトル $H\alpha$ 、 $H\beta$ およびヘリウムの励起スペクトル He I に関しては NBS のデータ^{35) 36)}を、Ar II については、Olsen³⁴⁾のデータを使用した。

プラズマを状態解析するための基準として、多成分系における Saha の熱電離平衡連立方程式から種々の混合ガス組成における構成粒子密度を計算した^{30) 37)}。Fig. 3. 3 は、その計算結果で、(a)は、100%アルゴンと 90%アルゴン-10%水素混合系について、(b)はアルゴン-ヘリウム混合系について示した。



(a) 90%Ar-10%H₂ mixed gas system

Fig. 3. 3 Equilibrium composition in argon-hydrogen and argon-helium gas system



(b) Argon-helium mixed gas system

Fig. 3.3 Equilibrium composition in argon-hydrogen and argon-helium gas system

3. 3. 1 Fowler-Milne法による温度分布

本法は、Off-axis 最大放射係数法とも呼ばれる手法である。対象スペクトルの強度と温度の関係を(3. 1)式より求めることが必要である。このとき、(3. 1)式でのアルゴンあるいは水素の粒子密度 N_x が必要となる。そこで Saha の熱電離平衡式を解いて N_x を求める必要がある。このため、局所熱平衡を仮定することになる。

アルゴンガスアークを想定し、波長 696.5nm のアルゴン原子の励起スペクトル (Ar I) の強度と温度の関係を Table 3. 1、Fig. 3. 3(a) を用いて (3. 1) 式から算出した。その結果が、Fig. 3. 4 である。この図からわかるように、ある特定温度で最大放射強度 I_{x^*} が存在す

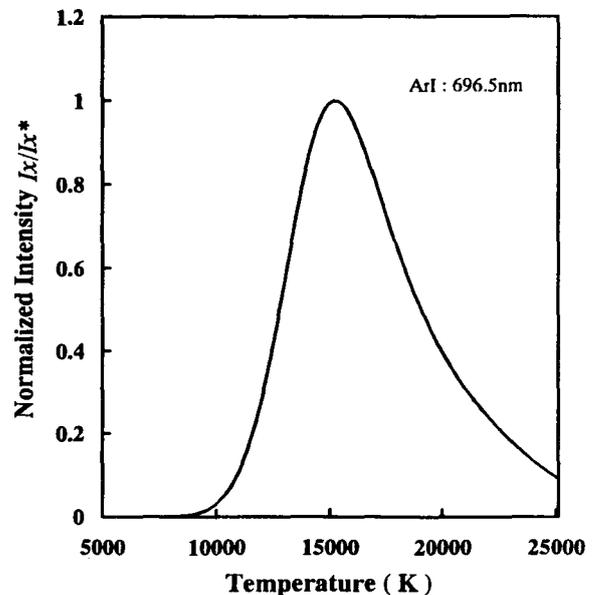


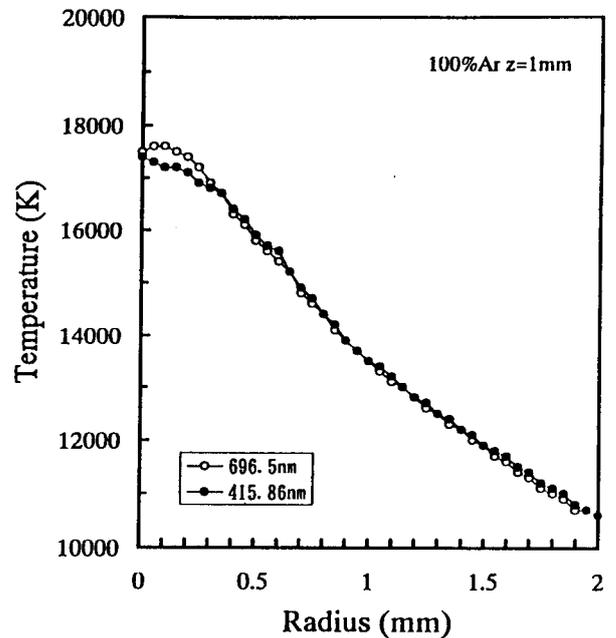
Fig. 3.4 Calculated relationship between normalized Ar I (696.5nm) intensity and temperature

る。図では、この最大強度で正規化して示してある。この図から、最大強度に対する相対強度比 I_x / I_{x^*} と温度との関係が得られる。この方法では、最大放射強度値でスペクトル強度を正規化するので、Table 3. 1 の遷移確率のデータは最終的には不要となる。ただし、一連の計測結果のスペクトル強度分布にアーク中心軸から離れた位置で最大放射強度を見い出すことができた場合にのみ、最大放射強度に対するスペクトル強度比から温度を求めることができる。

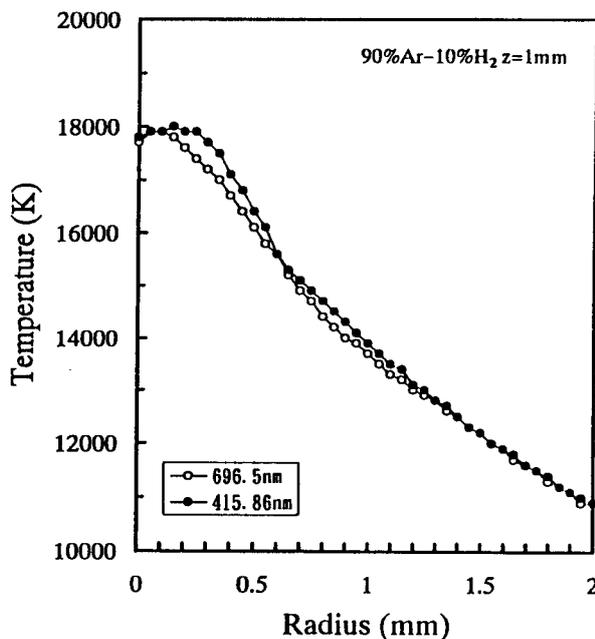
なお、考察しようとするプラズマの雰囲気ガス組成と対象とするスペクトルデータ (Table 3. 1) から Fig. 3. 4 算出時と同様にしてスペクトル強度比と温度の関係図を作成し、種々のプラズマの温度を求めた。

Fig. 3. 5 は、アルゴンガスアークと 90%Ar-10%H₂ 混合ガスアークの温度分布である。図中には 2 種類の Ar I スペクトルおよび水素励起スペクトル強度分布から求めたそれぞれの結果を示した。各図毎に見た場合、2 種類のスペクトル強度で計測したそれぞれの温度に大きな差は無く、安定した結果が得られている。なお、アルゴンガスアークの結果は、同じ方法で計測された Haddad ら³²⁾の結果とも一致している。

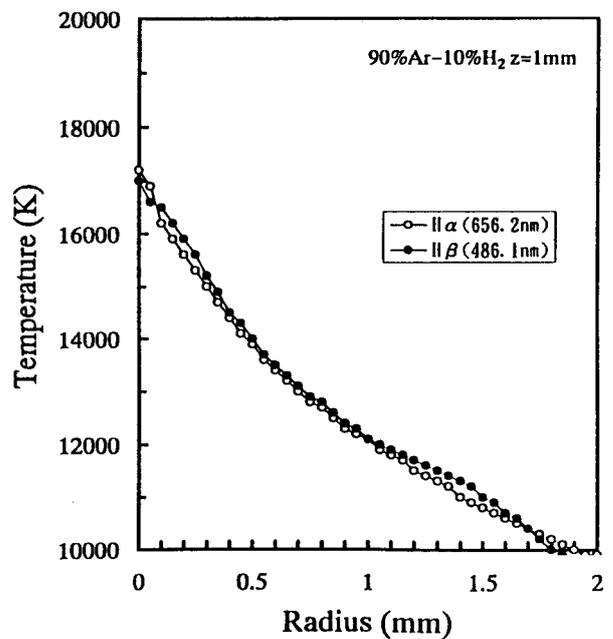
しかしながら、本法による結果において、



(a) by Ar I intensity in 100%Ar arc



(b) by Ar I intensity in 90%Ar-10%H₂ arc



(c) by H I intensity in 90%Ar-10%H₂ arc

Fig. 3. 5 Temperature distributions measured by Fowler-Milne method

Ar I スペクトル強度から評価した温度分布は、(a)のアルゴンガスアークと(b)の10%水素混合ガスアークとでほとんど差が現れていないが、水素スペクトル強度から評価した(c)の10%水素混合ガスアークでの温度分布は、それらに比較して温度が低く評価されている。すなわち、水素混合ガスアークにおいては、Ar I のスペクトル分布から求めた温度分布と水素のスペクトル分布から求めた温度分布は一致しない。

Fig. 3. 6 は、75%Ar-25%He 混合ガスアークにおいて、Ar I スペクトルから本法によって計測された温度分布である。図中にはアルゴンガスアークにおける温度も示した。25%He 混合によってアーク温度はアルゴンガスアークより明らかに高く評価され、アークも周辺へ拡大する結果となった。

なお、He I スペクトルの強度分布にはアーク軸から離れた位置で最大強度を計測できなかったのが本法の適用が不可能であった。

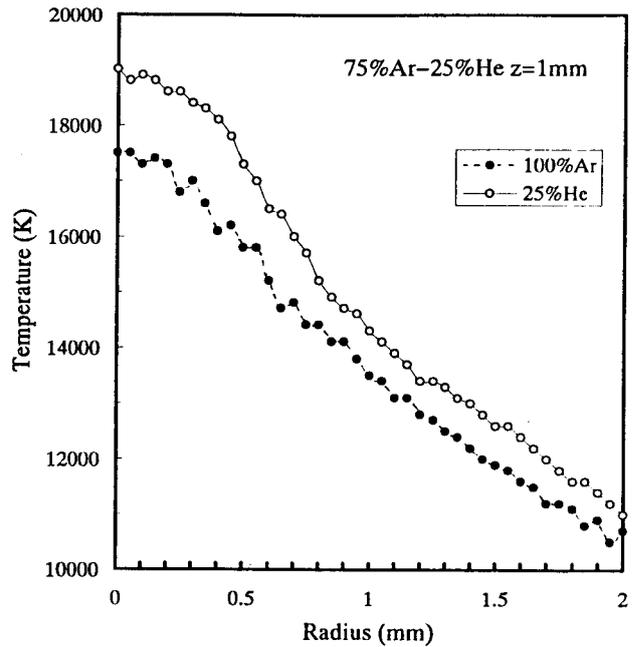


Fig. 3. 6 Temperature distribution measured from Ar I intensities by Fowler-Milne method (75%Ar-25%He mixed gas arc)

3. 3. 2 異なる状態にある粒子からの相対強度比法 (Ar II / Ar I 二線強度比法) による温度分布

アルゴン原子 (Ar I : 696.5nm) のスペクトル強度に対するアルゴンイオン (Ar II : 480.7nm) のスペクトル強度の比は、(3. 1)式を用いてFig. 3. 7のように温度と関係付けられ、またこの関係図は、100%Arと90%Ar-10%Heともほとんど同じである。本法でもアルゴン原子、アルゴンイオンそれぞれの粒子密度が計算上必要となるので、Fig. 3. 3(a)を用いて求める。したがって局所熱平衡を仮定する手法である。またこの方法では、Ar I と Ar II スペクトル強度間の波長 - 強度補正や遷移確率値が必要である。遷移確率比が±10%変動してもほとんど図の実線と大きくは変わらない特徴がある。したがって、温度評価に遷移確率値の誤差はほとんど影

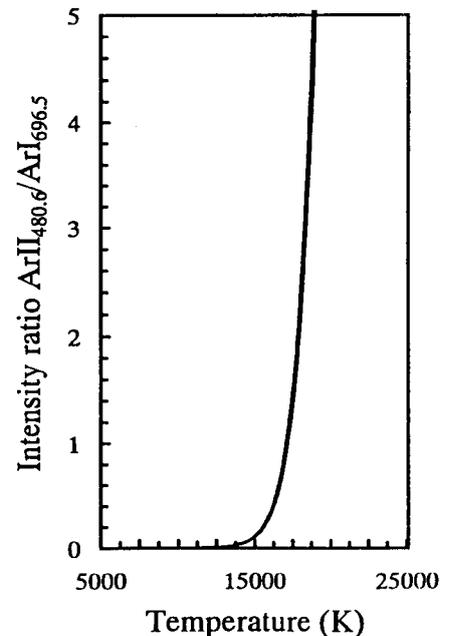


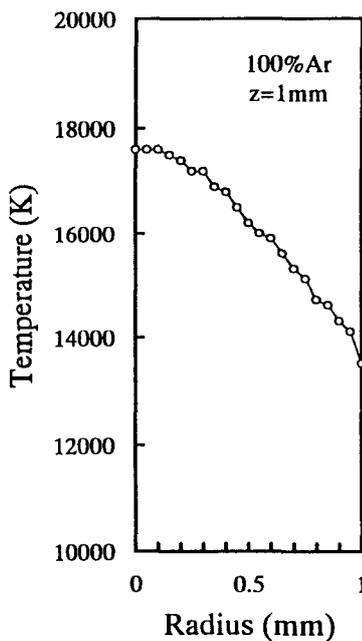
Fig. 3. 7 Calculated relationship between ratio of intensities Ar II / Ar I and temperature

響しない。

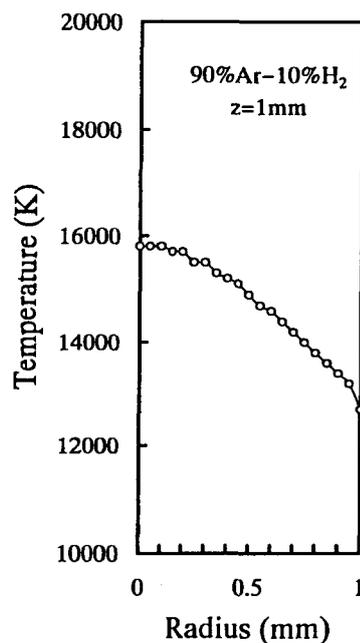
Fig. 3. 8 は、アルゴンガスアークと 90%Ar-10% H_2 混合ガスアークにおける温度分布結果である。アルゴンガスアークにおいては、Fig. 3. 5 (a)の結果とほぼ一致していることがわかる。しかし、水素混合ガスアークの温度分布は、アルゴンガスアークのそれより低く評価され、とくにアーク中心部での温度低下が大きく、Fig. 3. 5 (b)の結果と異なることがわかる。また、Fig. 3. 5 (c)の温度分布のプロファイルとも大きく異なっていることがわかる。

以上までの結果は、アルゴンガスアークにおいては、両計測法とも同等の温度分布を示したが、水素混合ガスアークでは、両法における計測温度分布は、3様の異なる結果となることを示した。

Fig. 3. 9 は、75%Ar-25%He 混合ガスアークにおける温度分布の計測結果である。水素混合の場合と同様な手法で Ar I および Ar II スペクトルの強度比と温度との関係を予め計算して求めた上で、温度を決定した。この図の結果は、アルゴガスアークの場合と比較すれば、アーク中心部で僅かに高温となり、逆に周辺部では僅かに低温となる。しかし、Fig. 3. 6 における Fowler-Milne 法での 25%He 混合時の温度分布と比較すると、明らかにアーク全体の温度が低く評価される。したがって、25%He 混合ガスアークにおいても、両計測法による評価温度分布は、2様の異なる結果となる。



(a) in 100%Ar arc



(b) in 90%Ar-10% H_2 arc

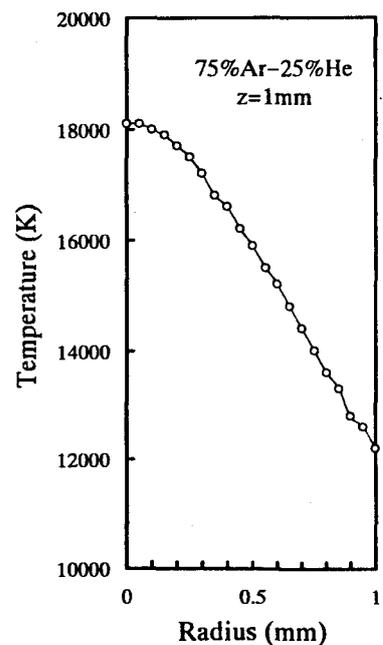


Fig. 3. 9 Temperature distribution measured by relative intensity ratio Ar II/Ar I (75%Ar-25%He arc)

Fig. 3. 8 Temperature distributions measured by relative intensity ratio Ar II/Ar I

3. 3. 3 同状態にある粒子からの相対強度比法（ボルツマンプロット法）による温度分布

3. 3. 2 項の方法では原子 - イオンのスペクトル強度比から温度を算出したのに対し、本法では同状態にある粒子のスペクトル強度比から温度を算出するものである。この方法による温度は一般に低く評価されることが多い^{18) 38)}。

今、波長 λ_1 、 λ_2 の 2 スペクトル強度を計測したとすれば、(3. 1) 式は次のように書き換えられる。

$$\ln \left(\frac{I_1 \lambda_1}{A_1 g_1} \right) = - \frac{\epsilon_1}{kT} + \ln \left(\frac{Nhc}{Z(T)} \right) \quad (3. 2)$$

$$\ln \left(\frac{I_2 \lambda_2}{A_2 g_2} \right) = - \frac{\epsilon_2}{kT} + \ln \left(\frac{Nhc}{Z(T)} \right) \quad (3. 3)$$

上式の差をとり、温度 T は次式となる。

$$T = - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{k} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{A_2 g_2 I_1 \lambda_1}{A_1 g_1 I_2 \lambda_2} \right)} \quad (3. 4)$$

(3. 4) 式は対象とする粒子の密度 N_x とは無関係であり、雰囲気ガス組成に影響されない。したがって、Saha の熱電離平衡式を使用しないため局所熱平衡の仮定を設ける必要はない。ただし、考察対象粒子間でボルツマン分布則が成立するという局所部分熱平衡を仮定する必要がある。一般にボルツマンプロット法と呼ばれる解析方法の基本型である。

Fig. 3. 10 (a) は、ボルツマンプロット法で多く使用されている Ar I スペクトル群である。今これらのスペクトル強度をプロットすると、同図(b)のような結果になる。バラツキが大きく温度決定は到底不可能だが、敢えて図中の勾配からは約 7,000K ($z=2\text{mm}$, $r=0.5\text{mm}$) と決

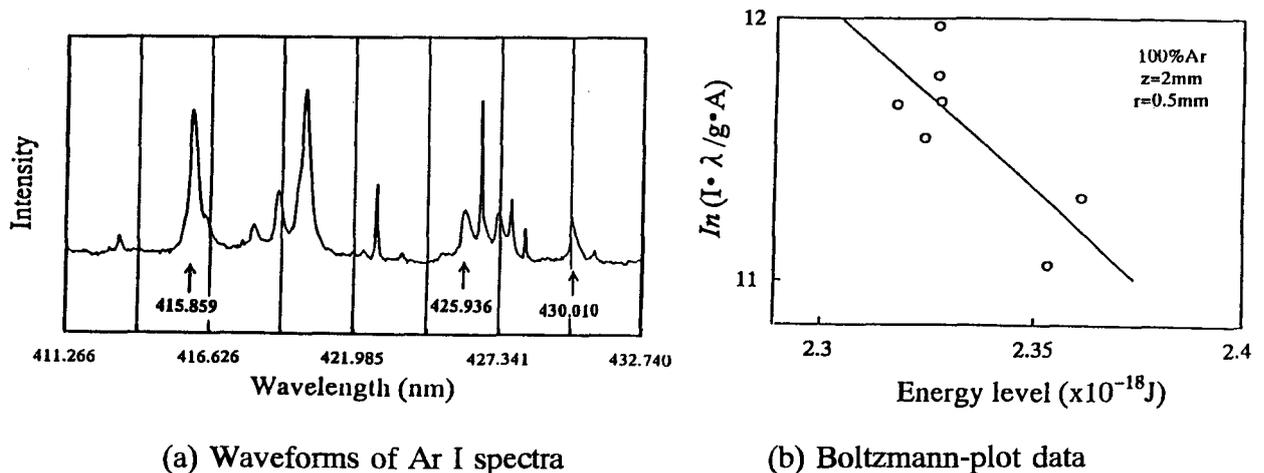


Fig. 3. 10 Waveforms of Ar I for Boltzmann-plot method and an example of plotted data

定される。この温度は同位置における Fowler-Milne 法での計測温度に比べて著しく低い温度である。Fig. 3. 10 に示した対象とするスペクトルは、強度が微弱で S/N 比が低いのに加えて、対象スペクトルにそれ以外のスペクトルが重畳しており、波形分離が必要となる。このようなスペクトル強度の評価においては誤差が入り易い。

Fig. 3. 11 は、Fig. 3. 10 のスペクトル群の中から最も高い励起エネルギーレベルにある 425.9nm と最も低いエネルギーレベルに近い 430.01nm を対象として、 I_1 / I_2 比と温度の関係を (3. 4) 式と Table 3. 1 から算出したものである。なお図中の細線は、 A_2 / A_1 が $\pm 10\%$ 変化したときの強度と温度の関係を示している。前項での Fig. 3. 7 に比べて遷移確率の精度が温度決定に極めて大きく影響することがわかる。とくに高温領域の温度測定では計測強度比の誤差によって温度が極めて大きく変動することがわかる。これは、基本的に対象とした 2 線の励起エネルギーレベルが近すぎるためである。

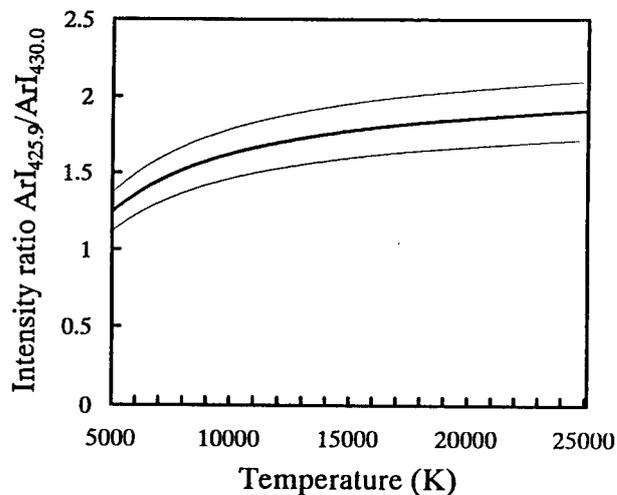


Fig. 3. 11 Theoretical relationship between ratio of intensities $Ar I_{425.9} / Ar I_{430.0}$ and temperature

次に、エネルギーレベルの差が十分に大きくとり得るスペクトルを用いて検討する。

Fig. 3. 12 (a) は、Fig. 3. 10 (a) の微弱スペクトルの中では強度が強かつ波形分離時に比較的誤差が少ないと思われる励起スペクトル 415.86nm とエネルギーレベルの離れた 696.5nm との相対強度比と温度の関係を示している。(b) 図は、波形分離処理を必要とせず、

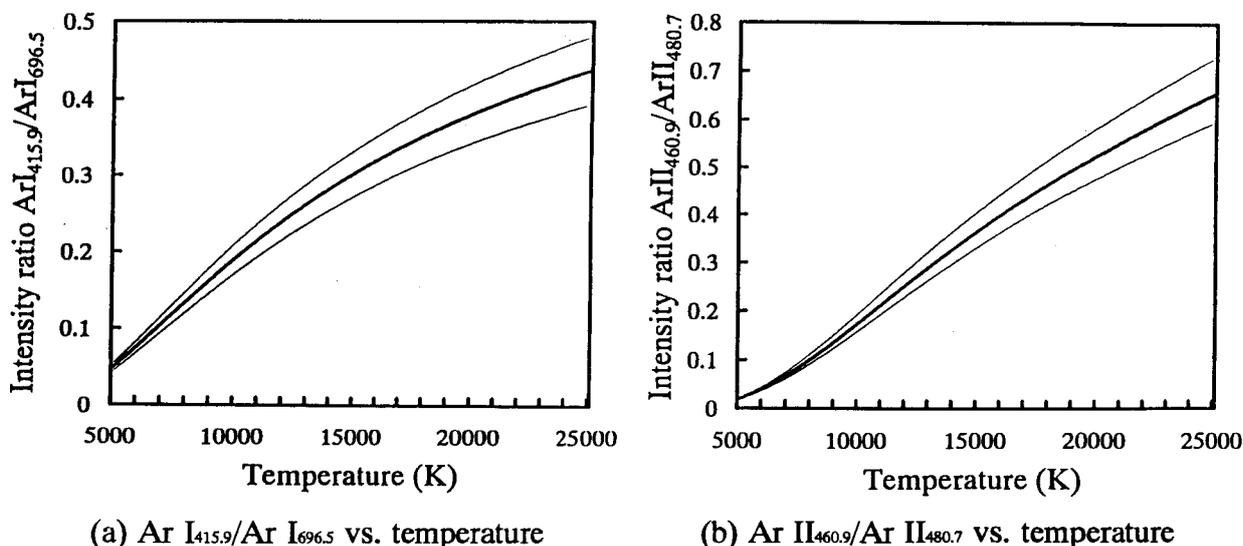
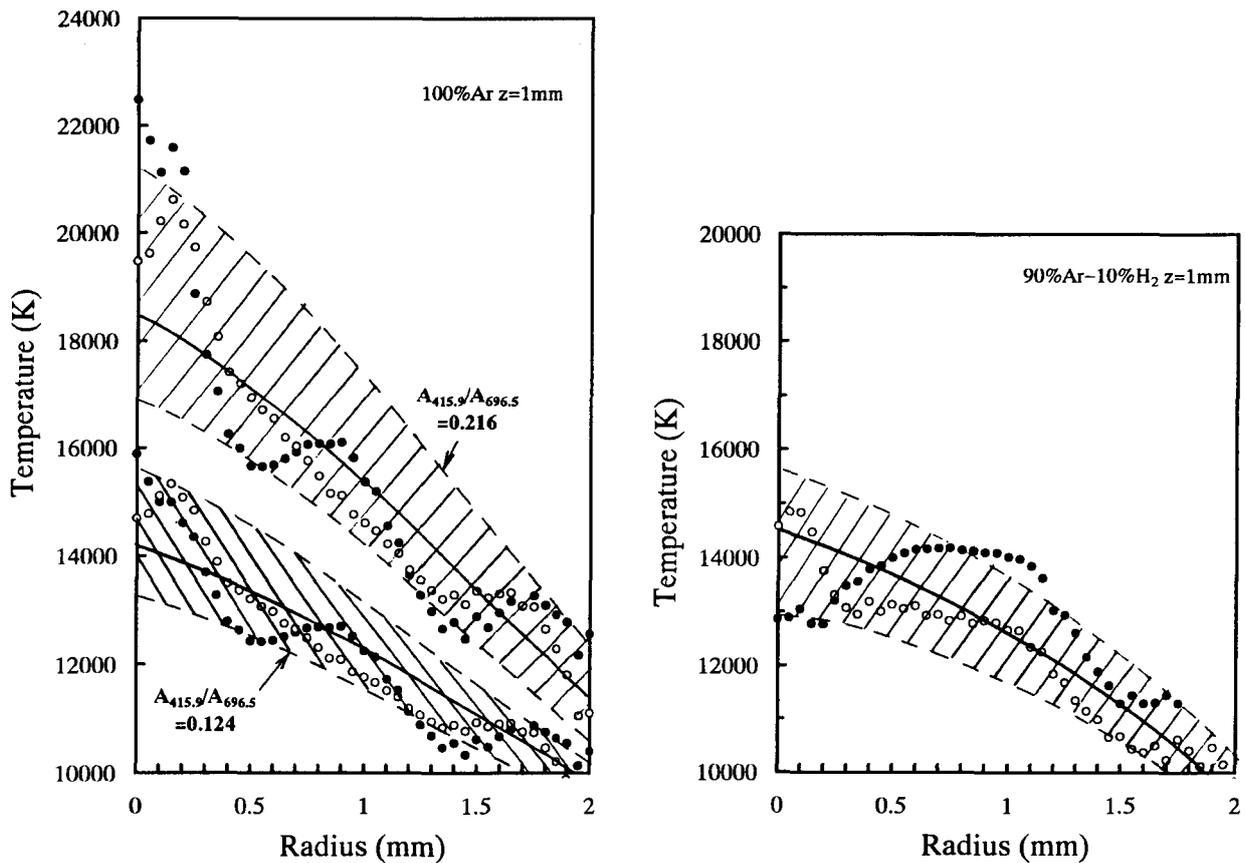


Fig. 3. 12 Theoretical relationship between ratio of relative intensities of same atomic species and temperature

かつ比較的強度の強い電離スペクトル 460.86nm と 480.7nm を用いた場合で、それらの相対強度比と温度の関係を算出したものである。図中の細線は Fig. 3. 11 のそれと同意であり、温度決定に対して Fig. 3. 11 の場合より遷移確率値や計測強度比の誤差の影響がかなり抑えられる可能性があることがわかる。

Fig. 3. 13 はアルゴンガスアークと 90%Ar-10%H₂ 混合ガスアークでの温度の計測結果である。(a)(b)両図の温度分布計測には、Fig. 3. 5 で利用した 2 線のスペクトル強度データをそのまま使用し、遷移確率値は Table 3. 1 の NBS のデータ ($A_{415.9}/A_{696.5}=0.216$) を用いた。(a)図のアルゴンガスアークでは、前項までの結果より若干高温に計測されている。なお、図中の○印と●印の差異は、微弱スペクトル線 415.86nm のノイズ処理 (スムージング処理) の有無によって生じたものであり、僅かの処理の差異が結果に大きく影響することがわかる。415.86nm、696.5nm スペクトルの遷移確率に Olsen のデータを使用した $A_{415.9}/A_{696.5}=0.124$ の場合に、計測温度はアーク中心部で 4,000K ほど低下する結果になり、遷移確率値の影響も大きいことがわかる。一方、(b)図の 10% 水素混合アークでは、計測温度が全域で前述の 2 法よりかなり低下している。ここでも、やはり温度分布結果に計測誤差による変動が見られる。なお、図の 2 種類の温度分布結果は、(a)図と同様、同一の 415.86nm スペクトル強度データ (水素混合時にはアルゴンガスアーク時に比べて一層強度が低下する) のノイズ処理の差異によって



(a) from Ar I intensities in 100%Ar arc

(b) from Ar I intensities in 90%Ar-10%H₂ arc

Fig. 3.13 Temperature distributions measured from intensities of argon atomic species

生じたものである。

Ar I スペクトルを用いる本計測法においては、415.86nm のスペクトルと同等のエネルギーレベルにあって強度の計測誤差の少ないスペクトルが見当たらないことが問題である。

次に、(c)(d)図の電離スペクトルでの温度分布は、対象スペクトルの輝線強度が強かつ波形分離の必要がないことに加えて Fig.

3. 1 2 (b)からも予測されるように比較的安定に評価でき、前述の Ar II /Ar I 二線強度比法の結果とほぼ同等の結果となることがわかる。

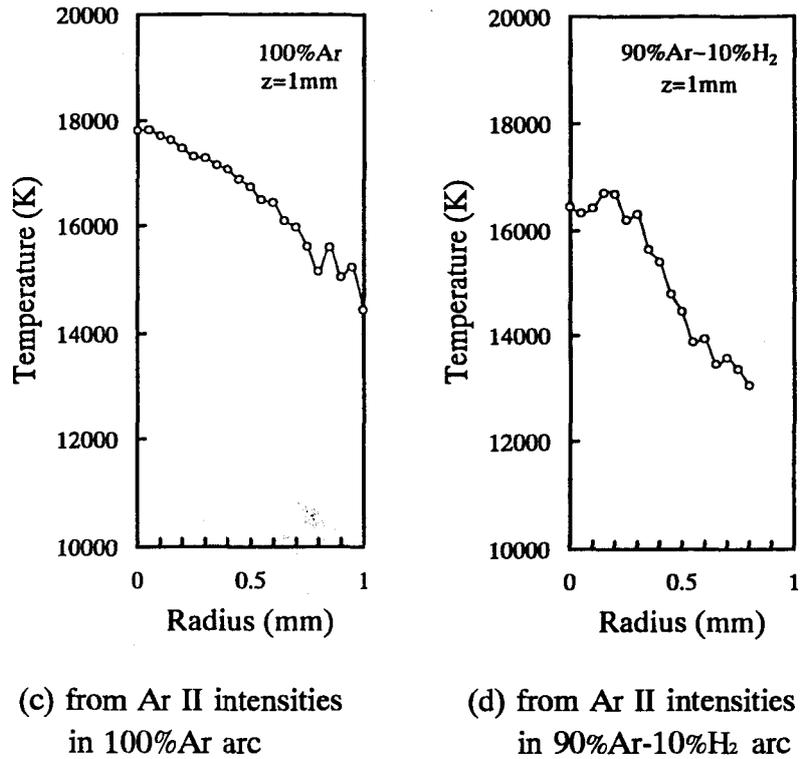


Fig. 3. 13 Temperature distributions measured from intensities of argon atomic species

Fig. 3. 1 4 (a)は、水素励起スペクトル H α (656.2nm)、H β (486.1nm) の相対強度比と温度の関係であり、Fig. 3. 1 2 に比べれば、高温域での温度決定において計測強度誤差の影響がかなり強く現れる可

能性があることがわかる。(b)図は、この関係から求めたアーク温度分布の計測結果である。 Fig. 3. 5 (b)、(c)、Fig. 3. 8 (b)や Fig. 3. 1 3 (b)、(d)より高温に評価される。

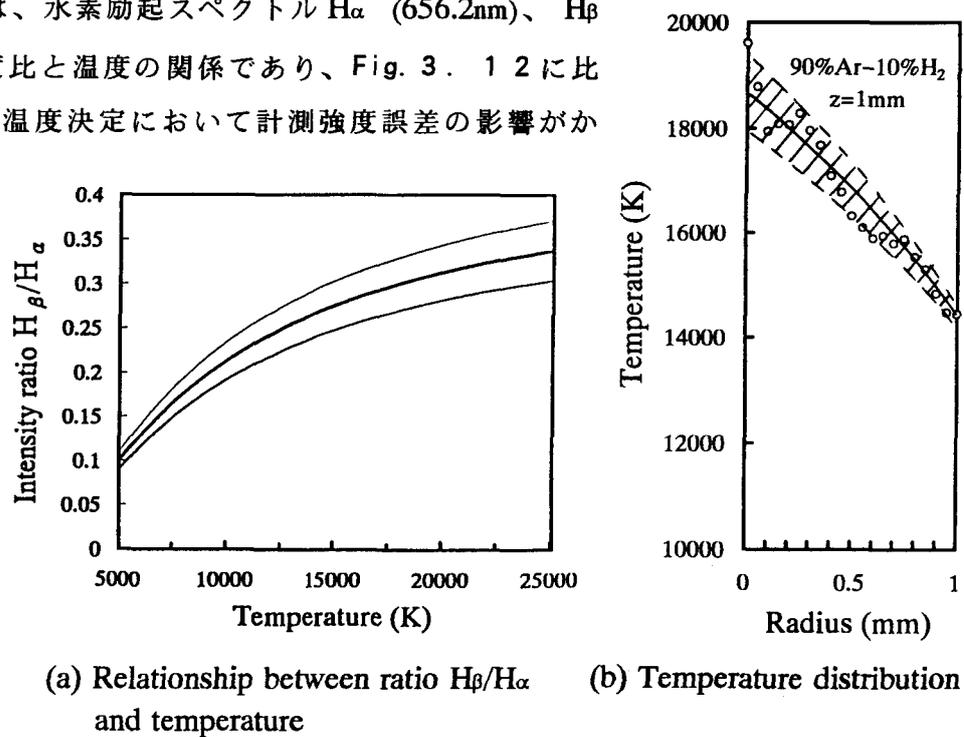


Fig. 3. 14 Theoretical relationship between ratio of relative intensities of hydrogen atom and temperature, and measured temperature distribution in 90%Ar-10%H₂ arc

以上の結果において、本法では、

前項までの方法より、計測強度比の誤差が温度決定に強く現れる可能性があること、また同様に遷移確率の相対比の誤差が温度評価に強く現れることから、計測温度に大きなバラツキを生じ易いことを示した。精度の上でこのように大きな問題が残ることを理解した上で、結果として、例えば 10% 水素混合ガスアークにおいては、水素スペクトル強度比から決定した温度が最も高く、次いで Ar II /Ar II 強度比からの温度、そして Ar I /Ar I 強度比からの温度の順に 1,000 ~ 2,000K 程度ずつ低く評価される傾向にある。

ボルツマンプロット法は、局所熱平衡近似を仮定する必要もなく、各粒子毎の励起温度が計測できる有効な分析法であるが、計測誤差や分光データの未整備等から温度結果が大きくバラツキ易く、温度分布等のプラズマ状態を詳細に比較・検討する場合には、現状においてはあまり適切な方法ではないと判断された。

3. 4 結 言

各種分光的プラズマ診断法によるアークプラズマの計測温度が、必ずしも一致しないことが指摘されている。このため、本章では、アーク電流 100A のアークプラズマを対象に、種々の発光分光分析法を適用して、陰極下 1mm (z=1mm) でのアークプラズマの温度分布を比較・検討し、分光法によるアークプラズマの定量評価の可能性を検討した。ここでは、アルゴンガスアークを基準において、アルゴンに水素を混合した場合と一部アルゴンにヘリウムを混合した場合の温度分布を検討し、このときの問題点を抽出した。

以下に得られた結果をまとめた。

- (1) 各種の分光分析法におけるアークプラズマの計測温度結果の特徴を明らかにした。
 - ・ Ar II /Ar II、Ar I /Ar I 及び H β /H α 相対強度比法では、計測誤差や遷移確率値の誤差に評価温度は強く支配され、評価温度にはバラツキが大きい。
 - ・ Fowler-Milne 法、Ar II /Ar I 二線強度比法では、変動の少ない再現性のある温度分布が得られる。
- (2) Fowler-Milne 法、Ar II /Ar I 二線強度比法が、プラズマの状態解析に有効であり、一方、相対強度比法は、現状においては詳細なプラズマの状態解析に適さない。
- (3) アルゴンガスアークでは、Fowler-Milne 法、Ar II /Ar I 二線強度比法、Ar II /Ar II および Ar I /Ar I 相対強度比法での評価温度は、ほぼ一致している。
- (4) すなわち、Ar I /Ar I 相対強度比法での評価温度が低い温度を与えるとする従来からの指摘は、必ずしも正しくない。
- (5) 90%Ar-10%H $_2$ 混合ガスアークにおいては、アルゴンガスアークの場合とは異なり、温度分布は分光分析法によってそれぞれに異なる計測結果となる。
 - ・ Ar II /Ar I 二線強度比法と Ar II /Ar II 相対強度比法での評価温度分布は同等である。

- ・ Ar I /Ar I 相対強度比法では、Ar II /Ar I 二線強度比法等の評価温度より低くなる。
- ・ H β /H α 相対強度比法では、Ar II /Ar I 二線強度比法等での計測温度より高くなる。
- ・ Ar I スペクトルによる Fowler-Milne 法では、Ar II /Ar I 二線強度比法等での計測温度より高くなる。
- ・ 水素スペクトルによる Fowler-Milne 法では、Ar II /Ar I 二線強度比法等での計測温度より低くなる。

(6)75%Ar-25%He 混合ガスアークにおいても、Ar I スペクトルによる Fowler-Milne 法ではアルゴンガスアークより高い温度分布を示したが、Ar II /Ar I 二線強度比法では、アルゴンガスアークの場合とほぼ同等の温度分布となる。

以上のように、アルゴン - 水素混合ガスアークやアルゴン - ヘリウム混合ガスアークにおいては、各分光法によって計測温度がそれぞれ異なって評価されるという問題点が存在することを明らかにした。

第4章 質量分析法による陽極母板面上の プラズマガス組成の評価

4. 1 緒言

第3章においては、陰極近傍のアークプラズマを対象に検討し、アルゴンガスアークでは、種々の発光分光分析法から評価された温度はほぼ同一で、局所熱平衡を仮定しても矛盾を生じないが、アルゴンガスアークに水素やヘリウムを混合した場合には、種々の発光分光分析法によって、それぞれ異なったアーク温度分布に計測されることを明らかにした。このことから、アルゴンガスアークに水素やヘリウムを混合した場合には、プラズマを局所熱平衡の状態にあるとして近似的に取り扱えなくなるように思われる。

しかし、第2章のアルゴン・ヘリウム混合ガスの最大アーク圧力特性において、ヘリウムガスアークにアルゴンを添加してもアーク圧力は変化しないが、逆にアルゴンガスアークにヘリウムを電極先端より上方に添加するとき、アーク圧力が急激に低下することを示した。この結果から、異種ガスを混合する場合に電極先端近傍部に侵入し易いガスと侵入しがたいガスがあるように推察された。このことは、アーク中とくに陰極近傍の混合ガス比率が供給したシールドガスの混合比率と必ずしも同一ではないことを示唆している。

従来、溶接アーク現象において、アーク中でも均一にガスは混合されているという観点で扱われ、第3章での分光分析においてもそのように扱ってきたことから、上述の推察はアーク現象解明において注目される。

そこで本章では、予め混合して供給されたシールドガスの組成割合がアーク中において変化する可能性があるか否かを明らかにすることを目的にした。このため陽極面近傍におけるアークプラズマガスを採取してそのガス組成を質量分析器によって計測・評価する方法を開発し、アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気下において陽極面上のプラズマガスの組成分布を検討した。なお、比較のために、アルゴン-窒素混合ガス雰囲気についても検討した。

4. 2 実験方法

4. 2. 1 TIGアーク発生装置

Fig. 4. 1は、アーク発生装置の概略図であり、陰極は、前章までと同様、先端角45°の径3.2mmの2%トリア入りタンゲステンである。陽極には、中心部にプラズマガスを採取するための0.5mmφの孔を設けた図中に示す構造の水冷銅板を用いた。なお水冷銅板は水平方向に移動するステージ上に設置した。また、シールドガス

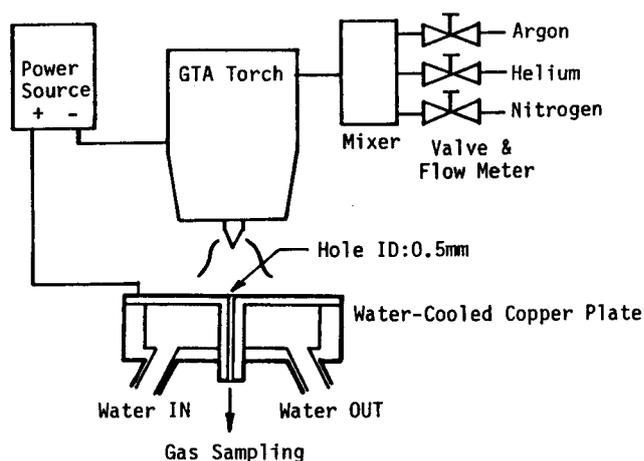


Fig. 4. 1 Setup of GTA system

の全流量は、原則として 20ℓ/min とした。

4. 2. 2 ガス分析装置

本実験では、母板上の採取されたプラズマガスを直結された質量分析法にてガス分析する手法を採用することとした。この手法によって、不純ガスが混入しない安定した計測が可能になる。Fig. 4. 2 に本ガス分析システムの系統図を示した。本システムは、真空容器のリークテストに用いられる手法³⁾⁹⁾を応用したものである。システムは、アークプラズマ中のガスをロータリーポンプにより、常時水冷銅板測定孔より吸引するガスサンプリング系と、ロータリーポンプと油拡散ポンプから成る高真空排気装置に組み込まれた四重極型質量分析器（日電アネルバ製 AGA100）のガス分析系とで構成される。

ガスサンプリング系では、ガス採取によってアークに乱れを生じさせない微量ガス吸入量に設定するため、および測定の実現性を確保するために、ニードルバルブのかわりに、内径 0.13mm の長さ 50mm のステンレスパイプを挿入した。この場合の吸入量は、25℃の空気を分子流として計算すると近似的に 5.5cc/s である⁴⁾⁹⁾。またガス採取時にアーク電圧に変化がないことおよびアーク外観に乱れがないことを確認して実験した。なおパイプ装着した場合、母板上のガス組成割合の変化に対して分析計が安定値を示すまでに 11 秒を要した。

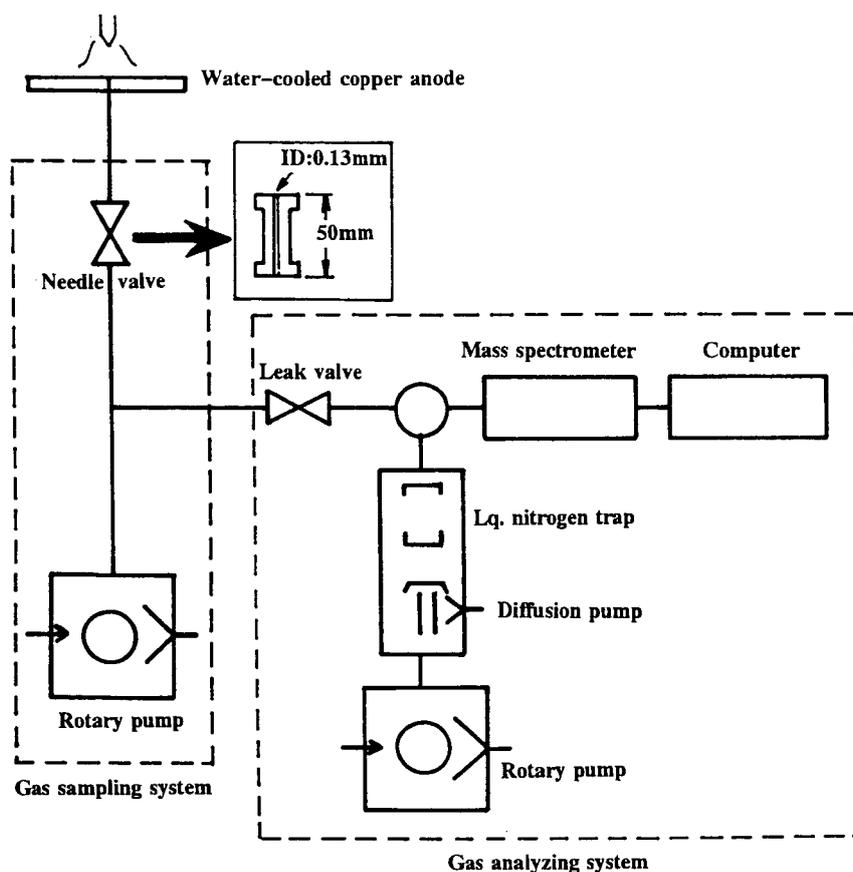


Fig. 4. 2 Schematic configuration for measurement of plasma gas composition by mass spectrometer

ガス分析系では、吸入系の途中に設置したバリアブル・リークバルブを調整することによって、試料ガスの一部を 10^{-9} Pa の高真空室内の質量分析部に 10^{-8} Pa まで取り込み分析する。なお、 10^{-9} Pa の高真空室内には水素ガスのみが残留ガスとして計測されるので、水素混合ガスアークにおいては分析が極めて困難であり、実験できなかった。アルゴン-ヘリウム混合ガスアークでの評価においては、水素の分析ピーク値が一定の低レベル以下に下がることを確認した後実験を遂行することによって、データの再現性を得た。

以上、質量分析器によるガス分析システムの特徴は、極めて微量のガスの採取でガス組成分析が可能となるようにしたことである。

4. 2. 3 ガス組成の評価法

Fig. 4. 3 はアルゴンとヘリウムの混合ガスを質量分析器で分析したマススペクトル波形例である。ここでの波形は、質量数 3 から 40 間で掃引した場合のアルゴンとヘリウムのスペクトルで、四重極フィルタでは質量数に係わらず図のようにスペクトル幅をほぼ一定に調整して、分解能を質量数に対して一定にしている。したがってアルゴンとヘリウムのマススペクトルの強度をスペクトルの面積ではなく、ピーク値 H_{Ar} と H_{He} で代表させ、その比率でもってそれぞれのガス分圧を計測することとした⁴⁰⁾。

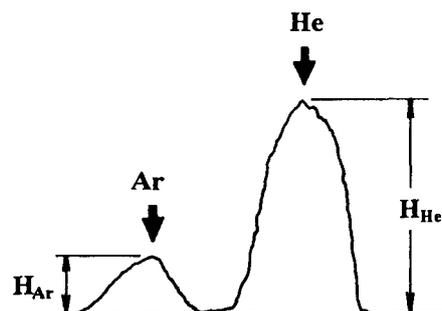


Fig. 4. 3 Example of mass spectrum waveform

Fig. 4. 4 は、アークを発生しないでヘリウムとアルゴンの混合シールドガスを流した場合で、水冷銅板を水平方向に移動して得られた銅板上の採取ガスの H_{He}/H_{Ar} 値の分布である。銅板上での H_{He}/H_{Ar} 値の分布は、ほぼ一定で、アルゴンとヘリウムの分圧はほぼ一定であると判断できる。すなわち、シールドガス中では、アルゴンとヘリウムが均一に混合していることを示している。ガスの流れによって H_{He}/H_{Ar} 値が安定した値となるかを検討するため、シールドカップ（内径 20mm）の代わりに内径 2mm のノズルを用いて銅板上へ 2mm 上方から 20l/min の混合ガス噴流を吹き付けたが、Fig. 4. 4 の H_{He}/H_{Ar} 値とに差異はなかった。

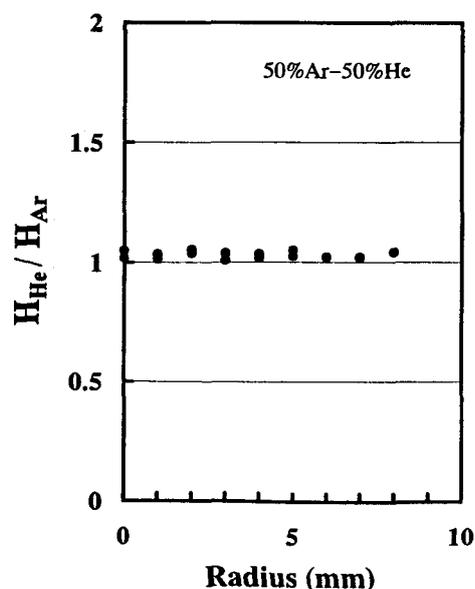


Fig. 4. 4 Distribution of ratio of spectrum intensities (H_{He}/H_{Ar}) in Ar-He shielding gas flow

したがって、シールドガスの流し方で H_{He}/H_{Ar} 比が変化しないことから、シールドガスの混合率に対応した

H_{He}/H_{Ar} 値（ガス分圧比）を予め実測しておけば、採取したガスの H_{He}/H_{Ar} 値からその組成を求めることができるかと判断した。

Fig. 4. 5 は、アークを発生しないで種々に混合率を変化したシールドガスを流した場合に計測された H_{He}/H_{Ar} 値であり、シールドガス組成との関係をまとめた図である。これをガス組成計測のための校正図とした。今、採取したガスの H_{He}/H_{Ar} 値が図中の例 1.6 と測定されれば、その採取ガスの組成としてヘリウム濃度が 60.6% と計測される。全実験において Fig. 4. 2 の装置構成、配管等を変更せず、この校正手法によってガス組成を決定した。

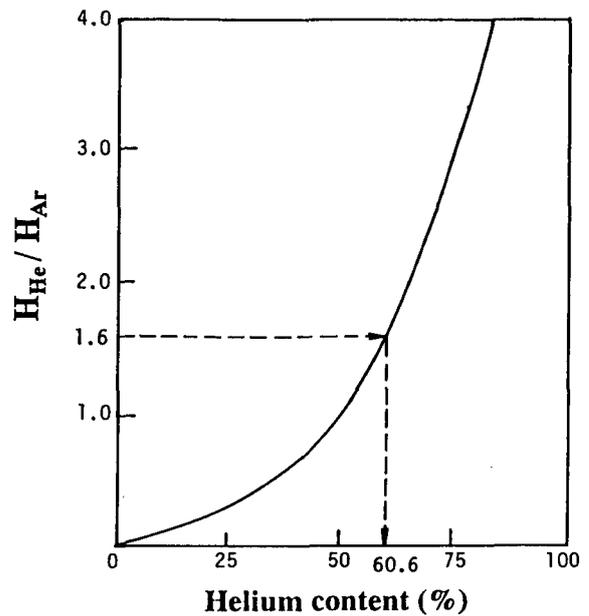


Fig. 4. 5 Calibration curve to obtain helium concentration from spectrum intensity ratio (H_{He}/H_{Ar})

4. 3 混合ガスアークにおける水冷銅陽極板上のガス組成

4. 3. 1 アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるプラズマガス組成の特徴

Fig. 4. 6 は、アーク長 3mm、アーク電流 200A のアークを点弧した場合の陽極表面上のプラズマガス組成分布（実線）を示したものである。ただし、この結果は濃度に換算はせず、スペクトル比 H_{He}/H_{Ar} で示してある。なお、Fig. 4. 4 のアーク発生前のシールドガスのみを流した場合の陽極表面上のガス組成分布（破線）も併せて示した。アーク点弧前では、均一なガス組成分布を示すが、アークの点弧によりアーク中心部で H_{He}/H_{Ar} 値が急増し、ヘリウムのスペクトル強度がアルゴンのスペクトル強度に対して相対的に強まることがわかる。すなわちアークの発生によって陽極面上のガス組成分布が急変する。

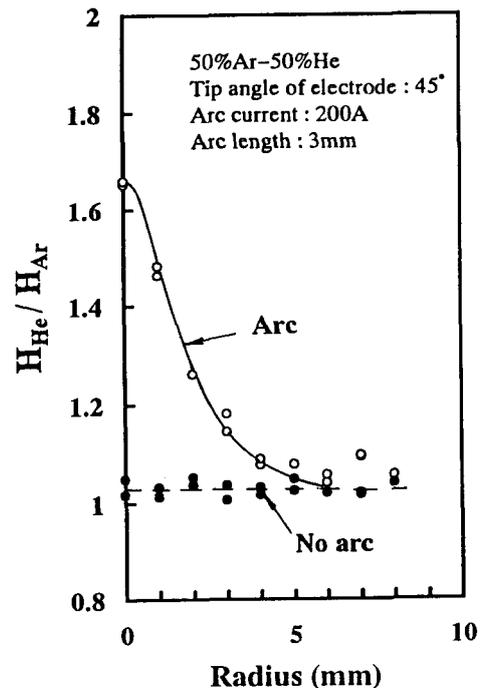
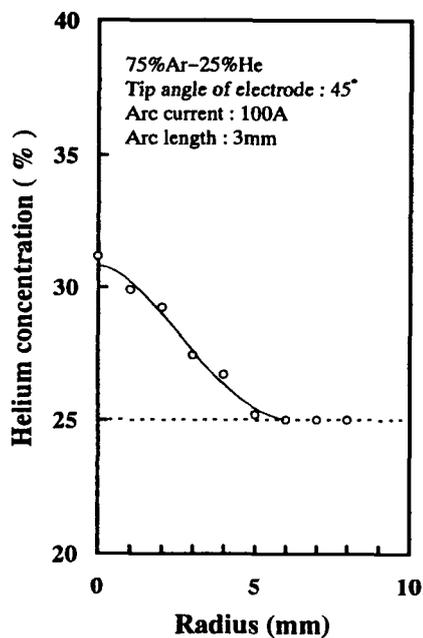


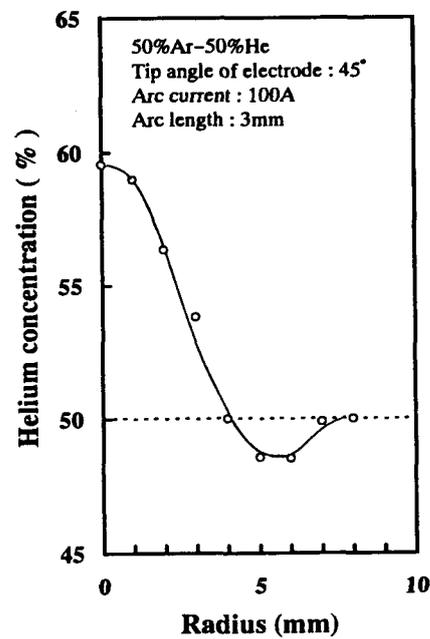
Fig. 4. 6 Change of distribution of spectrum intensity ratio H_{He}/H_{Ar} caused by arc

Fig. 4. 7 は、アーク長 3mm、アーク電流 100A において、アルゴンとヘリウムの混合シールドガス組成を (a) 75%Ar-25%He、(b) 50%Ar-50%He、(c) 25%Ar-75%He と変化した場合の陽極表面上でのプ

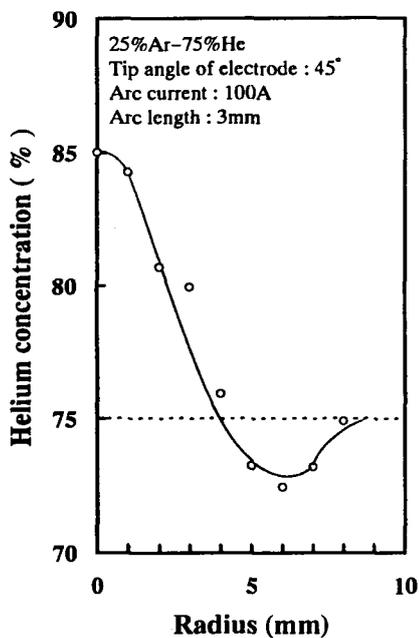
ラズマガス組成分布の計測結果である。計測結果の分布パターンから、(1) アーク中心軸部でヘリウム濃度が供給シールドガスでの濃度より増加し、中心部から離れるにしたがって、単調に減少し、やがて供給シールドガスの組成に等しくなるものと、(2) アーク中心軸部でヘリウム濃度の高い領域が存在しているが、中心から離れるにしたがい、逆にヘリウム濃度の低い領域、すなわちアルゴン濃度の僅かに高い領域が現れ、やがて供給シールドガス濃度になるもの、の2形態があることがわかる。



(a) 75%Ar-25%He



(b) 50%Ar-50%He

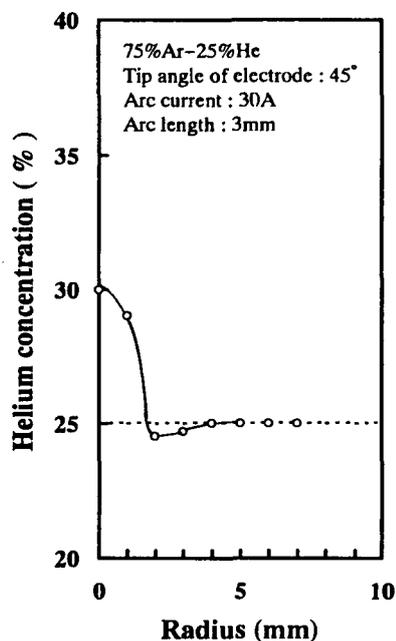


(c) 25%Ar-75%He

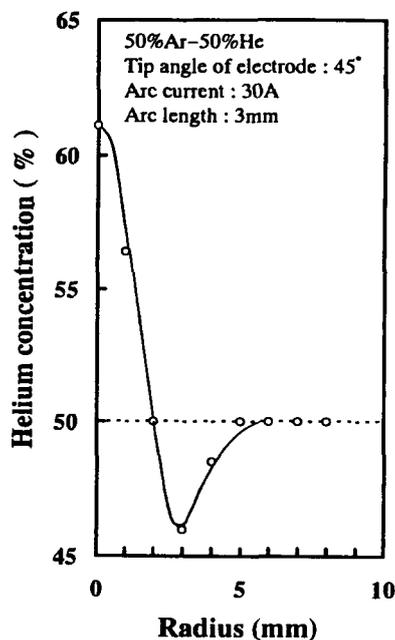
Fig. 4. 7 Helium concentration distributions at the anode surface in 100A Ar-He mixed gas arcs

ここでの重要な結果は、これらのいずれの結果からもアーク中心軸近傍でのヘリウム濃度は、供給されたシールドガスのヘリウム濃度より高くなることである。また、アルゴン濃度が高く計測される領域が存在することから、本計測システムにおいて、とくにヘリウムが選択的に質量分析部に吸引されることは無いと考えられる。

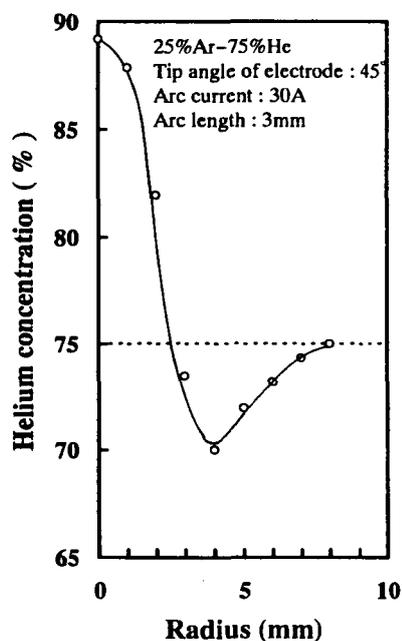
Fig. 4. 8 は、アーク長 3mm で、アーク電流 30A と 200A とにおいて、アルゴン - ヘリウム



(a) 30A, 75%Ar-25%He

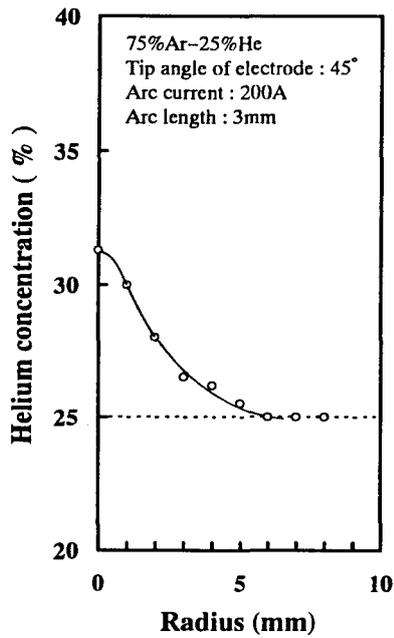


(b) 30A, 50%Ar-50%He

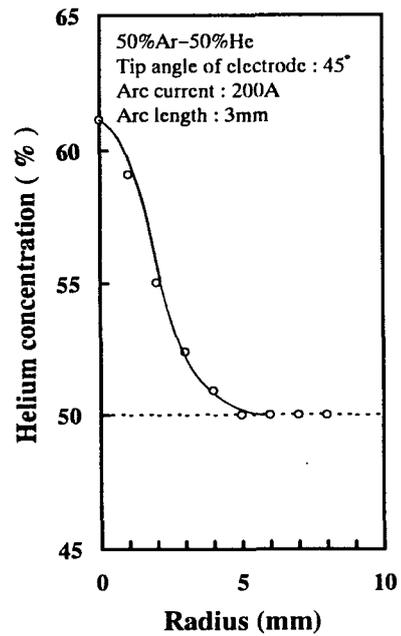


(c) 30A, 25%Ar-75%He

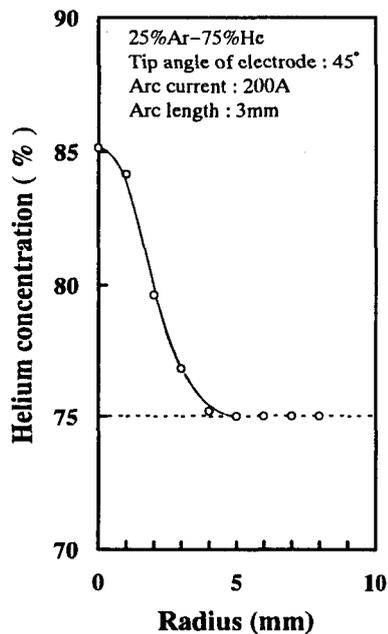
Fig. 4. 8 Helium concentration distributions at the anode surface in 30A and 200A Ar-He mixed gas arcs



(d) 200A, 75%Ar-25%He



(e) 200A, 50%Ar-50%He



(f) 200A, 25%Ar-75%He

Fig. 4. 8 Helium concentration distributions at the anode surface in 30A and 200A Ar-He mixed gas arcs

ムの混合シールドガス組成を変化した場合のプラズマガス組成分布の計測結果である。Fig. 4. 7の結果と併せて比較すると、同一シールドガス組成毎で電流を変化させてアークの状態を大きく変動させてもアーク中心部へヘリウムが集中する特性に変化はなく、濃縮したヘリウム濃度値も顕著に変化しない結果となっている。

一方、計測されたガス組成分布に関しては、アーク中心軸上を流れてきたプラズマガス流が

母板に衝突して母板表面上を放射状に流れており、アークプラズマ中のガス組成分布を示すものではないことに注意すべきである。Fig. 4. 7 および Fig. 4. 8 の分布において、供給シールドガス中のヘリウム混合率が高い、もしくはアーク電流の低いアーク発生条件において、すなわちプラズマ気流が弱い条件（2. 3. 2 項参照）の場合に、アルゴン濃度の高まる領域が計測されることを示している。ちなみに Fig. 4. 9 は、電極先端尖角を 120° にしてプラズマ気流を弱めた場合で、アルゴン濃度の高まる領域が、より高電流、高アルゴン濃度シールドガス等のアーク発生条件で計測されるようになることを示している。アーク中心軸部でヘリウム濃度が高まることは、当然逆にヘリウム濃度の低い（アルゴン濃度の高い）層が、いずれのアーク発生条件においても存在しているはずである。プラズマ気流の強い場合には、母板表面をアーク中心軸領域からの輸送されたガスの放射流が勢いよく流れているため、母板表面の薄い層からのみ採取され、アーク中心軸領域からの放射流のガス組成の影響が現れるが、プラズマ気流が弱い場合には、母板表面からより上方のプラズマ領域のガスも採取される。このため、ヘリウム濃度の高まった領域の周囲を取り囲んでいるアルゴン濃度の高まった領域の影響が現れるものと考えられる。

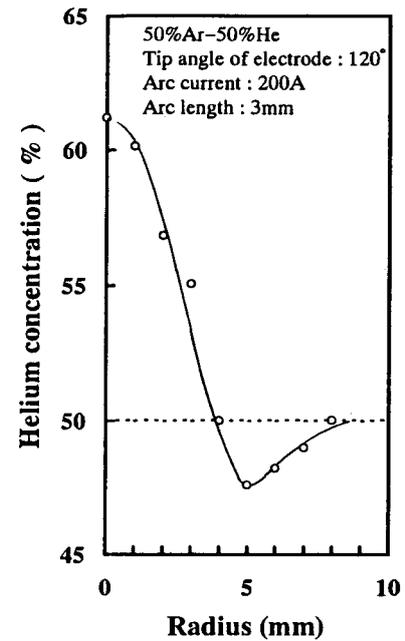
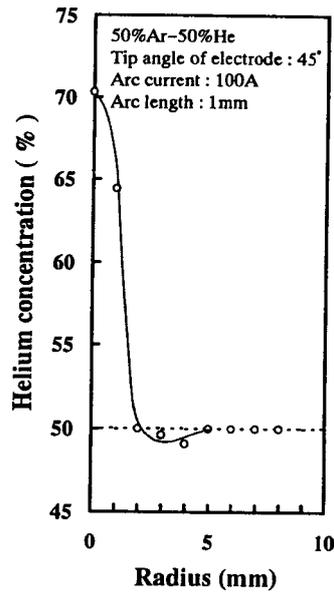


Fig. 4. 9 Helium concentration distribution at anode surface in case of electrode with the tip angle 120°

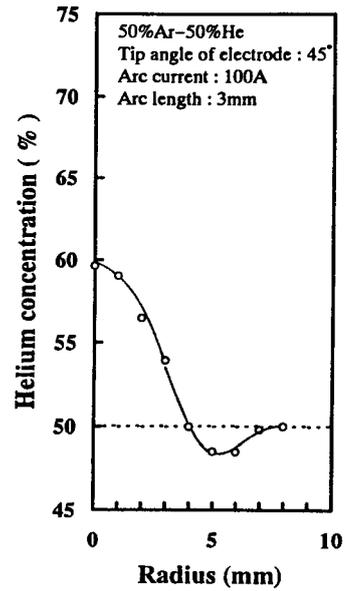
4. 3. 2 プラズマガス組成に及ぼすアーク長の影響

Fig. 4. 10 は、50%Ar-50%He 混合シールドガスでアーク電流を 100A 一定とし、アーク長 1mm から 10mm まで変化したときの陽極上のプラズマガス組成分布である。アーク長 1mm ではアーク中心軸部のヘリウム濃度は極めて高くなる。そしてアーク長の増加にともなって中心軸近傍のヘリウムは周辺部へ拡散して急激に濃度が低下し、分布も広がっていく。この傾向は、異なるアルゴン - ヘリウムシールドガス組成の場合においても同様である。ただし、母板表面には放射流としてアーク中心軸領域からのガスが輸送されているため、アーク中心軸部での組成のガスの影響が採取ガスに含まれる。したがって、アーク直下の陽極面の中心の淀み点におけるヘリウム濃度のみがアークプラズマ内部の状態を反映するものと考えられる。

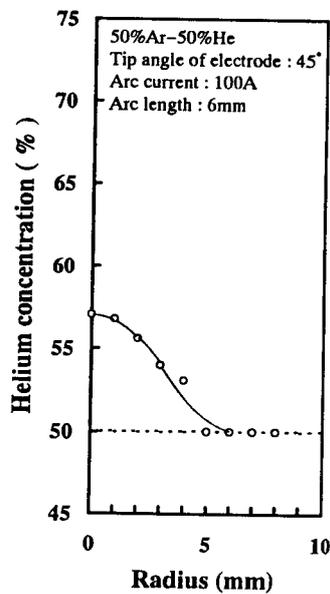
そこで、Fig. 4. 11 は、Fig. 4. 10 の結果を含めて各種シールドガス組成におけるアーク中心でのヘリウム濃度とアーク長の関係を示したものである。いずれのシールドガス組成においてもアーク長の増大によってアーク中心でのヘリウム濃度が急激に減衰する。このことか



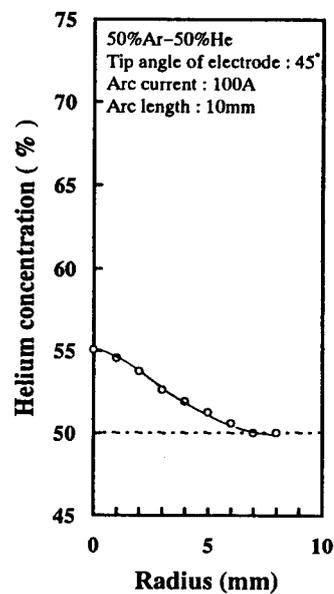
(a) Arc length = 1mm



(b) Arc length = 3mm



(c) Arc length = 6mm



(d) Arc length = 10mm

Fig. 4. 10 Helium concentration distributions as a function of arc length

ら、ヘリウムのアーク中心軸近傍への濃化現象は電極先端近傍の現象に起因するものと判断される。Fig. 4. 12は、陰極近傍でのプラズマガス組成を推定する観点から、アーク長1mmのときのアーク中心軸直下でのヘリウム濃度と予め混合されて供給されたシールドガスのヘリウムガス濃度との関係をまとめて示したものである。図中の破線はシールドガス中に予め混合したヘリウム濃度である。シールドガス中のヘリウム濃度とプラズマガスの計測ヘリウム濃度を比較すると、アルゴンガスアークに微量のヘリウムを添加する場合にはアーク中心部に効率

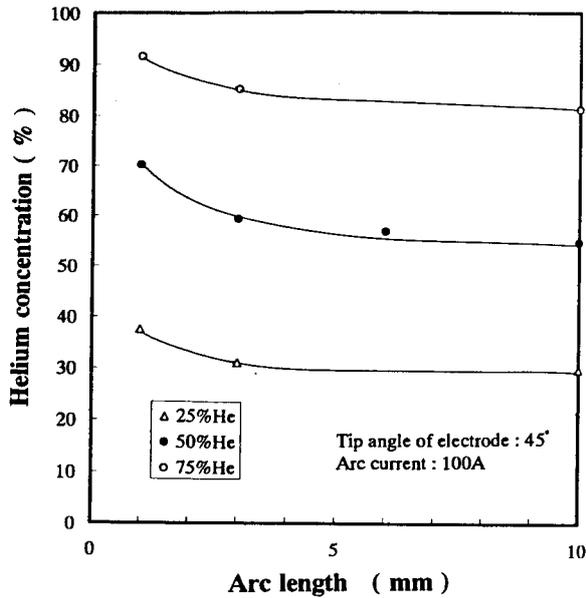


Fig. 4. 11 Helium concentration at the arc center as a function of arc length

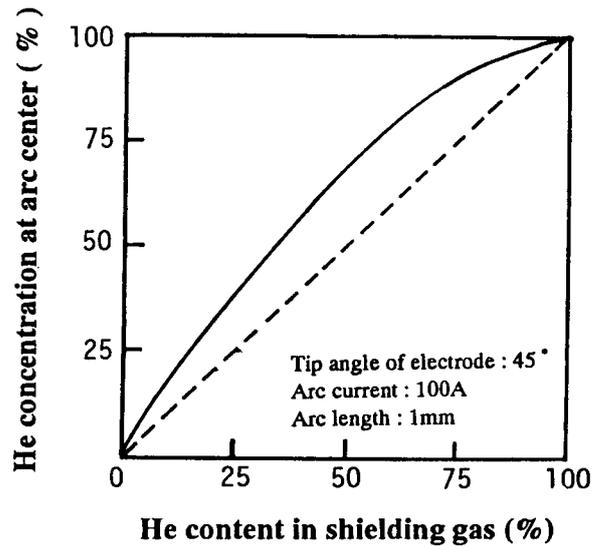


Fig. 4. 12 Relationship between helium concentration at the arc center and helium content in shielding gas

よくヘリウムが侵入して濃化するが、ヘリウムガスアーク中に微量のアルゴンを添加してもアーク中心部にアルゴンは侵入しにくいという結果となることを示している。

4. 3. 3 窒素微量添加によるプラズマガス組成分布の変化

窒素を添加した場合のガス組成計測法は、アルゴン-ヘリウム混合ガスの計測手法と全く同じである。ただし、窒素スペクトルとしては、窒素分子 (N_2) スペクトルを用いた。また、Fig. 4. 7 および Fig. 4. 8 の結果から電流によってアーク中心部でのヘリウム濃縮現象に大差が無いことから、ここでは陽極の局部溶融を生じないで安定計測が可能なアーク電流 30A での窒素混合によるプラズマガス組成分布の変化について定性的な傾向を調べた。

Fig. 4. 13 は、アーク長 3mm のヘリウムガスアーク中に窒素を添加したときのプラズマガス組成分布(a)と、アルゴンガスアーク中に窒素を添加したときのプラズマガス組成分布(b)を示したものである。この結果から、ヘリウムガスアークではアーク中心軸近傍でヘリウムが濃縮し、窒素は添加された濃度より低い濃度となるが、アルゴンガスアークではアルゴンと窒素はほとんど均一に混合した分布となることがわかる。すなわち、ヘリウムシールドガス中へ窒素を添加しても窒素はアーク中心軸部へ侵入しにくい。これはヘリウムガスアーク中へアルゴンが侵入しにくいことと同じ傾向である。一方、アルゴンと窒素間においては、各ガスの挙動に大きな差異がないことを示している。

以上の結果から、アルゴン-ヘリウム混合ガスアーク、ヘリウム-窒素混合ガスアークおよ

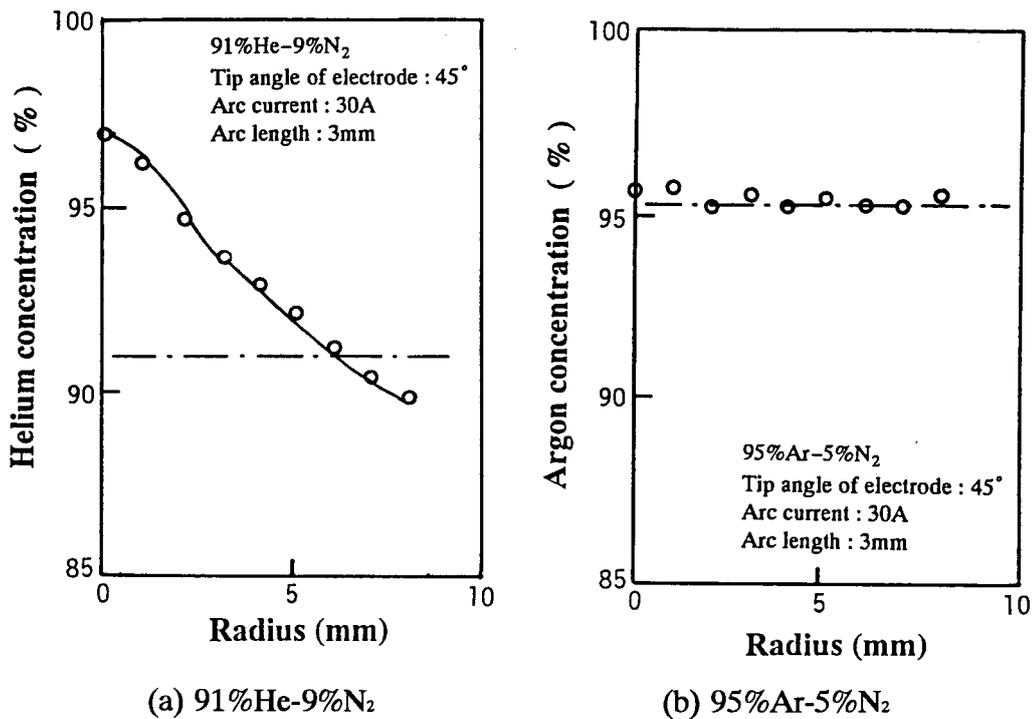


Fig. 4. 13 Concentration distribution of helium and argon in helium arc and argon arc respectively upon introduction of nitrogen

びアルゴン - 窒素混合ガスアークにおいて、ガスの組み合わせによりプラズマガス組成が予め混合されたシールドガス組成から大きく変化することも、変化しないこともあることを明らかにした。

4. 4 結 言

本章では、前章までに明らかにした混合ガス雰囲気におけるアーク現象等から、プラズマ中のガス組成が雰囲気中のガス組成と異なると予測し、プラズマガスを直接採取してガス分析することによってプラズマガス組成を明らかにすることを目的とした。そこで、プラズマにできる限り擾乱を与えず安定にガスを採取し、そのガス組成を質量分析器により計測するシステムの開発を行い、この手法によって以下の結果を得た。

- (1) アルゴン - ヘリウム混合ガス雰囲気下においてアークを点弧するとき、陽極面上のアーク中心軸部近傍の領域でヘリウム濃度が高くなる。
- (2) 種々のアーク発生条件においても、陽極表面のアークプラズマガスは、予め混合して供給されたシールドガス組成割合とは異なったガス組成で存在し、いずれのアーク発生条件でもアーク中心下近傍にはヘリウム濃度の高い領域が存在する。またその周囲にアルゴン濃度の高い領域が計測されるアーク発生条件がある。
- (3) アーク長が短いほどアーク中心軸近傍でヘリウム濃度が高くなり、アーク長の増加とともに

にヘリウム濃度は減少して、シールドガス組成に漸近していく。

- (4) アルゴンガスアーク中に微量のヘリウムを混合するときアーク中心軸部でのヘリウム濃度はシールドガスでの濃度の2倍近くまで高くなるが、逆にヘリウムガスアーク中に微量のアルゴンを添加してもアーク中心軸部でのヘリウム濃度は僅かしか低下しない。
- (5) アルゴンガスアークで微量の窒素を添加した場合、プラズマ中ではアルゴンと窒素はほぼ均一に混合して分布する。ヘリウムガスアークではアーク中心軸近傍にはヘリウムが優先的に侵入し、窒素は添加された濃度より低い濃度で存在する。

第5章 混合ガスアークプラズマにおけるガス組成と 温度の状態解析

— 発光分光法による混合ガスアークプラズマの状態解析 —

5.1 緒言

混合ガス雰囲気として、アルゴン-ヘリウム、アルゴン-水素を主たる対象として取り上げてきたが、実験上の制約もあり、必ずしも全ての実験結果が系統的に整備されていない。

そこで本章においては、アルゴンを基準として、電離電圧がより高いヘリウムと電離電圧が若干低い水素を混合した雰囲気下でのプラズマの状態を系統的に解析する。

前章において、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークプラズマ中で必ずしも均一にガスが混合していないことを示した。また、小アーク長に近づくほどこの現象が顕著となることから、陰極近傍のプラズマのガス組成が最も顕著に不均一な分布を示すと考えられる。

しかしながら、このことは陽極面上のガス分析結果から間接的にプラズマ中の状態を推測したもので、直接プラズマ中のガス組成を計測して、評価したものではない。

本章では直接プラズマ中の状態を評価するための解析手法について検討する。具体的には、第3章において分光計測したスペクトル強度データを用い、プラズマが局所熱平衡状態にあるものと仮定して、混合ガス組成が未知である場合の発光分光分析としての新たな解析手法を検討する。これによって、第3章での混合ガスアークプラズマの温度分布に生じた問題点の解決を図る。

5.2 各種ガス混合雰囲気におけるアークプラズマの輝線スペクトル強度 分布特性

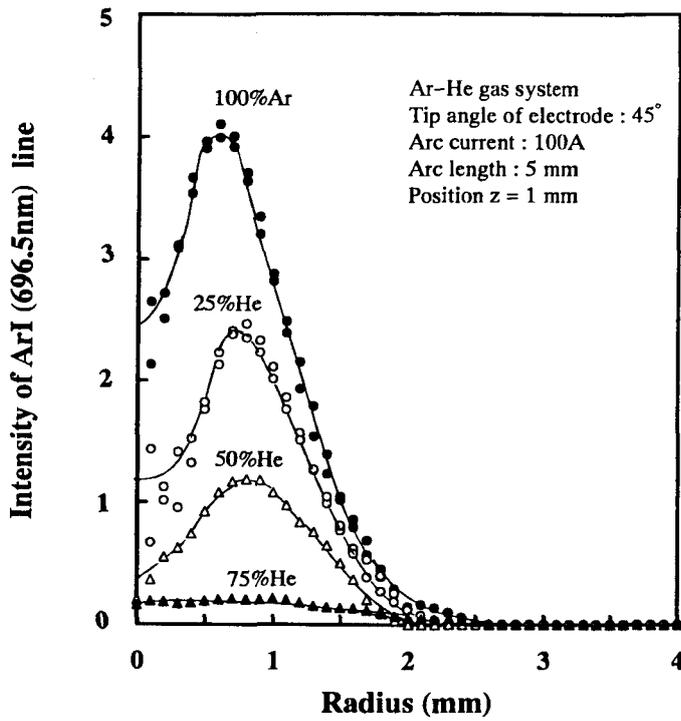
本節では、プラズマ中での各種粒子からの輝線スペクトルの強度分布の特徴について示す。アーク発生装置や輝線スペクトルの計測およびデータ処理手法は、全て第3章で用いた手法と同じである。したがって、本章で用いるスペクトル強度のデータは、基本的に第3章のデータと同じものである。ただし、本章で用いるデータは、1回のアーク発生から消弧までの間に連続して計測されたものである。本論文では、このようなデータをシリーズデータと仮称し、これらを用いた。

5.2.1 アルゴン-ヘリウム混合ガスアークのスペクトル強度分布の特徴

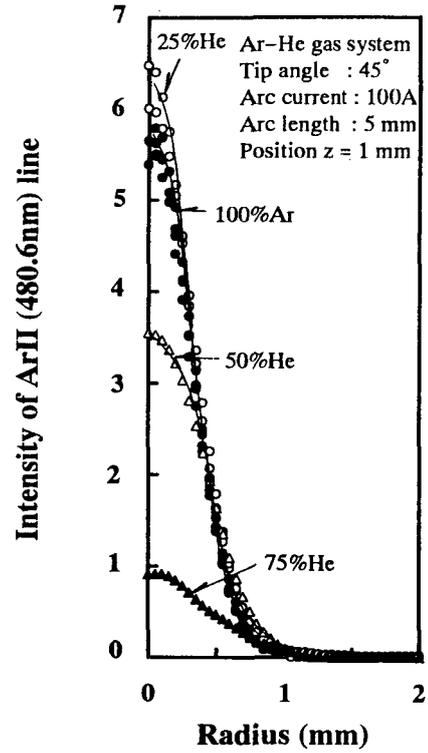
Fig. 5. 1は、アーク長5mm、アーク電流100Aのアルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおける電極下1mm ($z=1\text{mm}$)のプラズマでのAr I、Ar IIおよびHe Iそれぞれのスペクトル強度分布である。

アルゴンガスアークの場合のAr IおよびAr IIスペクトルの強度分布を基準において、ヘ

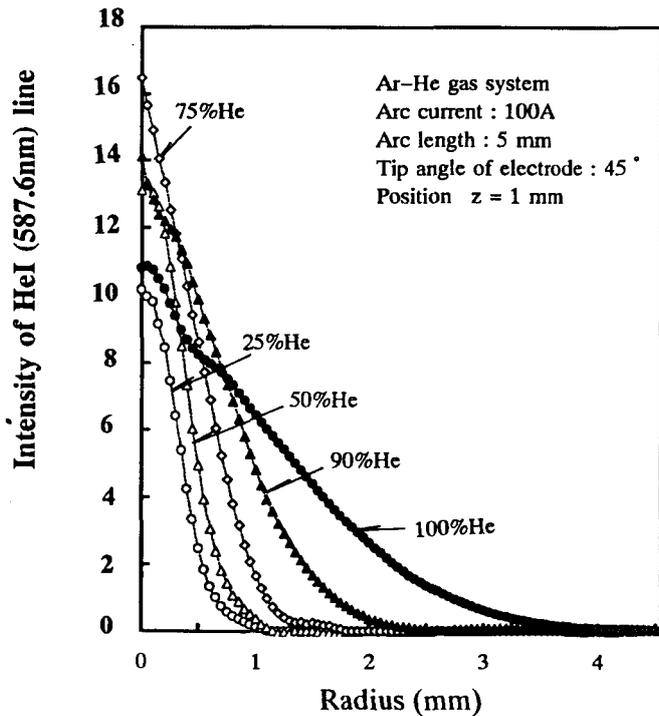
リウムを混合した場合の Ar I および Ar II スペクトル強度分布の変化の特徴は、以下の点にある。



(a) Ar I line



(b) Ar II line



(c) He I line

Fig. 5. 1 Intensity distributions of Ar I , Ar II and He I lines in Ar-He mixed gas arcs

アルゴンガスアーク中にヘリウムを混合するにともない、Ar I (696.5nm)の強度分布は、低下する。とくに Ar I スペクトル強度分布の最大スペクトル強度 (off-axis 最大放射強度) は、急激に低下していく。一方、その周囲のアーク軸から 1.5mm ほど離れた領域での強度は、25%ヘリウムを混合してもアルゴンガスアークでの強度とほとんど変わらず、最大放射強度のような急激な低下を示さないことである。また、Ar II (480.6nm)強度分布は、ヘリウムを 25%混合してもあまり低下しない(ただし、低下する場合もある。z=1mm より少しでも大きくなると低下する。ここで低下しないことに注目する必要はない)が、それ以上混合する場合には急激に低下していく。

一方、He I スペクトル強度は、25%He 組成においても、アーク中心で高強度で計測され、75%He 組成まではその強度が増大し、それ以上の He 濃度では逆に減少する特徴がある。また、もう一つの特徴として、He I スペクトル強度分布の周辺での拡がり、ヘリウム濃度の増加とともに増大し、100%ヘリウム雰囲気では急激に拡大することである。

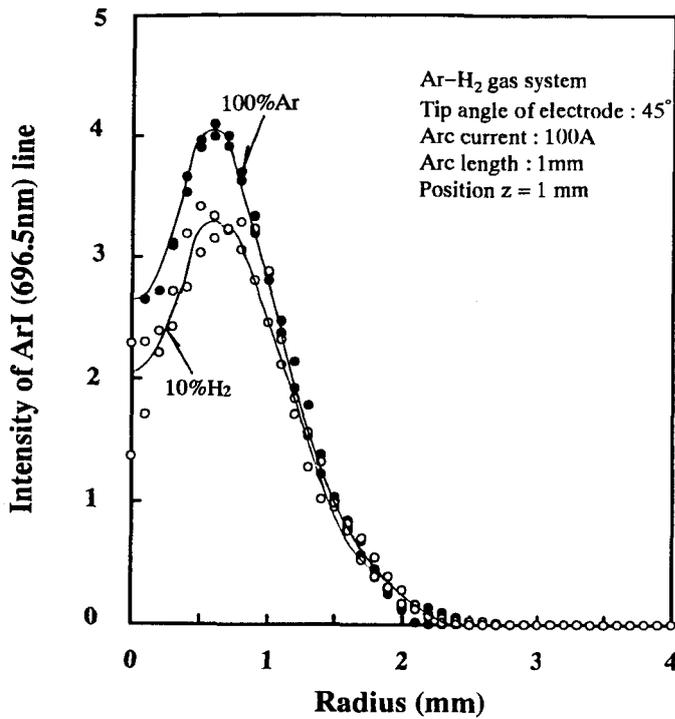
以上のようにヘリウム混合にともなう各種スペクトル強度の変化は、単純ではないが、基本的な特性は、アルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合、アーク中心軸から半径約 1mm の領域の Ar I のスペクトル強度にヘリウム混入の影響が強く現れること、一方ヘリウムガスアークにアルゴンを混合した場合、He I スペクトルの強度分布の周辺部にアルゴン混入の影響が現れ、分布が収縮することである。

これらデータの解析においては、第 4 章で示唆したようにアーク柱のガス組成分布が不均一になる可能性があること、各スペクトル強度が、(3. 1) 式からわかるように温度と対象粒子の密度(原子粒子あるいは一価電離粒子密度)の両因子によって決定されることに注意しなければならない。このため、本項では、スペクトル強度分布の特徴を定性的に述べるに留める。

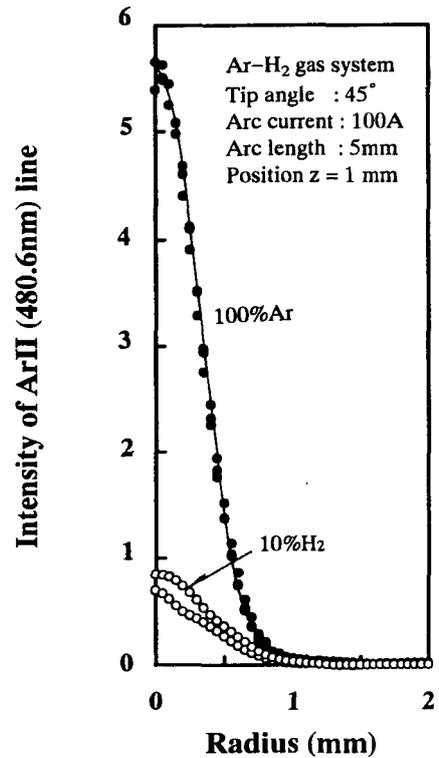
5. 2. 2 水素混合ガスアークにおけるスペクトル強度分布の特徴

Fig. 5. 2 は、アーク長 5mm、アーク電流 100A のアルゴンガスアークと 90%Ar-10%H₂ 混合ガスアークでの電極下 1mm における Ar I、Ar II スペクトルの強度分布である。水素の添加により、Ar I、Ar II スペクトル強度は、アーク中心軸から半径約 0.7mm 未満の領域で低下している。とくに水素混合によって Ar II 強度の低下が著しく、この変化傾向は、アルゴンに 25%ヘリウム混合した時の傾向と大きく異なる。なお、水素混合アークの中心部の温度は、第 3 章のボルツマンプロット法で示したようにパラッキは大きいと 10,000K 以上にあるため、水素はほとんど解離していると考えられ、水素原子濃度としては、アルゴンと水素が均一に混合していれば、約 18%となる。

Fig. 5. 3 は、ヘリウムガスアークと 95%He-5%H₂ 混合ガスアークの場合の He I スペクトル強度分布である。ヘリウムガスアークに水素を添加すると、He I スペクトル強度分布は、



(a) Ar I line



(b) Ar II line

Fig. 5. 2 Intensity distributions of Ar I and Ar II lines in 100%Ar and 90%Ar-10%H₂ arcs

全域にわたって急激に低下する。このことは、Fig. 5. 1 でヘリウムガスアークにアルゴンを混合した場合に、He I スペクトル強度がアーク中心部近傍で急増した結果と、全く逆の傾向を示している。異種ガス添加によるプラズマ状態の変化は、二成分ガスの組み合わせによって、大きく異なる。

以上、異種ガスをアルゴンガスアークに混合した場合のスペクトル強度分布の変化の特徴を整理した。これらのシリーズデータにおける各種スペクトルの相対的な強度関係を明確に説明するためには、すなわち詳細な異種ガス混合によるプラズマの状態の変化を評価するためには、温度と粒子密度を同時に評価する手法の開発が不可欠である。

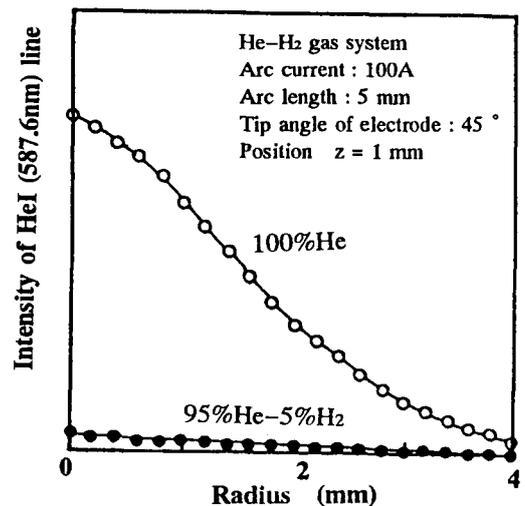


Fig. 5. 3 Intensity distributions of He I lines in 100%He and 95%He-5%H₂ arcs

5. 3 混合ガス雰囲気下におけるプラズマの状態解析

計測された輝線スペクトルの強度は、(3. 1)式で表されるように、この強度は局部領域のプラズマ温度と対象粒子の密度の両者に影響される。第3章では、プラズマ中でも供給されたシールドガスの組成であるとして温度を決定したが、ここでの扱いでは粒子密度も未知数となる。

そこで、粒子密度に無関係に温度が決定できれば、その後に粒子密度を算出することができる。このような温度の決定法が、第3章における同種、同状態にある粒子からのスペクトルを利用した相対強度比法（ボルツマンプロット法）である。しかしながら、第3章で示したように、相対強度比法では、計測誤差や分光データの精度の影響が計測温度に大きく現れる。このため詳細なプラズマの状態の分析には、現状において相対強度比法は不適である。

そこで、安定な温度評価ができた Fowler-Milne 法や Ar II /Ar I 二線強度比法の適用が考えられる。ただし、温度と粒子密度の2つの未知数があるので、これら両法の温度決定の考え方を利用して連立方程式を導出しなければならない。

5. 3. 1 混合ガスアークプラズマの状態解析のための構成方程式

アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気の場合について、連立方程式を導出する。

プラズマ中のある任意の位置における温度を T (K)、アルゴン原子密度 N_1 (m^{-3})、アルゴン一価イオン密度 N_2 (m^{-3})、ヘリウム原子密度 N_4 (m^{-3}) とすると、Ar I、Ar II、He I の各スペクトル強度 I_1 、 I_2 、 I_3 は、(3. 1)式より次式で示される。

$$I_1 = A_1 h \nu_1 N_1 \frac{g_1 \exp\left(-\frac{\epsilon_1}{kT}\right)}{Z_1(T)} \quad (5. 1)$$

$$I_2 = A_2 h \nu_2 N_2 \frac{g_2 \exp\left(-\frac{\epsilon_2}{kT}\right)}{Z_2(T)} \quad (5. 2)$$

$$I_3 = A_4 h \nu_4 N_4 \frac{g_4 \exp\left(-\frac{\epsilon_4}{kT}\right)}{Z_4(T)} \quad (5. 3)$$

ここで、プラズマが局所熱平衡で近似できると仮定すれば、Saha の熱電離平衡の関係が利用できる。10,000 K から 20,000 K の温度範囲でプラズマ状態を考察することになると、プラズマの構成粒子の種類は、Ar、Ar⁺、Ar⁺⁺、He、He⁺、電子 e⁻ である。それぞれの粒子密度を、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 (m^{-3}) で表す。このときの Saha の電離平衡式は、以下のように表される。

$$\frac{N_2 N_6}{N_1} = K_1(T) \quad (5.4)$$

$$\frac{N_3 N_6}{N_2} = K_2(T) \quad (5.5)$$

$$\frac{N_5 N_6}{N_4} = K_3(T) \quad (5.6)$$

$$N_2 + 2N_3 + N_5 = N_6 \quad (5.7)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 = \frac{p}{kT} \quad (5.8)$$

$$\frac{N_1 + N_2 + N_3}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5} = \frac{\alpha}{100} \quad (5.9)$$

$K_1(T)$: 一価アルゴンイオンの平衡定数⁸⁰⁾

$K_2(T)$: 二価アルゴンイオンの平衡定数³⁰⁾

$K_3(T)$: 一価ヘリウムイオンの平衡定数³⁰⁾

p : 雰囲気圧力

α : アルゴン濃度 (%)

以上の関係式を用いて、スペクトル強度が計測結果から既知であるとして、これらを満足する温度 T と、アルゴン濃度 α を算出すればよい。ここで未知数は、 T 、 α 、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 の 8 つであり、熱平衡式 6 つにスペクトル強度式から 2 つを選択すれば解が求まる。

なお、水素をアルゴンに混合する場合は、基本的にはヘリウムに関する記述を水素に関する式に置換するだけである。

5. 3. 2 構成方程式の解法

スペクトル強度式からは、アルゴンへのヘリウム混合の場合と水素混合の場合の双方に対応できる (5. 1)、(5. 2) 式を選択することにする。しかしこれら二式の強度は絶対強度として扱われているため、とくに第 3 章で述べたように遷移確率の誤差が入り易く、その影響が理論値と計測値にズレを生じさせる。またスペクトル計測時には、光学系全体における波長間の強度の絶対値補正が必要である。

そこで、これらのことを前提において、精度の高い結果を得るための解析手法について以下に述べる。今、計測強度を $measI_1$ および $measI_2$ とし、これらの波長での絶対値補正係数をそれぞれ ξ_1 、 ξ_2 とすると、

$$I_1 = \xi_1 \cdot measI_1$$

$$I_2 = \xi_2 \cdot measI_2$$

この二式の ξ_1 、 ξ_2 が決定できれば解を得ることができる。

ここでは、これらの絶対値補正係数の決定のための一手法について述べる。

まず、具体的には、100% アルゴン雰囲気における Ar I の最大放射強度 $I_{1,100}^*$ で (5. 1) 式を除する。 T^* および $N_{1,100}^*$ は、100% アルゴンでの最大強度となるときの波長によって決まる特性温度とそのときのアルゴン原子密度である。

$$I_{n1} = \frac{I_1}{I_{1,100}^*} = \frac{N_1}{N_{1,100}^*} \cdot \frac{Z_1(T^*)}{Z_1(T)} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{kT^*}\right)} \quad (5. 10)$$

なお、 I_{n1} は正規化された強度 (正規化強度と以下略す) である。

計測最大強度値を $measI_{1,100}^*$ とすると、

$$I_{n1} = \frac{I_1}{I_{1,100}^*} = \frac{\xi_1 \cdot measI_1}{\xi_1 \cdot measI_{1,100}^*} = measI_{n1}$$

であるから、

$$measI_{n1} = \frac{N_1}{N_{1,100}^*} \cdot \frac{Z_1(T^*)}{Z_1(T)} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{kT^*}\right)} \quad (5. 11)$$

この式を (5. 1) の代わりに用いる。この手法が、Fowler-Milne 法の考え方である。

次に Ar II に関しても同様の処理を実行すればよい。しかし、Fig. 5. 1 (b) の結果において Ar II の最大放射強度を測定できなかったので、別の処理を考える必要がある。

まず、Ar II スペクトル強度を、100% アルゴンでの Ar I の最大放射強度で除したものを相対正規化強度 I_{n2} として扱うことにすると、(5. 2) 式から次式を得る。

$$I_{n2} = \frac{I_2}{I_{1,100}^*} = C_1 \frac{N_2}{N_{1,100}^*} \cdot \frac{Z_1(T^*)}{Z_2(T)} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\varepsilon_2}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{kT^*}\right)} \quad (5. 12)$$

$$\text{ただし、} C_1 \equiv \frac{A_2 h \nu_2 g_2}{A_1 h \nu_1 g_1}$$

Ar II スペクトルの計測強度との関係を求めると、

$$I_{n2} = \frac{I_2}{I_{1,100}} = \frac{\xi_2 \cdot measI_2}{\xi_1 \cdot measI_{1,100}} = C_2 \cdot measI_{n2}$$

$$\text{ただし、} C_2 \equiv \frac{\xi_2}{\xi_1}$$

となる。故に

$$measI_{n2} = \frac{I}{C_2} I_{n2} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{N_2}{N_{1,100}} \cdot \frac{Z_1(T')}{Z_2(T)} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\epsilon_2}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\epsilon_1}{kT'}\right)} \quad (5.13)$$

この式を(5.2)式の代わりに用いる。

(5.11)式と(5.13)式の二線の相対強度比関係は次式となる。

$$\frac{measI_{n2}}{measI_{n1}} = C \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{Z_1(T)}{Z_2(T)} \cdot \exp\left(-\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{kT}\right) \quad (5.14)$$

$$\text{ただし、} C \equiv \frac{C_1}{C_2}$$

これによって、定数 C に補正項が集約される。

今、アルゴンガスアークの種々のアーク発生条件およびプラズマ中の位置（100A～200A、 $z=1\sim 2\text{mm}$ 、 $r=0\sim 3\text{mm}$ ）で、対にして $measI_{n1}$ と $measI_{n2}$ を計測して、(5.14)式の関係が成立する定数 C を決定する。Fig. 5. 4 は、(5.10)と(5.12)式からその強度関係を示したもので、種々のアーク条件、種々のアーク位置において、対にして計測された $measI_{n1}$ と $measI_{n2}$ の強度関係（○印）をこの図にプロットした一例である。100%アルゴン雰囲気において、(5.4)～(5.9)式を解いて、各温度での N_1 、 N_2 を求め、これらのプロット全点の強度関係に最も適合するような定数 C を求める。すなわち、これにより遷移確率の値や波長間の強度補正係数を、多点のデータを基にして得られた定数 C で代表させたことになる。得られた最適な定数値 C を用いて、Ar II と

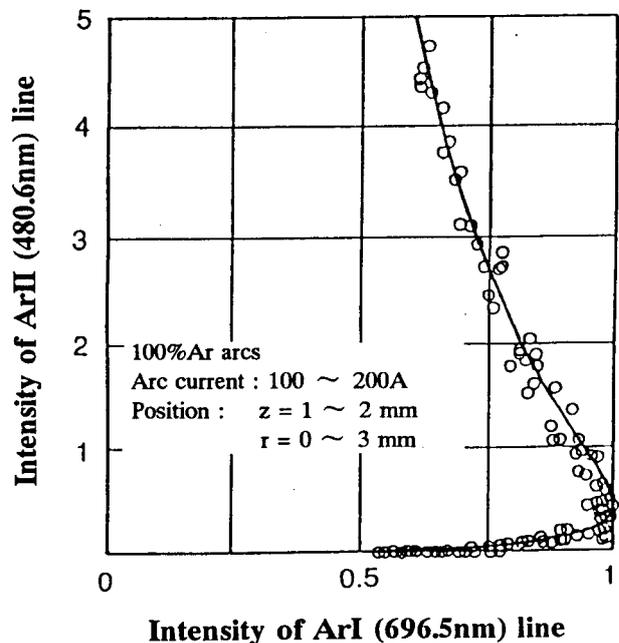


Fig. 5. 4 Relationship between Ar I and Ar II intensities in 100%Ar arcs

Ar I の強度関係を計算した結果が図中の実線である。Ar I と Ar II のスペクトル強度データの関係は、ほぼ一定の関係で整理できることがわかる。

このアルゴンガスアークでの関係を基準にして種々の混合ガス組成のプラズマの状態を評価する。アルゴンガスアークにおける Ar I の最大放射強度が、Ar I、Ar II の強度のシリーズデータ処理の基準値であり、この強度は、シリーズデータの中で必ず計測されなければならない。Fig. 5. 5 は、種々のアルゴン-ヘリウム混合組成において、(5. 4) ~ (5. 9) 式と (5. 11)、(5. 13) 式から $measI_{n1}$ と $measI_{n2}$ の関係を上述の定数 C を用いて算出した結果である。また各

強度関係における温度は破線のように計算される。任意位置で計測された Ar II と Ar I の強度が、この図面上の●印点にプロットされたとすると、種々の組成と温度で (5. 4) ~ (5. 9) 式の連立方程式を解いて N_1 、 N_2 を求め、(5. 11)、(5. 13) 両式から Ar II と Ar I の強度を算出し、与えられたデータに等しくなるまで繰返し計算する。このプロット点での結果は、アルゴン濃度 $\alpha = 56\%$ (ヘリウム濃度 44%)、温度 $T = 17,400\text{K}$ と評価できる。

以上のようにして、プラズマの温度と組成を同時に算出することができる。このような状態解析手法を、便宜的に本論文では、二線強度相関法と呼ぶ。

5. 3. 3 アルゴン-ヘリウム混合ガス雰囲気下における局所プラズマの温度とガス組成

Fig. 5. 6 は、Fig. 5. 1 の計測データの中からアルゴンガスアークと 75%Ar-25%He 混合ガスアークにおけるデータを Fig. 5. 5 上にプロットした場合である。アルゴンガスアークにおけるデータは、定数 C を求めるために利用した。当然のことながら 100% アルゴン組成の線上にプロットされる。これに対して、75%Ar-25%He 混合ガスアークの場合は、アーク中心領域のデータ (図中には、半径方向への中心軸からの距離を r で示した) は、25%ヘリウム濃度で計算された強度関係線上から大きく離れ、アーク中心軸 ($r=0\text{mm}$) でヘリウム濃度は 40% から 45% の計算線上にプロットされる。すなわち、ヘリウム濃度がアーク中心軸上で 40% から 45% まで上昇したことを示している。またこのときの温度は、17,600K となる。

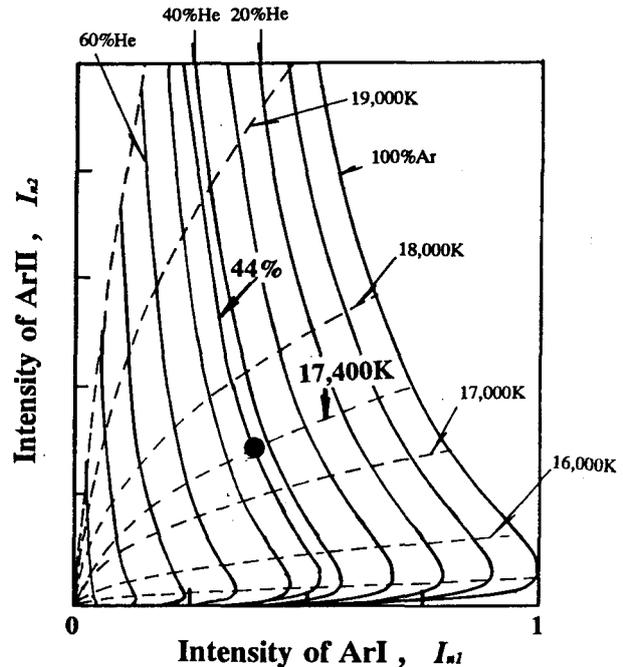


Fig. 5.5 Calculation of local helium concentration and temperature in Ar-He mixed gas arc

Fig. 5. 7 は、各プロット点において温度(a)と組成(b)を求めた結果である。このときのアーク中心部の温度は、第3章における例えばFig. 3. 5 (a)のアルゴンガスアークの温度と大差がないことがわかる。また、25%ヘリウム混合の場合では、Fowler-Milne法で評価したFig. 3. 6の温度より明らかに低く、さらに、Fig. 3. 9のAr II /Ar I 二線相対強度比法の温度よりも若干低くなることがわかる。

Fig. 5. 8 は、種々のヘリウム混合組成において二線強度相関法からアーク中心軸上のヘリウム濃度(a)と温度(b)を計測した結果である。(a)図において、プラズマ中でははず

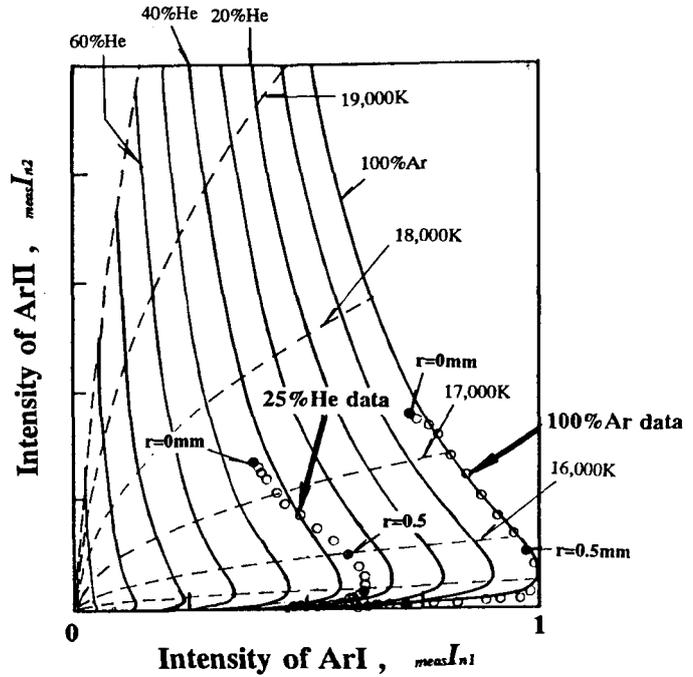
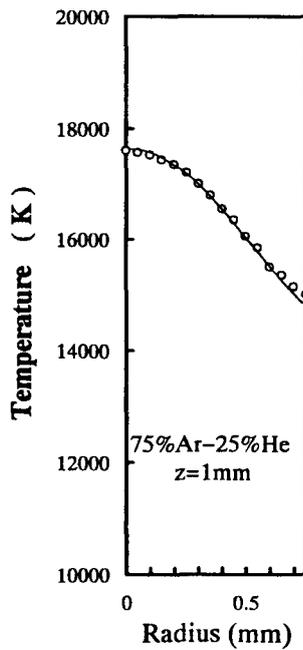
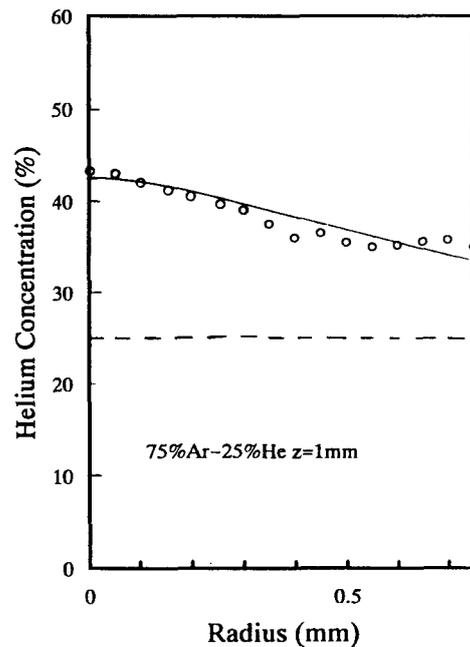


Fig. 5. 6 Relationship between measured Ar I and Ar II intensities in 75%Ar-25%He mixed gas arcs

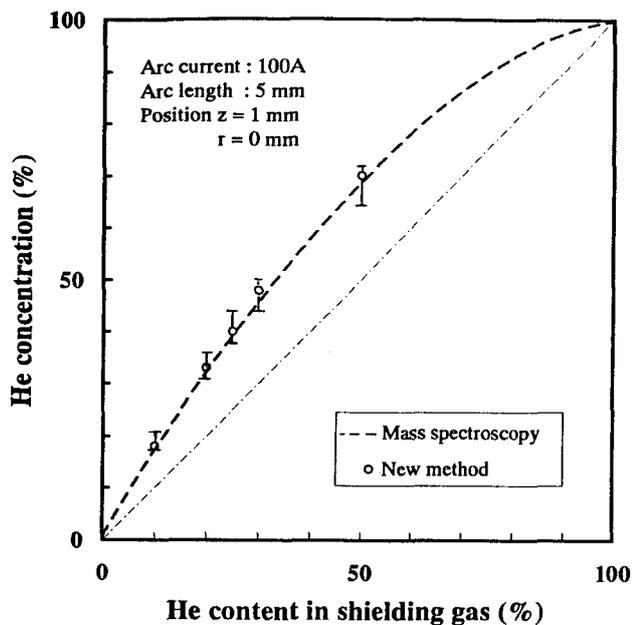


(a) Temperature distribution

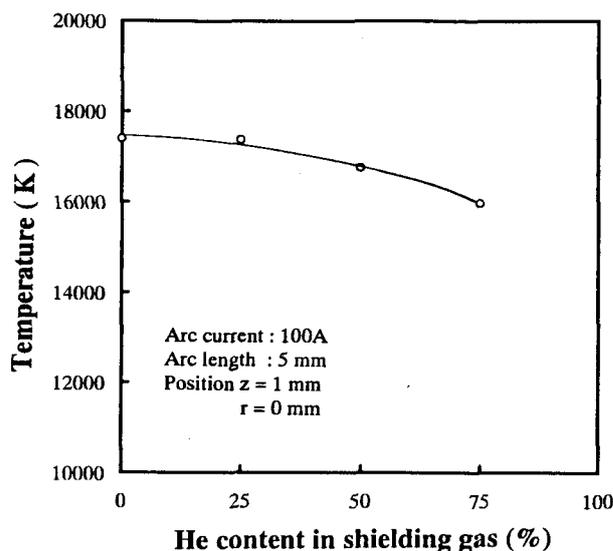


(b) Helium concentration distribution

Fig. 5. 7 Distributions of temperature and helium concentration in 75% Ar-25%He mixed gas arc



(a) Helium concentration in plasma



(b) Temperature of plasma

Fig. 5. 8 Helium concentration and temperature at arc center in Ar-He mixed gas arcs

れのシールドガス組成のヘリウム濃度よりも高くなることがわかる。また図中に示す破線は、第4章のFig. 4. 1 2の結果であり、これとよく一致している。(b)図においては、ヘリウムの混合によりアーク中心温度は若干上昇した後、低下する傾向にあるが、ヘリウムを混合してもアーク中心軸上での温度は大きく変化しないことがわかる。

しかし、一般的にはヘリウムを混合する場合には、局所熱平衡の近似が仮定できないと言われている。そこで次にアーク中心でのヘリウムの He I スペクトル強度を検証する。

Fig. 5. 9 は、Fig. 5. 8 において評価されたヘリウム濃度と温度から (5. 3) 式によって He I 強度を算出したもの (○印) である。また図中の△印は計測された He I の強度である。この図から、75%ヘリウム混合雰囲気での計測スペクトル強度が、50%ヘリウム混合時より増大するのに対し、算出された強度は逆に低下することがわかる。すなわち雰囲気ヘリウム

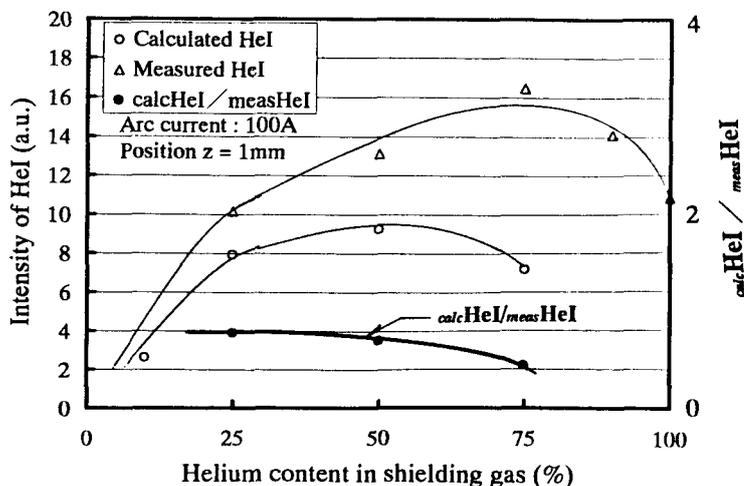


Fig. 5. 9 Comparison between measured He I intensity and calculated He I intensity

濃度の増大にともなうスペクトル強度の変化傾向に差異を生じる。図中の●印は、算出強度と計測強度の比を示したものであり、シールドガスのヘリウム濃度が50%以下では、ほぼ一定で両者はお互いに対応しているが、ヘリウム濃度が50%以上では、その比率は急激に低下することがわかる。したがって、ヘリウム濃度50%以上の混合ガス雰囲気においては、Fig. 5. 8で評価された温度とヘリウム濃度が正しくない可能性があることを示しており、局所熱平衡近似を仮定する二線強度相関法の適用に問題が生じる。

5. 3. 4 アルゴン-水素混合ガス雰囲気下における局所プラズマの温度とガス組成

水素は、10,000K以上でほとんど全て解離している (Fig. 3. 3(a)参照)。そこで10,000K以上のプラズマの構成粒子は、Ar、Ar⁺、Ar⁺⁺、H、H⁺、e⁻であり、基本的には物理定数等を除いてヘリウム混合時の構成方程式と変わらない。

変化する式は、(5. 9)式の代わりに解離していることを考慮した次式を用いることのみである。ただし、 α は、水素分子濃度に対するアルゴンの濃度である。

$$\frac{N_1 + N_2 + N_3}{N_1 + N_2 + N_3 + \frac{N_4}{2} + \frac{N_5}{2}} = \frac{\alpha}{100} \quad (5. 15)$$

5. 3. 2項の手法で計算された種々の水素混合組成におけるAr IとAr IIの強度関係は、

Fig. 5. 10 (Fig. 5. 5参照)で与えられる。図中のプロット点は、90%Ar-10%H₂混合ガスアークのデータである。Fig. 5. 6のヘリウム混合の場合と同様、計測結果はアーク中心部 (r=0) で水素濃度が高くなることを示している。Fig. 5. 11は、二線強度相関法で計測した温度(a)と水素分子濃度分布(b)である。この計測された温度分布は、第3章におけるAr II /Ar I二線強度比法 (Fig. 3. 8(b))やAr II /Ar II相対強度比法 (Fig. 3. 13(d))の結果にほぼ等しい。すなわち、水素の混合によってアークの中心部の温度は、急激に低下する。また、アルゴンガスアークに水素を混合した場合にもヘリウム混合の

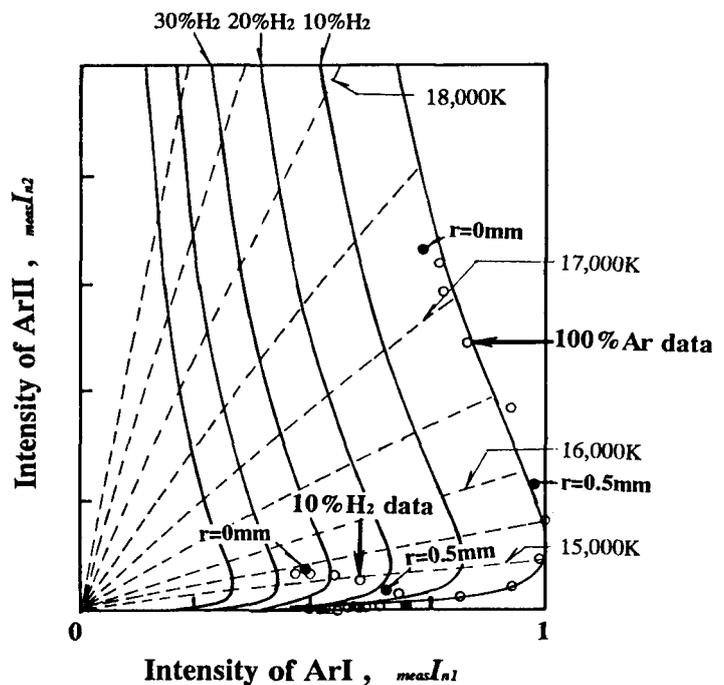
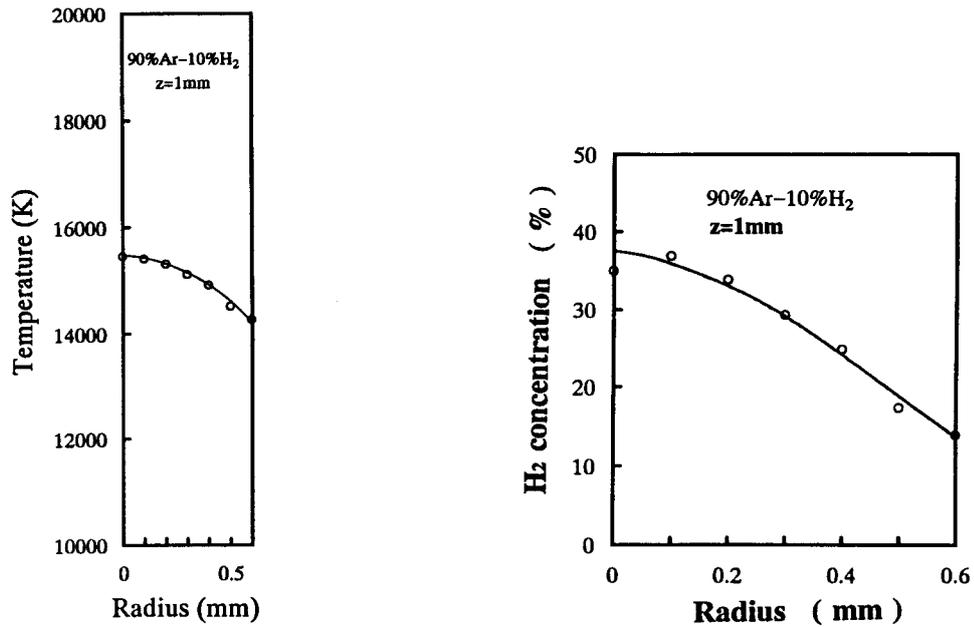


Fig. 5. 10 Relationship between measured Ar I and Ar II intensities in 90%Ar-10%H₂ mixed gas arc



(a) Temperature distribution

(b) Hydrogen concentration distribution

Fig. 5. 11 Distributions of temperature and hydrogen (H₂) concentration in 90% Ar-10% H₂ mixed gas arc

場合と同様に水素濃度がアーク中心部で著しく高くなる。

次に、二線強度相関法の連立方程式で使用しなかった水素スペクトルの計測強度をFig. 5 11の結果と照合する。Fig. 5. 11の温度と組成を用いて、(5. 3)式からH_αスペクトル強度の分布を逆算し、計測強度と照合する。Fig. 5. 12は、計算結果に定数を乗じて、計測強度上に重ねたものである。Fig. 5. 10から予期されるように評価結果に誤差が大きくなる $r \geq 0.5\text{mm}$ を除けば、強度分布のプロファイルは、ほぼ一致している。したがって、アーク中心軸近傍域で水素濃度が増大し、かつ温度が低下すると考えることによって、第3章でFowler-Milne法およびAr II /Ar I 二線強度比法からそれぞれ異なる温度分布に評価されたAr I、Ar IIおよびH_αスペクトル強度の計測データの問題点が解決できた。

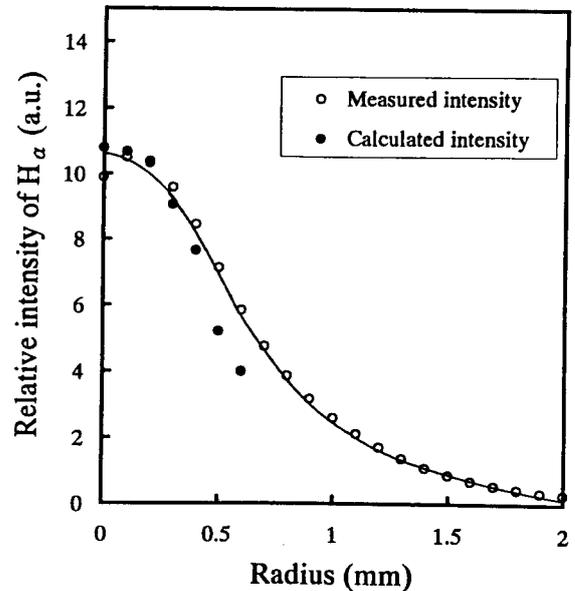


Fig. 5. 12 Comparison between measured H_α intensity and calculated H_α intensity

5. 4 アルゴン-水素混合ガスアークにおける広範囲プラズマ領域の 状態解析

前節までは、Ar II スペクトル強度が安定に計測できた陰極近傍の極めて狭い領域での分光分析結果であったが、本節では、陰極から陽極近傍までの広範囲のプラズマ領域を状態解析できるシステムに拡張することを検討する。

Ar II スペクトル強度が 15,000K 以上の陰極近傍の狭い領域でしか計測できないのに対し、水素の H I スペクトル、とくに 656.2nm の H α 輝線強度は、10,000K 以上の陽極近傍から陰極近傍までのプラズマで計測が可能である。また前節においてプラズマガスの混合組成が不均一であることを考慮すれば、すべてのスペクトル強度の相関関係に矛盾が生じなかったことから、アルゴン原子スペクトル Ar I と水素原子スペクトル H α を使用した二線強度相関法による分光分析を行う。

なお、前節にも述べたように 10,000K 以上におけるアルゴン-水素混合ガスアークプラズマの構成粒子の種類は、Ar、Ar⁺、Ar⁺⁺、H、H⁺、電子 e⁻ である。それぞれの粒子密度を、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 (m⁻³) で表す。

まず、(5. 1) 式を用い、100% アルゴンガスアークの最大放射強度で Ar I 強度データを正規化する。しかし、100% 水素雰囲気での H α スペクトルの最大放射強度を用い、混合時の H α 強度データを正規化することは、不可能に近い。なぜなら、純水素雰囲気では、両電極からの蒸発金属粒子がプラズマ中に混入し、100% 水素雰囲気のプラズマとならないからである。

そこで前節の場合と同様に 100% アルゴン雰囲気における Ar I の最大放射強度で水素スペクトル強度データを除して以下の式を得る。

$${}_{\text{meas}}I_{n1} = \frac{I}{C_n} \frac{N_1 \exp\left[-\frac{\epsilon_1}{kT}\right]}{Z_1(T)} \quad (5. 16)$$

$${}_{\text{meas}}I_{n3} = C \frac{N_3 \exp\left[-\frac{\epsilon_3}{kT}\right]}{Z_3(T)} \quad (5. 17)$$

ただし、
$$C \equiv \frac{C_1}{C_2 C_n}$$

$$C_n \equiv \frac{N_{1,100} \exp\left[-\frac{\epsilon_1}{kT'}\right]}{Z_1(T')}$$

$$C_1 \equiv \frac{A_i h \nu_i g_i}{A_i h \nu_i g_i}$$

$$C_2 \equiv \frac{\xi_3}{\xi_1}$$

ξ_1 : Ar I の絶対値補正係数

ξ_3 : H α の絶対値補正係数

前節においては、100%アルゴン組成における Ar II と Ar I の計算強度の関係と計測強度データの関係を照合することにより、定数 C を求めることができた。しかし、アルゴン-水素混合ガスプラズマ中では、組成不均一現象が存在し、プラズマのガス組成が未知となる。このために計測データと照合して定数 C を求める基準となるガス組成がなく、Ar I と H α の強度の関係が決定できない。したがって、前節と同様な手法から定数 C を求めることが出来ない。そこで、以下のような処理を行った。

種々の水素混合ガス組成において、(5.16) と (5.17) 式の強度関係を算出した結果が Fig. 5.13 である。図中の細線 (15,000K 以下) と細破線 (16,000K 以上) は、等温度線を示している。図において、太い破線で示される包絡線が存在する。種々の組成で、この包絡線と接する点の温度とそのときの水素分子 (H $_2$) 濃度の関係 (太線) を図示したのが Fig. 5.14 である。ただし、この曲線は概念的なもので正確な計算結果ではない。今、水素

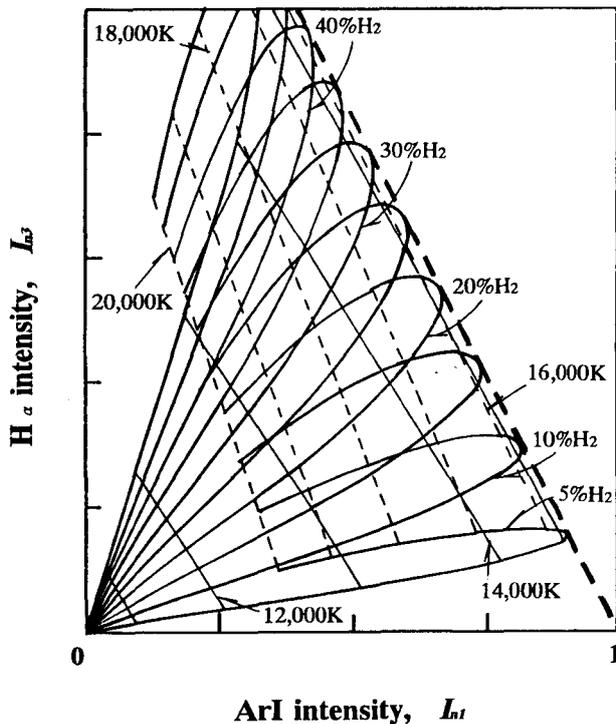


Fig. 5.13 Relationship between Ar I and H α intensities in Ar-H $_2$ gas system

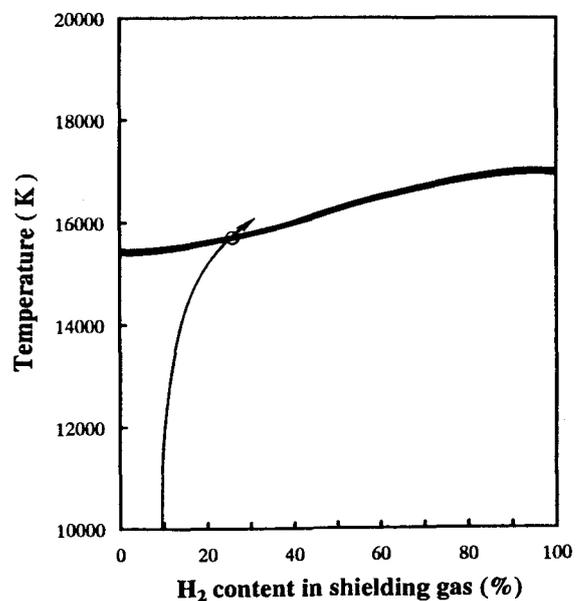


Fig. 5.14 Point of contact with envelope line

分子濃度 10% の雰囲気下の混合ガスアークの陰極下のある z 軸位置において、アーク外周部からアーク中心部へ温度と水素濃度を計測したと仮定すると、前節の結果から予測されるように水素濃度もアーク温度も増大していく（図中の細線）。そしてさらに高温のプラズマ領域で、やがて細線は太線と交わる。この交点が、Fig. 5. 13 における包絡線との接点になる。

このような考え方から、計測された Ar I スペクトルと $H\alpha$ スペクトルの強度関係の曲線に、Fig. 5. 13 の包絡線が丁度接するように定数 C を決定する（ C を変化することによって、Fig. 5. 13 の $(I_{n1}, I_{n3}) = (1, 0)$ を通る包絡線の勾配が変

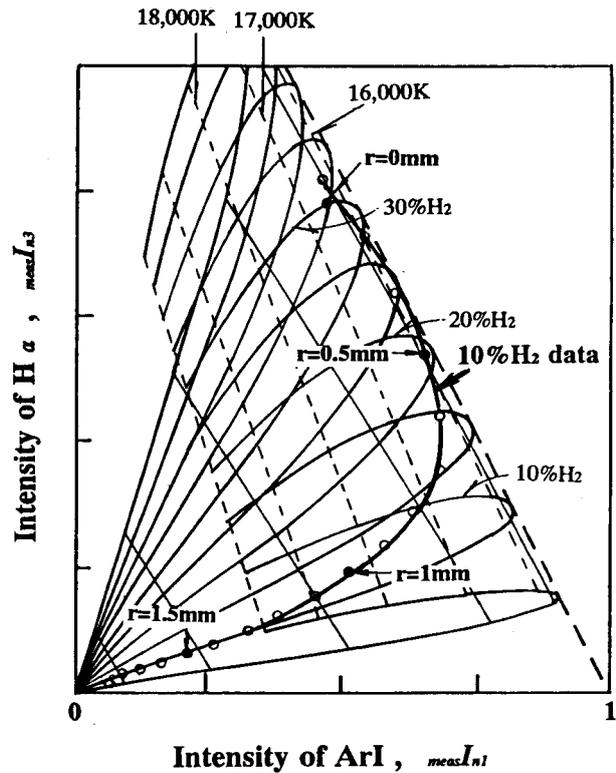
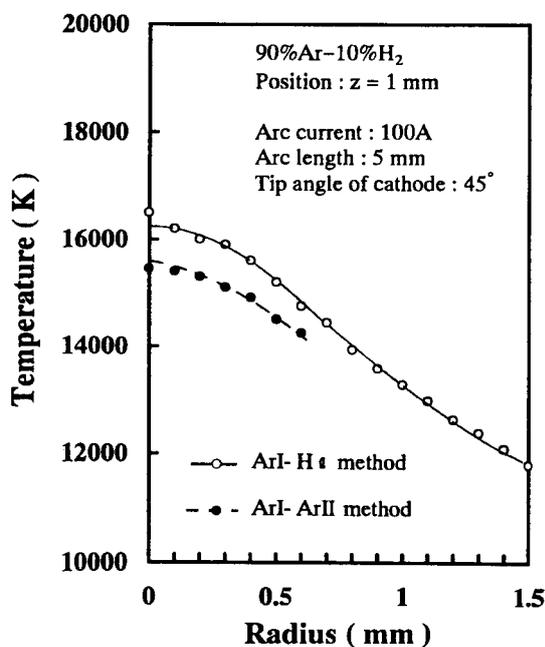
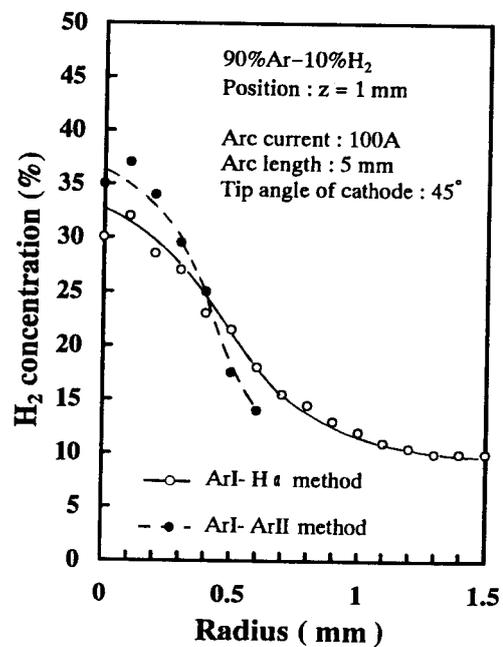


Fig. 5. 15 Relationship between measured Ar I and $H\alpha$ intensities in 90%Ar-10% H_2 mixed gas arcs



(a) Temperature distribution



(b) H_2 concentration distribution

Fig. 5. 16 Distributions of temperature and H_2 concentration in 90%Ar-10% H_2 arc

化する)。

Fig. 5. 15 は、90%Ar-10% H_2 混合ガスアークプラズマでの Ar I と $H\alpha$ の計測強度結果を上記の手法により計算結果上にプロットしたものである。計測プロット点はアーク中心軸近傍域で計算結果から高水素濃度側に大きくずれ、アーク中心部 ($r=0$ mm) のプロット点では水素濃度約 30% になっている。また、アーク周辺域では、10% 水素濃度曲線にほぼ一致していることがわかる。データプロット点に相当する温度と組成を前節と同様な方法で求めると複数の評価温度と組成の組み合わせ結果 (たとえば、 $r=0$ のプロット点では、30% H_2 の曲線上と、35% H_2 の曲線上に存在する) が得られる。そこで評価された濃度や温度分布に不連続を生じない結果を選択すると、Fig. 5. 16 の温度分布(a)とガス組成分布(b)が得られる。この結果は、図中に破線で示した Ar II -Ar I の二線強度相関法の結果 (Fig. 5. 11) とほぼ一致している。

このような Ar I - $H\alpha$ の二線強度相関法で、アルゴン - 水素混合ガスアークプラズマの 10,000K 以上にある広範囲領域の温度分布(a)とガス組成 (水素分子濃度) 分布(b)を計測して求めた結果が、Fig. 5. 17 である。なお、参考のために、Fig. 5. 18 に、アルゴンガスアークにおける温度分布を示した。この温度分布は、Fowler-Milne 法によって算出したもので

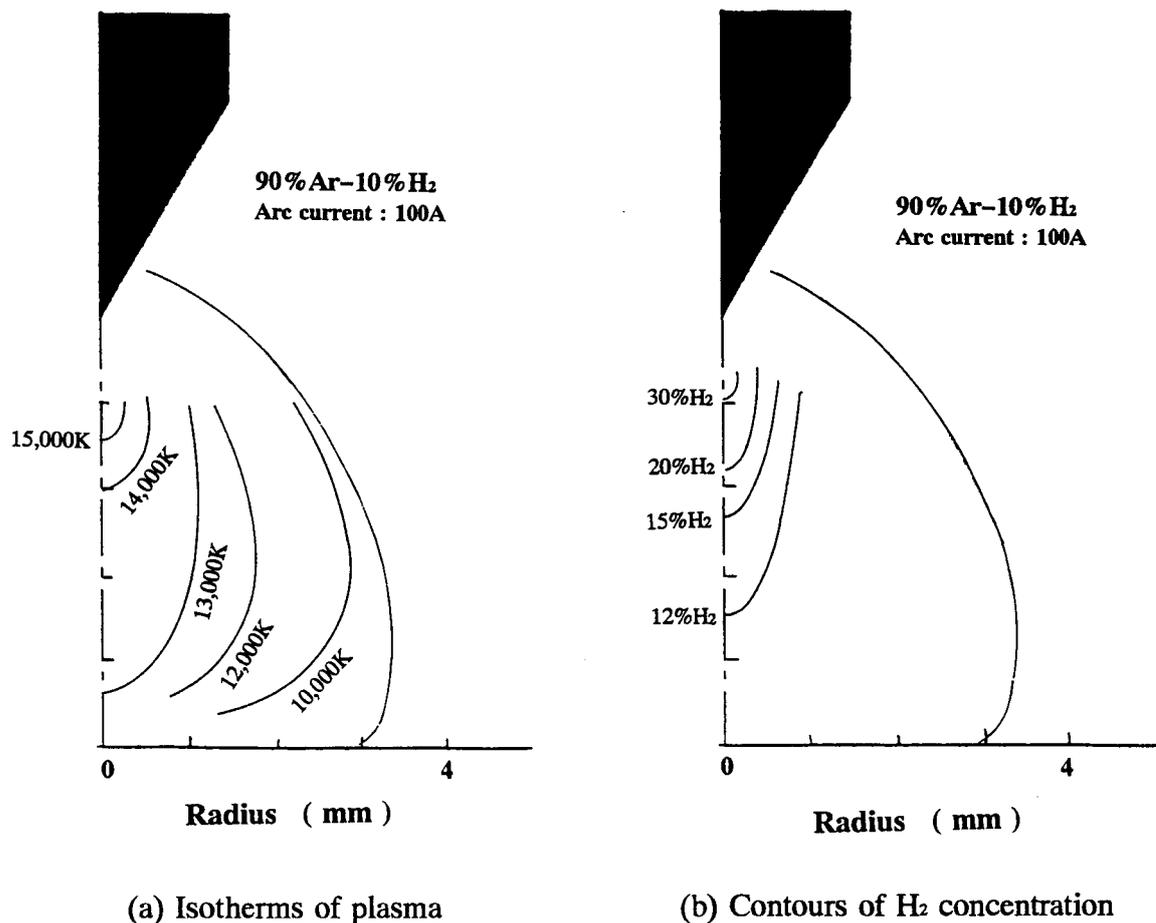


Fig. 5. 17 Contours of temperature and H_2 concentration in 90%Ar-10% H_2 arc

ある。以上の結果から、混合された水素は、陰極近傍で、かつアーク中心軸近傍で著しく濃縮し、アーク長 5mm の場合の陽極近傍プラズマのガス組成は、10% H_2 濃度のほぼ均一な分布になることがわかる。また、水素の混合によって、アルゴンガスアークよりアーク中心部の温度は低下し、陽極近傍で高温域（例えば 10,000K の等温線）が急激に収縮することがわかる。

従来水素をシールドガス中に混合した場合、水素ガスが高熱伝導率であることからプラズマからの熱損失を抑制するために熱的ピンチ作用が生じると考えられており、その結果としてアーク柱は緊縮し、かつプラズマ温度は増大すると言われている。しかし、本節においては、以上の計測結果から、アーク柱は緊縮はするが、温度に関しては、逆に明らかに低下しており、従来の考え方が正しくないことを明らかにした。

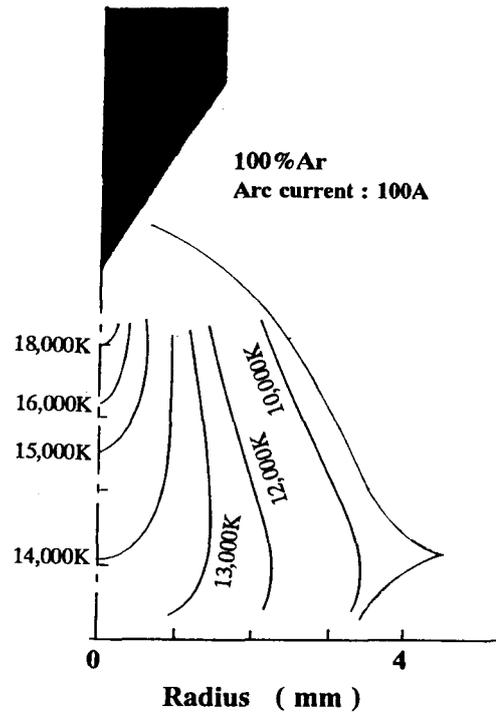


Fig. 5.18 Isotherms of argon arc plasma

5. 5 結 言

第4章での結果を受けて、混合ガスアークプラズマ中のガス組成が不均一である、すなわち混合ガス組成が未知である場合の発光分光分析法を検討した。この分析法によって、第3章で生じたアルゴン-ヘリウムおよびアルゴン-水素混合ガスアークプラズマの計測温度の問題点が解決できることを明らかにした。以下得られた結果について述べる。

陰極近傍領域 ($z=1\text{mm}$) のプラズマを対象として、

- (1) アークプラズマ空間でガス組成が変化することを前提に、かつ局所熱平衡が近似的に成立すると仮定して新たな分光分析法を開発した。具体的には、Sahaの熱電離平衡の方程式の解から得られる Ar I と Ar II 強度の相関関係と計測した各強度の相関関係を照合することによって、アルゴンガスアーク中へ種々の異種ガスを混合した場合のプラズマ中の局部ガス組成および温度を同時に決定する Ar I -Ar II 二線強度相関法を提案した。
- (2) 二線強度相関法によって、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークプラズマの状態を評価すると、陰極前面のアーク中心軸近傍にヘリウムが濃縮し、供給シールドガス組成から変化することを示した。またヘリウムの混合率を変化したときのアーク中心でのヘリウム濃度変化は、前章の質量分析器による測定結果と極めて良い一致を示した。
- (3) また、アルゴンガスアーク中にヘリウムを混合した場合、二線強度相関法から評価したア

ーク中心軸近傍の温度は、50%He 組成までの雰囲気下ではアルゴンガスアークの温度とほぼ同じである。

- (4) アルゴンガスアークに 10% 水素を混合した場合、陰極前面のアーク中心軸近傍で水素濃度が著しく高くなる。このときアーク中心軸近傍のアーク温度は、アルゴンガスアークより 2,000K ほど低下する
- (5) ガス組成がプラズマ中で変化することを考慮した二線強度相関法によって、第 3 章で生じた温度計測結果の問題点を解決した。

プラズマ全体の領域を対象として

- (6) 90%Ar-10%H₂ 混合アークにおいては、約 10,000K 以上の広範囲のプラズマ領域のガス組成と温度を決定できる Ar I -H α 二線強度相関法を提案した。
- (7) この結果、混合した水素は、アーク中心軸近傍で濃縮し、かつ陰極近傍に近づくほど顕著に濃縮する。この場合の温度は、アルゴンガスアークに比較してアーク全体で低下し、陽極に近づくほど著しく低下する。
- (8) 従来、高熱伝導度の水素を混合することによりプラズマの冷却効果が強まり、熱的ピンチ作用が生じてアーク柱が緊縮かつ高温化されると考えられてきた。
しかし、以上の計測・解析結果では、プラズマ温度は水素混合によって上昇することはない、逆に低下する。したがって、熱的ピンチ作用による現象の理解は正しくない。

第6章 混合ガスアークプラズマの電子密度分布と陽極形態

— プラズマの状態とアーク現象との相関に関する検討 —

6. 1 緒言

前章において、プラズマ中でガス組成が均一でないとして分光分析する Ar II -Ar I および Ar I -H α 二線強度相関法を提案し、アルゴン-ヘリウムおよびアルゴン-水素混合ガスアークプラズマの温度とガス組成を定量的に解析できることを示した。

そこで、本章では、まずプラズマの諸特性を決定する重要なプラズマパラメータである電子密度分布に及ぼすプラズマ温度やガス組成の影響について検討する。具体的には、局所熱平衡近似を仮定しない Stark 拡がり法^{28) 31) 41)} や赤外線放射プラズマ診断法⁴²⁾ によって電子密度分布を計測し、また同時に前章で得られた温度とガス組成から Saha の熱電離平衡式を用いて算出される電子密度分布と照合してガス組成不均一な状態におけるプラズマの電離特性を明らかにする。次いで、このようなプラズマの電離状態が第2章で述べたアーク現象にどのような影響を与えるかを考察する。とくに、陽極面上での電流密度分布を計測し、水素の添加とヘリウムの添加の場合におけるプラズマの状態と電流密度分布特性の相違を明らかにする。

さらに、上記検討結果をもとに、熔融陽極において、水素をアルゴンガスアークに混合して金属蒸発を促進し、プラズマ中に蒸発金属粒子が混入した多成分粒子混合雰囲気でのプラズマの状態特性を検討する。そして、アークプラズマ中での蒸発金属粒子の分布状態を明らかにする。

6. 2 混合ガスアークにおける電子密度分布

6. 2. 1 電子密度の計測方法

最も一般的に適用される電子密度測定法に、Stark 拡がり法がある。この Stark 拡がり法は、アルゴン、ヘリウム、水素等の輝線スペクトル波形の拡がり量、すなわち半値幅を計測し、Stark 効果における半値幅と電子密度の関係式を利用して電子密度を求める手法である。しかし、輝線スペクトル波形の拡がり量は、Stark 効果によってのみ生ずる現象ではなく、その他の多くの原因によって拡がる。それ故、Stark 効果が最も支配的で、かつ十分大きく拡がるスペクトルを選択しなければならない。このようなことから実際には水素の原子スペクトル H β 波形が採用される。したがって、種々の雰囲気下におけるプラズマの電子密度を計測するためには、水素を微量混合し、H β 波形を得なければならない。

しかし、前章までの結果から、異種ガス混合によってプラズマ状態が大きく変化することが明らかになった。とくに Fig. 5. 3 の結果のようにヘリウムガスアークの電子密度を計測するために水素を混合したとすると、ヘリウムのスペクトル強度が激減し、もはやヘリウムガスアークプラズマの電子密度として評価することはできなくなる。このことはアルゴンガスアーク

においても同様である。このためには、異種ガスの混合を要求しない電子密度測定法が不可欠となる。

そこで、赤外領域のプラズマの連続スペクトルの放射強度が制動放射に支配されることを利用した赤外線放射プラズマ診断法（以下 IR 法と略す）^{4,2)}を採用した。なお、第 3 章の Fig. 3. 1 の実験概略図において、分光器の代わりに赤外線用簡易分光器として赤外線放射温度計を用いる。ここでは、波長 2 μm に感度を有する PbS センサーを内蔵する赤外線放射温度計を用いた。その他の光学系は上述までの分光計測の場合と同一である。採取されたプラズマからの放射光は、光学ファイバーを通過した出力端での発光として見なして、この発光量を放射温度計で計測した。

赤外線放射温度計からの出力は温度であるが、放射温度計測の原理の逆過程として出力温度 T から積分放射強度 L_λ を次式の Planck の式を用いて算出する。

$$L_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (6. 1)$$

λ : 計測波長

C_1 : 物理定数

C_2 : 物理定数

この式から求めた放射強度分布をアーベル変換して空間分解する。これによって得られた波長 2 μm における放射強度 I_λ と電子密度 N_e の関係は次式で示される。

$$N_e = C\sqrt{I_\lambda} \quad (6. 2)$$

C : 物理定数および光学系の補正定数

この式によって、放射温度計の計測温度から電子密度を算出することができる。この電子密度計測法は、Saha の熱電離平衡関係に全く関係しないため、局所熱平衡の仮定を必要としない。しかし、この手法は、連続スペクトル強度の絶対値を必要とする。したがって、本実験計測系において、光学系の絶対値補正が不可欠である。

そこで、以下の手法によって補正を行った。

第 3 章において、アルゴンガスアークでは、局所熱平衡近似を仮定しても種々の温度評価法における計測温度結果に差異が無かったことから、アルゴンガスアークにおける電子密度は Saha の熱電離平衡方程式を満足していると考えられる。

Fig. 6. 1 は、IR 法によるアルゴンガスアークでの電子密度分布の計測結果である。縦軸は任意単位である。この図において電子密度分布には、Ar I スペクトル強度分布と同様に、アーク中心軸から離れた位置で極大値を示している。この最大電子密度点は、Saha の式から

$2 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ と計算される (Fig. 3. 3 参照)。第3章でも述べたとおり $z < 1 \text{ mm}$ では局所熱平衡近似を仮定することに問題があるので、ここでは図の $z = 1 \text{ mm}$ での最大電子密度点において、計測電子密度と計算電子密度の相関係数を求め、これを補正係数 C とする。本節では、アルゴンガスアークの場合の電子密度分布を基準にして、異種ガスが混合した場合の電子密度分布の変化を Saha の熱電離平衡式を使用せずに評価することを目的としており、アルゴンガスアークにおいて補正係数 C を決定する以外には、Saha の式を一切使用しない。

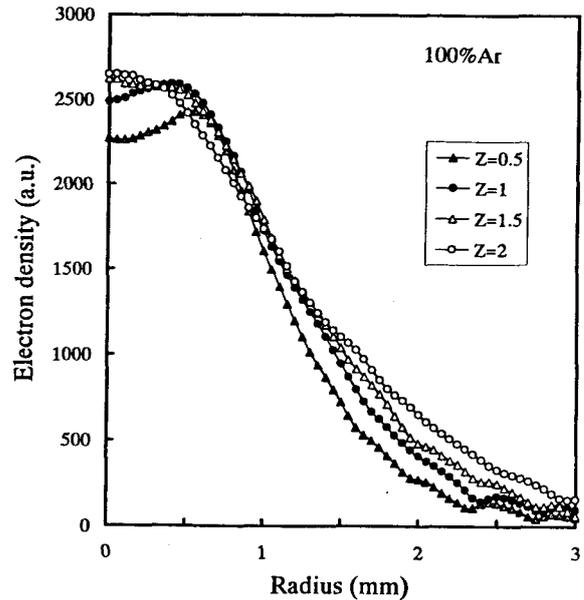


Fig. 6. 1 Electron density distribution without calibration (100%Ar arc)

6. 2. 2 アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおける電子密度分布と放射エネルギー

Fig. 6. 2 は、IR 法によって計測したアルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおける電子密度分布である。(a)は、計測積分放射強度 L_λ (アーベル変換処理を行う前の計測データである) の分布である。(b)は、(a)図から評価される電子密度分布である。ヘリウムの混合により、電子密度は、アーク中心領域 (中心軸から半径約 1mm 未満) において顕著に低下する。また (b)図の評価の元データである (a)図の積分放射強度すなわち制動放射強度は、一層急激に低下

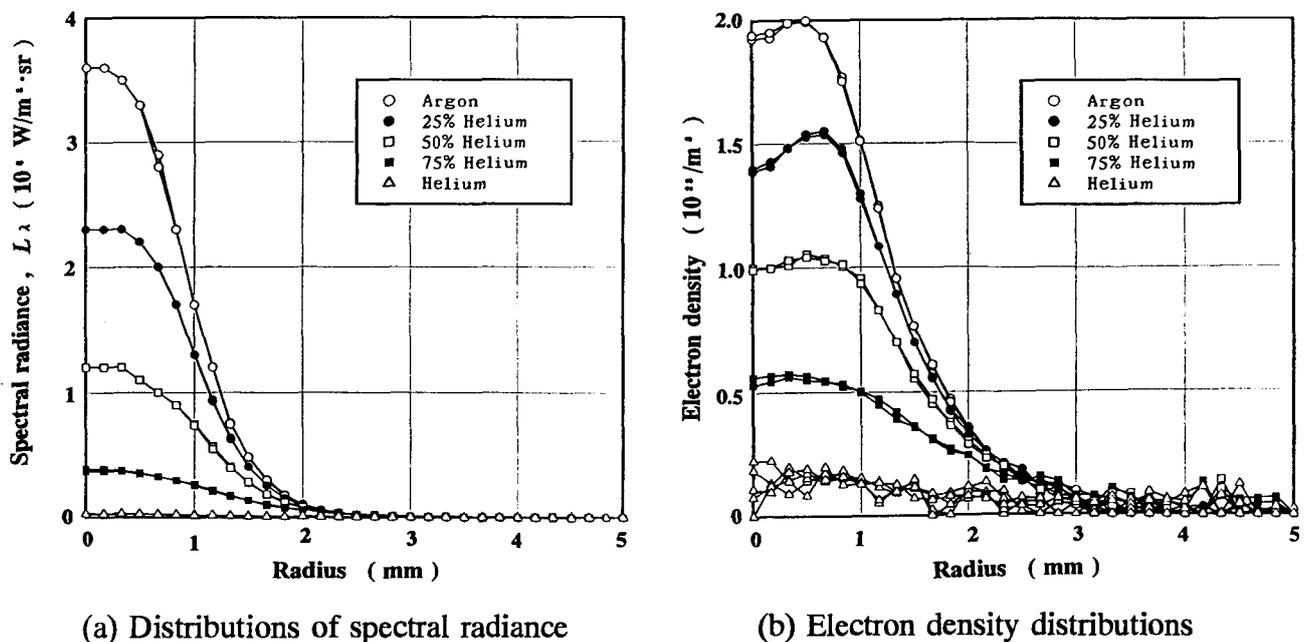


Fig. 6. 2 Distributions of measured spectral radiance and electron density at $z = 1 \text{ mm}$ in Ar-He mixed gas arcs

している。これらの急激な低下とアークプラズマ中におけるガス組成変化との関連について検討する。

Fig. 6. 3は、75%Ar-25%He混合ガスアークにおいて、前章の二線強度相関法で求めた組成と温度を使用してSahaの式から算出した電子密度分布（○印）とIR法で計測した電子密度分布（太線）である。また、図中の細線は、第3章で25%ヘリウム混合時のAr Iスペクトル強度からFowler-Milne法によって求めた温度分布をもとに電子密度を算出した結果である。参考のためにアルゴンガスアークの場合も併記した。アルゴンガスアークの場合は、第3章でのFowler-Milne法での温度分布から電子密度分布（破線）を算出したものと、IR法により評価した電子密度分布（中太線）も示してある。アルゴンガスアークの結果はいずれともよく一致している。25%ヘリウム混合の場合では、IR法による電子密度分布は、組成の不均一を考慮しなかった細線の電子密度結果とは大きく異なっているが、二線強度相関法による評価電子密度とよく一致している。このことは、アーク中心軸近傍領域（中心軸から半径1mm未満の領域）でヘリウム濃度が高くなったために、Sahaの式における25%ヘリウム組成の電子密度（Fig. 3. 3(b)参照）より中心領域の電子密度が大きく低下したことを示している。すなわち、この結果は、陰極近傍のアーク中心軸領域において電離電圧の高いヘリウム濃度が増加したことにより、電離度が一層低下したことを示している。

局所熱平衡を仮定してガス組成不均一を考慮した二線強度相関法での計測結果は、25%ヘリウム混合アークの場合のFig. 6. 3およびFig. 5. 9等における全ての分光計測結果に矛盾を生じさせないことがわかる。すなわち、二線強度相関法におけるプラズマの状態解析の有効性を明らかにした。

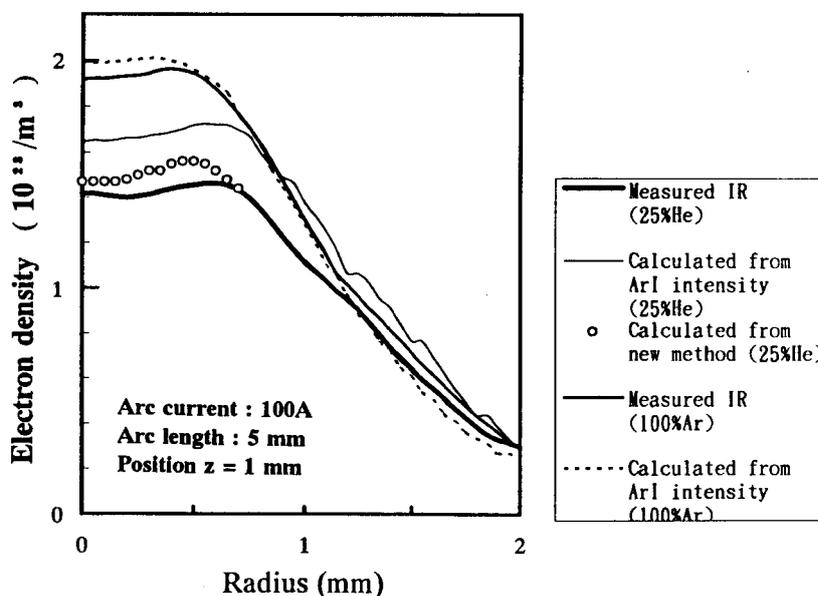
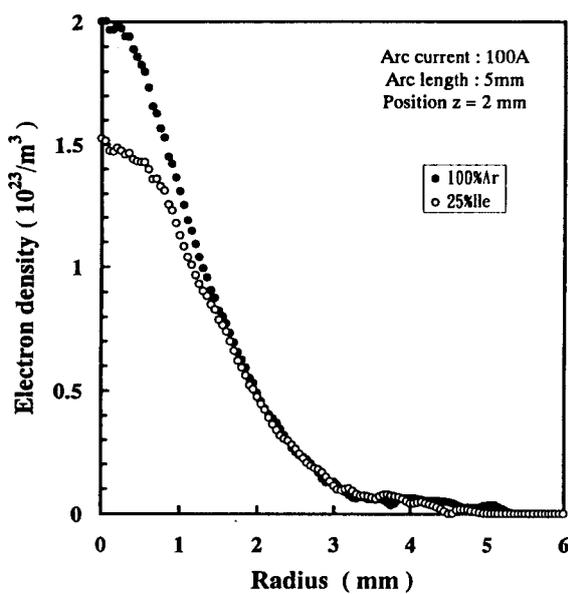
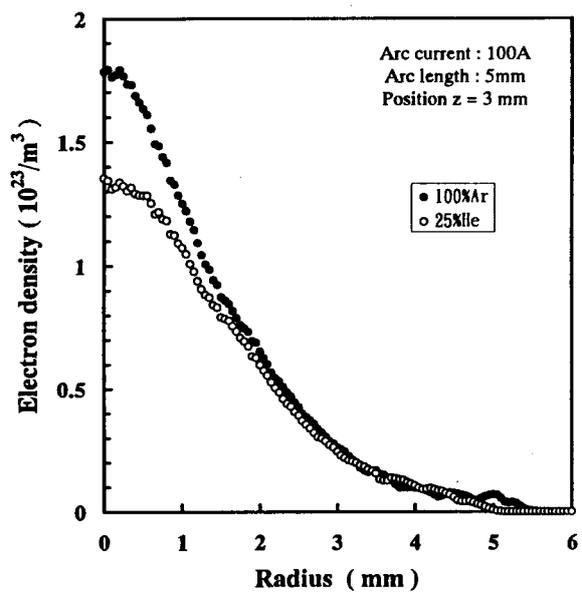


Fig. 6. 3 Comparison among electron density profiles measured by some method

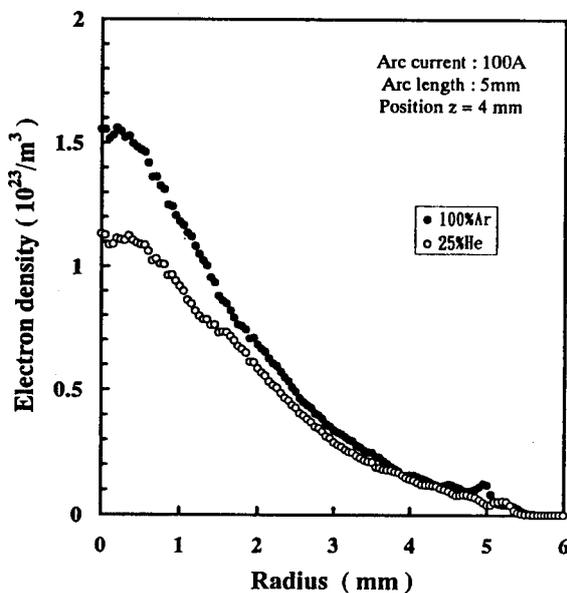
次に、Fig. 6. 4に、プラズマ全体領域における電離状態の特性を、電子密度分布としてまとめた（ $z=1\text{mm}$ は Fig. 6. 2(b)参照）。この図は、計測 z 位置を変化した場合の IR 法により計測されたアルゴンガスアークと 75%Ar-25%He 混合ガスアークの場合の電子密度分布である。電離電圧の高いヘリウムがアーク中心部で濃縮することを反映して、アーク中心部でアルゴンガスアークの場合より電子密度が大きく低下する。しかし周辺部においては、中心領域に比較してアルゴンガスアークより電子密度が大きく低下することはない。この傾向は陽極直上 1mm（ $z=4\text{mm}$ ）の領域においても保持されている。すなわち、陽極近傍領域を含めプラズマ全体域でのアークの電離領域が、ヘリウム混合によって大きく収縮することはない。したがって、ヘリウム混合の場合においても、熱的ピンチ効果は現れない。



(a) $z=2\text{mm}$



(b) $z=3\text{mm}$



(c) $z=4\text{mm}$

Fig. 6. 4 Electron density distributions at some positions in 75%Ar-25%He arc

次に、ヘリウム混合によるアーク中心領域での電子密度の顕著な低下と、第2章で明らかにしたプラズマからの放射損失エネルギーとの関連について検討する。

全波長域にわたる全制動放射エネルギーは、次式で与えられる。

$$I_{total} = C_0 N_e^2 \sqrt{kT_e} \quad (6.3)$$

全制動放射エネルギーは、電子密度 N_e と電子温度 T_e によって決まる。ただし、 C_0 は定数である。しかし、アークプラズマでは電子密度 N_e と電子温度 T_e は独立のパラメータではなく、温度の増加によって電子密度は急激に増大するし、かつその自乗で全放射エネルギーに影響を及ぼす。また、Fig. 6. 2 (a)より半径 2mm 以上の領域での放射強度は微少であり、半径 2mm の温度はアルゴンガスアークで 11,000K である。このため温度を 15,000K と一定として考察しても、ここで放射エネルギー算出の対象とするプラズマ領域が、11,000 から 18,000K とすると、誤差は $\pm 10\%$ 以下である。なお、ヘリウム混合によってプラズマの最高温度は、前章で示したようにほとんど変化しない。そこで、温度の項を無視すると、全制動放射エネルギーは、電子密度によって支配されるので、(6. 2) 式における特定波長における放射エネルギー I_λ (このエネルギーも温度より電子密度に支配されている⁴²⁾) で代用して評価できる。

この放射エネルギー I_λ をプラズマの厚さ方向へ積分したのが、Fig. 6. 2 (a) の L_λ の分布である。この L_λ 分布を x 軸方向で積分し、かつ z 軸方向 (Fig. 6. 4 における電子密度評価時の計測積分データ) にも積分して全制動放射エネルギーを算出する。Fig. 6. 5 は、この算出結

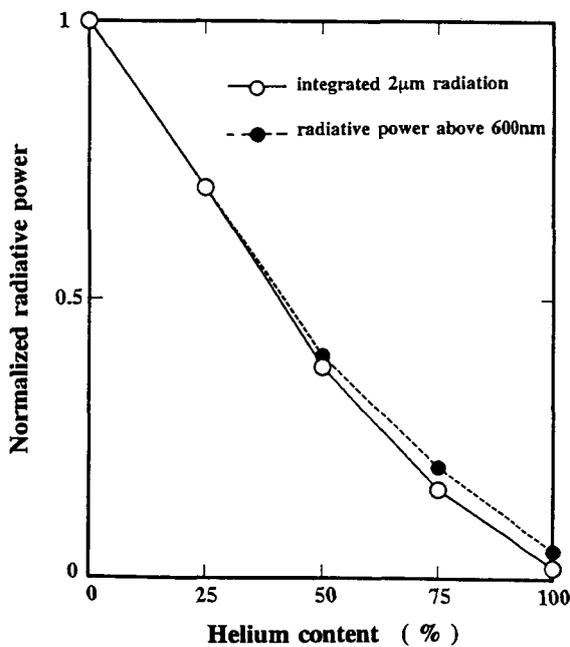


Fig. 6. 5 Comparison between total integrated spectral radiance of 2μm radiation and radiative power of the arc above 600nm as a function of helium content

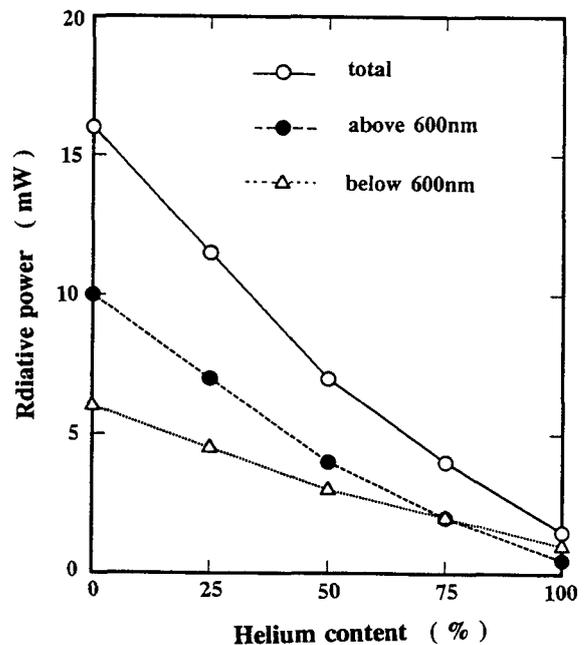


Fig. 6. 6 Radiative power of the arc as a function of helium content

果（○印）である。Fig. 6. 6は、第2章におけるプラズマからの放射エネルギー計測時に600nmのハイパスフィルターを通して赤外域の放射エネルギー（制動放射エネルギーが支配的である）のみをパワーメータで計測した結果（●印）である。○印は第2章の全放射エネルギーの結果である（Fig. 2. 27参照）。この図から、全放射エネルギーのヘリウム混合にともなう低下は、赤外域の放射エネルギーの低下に強く依存していることがわかる。この赤外域の計測放射エネルギーの変化を、Fig. 6. 5中に●印で示した。この図において、積分された制動放射エネルギーと赤外域の計測放射エネルギーの変化傾向は、極めてよい一致を示している。

以上の結果から、ヘリウム混合にともなう放射損失エネルギーの低下が、アーク中心領域におけるヘリウム濃縮による電子密度の急激な低下に強く依存することを明らかにした。

6. 2. 3 アルゴン-水素混合ガスアークにおける電子密度分布

Fig. 6. 7は、90%Ar-10%H₂混合ガスアークにおけるIR法によって計測された電子密度分布（△印）である。▲および●印は、二線強度相関法で評価された組成と温度を使用してSahaの式から算出した電子密度分布である。また、参考のために、第3章でAr Iスペクトル強度（細線）およびH α スペクトル強度（破線）を用いてFowler-Milne法から評価した温度をもとに10%H₂均一混合雰囲気での電子密度を算出した結果も併記した。計測電子密度分布は、二線強度相関法による結果と同等か若干高くなっているが、破線や細線と比較して、よい一致にある。また分布のプロファイルもよく一致している。

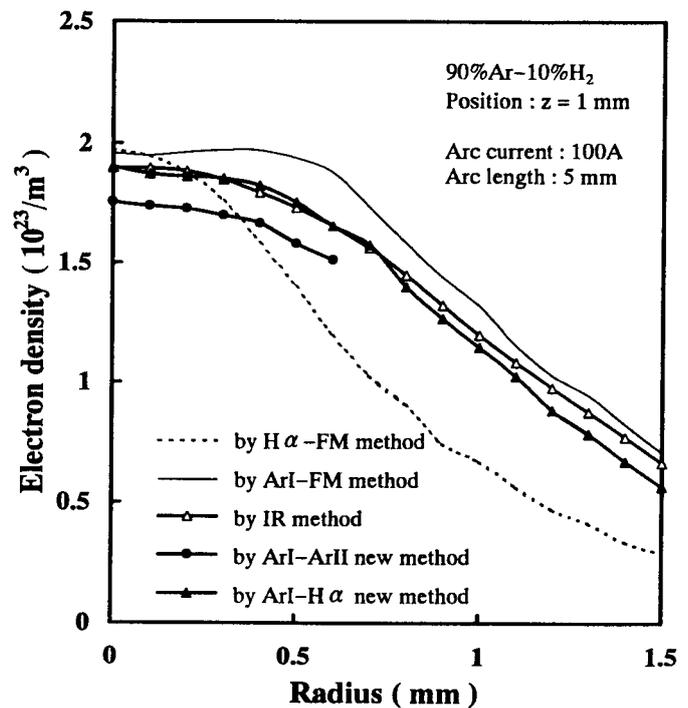


Fig. 6. 7 Comparison among electron density profiles measured by some methods

次に、水素混合ガスアークでは、H β ス

ペクトル波形を用いたStark拡がり法による電子密度計測ができる。以下Stark拡がり法による電子密度計測について述べる。

Stark拡がり法は、H β スペクトルの波形の半値幅を計測する方法であり、計測波形を各波長毎にアーベル変換し、それらを再び波形に変換する必要がある。Fig. 6. 8は、アーベル変換後に再構築されたアーク中心軸位置でのH β スペクトルの波形である。H β スペクトルの双頭波形のピーク部は、理論的には中心波長486.1nmに対して対称になるはずであるが、実際には図のように対称にはならないことが多い。すなわち、ピーク強度を正確に決定しなければ、

ピーク値の半値における拡がり幅（半値幅）の計測に大きな誤差が生じる。

ここではスペクトル波形の面積（輝線スペクトルの放射エネルギーを意味する）が変化しないように対称化する。具体的には、スペクトルの周辺波形が対称であることから、波形の周辺波長域が重なるように折り返す。次いで非対称部において各波長での強度を平均して、Fig. 6. 9の波形を求める。さらに、この平均強度によって求められるピーク領域を波形面積が変化しないように平坦化する。この平坦化された強度（図中の中太線の高さ）を半値（細線の高さ）幅計測の基準ピーク値とした。なお、ここでの処理は、Lochte-Holtgreven²⁸⁾の手法に準ずるものである。Fig. 6. 10は、半値幅と電子密度の関係を示した図で、電子密度 10^{23} m^{-3} まではGriem³¹⁾によって与えられている。それ以上の電子密度に対しては、外挿して求めた。ただし、この図は、Griemの理論値をFig. 6. 9の手法に合わせてピーク部を平坦化処理した値をピーク値とし、その半値の幅と電子密度の関係を求めたものである。

以上の手順によって電子密度を計測した結果が、Fig. 6. 11である。図中の○印が Stark 拡がり法により求めた電子密度である。△印は IR 法によるものであり、▲および●印は二線強度相関法による結果である。若干の差異はあるが、3法での結果はほぼ一致している。

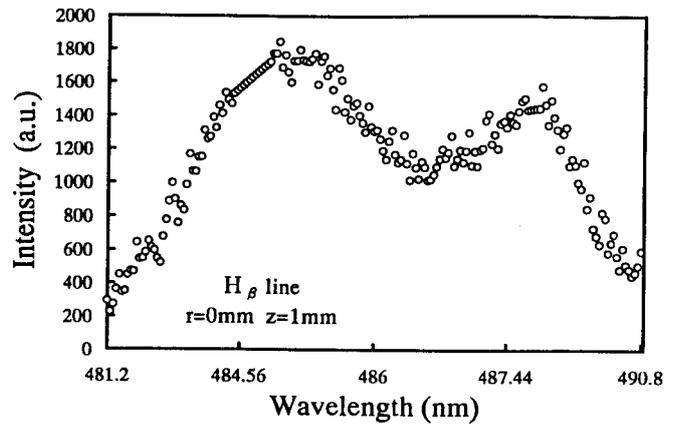


Fig. 6. 8 Waveform of H β line after Abel inversion

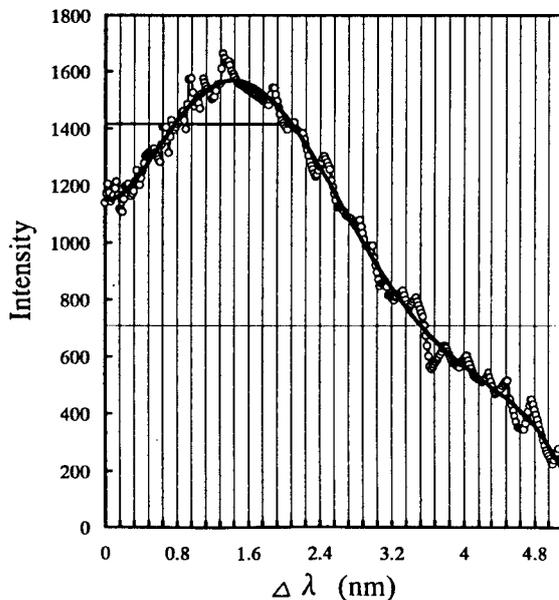


Fig. 6. 9 Peak intensity and half width of H β line

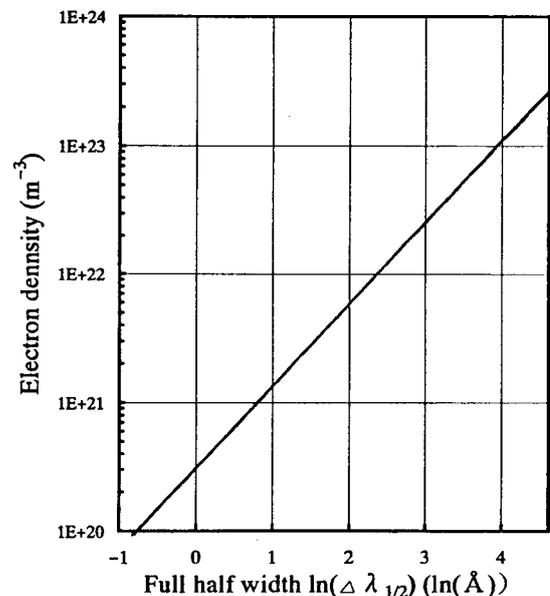


Fig. 6. 10 Relationship between electron density and full half width in H β line

Fig. 6. 12は、IR法で求めたプラズマ全体領域における電子密度分布をまとめたものである。図中にはアルゴンガスアークにおける電子密度を併記した。陰極近傍では、アーク中心部で電子密度は低下するが、周辺部ではアルゴンガスアークと同等である。しかし、陽極に近づくとともに、アルゴンガスアークにおける電子密度分布より中心部、周辺部ともに電子密度が低下する。とくに周辺部では、電離領域が急激に収縮

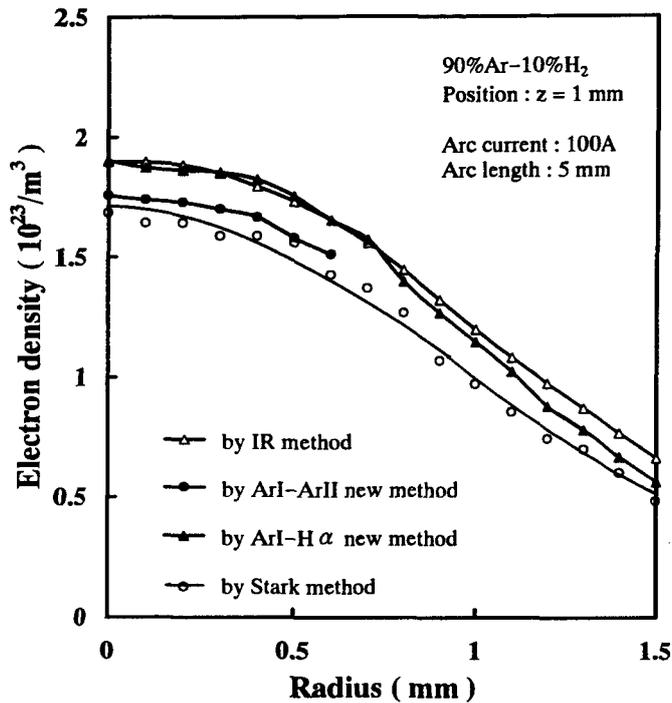
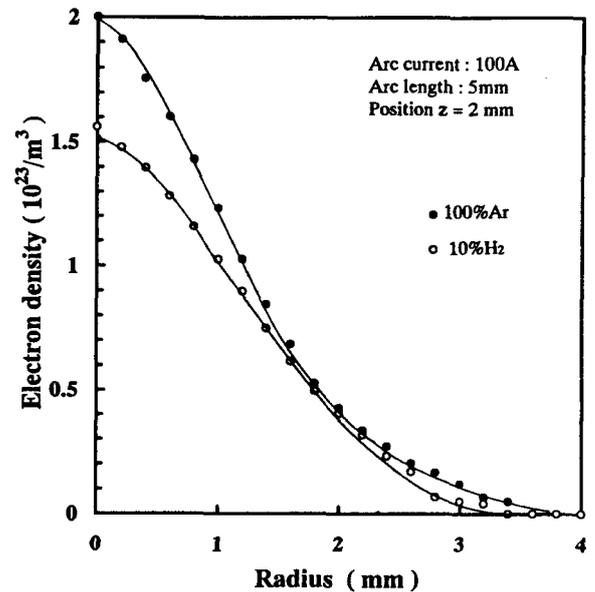
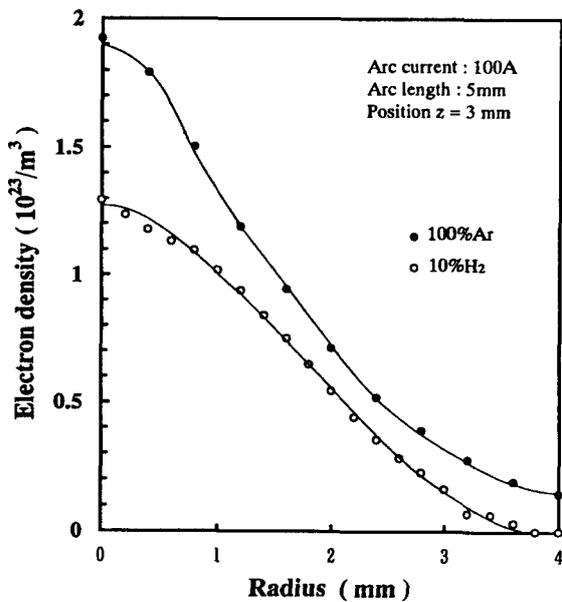


Fig. 6.11 Comparison among electron density profiles measured by some methods

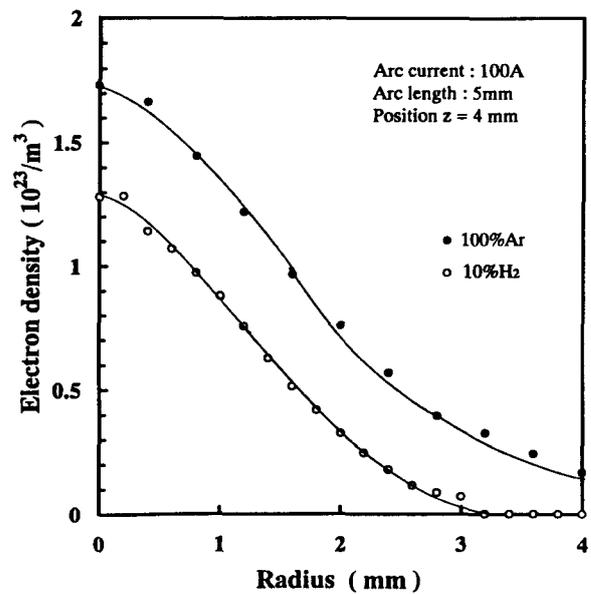
づくともない、アルゴンガスアークにおける電子密度分布より中心部、周辺部ともに電子密度が低下する。とくに周辺部では、電離領域が急激に収縮



(a) z=2mm



(b) z=3mm



(c) z=4mm

Fig. 6.12 Electron density distributions at some positions measured by infrared radiation method (90%Ar-10%H₂ arc)

する。このことは陽極面上のプラズマ温度の急激な低下によるものである（Fig. 5. 17(a) 参照）。

以上、電子密度分布結果において、アルゴンガスアークにヘリウムを添加した場合には電離しづらいヘリウムのアーク中心部への濃縮現象の影響が強く現れるのに対し、水素を添加した場合にはアーク温度の低下の影響（Fig. 3. 3(a)からガス組成による電子密度の変化は小さいと判断できる）が強く現れる。また、ヘリウム添加と水素添加とでは陽極直上のプラズマの電離状態に大きな違いがあることを明らかにした。

また、本節において、局所熱平衡近似の仮定のもとに提案されたプラズマ中のガス組成の不均一性を考慮した二線強度相関法によって評価した電子密度分布と、局所熱平衡を仮定しない電子密度計測での結果とを照合するとき、よい一致が得られ、二線強度相関法の有効性が示された。

6. 3 混合ガスアークにおける陽極面の電流密度分布

本節では、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークとアルゴン-水素混合ガスアークでの陽極上の電流密度分布を計測し、第2章における陽極溶融現象ならびに前節までのプラズマの電離状態との関連を検討する。

6. 3. 1 水冷銅陽極における電流密度分布と陽極近傍プラズマの状態

陽極上の電流密度計測には、岡田^{4,3)}により提案された陽極材裏面の電位分布を計測する探針法を採用した。Fig. 6. 13は、陽極電流密度測定探針法の概略図である。水冷銅板の厚さは、1.5mmである。探針は、陽極板裏面においてアーク中心軸を通る±15mmの直線範囲で走査し、そのときの電位変化を記録計で計測した。なお、アーク中心での電位を0mVとした。本法は、計測された電位分布に最も近い電位分布となるような電流密度分布を計算によって探索し、推定する手法である。

Fig. 6. 14は、アルゴンガスアークの場合の陽極面上の計測電位分布から推定された電流密度分布である。アルゴンガスアークでは陽極面での電流の拡がり半径は3.5mm程度である。次にアルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合の電流密度分布は、75%ヘリウム濃度までアルゴンガスアークにおける計測電位分

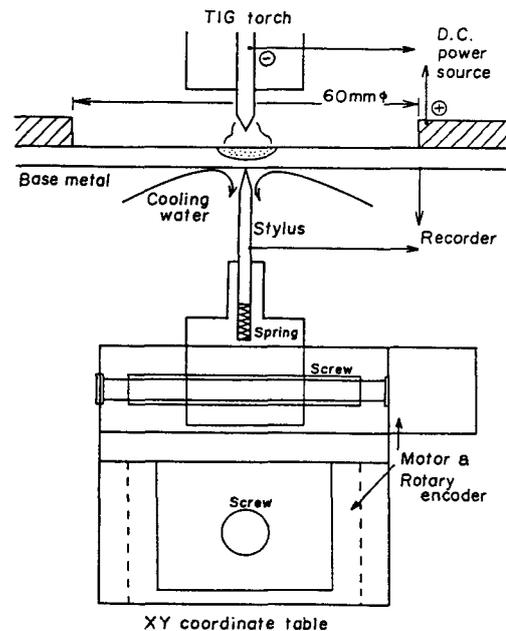


Fig. 6. 13 Schematic diagram for measurement of electric potential distribution at the back of a thin anode plate^{4,3)}

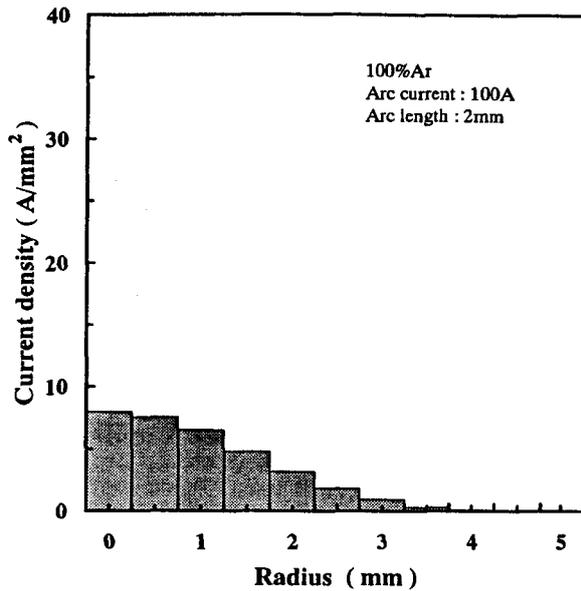


Fig. 6. 14 Current density distribution at the water-cooled copper anode measured by electric potential method (100%Ar arc)

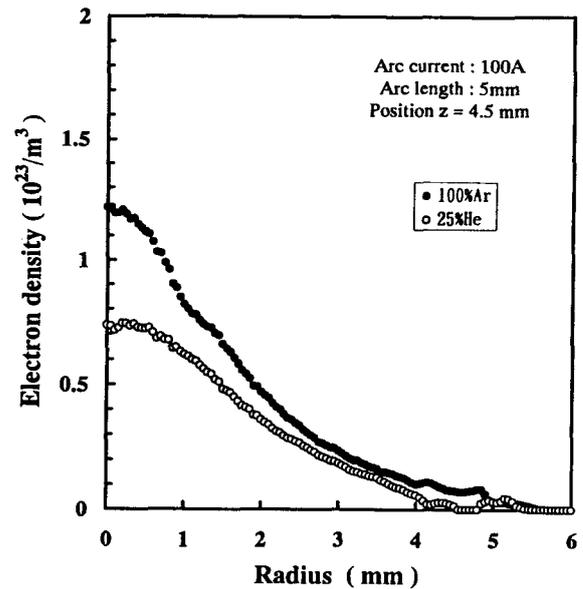


Fig. 6. 15 Electron density distribution near the anode (z=4.5mm) in 100%Ar and 75%Ar-25%He arcs

布と全く同じであり、変化しない。ただし、100%ヘリウム雰囲気においては明らかに集中する。Fig. 6. 15は、陽極面上0.5mmの位置におけるアルゴンガスアークと75%Ar-25%He混合ガスアークでの電子密度分布の計測結果である。この図から陽極面上近傍におけるプラズマの電離領域の拡がりに大差なく、陽極面電流密度分布でアルゴンガスアークと差がなかったこととよい相関がある。なお、アルゴンガスアークにヘリウムを75%まで混合した場合の陽極面電流密度分布が、アルゴンガスアークの場合とほとんど変化しないという傾向は、第2章において溶融開始速度で入熱密度分布を推定した結果ともよく対応している。

Fig. 6. 16は、5%水素混合アークの場合に推定された陽極面上の電流密度分布である。アルゴンガスアークに比較して、電流の拡がり半径は1.5mm程度まで著しく収縮することがわかる。ヘリウムを混合した場合とは大きく異なることがわかる。また水素混合時の陽極面から0.5mmの位置における電子密度分布をFig. 6. 17に示した。この結果からもプラズマの電離領域はアルゴンガスアークに比較して著しく収

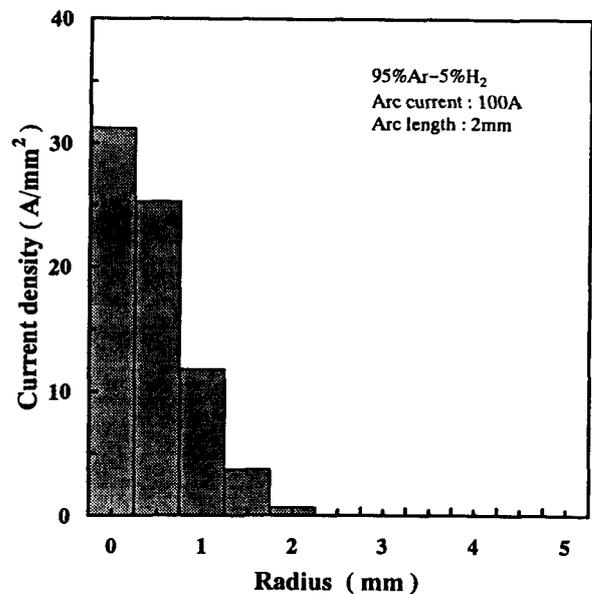


Fig. 6. 16 Current density distribution at the water-cooled copper anode measured by electric potential method (95%Ar-5% H_2 arc)

縮している。

異種ガス混合時の陽極面での電流密度分布の変化は、陽極近傍のプラズマの電子密度分布の変化とよく対応している。そして、異種ガス混合にともなう陽極近傍の電子密度分布の変化は、前節に示したプラズマ柱領域での電子密度分布の変化の特徴と全く同じである。このことから、プラズマ柱の異種ガス混合による変化が、そのまま陽極近傍のプラズマ、さらには陽極面電流密度分布に大きく影響したと判断される。

6. 3. 2 熔融陽極における電流密度分布と陽極近傍プラズマの状態

前項まで述べたきた計測結果から、水冷銅陽極においてプラズマの影響が陽極形態に大きく影響することを示してきた。しかし、溶接等の熱加工においては、陽極が熔融し、そのとき陽極金属が蒸発している。すなわちプラズマ中に金属粒子が混合した多成分粒子混合雰囲気となる。このような場合に陽極形態がどのように変化するのか、またプラズマの状態がどのように変化するのかについて検討する。なお、本項では、主として金属蒸発の顕著なアルゴン-水素系の混合ガス雰囲気を扱うこととする。

Fig. 6. 18 は、Fig. 6. 13 の陽極材料に3mm厚のステンレス鋼板 (SUS304) を用いた場合での陽極面の推定電流密度分布である。(a)図は、アルゴンガスアークの場合であり、(b)図は、95%Ar-5%H₂ 混合ガスアークの場合である。いずれの場合も陽極の熔融によって電流密度のプロファイルがFig. 6. 14 やFig. 6. 16 でのガウス分布状からほぼ均一な分布に変化する。しかし、水素の添加によって熔融面で電流が集中する傾向は水冷銅板と同じである。ただし、水冷銅陽極を用いた場合ほど顕著な集中性を示さないことがわかる。

金属蒸発がプラズマの電離状態に及ぼす影響を調べた。Fig. 6. 19 は、陽極面上近傍のプラズマ領域の電子密度分布を計測した結果である。陽極材に純鉄を使用した場合を示し、また参考のために水冷銅陽極の結果も併せて示した。アルゴンガスアークにおいて、陽極面上0.5mm (z=4.5mm) での電子密度分布は、水冷銅陽極および熔融陽極の場合ともほぼ同じで、蒸発金属粒子の影響がほとんど現れない結果となっている。一方、95%Ar-5%H₂ 混合ガスアークにおいては、陽極面上0.5mm (z=4.5mm) の電子密度分布は、熔融陽極の場合に大きく拡がり、蒸発金属粒子の電離による影響が顕著に現れることがわかる。しかしながら陽極面上1mmの位置 (z=4mm) においては、熔融陽極、水冷銅陽極のいずれの場合の電子密度分布に

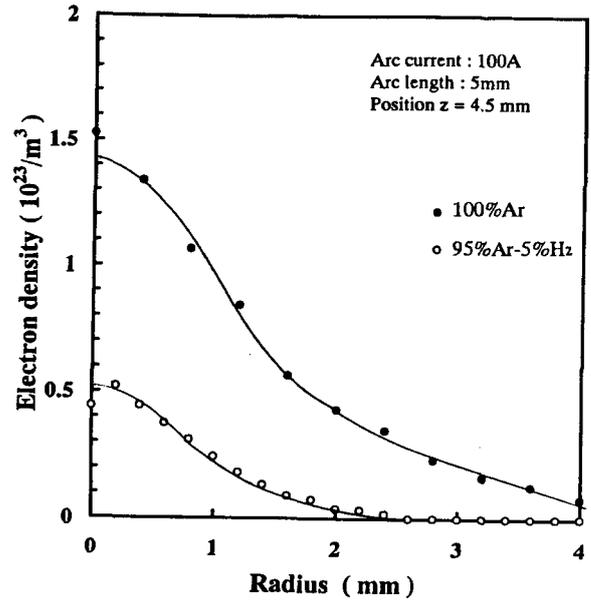


Fig. 6. 17 Electron density distribution near the anode (z=4.5mm) in 100%Ar and 95%Ar-5%H₂ arcs

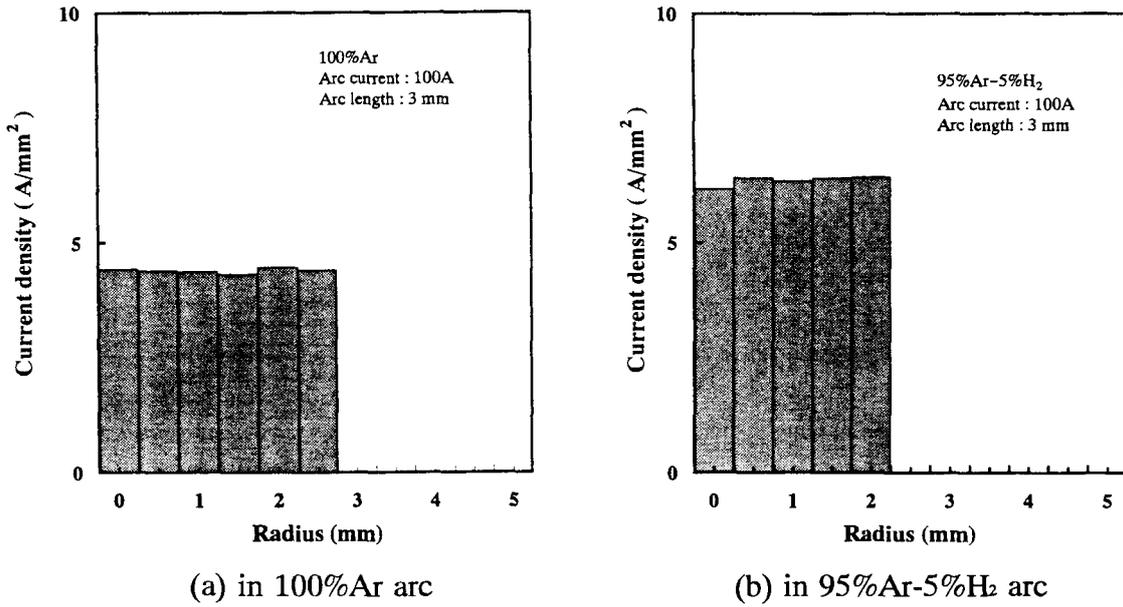
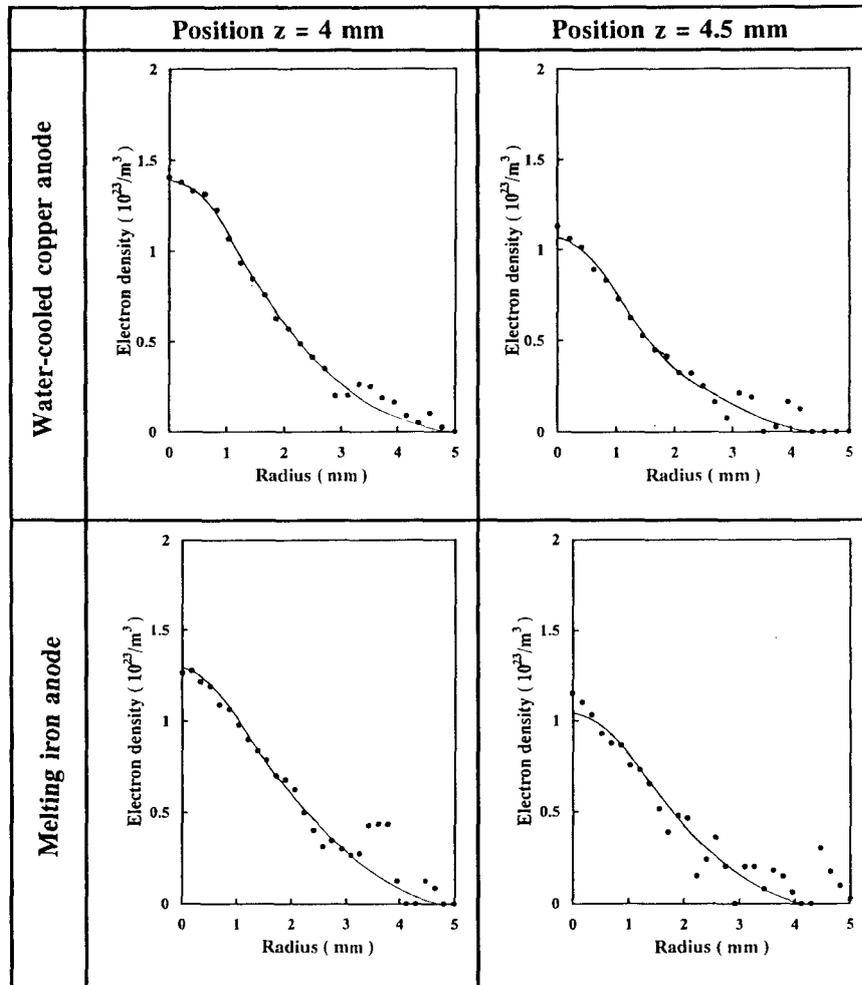
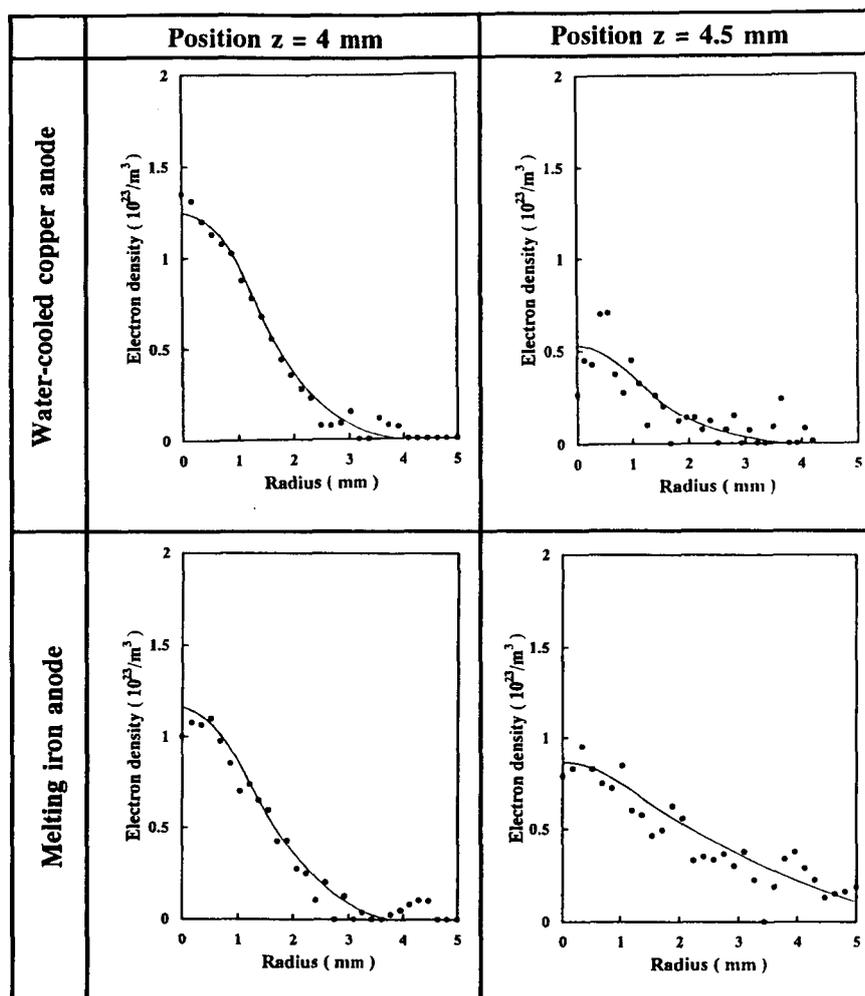


Fig. 6. 18 Current density distribution at the melting steel anode measured by electric potential method



(a) in 100%Ar arcs (100A)

Fig. 6. 19 Electron density distributions near the water-cooled copper and melting iron anodes



(b) in 95%Ar-5% H_2 arcs (100A)

Fig. 6. 19 Electron density distributions near the water-cooled copper and melting iron anodes

も大差がないことがわかる。また、さらに陰極側での電子密度分布を計測して比較した場合においても大差がなかった。これらのことは、蒸発金属粒子がプラズマに影響を与えた領域は陽極面上 1mm までであると判断できる。すなわち、95%Ar-5% H_2 混合ガスアークのプラズマの $z=4$ mm 以下の領域では、水冷銅陽極の場合と差異がない。

また、蒸発金属粒子の影響が顕著に現れた陽極近傍プラズマにおいて、電子密度分布の拡がり半径は 5mm 以上に計測される。しかし、Fig. 6. 18 における溶融面の電流密度分布の拡がり半径は、2mm 程度であり、電子密度分布の拡がり半径のように大きく拡がることはなく、電流密度分布と電子密度分布は、必ずしも対応しない。

このことから、電流密度分布の拡がり半径は、陽極近傍の薄層のプラズマの電離現象（電子密度分布特性）に支配されず、プラズマ柱部の電離領域の特性に支配されるものと考えられる。

ただし、熱源の集中性は、電流密度分布のみで決定されるわけではなく、入熱密度分布として詳細な計測を行うことによって今後議論されねばならない。

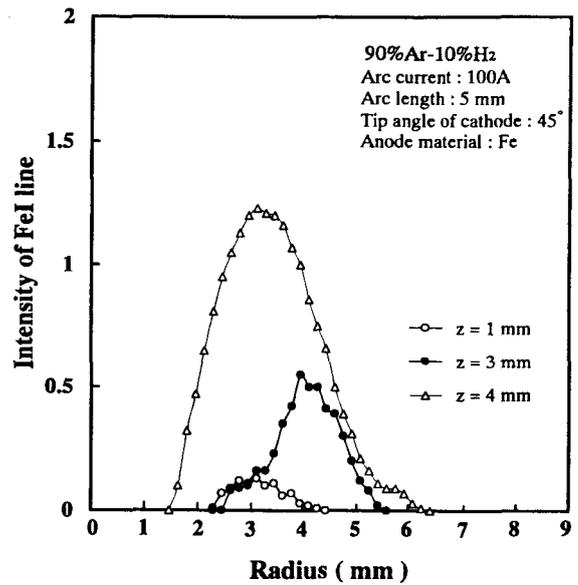
6. 4 蒸発金属を含む多成分粒子混合アークプラズマ中の金属粒子の分布状態

本節では、蒸発した金属粒子がプラズマのどの領域に存在しているのか明らかにするため、金属粒子の輝線スペクトル計測から、蒸発金属粒子の分布状態を検討する。

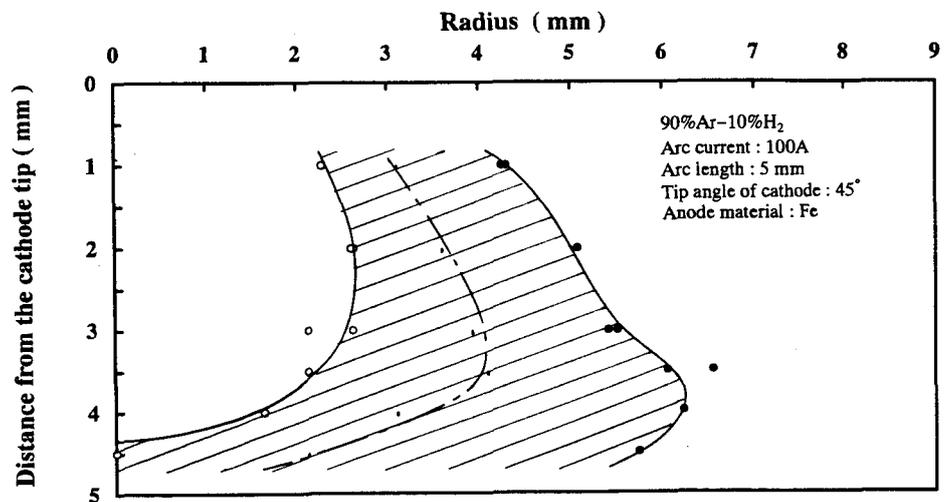
溶融池からの蒸発金属粒子の挙動は、変動が大きく、定量的な計測は極めて困難である。したがって、本節では、繰り返し計測の平均値として蒸発金属粒子の分布状態を検討する。このような長時間にわたる計測においては、金属蒸発によって溶融池面が凹むことによって、アーク長が変化すること、また陽極面を側方から計測できなくなる等の問題が生じる。このため、ここでは水冷銅板上に設置された純鉄を、まず十分に溶融した溶融金属塊を作り、これを陽極として用いた。また雰囲気ガス組成は、前節と同様にアルゴン-水素混合系を主として用い、一部アルゴン-水素-ヘリウム混合系も使用した。

金属粒子のスペクトルの強度分布計測においては、1走査をできるだけ短時間にするため、分光強度を前節まで使用したマルチチャンネル検出器の代わりに、フォトマルチプライヤを用いた。このためスペクトルの強度は、スペクトル波形面積としてではなく、ピーク強度で表した。

Fig. 6. 20 (a)は、90%Ar-10%H₂混合ガスアークにおける鉄原子スペクトル Fe I (381.6nm) の計測強度分布結果である。各 z 位置における鉄原子スペクトルの強度は、アーク中心軸近傍の領域では計測されず、アークの外周部の領域でのみ計測される。ただし、陽極面近傍 ($z \geq 4.5\text{mm}$) においてはアーク中心領域でも計測されるが、この領域における Fe I の強度は著しく変動する。同(b)図には、鉄原子スペクトルが計測された領域(斜線部)を示す。図中の一点鎖線は Fe I スペクトル



(a) Fe I intensity distribution



(b) Region measuring Fe I intensity at iron anode

Fig. 6. 20 Fe I intensity distribution in 90%Ar-10%H₂ arc

強度分布で最大放射強度となる位置である。また前節において、プラズマ内部状態は陽極金属蒸発の影響をほとんど受けなかった (Fig. 6. 19 (b)参照) ことから、第5章のFig. 5. 17 (a)に示したプラズマの温度分布と比較することができる。この結果、斜線領域 (陽極近傍領域は除く) の温度は、約 10,000K 以下である。

以上の結果について考察を行う。陽極から蒸発した金属粒子は、陰極側からのプラズマ気流によってアーク周辺領域へ輸送される。その輸送状況は、牛尾ら⁴⁴⁾によって数値計算されたプラズマ気流の流線 (Fig. 6. 21 参照) から、予測される。したがって、アーク周辺にできる渦によって蒸発粒子は、一度周辺へ輸送された後、再びアーク中へ巻き込まれると予測される。

そこで、Fig. 6. 20の結果を検証すると、各位置において計測された最大放射強度は、一定ではなく、陽極に近い位置 (zが大きい位置) ほど高くなる。これを Fowler-Milne 法で分光分析する場合の最大放射強度に相当する強度と考え、陰極に近づくほど鉄粒子密度が急減していることを示している。しかし、鉄粒子密度が位置によって変化する場合には、第5章で明らかにしてきたように粒子混合雰囲気での最大放射強度は、Fowler-Milne 法での基準強度にはならない。

また、Fig. 6. 22は、Fe I (381.6nm) スペクトル強度と温度の関係を計算した結果である。図から約 12,500K の温度において放射強度は、最大になる。したがって、Fig. 6. 20で Fe I の検出領域が約 10,000K 以下であることから、計測された Fe I の最大放射強度は、Fig. 6. 22での最大放射強度と明らかに異なる。すなわち、Fig. 6. 20 (b)の一点鎖線は、等温線を示していない。

したがって、Fig. 6. 22の最大放射強度を示す高温域に達するまでに Fe I 強度が低下することは、アーク周辺からアーク中心軸部へ向かって鉄粒子密度が急激に低下したためであると判断される。

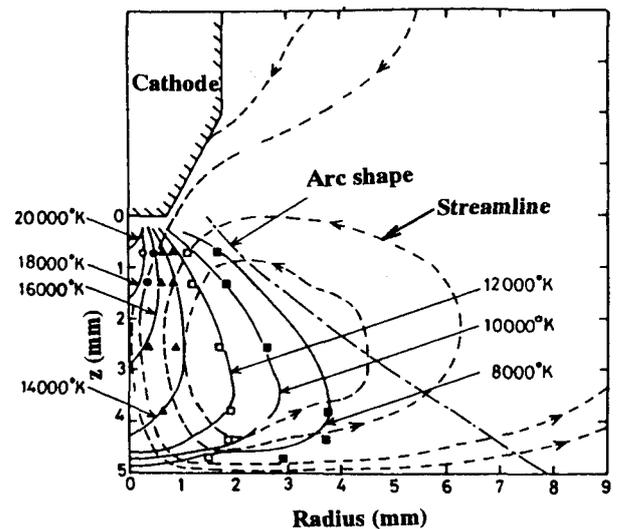


Fig. 6. 21 Computed plasma streamline and temperature in Ar arc⁴⁴⁾

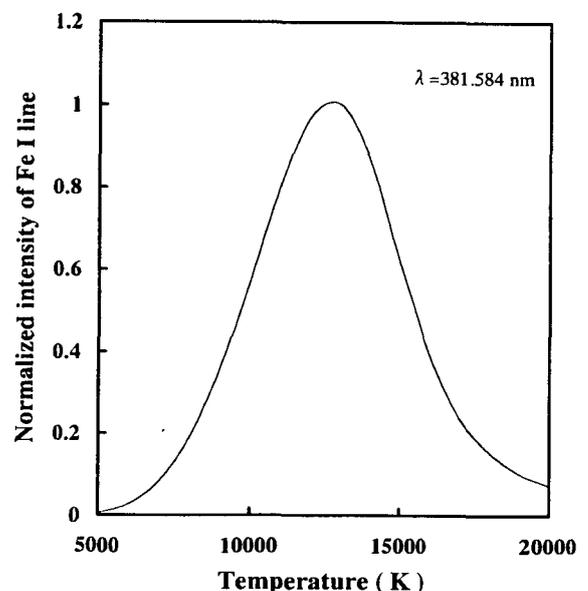


Fig. 6. 22 Relationship between temperature and calculated Fe I intensity

70%Ar-20%He-10%H₂ 混合ガス雰囲気下のアークにおいて、鉄原子および鉄イオンスペクトルの強度分布を計測した一例がFig. 6. 23である。z=4mm以上の位置において、鉄一価イオンスペクトル Fe II が鉄原子スペクトル Fe I のやや内側の領域で計測される。しかし、Fe I スペクトルと Fe II イオンスペクトル強度がアーク中心側で急速に低下して計測できなくなる位置は、ほとんど同じである。アーク中心側のより高温領域に至って鉄一価イオンスペクトルが消滅することは、鉄の二価イオンに遷移したためと単純には考えられる。高温化によってより多価イオンに電離する場合には、まず Fe I スペクトル強度が消滅し、それよりアーク中心側によったより高温の位置で Fe II スペクトル強度が消滅するはずである。すなわち消滅する位置に明らかに差が生じるはずである。したがって、ここでの結果からもアーク中心部に向かって鉄粒子密度が急激に低下するため、Fe I および Fe II スペクトル強度が同時に低下したと判断される。

以上の結果から、本節におけるアーク発生条件の下では、金属粒子は、アークプラズマの中心部領域にほとんど巻き込まれないと考えられる。すなわち、溶融鉄陽極における90%Ar-10%H₂ 混合ガスアークでは、アーク中心軸近傍の領域で水素が濃縮し、その周囲にほぼ90%Ar-10%H₂のガス雰囲気が存在し、さらにその外側に蒸発鉄粒子を含む雰囲気が取り囲むように分布している。

本研究結果を総合的に判断するとき、アルゴンガスアークの陰極近傍のプラズマ領域で最も濃縮しやすい添加粒子は、水素であり、次いでヘリウム、窒素の順であり、鉄粒子は濃縮しがたい結果となる。この組成の不均一性の発生メカニズムに関しては、未解決であるが、各粒子状態におけるエンタルピ（エネルギー）分布の相違やドリフト速度（粒子相互間での動き易さ）の相違等の観点から検討する必要があると考えられる。

以上、本研究では、混合ガスアークプラズマの計測・解析手法を開発することによって、混合ガス雰囲気下におけるアークプラズマ中のガス組成は一様ではなく、不均一な分布となることを明らかにし、これに関連する混合ガスアークの諸現象の特徴を明らかにした。しかし、分光定数の未整備や計測装置に関連する計測精度の限界等から、現状ではアーク諸現象の解明するための多くの問題点を未解決のまま残した。今後は、プラズマの粒子密度および温度を独立して計測することを基本にした、より精度の高い計測・解析技術の開発によって、これら問題点の解決を目指さなければならない。

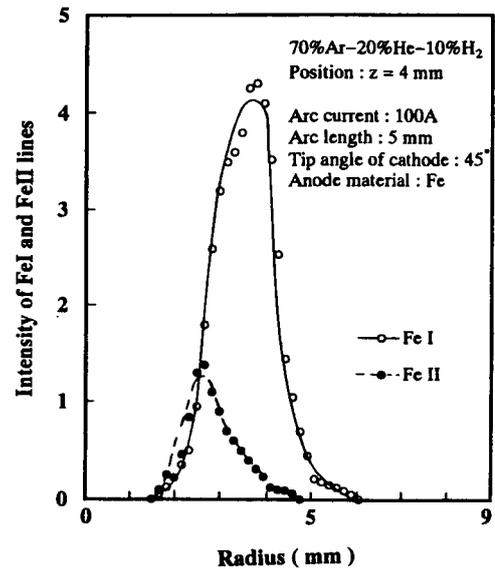


Fig. 6. 23 Correlation between Fe I and Fe II intensity distributions

6. 5 結 言

局所熱平衡を仮定しない赤外線放射プラズマ診断法および Stark 拡がり法により陰極近傍から陽極近傍までのアークプラズマ領域の電子密度分布を計測し、混合ガスアークにおける電離特性を明らかにすること、およびアルゴンガスアークに水素やヘリウムを混合した場合のプラズマの電離特性と第 2 章で示したアークの諸現象とくに放射損失エネルギー特性や陽極現象との関連を明らかにすることを目的に、検討を行った。このとき同時に第 5 章で示した二線強度相関法によるプラズマ状態解析結果と電離状態特性とを照合し、二線強度相関法の有効性を調べた。得られた結果を以下に示す。

- (1) アルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合、アーク中心軸近傍のプラズマの電子密度は、アルゴンより電離しがたいヘリウムの濃縮によって急激に低下する。これに対してアーク外周部の電子密度は、中心部ほど大きく低下せず、アーク柱の電離領域は緊縮しない。
- (2) アルゴンガスアークに水素を混合した場合、プラズマ全体に温度が低下するため、電子密度密度も全体に低下する。この結果、アーク柱の電離領域が緊縮する。この傾向は、陽極近傍プラズマで顕著となる。
- (3) 局所熱平衡を仮定しない赤外線放射プラズマ診断法および Stark 拡がり法により測定した電子密度分布は、第 5 章で二線強度相関法で解析したプラズマのガス組成分布と温度分布から Saha の式によって算出した電子密度分布と一致した。これによって、二線強度相関法の有効性を示した。
- (4) 第 5 章と上述の結果から、アルゴンアークへヘリウムや水素を混合しても熱的ピンチ効果が現れることはない。
- (5) 第 2 章におけるアルゴンガスアークへのヘリウム混合による放射損失エネルギーの急減は、アーク中心領域での電子密度の急激な低下に依存する。
- (6) 水冷銅陽極において、陽極の電位分布計測から推定した陽極面の電流密度分布は、アルゴンガスアークに水素を添加することにより集中的となる。また、これと対応して陽極直上の電子密度分布も同程度まで収縮する。
- (7) アルゴンにヘリウムを混合した場合、陽極面の電流密度分布および陽極直上のプラズマの電子密度分布はアルゴンガスアークの場合とほとんど変化なく、ヘリウム混合によって陽極で電流は集中しない。
- (8) 熔融した鉄陽極から蒸発した鉄粒子は、陽極近傍領域と陰極近傍までのアークプラズマの外周を取り囲む領域に分布する。したがって、陰極近傍に分布する鉄粒子は、アークの中心部にほとんど巻き込まれることはない。
- (9) 以上、種々の粒子が混合する雰囲気において、アークプラズマ中で全ての粒子が均一に混合しているとは限らないことを明らかにした。

第7章 総括

本研究は、混合ガス雰囲気下におけるガスタングステンアークのプラズマ特性を明らかにすることを目的とした。とくに、プラズマ中の混合ガス組成と温度に注目し、発光分光分析によるプラズマ状態の定量的解析手法を開発して検討した。

第1章は緒論であり、本研究を行う背景および必要性和目的ならびに研究遂行の方針を述べた。

以下、この方針と対応させて、本研究で得られた結果を要約する。

第2章では、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおけるアーク現象として、アーク電圧特性、アーク圧力特性、熱輸送特性および溶融・蒸発特性を取り上げ、アルゴンガスアーク中へのヘリウムの混合の影響が、アークの陰極、アーク柱および陽極のどのプラズマ領域に顕著に現れるかについて検討した。

この主な結果を以下に示す。

- (1) アルゴンガスアークにヘリウムを混合することによって陰極近傍の領域の電位のみが増大する。
- (2) アルゴンガスアークにヘリウムを混合するにともないアーク圧力は急激に低下し、ヘリウム濃度75%以上ではほぼ飽和する。
- (3) ヘリウムの混合とともに陽極への熱輸送効率(熱効率)は増大する。これは、アーク柱からの放射エネルギー損失の減少による。
- (4) アルゴンガスアークにヘリウムを混合しても陽極が溶融し始める熱源移動速度と陽極材料の蒸発速度ともアルゴンガスアーク時と大きく変化することはなく、陽極の入熱密度分布は集中的にはならない。
- (5) 水素をアルゴンガスアークに混合した場合には、顕著な金属蒸発が生じ、熱源は集中的となる。この傾向はヘリウムを混合しても顕著な金属蒸発を生じなかったことと大きく異なる。

以上、混合ガスアークにおけるアーク現象の特徴を明らかにし、かつヘリウム混合の影響が、陰極近傍での現象に関連する上記の(1)、(2)で、顕著に現れることを明らかにした。

第3章では、アルゴン-ヘリウム混合ガスおよびアルゴン-水素混合ガスアークを対象として、発光分光分析法によるプラズマの温度の定量的評価を検討した。発光分光分析法として局所熱平衡近似を仮定するFowler-Milne法および $\text{Ar II} / \text{Ar I}$ 二線強度比法と局所部分熱平衡近似を仮定する $\text{Ar II} / \text{Ar II}$ 、 $\text{Ar I} / \text{Ar I}$ および $\text{H}\beta / \text{H}\alpha$ 相対強度比法(ボルツマンプロット法)を適用して検討し、以下の結果を得た。

- (1) アルゴンガスアークプラズマでは、種々の分光分析法による温度分布の計測結果はほぼ一致し、局所熱平衡近似を仮定してもほとんど矛盾を生じない。

したがって、Ar I /Ar I 相対強度比法では低く温度が計測されるという従来の指摘は正しくない。

- (2) アルゴン-水素混合ガス、アルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおいて、種々の分光分析法によって計測される温度分布には、顕著な差異が生じ、多くの問題点が存在する。
- (3) アークプラズマにおける Ar II /Ar II、Ar I /Ar I および H β /H α 相対強度比法では、計測誤差や遷移確率値の誤差に評価温度は強く支配され、評価温度にはバラツキが大きい。したがって現状において、相対強度比法は、詳細なプラズマの状態解析に適さない。一方、Fowler-Milne 法、Ar II /Ar I 二線強度比法では、変動の少ない再現性のある温度分布が得られる。

以上、アルゴン-水素混合ガスおよびアルゴン-ヘリウム混合ガスアークにおいては、多くの問題が生じることを明らかにし、かつアークプラズマへの各種発光分光分析法の適応性を明らかにした。

混合ガスアークにおいて、第2章でヘリウムガスの影響が陰極近傍の現象に現れやすいことと、第3章でプラズマ中のガス組成をシールドガス組成と同じとして分光分析した温度分布に問題が生じることから、ヘリウムや水素混合時にプラズマガス組成がシールドガス組成と異なるか、あるいは分光分析における局所熱平衡近似が成立しないかのいずれかの可能性があるかと判断した。

したがって、第4章では、プラズマガスを直接採取しガス分析する質量分析法によって、プラズマガス組成を検討した。このためにまず、水冷銅陽極板に開けた細径孔から陽極面上のプラズマガスを微量採取し、そのガスを直結された質量分析器にてガス分析するその場ガス分析システムを開発した。以下、この手法によって得られたアルゴン-ヘリウム混合ガスアークでの主な結果を示す。

- (1) 種々のアーク発生条件においても陽極表面のアーク中心軸近傍のプラズマガスのヘリウム濃度は、シールドガスのそれより高くなり、またその周囲にはアルゴン濃度が高くなるアーク発生条件がある。
- (2) アーク長が短いほどアーク中心軸近傍の陽極面上のプラズマガスのヘリウム濃度が著しく高くなり、アーク長の増加とともにヘリウム濃度は減少して、シールドガス組成に漸近する。

第4章での陽極面上でのプラズマガス組成分析結果から、プラズマ中でもガス組成の不均一が予想される。このようなプラズマに対して、ガス組成が既知であるとして解析した第3章の分光分析結果では当然問題を生じる。したがって、プラズマのガス組成を未知数として解析できる分光分析法が不可欠となる。そこで、第5、6章においては、プラズマガス組成の不均一分布を考慮する発光分析手法を検討し、混合ガスアークのプラズマ状態を解明し、第2章における混合ガスアークのプラズマ特性との関連を明らかにする。

第5章では、局所熱平衡が近似的に成立すると仮定して、アルゴンガスアーク中へ種々の異

種ガスを混合した場合のプラズマ中の局部ガス組成およびその温度を、異なる粒子状態あるいは異なる粒子からの 2 種類のスペクトル強度の相関関係を用いて評価する二線強度相関法を提案し、以下の結果を得た。

- (1) アルゴンガスアーク中にヘリウムを 50% 濃度まで混合しても、Ar I -Ar II 二線強度相関法から計測されるアーク中心近傍の温度は、アルゴンガスアークの温度とほぼ同じである。また、同時に評価されるヘリウム濃度は、アーク中心軸近傍で高くなる。このときのヘリウム濃度は、第 4 章での質量分析による測定結果と一致する。
- (2) アルゴン - 水素混合ガスアークにおいて、Ar I -H α 二線強度相関法により計測した水素濃度は、アーク中心軸近傍の陰極近傍で極めて高くなる。また温度は、アルゴンガスアークに比較してアーク全体で低下し、陽極に近づくほど一層顕著に低下する。すなわち、プラズマは緊縮するが、プラズマ温度は水素混合によって低下する。
- (3) この結果から、従来高熱伝導度の水素やヘリウムを混合することによりプラズマの冷却効果が強まり、これによってアーク柱が緊縮し、かつ高温化するという熱的ピンチ効果による理解は正しくない。

第 6 章では、第 5 章で評価された混合ガスアークプラズマの状態を反映した電子密度分布特性を、局所熱平衡を仮定しない Stark 拡がり法と赤外線放射プラズマ診断法により検討した。次いで、第 2 章におけるプラズマの放射エネルギー特性および陽極形態とプラズマ状態の関連を検討し、以下の結果を得た。

- (1) アルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合、アーク中心軸近傍のプラズマの電子密度は、アルゴンより電離しがたいヘリウムの濃縮によって急激に低下する。これに対してアーク外周部の電子密度は、中心部ほど大きく低下せず、アーク柱の電離領域は緊縮しない。
- (2) アルゴンガスアークに水素を混合した場合、プラズマ全体に温度が低下するため、電子密度密度も全体に低下する。この結果、アーク柱の電離領域が緊縮する。この傾向は、陽極近傍プラズマで顕著となる。
- (3) 局所熱平衡を仮定しない赤外線放射プラズマ診断法および Stark 拡がり法により測定した電子密度分布は、第 5 章で二線強度相関法で解析したプラズマのガス組成分布と温度分布から Saha の式によって算出した電子密度分布と一致する。これによって、二線強度相関法の有効性を示した。
- (4) 第 2 章におけるアルゴンガスアークへのヘリウム混合による放射損失エネルギーの急減の主な因は、アーク中心でヘリウムが濃縮することによる電子密度の急減にある。
- (5) アルゴンガスアークにヘリウムを混合した場合、陽極面の電流密度分布は、ヘリウム混合によってほとんど変化しない。アルゴンガスアークに水素を混合した場合には、電子密度分布径も陽極近傍で著しく収縮し、このとき、陽極面の電流密度分布も、急激に集中する。
- (6) 純鉄陽極から蒸発した鉄粒子は、陽極近傍領域と陰極近傍までのアークプラズマの外周を

取り囲む領域にのみ分布し、陰極近傍の鉄粒子はアークの中心部に巻き込まれることはない。

以上、本研究において、混合ガス雰囲気下でのアークプラズマの組成や温度を評価するための二線強度相関法を開発し、この手法によって、従来まで考えられていたプラズマ状態とは大きく異なる混合ガス雰囲気下のプラズマの状態を明らかにした。これによって混合ガスアークプラズマの状態の考察時の注意点を指摘し、今後の新たな理論的解明のための指針を与えた。

謝 辞

本論文は、大阪大学工学部生産加工工学科教授 黄地 尚義博士の懇切な御指導と御鞭撻により完成し得たものであり、謹んで深甚なる謝意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり、有益な御討論と御教示を賜りました大阪大学接合科学研究所教授 松縄 朗博士、同研究所教授 牛尾 誠夫博士、同大学工学部生産加工工学科教授 小林 紘二郎博士に深く感謝いたします。

本論文に関する研究は、金属材料技術研究所溶接研究部および組織制御研究部において実施したものであり、同研究所前所長 新居 和嘉博士、同研究所所長 岡田 雅年博士、ならびに直接御指導戴きました元溶接研究部長 稲垣 道夫博士、前組織制御研究部長 中村 治方博士、組織制御研究部長 佐藤 彰博士、環境性能研究部長 入江 宏定博士、組織制御研究部第3研究室長 岡田 明博士に深く感謝の意を表します。

研究の遂行にあたっては、金属材料技術研究所組織制御研究部第5研究室長 塚本 進博士、当時同部特別研究員 Johan Zijp 博士、同部主任研究官 佐久間 信夫氏、村松 由樹氏をはじめ組織制御研究部の各位から貴重な御討論と御協力を戴いた。また、同研究所において卒業研究を行った当時日本工業大学学生および日本大学学生諸氏には、熱心に実験の御協力を戴いた。各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 安藤, 長谷川: 「溶接アーク現象 (増補版)」, 産報 (1967)
- 2) Lancaster J.F.: 「溶接アークの物理」 (溶接学会溶参考文献接アーク物理研究委員会 訳), 溶接学会 (1990)
- 3) 大野, 宇田: 「ニッケル溶接金属の気孔生成におよぼす水素、窒素の影響」, 溶接学会誌, 48(1979)4, 223
- 4) 平岡: 「混合ガスシールドTIGアークにおける母板表面上のプラズマガスの組成割合」, 溶接学会論文集, 10(1992), 1, 58
- 5) 宇田: 「超微粒子」, 溶接学会誌, 54(1985)6, 318
- 6) 岡田, 竹内, 村川: 「回転DCアーク法によるダイヤモンド合成」, 溶接協会、表面改質技術委員会資料 (1993), SM-80-93
- 7) Frie, W. and Maecker, H.: "Zur Dynamik reagierender Gase", Zeitschrift für Physik, 168(1962), 206
- 8) Frie, W.: "Entmischungseffekte bei Gemischen ionisierender Atomgase", Zeitschrift für Physik, 172(1963), 99
- 9) Richter, J.: "Über Diffusionsvorgänge in Lichtbögen", Zeitschrift für Astrophysik, 53(1961), 262
- 10) 山本, 村山: 「プラズマの分光計測」, 学会出版センター (1995)
- 11) Chapman, S. and Cowling, T.G.: "The Mathematical Theory of Non-uniform Gases", Cambridge Univ. Press(1960)
- 12) Key J.F., Chan, J.W. and McIlwain, M.E.: "Process Variable Influence on Arc Temperature Distribution", Welding J., 62(1983), 179s
- 13) Gibson, G.J. and Seitz, R.O.: "Thoriated-Tungsten Electrodes", Their Welding Characteristics and Applications, J.A.W.S, 31(1952), 102
- 14) Davis, E. and Terry, C.A.: "Nitrogen-Arc Welding of Copper", British Weld. J., 1(1954), 53
- 15) Skolnik, M. and Jones, T.B.: "High Current Tungsten Arc in Argon, Helium and Their Mixtures", J. A.W.S., 32(1953), 55s
- 16) Jackson, C.E.: "The science of arc welding", 39(1960)
- 17) 安藤, 西口, 福田: 「カロリメータによる溶融池平均温度の測定」, 溶接学会誌, 36(1967), 371
- 18) 赤崎, 村岡, 渡辺, 蝦原: 「プラズマ工学の基礎」, 産業図書 (1984)

- 19) Maecker, H.: "Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression", Zeitschrift für Physik, 141(1955), 198
- 20) Zijp, J.P.: "Heat Transport during Gas Tungsten Arc Welding", Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft(1990)
- 21) Allum, C.J.: "Power dissipation in the column of a TIG welding arc", J. Phys. D: Appl. Phys., 16(1983), 2149
- 22) Evans, D.L. and Tankin, R.S.: "Measurement of emission and absorption radiation by an argon plasma", Phys. Fluids., 10(1967), 1137
- 23) Cram, L.E.: "Statistical evaluation of radiative power losses from thermal plasmas due to spectral lines", J. Phys. D: Appl. Phys., 18(1985), 401
- 24) 大野：「アークプラズマによる超微粒子の作製に関する研究」，学位請求論文（東京大学，1988）
- 25) 伏見：「実験物理学講座 30: プラズマ・核融合」，共立出版 (1979)
- 26) Fowler, R.H. and Milne, E.A.: Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 83(1923),403; 84(1924), 499
- 27) 原口：「ICP発光分析の基礎と応用」，講談社サイエンティフィック (1986)
- 28) Lochte-Holtgreven, W.: "Plasma Diagnostics", North-Holland Publishing co. (1968)
- 29) Nester, O.H. and Olsen, H.N.: "Numerical Methods for Reducing Line and Surface Probe Data", SIAM Review, 2(1960)3, 200
- 30) 中野：「プラズマ工学例題演習」，コロナ社 (1975)
- 31) Griem, H.R.: "Plasma Spectroscopy", McGraw-Hill(1964)
- 32) Haddad, G.N. and Farmer, A.J.D.: "Temperature determinations in a free-burning arc : I, Experimental techniques and results in argon", J. Phys. D: Appl. Phys., 17(1984), 1189
- 33) Farmer, A.J.D. and Haddad, G.N.: J. Phys. D: Appl. Phys., 21(1988), 426
- 34) Olsen, H.N.: "The electric arc as a light source for quantitative spectroscopy", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 3(1963), 305
- 35) Wiese, W.L., Smith, M.W. and Miles, B.M.: "Atomic Transition Probabilities, Vol.II, Sodium through Calcium", NSRDS-NBS 22, U.S.Govt. Printing Office(1969)
- 36) Wiese, W.L., Smith, M.W. and Glennon, B.M.: "Atomic Transition Probabilities, Vol.I, Hydrogen through Neon", NSRDS-NBS 4, U.S.Govt. Printing Office(1966)
- 37) Pateyron, B., Aubreton, J., Elchinger, M.F., Delluc, G. and Fauchais, P.: "Thermodynamic and Transport Properties of N₂, O₂, H₂, Ar, He and their Mixtures", Internal Report,

Laboratoire Céramiques Nouvelles URA 320 CNRS, University of Limoges, France,
(1986)-ADEP software

- 38) 北村, 柴田, 武田: 「高周波プラズマ内での酸化物のインフライト還元」, 日本鉄鋼協会基礎研究会熱プラズマ研究部会 (1993), 146
- 39) 林: 「実験物理学講座 4: 真空技術」, 共立出版 (1985)
- 40) Carpenter, L.G.: 「真空技術入門」, 共立出版 (1989)
- 41) Huddleston, R.H. and Leonard, S.L.: "Plasma Diagnostic Techniques", Academic Press (1965)
- 42) Ohji, T. and Eagar, T.W.: "Infrared Radiation from an Arc Plasma and Its Application to Plasma Diagnostics", Plasma Chem. Plasma Process., 12(1992)4
- 43) 岡田, 中村: 「静止 T I G アークにおける Ti 合金板熔融池面の電流分布」, 溶接学会論文集, 9(1991), 216
- 44) 牛尾, 松田: 「アークの工学的数値解析モデル」, 溶接学会論文集, 6(1988)1, 91

本論文に関する著者の発表論文

- 1) TIG アークにおける最大アーク圧力に及ぼす電極形状の影響, 溶接学会論文集, Vol. 3 (1985), No. 2
- 2) 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, Vol. 3 (1985), No. 2
- 3) Effect of Helium Gas on Arc Characteristics in Gas Tungsten Arc Welding, Transactions of National Research Institute for Metals, Vol. 28 (1986), No.2
- 4) Effect of Electrode Geometry on Maximum Arc Pressure in Gas Tungsten Arc Welding, IIW Doc. 212-652-86 (1986)
- 5) 混合ガスシールド TIG アークにおける母板表面上のプラズマガスの組成割合 - 混合ガス雰囲気下における TIG アーク特性に関する研究 (第 1 報) -, 溶接学会論文集, Vol. 10 (1992), No. 1
- 6) 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 - 混合ガス雰囲気下における TIG アーク特性に関する研究 (第 2 報) -, 溶接学会論文集, Vol. 11 (1993), No. 1
- 7) Demixing in Argon-Helium Mixed Gas Tungsten Welding Arcs, ISPC-11 (Proceedings), Vol. 1 (1993)
- 8) Study on anode fall voltage and radiation in argon-helium mixed gas arcs, IIW Doc. 212-836-93 (1993)
- 9) Basic Parameters in Heat Transport in Argon-Helium Mixed Gas Arcs, 溶接学会論文集, Vol. 12 (1994), No. 1
- 10) Measurement of Arc Plasma by IR Plasma Diagnostic Method, IIW Doc. 212-881-95 (1995)
- 11) 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, Vol. 14 (1996), No. 4
- 12) 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 (投稿中)
- 13) 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 - 混合ガス雰囲気下における TIG アーク特性に関する研究 (第 3 報) -, 溶接学会論文集 (投稿中)