



Title	宇宙環境下におけるアーク放電とその熱源特性に関する研究
Author(s)	西川, 宏
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2356
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

宇宙環境下におけるアーク放電と
その熱源特性に関する研究

2001年12月

西 川 宏

宇宙環境下におけるアーク放電と
その熱源特性に関する研究

2001年12月

西 川 宏

目 次

第1章 緒論	1
1. 1 宇宙溶接技術に関する研究の現状と問題点	1
1. 2 Hollow Cathode Arc (HCA)に関する研究の現状と問題点	2
1. 3 研究の目的と方針	3
第2章 低圧下の HCA 放電特性に関する基礎的検討	6
2. 1 緒言	6
2. 2 HCA の原理と実験装置	6
2. 3 HCA の点弧特性と放電外観	9
2. 3. 1 放電開始電圧	9
2. 3. 2 HCA の点弧過程	13
2. 3. 3 アーク放電の形態	15
2. 4 HCA の電流電圧特性	17
2. 5 結言	23
第3章 HCA による母材溶込み特性	24
3. 1 緒言	24
3. 2 HCA の典型的な溶込み特性	24
3. 3 溶込み形状に及ぼすプロセスパラメータの影響	27
3. 3. 1 内径の小さい中空電極を使用した場合	27
3. 3. 2 内径の大きい中空電極を使用した場合	30
3. 4 ビードオンプレート溶接における母材溶融現象	33
3. 5 結言	36
第4章 プローブ法による HCA プラズマの電子密度・温度計測	38
4. 1 緒言	38
4. 2 プローブ法の実験装置と方法	38
4. 3 電子密度・温度分布に関する検討	40
4. 3. 1 陽極に銅板を使用した場合	40
4. 3. 2 陽極にステンレス鋼板を使用した場合	45
4. 4 アーク空間の電位分布に関する検討	50
4. 5 結言	52

第5章 HCA による溶込みメカニズムに関する検討	53
5. 1 緒言	53
5. 2 電流分布領域に関する検討	53
5. 2. 1 分割母板法とその実験装置	53
5. 2. 2 電流分布領域と溶込みの関係	55
5. 3 母材への入熱に関する検討	56
5. 3. 1 陽極入熱について	56
5. 3. 2 入熱に関する検討	57
5. 4 HCA による溶融池内の対流現象に関する検討	58
5. 4. 1 溶融池内の対流現象について	58
5. 4. 2 溶融池表面流れの観察	60
5. 5 結言	63
第6章 HCA のアルミニウム溶接への応用	64
6. 1 緒言	64
6. 2 HCA によるアルミニウムの溶融特性	64
6. 2. 1 アルミニウムの溶接について	64
6. 2. 2 HCA の放電外観と溶接後のビード外観	65
6. 2. 3 電子密度・温度分布に関する検討	67
6. 2. 4 HCA によるアルミニウムの溶融特性	69
6. 3 溶接部の欠陥及び強度に関する検討	72
6. 3. 1 ビード外観及び放射線透過試験	72
6. 3. 2 溶接部の引張り試験	75
6. 4 結言	77
第7章 溶接プロセスに及ぼす重力の影響	79
7. 1 緒言	79
7. 2 微小重力環境下でのアーク溶接現象	79
7. 2. 1 実験の概要	79
7. 2. 2 アークプラズマに及ぼす重力の影響	83
7. 2. 3 溶融池に及ぼす重力の影響	84
7. 3 結言	87

第8章 総括	89
謝辞	94
参考文献	95
本論文に関する発表論文	98

第1章 緒論

1998年11月に始まった国際宇宙ステーション (ISS) の建造に代表されるように宇宙空間での大型建造物の建造が現実のものとなってきた。現在建造中のISSについては、宇宙空間での組み立ての際、溶接は用いられず機械的な接合によって組み立てられる。しかし近い将来、宇宙空間における各種インフラストラクチャーの整備や大型建造物の建造の際には安全で信頼性の高い溶接技術が必要になると思われる。

したがって本研究では、宇宙溶接技術すなわち真空・微小重力環境下での溶接技術が必要になるであろうという観点から、これまで宇宙空間での適用性について、十分に研究されているとはいえないアーク溶接法に注目し、宇宙環境下で使用できるアーク溶接技術の確立のための基礎的な検討を試みることを目的とする。

1. 1 宇宙溶接技術に関する研究の現状と問題点

旧ソ連は、1960年頃からパトン溶接研究所を中心として、宇宙溶接技術の開発に着手している^{1,2,3)}。初期の段階では、電子ビーム溶接法、消耗電極式アーク溶接法、プラズマ溶接法、抵抗スポット溶接法のそれぞれについて検討している。そして1969年、宇宙における最初の溶接と切断の実験を宇宙船上で実施している。この実験では消耗電極を用いる低圧アーク法、中空陰極方式の低圧拘束アーク法、電子ビーム法をテストし、電子ビーム溶接法が宇宙真空下でも十分に安定であることを示している。その後1984年には、手動電子ビーム装置を用いた溶接、切断、ろう付、コーティングの実験を宇宙船外の宇宙空間で実行し、成功をおさめている⁴⁾。しかし、溶接中に発生するX線による宇宙飛行士の被ばくや電子ビームの安全性には依然として問題が残っている。

一方、米国では、1973年に宇宙ステーション“スカイラブ”で宇宙溶接に関連した実験がおこなわれ、電子ビームを用いた金属の溶融実験とろう付実験等がおこなわれている^{5,6)}。1997年にはNASAがスペースシャトルでの電子ビーム溶接の実験を計画したが、結局無期延期となっている⁷⁾。したがって、米国では、宇宙環境で溶接に関連した実験は1973年以降おこなわれていないが⁸⁾、その間も宇宙空間での溶接技術や補修技術の可能性、必要性がたびたび検討されており、問題点としては安全性や電力設備の問題等があげられている⁹⁾。

これまで日本では、宇宙空間で実際に溶接実験をおこなった例は無い。しかし宇宙溶接実験としては、航空機や落下塔を利用した微小重力下での溶接実験や真空チャンバーを利用した低圧下でのアーク溶接実験の結果が数例報告されている。具体的には、1990年に阿部らにより航空機を利用した微小重力下でのアルミニウム及びアルミニウム合金の溶接実験の結果が報告されている¹⁰⁾。その後、貝原らにより落下塔を利用

した微小重力下の金属挙動とティグ溶接やマグ溶接の実験結果が報告され¹¹⁾、また野城らは落下塔を利用し、ビード形成や気孔形成などの溶接現象に及ぼす重力の影響を検討している^{12,13)}。一方吹田らは、微小重力環境よりも真空環境が宇宙空間での溶接現象に大きな影響を及ぼすと考え、真空環境下でも使用できるアークプラズマを利用したGHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 法を宇宙溶接技術として提案している¹⁴⁾。しかしその特性については、十分に検討されているとはいえない。

以上のように、世界的にみると宇宙溶接技術としては、真空状態でも使用できる電子ビーム溶接法を中心として検討がすすめられてきたが、安全性の問題等は解決されないままである。また地球上で最も広く研究・利用されている溶接法はアーク溶接法であるが、宇宙溶接法としてのアーク溶接法に関しては、微小重力実験により重力の影響は比較的良好に検討されているものの、低圧下でのアーク溶接現象については十分に検討されているとはいえず、宇宙空間でのアーク溶接法の適用性については、未知の部分が多いといえる。

1. 2 Hollow Cathode Arc (HCA) に関する研究の現状と問題点

一般に大気圧中で用いられているGTA (Gas Tungsten Arc) 溶接法を低圧環境下で用いようとする、圧力の減少にともないアーク柱の電位傾度が低くなるために、アークが不安定となり、10Torr (約 1×10^3 Pa) 程度以下ではアーク起動が困難であるとされている¹⁵⁾。国際宇宙ステーションが建造されている低高度軌道上(地球表面から250~500kmの高度)の平均圧力は、約 5×10^{-4} Paであり、従来通りのアーク溶接法では宇宙空間でのアーク放電の発生及び維持は困難である。したがって、宇宙空間でアーク溶接法を使用するには何らかの工夫が必要である。

これまで真空中におけるアーク放電の研究については、溶接以外の分野で、プラズマ発生源としての中空陰極アーク (Hollow Cathode Arc (HCA)) の研究が、1960年代から盛んに行われている。中空陰極アークは、中空電極の先端から放電に必要な微量のガスを放電空間に供給させることで、真空中でも放電の発生及び維持が可能なアーク放電である。

例えば、L.M.Lidskyら¹⁶⁾は中空陰極を用い、 10^{-3} Torr (約0.1Pa) 以下の低圧下でアークプラズマを発生させる実験装置を試作し、中空陰極アークプラズマの性質について実験的検討をおこなっている。その結果、中空陰極アークが高電離プラズマであることや放電パラメータと電流電圧特性の間には大きな関係があることを明らかにしている。さらにプラズマ密度・温度をLangmuirプローブ法を用いて計測し、荷電粒子密度が $10^{19} \sim 10^{20}/\text{m}^3$ 、電子温度が $10^4 \sim 10^5$ K程度であることを明らかにしている。また1970年代後半、J.L.Delcroixら¹⁷⁾は、100編以上の様々な中空陰極アークに関する論文を参考に、中空陰極アークについての総合的な解説をおこなっている。この中で中空陰極アークは、放電条件によりアークプラズマ自身が陰極内部へ進入し、内部からプ

ラズマが発生することや、磁場により制限された外部プラズマの電子密度は $10^{18} \sim 10^{20}/\text{m}^3$ にまで達すること、電子温度は一般に $10^4 \sim 10^5 \text{K}$ を示すことなどを多くの実験結果から指摘している。その後 C.M.Ferreira と J.L.Delcroix¹⁸⁾ によって中空陰極アークに対する理論的検討も与えられている。

またこれまでから中空陰極アークの溶接技術への適用も試みられている。1960年代に旧ソ連で、宇宙溶接用技術として中空陰極方式の低圧プラズマアークの研究がおこなわれていた³⁾。1969年の宇宙空間における実験の際、プラズマ形成用ガスが瞬時に拡散してしまい高電流アークを維持するために必要なプラズマ密度を放電空間に確保することができず低圧プラズマアークを使用した溶接実験は、失敗に終わっている。それ以降、宇宙溶接技術としては、中空陰極方式の低圧プラズマアークの研究はおこなわれていないようである。その後は、地球上で利用できる低圧中のアーク溶接技術として中空陰極アークを用いた溶接技術の研究が N.V.Shiganov や V.M.Nerovnyi によっておこなわれている。

N.V.Shiganov¹⁹⁾ は、真空中で中空陰極アークを用いた場合、溶接パラメータがアーク電圧へ及ぼす影響や溶接部の基本的な特性について調査している。また中空陰極アークをろう付け用の熱源として用いた実験もおこなっている。また V.M.Nerovnyi²⁰⁻²³⁾ らは、中空陰極アークの熱源分布は中央部に集中した熱源と周辺部に広がった熱源の2種類の熱源が重なったような熱源であると指摘している。また Langmuir プローブ法を用いて、アーク電流 100A 以下のアーク放電に対して、中空陰極内部の電子密度分布の計測をおこない、電極外部よりも電極内部で電子密度が最大となることや、その位置が電流値やアーク長に依存することを示している。さらに安定して中空陰極アークを点弧する方法についても検討をおこなっており、補助アークにより陰極を加熱した後、自続放電を起こす方式などが提案されている。

このように V.M.Nerovnyi らは、中空陰極アークについて、陰極内部のプラズマ特性やその放電形態について詳細に検討をおこなっているが、溶接用熱源として用いた場合の母材溶融特性やその溶融メカニズム、プラズマ特性と溶融特性との関係などに関しては、十分な検討はおこなわれていない。

1. 3 研究の目的と方針

これまでも述べたように、宇宙空間でのアーク溶接の適用性については未知の部分が多い。宇宙空間の特徴としては、主に微小重力環境であることと真空環境であることが挙げられるが、アーク溶接現象に及ぼすこれらの影響について同時に検討することは、議論を複雑にする。したがって本研究では、それぞれの影響について独立させて検討をおこない、宇宙空間におけるアーク溶接技術の確立のための基礎的な検討をおこなうことにする。

本研究では、まず真空中でも使用できる中空陰極アークに注目し、真空環境下にお

ける中空陰極アークの放電特性や電子密度・温度などのプラズマ特性，母材へのアーク入熱形態，母材溶融特性，さらには母材溶融メカニズムに関する研究をおこない，真空環境下での，中空陰極アークの溶接用熱源としての特性について明らかにする。次いで，重力がアーク放電形態や溶融ビードに及ぼす影響について検討をおこなう。

本論文の構成を，Fig.1.1 に示すフローチャートに基づいて以下に説明する。

第1章では，これまでに旧ソ連・米国を中心に行われてきた宇宙溶接技術開発の現状及び問題点，さらに日本における宇宙溶接技術研究の現状及び問題点を明らかにする。また宇宙溶接技術として真空中でも使用できる中空陰極アークに注目し，これまでプラズマ源として研究されてきた現状や溶接用熱源として研究されてきた現状について述べ，最後に本研究の方針及び明らかにすべき課題について述べる。

第2章では，低圧下における中空陰極アークの基礎的な放電特性を明らかにする。具体的には，はじめに中空陰極アークの発生原理及び試作した実験装置について述べる。次に低圧下での中空陰極アークの放電開始特性や放電外観，電流電圧特性について検討をおこない，中空陰極アークの溶接用熱源としての基礎的な放電特性について明らかにする。

第3章では，中空陰極アークを溶接用熱源として用いた場合の母材溶込み特性について，静止アークによる溶融実験とビードオンプレート溶接実験の結果から大気圧下のGTAの溶込み特性との違いやプロセスパラメータの影響を明らかにする。

第4章では，中空陰極アークプラズマがどのような特徴をもったプラズマであるか理解するために，Langmuirプローブ法を用いて低圧下の中空陰極アークのプラズマ特性を明らかにする。具体的には，プローブ法を用いて中空陰極アークの電子密度・温度，アーク柱内の電位分布の計測をおこない，プラズマ特性とアークパラメータの関係や母材の状態との関係について明らかにする。

第5章では，第3章で得られた中空陰極アークによる溶込み形状に関して，その溶込みメカニズムを明らかにする。アークから陽極への入熱に関しては，電子が持ち込むエネルギーが重要であり，第4章で得られた中空陰極アークプラズマの電子温度やアーク柱内の電位分布が重要になる。また溶込み形状に関しては，溶融池内の対流現象が重要になる。したがって，主に陽極表面上の電流分布領域や陽極への入熱エネルギー，溶融池内の対流現象の観点から溶込みメカニズムについて検討をおこなう。

第6章では，宇宙構造物の資材として使用されるであろうアルミニウム合金への中空陰極アークの適用性について基礎的な検討をおこなう。一般にアルミニウムの溶接をおこなう場合，表面の酸化膜が大きな問題となる。したがって大気圧下でのアーク溶接では，クリーニング作用を利用した交流アーク溶接が一般的である。ここでは中空陰極アークを用いることで，問題となる酸化膜を除去できることを示し，健全な溶接が可能であることを示す。その際，引張り試験による溶接部の強度評価や放射線透過試験による欠陥の有無の評価をおこなう。

第7章では、重力のアーク溶接現象に及ぼす影響について検討をおこなう。具体的には、落下塔や航空機を用いた微小重力実験についての概要を述べ、それらから得られた結果をもとに重力がアーク放電や溶融池形状に及ぼす影響について明らかにする。第8章では、本研究で得られた結果を総括して本研究の結論を述べる。

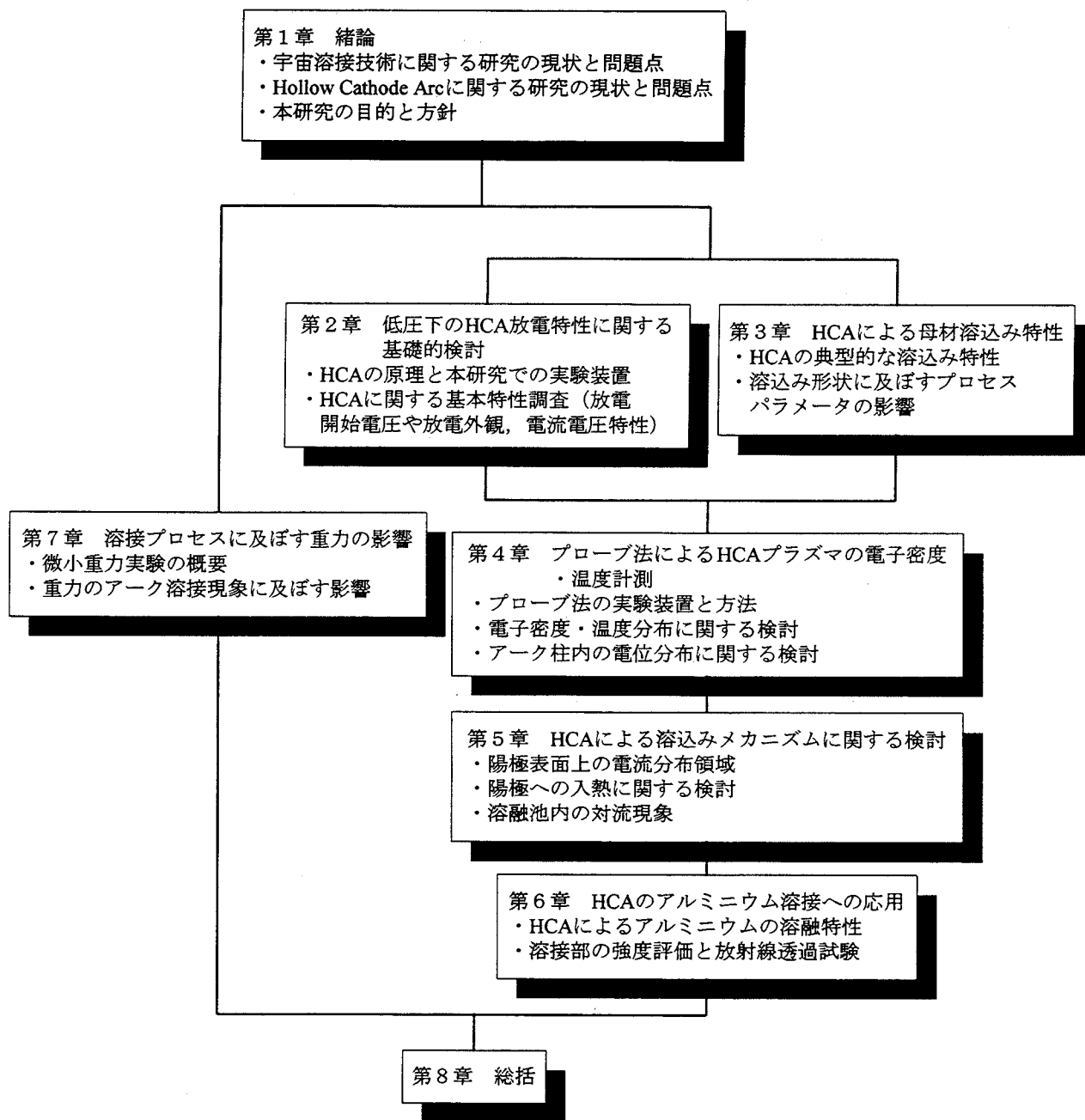


Fig.1.1 Flow chart of this study

第2章 低圧下の HCA 放電特性に関する基礎的検討

2.1 緒言

本研究では、まず、宇宙空間の特徴である真空環境下でのアーク溶接現象について検討をおこなう。

これまでも述べたように、一般に大気圧下で使用されている GTA 溶接法を真空環境下で使用しようとする、約 10Torr 以下ではアーク放電の起動が困難となり、使用できないとされている。したがって本研究では、中空陰極を利用し、電極先端から微量のプラズマ形成用ガスを供給することで真空環境下でも使用可能な中空陰極アーク (Hollow Cathode Arc (HCA)) に注目し、真空環境下における溶接用熱源としての特性について検討をおこなうこととした。本章では、その HCA の基礎的な放電特性を明らかにする。

2.2 HCA の原理と実験装置

HCA は、中空電極の先端からのみガスを微量流出させることによって、そのままではアーク放電の形成が難しい真空環境下でも、点弧及び維持が可能なアーク放電である。

以下に HCA の発生用トーチについて簡単に説明する。Fig.2.1(a)に示すのが、従来から用いられている GTA 溶接用のトーチである。GTA 溶接では、電極に中実タングステン電極を使用し、コレットボディ側壁のガス流出孔からシールドガスを供給する

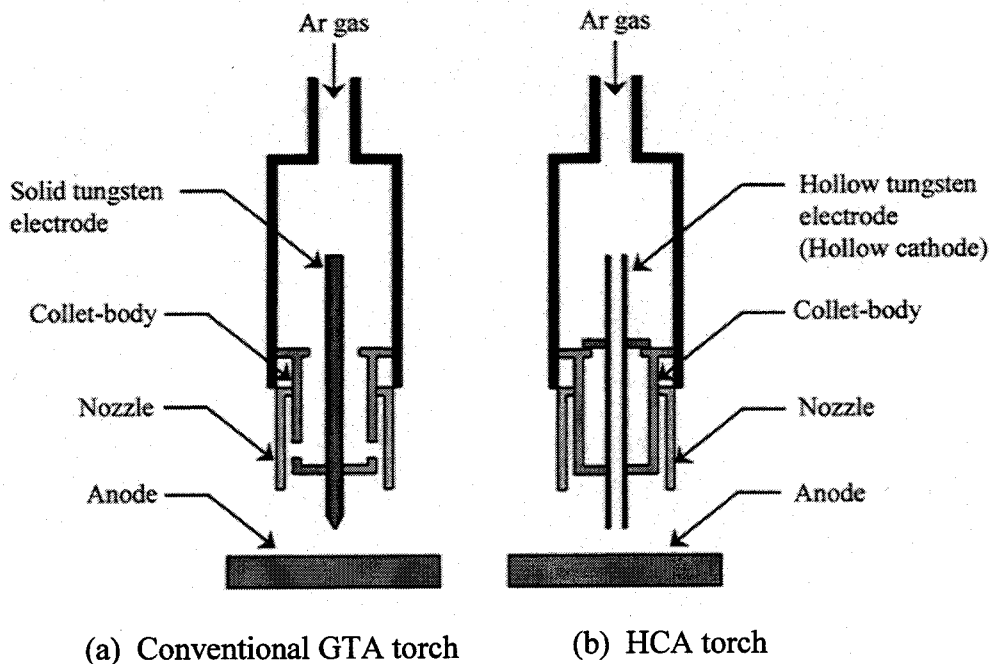


Fig.2.1 Detail of welding torches

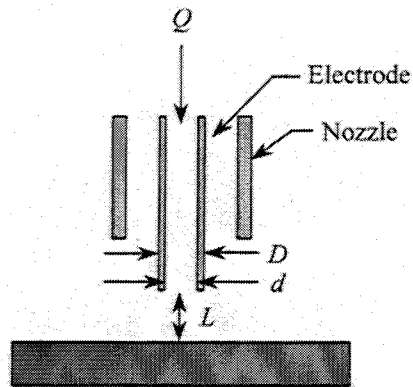


Fig.2.2 Tip of the hollow cathode used in the present work

ことで溶接部の酸化を防ぎ溶接をおこなう。本研究においては特に断らない限り，GTA溶接の場合，電極に直径 4.0mm の 2%酸化ランタン入り電極を用い，シールドガスには，Ar ガスを用いた。

次に，Fig.2.1(b)に示すのが今回用いた HCA 用のトーチである。電極に中空電極を使用し，その電極先端部からのみ放電に必要な最小限のガスを供給する仕組みになっている。供給されるガスはプラズマ形成用ガスである。本研究では，ガスに Ar ガスを使用した。さらに電極先端を拡大した図が Fig.2.2 であり，以後使用する記号を示している。 D ：電極外径， d ：電極内径， Q ：ガス流量， L ：アーク長をそれぞれ表す。実験では，外径 4.0mm，内径 3.0mm の 2%酸化トリウム入り中空タングステン電極（以下では，2%Th-HW (Hollow Tungsten(W) containing Thorium oxide)電極と略記）と外径 4.0mm，内径 1.8mm の 2%酸化ランタン入り中空タングステン電極 (2%La-HW (Hollow Tungsten(W) containing Lanthanum oxide)電極)，外径 4.0mm，内径 3.4mm の中空タンタル電極 (HTa (Hollow Tantalum)電極) を適宜用いた。

地上で一般に用いられているアーク溶接用電源を航空機実験などに使用すると，溶接時に発生する高周波などのノイズが航空機の計器などに大きな影響を与え，問題となる。このような問題は，将来宇宙空間での適用を考えたときにも十分起こりうる。したがって，本研究では航空機実験にも用いることのできる低ノイズかつ軽量の電源を使用する実験装置を試作した。

今回，試作した実験装置では，高周波などのノイズの問題を解決するため，バッテリーを電源として使用し，さらには点孤時のノイズを軽減する目的で，直流の高電圧点孤方式を採用した。Fig.2.3 に示すのが実験装置の回路図である。

この回路は，アーク持続用のバッテリー電源回路とアーク点孤用の高電圧電源回路から構成されている。バッテリーとしては，出力 12V の密閉型バッテリーを 4 個直列にして使用し，高電圧電源としては可変式の最大電圧 1kV，最大電流 50mA のものを使用した。またアーク消去用としてトランジスタを回路内に組み込んだ。実験は，全

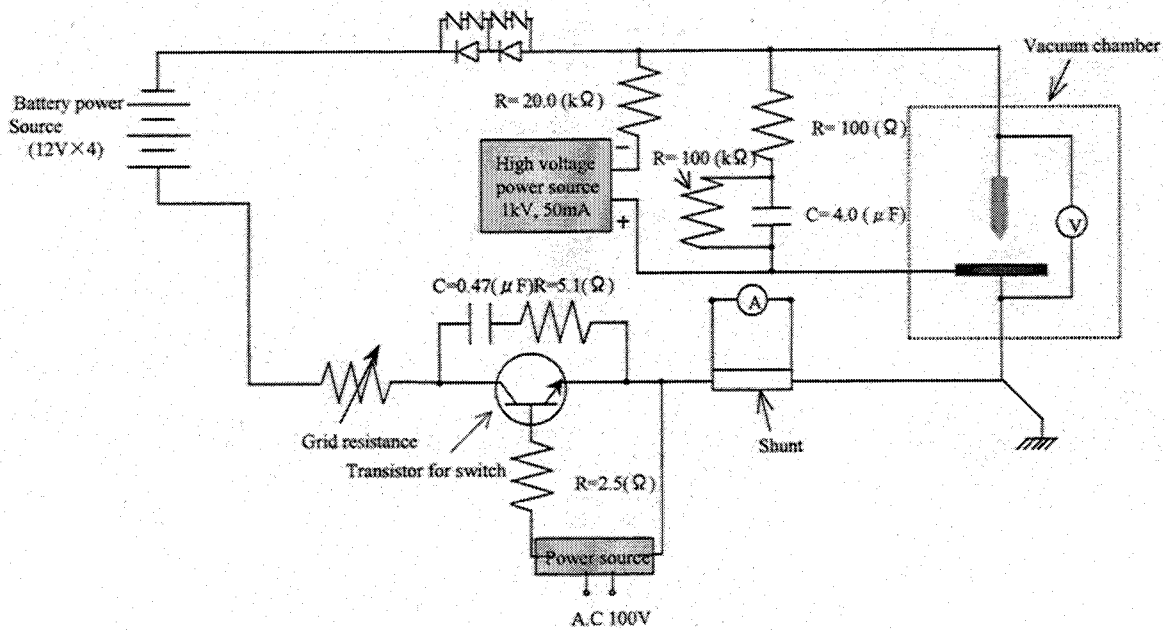


Fig.2.3 Experimental apparatus for HCA

て電極マイナスの極性でおこなった。

航空機実験では、すべてこのバッテリーを使用した実験装置を用いた。バッテリーを用いた場合、設定電流によっては、時間の経過とともにアーク電流が減少するため、地上の真空チャンバー内の実験では、市販のインバータ電源（パナソニック製 インバータ制御直流 TIG 溶接機 YC-200 TR5）を用いたものもある。その場合には、高周波点孤方式を採用した。電源が異なる場合にも、溶接現象にはほとんど違いが無いことを確認している。

真空チャンバーの大きさは、 $400 \times 400 \times 400 \text{mm}$ であり、排気ポンプとしては、ロータリーポンプとメカニカルブースターポンプを併用した。それによってチャンバー内は、プラズマ形成用ガスを供給しない状態で $4 \times 10^{-1} \text{Pa}$ ($3 \times 10^{-3} \text{Torr}$) 以下の真空度となっている。

2. 3 HCA の点弧特性と放電外観

2. 3. 1 放電開始電圧

Fig.2.4 に気体の一般的な放電特性を示す²⁴⁾。低圧下の気体に直流電圧を加えると最初は電圧に応じて 10^{-12} A 程度以下の極めて微小な電流が流れる。さらに電圧を上げていくと気体が絶縁破壊を起こし、自続放電が形成される。この絶縁破壊を起こすときの電圧を絶縁破壊電圧、自続放電を成立させるための電極間電圧を放電開始電圧、火花電圧と呼ぶ²⁵⁾。一般に絶縁破壊電圧は Paschen の法則²⁶⁾により電極間距離と周囲圧力に依存することがわかっている。また自続放電は、その放電形態によって暗放電・グロー放電・アーク放電の三つの基本形態に区別できる。

次に、HCA 用トーチを適用し、電極間に直流高電圧を印加することで、低圧下でグロー放電及びアーク放電が形成されたときの典型的な電圧変化の様子を Fig.2.5 に示す。それぞれ (a) はグロー放電、(b) はアーク放電が形成されたときの電圧変化である。いずれにおいても、電極には外径 4.0mm、内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を用い、周囲圧力は 5Pa (0.04Torr)、Ar ガス流量は 1.7ml/s(100cc/min)、電極・母材間距離は 5mm とした。

これらを見ると放電開始電圧は、いずれも約 700V 程度である。大気圧下での絶縁破壊電圧が数 kV であることを考えるとかなり低くなっており、大気圧中に比べ、放電し易くなっている。またアーク放電に移行し安定するか、グロー放電に移行し安定するかは、使用している電源の外部特性に依存する。ここでは、(a) のようにグロー放電へ移行させる場合には、アーク自続用のバッテリーをはずして計測した。

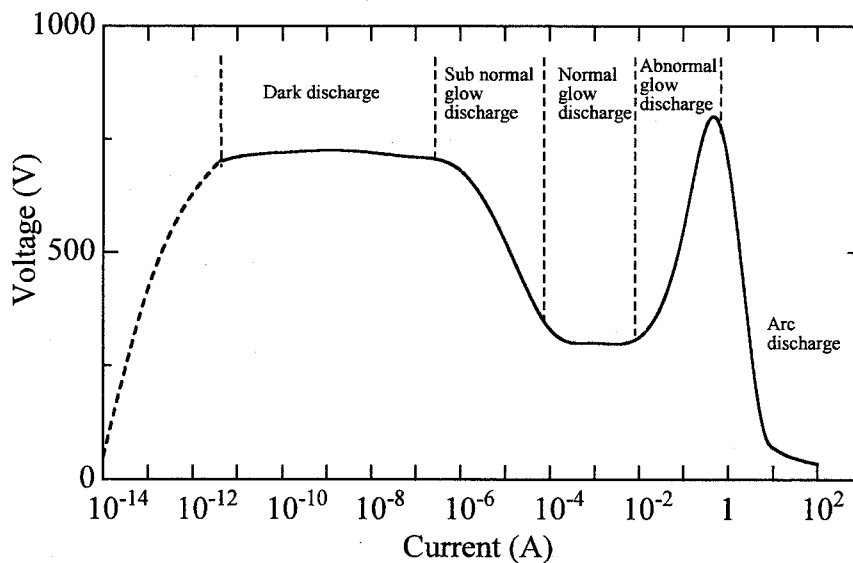
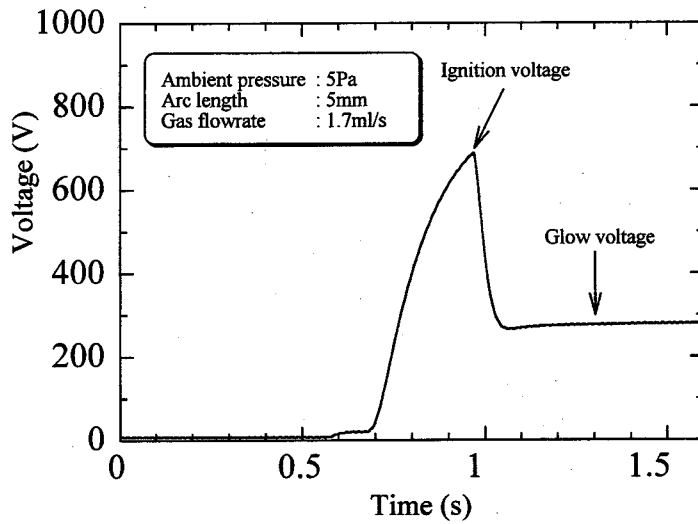
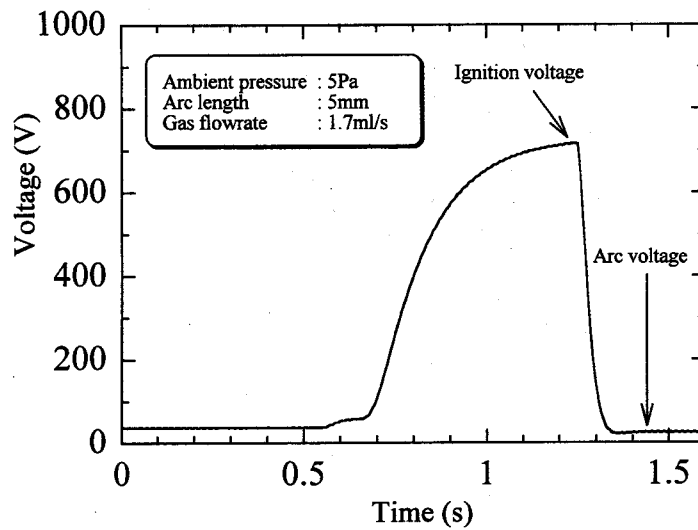


Fig.2.4 Discharge characteristics of gas



(a) Glow discharge



(b) Arc discharge

Fig.2.5 Ignition process of HCA

Fig.2.6 にガス流量を一定とし、周囲圧力が放電開始電圧に及ぼす影響について調査した結果を示す。縦軸に放電開始電圧を、横軸に周囲圧力をとった。図中の●, ▲, ■, ◆はそれぞれ電極・母材間距離が 2, 5, 7, 10mm のときを表している。これらの点は、各条件について 5 回程度計測をおこないの平均値をとったものである。電極には、外径 4.0mm, 内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を用いた。(a) は電極先端から流出させるガス流量を 0.8ml/s, (b) は 1.7ml/s, (c) は 2.5ml/s, (d) は 3.3ml/s としたときのものである。本実験では、周囲圧力を変化させるために、ガス供給量は一定とし、真空チャンバーと排気ポンプの間のバルブによりチャンバー内圧力の調整をおこなった。

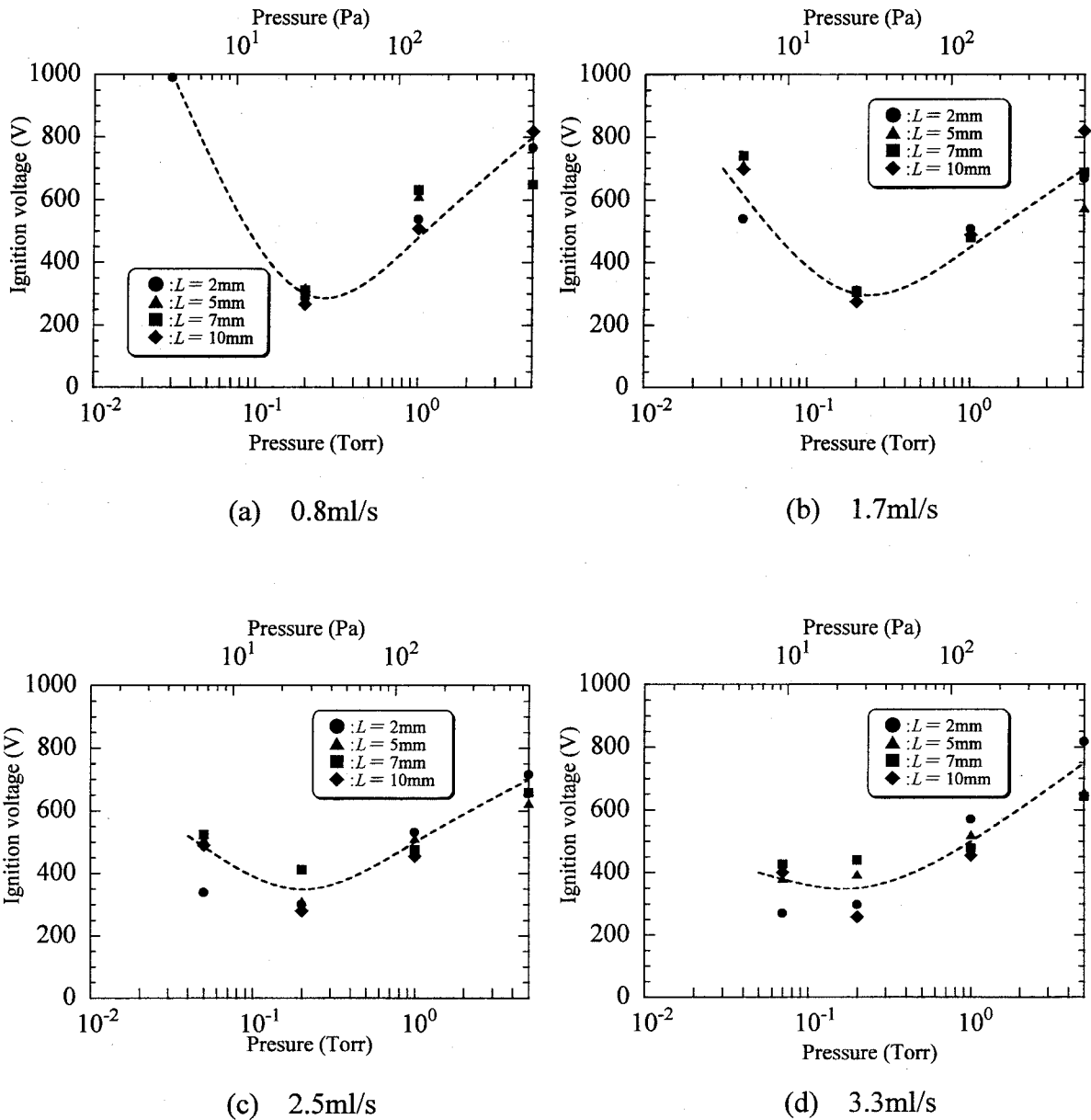


Fig.2.6 Relationship between ambient pressure and ignition voltage

これらを見ると電極・母材間の距離，電極先端からのガス流量に関係なく周囲圧力が約 27Pa (約 0.2Torr) のときに放電開始電圧はほぼ最低値を示し，最も放電し易くなることがわかる。また周囲圧力が 27Pa よりも低い今回の実験範囲内では，放電開始電圧がガス流量に依存し，ガス流量が多いほど放電開始電圧が低くなっていることがわかる。したがって，さらに低圧下でもガス流量を増すことで放電開始電圧の上昇を抑制できる可能性がある。

このことを確認するために，さらに低い真空環境で実験可能な真空チャンバー (高

松工業高等専門学校 所有) を用いて放電開始電圧の計測をおこなった. その結果の一例を Fig.2.7 に示す. ○が計測をおこなった結果であり, ガス流量は 3.3ml/s, 電極・母材間距離は 2mm の場合である. 実験装置自体は異なるが, 電極には Fig.2.6 と同様の外径 4.0mm, 内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を使用した. チャンバー内の圧力は, ガスを供給しない状態で約 10^{-5} Pa, Ar ガスを 3.3ml/s 流し, 圧力が平衡した状態で 9.0×10^{-2} Pa となっていた. これをみると 10^{-1} Pa 程度の圧力下でも放電開始電圧は, 400V 程度を示し, それほど上昇しないことがわかる.

また電極形状を変化させて, 外径と内径の影響を調べたが, 周囲圧力が約 27Pa (約 0.2Torr) のときに放電開始電圧が最低値を示し, 放電開始電圧自体も同じような値となった. 全体的に同じような傾向を示すことから, 本研究の範囲内では, 放電開始電圧は電極形状に, ほとんど依存しないといえる.

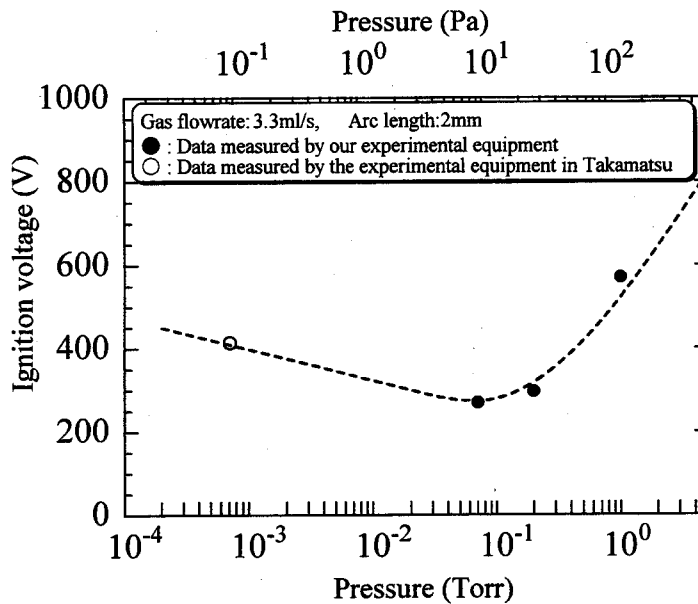


Fig.2.7 Ignition voltage under lower pressure condition

2. 3. 2 HCA の点弧過程

直流の高電圧点弧方式を使用した場合の低圧下における HCA の点弧過程の様子を Fig.2.8 に示す。周囲圧力は 5Pa, ガス流量は 1.7ml/s, 電極・母材間距離は 10mm とした。また電極には, 外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。

これらを見ると放電開始時, 電極先端のみで放電が起こるのではなく, 電極表面のランダムな位置で放電が開始し, 表面をはい回っていることがわかる。また局所的な強い光は, 電極表面に陰極点が形成されているものと思われる。放電が電極表面をはい回り, 電極が高温となったところで, 熱電子放出が起こり持続的な放電が形成される。T₆, T₇ の写真をみるとその放電は, 陰極内部に入り込み, 内部から放電が起こっているものと推察できる。

このときの電極・母材間の電圧変化の様子と放電電流の変化の様子を Fig.2.9 に示す。また放電開始から安定した放電が形成されるまでの電流変化の様子に対応する放電外観の変化の様子をグラフ上部に示す。それぞれ, (a)は放電開始直前, (b)は放電開始直後, (c)は放電開始後約 0.2 秒で電流が乱れている時, (d)は電流の乱れが収まり始めた時, (e)は電流が一定になったときの様子である。放電が電極表面をはい回っているときには, 電流の値が大きく乱れており, 電極内部から安定した放電が形成され始めるところで電流の値も安定し始めることがわかった。放電が不安定である時間は, 実験ごとに異なるが約 0.5~1 秒程度であった。

高周波点弧方式を採用した場合についても, 点弧過程の様子を観察をおこなった。直流の高電圧点弧方式と同様に, 放電が電極表面をはい回り, 電極が高温になったところで電極内部から放電が形成されているであろうことを確認した。直流高電圧点弧方式と高周波点弧方式に点弧過程での大きな違いはない。

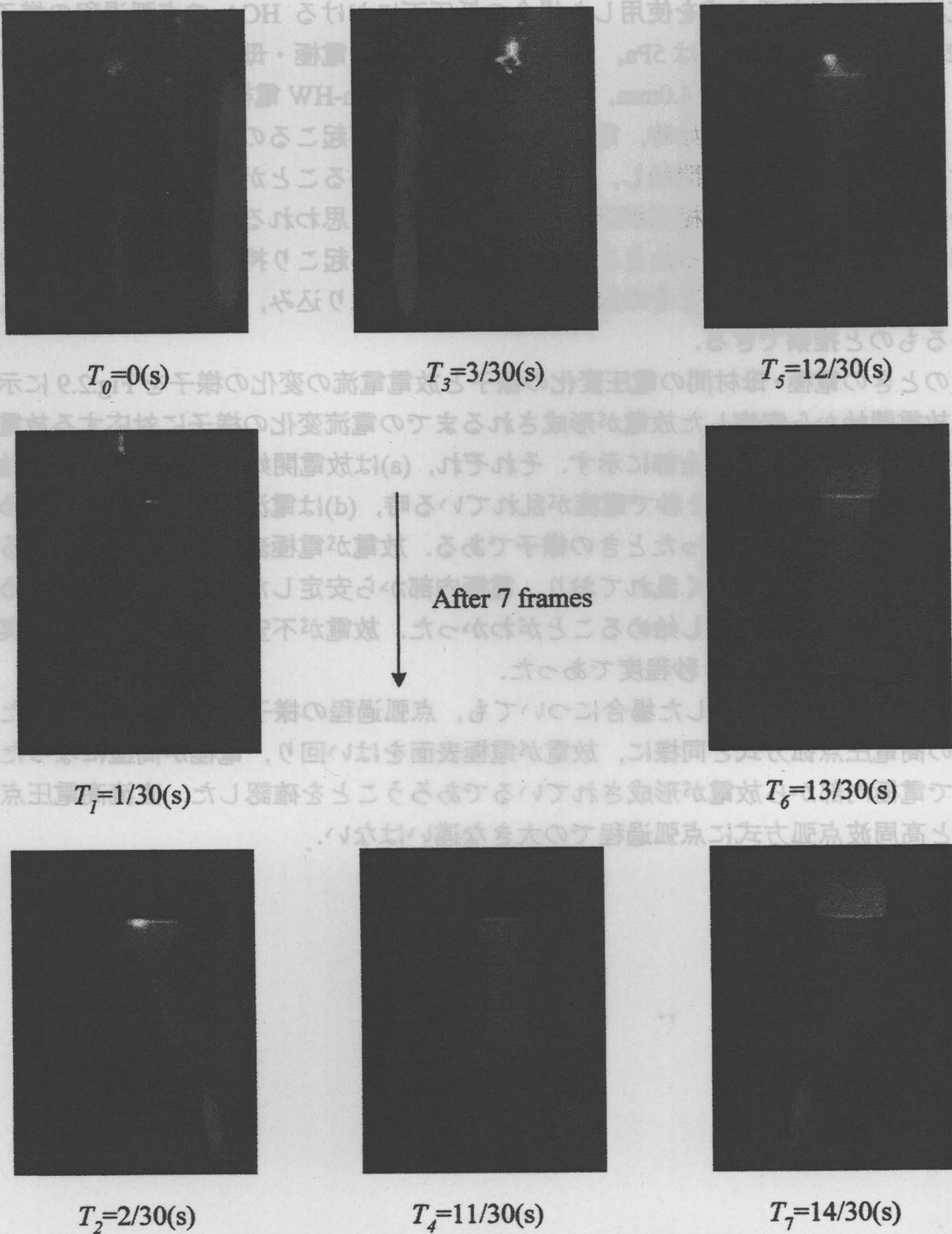


Fig.2.8 Ignition process of HCA with CCD camera
 ($P=5\text{Pa}$, $L=10\text{mm}$, $Q=1.7\text{ml/s}$,
 30 frames per second)

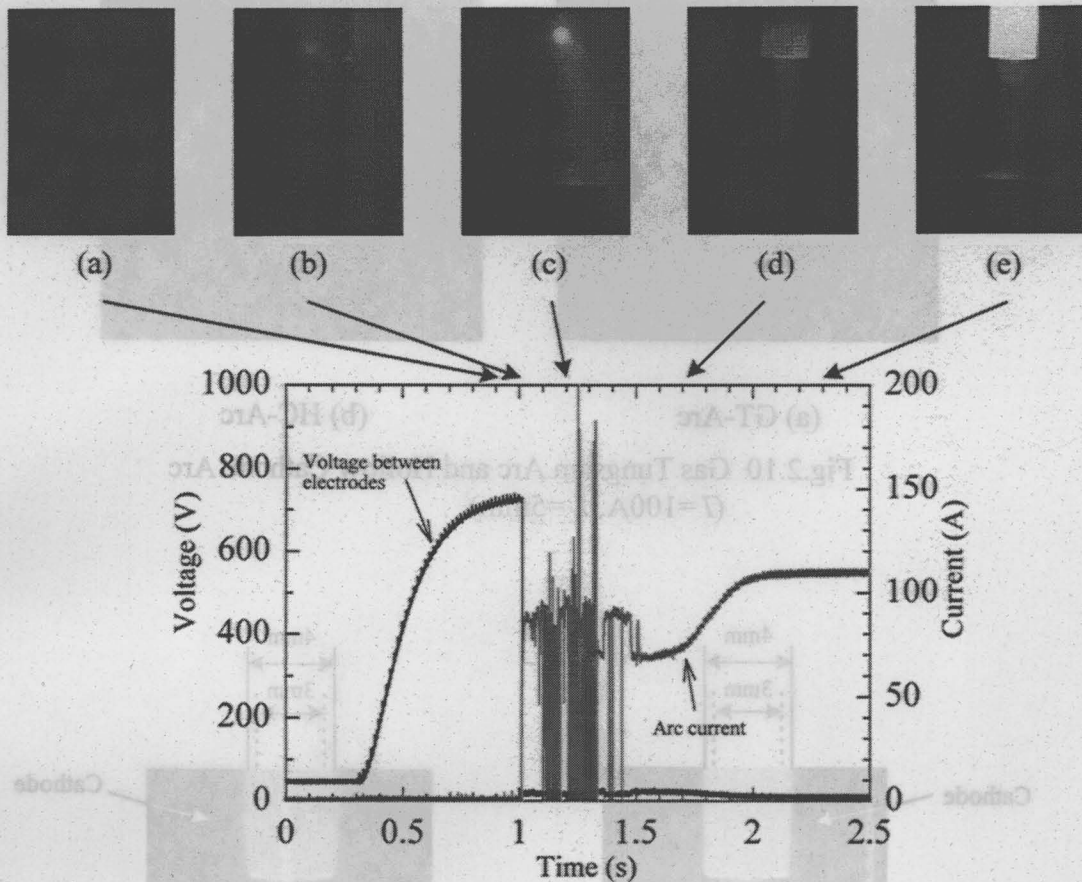


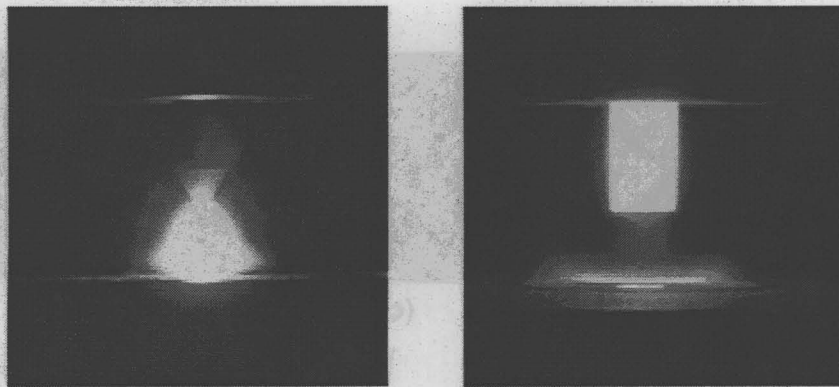
Fig.2.9 Ignition process of HCA
($P=5\text{Pa}$, $L=10\text{mm}$ $Q=1.7\text{ml/s}$)

2. 3. 3 アーク放電の形態

大気圧下での Gas Tungsten Arc (GT-Arc)と低圧下での Hollow Cathode Arc (HC-Arc)の様子を Fig.2.10 に示す. (a) は GT-Arc であり, アーク電流は 100A, 電極・母材間距離は 5mm, ガス流量は 170ml/s としたときのものである. (b) は HC-Arc であり, 周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 100A, 電極・母材間距離は 5mm, 電極先端からのガス流量は 1.7ml/s としたときのものである. 電極には, 外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した.

一般に大気圧下での GT-Arc は, シールドガスに Ar ガスを用いるとプラズマ密度が約 $10^{23}/\text{m}^3$ にまで達する²⁷⁾. このためアークプラズマの放出する光も強く, アーク柱は, 通常, 明瞭に観察できる. 一方, 低圧下でのアーク放電では, 周囲圧力が低いためにプラズマ密度も低くなり, アークプラズマの放出する光も強くない.

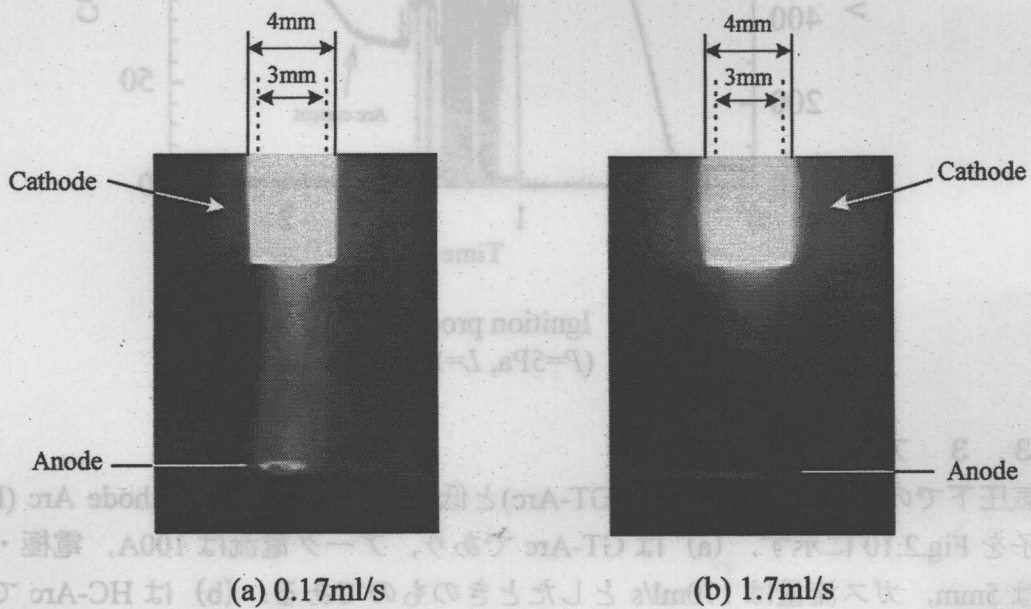
低圧下における HC-Arc に関して, ガス流量を変化させたときの放電形態の変化の様子を Fig.2.11 に示す. (a)はガス流量を 0.17ml/s としたとき, (b)はガス流量を 1.7ml/s



(a) GT-Arc

(b) HC-Arc

Fig.2.10 Gas Tungsten Arc and Hollow Cathode Arc
($I=100A, L=5mm$)



(a) 0.17ml/s

(b) 1.7ml/s

Fig.2.11 Effect of gas flow rate on HCA discharge
($P=5Pa, I=130A, L=10mm$)

としたときのものである。また写真の上に描いているのは、中空電極の外径と内径の寸法であり、電極には外径 4.0mm、内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。それぞれ周囲圧力は 5Pa、アーク電流は 130A、電極・母材間距離は 10mm とし、陽極には銅板を使用した。

ガス流量を変化させることで、明らかに放電外観が異なっていることがわかる。ガス流量を 0.17ml/s と少なくした場合には、電極から母材にかけて、円柱状のプラズマ

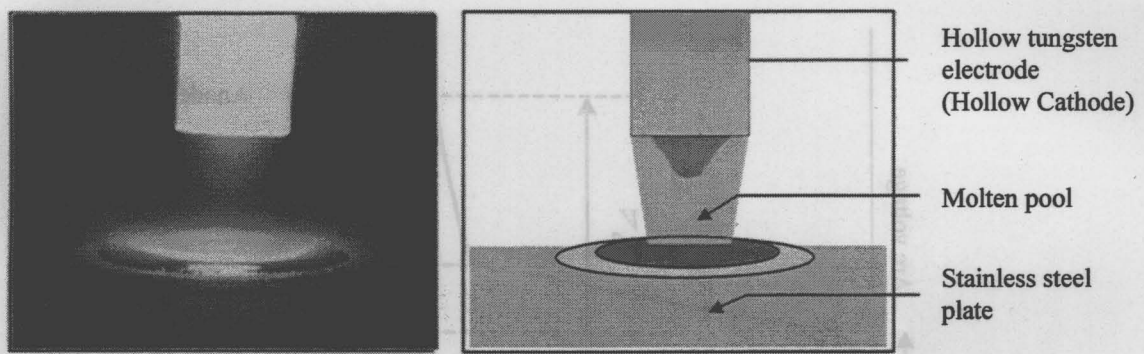


Fig.2.12 Photograph and schematic diagram of HCA.
 ($P=5\text{Pa}$, $I=150\text{A}$, $L=5\text{mm}$, $Q=1.7\text{ml/s}$)

が形成されており、その直径はほぼ電極内径に一致していた。これに対し、ガス流量を、 1.7ml/s とした場合には、電極直下にぼんやりとしたプラズマが観察されるのみであった。

このようにガス流量を変化させると、HC-Arcの放電形態が変化する。このようなアークを溶接用熱源として用いた場合、その放電形態によって、アーク特性や母材溶融特性も異なることが予想される。

Fig.2.12には、母材にステンレス鋼を使用し、母材が溶融している状態でのHC-Arcの外観とその概略図を示す。周囲圧力は 5Pa 、アーク電流は 150A 、電極・母材間距離は 5mm 、ガス流量は 1.7ml/s とした。陽極に銅板を用いた際には観察されなかったうっすらとした青っぽい発光が溶融池全体を覆っている。これは溶融池表面からの金属蒸気の影響と思われる、金属蒸気が活発に発生しているものと考えられる。

2. 4 HCAの電流電圧特性

大気圧下におけるGT-Arc (GTA)と低圧下におけるHC-Arc (HCA)のアーク電圧について検討をおこなう。大気圧下のアーク放電においてはFig.2.13に示すように、アーク電圧は陽極近傍の陽極降下電圧とアーク柱部のアーク柱降下電圧、陰極近傍の陰極降下電圧の和となる¹⁵⁾。

$$V_a = V_C + V_p + V_A \quad (3.1)$$

ここで、 V_a : アーク電圧, V_C : 陰極降下電圧, V_p : アーク柱降下電圧,

V_A : 陽極降下電圧

しかし、低圧下におけるHCAの場合、そのアーク電圧は、放電自身が陰極内部に侵入するため陰極内部のアーク柱降下電圧を考慮する必要があり、アーク長に沿った

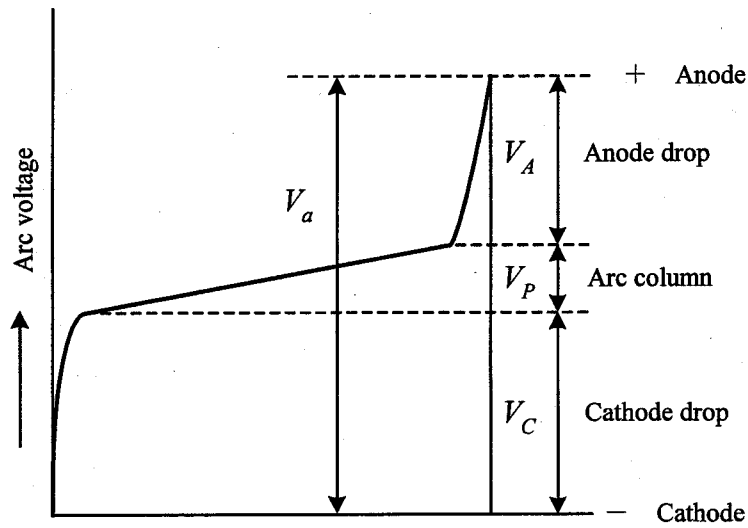


Fig.2.13 Schematic diagram of the potential distribution on the axis of GTA

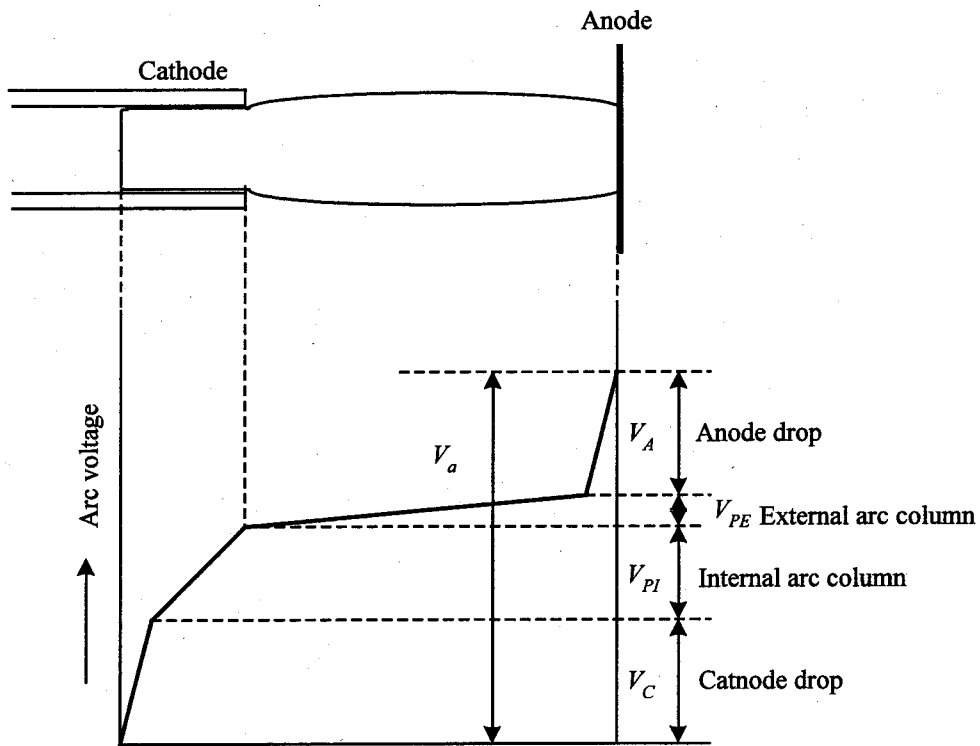


Fig.2.14 Schematic diagram of the potential distribution on the axis of HCA

電位分布は、Fig.2.14 のようになることが Delcroix らによって指摘されている¹⁷⁾。この場合にはアーク電圧は、次式のように表現できる。

$$V_a = V_C + V_A + V_{PE} + V_{PI} \quad (3.2)$$

ここで、 V_a : アーク電圧、 V_C : 陰極降下電圧、 V_A : 陽極降下電圧、

V_{PE} : 外部アーク柱降下電圧、 V_{PI} : 陰極内アーク柱降下電圧

HCA プラズマの性質として、電極先端からのガス流量の多少によってプラズマの電極内部へ侵入する程度が変化するとされている。具体的には高ガス流量の場合、HCA プラズマはほとんど陰極内部に侵入せず、低ガス流量になるほど陰極内部に侵入すると考えられている。すなわち、ガス流量が多い場合には、電極間にプラズマ形成に十分な気体が存在し、電極間でのプラズマの形成及び維持が可能となっているものと思われる。一方、ガス流量が少ない場合には、電極間に気体が不足し、電極間でのプラズマの形成及び維持が困難となり、ガスが供給される陰極内でのみ、プラズマの形成が可能な状態となるため、プラズマが陰極内部に侵入するような形態をとるものと思われる。しかし、陰極内部にプラズマが侵入する詳細な条件については、今後検討が必要である。

したがって陰極内部への侵入が無いと陰極内アーク柱降下はゼロに近く、陰極内部への侵入が大きいほど、陰極内アーク柱降下電圧が大きくなるためアーク電圧が上昇する。

次に、実際の GTA と HCA の典型的な電流電圧特性や HCA の電流電圧特性とそのプロセスパラメータの関係について検討する。

Fig.2.15 は、低圧下での HCA と大気圧下での GTA の典型的な電流電圧特性の一例である。○、△は、周囲圧力が 5Pa、アーク長 5mm、電極に外径 4.0mm、内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を用いた場合の HCA の電流電圧特性であり、○がガス流量 0.17ml/s、△がガス流量 1.7ml/s の場合のものである。また●は、大気圧下の GTA の電流電圧特性であり、シールドガス流量 170ml/s、アーク長 5mm とした場合のものである。それぞれにおいて、母材にはステンレス鋼 SUS304 を用いた。

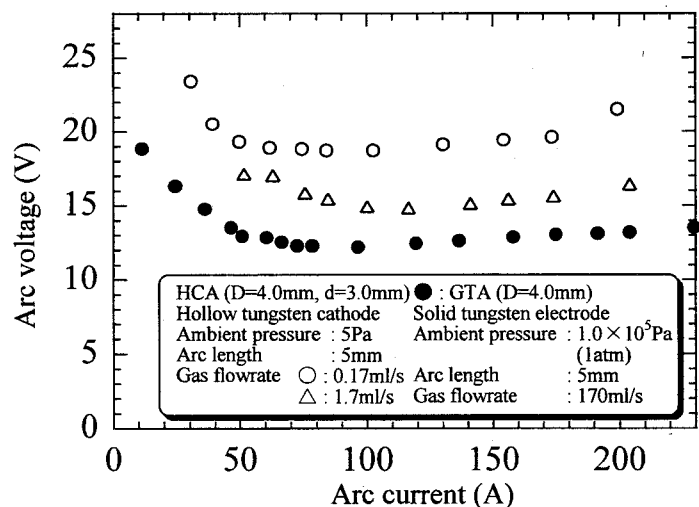


Fig.2.15 Comparison of arc characteristics between HCA and GTA

HCA と GTA とともに、低電流域でアーク電圧はアーク電流の増加とともに減少し、高電流域でアーク電圧はアーク電流の増加とともに緩やかに増加している。HCA の場合、ガス流量が少ない場合のアーク電圧は、すべての電流域で GTA のアーク電圧よりも 7-8V 高くなった。またガス流量が多い時のアーク電圧は、GTA のアーク電圧と比べて、2V 程度高くなっているものの比較的近い特性を示した。以上のように、低下下の HCA と大気圧下の GTA の電流電圧特性の違いは、HCA のガス流量が少ない場合に顕著である。

Fig.2.16 は、電極先端から供給されるガス流量を 0.17, 0.83, 1.7ml/s と変化させた場合の電流電圧特性である。アーク長は 5mm とし、電極には外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。100A 以上の電流域では、明らかにガス流量が少ないほどアーク電圧が高くなっている。1.7ml/s の場合には 0.17ml/s と比べて 5V 程度も低くなった。これは、3.4.1 項で説明したようにガス流量が少なくなるに従って、アークプラズマが電極内に侵入すると考えられ、そのために陰極内アーク柱降下電圧が上昇し、アーク電圧が上昇したものと考えられる。

Fig.2.17 は、アーク長を 2, 5, 10mm と変化させたときの電流電圧特性である。周囲圧力は 5Pa, ガス流量は 0.17ml/s とし、電極には外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。大気圧中のアーク放電と同様、アーク長が長くなるほどアーク電圧が高くなる傾向にあることがわかる。大気圧中のアーク

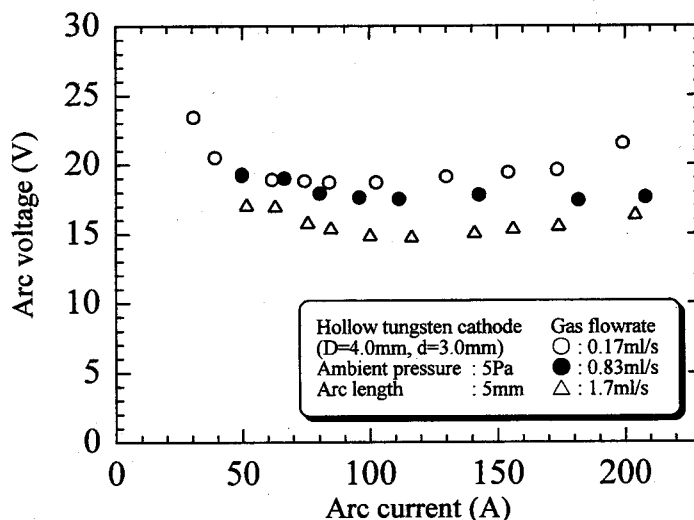


Fig.2.16 Effect of gas flowrate on arc characteristics ($P=5\text{Pa}$, $L=5\text{mm}$)

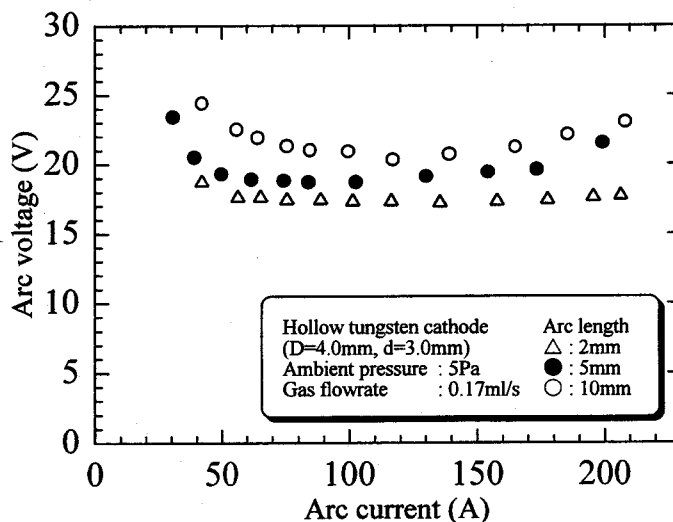


Fig.2.17 Effect of arc length on arc characteristics ($P=5\text{Pa}$, $Q=0.17\text{ml/s}$)

放電においては、アーク長が変化するとアーク柱電圧降下が変化し、アーク電圧が変化するとされており、アーク長の変化量に比例してアーク電圧も変化する。しかしながら、Fig.2.17 をみるとアーク長の変化量とアーク電圧の変化量に比例関係はみられずアーク電圧変化の原因は、外部アーク柱降下電圧の変化のみではないことを示唆している。

Fig.2.18 は、周囲圧力を 4,150,700Pa と変化させたときの電流電圧特性である。アーク長は 5mm，ガス流量 0.17ml/s，電極には外径 4.0mm，内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。150A 以上の電流域では、周囲圧力が低いほど、アーク電圧が高くなる傾向がある。逆に低電流域ではその傾向は顕著ではなくなる。

Fig.2.19 は、電極に外径 4.0mm，内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極と外径 4.0mm，内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を用いたときの電流電圧特性である。○は内径 1.8mm，●は内径 3.0mm の電極を表している。

また(a)はガス流量が 1.7ml/s，(b)はガス流量が 0.17ml/s の場合のものである。また周囲圧力は 5Pa，アーク長は 5mm とした。ガス流量が多い場合には、アーク電流 100A 以下で内径 3.0mm の方が、数 V 程度アーク電圧が高くなっているものの同じような傾向を示している。しかし、ガス流量が少ない場合には、内径の違いが顕著に表れている。内径 1.8mm の場合に、アーク電流の増加に伴い、急激にアーク電圧が上昇している。

外径 4.0mm，内径 3.4mm の中空タンタル電極を用いて電流電圧特性の計測をおこなったが、この場合内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極の場合とほとんど変わらなかった。

以上のように中空陰極を用いた HCA の電流電圧特性は、電極先端から流出されるガス流量やアーク長，周囲圧力，電極形状の影響を大きく受けることが明らかになった。

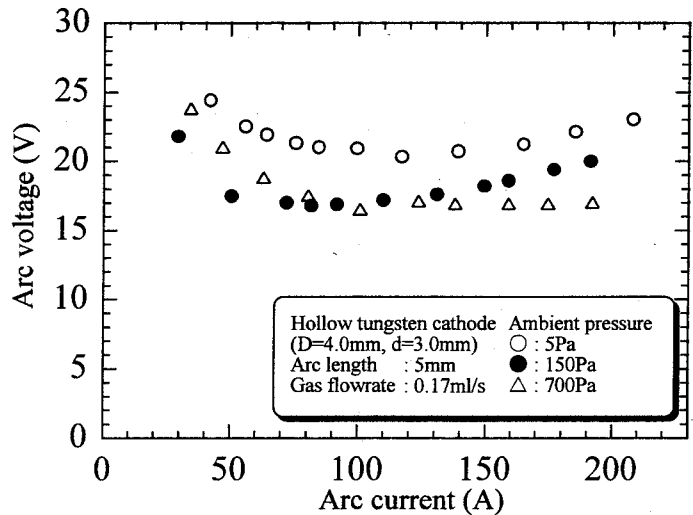
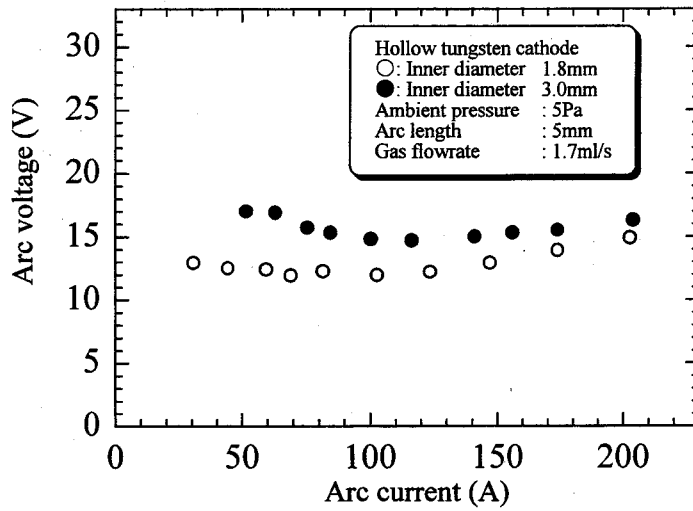
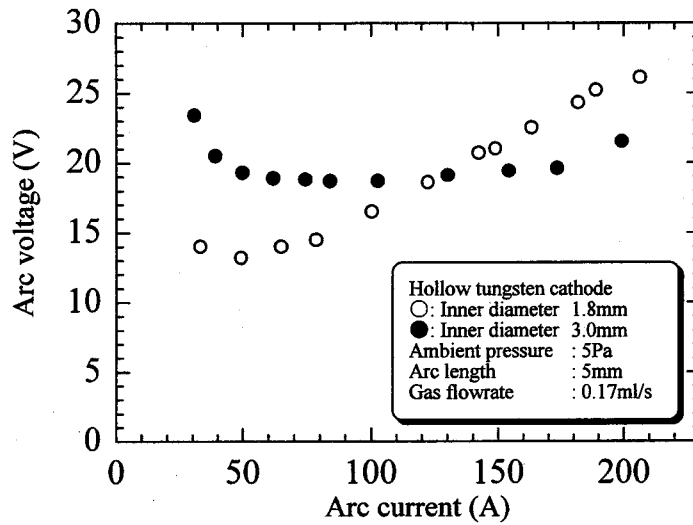


Fig.2.18 Effect of ambient pressure on arc characteristics (L=5mm, Q=0.17ml/s)



(a) $Q = 1.7\text{ml/s}$



(b) $Q = 0.17\text{ml/s}$

Fig.2.19 Effect of electrode inner diameter on arc characteristics
 ($P=5\text{Pa}$, $L=5\text{mm}$)

2. 5 結言

本章では、低圧下における中空陰極アークの放電特性を明らかにすることを目的として実験的検討をおこなった。具体的には、はじめに HCA の原理及び試作した実験装置について述べ、その実験装置を用いておこなった放電開始特性や放電外観、電流電圧特性の調査結果を示し、それぞれの特性について検討した。

以下に本章で得られた主な結果を要約する。

- (1) HCA を用いることで、低圧中でも 1kV 以下の電圧で放電を開始させることが可能であること、その中でも周囲圧力が約 27Pa のとき最も放電し易いことを明らかにした。また 27Pa 以下の低圧下では、放電開始電圧がガス流量に依存し、ガス流量を増すことで放電開始電圧の上昇を抑制できることを示した。
- (2) 放電開始時、電極先端のみで放電が起こるのではなく、アークは電極表面をランダムに走り回る。電極が高温になり最終的に形成されたアーク放電は、陰極内部に入り込み、内部から放電していることが推察された。
- (3) 低圧下でのアーク放電は、周囲圧力が低いためにプラズマ密度も低く、アークプラズマの放出する光が弱いために、明瞭には観察しにくい。また放電外観は、ガス流量の影響を大きく受けており、ガス流量が少ない場合には、電極から母材にかけて円柱状にプラズマが形成されることを示した。
- (4) HCA のアーク電圧は、ガス流量が多い場合、大気圧下の GTA のアーク電圧と比較的近い特性を示し、ガス流量が少ない場合には、GTA のアーク電圧よりも 7-8V 高くなっていることを明らかにした。
- (5) 中空陰極を用いた HCA の電流電圧特性は、電極先端から放出されるガス流量やアーク長、周囲圧力、電極形状に大きく影響されることを明らかにした。

また第 1 章で述べたように、実際の宇宙空間、特に国際宇宙ステーションが建造されている低高度軌道上の平均圧力は約 5×10^{-4} Pa 程度である。本章では、実験装置の都合上、周囲圧力が 9.0×10^{-2} Pa までの範囲で点弧特性に関する検討をおこなったが、J.L.Delcroix¹⁷⁾によると、 5×10^{-3} Pa の低圧下でも HCA プラズマに関する実験がおこなわれており、宇宙空間のようなさらに低い圧力下でも HCA の形成は可能であると思われる。

第3章 HCAによる母材溶込み特性

3.1 緒言

前章で、低圧下でのHCAの放電外観は、大気圧中のGTAのそれと大きく異なり、またガス流量によっても大きく異なることを示した。電流電圧特性は、ガス流量やアーク長、周囲圧力、電極形状のようなプロセスパラメータに影響されることを明らかにした。

本章では、そのHCAを溶接用熱源として使用した場合の特徴を明らかにするために母材溶込み特性について検討をおこなう。静止アークによる溶融実験の場合、試験片にはサイズ50×50×12mmtのステンレス鋼SUS304を使用した。そのSUS304の化学成分をTable 3.1に示す。硫黄(S)量の異なる2種類のステンレス鋼を使用しており、S量を0.008%含むものをHS材、0.001%含むものをLS材と以下では呼ぶ。またビードオンプレート溶接実験の場合、トーチを固定し母材を移動させる方式をとり、試験片サイズは50×150×8mmt(HS材)または50×150×12mmt(LS材)とした。

Table 3.1 Chemical composition of materials

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304 (mass%) HS	0.04	0.60	1.31	0.0035	0.008	8.21	18.38
SUS304 (mass%) LS	0.06	0.44	0.87	0.0030	0.001	8.09	18.07

3.2 HCAの典型的な溶込み特性

HCAを溶接用熱源として用いた場合に得られる母材溶込み形状の特徴について検討するために、静止アークによる母材溶融実験をおこなった。まず大気圧中のGTAによる溶込み形状との比較をおこなう。

Fig.3.1は、HCAによる母材溶融実験の結果とGTAによる母材溶融実験の結果である。それぞれアーク長が5mm、10mmのときを示している。HCAの場合、周囲圧力は5Pa、ガス流量は0.17ml/s、アーク電流は130Aとし、電極には外径4.0mm、内径3.0mmの2%Th-HW電極を用いた。GTAの場合、周囲圧力は 1.0×10^5 Pa (1atm)、ガス流量は170ml/s、アーク電流は130Aとした。また本章における母材は、特に断らない限りHS材である。

それぞれの溶込み形状を比較すると、明らかにHCAによる溶込み形状とGTAによる溶込み形状は異なる。それぞれの溶融量を比較しても、アーク長が5mmの場合にはHCAを用いた場合の方が数倍多く、アーク長10mmの場合にはその差はさらに大きくなる。一般に知られているようにGTAによる溶込みは、アーク長が長くなり過ぎるとアークが広がり、母材への入熱密度

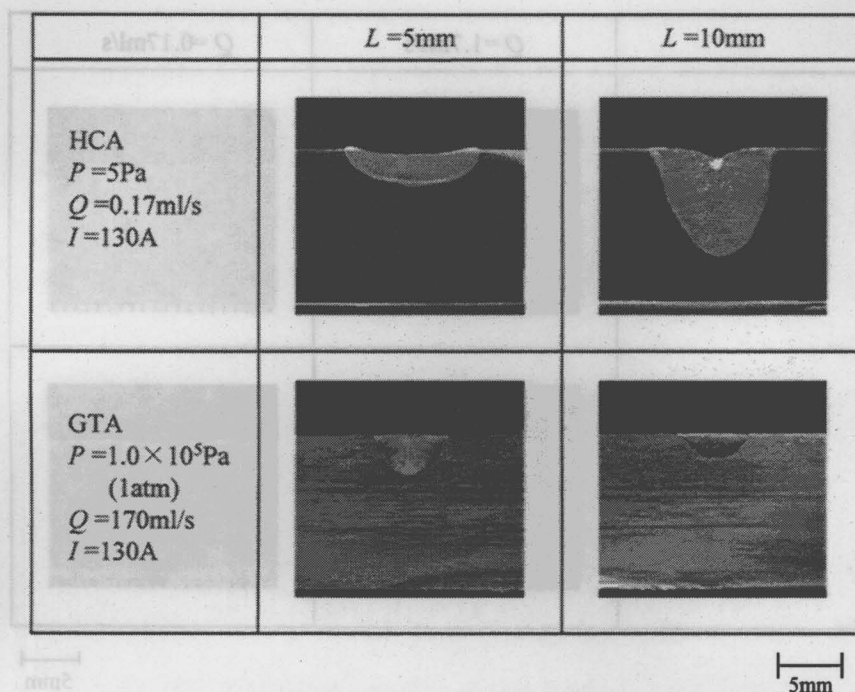


Fig.3.1 Penetrations in GTA and HCA melting.

が低下するために母材の溶融量が減少する。しかし HCA を用いた場合、アーク長が 5mm から 10mm に増加すると溶融量が大幅に増加しており、溶込みも非常に深くなっている。このように大気圧下での GTA による母材溶融現象と低圧下での HCA による母材溶融現象は大きく異なり、HCA に特有の溶込み形成現象が起こっていることが推察できる。

低圧下での HCA においては中空陰極が重要な役割を果たしている。その中空陰極の材質や形状が溶込み特性に及ぼす影響について検討をおこなう。はじめに電極材質の影響を検討するため、外径 4.0mm、内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極（タングステン管）を用いた場合と外径 4.0mm、内径 3.4mm の HTa 電極（タンタル管）を用いた場合の溶込み形状を Fig.3.2 に示す。周囲圧力は 5Pa、アーク電流は 150A、アーク長は 10mm、ガス流量は 0.17ml/s と 1.7ml/s の 2通りとした。

電極の材質に関わらずガス流量が 1.7ml/s の場合には、溶融量が少なく横に広がった浅い溶込みとなっている。またガス流量が 0.17ml/s の場合も材質に関わらず、溶融量が多い深い溶込みとなっており、電極材質の影響はみられない。

次に電極内径の影響を検討するため、外径 4.0mm、内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を用いた場合と外径 4.0mm、内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を用いた場合の溶込み形状を Fig.3.3 に示す。周囲圧力は 5Pa、アーク電流は 150A、アーク長は 10mm、ガス流量は 0.17ml/s と 1.7ml/s の 2通りとした。

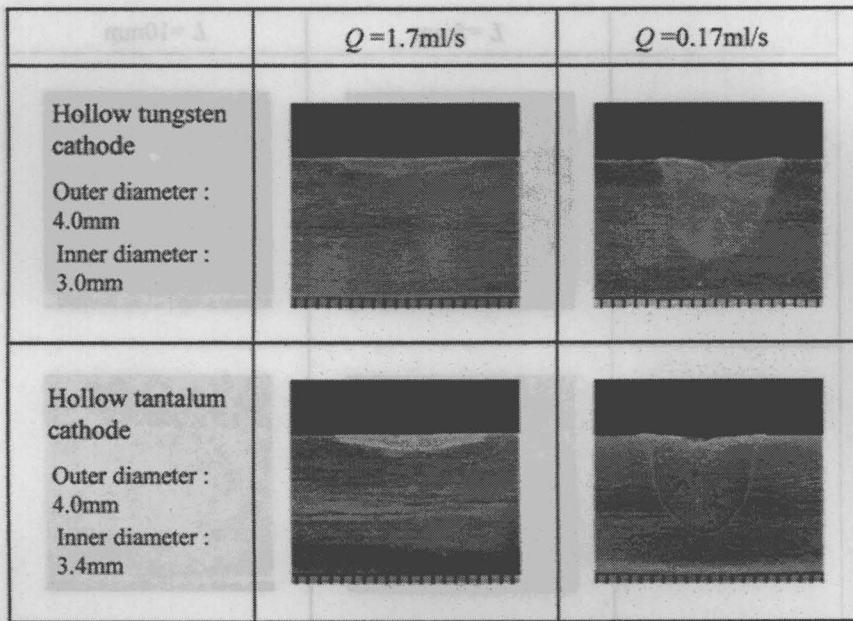


Fig.3.2 Penetrations in HCA melting using tungsten cathode and tantalum cathode:
 ambient pressure 5Pa, arc current 150A, arc length 10mm

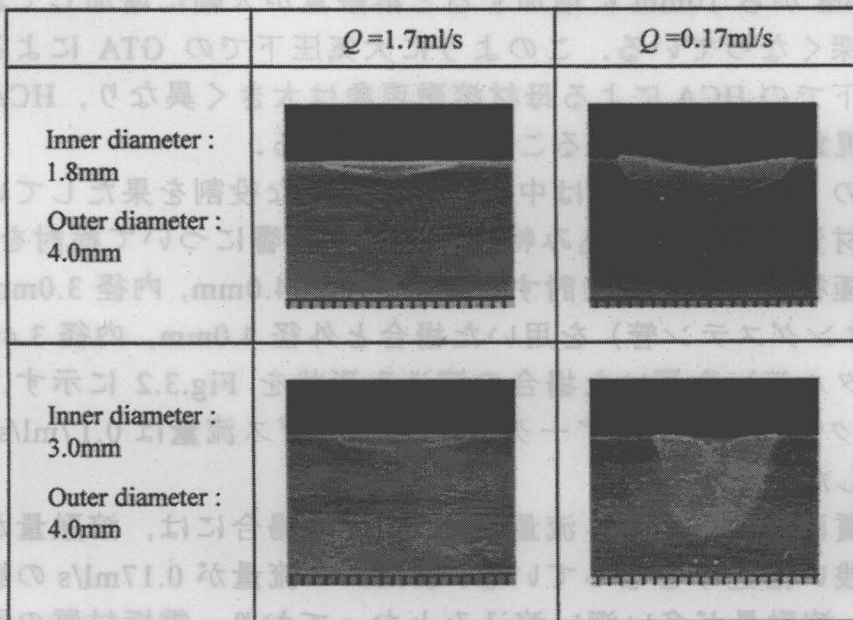


Fig.3.3 Penetrations in HCA melting depending on electrode inner diameter:
 ambient pressure 5Pa, arc current 150A, arc length 10mm

ガス流量が 1.7ml/s の場合には、電極内径に関わらず横に広がった浅い溶込みとなっており内径の影響はみられない。しかしガス流量が 0.17ml/s の場合には、電極内径が大きい 3.0mm の場合にのみ溶融量の多い深い溶込みとなっている。電極内径が 1.8mm と小さい場合には、溶融量は増加しているものの横に広がった溶込みとなっており、内径 3.0mm の場合とは異なった形状を示している。

以上より、HCA による溶込みは電極材質にそれほど影響されないが、ガス流量が少ない場合に電極内径の影響を受ける。

次の 3. 3 節では、HCA の溶込み特性についてさらに詳しく検討するために、溶込み形状に及ぼすプロセスパラメータの影響について検討をおこなう。ここでは内径の小さい電極 ($\phi 1.8\text{mm}$) を使用し、かつガス流量が多く、浅い溶込みが形成される条件下と、内径の大きい電極 ($\phi 3.0\text{mm}$ または $\phi 3.4\text{mm}$) を使用し、かつガス流量が少なく、深い溶込みが形成される条件下とに分け、プロセスパラメータが母材溶込み形状に及ぼす影響について検討する。

3. 3 溶込み形状に及ぼすプロセスパラメータの影響

3. 3. 1 内径の小さい中空電極を使用した場合

3. 2 節で示したように、外径 4.0mm、内径 1.8mm の 2%La-HW 電極のような内径の小さい電極を用いた場合の溶込み形状の特徴は、ガス流量 1.7ml/s の場合にみられるような、横に広がった浅い溶込みとなることである。本項では、電極内径が小さく、ガス流量が比較的多い場合を対象に母材溶込み形状に及ぼすプロセスパラメータの影響について検討する。十分な溶込みを得るためにアーク長は 2mm とした。

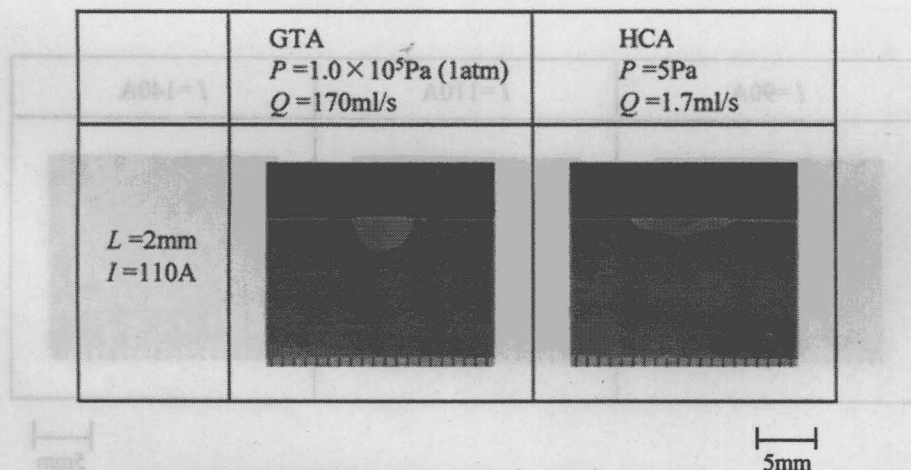


Fig.3.4 Penetrations in GTA and HCA melting

HCA: hollow tungsten cathode

($D=4.0\text{mm}$, $d=1.8\text{mm}$)

まず、大気圧下での GTA による母材溶融実験の一例と外径 4.0mm、内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を使用した HCA による母材溶融実験の一例を Fig.3.4 に示す。GTA による溶融実験は、大気圧下でおこない、シールドガス流量は 170ml/s とした。また HCA による溶融実験は、周囲圧力 5Pa でおこない、電極先端からのプラズマ形成用ガス流量は 1.7ml/s とした。両者ともアーク長は 2mm、アーク電流は 110A、溶融時間は 20 秒とした。

2つの溶込み形状を比較すると、電流とアーク長が等しいにも関わらず溶融池の形状及び幅・深さともに明らかに異なった形状を示している。GTA による溶込みは、中央部が深くなっているのに対し、ここで示した HCA による溶込みは、深さ方向よりも横方向に広がった形になっている。また溶融部表面中央に、凹みができているのも HCA に特有のものであり、電極先端から流出されるプラズマ形成用ガスの影響が溶融池表面に現れているものと思われる。Fig.3.5 に示すように、溶融池表面に電極先端からガスが吹きつけられ、表面が押されるために凹んだものと考えられる。

次に、アーク電流の大きさを変化させたときの溶込み形状の変化の様子を Fig.3.6 に示す。アーク電流は、左から 90、110、140A とし、周囲圧力は 5Pa、アーク長は 2mm、ガス流量は 1.7ml/s、溶融時間は 20 秒とした。

明らかにアーク電流の増加に伴い、溶融面積は大幅に増加している。しかし深さ方向よりも横方向に広がった溶込み

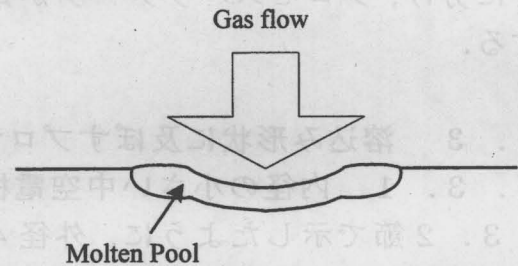


Fig.3.5 Effect of gas flow on penetration in HCA melting

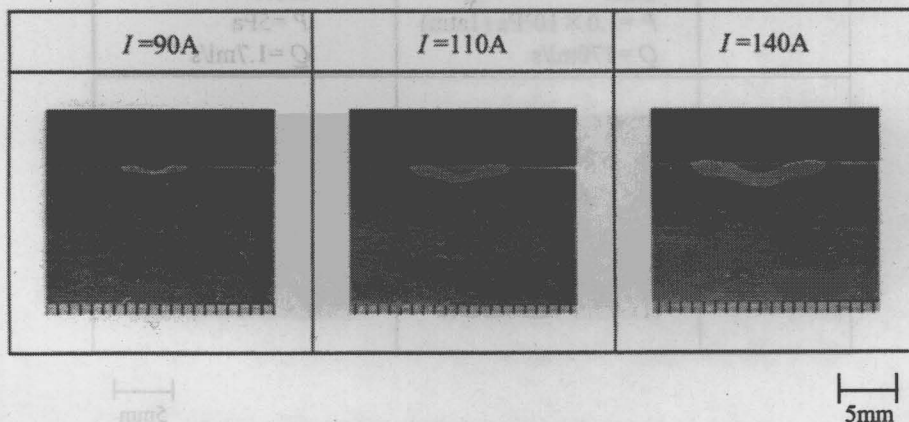


Fig.3.6 Effect of arc current on penetration in HCA melting: ambient pressure 5Pa, gas flowrate 1.7ml/s, arc length 2mm hollow tungsten cathode($D=4.0mm$, $d=1.8mm$)

形状になることには変わりはなく、アーク電流が変化しても、GTA を用いたときのような形状にはならない。つまり内径の小さい電極を用いると HCA の溶込みは、アーク電流の大きさに関係なく、深さ方向よりも横方向に広がったような溶込み形状になることがわかる。

電極先端から流出させるガス流量を変化させたときの溶込み形状の変化の様子を Fig.3.7 に示す。ガス流量は、左から 1.3, 1.7, 3.3ml/s とし、周囲圧力は 5Pa, アーク長は 2mm, アーク電流は 110A, 溶融時間は 20 秒とした。

溶融量には、さほど変化はみられず、ガス流量を増やすと溶融部中央の凹みが大きくなり、その周辺部の盛り上がりが大きくなっているのがわかる。やはり、アーク長が短い場合、溶融池表面は電極先端からのガスの影響を大きく受けている。最後に母材の硫黄含有量が溶込み形状に及ぼす影響について Fig.3.8 に示す。一般的な溶込み特性への硫黄含有量の影響については、5

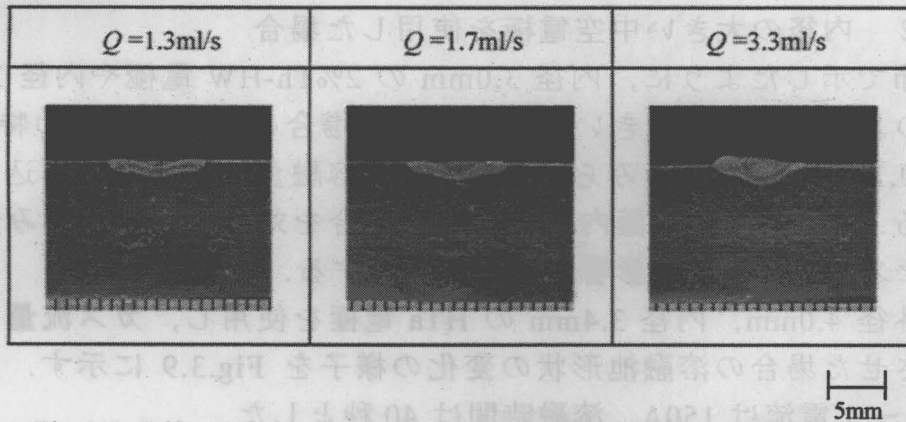


Fig.3.7 Effect of gas flowrate on penetration in HCA melting:
ambient pressure 5Pa, arc current 110A, arc length 2mm
hollow tungsten cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=1.8\text{mm}$)

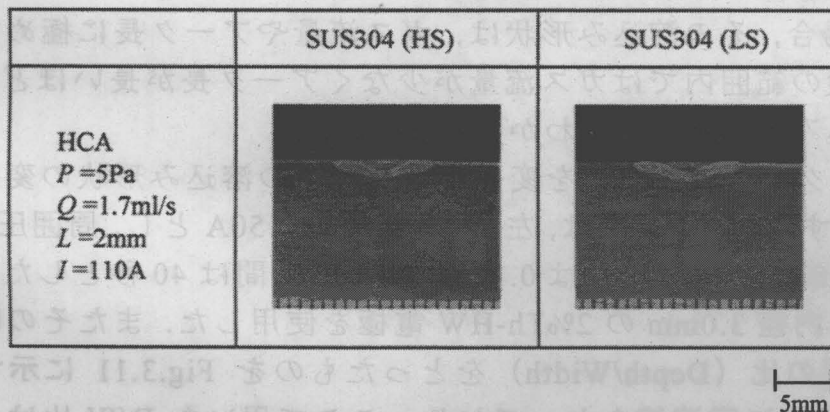


Fig.3.8 Effect of Sulfur on penetration in HCA melting:
hollow tungsten cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=1.8\text{mm}$)

章で詳しく述べる。左側が HS 材を用いた溶込み、右側が LS 材を用いたものである。周囲圧力は 5Pa, アーク長は 10mm, ガス流量は 1.7ml/s, アーク電流は 110A, 溶融時間は 20 秒とした。LS 材を用いた場合も, HS 材と同様, 溶込みは広く浅いものとなっており, 母材に含まれる S 量の影響はほとんど現れていない。

以上のように, ガス流量が 1.3-3.3ml/s と比較的多く, 内径の小さい電極を用いると HCA の溶込みは, プロセスパラメータや母材中の S 量とは無関係に, 深さ方向よりも横方向に広がったような形状になること, アーク長が短い場合, 溶融池表面形状は電極先端からのガスの影響を受けやすいことが明らかになった。このように溶込み形状が大気圧中の GTA によるそれと大きく異なる原因としては, 母材への入熱形態が大きく異なっていることが予想され, その溶込みメカニズムについては第 5 章で詳しく検討する。

3. 3. 2 内径の大きい中空電極を使用した場合

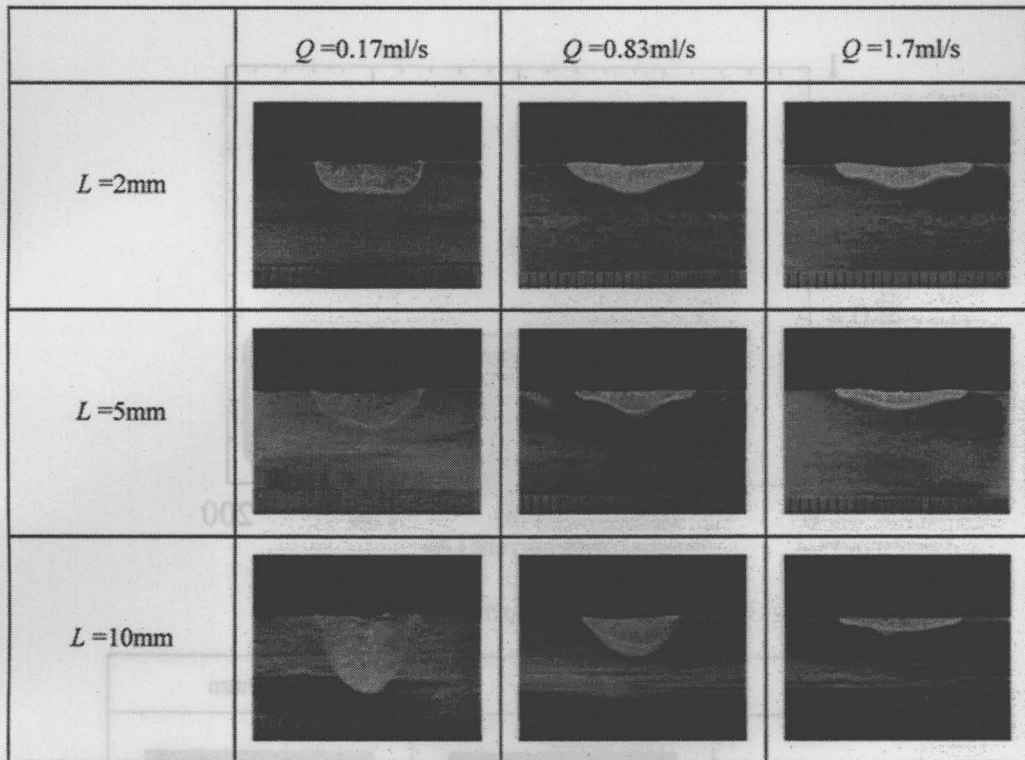
3. 2 節で示したように, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極や内径 3.4mm の HTa 電極のような内径の大きい電極を用いた場合の溶込み形状の特徴は, ガス流量が 0.17ml/s の場合にみられるような, 溶融量の多い深い溶込みとなることである。本項では, 電極内径が大きい場合を対象に母材溶込み形状に及ぼすプロセスパラメータの影響について検討する。

電極に外径 4.0mm, 内径 3.4mm の HTa 電極を使用し, ガス流量とアーク長を変化させた場合の溶融池形状の変化の様子を Fig.3.9 に示す。周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 150A, 溶融時間は 40 秒とした。

アーク長を一定とした場合, ガス流量が少ないほど, 溶融量の多い深い溶込み形状になっている。またガス流量が 0.17ml/s の場合には, アーク長を 10mm とした場合に非常に深い溶込みが形成されている。このように電極内径が大きい場合, その溶込み形状は, ガス流量やアーク長に極めて敏感であり, この実験の範囲内ではガス流量が少なくアーク長が長いほど, 溶融量が多い深い溶込みとなることがわかる。

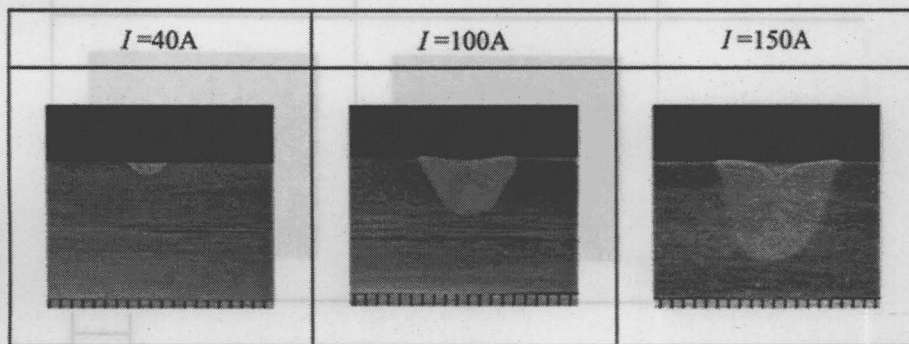
次に, アーク電流の大きさを変化させたときの溶込み形状の変化の様子を Fig.3.10 に示す。アーク電流は, 左から 40, 100, 150A とし, 周囲圧力は 5Pa, アーク長は 10mm, ガス流量は 0.17ml/s, 溶融時間は 40 秒とした。電極には外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。またその時の溶込み深さと溶融幅の比 (Depth/Width) をとったものを Fig.3.11 に示す。縦軸に D/W 比を, 横軸に電流値をとっており, ここで用いた D/W 比は, 一般に溶込み形状を表す指標である。

Fig.3.10 をみると, 電流が増加するごとに母材の溶融量が大きく増加して



5mm

Fig.3.9 Effect of arc length and gas flow rate on penetration in HCA melting
 ambient pressure 5Pa, arc current 150A
 hollow tantalum cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=3.4\text{mm}$)



5mm

Fig.3.10 Effect of arc current on penetration in HCA melting:
 ambient pressure 5Pa, arc length 10mm,
 gas flowrate 0.17ml/s
 hollow tungsten cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=3.0\text{mm}$)

おり、溶込み深さも増していることがわかる。実際、Fig.3.11 に示すように
 D/W 比も電流の増加とともに上昇しており、溶融幅の増加に対する溶込み深さ

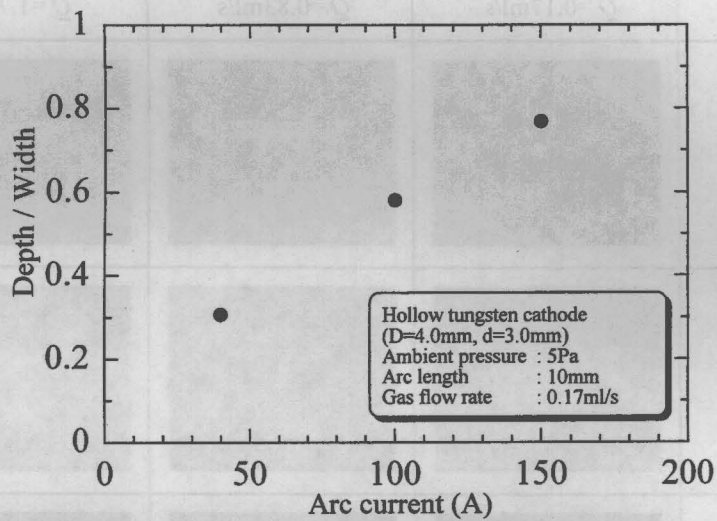


Fig.3.11 Effect of arc current on D/W rate

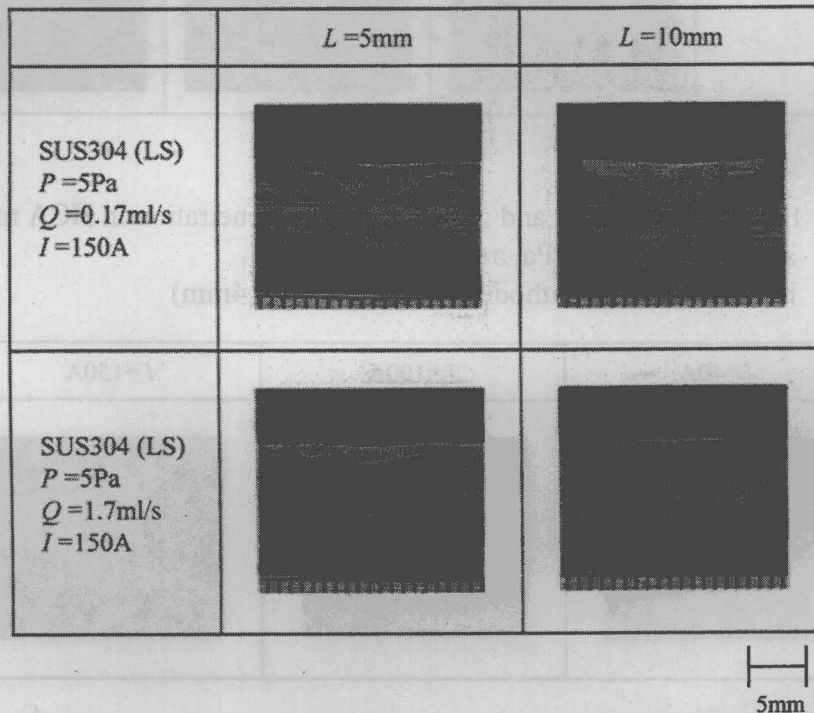


Fig.3.12 Effect of Sulfur on penetration in HCA melting hollow tungsten cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=3.0\text{mm}$)

の増加の割合が高くなっていることを表している。このように電流を増加させることで、より深い溶込み形状が形成される。

母材に LS 材を用いたときの溶込み形状を Fig.3.12 に示す。アーク長は 5, 10mm とし、ガス流量は 0.17ml/s, 1.7ml/s とし、アーク長の影響とガス流量の影響について表している。また周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 150A, 熔融時間は 40 秒とした。

実 LS 材を用いた場合、ガス流量が 1.7ml/s のときには HS 材同様、浅い溶込みとなっている。ガス流量を 0.17ml/s とした場合、アーク長が 5mm から 10mm に変化しても、HS 材を用いた場合のような溶込み形状、溶融量に大きな変化はない。またガス流量が 1.7ml/s のときに比べて、溶融量の差はアーク長 10mm のときで数倍程度となっている。このようにガス流量が少ない場合、その溶込み形状は、母材中に含まれる S 量に影響されることが明らかである。

以上のように、内径の大きい電極を用いると HCA による溶込みは、アーク長やガス流量、アーク電流のようなプロセスパラメータに大きく影響される。ガス流量が少なく、アーク長が長いときに、非常に溶融量の多い深い溶込みとなり、溶接用熱源としては効率の良い熱源となりうることが考えられる。その溶込みメカニズムについては、第 5 章で検討する。

3.4 ビードオンプレート溶接における母材溶融現象

これまで、HCA による母材溶込み特性を検討するために、静止アークによる溶込み形状の検討をおこなってきた。本節では、より実際の溶接現象に近い状態で溶込み特性を検討するために、ビードオンプレート溶接実験による母材溶込み形状について検討をおこなう。3.1 節でも述べたように、ビードオンプレート溶接実験の場合、試験片サイズは 50×150×8mmt(HS 材)または 50×150×12mmt(LS 材)とし、ビード長さは、全長 100mm とした。以下で示す断面は、溶接ビードが安定した溶接開始位置から 70mm の位置における

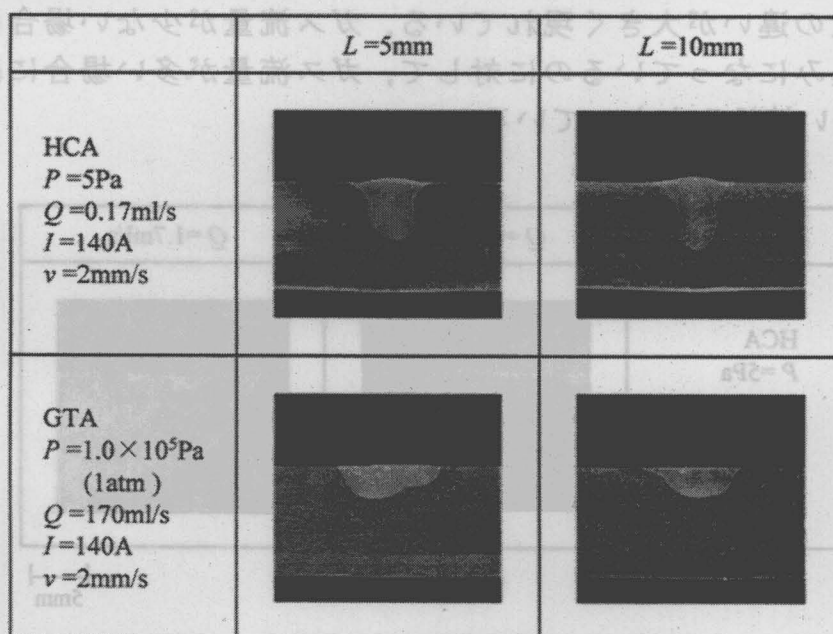


Fig.3.13 Bead cross sections in HCA and GTA welding

HCA:hollow tungsten cathode ($D=4.0\text{mm}$, $d=3.0\text{mm}$)

ビード横断面である。また電極には HCA の場合、静止アークによる溶融実験の際に深い溶込みが得られた内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を用いた。

Fig.3.13 は、HCA によるビードオンプレート実験の結果と大気圧中の GTA によるビードオンプレート溶接実験の結果である。それぞれアーク長を 5mm, 10mm とした。HCA の場合、周囲圧力は 5Pa, ガス流量は 0.17ml/s, アーク電流は 140A, 溶接速度 2mm/s とした。また GTA の場合、周囲圧力は $1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ (1atm), ガス流量は 170ml/s, アーク電流は 140A, 溶接速度は 2mm/s とした。

静止アークによる溶融実験と同様、GTA による溶込み形状と HCA による溶込み形状は大きく異なる。GTA の場合、Fig.3.1 に示した静止アークによる溶込みよりもさらに浅い溶込みになるのに対し、HCA の場合、静止アークによる溶込みよりも、さらに幅が狭く深い溶込み形状になっている。一方、溶融量に関しては、静止アークの場合ほど、HCA と GTA による溶融量の差はない。

内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した場合、静止アークによる溶込み形状は、プロセスパラメータの影響を大きく受ける。次にビードオンプレート溶接実験による溶込み断面に与えるプロセスパラメータの影響について検討をおこなう。ガス流量を 0.17ml/s, 1.7ml/s としたときの溶込み断面の様子を Fig.3.14 に示す。周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 140A, ガス流量は 0.17ml/s, 溶接速度は 2mm/s とした。静止アークによる溶融実験と同様、ガス流量による溶込み形状の違いが大きく現れている。ガス流量が少ない場合には、幅の細い深い溶込みになっているのに対して、ガス流量が多い場合には、横方向に広がった浅い溶込みとなっている。

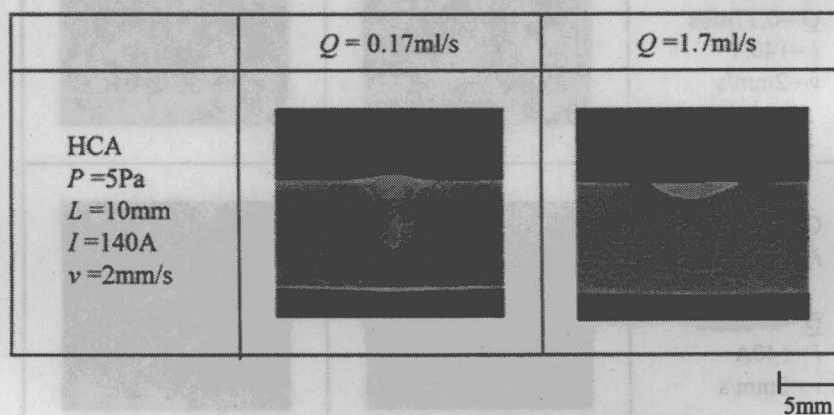


Fig.3.14 Effect of gas flowrate on bead cross section in HCA welding: ambient pressure 5Pa, arc current 140A, arc length 10mm, welding speed 2mm/s hollow tungsten cathode ($D = 4.0 \text{mm}$, $d = 3.0 \text{mm}$)

アーク長を変化させたときの溶込み断面の変化の様子を Fig.3.15 に示す。アーク長は、左から 2mm, 5mm, 10mm とし、周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 140A, ガス流量は 0.17ml/s, 溶接速度は 2mm/s とした。2mm の場合と 10mm の場合を比較しても, Fig.3.9 にみられたようなアーク長による溶込み深さの大きな違いはない。静止アークによる溶融現象では, ガス流量が少なく, アーク長が長い場合に深い溶込みが形成されたが, ビードオンプレート実験においては, アーク長に関係なくガス流量が少ない場合に深い溶込みが形成され, アーク長の影響はそれほど大きくない。

以上のように, ビードオンプレートによる溶込み断面は, アーク長よりもむしろガス流量に大きく依存することがわかった。

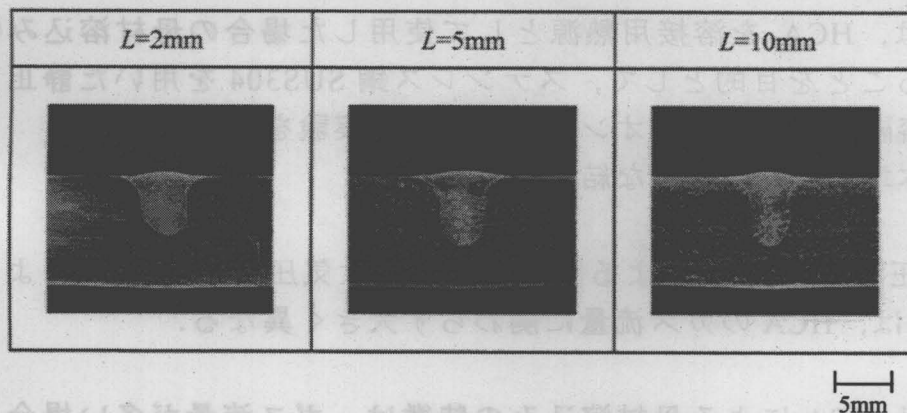


Fig.3.15 Effect of arc length on bead cross section in HCA welding: ambient pressure 5Pa, arc current 140A, gas flow rate 0.17ml/s, welding speed 2mm/s hollow tungsten cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=3.0\text{mm}$)

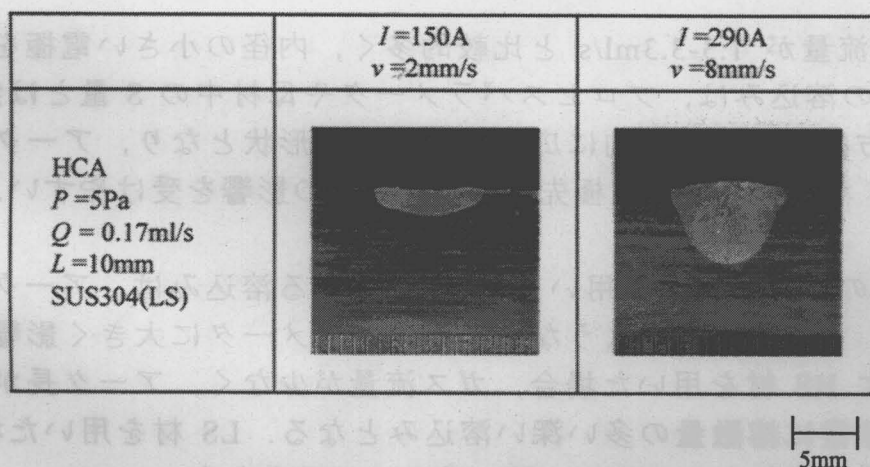


Fig.3.16 Effect of Sulfur on bead cross section in HCA welding: ambient pressure 5Pa, arc length 10mm hollow tungsten cathode($D=4.0\text{mm}$, $d=3.0\text{mm}$)

母材に LS 材を用いた場合の溶込み断面の様子を Fig.3.16 に示す。左側は溶接電流 150A, 溶接速度 2mm/s とし, 右側は溶接電流 290A, 溶接速度 8mm/s とした。また周囲圧力は 5Pa, ガス流量は 0.17ml/s とした。

溶接電流 150A, 溶接速度 2mm/s の場合には, 静止アークによる溶込みと同様, 浅い溶込みとなっているが, 溶接電流を 290A, 溶接速度を 8mm/s とした場合には, 深い溶込みを形成している。それぞれの D/W 比をとると, 0.25 と 0.65 となり, 大幅に溶込み深さが改善されていることがわかる。したがって, 高速大電流の条件下で溶接をおこなうことで, 母材に LS 材を用いた場合にも深い溶込みを形成することが可能である。

3. 5 結言

本章では, HCA を溶接用熱源として使用した場合の母材溶込み特性を明らかにすることを目的として, ステンレス鋼 SUS304 を用いた静止アークによる母材溶融実験とビードオンプレート溶接実験をおこなった。

以下に本章で得られた主な結果を要約する。

- (1) 低圧下での HCA による溶込み形状と大気圧下での GTA による溶込み形状は, HCA のガス流量に関わらず大きく異なる。
- (2) 静止 HCA による母材溶込みの特徴は, ガス流量が多い場合に, 電極内径に依存せず, 浅く広がった溶込みとなることと, ガス流量が少なく電極内径が大きい場合に, 溶融量が多く非常に深い溶込みとなることである。
- (3) ガス流量が 1.3-3.3ml/s と比較的多く, 内径の小さい電極を用いると HCA の溶込みは, プロセスパラメータや母材中の S 量とは無関係に, 深さ方向よりも横方向に広がったような形状となり, アーク長が短い場合, 溶融池表面は電極先端からのガスの影響を受けやすい。
- (4) 内径の大きい電極を用いると HCA による溶込みは, アーク長やガス流量, アーク電流のようなプロセスパラメータに大きく影響される。母材に HS 材を用いた場合, ガス流量が少なく, アーク長が長いときに, 非常に溶融量の多い深い溶込みとなる。LS 材を用いた場合には, 溶融量が増加するのみで, 深い溶込みにはならない。
- (5) ビードオンプレート溶接実験による溶込み断面は, アーク長よりもむ

しるガス流量に大きく依存し，ガス流量が少ない場合に，静止アークによる溶込みよりも幅の細い深い溶込みとなる．また高速大電流の条件下で溶接をおこなうことで，母材に LS 材を用いた場合にも深い溶込みを形成することが可能である．

第4章 プローブ法による HCA プラズマの電子密度・温度計測

4.1 緒言

対象としているプラズマがどのような特徴をもったプラズマであるかを理解するうえで、プラズマの電子密度やエネルギーの状態を知る手がかりとなる電子温度などのプラズマパラメータを知ることは、非常に有意義なことである。またアークプラズマを溶接用熱源として考える場合、そのプラズマの電子温度やアーク柱内の電位分布は、陽極への入熱を検討する上で、重要となる。

そこで本章では、HCA プラズマが低圧中のプラズマであることから、プラズマ密度はさほど高くはないと考え、比較的低温、低密度なプラズマの計測にこれまでから最もよく使用されてきたラングミュアプローブ法を使用し、HCA プラズマの電子密度と温度さらにはアーク柱内の電位分布の計測をおこなう。

4.2 プローブ法の実験装置と方法

一般にプローブ法は、プラズマ中に直接探針等を挿入し、プラズマから電流を取り出し、解析することで、そのプラズマの電子温度、電子密度、プラズマ内の電位分布等のプラズマパラメータを知る方法である^{28,29)}。

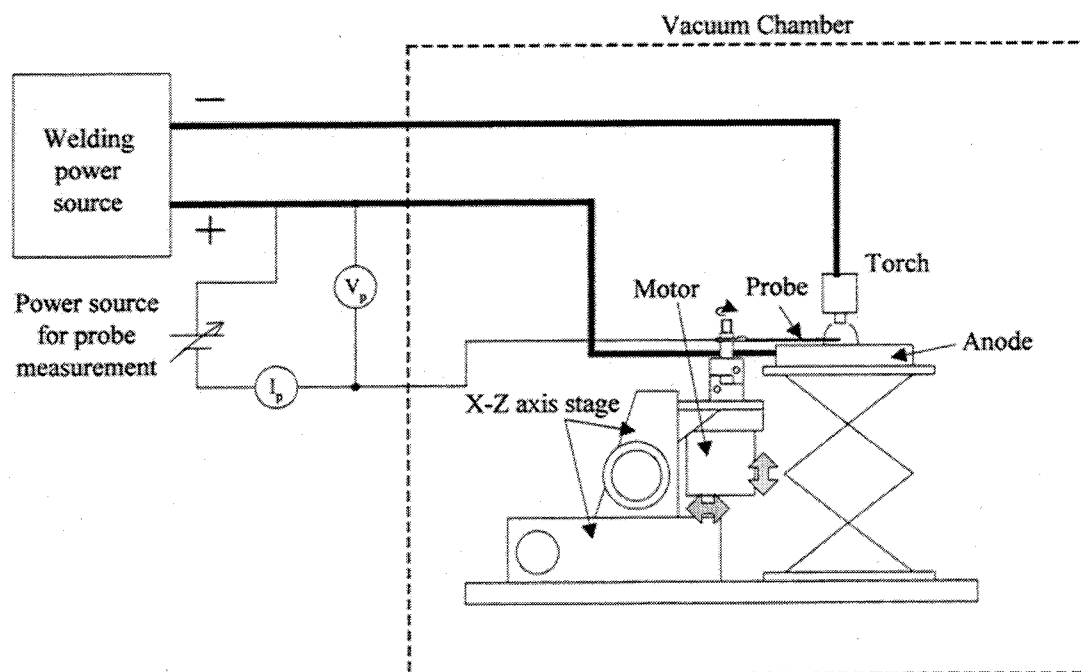


Fig.4.1 Experimental equipment for Langmuir probe method

本実験で使用したラングミュアプローブ法の実験装置の概略図を Fig.4.1 に示す。また使用したプローブの概略図を Fig.4.2 に示す。プローブは、図に示すような平面プローブとし、直径 0.25mm、長さ 110mm のタングステン棒を用いた。プローブ理論による解析上、プローブ先端面以外からの電流の流入を防ぐため先端面以外は、絶縁管によって覆っている。その絶縁管には、プラズマ自身にできる限り優乱を与えず、かつアーク電流 100A 程度でも溶融しないように、外径 1.0mm のアルミナ(Al_2O_3)製のものを使用した。また計測前には、プローブ表面を研磨紙で研磨し、使用した。

図に示すように、そのプローブをステッピングモータの軸に固定し、モータの回転でプローブを陽極面と平行な面上を回転させる。その際、プローブ先端面が高速度で、アーク中心軸上を通過するよう

にプローブを設定した。プローブ高さは、Z 軸ステージにより調整し、以下でプローブ高さ (h) とは、陽極面からの高さを表すことにする。またプローブの回転中に、Fig.4.3 に示すような、周波数 1kHz、最大電圧 20V、最小電圧 -16V の三角波状の電圧を陽極とプローブ間にプローブ電圧として印加した。実際には、プローブに流れる電流値 I_p とさきほどのプローブ電圧 V_p を Fig.4.1 に示した位置で計測し、レコーダに記録した。計測されたプローブ電圧とプローブ電流の関係の一例を Fig.4.4 に示す。さらにそれをもとに、プローブ理論にもとづいた解析をおこない、電子密度と温度、アーク柱内の電位分布の決定をおこなった。

また本章での実験において、電極は全て外径 4.0mm、内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を用いた。

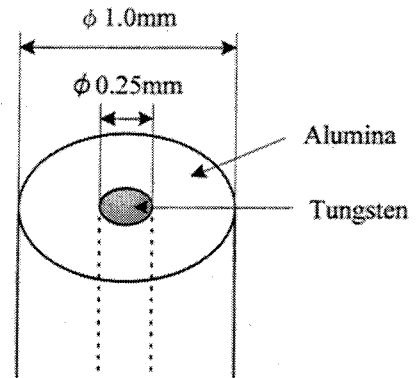


Fig.4.2 Probe on this experiment

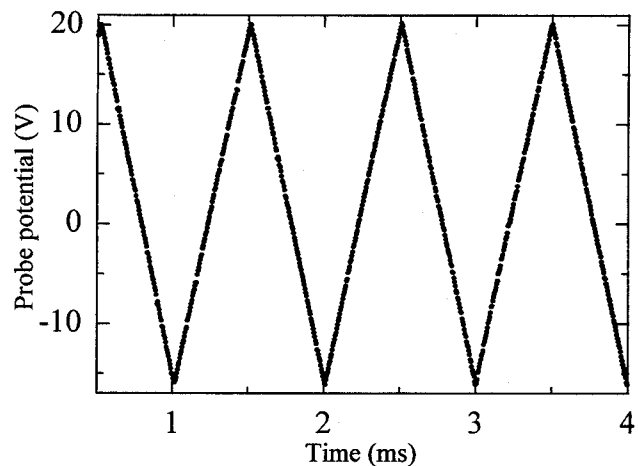


Fig.4.3 Wave form of probe potential

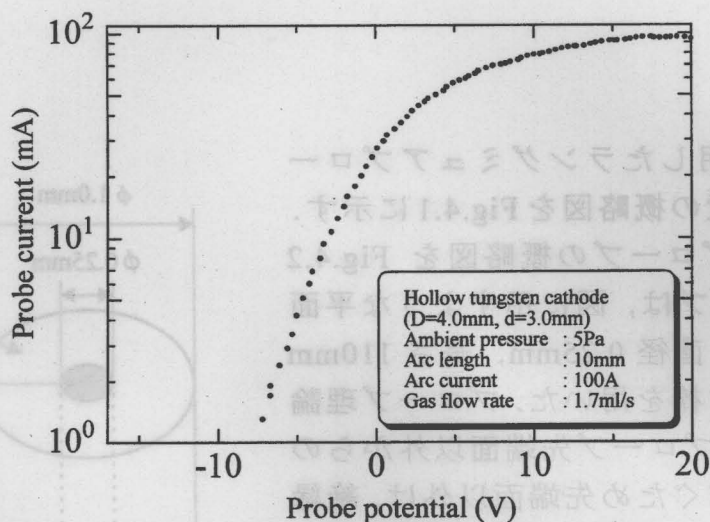


Fig.4.4 Example of Langmuir probe characteristic for HCA plasma

4. 3 電子密度・温度分布に関する検討

4. 3. 1 陽極に銅板を使用した場合

陽極に銅板を用いて、HCA プラズマの電子密度と温度の計測をおこなった。計測対象とした HCA の放電外観を Fig.4.5 に示し、計測結果を Fig.4.6, Fig.4.7 に示す。放電条件として、周囲圧力は 5Pa, アーク長は 10mm, アーク電流は 100A とした。なお、陽極に銅を用いた場合には、陽極は溶融せず

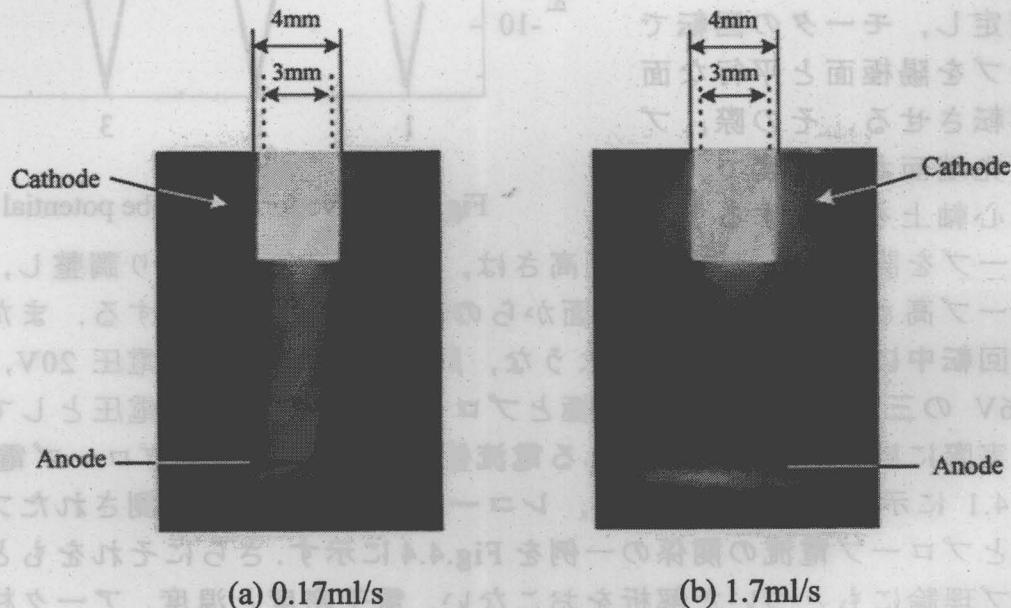


Fig.4.5 HCA discharge measured by probe method
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm
anode Copper

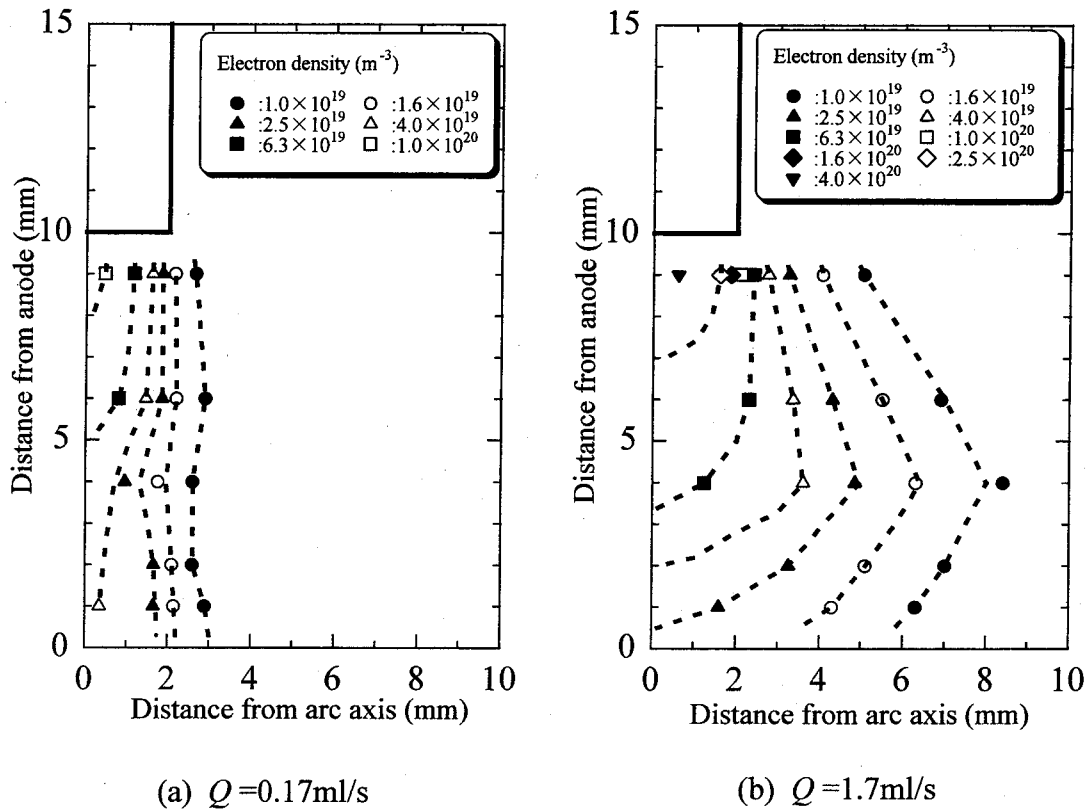
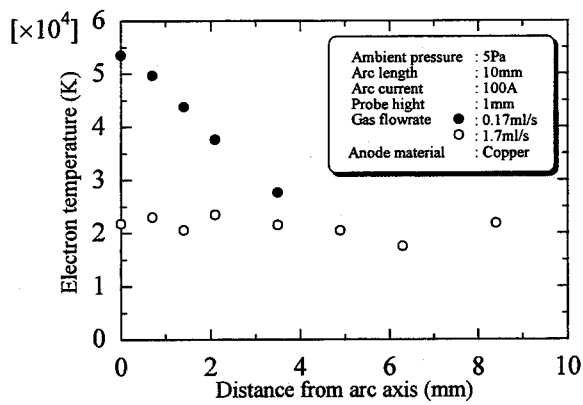


Fig.4.6 Electron density distribution between electrodes:
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm,
anode Copper

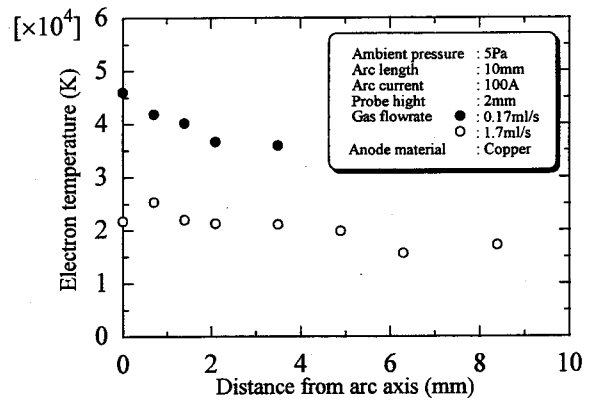
アークに影響を与えることはない。これに対し、陽極にステンレス鋼を用いた場合には陽極は溶融し、次項で示すようにアークは金属蒸気の影響を受ける。

Fig.4.6(a), (b)は、ガス流量をそれぞれ 0.17ml/s, 1.7ml/s としたときの電極・母材間の電子密度分布であり、図中の点線は等密度線を表している。ガス流量が 0.17ml/s と 1.7ml/s の場合とでは、明らかに電子密度分布は異なっている。0.17ml/s とガス流量が少ない場合、密度分布は電極・母材間に大きく広がることはなく、電極直下に集中している。また等密度線の間隔は狭く、密度勾配が急な分布となっている。電子密度が $1.0 \times 10^{19}/\text{m}^3$ を表す等密度線は、電極外径よりもやや大きい範囲で、アーク軸にほぼ平行に分布している。これはアーク柱が電極母材間でほぼ円柱状に形成されていることを表している。

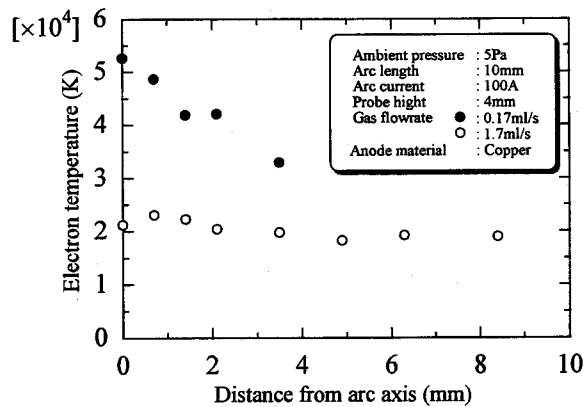
一方、1.7ml/s とガス流量が多い場合、密度分布は電極母材間に大きく広がっており、等密度線の間隔は広い。電子密度が $1.0 \times 10^{19}/\text{m}^3$ を表す等密度線は、アーク軸から約 8mm 離れた位置でも計測されており、これは電極先



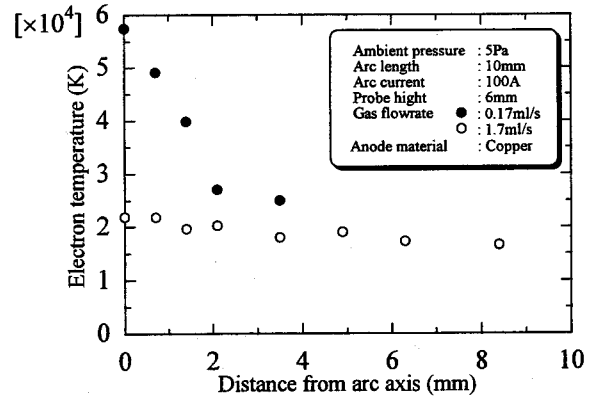
(a) $h=1\text{mm}$



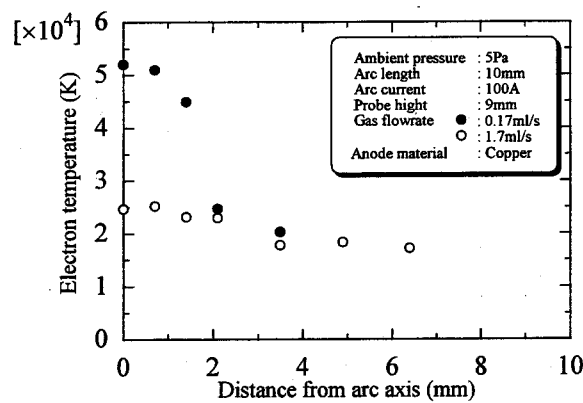
(b) $h=2\text{mm}$



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



(d) $h=6\text{mm}$



(e) $h=9\text{mm}$

Fig.4.7 Electron temperature distribution in HCA column:
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm
anode Copper

端から供給されるガス流量が多いために、周辺部へ拡散される気体が多くなるためであると考えられる。陽極表面近くでは、プラズマが中心部に集まる傾向を示している。

それぞれのガス流量において、電極直下で電子密度は最大となっているが、1.7ml/s の場合には電子密度の最大値は、 $4.0 \times 10^{20}/\text{m}^3$ となっており 0.17ml/s の場合よりも高くなっている。大気圧下におけるアルゴンシールドの GTA プラズマの電子密度分布は、電極直下で最高密度を示し、約 $10^{23}/\text{m}^3$ になることを考えると、HCA の電子密度は GTA のそれと比べて、約 1/100~1/1000 程度となっていることがわかる。

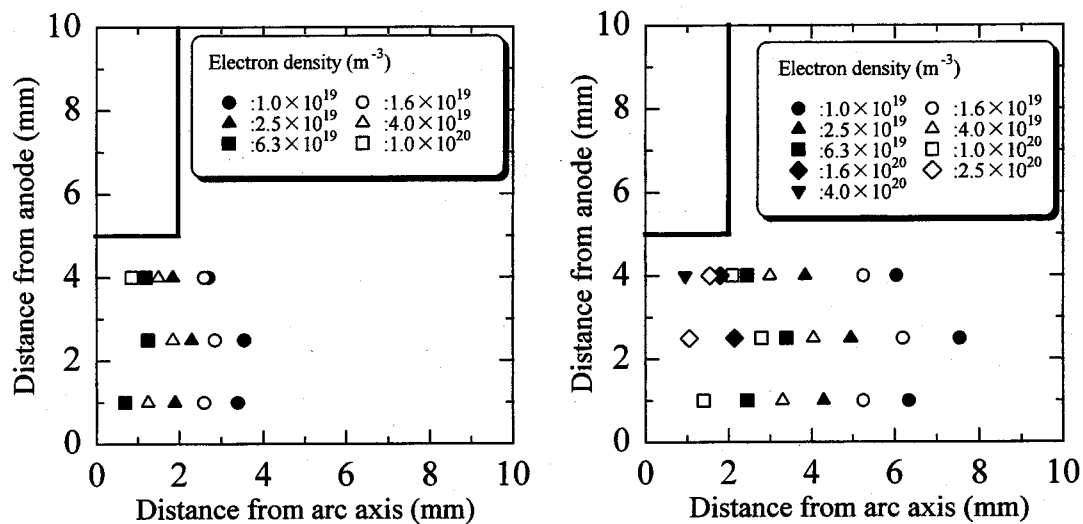
Fig.4.7 は、陽極からの高さが 1,2,4,6,9mm の位置におけるアーク半径方向の電子温度分布である。それぞれのグラフにおいて、●はガス流量 0.17ml/s, ○はガス流量 1.7ml/s の場合を表している。大気圧下におけるアルゴンシールドのタンゲステン陰極・銅陽極のアーク柱温度は、アーク電流に関わらず、陰極近傍で約 20000K が計測されている³⁰⁾。しかし、周辺部に広がるにつれて、急速にアーク柱温度は低下する。水冷銅陽極を用いると陽極近傍で 10000K 以上の温度が計測されている。

ガス流量が 0.17ml/s の場合、アーク軸上では陽極からの高さに関係なく、電子温度は約 45000K を越えており、一般の大気圧 GTA に比べて、非常に高い温度となっている。しかし、半径方向には、電子温度は急激に低下し、アーク軸から 4mm 程度離れた位置では、ほとんどの高さで、ガス流量が 1.7ml/s の場合とほぼ同じような温度となっている。

ガス流量が 1.7ml/s の場合には、位置に関係なく電極・母材間では、電子温度はほぼ 15000~20000K となっている。したがって、ガス流量が少ない場合にアーク中央付近で、電子温度の高いプラズマが得られることがわかった。

次にアーク長を 5mm とした場合の電子密度と温度の計測結果を Fig.4.8, Fig.4.9 に示す。放電条件として、周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 100A とした。

Fig.4.8(a), (b)は、ガス流量をそれぞれ 0.17ml/s と 1.7ml/s としたときの電極・母材間の電子密度分布である。アーク長が 10mm の場合と同様に、ガス流量が 0.17ml/s と 1.7ml/s の場合とでは、密度分布が大きく異なっている。それぞれ電極直下の位置で、最大値を示しており、ガス流量が 0.17ml/s の場合には $1.0 \times 10^{20}/\text{m}^3$, 1.7ml/s の場合には $4.0 \times 10^{20}/\text{m}^3$ となっている。これはアーク長が 10mm の場合と同様の値であり、また分布形状も、ガス流量が少ない場合には、電極直下に集中するような形状、ガス流量が多い場合には、電極・母材間に大きく広がるような形状となっており、アーク長 10mm の場合と同様の傾向を示している。やはり低圧環境下であることから、ガス流量



(a) $Q=0.17\text{ml/s}$

(b) $Q=1.7\text{ml/s}$

Fig.4.8 Electron density distribution between electrodes:
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 5mm,
anode Copper

が多い場合には、気体の拡散の影響が非常に大きいと思われる。

Fig.4.9 は、陽極からの高さが 1,2,5,4mm の位置におけるアーク半径方向の電子温度分布である。それぞれのグラフにおいて、●はガス流量 0.17ml/s, ○はガス流量 1.7ml/s の場合を表している。アーク長が 10mm の場合と同様にガス流量が 0.17ml/s の場合には、アーク軸上では陽極からの高さに関係なく、電子温度は約 40000~45000K となっており、非常に高い温度となっている。また半径方向には、電子温度は急激に低下している。ガス流量が 1.7ml/s の場合にも、アーク長が 10mm の場合と同様に、位置に無関係にアーク空間では、ほぼ 15000~25000K となっている。以上からアーク長が 5mm と 10mm の場合では、分布形状やプラズマの温度に大きな変化はなく、アーク長 5mm のプラズマを延長したものが 10mm のプラズマとなっていることが推察される。

以上のように陽極に未溶融の銅板を使用した場合、アーク長に関係なく電子密度分布はガス流量の影響を大きく受け、ガス流量が少ない場合には、電極直下に集中するような分布を示すことが明らかになった。また電子温度に関してもガス流量の影響を大きく受け、ガス流量が少ない場合には、アーク軸付近で 45000K 越えることが明らかになった。

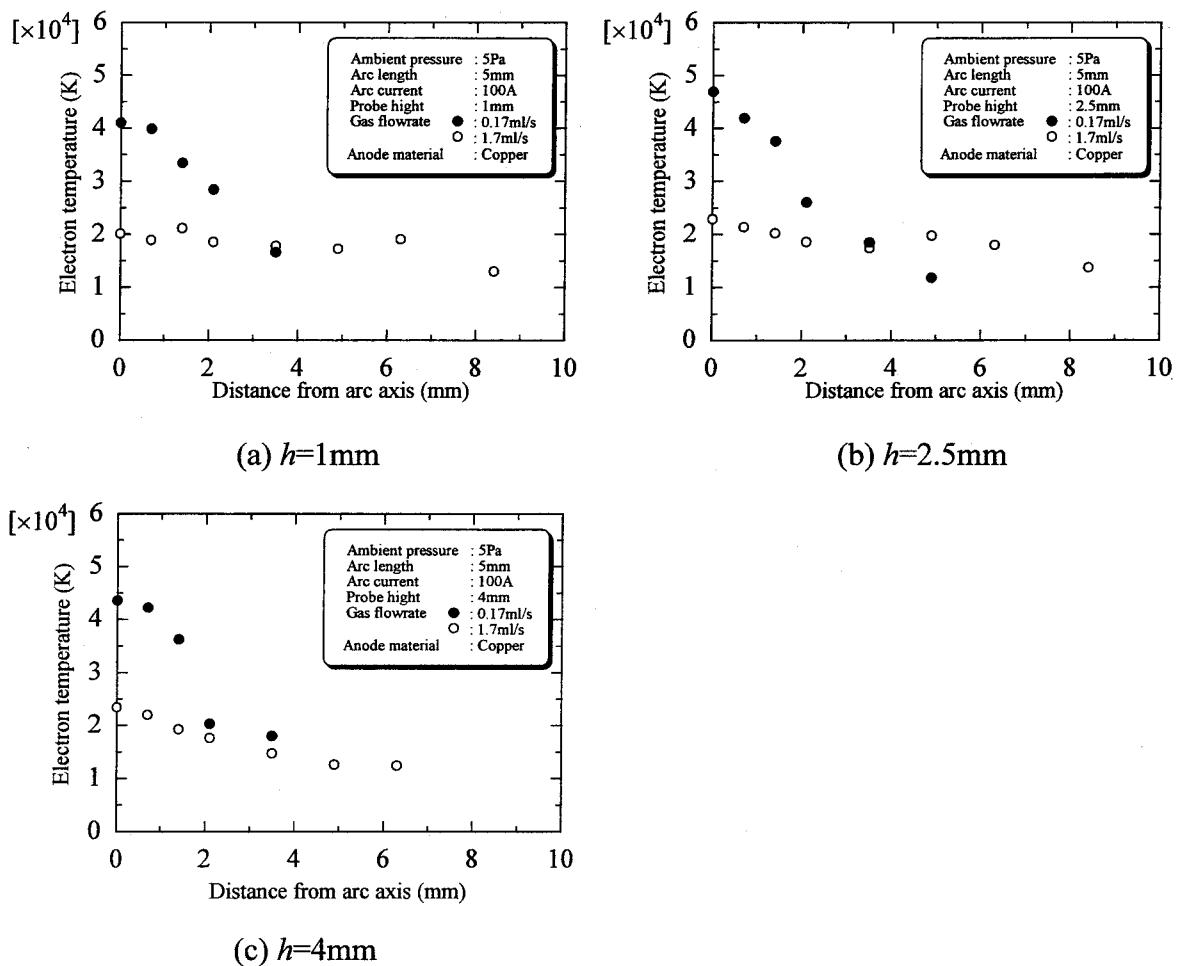


Fig.4.9 Electron temperature distribution in HCA column:
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 5mm
anode Copper

4. 3. 2 陽極にステンレス鋼板を使用した場合

陽極の状態が電極・母材間のプラズマの電子密度と温度に与える影響を検討するために、陽極に銅板を用いた場合とステンレス鋼 SUS304 板を用いた場合の電子密度と温度の計測結果を Fig.4.10, Fig.4.11 に示す。放電条件として、周囲圧力は 5Pa、ガス流量は 0.17ml/s、アーク長は 10mm、アーク電流は 100A とした。

Fig.4.10 は、陽極に銅板とステンレス鋼板を用いた場合の電極・母材間の電子密度分布である。銅板上は、未熔融の状態であり、ステンレス鋼板の場合、直径約 9mm の熔融池が陽極表面上に形成されていた。

両者ともガス流量が 0.17ml/s の場合であるが、陽極にステンレス鋼を用いた場合、電極・母材間にプラズマが大きく広がっているのがわかる。陽極が熔融していない銅陽極の場合には、プラズマの広がりは見られないことから、

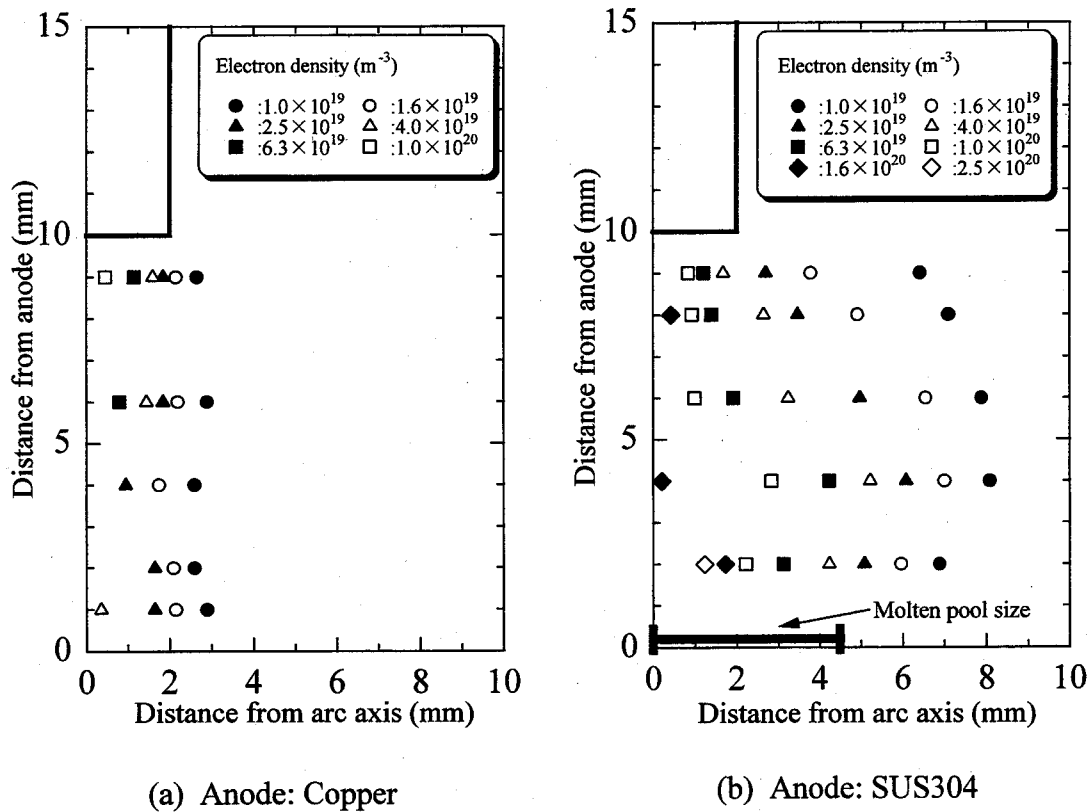


Fig.4.10 Electron density distribution between electrodes:
 ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc flowrate 0.17ml/s
 arc length 10mm

溶融池表面からの金属蒸気の影響が大きく現れているものと考えられる。また電子密度の最大値も、銅陽極の場合、電極直下のアーク中心付近でみられたが、溶融池が形成されている場合には、溶融池直上の中心付近で、電子密度の最大値を示しており、溶融池表面からの金属蒸気の影響が大きいと考えられる。またアーク中心軸付近では、銅陽極の場合よりも電子密度の高い領域が形成されていることもわかる。

Fig.4.11 は、陽極からの高さが 2,4,6,9mm の位置におけるアーク半径方向の電子温度分布である。それぞれのグラフにおいて、●は陽極にステンレス鋼板を用いた場合、○は陽極に銅板を用いた場合を示している。陽極にステンレス鋼を用いた場合と銅を用いた場合とでは両者とも、どの高さについても、アーク軸上で 45000~55000K の最高値を示し、半径方向には、温度が急激に低下するという同様の傾向を示している。

一般に、陽極表面からの金属蒸気がある場合、アーク柱中には電離電圧の異なった粒子が混在していることになる。電離電圧の高い粒子と低い粒子が混在している場合、低い電離電圧のものの方が多く電離されることになり、

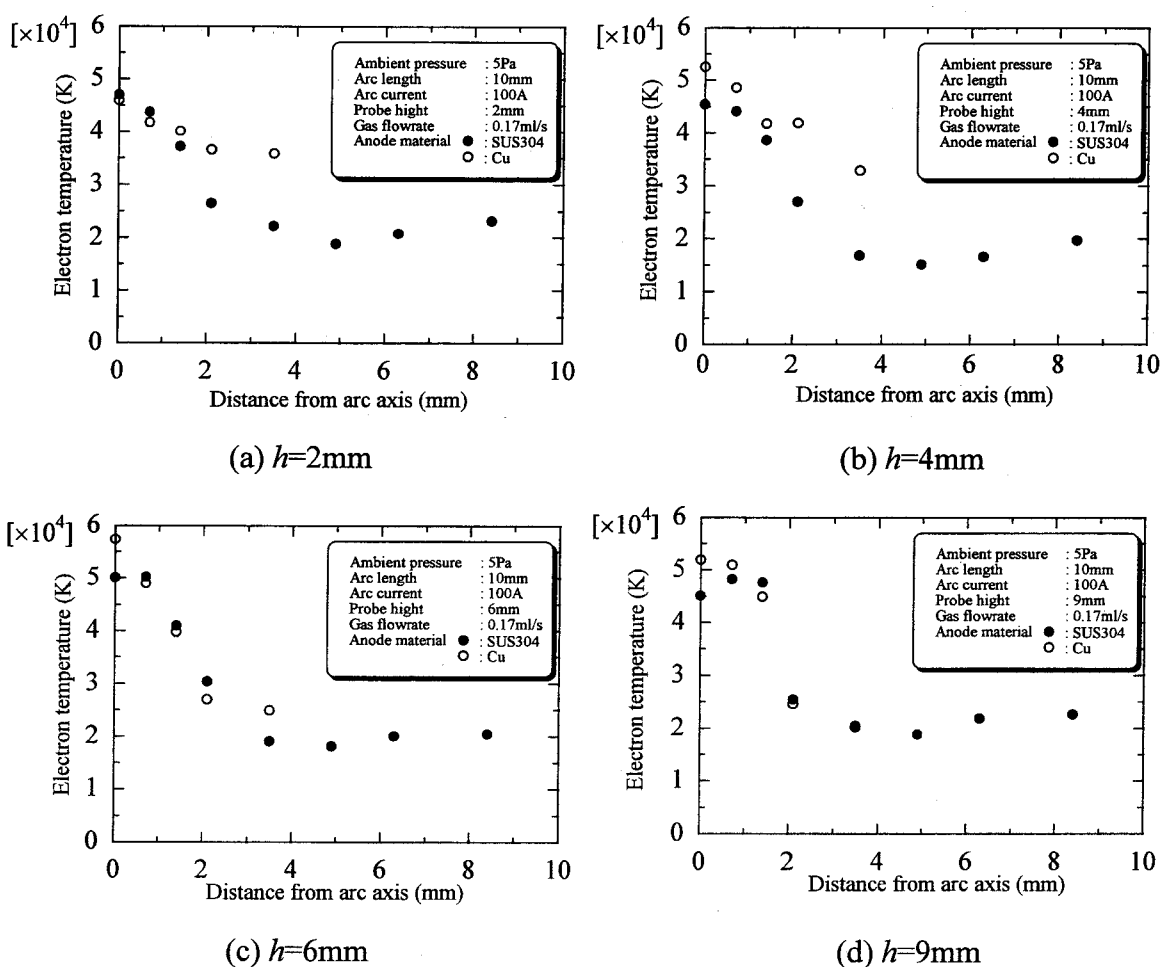


Fig.4.11 Electron temperature distribution in HCA column:
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm

アルゴンの電離電圧 (15.7V) よりも金属の電離電圧 (鉄の場合, 7.9V) の方が低いために陽極からの金属蒸気が多く電離される. それによってアーク柱の導電を維持するのでアーク柱の温度は, アルゴンのみの場合よりも低い温度でよいと言われており, 大気中の GTA では, 実際の計測結果からもそのようなことが確かめられている. しかし HCA の場合, 金属蒸気が存在する場合とそうでない場合とで, 電子温度にはそれほど明瞭な差はない.

次に, 陽極にステンレス鋼 SUS304 の HS 材と LS 材を用いた場合の電子密度と温度の計測結果を Fig.4.12, Fig.4.13 に示す. 前章のこれらの材料を用いた母材熔融実験では, アークパラメータが等しい場合でも, 母材に含まれる S 量の違いで溶込み形状が大きく異なることを確認している. 放電条件として, 周囲圧力は 5Pa, ガス流量は 0.17ml/s, アーク長は 10mm, アーク電流は 100A とした. またそれぞれの実験の際には, 陽極表面上に直径約 9mm

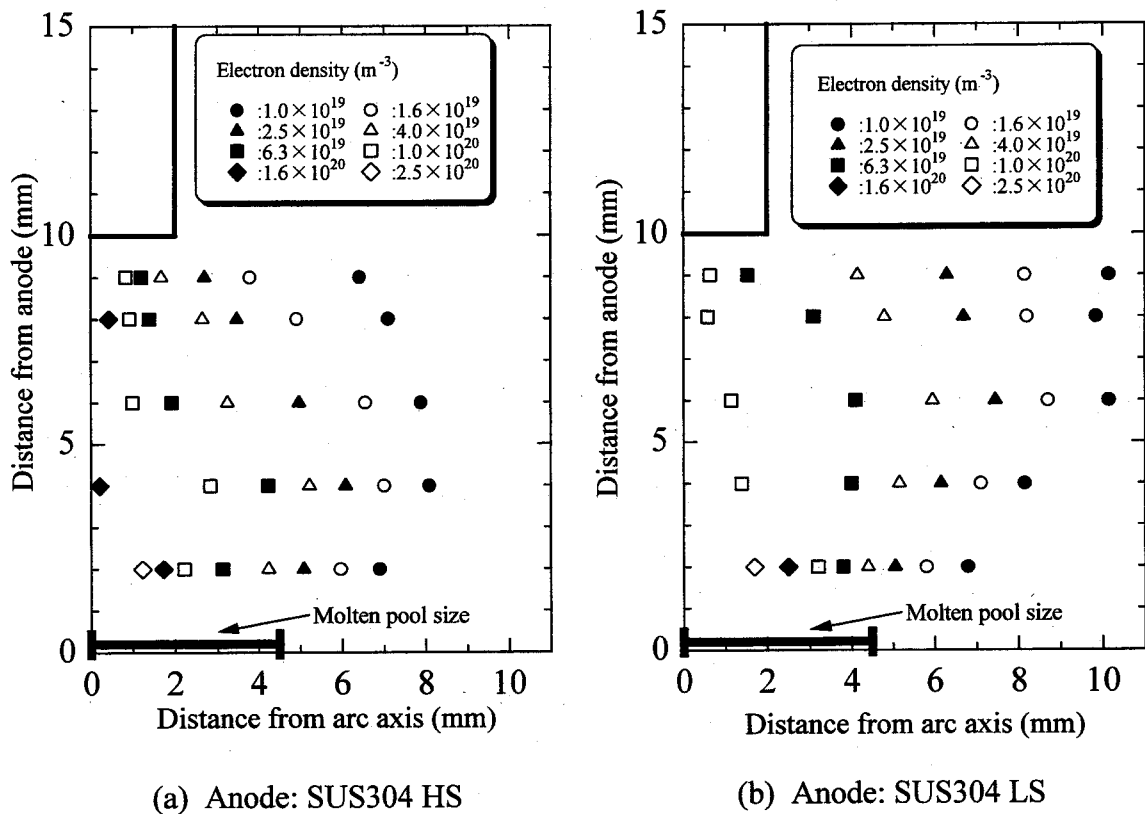
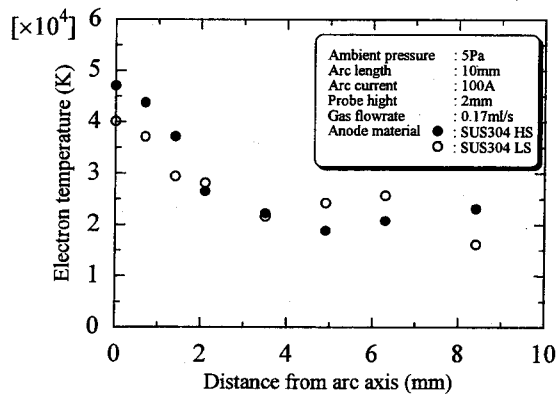


Fig.4.12 Electron density distribution between electrodes:
 ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc flowrate 0.17ml/s
 arc length 10mm

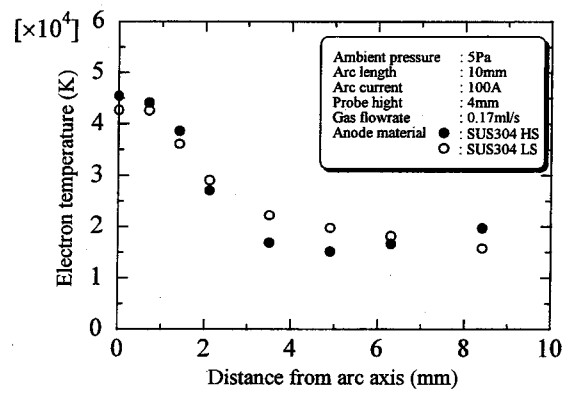
の溶融池が形成されていた。

Fig.4.12 は、陽極に HS 材と LS 材を用いた場合の電極・母材間の電子密度分布である。中心部の電子密度は、両者ともほとんど変わらず、陽極付近で最大電子密度を示している。しかし陽極に LS 材を用いた場合の方が、全体的に等密度線の間隔は広くなっており、密度分布が大きく外側へ広がる傾向をみせていることから、陽極表面からの金属蒸気の量が多いことが推察できる³¹⁾。

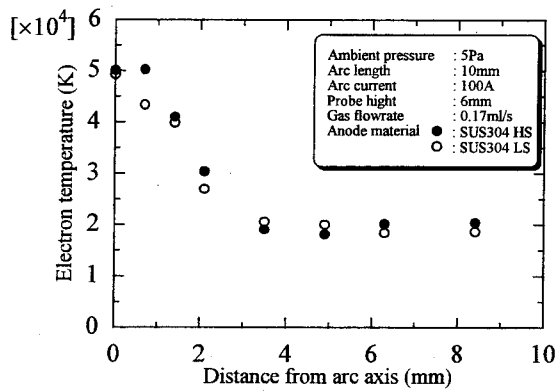
Fig.4.13 に示すのは、陽極からの高さが 2,4,6,8,9mm の位置におけるアーク半径方向の電子温度分布である。それぞれのグラフにおいて、●は陽極にステンレス鋼 SUS304HS 材を用いた場合、○は SUS304LS 材を用いた場合を示している。両者を比較すると、中心部付近で約 40000~50000K 程度の最高温度が計測されており、半径方向には急激に減少するという同様の傾向を示している。また周辺部の温度についても、HS 材と LS 材を用いた場合とではほとんどかわらず 15000K~25000K を示す。



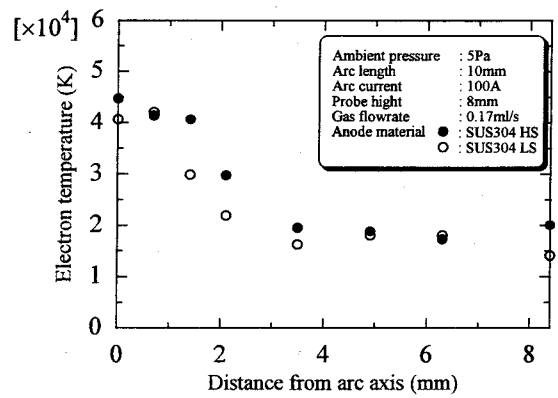
(a) $h=2\text{mm}$



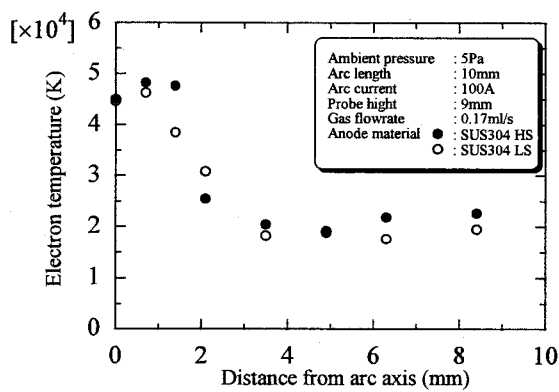
(b) $h=4\text{mm}$



(c) $h=6\text{mm}$



(d) $h=8\text{mm}$



(e) $h=9\text{mm}$

Fig.4.13 Electron temperature distribution in HCA column:
ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm
anode SUS304

以上のように、陽極にステンレス鋼板を使用した場合、電極・母材間における電子密度分布は、陽極表面からの金属蒸気の影響を大きく受け、密度分布は電極・母材間全体に広がった分布となる。また電子温度は、母材の状態や母材中に含まれる微量元素の影響をほとんど受けないことが明らかになった。

4. 4 アーク空間の電位分布に関する検討

プローブ計測をおこなった際に得られた電極（陰極）母材（陽極）間のアーク軸上におけるプラズマポテンシャルの分布を Fig.4.14, Fig.4.15 に示す。それぞれのグラフにおいて、縦軸は陰極の電位を基準にした場合の空間電位であり、横軸は陰極からの距離を示している。横軸の 10mm の位置が陽極面に相当する。また計測の際に得られるポテンシャルは、陽極面を基準にした値であるため、その値にそれぞれの条件でのアーク電圧分だけ平行移動した値を図中に示している。

Fig.4.14 は、陽極に銅板を使用した場合のアーク空間におけるポテンシャル分布を示している。放電条件として、周囲圧力は 5Pa, アーク長は 10mm, アーク電流は 100A とした。●はガス流量 0.17ml/s, ○はガス流量 1.7ml/s の場合を表している。大気圧下の GTA における電位分布や Delcroix ら¹⁷⁾によって指摘されている HCA の電位分布に関しては、Fig.2.13, Fig.2.14 に示したが、Fig.4.14 に示す電位分布はそれらとは大きく異なる。特にガス流量が 0.17ml/s の場合には、アークプラズマの空間電位が陽極の電位よりも明らか

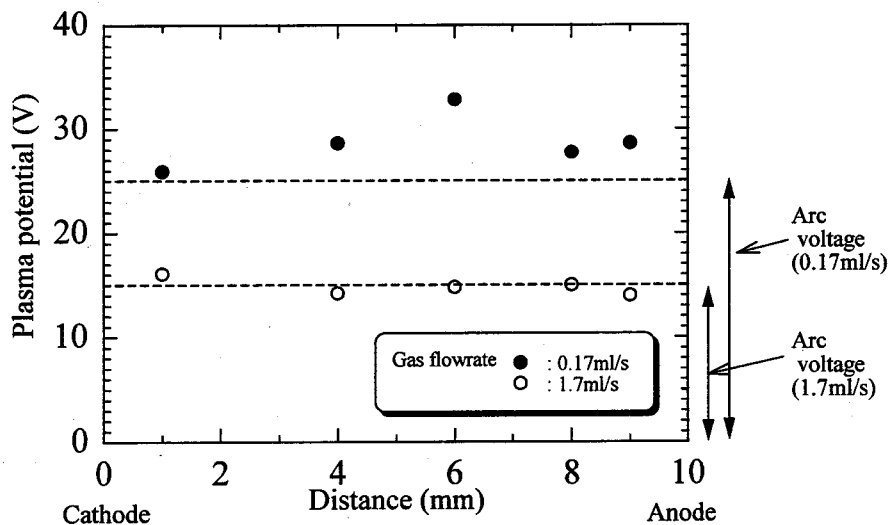


Fig.4.14 Plasma potential between electrodes
ambient pressure 5Pa, arc current 100A,
arc length 10mm, anode Copper

に高くなっており、陰極近傍における電位方向による勾配が負になっているものと考えられる。このような分布は、熱陰極アークの際に得られるラングミュア型の電位分布に類似している³²⁾。このラングミュア型の電位分布に関して、陽極付近の電位方向による勾配が負になる原因は、プラズマ中の電子温度が高いために電子の熱運動による電子電流密度が大きくなり過ぎ、負の電位勾配を生じて電流を制限するためであることが指摘されている。

Fig.4.15 は、陽極にステンレス鋼 SUS304 を用いた場合のアーク空間におけるポテンシャル分布を示している。放電条件として、周囲圧力は 5Pa、ガス流量 0.17ml/s、アーク長は 10mm、アーク電流は 100A とした。●は LS 材、○は HS 材を使用した場合である。電極・母材間の電位分布に関しては、LS 材と HS 材で、ほとんど違いは無い。また銅陽極の場合と比べて、陽極付近の電位が陽極の電位よりもさらに高くなっていることがわかる。

このようにガス流量が少ない場合、陽極の電位より陽極付近のポテンシャルは明らかに高くなる。しかしながら、先程も述べたように Fig.2.14 に示したような Delcroix ら¹⁷⁾が指摘した電位分布とは大きく異なっており、その原因については今後検討をおこなう必要がある。

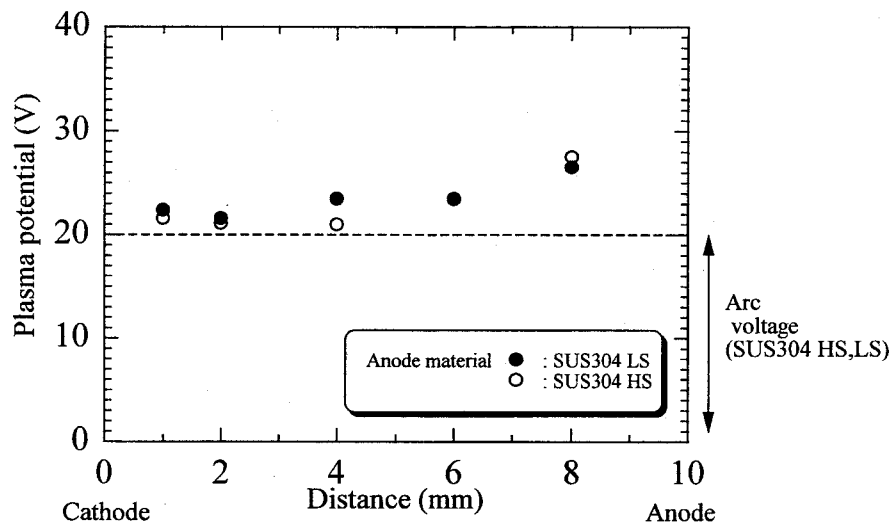


Fig.4.15 Plasma potential between electrodes
ambient pressure 5Pa, arc current 100A,
arc length 10mm, gas flowrate 0.17ml/s,
anode SUS304

4. 5 結言

本章では、低圧下における HCA プラズマの特徴を理解することを目的として、ラングミュアプローブ法を使用した HCA プラズマの電子密度、電子温度さらにはアーク柱内の電位分布の計測をおこなった。

以下に本章で得られた主な結果を要約する。

- (1) 陽極に未熔融の銅板を使用した場合、アーク長に無関係に、電子密度分布や電子温度は、ガス流量の影響を大きく受ける。
- (2) ガス流量が少ない場合には、電子密度分布は電極直下に集中するような分布を示し、電子温度に関しては、アーク軸付近で 45000K 越える高温を示している。
- (3) ガス流量が多い場合には、密度分布は電極・母材間の広い範囲に広がっており、電子温度に関しては、位置にほとんど関係なく、15000～20000K 程度を示している。
- (4) 陽極にステンレス鋼板を使用した場合、電子密度分布は熔融池表面からの金属蒸気の影響を大きく受け、ガス流量が少ない場合にも、電極母材間に大きく広がった分布となる。
- (5) 電子温度は、陽極表面の状態や母材中に含まれる微量元素の影響をほとんど受けない。
- (6) アーク空間中の電位分布は、ガス流量が少ない場合には、明らかに陽極電位よりも高い電位分布を示し、陽極からの金属蒸気が存在する場合には、さらにその電位差は大きくなる傾向にある。

第5章 HCAによる溶込みメカニズムに関する検討

5.1 緒言

これまで低圧下における HCA のアーク特性や、母材溶込み特性、さらには HCA プラズマの電子密度・温度を明らかにした。これらのことを考慮に入れながら、本章では、第3章で得られた溶込みの形成メカニズムについて検討する。

アークから陽極への入熱に関しては、後で述べるように電子が持ち込むエネルギーが重要であり、アーク中の電子密度・温度や、陽極への電子の流入経路が重要になる。また溶込み形状に関しては、熔融池内の対流現象が重要になる。

したがってここでは、ガス流量が 1.7ml/s と比較的多く、溶融量の少ない浅い溶込みが形成される場合とガス流量が 0.17ml/s と比較的に少なく、溶融量の多い深い溶込みが形成される場合の溶込みメカニズムについて、主に陽極表面の電流分布領域、陽極への入熱エネルギー、熔融池内の対流現象の観点からそれぞれ検討をおこなう。

5.2 電流分布領域に関する検討

5.2.1 分割母板法とその実験装置

第3章の Fig.3.3 で示したように、ガス流量が 1.7ml/s と比較的多い場合の HCA による溶込み形状は、電極内径に関わらず横に広がった浅い溶込みとなり、GTA によるそれと大きく異なる。広がった浅い溶込みとなる原因は、第4章で明らかにした HCA の電極・母材間における電子密度分布の広がり

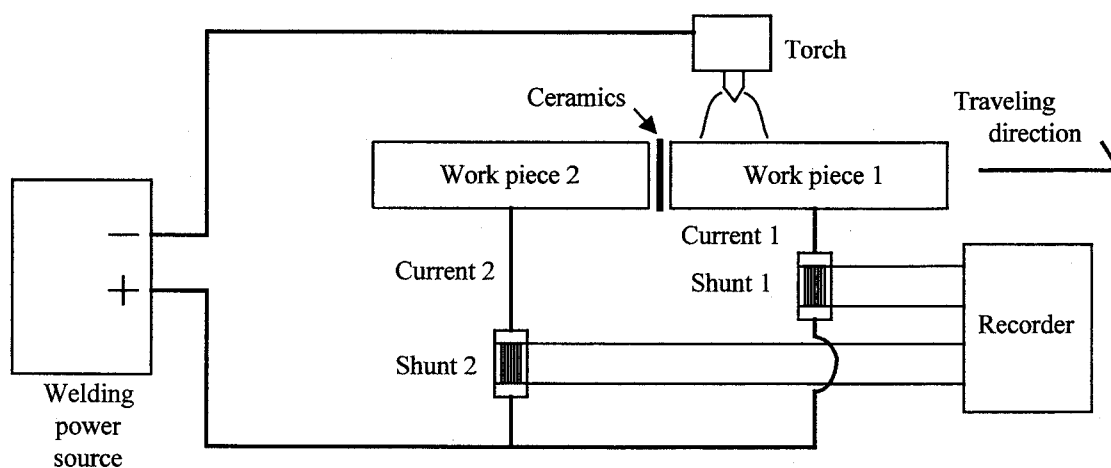


Fig.5.1 Experimental equipment for split anode method

から推測すると、母材表面上におけるアーク電流領域の広がりと考えられる。したがって、ここでは電流領域が比較的大きい場合の領域サイズを決定するのに有効な分割母板法を用いて、ガス流量が多い場合の HCA と大気圧下での GTA の母材表面上における電流分布領域の計測をおこなう。

分割母板法の実験装置図を Fig.5.1 に示す。母材は、2つの試験片（ステンレス鋼 SUS304, 50×50×12mm）からなり、それらの間にセラミックス板（0.6mm）を挟むことで試験片同士を電氣的に絶縁する仕組みとなっている。今回の実験では、トーチを固定し、試験片を 1mm/s の速度でアーク下を移動させながら、それぞれの試験片に流れる電流をシャントを通してレコーダに記録した。そのレコーダに記録された結果から電流分布領域を決定した。

その原理について、Fig.5.2 を用いて簡単に説明する。母材表面上のアークの電流分布領域がアーク軸を中心とした半径 R の円と仮定する。試験片を動かすことにより、トーチ位置は図中の (a) の位置から (d) の位置まで移動する。トーチすなわちアークが (a) の位置にあるときには、電流はすべて試験片 1 に流れ、(b) の位置を過ぎたときに初めて、電流は試験片 2 に流れ始める。さらにアークが移動し、(c) の位置に来たときに、今度は試験片 1 に流れる電流はゼロとなり、全て試験片 2 に流れる。図に示すように、(b) と (c) の位置を計測することによりアーク電流分布領域の直径 $2R$ を決定することができる。

計測結果の一例を Fig.5.3 に示す。周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 65A, アーク長は 8mm, ガス流量は 1.7ml/s の条件下で、電極には外径 4.0mm, 内径 1.8mm の 2%La-HW 電極を使用した場合の計測結果である。図中の実線がそれぞれの試験片で計測された電流変化の様子である。図のように電流領域は、非常に大きくなっており、ここでは計測装置の関係もあり、片方の試験片に流れる電流量が、全電流量の 10%以下になったところを領域の端とみなし、図のようにアーク電流領域 (Anode diameter) を定義した。HCA と GTA の比較をおこなうため、GTA の電流領域についても同様にアーク電流領域を決定

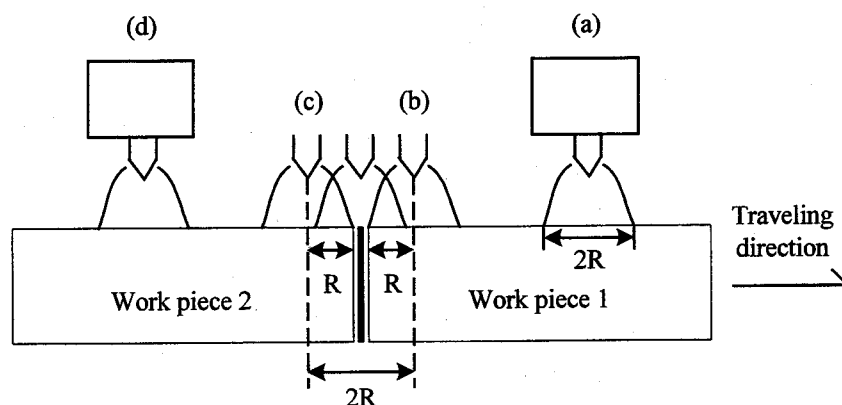


Fig.5.2 Schematic illustration of anode diameter measurement

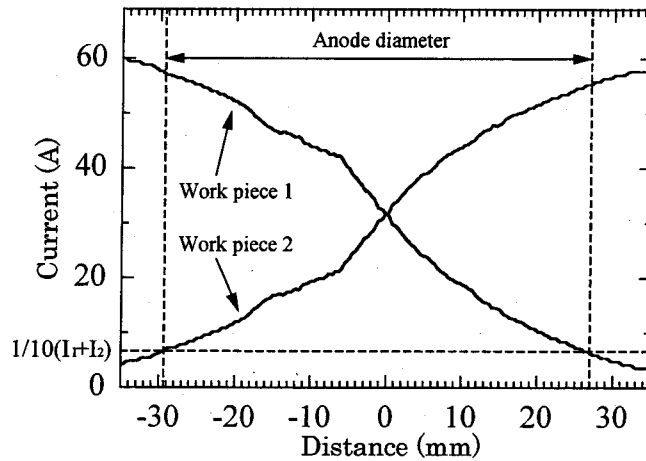


Fig.5.3 Typical example of current distribution measured by split anode method for HCA: ambient pressure 5Pa, arc current 65A, arc length 8mm, gas flowrate 1.7ml/s

した。また計測されたデータは、ほぼ軸対称な形となっており、分割されたアーク放電及びアーク電流はスムーズに試験片1から試験片2へ移行していることがわかる。

5. 2. 2 電流分布領域と溶込みの関係

アーク長を変化させながら、HCAとGTAのアーク電流領域の計測をおこなった結果をFig.5.4に示す。HCAの場合、周囲圧力は5Pa、ガス流量は1.7ml/s、アーク電流は65A、電極には外径4.0mm、内径1.8mmの2%La-HW電極を使用した。大気圧中のGTAの場合、ガス流量170ml/s、アーク電流65Aとした。

図をみるとHCAの場合、アーク長が5mm程度までは、アーク長が伸びるにしたがって、アーク電流領域も急激に広がり、領域は50mm以上にまで達する。その後も徐々に広がる傾向にある。一方、大気圧下でのGTAの場合、アーク長が10mmでも、アーク電流領域は7mm程度であり、ガス流量が多

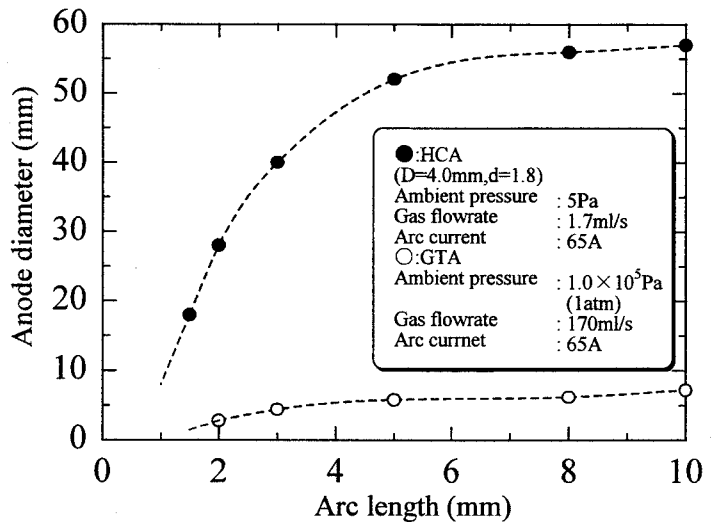


Fig.5.4 Comparison of anode diameters between HCA and GTA

い場合の HCA の電流領域は陽極表面上で非常に広がっていることがわかる。このアーク電流領域の広がり、母材へ入る電流密度の低下を引き起こし、さらには母材への入熱現象、母材熔融現象に大きな影響を与えているものと考えられる。すなわち、アーク入熱が広範囲に分散してしまうために、広く浅い溶込みが形成されることになる。

以上のように、ガス流量が 1.7ml/s と多い場合に得られる溶融量が少なく浅い溶込みは、電流領域の広がりが原因となっている。

5. 3 母材への入熱に関する検討

5. 3. 1 陽極入熱について

アークによる母材熔融現象を検討する上で、アークによって母材に持ち込まれる熱エネルギーについて知ることは重要である。ここで、母材に持ち込まれる熱エネルギーについて述べる。本研究では、実験は全て電極マイナスの極性でおこなっており、母材を陽極として用いているため、陽極へのアーク入熱について述べる³³⁾。

陽極へ供給される主なエネルギーとしては、従来から次のものが考えられている。

- ① アークプラズマからの放射エネルギー： Q_{rad}
- ② アークプラズマからの熱伝導及び対流によるエネルギー： Q_{con}
- ③ 陽極へ流入する電子が持ち込むエネルギー： Q_{ele}

陽極の熔融現象においてはこれらの中でも、電子が持ち込むエネルギーが最も重要であることが知られている。さらに電子の持ち込むエネルギーとして、次のものが考えられている。

- ④ 電子が陽極降下領域で加速されることにより得るエネルギー： eV_A
- ⑤ 電子が陽極金属内に取り込まれる際に放出される、陽極金属の仕事関数に相当するエネルギー： eV_W
- ⑥ 電子のエンタルピー： $(5/2)kT_e$

したがって、陽極への入熱は、近似的に次式のように表される。

$$Q_A = Q_{rad} + Q_{con} + Q_{ele} \approx Q_{ele} = I_a (V_A + V_W + (5/2)kT_e/e) \quad (5.1)$$

Q_A ：陽極入熱， I_a ：アーク電流， V_A ：陽極降下電圧， V_W ：陽極金属の仕事関数， k ：ボルツマン定数， T_e ：電子温度， e ：電子電荷

陽極金属の仕事関数はアークの特性に関係無く金属固有のものであるため、(5.1)式が示すように、母材へ入熱される熱エネルギーを検討するには、陽極降下電圧と電子温度が非常に重要な因子となる。

5. 3. 2 入熱に関する検討

前章では、ラングミュアプローブ法を用いて、HCA プラズマの電子密度、温度やアーク柱内の電位分布の計測をおこない、その結果を示した。ここではその計測結果をもとに、第3章の Fig.3.1 に示したような HCA と GTA を用いた場合での母材溶融量の違いや、Fig.3.2 で示したようなガス流量の違いによる母材溶融量の違いについて母材への入熱エネルギーの観点から検討をおこなう。陽極が溶融状態にある場合、陽極近傍の陽極降下電圧への金属蒸気の影響が不明確であるため、未溶融の銅陽極への入熱として検討をおこなう。したがって、材料固有の仕事関数の値は、銅の $4.5V^{34)}$ を用いる。

はじめに、HCA と GTA を熱源として用いた場合の陽極への入熱エネルギーに関して、比較をおこなう。HCA の場合、ガス流量が $0.17ml/s$ と少ない場合には、Fig.4.7 に示すようにアーク中心付近における電子温度は $50000K$ 程度を示す。陽極降下電圧は、Fig.4.14 に示したアーク軸上における電位分布から推測すると、陽極から $1mm$ の高さでのプラズマ電位は、陽極より $3V$ 程度高くなっており、陽極降下電圧は電子が陽極に流入するのを妨げる向きに働く。この $3V$ が陽極近傍の陽極降下電圧にそのまま当てはまるのか、さらなる検討が必要であると思われるが、ここでは V_A の値を、 $-3V$ ととして検討を進める。これらの値を(5.1)式に代入すると、陽極入熱は次のようになる。

$$Q_A \approx Q_{ele} = I_a (V_A + V_W + (5/2)kT_e/e) = I_a (-3 + 4.5 + 10.77) = 12.27I_a [W] \quad (5.2)$$

GTA の場合、銅陽極を用いると陽極付近では多くの場合、 $10000K$ 程度の電子温度が計測されている。また陽極降下電圧についてはこれまでから多くの議論がおこなわれている^{15,33,35)}。しかし陽極降下については非常に狭い領域での現象であるために、確かな実験計測が困難であり、様々な計測結果が示される原因となっている。ここでは溶接などの大電流アークでは陽極降下電圧が、ゼロに近いという安藤ら¹⁵⁾の立場を採り検討を進めことにし、 $V_A=0$ とする。これらの値を(5.1)式に代入すると、陽極入熱は次のようになる。

$$Q_A \approx Q_{ele} = I_a (V_A + V_W + (5/2)kT_e/e) = I_a (0 + 4.5 + 2.15) = 6.65I_a [W] \quad (5.3)$$

(5.2)、(5.3)式を比較すると HCA と GTA では、HCA の方が陽極への入熱エネルギーが明らかに多くなっていることがわかる。HCA を用いた場合には、プラズマ中の電子温度が非常に高くなっていることから、陽極への入熱エネルギーが大幅に増加し、陽極にステンレス鋼板を用いた場合には、その溶融量を増加させているものと考えられる。また GTA と比べて HCA は、低圧中で用いられていることから、アーク柱部分から周囲へ熱伝導によって、逃げる熱量も非常に少ないと思われる。

次に、HCA でガス流量が異なる場合の陽極への入熱エネルギーの違いに関して検討をおこなう。ガス流量が少ない場合の陽極入熱については、(5.2) 式に示した通りである。ガス流量が 1.7ml/s と多い場合には、Fig.4.7 に示したように、銅陽極を使用した場合には、プラズマ内の位置に関わらず、電子温度は 20000K 程度を示している。また陽極降下電圧については、Fig.4.14 に示したように、陽極からの高さに関わらずプラズマ内の電位分布はほぼ 0V を示しており、ここでは $V_A=0$ とする。これらの値を(5.1)式に代入すると、陽極入熱は次のようになる。

$$Q_A \approx Q_{ele} = I_a (V_A + V_W + (5/2)kT_e/e) = I_a (0 + 4.5 + 4.31) = 8.81I_a \text{ [W]} \quad (5.4)$$

(5.2)、(5.4) を比較すると母材への入熱エネルギーは、ガス流量が少ない場合の方が約 1.4 倍多くなっている。これだけの入熱量の違いで、Fig.3.3 で示したような大幅な溶融量の違いが現れるとは考えられず、入熱エネルギーの差と前項で示した陽極表面上の電流分布の広がり的大幅な溶融量の違いの要因となっていると思われる。

以上のように、HCA でガス流量を少なくした場合、プラズマ柱内の電子温度は 50000K 以上と非常に高くなっている。このことは、大きなエネルギーを持った電子が存在することになり、陽極への入熱エネルギーを増加させ、母材溶融量を増大させている主な要因となっている。

本節では、HCA の入熱現象を、大気圧下の GTA の入熱現象と同様の立場から(5.1)式を用いて検討をおこなった。しかし、V.M.Nerovnyi²²⁾の指摘によると、HCA プラズマの電子は、電極内で形成され、電極内の電界で加速された後、高いエネルギーと方向性をもった電子として、電極から放出されるとされている。このような立場をとると、(5.1)式では電子が電極内の電界で加速される際に得たエネルギーを適切に陽極への入熱エネルギーとして評価することが出来ないため、(5.1)式の適用は不適切であると思われる。HCA プラズマの形成過程を含めたさらなる検討が、HCA の入熱現象に対して必要であると思われる。

5. 4 HCA による溶融池内の対流現象に関する検討

5. 4. 1 溶融池内の対流現象について

一般にアークによる母材溶込み現象は、溶融池内の対流現象に強く影響されることがこれまでから指摘されている。

アーク溶接においては、従来から Fig.5.5 に示す 4 種類の対流メカニズムが指摘されている。(a)は、溶融池表面を流れるプラズマ気流によって駆動される対流で、溶融池中央から周辺部へ向かう流れである。(b)は、表面張力対

流と呼ばれ、溶融池表面の温度の違いによる表面張力差によって駆動される対流で、表面張力が小さい部分から大きい部分へ向かう流れである。(c)は、電磁対流と呼ばれ、溶融池内を流れる電流とその磁界によって生じる電磁力によって駆動される対流で、溶融池表面中心部から底部へ向かう内向きの流れである。(d)は、熱対流と呼ばれ、溶融池内の温度分布による密度差によって発生する浮力が駆動する底部から表面へ向かう外向きの流れである。

これらのうちで、アーク溶接では一般に、プラズマ気流による対流、表面張力対流、電磁対流が重要であるとされている²⁴⁾。

また以前から溶込み形状は母材に含まれる微量な元素の差によって影響されることが指摘されている³⁶⁻³⁸⁾。鋼中に含まれる硫黄や酸素などのVI族の元素やハロゲン系の元素は、母材の溶融現象に大きな影響を与え、溶込みを深くすることが指摘されている。微量な元素の差による溶込みの変化は、溶融池内の対流現象と密接に関係している。鋼中に含まれる硫黄や酸素などの

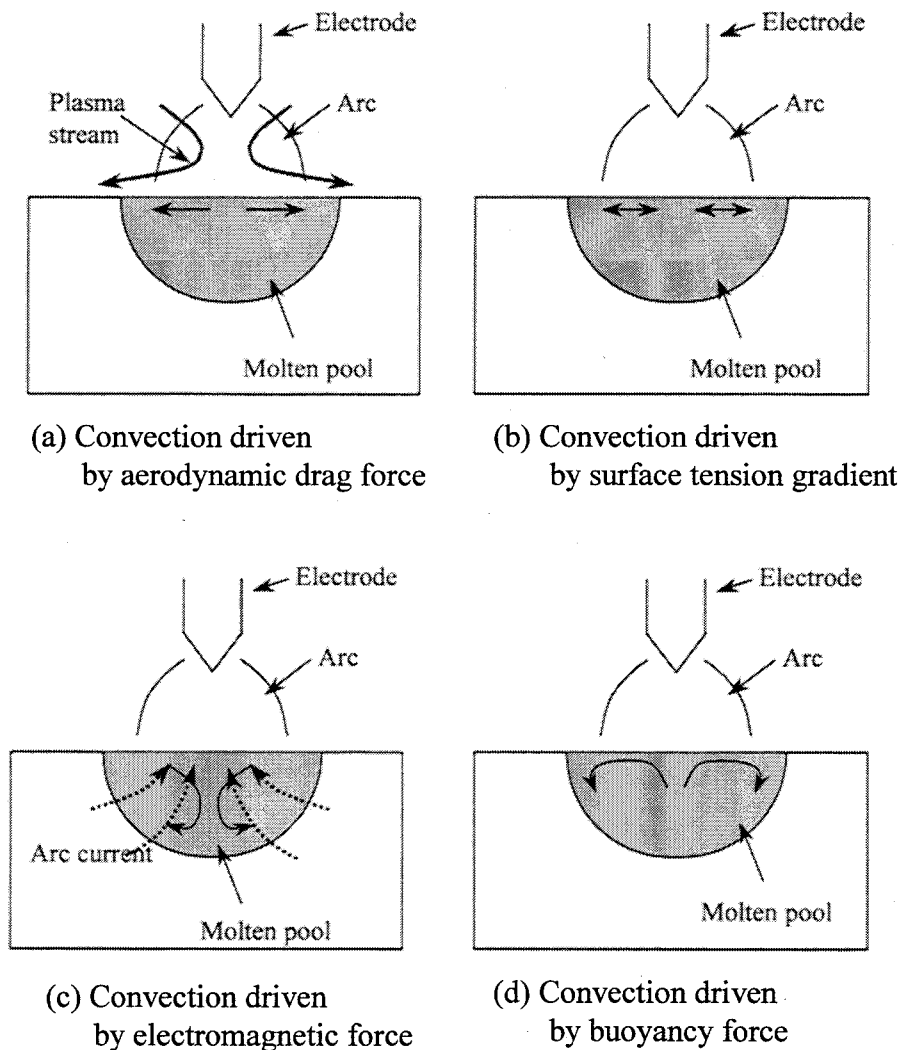


Fig.5.5 Fluid flow patterns in weld pool

表面活性元素は、表面張力の温度係数の符号を逆転させる働きがあり、表面張力対流の方向を逆転させることが指摘されており³⁹⁾、表面活性元素が比較的多く含まれている鋼では、表面張力対流は内向きとなり、深い溶込みが得られる。また少ない鋼では、外向きとなり、浅い溶込みが得られる。

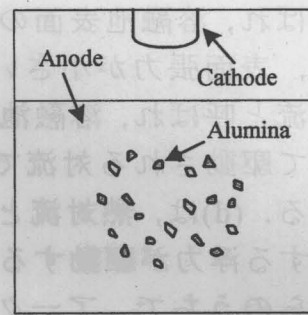
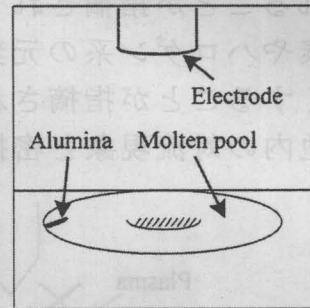
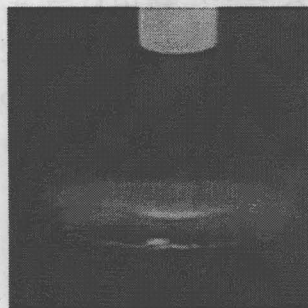


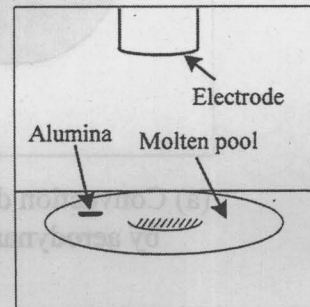
Fig.5.6 Appearance of anode surface before experiment

5. 4. 2 溶融池表面流れの観察

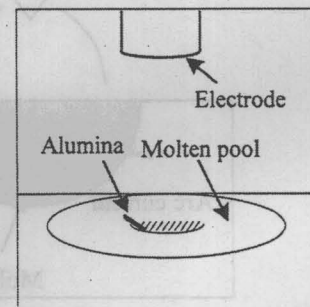
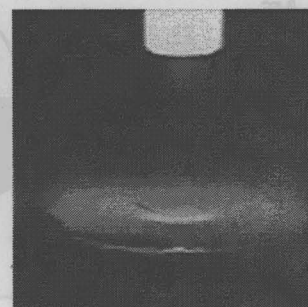
真空チャンバー内で、アークにさらされた溶融金属内の対流現象を直接観察することは、困難である。したがって溶融池内で発生している対流現象を推察するために、溶融池表面の観察をおこなった。溶融池表面の流れを観察するため、Heipleら³⁹⁾によっておこなわれたように、アーク点弧前から母材表面にアルミナの薄片を放置し、点弧後溶融池が成長していく段階で、アルミナの薄片が溶融池内に取り込まれる際のアルミナの動きを観察した。そのアルミナの動きから母材表面の流れを推察する。アーク点弧前の母材表面の模式図を Fig.5.6 に示す。



(a) $T_0=0(s)$



(b) $T_1=1/30(s)$



(c) $T_2=2/30(s)$

Fig.5.7 に示すのは、母材に SUS304 の HS 材を用い、ガス流量を少なく

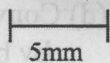


Fig.5.7 Motion of alumina particle on molten pool

した場合の点弧からある時間経過した熔融池表面の様子とその時の模式図である。連続写真は、1/30 秒ごとである。周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 130A, アーク長は 10mm, ガス流量は 0.17ml/s とし, 電極には外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。

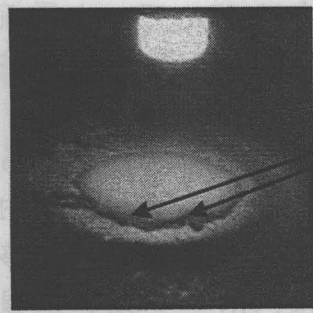
これらを見るとアルミナ片が, 熔融池左端から中央部へ移動する様子がよくわかり, 熔融池表面は外側から中央への流れがある。すなわち内向きの対流が熔融池内に発生していることを表している。このアルミナの移動速度は, 0.06m/s-0.08m/s 程度であった。このような現象は, HS 材を用いた場合には, 常に観察された。

SUS304 の LS 材を用いた場合には, アルミナ片は熔融池の周辺部を素早く動くのみであり, Fig.5.7 のような中央部に入り込む様子はなく, 内向きの流れはない。またこのアルミナを放置しておく方法では, 外向きの流れを表す中央から外側へアルミナ片が流れる様子を観察することはできなかった。

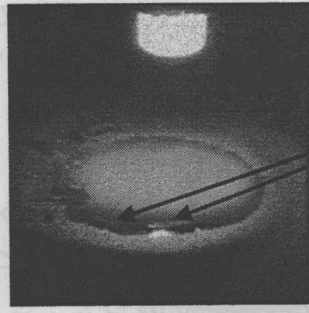
Fig.5.8 に示すのは, 母材に LS 材を使用し, ガス流量が 1.7ml/s と多い場合の熔融池表面の様子である。周囲圧力は 5Pa, アーク電流は 130A, アーク長は 10mm とし, 電極には外径 4.0mm, 内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用した。点弧後, 約 30 秒の状態を T_0 とし, その後 T_1 - T_7 まで 5 秒毎の様子を示している。

熔融池表面は, 非常に静かで時間的変動はほとんど観察されず, 時間が経過する毎に, 熔融池の大きさが大きくなっている。時間 T_0 において, 矢印で示した熔融池の縁にあるアルミナ片に注目する。それらは熔融池が大きくなる過程においても, ほとんど同じように熔融池の縁にあり, 熔融池の拡大に合わせるように移動している。したがって, Fig.3.5 で指摘したような電極先端からのガス流の影響による流れ以外, 熔融池形状に影響を与えるような熔融池表面の流れはないものと推察できる。これと同じような熔融池表面の様子は, 母材に HS 材を使用し, ガス流量が多い場合にも観察された。

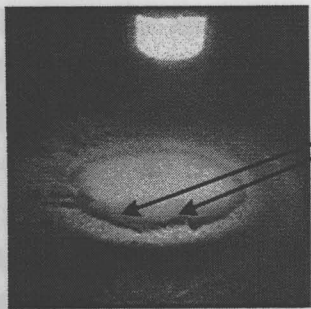
以上のようにガス流量が多い条件下では, SUS304 の HS 材, LS 材に関わらず, 熔融池表面にはガス流の影響による流れ以外, 熔融池形状に大きな影響を与えるような流れはなく, 5.2 節で示したように電流領域の広がり母材熔融現象に大きな影響をあたえている。また Fig.3.2 に示したような深い溶込みが形成されるガス流量が少ない条件下では, 内向きの対流現象が発生していることが確認でき, 深溶込みと熔融池内の対流現象には大きな関係があることは確実である。しかし大気圧下の GTA による溶込み現象と熔融池内の対流現象の関係についても, A-TIG⁴⁰⁾による深溶込みメカニズムに代表されるように十分理解されていない部分が多く, HCA による深溶込み発生メカニズムに関しても, 今後更なる検討が必要である。



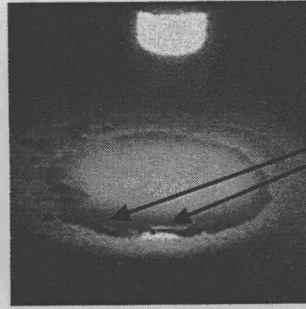
(a) $T_0=0(s)$



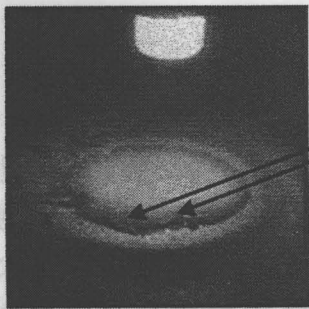
(e) $T_4=20(s)$



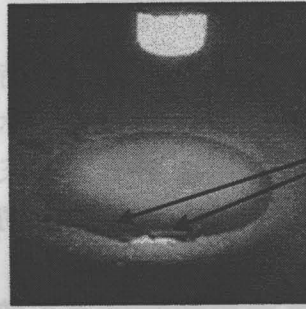
(b) $T_1=5(s)$



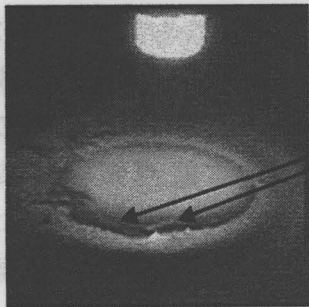
(f) $T_5=25(s)$



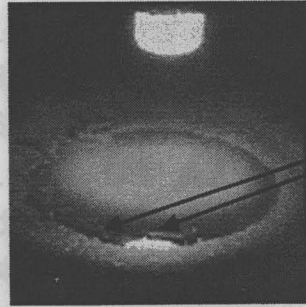
(c) $T_2=10(s)$



(g) $T_6=30(s)$



(d) $T_3=15(s)$



(h) $T_7=35(s)$

Fig.5.8 Appearance of molten pool surface

5. 5 結言

本章では、第3章で得られた溶込み形状の形成メカニズムを明らかにすることを目的として、陽極表面上の電流分布領域及び陽極への入熱エネルギー、溶融池内の対流現象の観点から検討をおこなった。

以下に本章で得られた主な結果を要約する。

- (1) HCAにおいて、ガス流量が1.7ml/sと多い場合には、陽極表面上の電流分布は直径50mm以上と大きく広がる。したがって、入熱が分散され、広く浅い溶込みが形成される。
- (2) HCAにおいて、ガス流量が0.17ml/sと少ない場合には、GTAに比べプラズマの電子温度が高く、陽極への入熱が大きくなる。このことが母材の溶融量が非常に多くなることの一つの要因である。
- (3) HCAにおいて、ガス流量が多い場合と少ない場合では、溶融量の差は非常に大きい。陽極へ持ち込まれる入熱エネルギーの違いは、溶融量の違いを十分に説明できるほどのものではなく、電流分布の広がりと合わせて、溶融形状に大きな違いが表れる。
- (4) ガス流量が少なく、母材にHS材を用いた場合に得られる深い溶込みは、溶融池内に発生している内向きの対流と大きな関連があることは確実であるが、その対流発生メカニズム等については今後の検討が必要である。

第6章 HCA のアルミニウム溶接への応用

6. 1 緒言

前章までは、ステンレス鋼や銅を対象として、HCA の溶接用熱源としての様々な特性について検討をおこなってきた。

しかし実際の宇宙空間での適用を考えた場合、その対象となる宇宙構造物の材料は、主としてアルミニウム合金が考えられ、それらへの HCA の適用性を検討する必要がある。

したがって、本章ではアルミニウムを陽極に用いた場合の放電外観や母材溶融特性について調査及び検討をおこなう。さらにはその実用性を検討するために突合わせ溶接実験をおこない、その溶接部の引張り強度や溶接ビード内部における欠陥の有無の調査をおこなう。本章では材料として、純アルミニウム (A1050) とスペースシャトルなどの材料としても実際に使用されている⁴¹⁾Al-Cu-Mg 合金 (A2219) を使用する。また本章での HCA の実験には、外径 4.0mm、内径 3.0mm の 2%Th-HW 電極を使用し、アーク点孤の際にはガス流量を 1.7ml/s とし、点孤後ガス流量を 0.17ml/s まで減らして実験をおこなった。GTA の実験には、直径 3.2mm の 2%酸化セリウム入りタングステン電極を使用した。

6. 2 HCA によるアルミニウムの溶融特性

6. 2. 1 アルミニウムの溶接について

一般に大気圧下におけるアルミニウムの溶接では、アルミニウム表面に形成されている酸化膜の存在が大きな問題となる。アルミニウムの融点が 933K であるのに対し、酸化膜 (Al_2O_3) の融点は約 2300K であるため、電極マイナスの極性の直流 GTA 溶接を用いて溶接しようとする時、母材のアルミニウム自身は溶融しているにもかかわらず、表面の酸化膜がそのまま残り、接合の妨げとなる。したがって、大気圧下におけるアルミニウムの溶接においては、酸化膜を除去するために陰極表面に発生する陰極点のクリーニング作用が利用される場合が多く、GTA においては入熱と酸化膜除去の観点から交流アークが使用される⁴²⁾。

本節では、電極マイナスの直流 HCA のアルミニウム溶接への適用性について検討するために、陽極に純アルミニウム (A1050) を用いて、ビードオンプレート溶接中の HCA の放電外観や静止 HCA プラズマの電子密度、温度、母材溶融特性について調査する。

6.2.2 HCAの放電外観と溶接後のビード外観

Fig.6.1 は、陽極に純アルミニウムを使用したビードオンプレート溶接中のHCAの放電外観とその模式図である。周囲圧力は5Pa、アーク電流は150A、ガス流量は0.17ml/s、アーク長は10mm、溶接速度は5mm/sとした。アーク

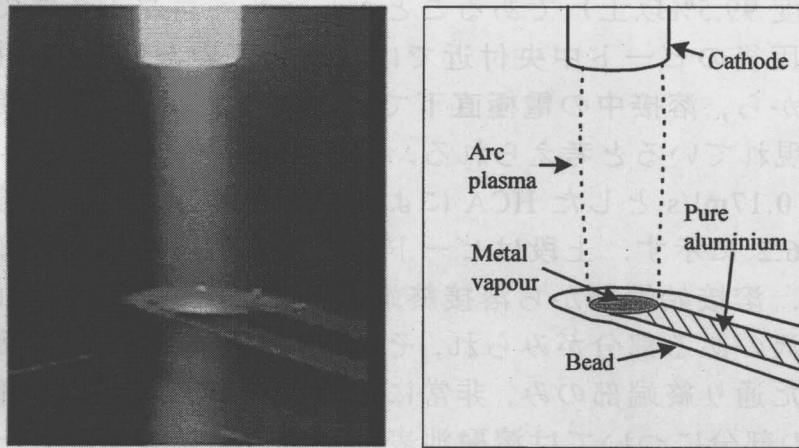


Fig.6.1 Photograph and schematic diagram of HCA on aluminium plate:
ambient pressure 5Pa, arc current 150A, arc length 10mm,
gas flowrate 0.17ml/s

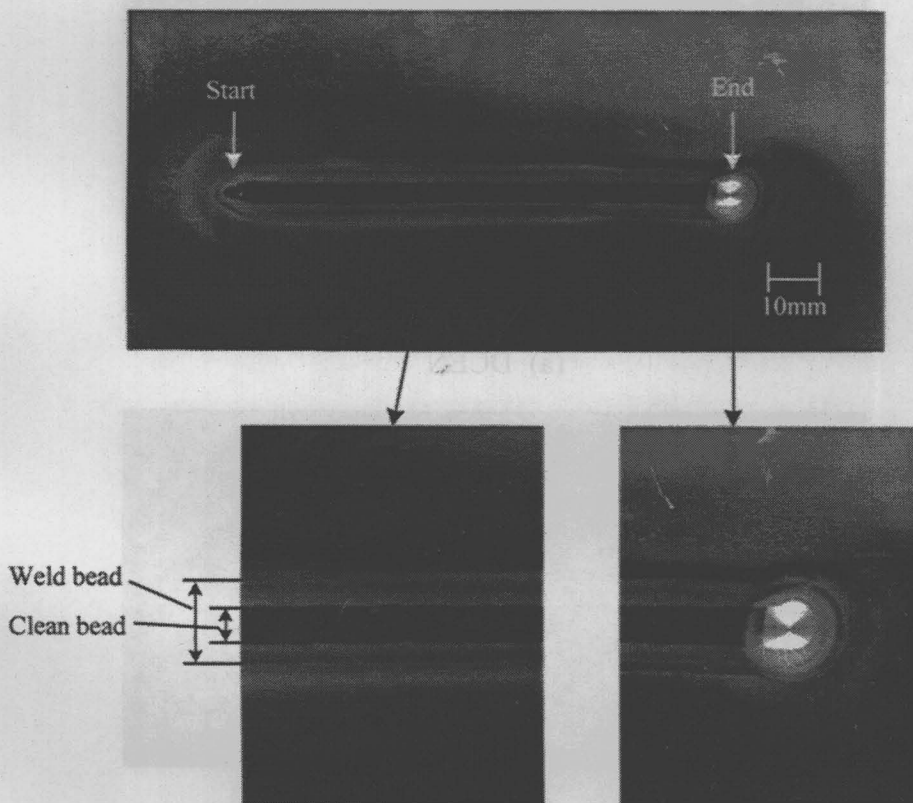
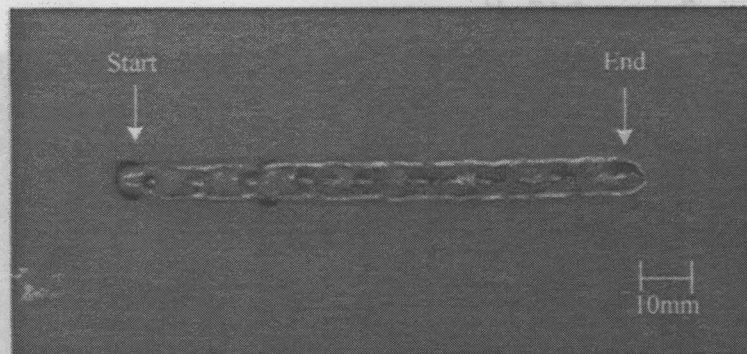


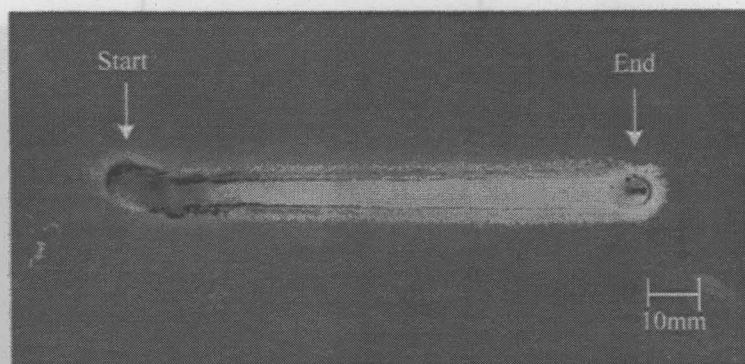
Fig.6.2 Appearance of bead by HCA

プラズマ自身は、ステンレス鋼を用いた場合と同様に、電極から母材にかけて、ほぼ円柱状に形成されている。また電極直下のビード表面には、電極からの HCA プラズマである青色のプラズマとは異なった、赤色のプラズマが観察される。これは母材表面からの金属蒸気であると思われ、陽極が純アルミニウム（純度 99.5%以上）であることからアルミニウム蒸気であると思われる。また凝固後のビード中央付近では金属光沢のある部分が観察できる。これらのことから、溶接中の電極直下では母材表面の酸化膜が除去され、アルミニウムが現れていると考えられる。

ガス流量を 0.17ml/s とした HCA によるビードオンプレート溶接後のビード外観を Fig.6.2 に示す。上段はビード全体を、下段は矢印の部分の拡大図を示している。溶接始端部から溶接終端部までビード中央部分に幅約 3mm 程度の金属光沢のある部分がみられ、その外側に溶融ビードの最大幅がある。拡大図に示した通り終端部のみ、非常に綺麗な金属光沢のある部分が現れている。その他の部分については溶融池表面からの金属蒸気がビード表面に付着したために黒っぽい色がついてはいるものの、他の部分と異なり金属光沢が現れている部分は、酸化膜が除去されていると思われる。



(a) DCEN



(b) AC

Fig.6.3 Appearance of bead by GTA

Fig.6.3 (a),(b)には、大気圧下における電極マイナスの直流 GTA を用いた場合のビード外観と交流 GTA を用いた場合のビード外観を示す。(a)は、電極マイナスの直流 GTA (DCEN) によるものであり、ビード表面に酸化膜が残ったままであるため、表面が大きく乱れている。(b)は、交流 GTA (AC) によるものであり、クリーニング作用によるクリーニング帯が形成されているのがわかる。Fig.6.2 に示した HCA による熔融ビードは、両者とも全く異なった外観を示しており、HCA 特有の熔融ビードであることがわかる。

6. 2. 3 電子密度・温度分布に関する検討

陽極にアルミニウムを使用した場合の HCA プラズマの電子密度と温度を明らかにするために、ラングミュアプローブ法を用いた計測をおこなった。安定したプラズマを計測するために、移動中のプラズマではなく、第 4 章と同様、静止アークプラズマを対象とした。静止アークによってアルミニウムを熔融させた場合にも、電極直下の熔融池表面からピンク色のプラズマが発生しているのを確認しており、実験後の熔融池表面からは直径 5mm 程度の金属光沢をもった表面が現れていた。

電子密度と温度の計測結果を Fig.6.4, Fig.6.5 に示す。放電条件は、周囲圧力 5Pa, アーク長 10mm, ガス流量 0.17ml/s, アーク電流 100A とした。

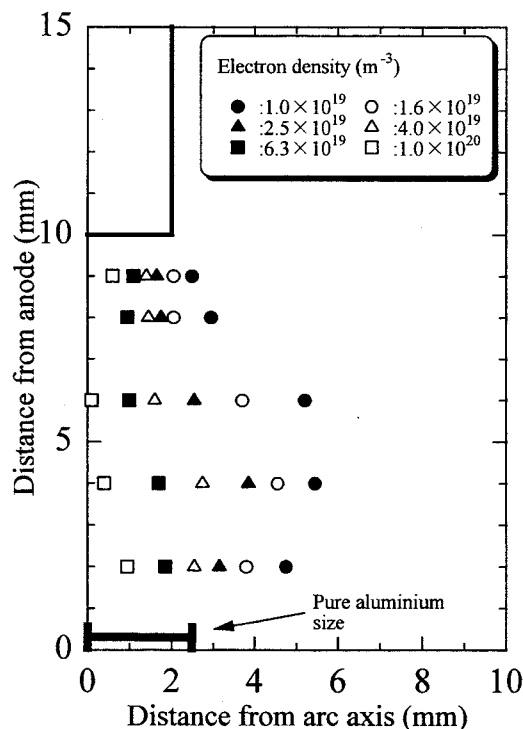
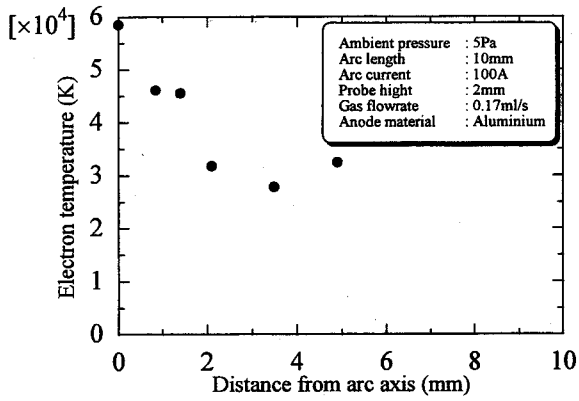
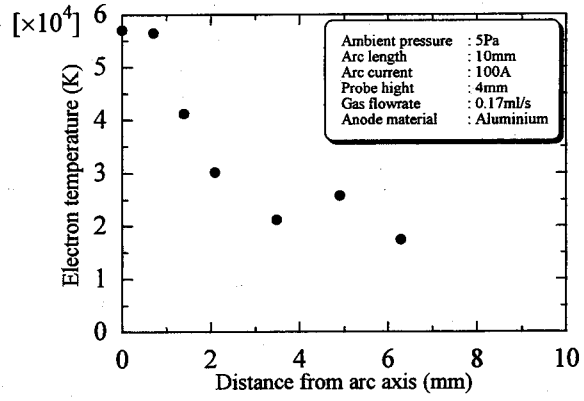


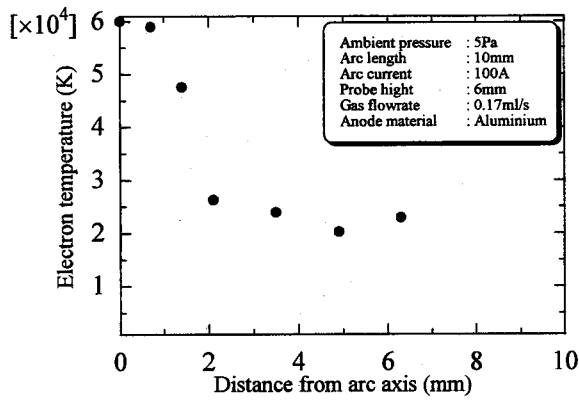
Fig.6.4 Electron density distribution between electrodes: ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm, gas flowrate 0.17ml/s, anode Aluminium



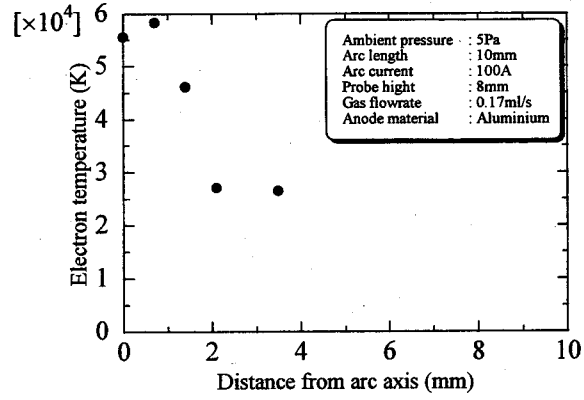
(a) $h=2\text{mm}$



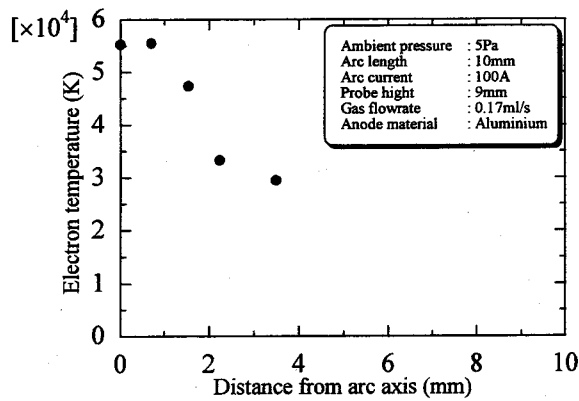
(b) $h=4\text{mm}$



(c) $h=6\text{mm}$



(d) $h=8\text{mm}$



(e) $h=9\text{mm}$

Fig.6.5 Electron temperature distribution in HCA column:
 ambient pressure 5Pa, arc current 100A, arc length 10mm
 anode aluminium

Fig.6.4 は、電極・母材間の電子密度分布である。Fig.4.10(a)に示した陽極に銅を用いた場合やFig.4.10(b)に示したステンレス鋼を用いた場合に比べると、ステンレス鋼を用いた場合ほどではないが、銅を用いた場合よりも母材付近での密度分布が広がっている。またアーク中心軸付近の密度も高くなっており、電子密度分布に表面からの金属蒸気の影響があらわれている。電極付近の密度分布は銅の場合と非常に類似している。他方、ステンレス鋼を用いた場合に比べ、金属蒸気が発生している部分が狭く、このためその影響は少ないものと考えられる。

Fig.6.5 は、陽極からの高さが2,4,6,8,9mmの位置におけるアーク半径方向の電子温度分布である。いずれの高さにおいても、アーク中心付近で電子温度は最も高くなり55000-60000K程度の値を示す。半径方向には、温度が急激に低下し、周辺付近で20000K程度を示している。Fig.4.11に示した銅板やステンレス鋼板を用いた場合の電子温度分布に比べて、最高温度が5000K程度高くはなっているものの、同様の傾向を示している。

以上のように、HCAプラズマは、陽極にアルミニウムを使用した場合にも、入熱エネルギーの高い集中した熱源となることがわかる。

6. 2. 4 HCAによるアルミニウムの熔融特性

HCAをアルミニウム溶接の熱源として用いた場合の母材溶込み現象について検討するため、純アルミニウム(A1050)のビードオンプレート溶接実験をおこなった。ビードオンプレート溶接実験では、トーチを固定し母材を移動させる方式をとり、試験片サイズは70×150×10mmとした。本項で示す断面は、溶接開始位置から70mmの位置におけるビード横断面である。またHCAのガス流量に関しては、ガス流量を1.7ml/sとした場合、母材をほとんど熔融させることができなかつたため、常にガス流量は0.17ml/sとして実験をおこなった。

Fig.6.6は、HCAによるビードオンプレート溶接実験と大気圧中のGTAによるビードオンプレート溶接実験の結果である。両者とも直流かつ電極マイナスの極性で実験をおこなっており、アーク電流は左から100A, 150A, 200Aとした。HCAの場合、周囲圧力は5Pa, ガス流量は0.17ml/s, アーク長は10mm, 溶接速度は5mm/sとした。またGTAの場合、周囲圧力は 1.0×10^5 Pa(1atm), ガス流量は170ml/s, アーク長は10mm, 溶接速度は5mm/sとした。ビード断面の下部には計測された平均的なアーク電圧を示している。

電流の大きさに関わらず両者の熔融量は、明らかに異なっており、HCAを用いた場合の方が数倍以上多くなっている。電流が大きいほど熔融量の差も大きくなっており、HCAを使用した場合、電流を200Aとすると裏面まで

	$I=100A$	$I=150A$	$I=200A$
HCA $P=5Pa$ $Q=0.17ml/s$ $L=10mm$ $v=5mm/s$			
	$V=23.0V$	$V=24.0V$	$V=24.0V$
GTA $P=1.0 \times 10^5 Pa$ (1atm) $Q=170ml/s$ $L=2mm$ $v=5mm/s$			
	$V=12.5V$	$V=12.0V$	$V=12.0V$

Fig.6.6 Penetrations in HCA and GTA welding
base metal: Aluminium

溶融している。また溶込み形状に関しては、HCAの200Aの場合を除いて、両者とも安藤ら¹⁵⁾の分類による単純溶込み型と呼ばれる形状を示しており、HCAとGTAにおける大差はないと思われる。ステンレス鋼の溶込み形状は、第5章で述べたように溶融池内の対流現象の影響を大きく受けるが、アルミニウムの場合には熱伝導性が良いために、対流の効果は緩和され²⁴⁾、熱伝導支配による溶込み形状を示す。

HCAとGTAを用いた場合に溶融量が大きく異なる原因は、ステンレス鋼の溶融現象でもみられたように、HCAプラズマの電子温度が高く、母材への入熱エネルギーがGTAを用いた場合に比べて、高くなっているためと考えられる。又は、前章でも述べたように、高いエネルギーと方向性をもった電子が電極内から陽極面へ向けて、流入していることも考えられる。

Fig.6.7に大気圧下の交流のGTAによるビードオンプレート溶接実験の結果とそのときの電流、電圧波形を示す。溶接条件は、Fig.6.6のGTAと同じである。交流GTAを用いた場合、クリーニング効果によりアルミニウム表面の酸化膜を除去することができ、良好なビードを得ることは可能となるが、電極マイナスの直流GTAとは、陽極への入熱形態が大幅に異なるため比較的大電流を使用しているが図に示すように溶融量は少なくなる。

Fig.6.8は、熱源としてHCAを用い、それぞれアーク長と溶接速度を変化させた場合のビード断面形状である。それぞれ周囲圧力は5Pa、ガス流量は0.17ml/s、アーク電流は150Aとした。左端の断面はアーク長10mm、溶接速度5mm/sとし、中央の断面はアーク長5mm、溶接速度5mm/s、右端の断面

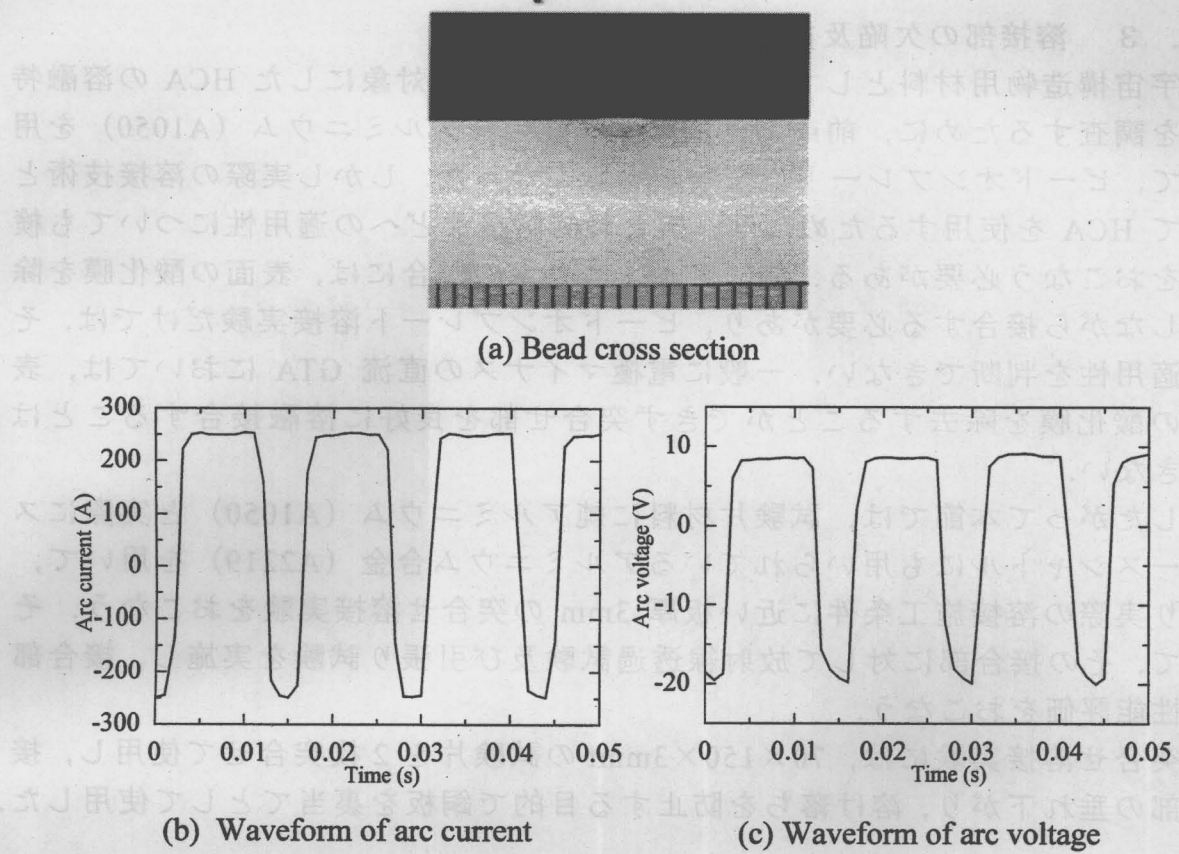


Fig.6.7 Melting bead and waveforms in GTA(AC)

	$L=10\text{mm}$ $v=5\text{mm/s}$	$L=5\text{mm}$ $v=5\text{mm/s}$	$L=10\text{mm}$ $v=3\text{mm/s}$
HCA $P=5\text{Pa}$ $Q=0.17\text{ml/s}$ $I=150\text{A}$			
	$V=24.0\text{V}$	$V=22.0\text{V}$	$V=23.0\text{V}$

Fig.6.8 Influence of arc length and welding velocity on penetration in HCA welding

はアーク長 10mm, 溶接速度 3mm/s とした.

左端と中央の断面を比較すると, ほとんど同様の溶込み形状を示しており, Fig.3.15 に示したステンレス鋼のビードオンプレート実験と同様にアーク長の影響は少ない.

また左端と右端の断面を比較すると, 溶接速度の遅い右端の断面の方が溶融量は多くなっているが溶込み形状に関しては, 両者とも単純溶込み型を示しており, 溶接速度の溶込み形状に及ぼす影響はほとんどない.

6. 3 溶接部の欠陥及び強度に関する検討

宇宙構造物用材料として有望なアルミニウムを対象にした HCA の溶融特性を調査するために、前節では板厚 10mm の純アルミニウム (A1050) を用いて、ビードオンプレート溶接実験をおこなった。しかし実際の溶接技術として HCA を使用するためには、突合わせ溶接などへの適用性についても検討をおこなう必要がある。特にアルミニウムの場合には、表面の酸化膜を除去しながら接合する必要がある。ビードオンプレート溶接実験だけでは、その適用性を判断できない。一般に電極マイナスの直流 GTA においては、表面の酸化膜を除去することができず突合せ部を良好に溶融接合することはできない。

したがって本節では、試験片材料に純アルミニウム (A1050) と実際にスペースシャトルにも用いられているアルミニウム合金 (A2219) を用いて、より実際の溶接施工条件に近い板厚 3mm の突合せ溶接実験をおこなう。そして、その接合部に対して放射線透過試験及び引張り試験を実施し、接合部の性能評価をおこなう。

突合せ溶接実験には、70×150×3mm の試験片を 2 枚突合せて使用し、接合部の垂れ下がり、溶け落ちを防止する目的で銅板を裏当てとして使用した。

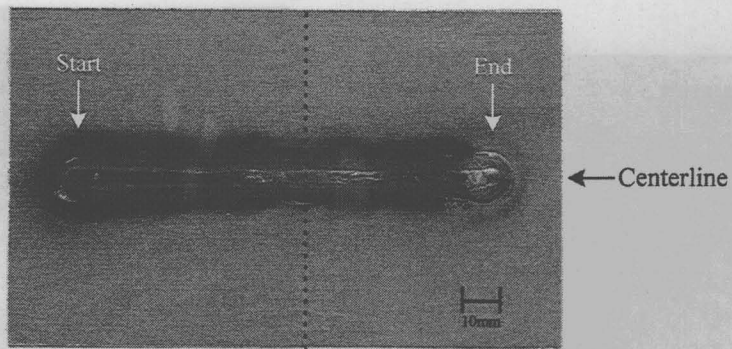
6. 3. 1 ビード外観及び放射線透過試験

Fig.6.9 は、突合せ実験後のビード表面と裏面の外観である。(a)は材料に A1050 を用いた場合、(b)は A2219 を用いた場合である。それぞれにおいて、(i)はビード表面、(ii)はビード裏面の様子を表している。表面の点線は、放射線透過試験や引張り試験片を作成する際に基準とした位置である。

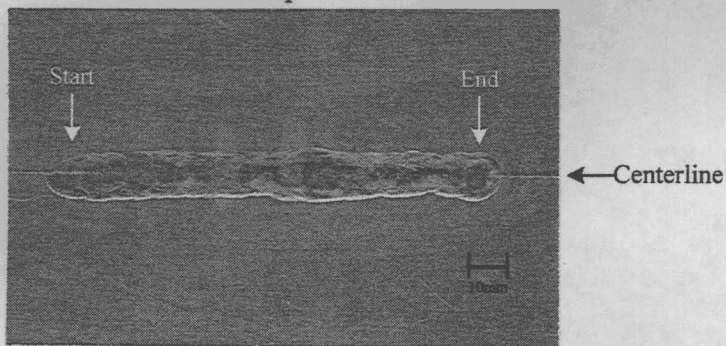
両者の表面をみるとビード中央付近に幅 2~2.5mm 程度の金属光沢のある部分が形成されている。これは Fig.6.2 でも示したように酸化膜が除去された金属光沢のある部分である。また裏面をみると、表面のビード幅と同程度のビード幅が得られており、裏面まで十分に溶込んでいることがわかる。

Fig.6.10 は、Fig.6.9 に示したビードの放射線透過試験の結果であり、(a)は A1050、(b)は A2219 の結果である。それぞれの写真で、中央のマークに相当する位置が、Fig.6.9 に示した表面の点線の位置であり、上のマークと下のマーク間は 50mm ある。

両者とも、上下のマーク間の溶融部ではブローホール等の溶接欠陥を含むことはなく、良好に溶接されている。一般に A1000 系の純アルミニウムにおいては、溶接条件によって、ブローホールが発生し易いといわれており、実際に大気中で交流 GTA を用いて突合わせ溶接をおこなった場合には、その接合部で HCA を用いた場合よりも多いブローホールが確認された。

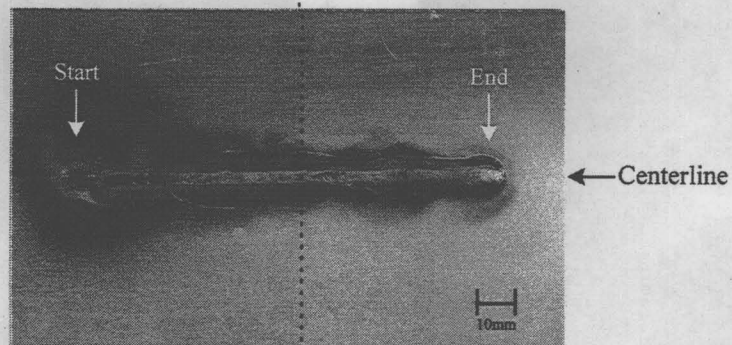


(i) Top surface

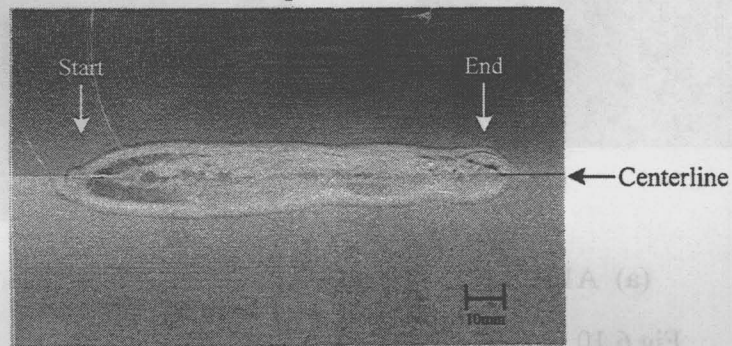


(ii) Bottom surface

(a) A1050



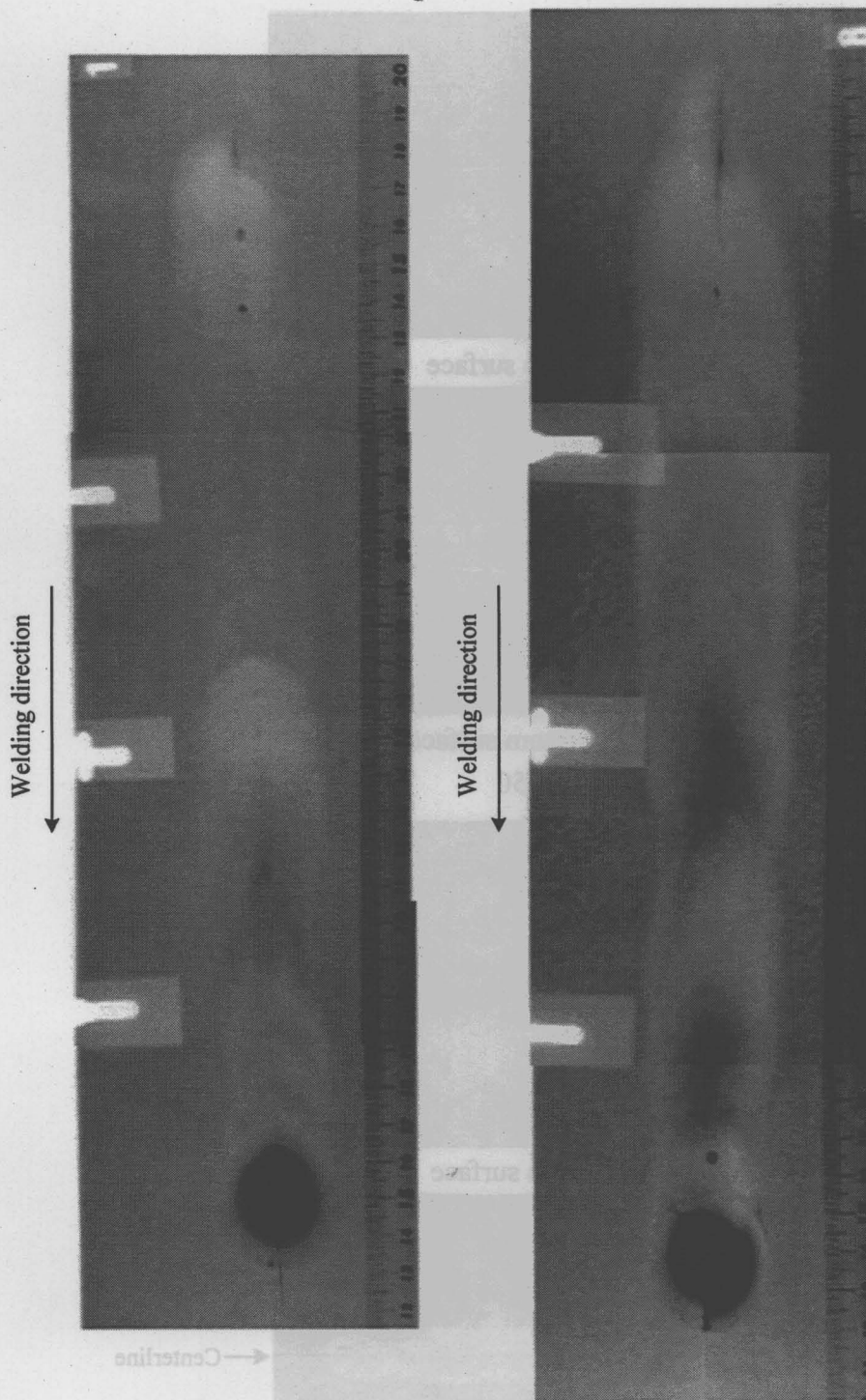
(i) Top surface



(ii) Bottom surface

(b) A2219

Fig.6.9 Appearance of weld bead surface by HCA welding



(a) A1050

(b) A2219

Fig.6.10 Results of radiographic examination for welded butt joints of aluminium plates

HCA を用いた場合，ブローホールを少なく出来る理由として，低圧中であるためにアーク雰囲気中に巻き込まれる空気がほとんど無いこと，ガス流

量が微量であるために、シールドガス中に含まれる水素及び水分がほとんど無いことが挙げられる。母材中に含まれる溶解水素を除去することは不可能であるが、母材表面に付着または吸着した水分や有機物を除くことは可能であり、ブローホールの原因であるといわれている水素の供給源を出来る限りなくすことで、HCA ではブローホールの発生を大気中の溶接法を用いた場合よりも押さえることができる。

以上のように、HCA をアルミニウム溶接用の熱源として用いることで、表面の酸化膜を除去しながら溶接が可能であり、適切な溶接条件を選択することで接合部にはブローホールが含まれ難くなることから、HCA がアルミニウムの溶接用熱源として、有効であることが示された。しかし溶接始端部や溶接終端部にはブローホールや融合不良がみられ、大気圧中の GTA と同様に溶接始端部や終端部では欠陥が発生し易い⁴²⁾ことがわかる。実際の溶接施工に用いる場合には、始端部や終端部では十分な注意が必要である。

6. 3. 2 溶接部の引張り試験

次に、HCA を用いておこなった溶接部の継手強度を調査するために、引張り試験を実施した結果について述べる。Fig.6.9 に点線で示した基準位置を中心に、Fig.6.11 に示すような引張り試験片を採取した。また母材自身の引張り強さを知るために、溶接部の無い母材の引張り試験片も作成し、試験をおこなった。この場合、溶接金属部の表面の最大幅にあたる部分は、平均的な表面ビード幅である 10mm とした。

引張り試験後の典型的な試験片を Fig.6.12 に示す。(a)は母材に A1050 を使

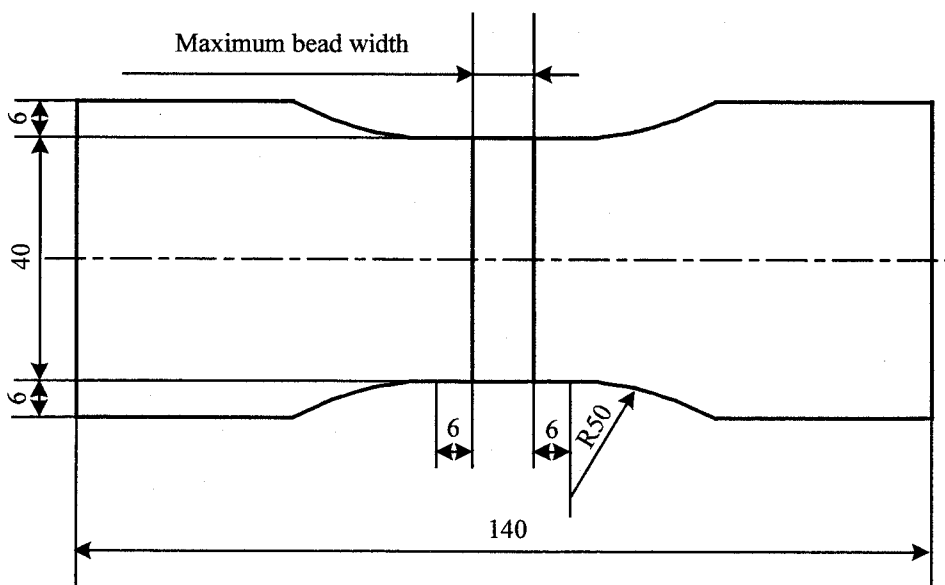
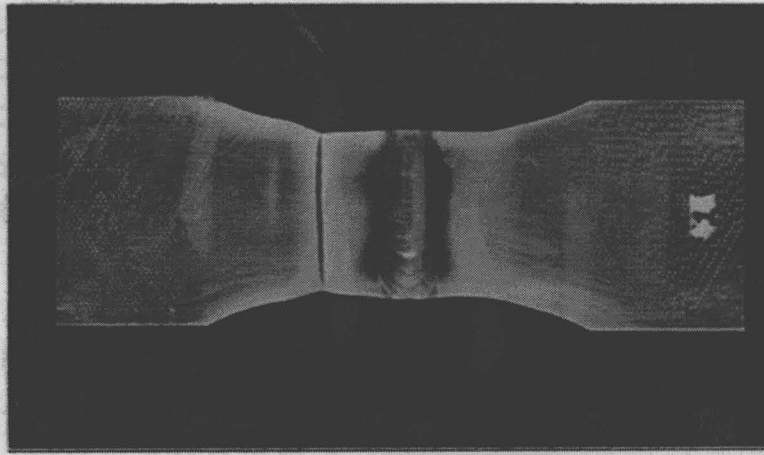
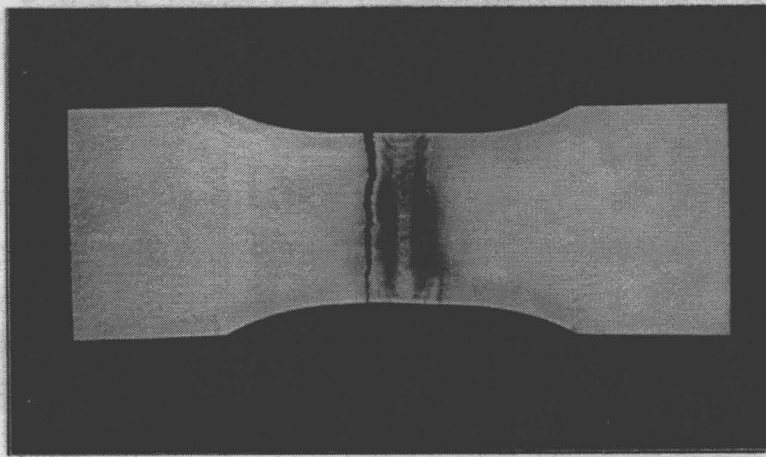


Fig.6.11 Size of test piece for tensile test



(a) A1050



(b) A2219

Fig.6.12 Appearance of specimen after tension test

用したもの、(b)は A2219 を使用したものであり、Fig.6.10 に放射線透過試験結果の写真を示した試験片でもある。A1050 の場合には、突合わせ部やビード部分で破断するのではなく、明らかに母材で破断していることがわかる。強度低下のあった熱影響部での破断であると思われる。A2219 の場合には、図からもわかるようにビード部と熱影響部の境界上で破断している。他の試験片においても、放射線透過試験で融合不良が無く、ブローホールがほとんど発見されなかった試験片においては、母材での破断となっており、A1050、A2219 ともそれぞれ Fig.6.12 のような傾向を示していた。

Table6.1, Table6.2 に引張り試験で得られた各試験片の引張り強さを示す。Table6.1 は母材の引張り強さであり、Table6.2 は表中に示す溶接条件で突合わせ溶接をおこなった試験片の引張り強さである。A1050 の母材引張り強さは平均 115.7MPa であり、A2219 の母材引張り強さは平均 249.6MPa であった。

Table 6.1 Tensile strength of base metal

Base metal	Tensile strength (MPa)
A2219	249.1
A2219	250.1
A1050	114.1
A1050	119.8
A1050	113.1

Table 6.2 Tensile strength of welded butt joints

No.	Material	Method	Arc current (A)	Welding speed (mm/s)	Arc length (mm)	Gas flowrate (ml/s)	Tensile strength (MPa)
1	A1050	HCA	100	5	5	0.17	69.9
2	A1050	HCA	100	5	5	0.17	67.5
3	A2219	HCA	90	5	5	0.17	231.9
4	A2219	HCA	90	5	5	0.17	234
5	A1050	GTA(AC)	200	5	2	170	61.9
6	A1050	GTA(AC)	200	5	2	170	63.7

Table 6.2 に示すように、A2219 に HCA を適用した場合の溶接部の引張り強さは、平均 233.0MPa となっており、母材の引張り強さにほとんど等しく十分な強度が得られている。また A1050 に HCA を適用した場合には、引張り強度は平均 68.7MPa となっており、母材引張り強さの約 60% となっているが、大気圧中で交流 GTA を適用した場合の引張り強さが、平均 62.8MPa であることを考えると、それ以上の強さを示しており、A1050 においても十分な強さが得られているといえる。

6. 4 結言

HCA を宇宙溶接用熱源として使用するためには、宇宙構造物の材料として有望なアルミニウム合金への適用性を検討する必要がある。したがって、本章ではアルミニウムを陽極に使用し、HCA の放電外観やアルミニウムの溶融特性の検討をおこなった。さらには実際の突合わせ溶接をおこない、その溶接部の放射線透過試験や引張り試験をおこなうことで、HCA の実用性についても検討をおこなった。

以下に本章で得られた主な結果を要約する。

- (1) アルミニウム溶接に電極マイナスの直流 HCA を使用すると、電極から母材にかけて、ほぼ円柱状のプラズマが形成される。
- (2) アルミニウム表面には、金属光沢のある部分が形成され、表面の酸化膜が除去されているものと考えられる。

- (3) プラズマの電子密度は、溶融池表面からの金属蒸気の影響を受けるものの、その影響は少ない。また電子温度も銅やステンレス鋼を陽極に用いた場合と同様に、55000-60000K という非常に高い値になる。
- (4) HCA と GTA をアルミニウム溶接の熱源として用いた場合、同じ電流値では HCA を用いた場合の方が明らかに溶融量が多い。溶込み形状については、HCA と GTA の違いはなく単純溶込み型を示す。
- (5) HCA プラズマは、陽極にアルミニウムを使用した場合にも、入熱エネルギーの高い集中した熱源となる。
- (6) 引張り試験の結果、HCA を使用して作られた溶接部は、大気圧中の GTA による溶接部と同等かそれ以上の強度を保つことが可能であることが明らかになった。

第7章 溶接プロセスに及ぼす重力の影響

7. 1 緒言

第1章で述べたように、宇宙空間で溶接をおこなう場合、溶接現象に影響を与える大きな因子として、宇宙真空と微小重力が考えられる。第2章から第6章において、真空環境下でも使用可能な HCA に注目し、低圧環境下における HCA の溶接用熱源としての特性について検討をおこなった。

本章では、重力のアーク溶接現象に及ぼす影響について検討する。現在、微小重力実験を比較的手軽におこなう方法としては、航空機を利用した微小重力実験と落下塔を利用した微小重力実験がある。それぞれの特徴は、航空機による実験の場合、比較的長い微小重力状態を得られること、落下塔による実験の場合、質の高い微小重力状態を得られることである。溶接現象に及ぼす重力の影響を明らかにするために、これらの微小重力実験をおこなったので、それぞれの実験について、その概要を述べ、重力がアーク放電や熔融池に及ぼす影響について検討する。

7. 2 微小重力環境下でのアーク溶接現象

7. 2. 1 実験の概要

重力の溶接現象全般に及ぼす影響を検討するために、これまで落下塔を用いた微小重力実験や航空機を用いた微小重力実験を実施してきた。それらの実験の概要について述べる。

Fig.7.1 に示すような落下塔を利用した微小重力実験では、実験装置を組み込んだカプセルをドロップシャフト内で落下させ、自由落下している間に、 $10^{-3} \sim 10^{-5}G$ という質の高い微小重力状態を約 10 秒間得ることができる。典型的な重力の変化の様子を Fig.7.2 に示す。この図で時刻 0 秒のときがカプセルの落下開始時刻である。この微小重力環境を利用し、溶接現象に及ぼす重力の影響について検討した。

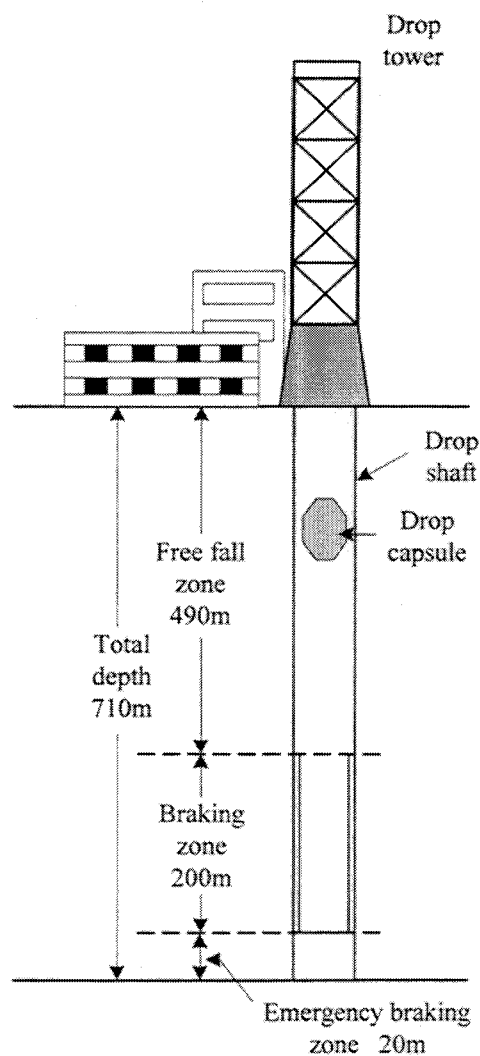


Fig.7.1 Schematic of the Japan Microgravity Center (JAMIC)

具体的にはカプセル内で、GTA 溶接法を用い、静止アークによる母材溶融実験とビードオンプレート溶接実験を、電極マイナス (DCEN) の極性でおこなった。ビードオンプレート溶接の実験をおこなうために移動台車装置を組み込み、アーク点孤後、台車が移動を開始するよう制御をおこなった。電源にはカプセル内に搭載した無停電電源 (Uninterruptible Power System (UPS)) を使用し、市販の溶接機を駆動させる方式を採用した。ここで採用した無停電電源とは、一般に各種電源トラブルや不可抗力による長時間停電の際に、蓄電池やコンデンサなどに蓄えられたエネルギーを使って、負荷へ途切れることなく、電力を供給することで電源障害を防止するための電源装置のことである。

また微小重力下におけるアーク放電の様子と溶融池表面、裏面の様子を2台の CCD カメラで観察できるようにした。Fig.7.3 に示すのが、今回使用した実験装置の写真である。また重力の影響をわかりやすくするために、微小重

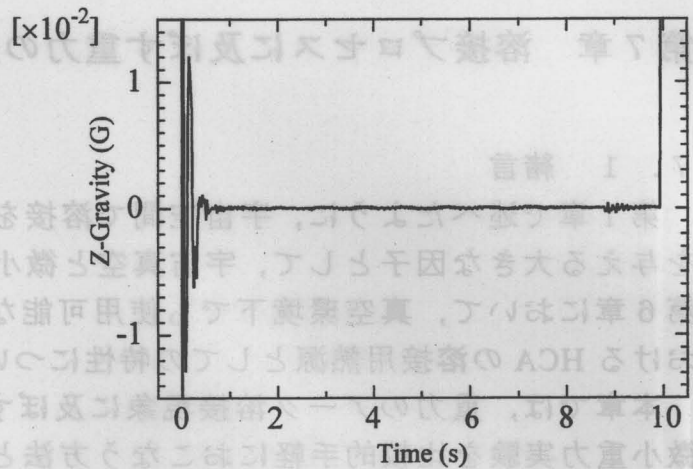


Fig.7.2 Change of Z-gravity by drop tower

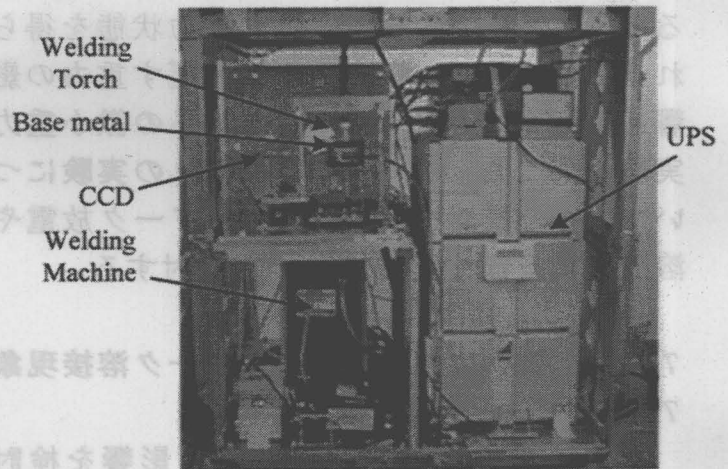


Fig.7.3 Experimental apparatus

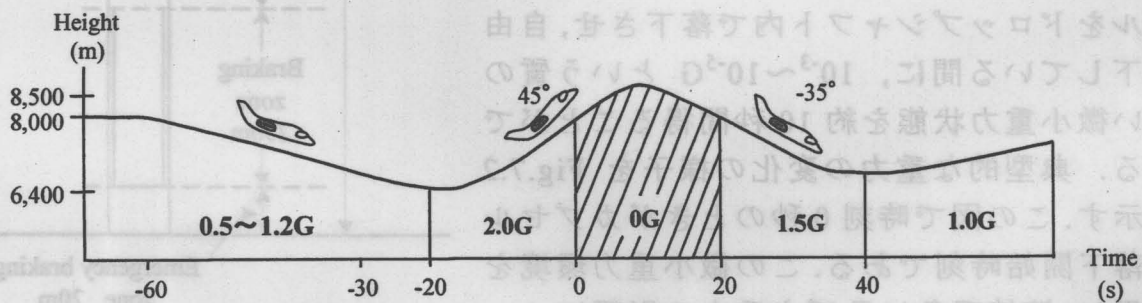


Fig.7.4 Image of parabolic flight pattern

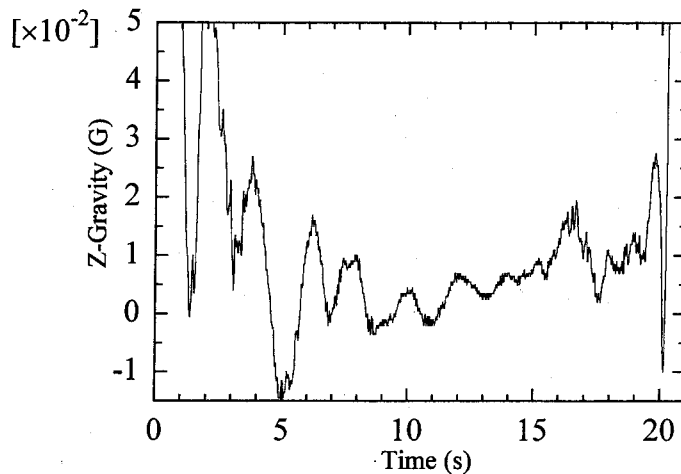


Fig.7.5 Change of Z-gravity in flying laboratory

力下のみの実験と重力下から実験を開始，微小重力下でアークを消弧し，熔融池を凝固させる実験の2通りの実験をおこなった。

次に航空機を利用した微小重力実験の概略について述べる．航空機実験では，航空機は Fig.7.4 に示すようなパラボリック飛行をおこない，上昇加速後と急降下時に機内に発生する微小重力環境を利用することで，ほぼ 0G を約 20 秒間得ることができる．航空機実験の特徴は，落下塔の実験に比べ，微小重力環境を 2 倍の約 20 秒間得られることである．しかし微小重力状態の質は，落下塔より劣る．典型的な重力の変化の様子を Fig.7.5 に示す．

なお，航空機実験では，航空機内に真空チャンバーを持ち込み低圧・微小重力環境を作り出した．そしてその真空チャンバー内でアーク溶接実験をおこなうことで，宇宙環境下におけるアーク溶接実験の模擬をおこなった．また航空機実験では，Fig.7.4 に示したフライトパターンを利用して，重力が 2G の状況での溶接実験も可能である．

Fig.7.6 は，今回の航空機実験に用いた実験装置の構成図であり，図中の太い線は電気系統の配線を表し，細い実線はリレーボックスからの信号用配線，破線は Ar ガスボンベからのガスの配管を表している．Fig.7.7 に示すのが実際の実験装置の写真である．地上で一般に用いられているアーク溶接電源を航空機実験等に使用しようとする時，溶接時に発生する高周波などのノイズが航空機の計器などに大きな影響を与えるため使用できない．したがって，低ノイズかつ軽量の電源を使用する実験装置となっている．基本的な構成としては，Fig.2.3 に示したように，アーク放電用のバッテリー電源回路とアーク点孤用の直流の高電圧電源回路から構成されている．また本実験では，実験開始前に，真空チャンバー内の圧力が 13Pa (約 0.1Torr) 以下になるよう

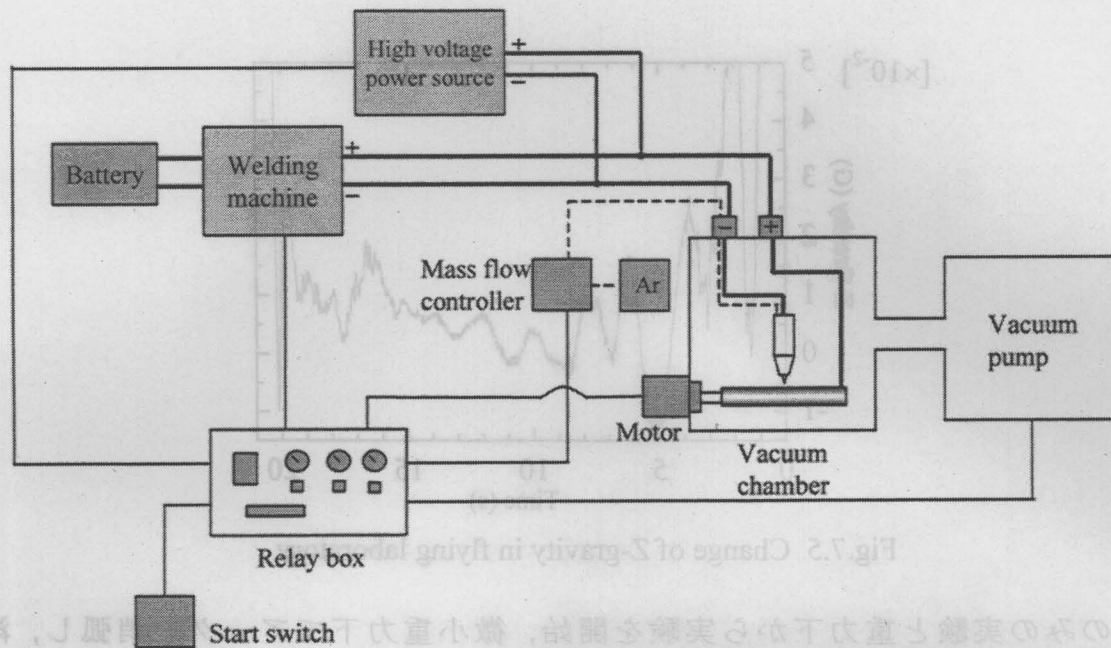


Fig.7.6 Experimental apparatus used in flying laboratory

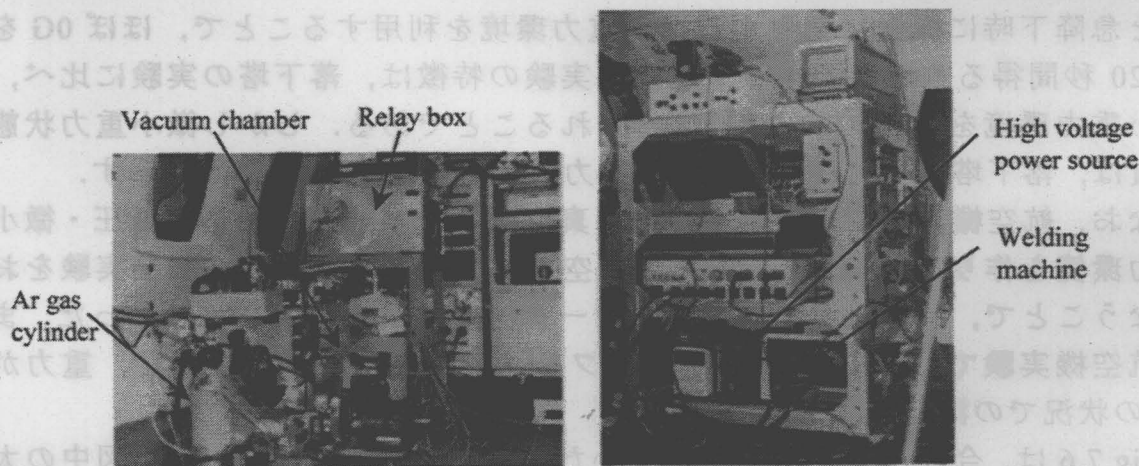


Fig.7.7 Pictures of experimental apparatus in flying laboratory

にして実験をおこなった。真空チャンバー側面には、観測用窓を取り付けており、チャンバー内のアークの様子をビデオにより撮影した。

航空機実験では、真空チャンバー内で溶接実験をおこなうため、GTAではなく、低圧下でも使用可能なHCAを用いている。内容としては、ステンレス鋼製のパイプを用いたビードオンプレート溶接実験とステンレス鋼製の平板を用いた静止アークによる溶融実験をおこなった。

7. 2. 2 アークプラズマに及ぼす重力の影響

落下塔による微小重力実験の際に、CCDカメラによって撮影されたビードオンプレート溶接中のアーク放電の様子を Fig.7.8 に示す。(a) は重力下で撮影されたアーク放電の様子、(b) は微小重力下で撮影されたアーク放電の様子である。ともに溶接条件は、アーク電流 80A、溶接速度 1.3mm/s、アーク長 2mm、ガス流量 170ml/s とし、母材にはステンレス鋼を用いた。

これらを見比べるとほとんど違いは見られない。これまでの報告では、ノズルからのシールドガスを使わず Ar 雰囲気内で実験をおこなった場合、微小重力下では、重力下の場合に比べて、アーク光が丸くひろがる¹¹⁾ことが報告されている。しかし比較的大電流のアーク放電においては電磁力の作用が強く、アーク放電の形状はプラズマ気流の影響を強く受ける。したがって微小重力下では、熱対流が無くなるものの、このことがプラズマの形状に大きな影響を及ぼすとは考え難い。重力の影響を受け易い熔融池表面への影響によって、アークプラズマに2次的な影響がでることも考えられるが、本実験で示したように、重力がアークプラズマ自体に及ぼす影響は、ほとんどない。

Fig.7.9 に示すのは、航空機実験の際に真空チャンバー側面の観測用窓から真空チャンバー内のアーク放電の様子を撮影したものであり、低圧・微小重力下での HCA 放電の様子である。(a) はパイプのビードオンプレート溶接を熔融池後方から撮影したものであり、溶接条件はアーク電流 100A、アーク長 3mm、溶接速度 2.7mm/s、ガス流量 1.7ml/s とした。(b) は平板を用いた静止アークによる熔融実験の様子を撮影したものであり、アーク電流は 100A、アーク長は 3mm、ガス流量は 1.7ml/s とした。

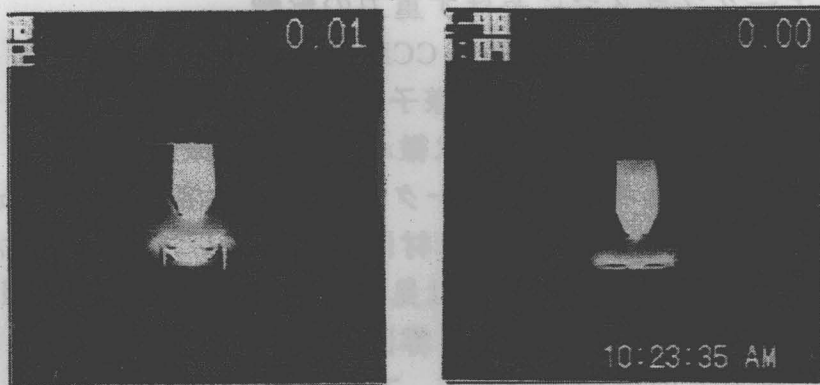


(a) Normal-gravity

(b) Micro-gravity

Fig.7.8 Appearance of GTA in welding

($I=80A$, $v=1.3mm/s$, $L=2mm$, $Q=170ml/s$)



(a) Welding of pipe ($v=2.7\text{mm/s}$) (b) Welding of flat plate ($I=100\text{A}$, $L=3\text{mm}$, $Q=1.7\text{ml/s}$)

Fig.7.9 Appearance of HCA in microgravity ($I=100\text{A}$, $L=3\text{mm}$, $Q=1.7\text{ml/s}$)

これらを見ると地上の真空チャンバー内でアーク放電の実験をおこなった場合と同様、肉眼ではほとんど見えない、非常にうっすらとしたアーク放電が電極・母材間に観察され、ここでも重力のアーク放電形態への影響は少ない。

以上のようにアーク放電自体には、重力の影響は観察されず、微小重力環境下でも、地上と同様に母材を熔融させることができる。また低圧下でも HCA を用いることで、低圧・微小重力環境下でアーク溶接が十分可能であることが確認できた。

7. 2. 3 熔融池に及ぼす重力の影響

Fig.7.10 は、落下塔を利用した微小重力実験において、重力の変化にともなう熔融池形状の変化の様子を CCD カメラにより観察した結果である。実験は立向きの静止アークによる熔融実験であり、母材側方から裏面側の熔融池形状の様子を観察した。熔融条件は、アーク電流 80A、アーク長 2mm、シールドガス流量 170ml/s とし、母材にはステンレス鋼を使用した。図は、地上と同じ 1G の状態から微小重力 (約 0G) の状態へ重力が変化したときの連続写真であり、ひとコマは 1/30 秒ごとである。

このときの重力変化の様子を Fig.7.11 に示す。時刻 0 秒が重力変化の開始する時刻である。0 秒付近を拡大した図をみると、開始後 0.03 秒程度で重力が 1/100 程度にまで変化していることがわかる。連続写真をみると 3 コマ目と 4 コマ目の間で、熔融池の垂れ下がりが無くなっている。つまりひとコマは 1/30 秒ごとであり、それよりも速い速度で、重力による垂れ下がりには元にもどることがわかった。ほぼもとに戻った後は、慣性により表面がかすか

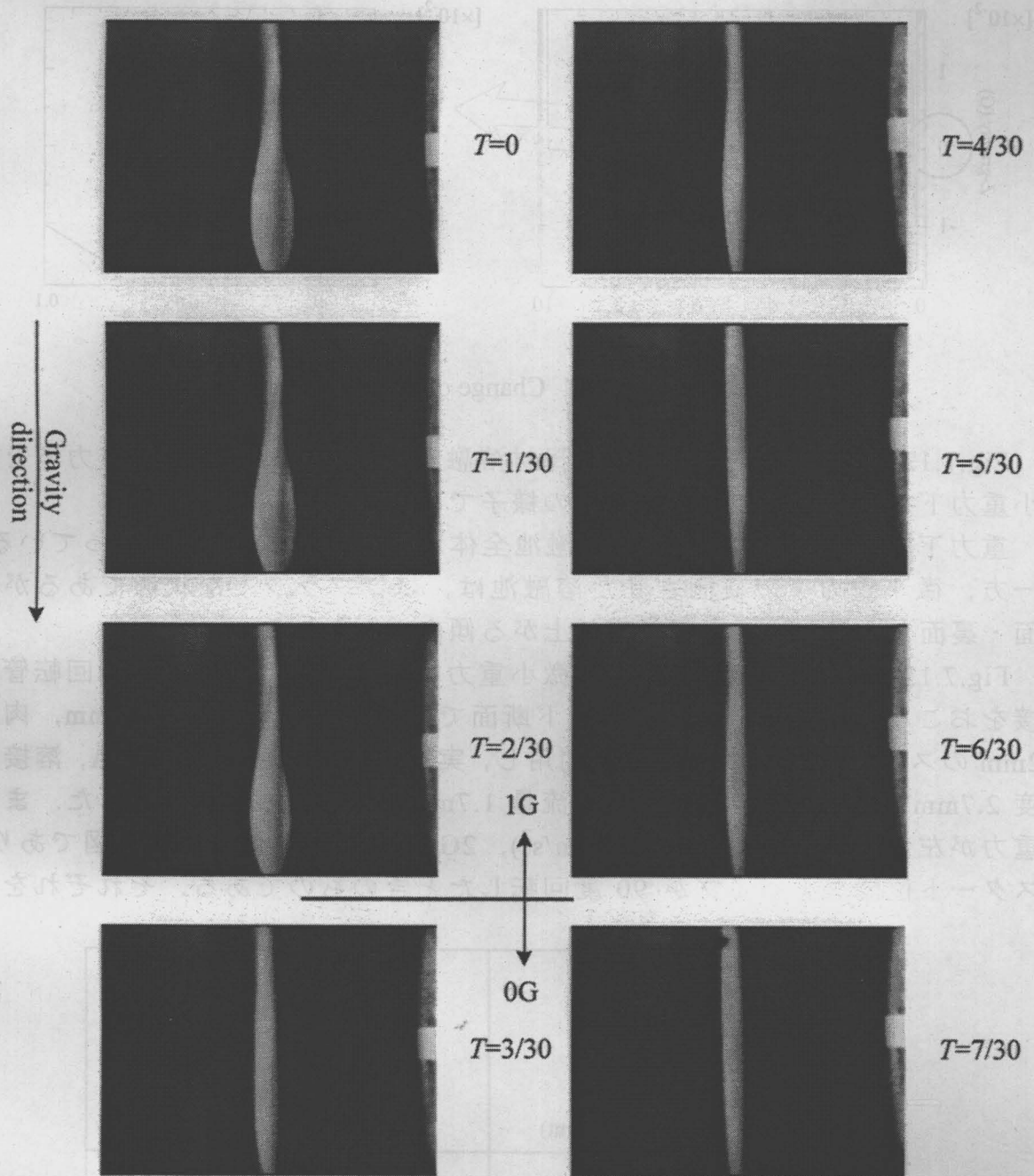


Fig.7.10 Change of molten pool profile with gravity
 (GTA, $I=80A$, $L=2mm$, $Q=170ml/s$)

に振動しているのが写真から推察できるが、その振幅は小さい。すなわちビデオによる観察によれば、比較的アーク圧力の小さい条件下では、熔融池の表面形状は重力とほぼ平衡する形で推移することがわかる。

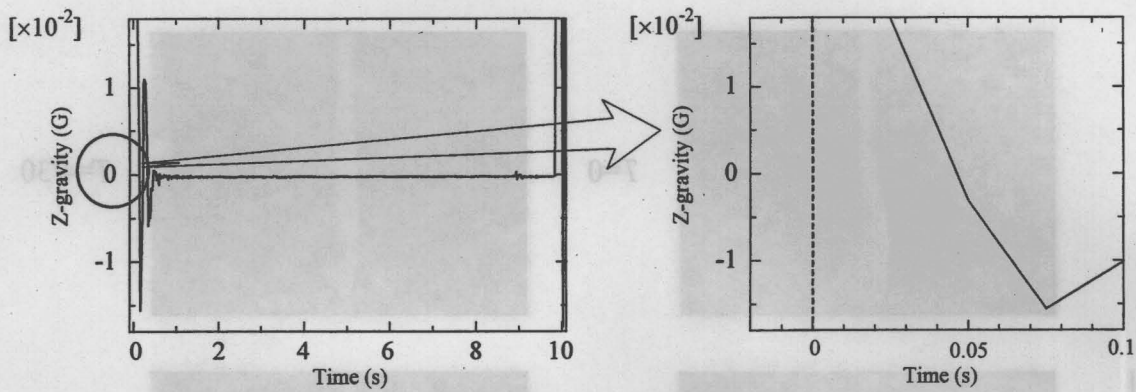


Fig.7.11 Change of gravity

Fig.7.12 は、静止アークによる母材溶融実験において溶融池を重力下と微小重力下で凝固させたときの断面の様子である。

重力下で凝固した場合には、溶融池全体が重力方向に、垂れ下がっている。一方、微小重力下で凝固させた溶融池は、ほぼフラットな状態であるが表面・裏面とも僅かに中央部が盛り上がる傾向がみられる。

Fig.7.13 は、航空機を利用した微小重力実験において、パイプの回転管溶接をおこなった結果得られたビード断面である。実験には外径 30mm、肉厚 2mm のステンレス鋼製パイプを利用し、実験条件はアーク電流 85A、溶接速度 2.7mm/s、電極先端からのガス流量 1.7ml/s、アーク長 3mm とした。また重力が左から 0G(0m/s²), 1G(9.8m/s²), 2G(19.6m/s²)のときの断面図であり、スタート位置からパイプが 90 度回転したときのものである。それぞれを見

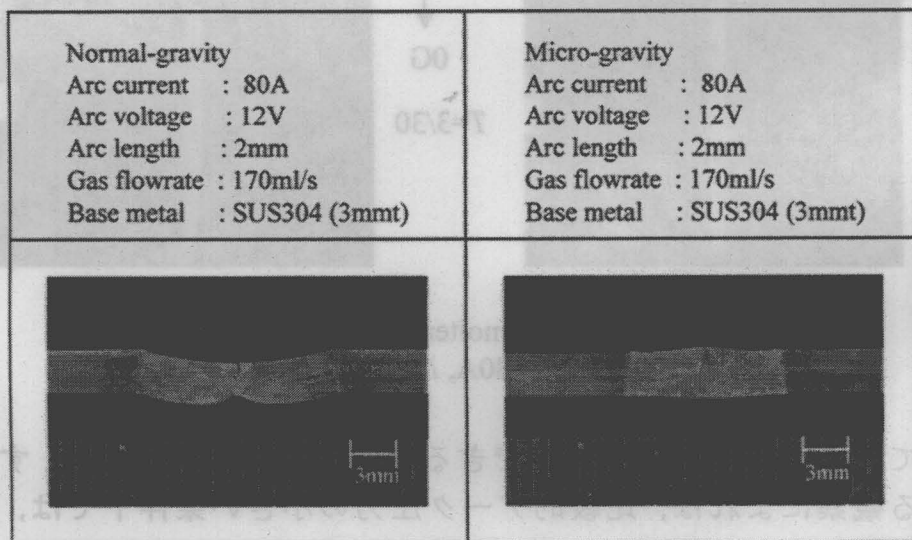


Fig.7.12 Effect of gravity on weld bead profile

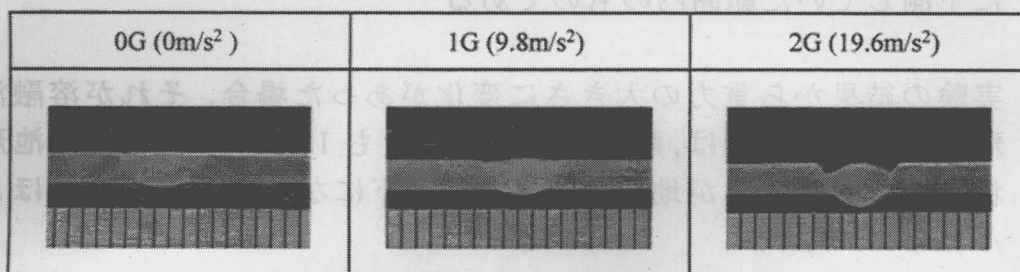


Fig.7.13 Effect of gravity on weld bead profile (Bead cross section)
 ($I=85A$, $v=2.7mm/s$, $Q=1.7ml/s$, $L=3mm$)

比べると、裏面の垂れ下がり方が明らかに異なっている。0G の場合には、パイプ裏面の垂れ下がりはほとんど無い。2G の場合には、表面にアンダカットが形成され、裏面の垂れ下がりも 1G の場合よりも大きくなっていることがわかる。

以上のことから、重力が溶融中の溶融池形状や凝固形状に大きな影響を及ぼすことが確認できた。すなわち微小重力下では、溶融池表面や裏面の変位はほとんどなく、また重力が大きくなると表面がアンダカットになることや裏面の垂れ下がりも大きくなることが確認できた。しかしながらそれらの影響は、実験前に予測していた範囲内のものであった。

7. 3 結言

本章では、宇宙空間で溶接をおこなう場合、溶接現象に影響を与える因子として考えうる微小重力環境を対象として、その溶接現象に与える影響について検討をおこなった。具体的には、落下塔や航空機を利用した微小重力実験について、その実験方法を紹介し、実験によって得られた結果から、重力がアーク放電や溶融池に及ぼす影響について検討をおこなった。

以下に本章で得られた主な結果を要約する。

- (1) アーク放電の形態には、重力の影響はほとんど観察されず、微小重力環境下でも、地上と同様に母材を溶融させることができる。また HCA を用いることで、低圧・微小重力環境下でアーク溶接が十分可能である。
- (2) 重力は、溶融中の溶融池形状や凝固形状に大きな影響を及ぼす。すなわち微小重力下では、ほとんど溶融池表面や裏面に変位はない。逆に重力が大きくなると表面がアンダカットになり、裏面の垂れ下がりも大きくなる。しかしながらそれらの影響は、実験前

に予測していた範囲内のものである

- (3) 実験の結果から重力の大きさに変化があった場合、それが溶融池形状に及ぼす影響は、瞬時又は少なくとも 1/30 秒以内に溶融池形状に現れる。重力が地球上の 1/100 以下になるとその影響はほとんどない。

第 8 章 総括

本研究では、宇宙環境下で使用できるアーク溶接技術を確立するための基礎的な検討を試みることを目的とした。特に、真空環境下で使用可能な中空陰極アーク(Hollow Cathode Arc (HCA))に注目し、低圧下での HCA の放電特性やプラズマ特性、母材溶融特性、溶融メカニズムなど、HCA の溶接用熱源としての特性について検討した。また重力のアーク溶接現象に及ぼす影響についても検討した。

ここでは、本研究で得られた主要な結論について各章ごとに要約し、最後に宇宙溶接の実用化に向けた宇宙溶接研究に関する全般的な指針について述べる。

第 1 章は緒論であり、本研究をおこなう背景と研究の現状、問題点及び研究の方針について述べた。

第 2 章では、HCA の原理及び試作をおこなった実験装置について述べ、続いて、低圧下における HCA の放電開始特性や放電外観、電流電圧特性などの放電特性を明らかにすることを目的として実験的検討をおこなった。

得られた結果を以下に示す。

- (1) HCA を用いることで、低圧環境下でも 1kV 以下の電圧で放電を開始させることが可能である。また周囲圧力が約 27Pa 以下では、放電開始電圧はガス流量に依存し、ガス流量を増加させることで、放電開始電圧の上昇を抑制できる。
- (2) 低圧下での HCA 放電は、周囲圧力が低いためにプラズマ密度も低く、アークプラズマの放出する光が弱いために、明瞭には観察しにくい。また放電外観は、ガス流量の影響を大きく受け、ガス流量が少ない場合には、電極から母材にかけて円柱状にプラズマが形成される。
- (3) 中空陰極を使用した HCA の電流電圧特性は、アーク長やガス流量、周囲圧力、電極形状のプロセスパラメータに大きく影響される。ガス流量が少ない場合には、大気圧下の GTA のアーク電圧よりも 7~8V 高くなる。

さらに本章における点弧特性に関する検討の結果、及びこれまでの HCA プラズマに関する研究の状況¹⁷⁾から判断すると、HCA を用いることで、本研究でおこなった圧力範囲よりもさらに低い圧力下においても、アーク放電の点弧及び維持は可能であると思われ、宇宙空間においても十分に適用可能

であると推察できる。

第3章では、HCAを溶接用熱源として使用した場合の母材溶込み特性を明らかにすることを目的として、ステンレス鋼 SUS304 を用いた静止アークによる母材溶融実験とビードオンプレート溶接実験をおこなった。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 低圧下でのHCAによる溶込み形状と大気圧下でのGTAによる溶込み形状は大きく異なる。
- (2) HCAによる溶込みの特徴は、ガス流量が多い場合に、浅く広がった溶込みとなること、ガス流量が少なく電極内径が大きい場合に、溶融量の多い深い溶込みとなることである。
- (3) ガス流量が多い場合には、プロセスパラメータや母材中のS量とは無関係に、浅く広がった形状になる。アーク長が短い場合には、溶融池表面は電極先端からのガス流の影響を受ける。
- (4) 内径の大きい電極を用いたHCAの溶込み形状は、アーク長やガス流量、アーク電流のようなプロセスパラメータに大きく影響を受ける。HS材を母材に用いた場合、ガス流量が少なくアーク長が長い場合に、溶融量の多い深い溶込みとなる。
- (5) ビードオンプレート溶接実験による溶込み断面は、ガス流量に大きく依存し、ガス流量が少ない場合に、幅の細い深い溶込みとなる。LS材を用いた場合にも、高速大電流の条件下で溶接をおこなうことで、深い溶込みを形成することができる。

さらには、第5章で述べたようにHCAが方向性をもったエネルギー源であるとすると、宇宙空間のようなさらに低い圧力下では、粒子間の衝突がほとんどなくなるために、電子はエネルギーを維持したまま、母材へ突入することになり、より溶融量の多い溶込みとなることが期待できる。

第4章では、低圧下におけるHCAプラズマの特徴を理解するために、ラングミュアプローブ法を使用したHCAプラズマの電子密度、電子温度さらにはアーク柱内のプラズマポテンシャルの計測をおこなった。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 陽極に銅板を使用した場合、HCAプラズマの電子密度分布や電子温度は、ガス流量の影響を大きく受ける。
- (2) ガス流量が少ない場合には、電子密度分布は電極直下に集中するような分布となり、電子温度は電極先端からの距離に関係なくアーク中心軸付近で、45000Kを越える値を示す。

- (3) ガス流量が多い場合には、電子密度分布は電極・母材間の広い範囲に広がっており、電子温度に関しては、アーク空間内では位置に関係なく 15000~20000K 程度を示す。
- (4) 陽極にステンレス鋼板を使用した場合、電子密度分布は熔融池表面からの金属蒸気の影響を大きく受ける。しかし電子温度に関しては、陽極表面状態や母材中に含まれる微量元素の影響をほとんど受けない。
- (5) アーク柱内のポテンシャル分布は、ガス流量が少ない場合に、陽極よりも高いポテンシャルを示す。陽極からの金属蒸気が存在する場合には、さらにそのポテンシャルは陽極よりも高くなる傾向にある。

第5章では、第3章で得られた溶込み形状の形成メカニズムを明らかにすることを目的として、陽極表面上の電流分布領域及び陽極への入熱エネルギー、熔融池内の対流現象の観点から検討をおこなった。

得られた結果を以下に示す。

- (1) ガス流量が多い場合には、陽極表面上における HCA の電流分布領域は直径 50mm 以上と大きく広がる。したがって、入熱が広範囲に分散され、広く浅い溶込みを形成する。
- (2) ガス流量が少ない場合、HCA プラズマの電子温度は、GTA プラズマの電子温度よりもかなり高いために、陽極への入熱も大きくなる。このことが母材の溶融量が非常に多くなることの一つの要因である。
- (3) ガス流量が少ない場合に得られる深い溶込みは、熔融池内に発生している内向きの対流現象と密接に関わりがあることは明白であるが、その対流発生のメカニズム等については今後の検討が必要である。

第4章における電子温度の計測結果や本章での入熱エネルギーの検討結果から、HCA は高エネルギー密度の熱源であることが明らかになった。これは、第2章で示した HCA のアーク電圧がかなり高くなっていることが一因であると考えられる。今後、さらに高いアーク電圧を得ることができれば、さらに高エネルギー密度の熱源が得られるものと思われる。

第6章では、HCA を宇宙溶接技術として使用するという観点から、宇宙構造物の材料として、有望なアルミニウム合金への HCA の適用性について検討をおこなった。

得られた結果を以下に示す。

- (1) アルミニウム溶接に電極マイナスの直流 HCA を使用すると、電極から母材にかけて、ほぼ円柱状のプラズマが形成される。そのプラズマ通過後のアルミニウム表面には、金属光沢のある部分が形成され表面

の酸化膜が除去されているものと考えられる。

- (2) HCA と GTA を用いた場合の溶込み形状を比較すると、同じ電流値でも HCA を用いた場合の方が明らかに溶融量が多い。
- (3) HCA プラズマは、陽極にアルミニウムを使用した場合にも、入熱エネルギーの高い集中した熱源となる。
- (4) 引張り試験の結果、HCA を使用した溶接部の強度は、大気圧中の GTA による溶接部の強度と同等かそれ以上の強度を示す。

大気中のアーク溶接では、アルミニウムの溶接の場合、交流アークが一般的であったが、HCA を用いることで、電極マイナスの直流アークでも十分に溶接が可能であることが確認できたことは、実際の宇宙溶接技術として考えた場合に非常に有意義なことである。また電極マイナスの直流アークでアルミニウムの溶接をおこなえることは、溶接作業効率の向上を意味し、第5章で述べた高エネルギー密度の熱源であることと合わせて、地上での新しい熱源と成りうる可能性を秘めている。

第7章では、落下塔や航空機を利用した微小重力実験の結果から重力がアーク放電や溶融池形状に及ぼす影響について検討をおこなった。

得られた結果を以下に示す。

- (1) アーク放電の形態には、重力の影響はほとんど観察されず、微小重力環境下でも、地上と同様に母材を溶融させることができる。また HCA を用いることで、宇宙空間のような真空・微小重力環境下でもアーク溶接が可能である。
- (2) 重力は、溶融中の溶融池形状や凝固形状に大きな影響を及ぼす。すなわち微小重力下では、ほとんど溶融池表面や裏面の変位はない。逆に重力が大きくなると表面がアングダカットになり、裏面の垂れ下がりは大きくなる。
- (3) 微小重力実験の結果から重力の大きさが変化した場合、その影響は瞬時又は少なくとも 1/30 秒以内に溶融池形状に現れる。重力が地球上の 1/100 以下になると、重力による溶融池形状の変化はほとんどない。

このように、重力が溶接現象に及ぼす影響は、ほとんど予測していた範囲内のものであった。しかし、実際に宇宙溶接をおこなう場合には、溶接作業やオペレータの行動力に及ぼす微小重力の影響なども検討する必要があると思われる。

以上、本研究では、将来、宇宙溶接技術が必要不可欠になるであろうという観点から、宇宙空間で使用できるアーク溶接技術確立のための基礎的な検

討をおこなった。その結果、中空陰極アーク(HCA)を使用することで、宇宙環境下のような真空・微小重力環境下でもアーク溶接をおこなえる可能性があることを示した。さらにはHCAの熱源としての特性は、従来からのGTAと比べて、全く新しいものであることを指摘し、HCAがこれまでにない新しい加工用熱源となりうることを示した。

更に、宇宙溶接実用化のためには、今後も多くの研究を進めていく必要がある。中空陰極アークを宇宙溶接技術として実際に適用する場合に考えられる問題点や、宇宙溶接の実用化に向けた宇宙溶接研究に関する指針を述べる。

宇宙空間における中空陰極アークの適用に際して、最大の課題はアークの点弧であると思われる。アークの点弧及び維持が可能であれば、本研究で示したように中空陰極アークは溶接用熱源として十分使用可能であろう。第1章で述べたように、旧ソ連は宇宙空間において、中空陰極方式の低圧プラズマアークを使用した溶接実験に失敗している。その原因として、宇宙空間は無限の広がりをもつために、プラズマ形成用ガスが瞬時に拡散してしまい、十分な密度のガスを放電空間に確保できなかったことが挙げられている。このことは、HCAを適用した場合にも十分に考えられる。

このことに対する解決策としては、溶接トーチ周辺部に特別な囲いなどを取り付けて、ガスの拡散速度を制限すること³⁾や、溶接部全体を補助チャンバーで覆い圧力の高い空間を作り出すことなどが考えられる。

また近い将来における宇宙溶接の活躍の場は、宇宙ステーションや人工衛星などの補修作業であると思われる。これは、スペース・デブリ等の衝突の際に破損した部分の補修や長期間使用するための保全・再調整のためである。旧ソ連の経験による³⁾と、手動溶接では気密性の確保が極めて難しいと考えられ、機械化及び自動溶接の研究をさらに進めていく必要がある。また、安全や経済性を考慮しても人間が宇宙空間に出て直接作業するのではなく宇宙溶接用ロボットを送り出しステーションや地上から遠隔操作により溶接をおこなうことが必要であろう。以上のようなことから、溶接熱源とその溶接プロセスの研究以外にも宇宙溶接の実用化のためには、次のような研究をより一層進める必要があると思われる。

- (1) 実際に宇宙空間で溶接や検査等をおこなう作業用ロボットの研究・開発
- (2) 地上やステーション上から作業中のロボットなどを遠隔制御するためのテレサイエンスの研究
- (3) 宇宙溶接技術のための情報データベースやシミュレーション技術の開発

謝 辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科教授 黄地尚義博士の暖かい御指導と御鞭撻を賜って遂行し得たものであり、心から厚く御礼申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、大阪大学大学院工学研究科教授 大中逸雄博士，同大学接合科学研究所教授 牛尾誠夫博士，同大学大学院工学研究科付属超高温理工学施設教授 岡田成文博士より有益な御教示と御討論を賜り、深く感謝いたします。

日頃より、適切な御指導ならびに御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科助教授 平田好則博士，同大学大学院工学研究科助手 宮坂史和先生に心から感謝いたします。さらに、本研究の遂行にあたり多くの有益な御助言と御激励をいただきました大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

本研究の実験遂行にあたり御助言，御協力をいただきました高松工業高等専門学校教授 吹田義一博士，大阪大学接合科学研究所助手 田中学博士に感謝の意を表します。

本研究における実験装置の作成に際しては、松下溶接システム株式会社 浜本康司氏，片山尚彦氏，マイト工業株式会社 板野隆氏など関係各位から多大な御協力を頂き，心から感謝いたします。

非破壊透過試験に際しては，株式会社ジオトップ 廣瀬貞雄氏，非破壊検査株式会社 中村和夫博士，篠田邦彦氏に多大な御協力を頂き，ここに感謝の意を表します。

微小重力実験を遂行するにあたり多大な御支援を頂きましたダイヤモンドエア サービス株式会社，株式会社地下無重力実験センターの皆様方には深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり御協力頂きました，吉田和弘氏（現 株式会社 小松製作所），丸山敏和氏，福島小巻氏，小坂圭氏，太田雅司氏に深く感謝いたしますとともに，直接間接の御協力を頂きました黄地研究室の諸先輩，諸氏に厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが，これまでの研究生活に対し大いなる理解を示し，また日常生活を全面的に支えてくれた両親に心より感謝いたします。

参考文献

1. E.Paton, V.N.Kubasov: Experimental Welding of Metals in Space, Avt.Svarka, No.5, (1970) pp.7-12
2. B.E.Paton: Welding in Space, Welding Engineer, Vol.57, No.1, (1972) pp.25-29
3. B.E.パトン, V.F.ラプチンスキー (黄地訳): 宇宙の溶接, 産報出版 (2000)
4. B.Irving: Electron Beam Welding, Soviet Style: A Front Runner for Space, Welding Journal, Vol.70, No.7, (1991) pp.55-59
5. D.McKeown: Space welding in the Skylab, Welding Engineer, Vol.59, No.12, (1974) pp.18-20
6. T.A.Siewert, R.W.Heine, C.M.Adams, J.R.Williams: The Skylab Brazing Experiment, Welding Journal, Vol.56, No.10, (1977) pp.291-300
7. M.R.Johnsen: Space Welding Experiment Postponed Indefinitely, Welding Journal, Vol.76, No.4, (1997) pp.22
8. 増淵: 宇宙溶接について, 溶接学会誌, Vol.59, No.6, (1990) pp.29-35
9. F.Kuvin: Welding in space: questions remain, Welding Design & Fabrication, Vol.63, No.3, (1990) pp.22-24
10. 阿部, 安田, 藤原, 名山, 岡崎: 微小重力下の物理現象調査のための航空機実験, 三菱重工技報, Vol.27, No.6, (1990) pp.532-53
11. 貝原, 栗林, 丹治, 河内, 根崎: 微小重力下の金属の溶融挙動と溶接現象に関する研究, 石川島播磨技報, Vol.34, No.2, (1994) pp.109-114
12. K.Nogi, Y.Aoki: Behavior of Bubbles in Welding for Repairs in Space, Materials & Design, Vol.18, No.4, (1997) pp.275-278
13. K.Nogi, Y.Aoki, H.fujii, K.Namata, S.Kaiharu: Weld Formation in Microgravity, ISIJ International, Vol.38, No.2, (1998) pp.163-170
14. 吹田, 佃, 高木, 黄地, 増淵: 宇宙空間での GTA 溶接に関する研究 (第1報), 溶接学会論文集, Vol.11, No.3, (1993) pp.423-427
15. 安藤, 長谷川: 溶接アーク現象 (増補版), 産報 (1965)
16. L.M.Lidsky, S.D.Rothleder, D.J.Rose, S.Yoshikawa: Highly Ionized Hollow Cathode Discharge, Journal of Applied Physics, Vol.33, No.8, (1962) pp.2490-2497
17. J.L.Delcroix, A.R.Trindade: Hollow cathode arcs, Advances in Electronics and Electron Physics, Vol.35, (1974) pp.87-190
18. C.M.Ferreira, J.L.Delcroix: Theory of the hollow cathode arc, Journal of Applied Physics, Vol.49, No.4, (1978) pp.2380-2395

19. N.V.Shiganov: Some special features of arc welding with a hollow electrode in vacuum, *Welding Production*, Vol.20, No.9, (1973) pp.30-33
20. V.M.Nerovnyi, V.P.Fedichev, G.V.Pod'yapol'skii: Thermal Effect of the Low Pressure Welding Arc on the Heated Body, *Physics and chemistry of materials treatment*, Vol.22, No.2, (1988) pp.178-181
21. V.M.Nerovnyi, G.V.Pod'yapol'skii: A device for sampling the plasma in an arc discharge with a hollow cathode, *Automatic welding*, Vol.38, No.4, (1985) pp.39-41
22. V.M.Nerovnyi, G.V.Pod'yapol'skii, V.M.Yampol'skii: Parameters of the plasma in the internal space within an unconsumable welding arc discharge cathode, *Automatic welding*, Vol.38, No.12, (1985) pp.21-24
23. V.M.Nerovnyi: Special features of the excitation of welding arc discharge with a hollow cathode in vacuum, *Welding International*, Vo.14, No.8, (2000) pp.648-652
24. 黄地：溶接・接合プロセスの基礎，産報出版 (1996)
25. 八田：気体放電，近代科学社 (1968)
26. A.von Engal (山本，奥田共訳)：電離気体，コロナ社 (1974)
27. J.F.Lancaster (溶接学会溶接アーク物理研究委員会訳)：溶接アークの物理，黒木出版 (1990)
28. R.H.Huddleston, S.L.Leonard: *Plasma diagnostic techniques*, Academic Press Inc., (1965)
29. 堤井：プラズマ基礎工学 (増補版)，内田老鶴圃 (1997)
30. C.E.Jackson: The science of arc welding, *Welding Journal*, Vol.39, No.4, (1960) pp.129-140
31. 黄地，井上，西口：電子ビーム溶融プールにおける対流現象，溶接学会論文集，Vol.9, No.4, (1991) pp.501-506
32. 武田：気体放電の基礎 新訂版，東京電機大学出版 (1990)
33. N.A.Sanders, E.Pfender: Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs, *Journal of applied Physics*, Vol.55, No.3, (1984) pp.714-722
34. D. E. Gray: *American Institute of Physics (Third Edition)*, McGraw-Hill Book Company (1972)
35. H.A.Dinulescu, E.Pfender: Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs, *Journal of applied Physics*, Vol.51, No.6, (1980) pp.3149-3157
36. H.C.Ludwig: Arc Welding of Vacuum-and Inert-Atmosphere-Melted Zircaloy-2, *Welding Journal*, Vol.36, (1957) pp.335s-341s
37. H.C.Ludwig: Current Density and Anode Spot Size in the Gas Tungsten Arc, *Welding Journal*, Vol.47, (1968) pp.234s-240s

38. B.E.Paton: Intergrated mechanization is the most important factor in accelerating the production of welding structures, Automatic Welding, Vol.27, No.1, (1974) pp.1-6
39. C.R.Heiple J.R.Roper: Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry, Welding Journal, Vol.61, (1982) pp.97s-102s
40. W.Lucas, D.Howse: Activating flux increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes, Welding & Metal Fabrication, Vol.63, No.1, (1996) pp.11-17
41. Howard Woodward: International space station welding will be out of this world, Welding Journal, Vol.75, No.3, (1996) pp.34-40
42. 日本溶接協会編：新版ティグ溶接法の基礎と実際，産報出版（1992）

本論文に関する発表論文

投稿論文

- 「低圧下での GHTA 放電の特性と母材の溶融特性」, 溶接学会論文集, Vol.18, No.2, (2000) pp.272-279
- 「航空機を使用した模擬宇宙環境下での GHTA 溶接実験」, 溶接学会論文集, Vol.18, No.2, (2000) pp.228-235
- “Gas hollow tungsten arc characteristics under simulated space environment”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.6, No.1, (2001) pp.12-16
- 「低圧下における中空陰極アークの熱源的特性に関する研究」, 電気学会論文誌, Vol.122-A, No.1, (2002) (掲載予定)
- 「低圧下における Hollow Cathode Arc の溶接アーク現象」, 溶接学会論文集, Vol.20, No.1, (2002) (掲載予定)
- “Characteristics of Hollow Cathode Arc as a Welding Heat Source ---Arc Characteristics and Melting properties---”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.7, (2002) (to be published)

国際学会発表論文

- “Gas hollow tungsten arc characteristics under simulated space environment”, IIW Doc.212-968-00, (2000)
- “Hollow Electrode GTAW Experiments under Simulated Space Environments in a Flying Laboratory - Especially Arc Spot Welding of Stainless Steel Plates ---”, Space Bound 2000, (2000)
- “Characteristics of Hollow Cathode Arc as a welding heat source ---Ignition process and melting property---”, Proceedings of 4th European conference of welding joining and cutting, (2001) pp.429-434
- “Characteristics of Hollow Cathode Arc as a Welding Heat Source ---Penetration Mechanism by HCA method---”, Proceedings of 7th International Welding Symposium, (2001) pp.89-94

