

宇宙溶接技術の確立

大阪大学・接合科学研究所 野城清、藤井英俊
松本大平、青木祥宏、杉山裕之

1. はじめに

21世紀は宇宙開発の時代と捉えられており、各国が協調して国際宇宙ステーションの建造が進行している。本年2月1日にスペースシャトルコロンビア号の墜落事故により、その進行速度の見直しが行われているが、計画全体の大幅な変更は無いようである。

宇宙溶接技術は宇宙空間での大型構造物の建設、補修に不可欠な技術であるが、宇宙溶接技術に関する研究は宇宙空間が高真空、無重力の非常に特殊な環境であり、これまで宇宙開発を活発に行ってきた旧ソ連が主に実施してきた。しかし技術が軍事機密に属するため、それらの詳細は報告されておらず、実際に宇宙空間での溶接実験に関する報告は数件で微小重力環境のものを入れても20件に満たない^{1)・11)}。

宇宙空間における最初の溶接実験は、1969年旧ソ連のソユーズ6号にて小型溶接装置Vulcanを用いて実施された。溶接法として、中空電極を用いた低圧アーク(GHTA)溶接、電子ビーム溶接、溶極式低圧アーク溶接の3種類が選定された。初めに実施されたGHTA溶接法では、1mmのステンレス鋼、チタンの突合せ溶接が試みられた。しかしながら、地上での予備実験では良好に溶接を行うことができたのに対して、宇宙空間では高排気速度のため高電流アークを形成するプラズマの集束を行うことができず、低電流放電しか形成されなかったため、表面に少しの溶融傷を残すだけに留まった。次に行われた電子ビーム溶接法では、1.5-2.0mmの1Cr18Ni9Tiステンレス鋼、チタン合金、そして、AlMg-6アルミニウム

合金の突合せ溶接が行われた。その結果、良好とまではいかないが通常の溶接部形成を行うことができたと報じている。

また、コンピューターの急速な進歩にともない、産業界においては材料の製造・加工プロセスをあらかじめシミュレーションすることによって、より高性能な材料を高効率で得るための努力がなされている。プロセスをシミュレーションするためにはプロセスの正確なモデル化が要求される。

溶接の成否は溶融池形状に支配されるが、溶融池には重力、電磁力、プラズマ気流等の力が働き、地上ではその形状におよぼすこれらの力の影響を分離することが困難である。しかし微小重力(無重力)環境下では重力の影響を除外できるため、溶接現象を単純化できる。

本プロジェクトでは微小重力環境下でアークおよび電子ビームにより溶接実験を行い、宇宙溶接技術の確立および地上での複雑な溶接現象を解明することを目的とする。

2. 微小重力環境下における溶接現象の解析

2-1 微小重力環境を得る方法

溶接は溶融から凝固までが短時間で終了する非平衡プロセスであるため、現象の解析には長時間を要しない。

地上で微小重力を得る方法は航空機によるパラボリック飛行と自由落下による方法に大別されるが、微小重力のレベルを考慮し、本研究は自由落下による方法を採用した。図1に

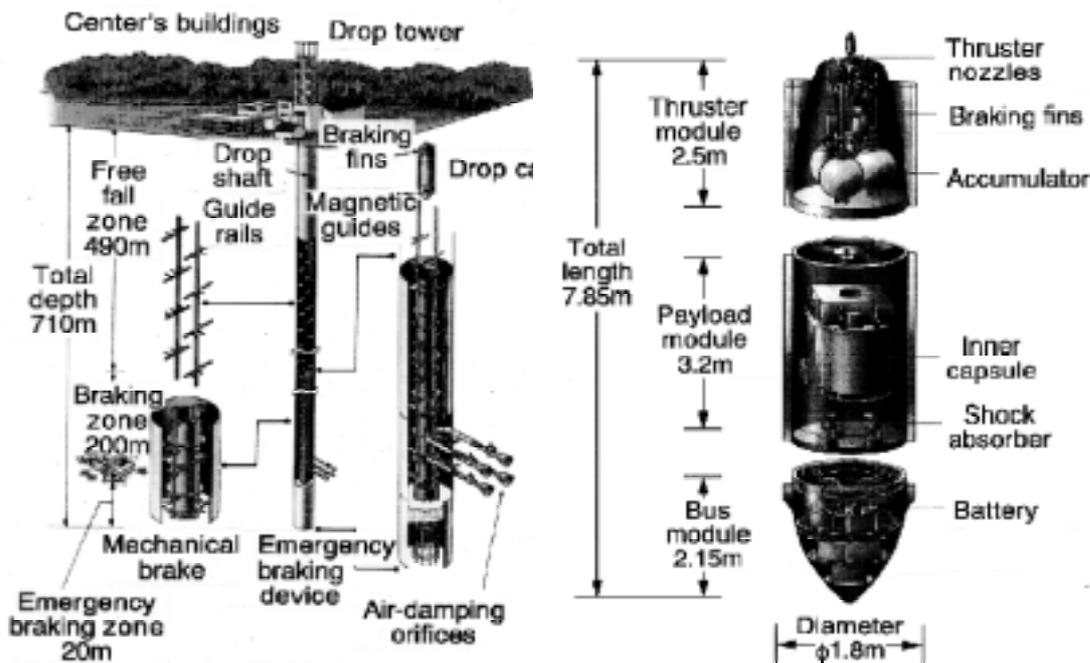


図1 地下無重力実験センター施設概要

本研究で採用した落下施設の概要を示す。

この落下塔は $10^{-5}G$ といった高品質な微小重力環境を 10 秒間に渡って得ることができ、地上施設としては世界最長時間提供することが可能な施設である。

この落下塔は 490m の自由落下部分と 220m の制動部分で構成されている。また、落下カプセルは二重構造となっており、実際に装置を搭載するのは内カプセルの中である。高品質な微小重力環境を得るために、外カプセルには空気抵抗を相殺するためのスラスタノズルが装着され、さらに外カプセルと内カプセルとの間を真空にし、カプセル落下中は内カプセルが外カプセル中を自由落下する仕組みとなっている。カプセルの総重量は約 8000kg、直径約 1.8m、長さ約 7.8m であるが、内カプセルに搭載する装置は以下に示すような条件を満たすことが要求されている。

- 1) 容積は $870^l \times 870^w \times 918^h$ mm 以下であること。
- 2) 重量は 500kg 以下であること。
- 3) 全自動運転が可能なこと。
- 4) 制動時の重力レベルである 8G に耐えうること。

上記 1)~4) の制約に加えて、供給される電力は最大 100V, 8A × 15 分であるために、これ以上の電力を消費する場合にはバッテリーを搭載する必要があるが、その容積、重量は上記制約 1) および 2) に含まれる。これらの制約は通常の電子ビーム溶接装置にとっては克服が非常に困難であるが、実際に装置を宇宙空間に持ち出すことを想定しても、装置の小型・軽量化は非常に重要であり、解決しなければならない問題である。

2-2 微小重力用溶接装置

微小重力用溶接装置は上記の制約を満たす必要があるため、図 2 に本研究で使用したガスタングステンアーク溶接装置の外観を示す。この装置は、溶接チャンバ、制御装置、ガスボンベ、溶接電源（ダイデン社製 TIGTAC200EP）、バッテリー（GSEE 製 無停電電源装置 BM3000FND）によって構成されている。



図 2 ガスタングステンアーク溶接装置

溶接チャンバ内は、試料固定台、溶接トーチ、溶接トーチ駆動装置、CCD カメラ等が搭載されている。これらはセッティングにより自在に溶接方向を変えることが可能な設計となっている。

溶接電源は、小型直流ティグアーク溶接電源であり、それに送る電力供給用バッテリーは AC100V, 3000VA 仕様のもを用いている。極性は電極の消耗が少ない DCEN（直流正極性）を用いた。

2-3 溶接試料および溶接条件

本実験で用いた溶接試料は電子ビーム溶接時と同様に純 Al（99.999%）およびアルミニウム合金 A2219 である。

試料形状も同様に、ビードオンプレート溶接では $100^l \times 50^w \times 3^t$ mm、突合せ溶接では各 $100^l \times 25^w \times 3^t$ mm である。試料は、エメリー紙（#220）で研磨後、アセトン中で超音波洗浄を施し脱脂を行った。突合せ溶接においてはルート面のみエメリー紙（#220, #400, #800）を用いて研磨を行った。

本研究での溶接条件を表 1 に示す。

表 1 ガスタングステンアーク溶接条件

Parameter	Condition
Arc current, A	40, 60, 80
Arc voltage, V	20~26
Welding speed, mm/sec	4, 5, 6
Welding position	flat, horizontal
Arc length, mm	3
Shielding gas	He
Shielding gas flow rate, m ³ /sec	1.7×10^{-4}

溶接実験として以下の 2 種類の実験を行った。

- 1) 2219 のビードオンプレート溶接
- 2) 219 合金と純 Al（99.999%）の突合せ溶接

3. 結果および考察

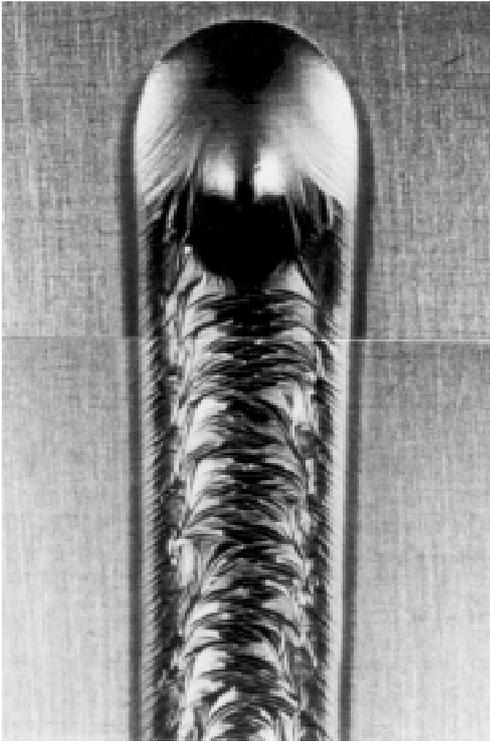
3-1 溶接部形状におよぼす重力の影響

図 3 にアルゴンシールドガスを用いた立向き上進のビードオンプレート溶接部外観を示す。地上環境では図 3 (a) に示すように表面は酸化膜で覆われているがリップルの規則的な分布が明瞭に観察された。一方、微小重力環境では図 3 (b) に示すように、リップルは現れずに不規則な皺が観察された。

以上の結果より、アルミニウム合金を GTA 溶接する場合、地上環境では、表面に酸化皮膜があっても重力による流れの影響が大きく、微小重力環境では重力による対流以外の因子（酸化皮膜、アーク圧力、電磁対流、プラズマ気流）が支配的となり、特に凝固時は酸化被膜の影響により不規則な起伏が生じると考えられる。

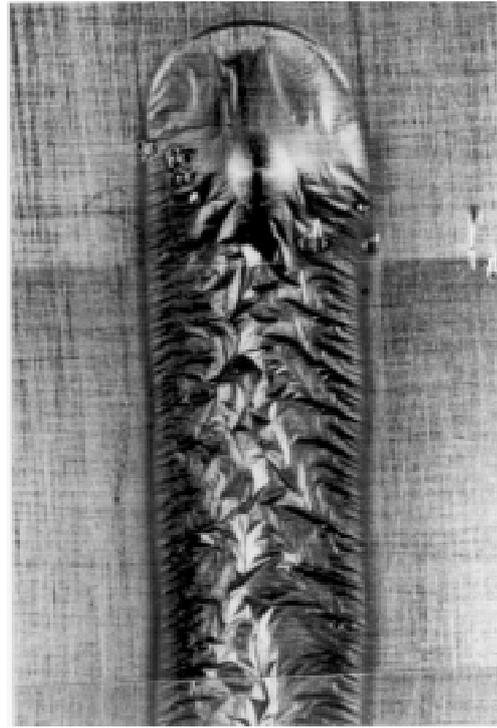
図 4、図 5 にアルゴンシールドガスを用いた溶接ビード断面を示す。図 4 はビードオンプレート溶接部であり、図 5 は突合せ溶接部である。溶接方向は溶接部形状が重力の影響をもっとも受けると考えられる横向き溶接を採用した。地上環境では、図 4 (a)、図 5 (a) に示されるように溶接部断面上部では薄く、下部では厚くなっている。一方、微小重力環境では、図 4 (b)、図 5 (b) に示されるように、溶接部は変形しているが上部、下部ともほぼ同じ厚みである。これらの違いは熔融金属の重力方向への流れの有無によるものである。

(a) 1G



4mm

(b) $10^{-5}G$



4mm

図3 GTAによる立て向き上進溶接時のビード形状

(a) 1G

(b) $10^{-5}G$

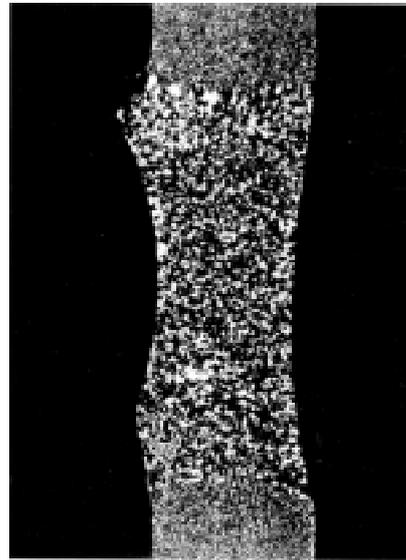
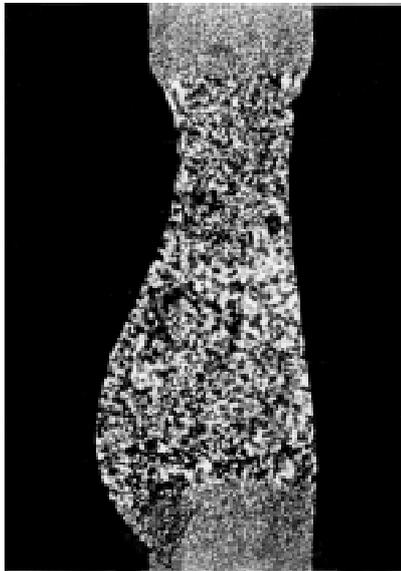


図4 GTAによるビードオン溶接時の溶接部断面の形状におよぼす重力の影響

アルゴンシールドガスを使用した場合，両環境での溶接部形状の違いがビードオンプレート溶接部より突合せ溶接部の方が大きい．これはアーク圧の影響を突合せ溶接部の方が大きく受けやすいことを示している．その理由として，本研究

では試料の固定による保持力が弱かったためであると考えられる．また，突合せ溶接部には，ルート面の影響であると考えられる気孔が観察された．また図5の矢印に示すように突合せ溶接時においてはいずれの環境下においても溶接部に

(a) 1G

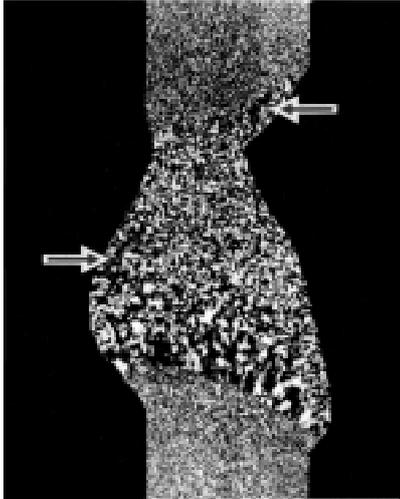
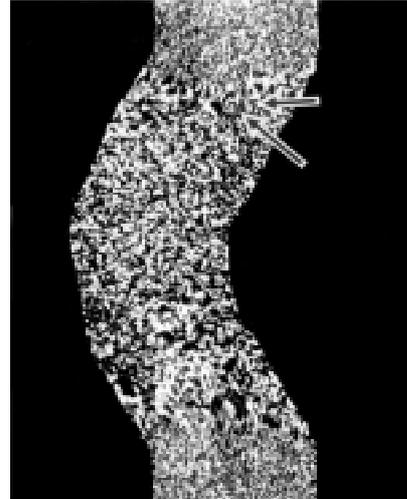
(b) $10^{-5}G$ 

図5 GTAによる突合せ溶接時の溶接部断面の形状におよぼす重力の影響

気泡の存在が確認された。気泡の生成は特に微小重力環境においては密度差による浮上・除去が期待できないため、その生成機構の解明および除去方法の確立が宇宙溶接技術の確立のためには重要な課題となってくるものと思われる。

4. まとめ

本研究ではGTA(ガスタングステンアーク)溶接装置の試作および試作した装置を用いた溶接実験を地上および微小重力環境下で行い、以下の点を明らかにした。

- 1) 試作した全自動小型GTA溶接装置は制動時の8Gの重力に耐え、支障なく作動することを明らかにした。
- 2) 地上、微小重力環境下で同一条件で溶接を行った結果、微小重力環境下における溶融池形状は地上で得られたものよりも平坦であることが明らかとなった。
- 3) 地上環境ではリップルの規則的な分布が明瞭に観察されたが微小重力環境ではリップルは現れずに不規則な皺が観察された。

5. 文献

- 1) B.E.Paton: WELDING IN SPACE, Weld. Eng., 57(1972), No.1, 25
- 2) B.E.Paton and V.F.Lapahinskii: WELDING in SPACE and RELATED TECHNOLOGIES, Cambridge Int. Sci. Pub. (1977)
- 3) B.Irving; Weld. J., 70(1991), 55
- 4) M.Nance, J.E.Jones; ASM Int., 6(1993), 1020
- 5) T.A.Siewert, R.W.Heine, C.M. Adams Jr, and J.R. Willams: Weld. J. 56(1979), No.10, 291
- 7) R.E.Mueller and W.W.Duley: ICALEO,(1993), 755
- 8) R.G.Keanini and B.Rubinskii: Weld. J., 69(1990), No.7, 41
- 9) K.Masubuchi, A.Imakita and M.Miyake: Weld. J., 67(1988), No.4, 25
- 10) 阿部義人、安田千秋、藤原誠、名山理介、岡崎洋：三菱重工業技報、27(1990), 532
- 11) 貝原正一郎、栗林宗孝、丹治彰、河内啓輔、根崎幸二；石川島播磨重工業技報、34(1994), 109

