特別講演内容

宇宙溶接について*

増 淵 興 一**

Welding in Space*

by Koichi Masubuchi**

キーワード：宇宙溶接，宇宙ステーション，宇宙基地，遠隔溶接，無人溶接

1. ま え が き

今回溶接学会の第 57 期通常総会において推薦会員に選ばれ、引き続いて開催された春季全国大会において宇宙溶接について特別講演をする機会を得ましたことは小生にとりまして誠に光栄に存ずることです。この原稿は特別講演の内容を主体として取りまとめたものです。

私が初めて渡米したのは 1958 年（昭和 33 年）のことで、1968 年以来マサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute of Technology) の海洋工学科 (Department of Ocean Engineering) で材料及び建造法の講座を担当しております。また材料理工学科 (Department of Materials Science and Engineering) の教授も兼任しております。

宇宙溶接の現状を一言で表現すれば「夜明け前、それもまだ真つ暗の夜空の東の方がかすかに白くなって来た時」のようなものであり、今後どのように事態が展開して行くのかは誰にもわからない。1990 年代には現在計画されている宇宙ステーションが打ち上げられるであろうし、その後は更に大きな宇宙構造物が建造されることになるであろう。そうすれば溶接などこれらの建造物を建造したり修理したりする技術そしてその研究もどうしても必要となり、本文では現在までにわかっている限られた知識について述べるだけでなく、宇宙溶接に関連した技術の発展の動向を述べる。

2. 宇宙開発と溶接技術

宇宙溶接について述べる前に宇宙開発、特に米国における宇宙開発の概要を溶接技術に関連したことに重点を置いて述べる（表 1 参照）。

宇宙開発の始まり。宇宙開発が広く一般社会の人達にとって現実のものとなったのは、1957 年にソ連が最初の人工衛星スプートニク 1 号を打ち上げた時からである。翌 1958 年には米国も第 1 号人工衛星エクスプローラ 1 号を打ち上げ、従来からあった国立航空諮問委員会 (National Advisory Committee for Aeronautics) を拡充改組して航空宇宙庁 (National Aeronautics and Space Administration) を発足させた。続いて 1961 年にケネディ大統領は 10 年以内に月に人間を着陸させると言うアポロ計画を発表した。

アポロ計画と溶接に関する諸問題。アポロ計画に使用されたロケットはサターン 5 型で、その高さは 110 メートルもあり現在までに米国で使用された宇宙ロケットの

表 1 宇宙開発に関する主要事項の一部

	<u>U. S. A.</u>	<u>U. S. S. R.</u>
1957		Sputnik I
1958	NASA Explorer I	
1969	Appollo moon landing	Soyuz 6 welding
1973	Skylab	
1982	Space Shuttle "Columbia"	
1983	MIT Study	
1986	"Challenger" explosion Space Station Working Group	
1989	MSFC Workshop	

*原稿受付 平成元年 11 月 13 日，平成元年 4 月溶接学会春季全国大会にて特別講演

**推薦会員 マサチューセッツ工科大学教授，Guest Member, Professor, Massachusetts Institute of Technology

中で最大のものである（詳細は参考文献1~4参照）。

燃料を満載して月に向かって出発する場合の重量は約2600トンあるが、その自重は約170トンしかなく、非常に多重の燃料（ケロシン及び液体水素）及び酸化剤（液体酸素）を使用する。これは地球の重力圏を脱出するために巨大なエネルギーを必要とするからで、当然これらの燃料及び酸化剤を貯蔵する大きなタンクが必要である。その材料としては軽くて、かつ低温における靱性の優れたアルミニウムが選ばれ、2219及び2014合金が広く用いられた。これらのタンクは溶接建造でガスティングステンアーク（GTA）及びガスメタルアーク（GMA）溶接法が使用された。

アポロ計画は大体において計画通り進行し、1969年にはアポロ11号が月面着陸を達成した。しかしこれだけの大規模で複雑なプロジェクトともなると、いろいろな問題も発生した。2000番系のアルミニウム-銅合金は航空機体用には以前から広く使用されていたが、航空機体は主として鋳構造であり、サターン5型のような巨大な構造物を全溶接で建造すると言う経験はなかった。そのため溶接に関しては（1）ブローホールが発生しやすい、（2）熱処理合金を使っているのに継手強度が母材より低下する、（3）溶接変形を生じやすいなどの問題が起き、これらの問題を解決するためにNASAでは多額の研究費を注ぎ込んだ¹⁻⁴⁾。

宇宙環境での溶接実験。宇宙環境での溶接に関する実験であるが、1969年にソ連がソユーズ6号人工衛星の飛行中に行ったものが最初である。米国は1973年にスカイラブ（Skylab）の中で溶接に関連したいくつかの実験を行った。スカイラブ計画ではサターン5型のロケットの本体を利用してその内部に実験室を作り地球の上空を人工衛星のようにまわらせ多くの実験を行った。溶接に関連した実験についてもう少し詳細を後述する。

スペースシャトル計画。1980年代にはいつてからの米国における有人宇宙飛行計画の主体はスペースシャトルである。1982年にはその第一機コロンビア号が宇宙飛行を行った。溶接技術の面ではスペースシャトルはサターン5型の延長と見てよく、その頃はアルミニウムの溶接技術も確立されており特に問題は無かった⁴⁾。

宇宙ステーション計画の初期。1980年代に入ってスペースシャトルの次の有人宇宙計画として宇宙ステーション（宇宙基地）が検討されるようになった。計画の発端は1992年がコロンブスがアメリカ大陸を発見して丁度500年になるのでその記念事業の一端として考えられたが、実行はこの予定より遅れている。またこの計画はアメリカだけでなく、日本、カナダ、及び西ヨーロッ

パ諸国（EC諸国）と共同することになった⁵⁾。

1982年秋に「宇宙ステーションが建造された場合その中でどんな研究をしたら良いか」についてNASAは全米で研究案を公募した。1000件以上の申し込みがあり、300件以上の公式提案が提出されたが、その中で18件が採用になった。この18件は物理、化学、生物学、医学など広い分野にわたり、工学関係は3件でMITの私の研究室から提出された溶接に関する研究案がはいっていた。これらの18件のテーマについては1983年に初期研究が行われた。MITからは“Feasibility of Remotely Manipulated Welding in Space—A Step in the Development of Novel Joining Technologies”と言う最終報告書をNASA本部のOffice of Space Science and Applicationsに提出した⁶⁾。この報告では以下の点について述べている：

- (1) 宇宙において予想される接合を必要とする業務
- (2) 宇宙溶接において要求される自動化及び無人化
- (3) 宇宙溶接に関する新しい接合法及び機器
- (4) 将来行うべき研究開発計画。

この研究の成果についてはもう少し詳細を後述する。

チャレンジャー号の爆発事故及びその後の状況。1986年にスペースシャトルのチャレンジャー号が発射時に爆発すると言う大事故が起りNASAの予算の大きな部分な代替のスペースシャトルを建造することに使われ、宇宙ステーションをはじめ多くの計画が大幅に遅れた。1986年にはNASAの内部にSpace Station Working Groupと言う組織ができ、私は“On-Orbit Joining Technology for Maintenance and Construction”と言う題で講演をした。一方NASAのジョンソン宇宙センターでは以前からSatellite Services Working Groupがあり従来は主としてスペースシャトルのサービス及びメンテナンスを検討していたが、最近宇宙ステーションに主題が移りつつある。私の知っている限りでは現在の段階では溶接を含め宇宙での建造及び修理技術をいかに開発すべきかについてNASAとして統一された案は確立されていない。宇宙構造物への溶接の使用についてのNASAの現在での見解は以下のように要約できる。：

- (1) 現在計画中の宇宙ステーションの建造は主として機械接合により、溶接は使用しない。
- (2) しかし宇宙ステーションの中で溶接に関する実験を行う確立は高い。
- (3) 宇宙ステーションの修理には溶接を使用せざるを得ないのではないか。
- (4) 宇宙ステーションよりも将来の計画ではより大き

な宇宙構造物が必要で、その際は溶接を使用することがどうしても必要になる。

3. 宇宙環境での溶接実験

ソ連での実験. 宇宙環境における溶接に関する実験を最初に行ったのはソ連で、1969 年にソユーズ 6 号の飛行中であった。その内容について西側で発表されたものとして参考文献 7) がある。この論文は主として米国の宇宙開発について述べているのでソ連での研究については省略するが、研究の対象となった溶接法と材料とは下記のごとくである：

溶接法：電子ビーム溶接

プラズマアーク溶接

消耗アーク (GMA) 溶接

材 料：ステンレス鋼

アルミニウム合金

Al-Cu 合金

チタニウム合金。

その後もソ連では宇宙溶接について実験をおこなっている。例えば 1984 年頃サリュート 7 号の飛行中に手持ちの電子ビーム溶接装置を使って溶接に関する実験をおこなったという。

米国での実験. 米国では 1973 年にスカイラブの中で宇宙溶接に関連した実験を行った。これらの実験は下記の 3 種類である：^{4,6,8)}

(a) 金属溶融実験 M 551

(b) ろう付け実験 M 552

(c) 球作製実験 M 553.

金属溶融実験では電子ビームを用いて金属が無重力の下でいかに溶融するかを調べた。材料としてはアルミニウム合金、ステンレス鋼、及び酸化トリウムを散らせたニッケルの 3 種類が用いられた。**ろう付け実験**では無重力下で管のろう付けがどのように出来るかを検討した。熱源としてはテルミットを使用した。**球作製実験**では電子ビームで溶解された金属がいかに完全な球状に凝固するかを調べた。米国ではその後宇宙環境における溶接に関連した実験は行われていない。

4. MIT における宇宙溶接に関連する研究

前述したように MIT の私の研究室では 1983 年に NASA のスポンサーで宇宙溶接に関する研究を行った^{6,9)}。これが契機となり今日までいろいろの形で宇宙溶接に関して研究を行って来たので、その概要を述べる¹⁰⁾。

4.1 宇宙溶接に関する文献調査及び溶接について

私の研究室では 1983 年以来宇宙溶接に関する文献についての調査を継続的に行っている。調査は MIT の図書館にあるデータベースを主体にし、その他に色々な形で入手した情報を追加している。当然の成り行きとして米国を含めたアメリカ大陸及び西ヨーロッパ諸国の資料が多く、ソ連を含めた東欧圏や、日本、中国などの情報は限られている。

宇宙溶接に関する研究論文が書かれるようになったのは 1960 年代のことで、スコルハマーが 1963 年に発表した宇宙での電子ビーム溶接に関する論文¹¹⁾が学会で発表された論文として最初である。表 2 は宇宙溶接に関する文献を国別及びプロセス別に分類したものである¹⁰⁾。この表は 1986 年に行った調査の結果で全体で 125 の論文があった。1989 年の調査ではその後約 15 増えているようである。

国別で言うと米国とソ連とが圧倒的に多いが、これは宇宙開発がこの二国を主体に行われていることから当然理解出来ることである。非常に特徴にあることは日本の論文が全く無いことである。日本は長い間溶接に関する研究が盛んでほとんどの分野で多くの論文が書かれているにも拘わらず宇宙溶接に関するものは皆無である。1990 年代に打ち上げられる予定の宇宙ステーション計画には日本も参加する予定であるから、近い将来に宇宙溶接に関する研究が日本でも盛んになるのでは無からうか。

表 2 について溶接法と言う面から検討して見ると、電子ビーム溶接に関する文献がもっとも多い。宇宙は真空であるから電子ビーム溶接が適しているのではないかと誰でも思うことである。前述したソ連及び米国ですで行った宇宙環境での実験でも電子ビームに関する実験が入っている。しかし電子ビーム溶接を宇宙ステーション内で使うことに関しては以下の様な問題を解決する必要がある：

- (1) 高い電圧を使用するが、充分電源があるか、
- (2) いかにして作業員の安全を確保するか、
- (3) いかにして精度の高い継手開先を得るか、

ろう付けについても関心が強い。宇宙溶接では使用可能な電力に厳しい制限があるのでテルミットのように溶接に必要なエネルギーを内蔵した溶接システムの利用度は高いと思う。圧接、超音波溶接、摩擦溶接など熔融金属を使用しない Cold Welding も宇宙溶接には適している。たとえば、MIT では真空中で摩擦溶接の実験を行ったが良好な結果が得られた¹²⁾。ただし、地上で一般に使用

表2 宇宙接合に関する文献の接合法別及び国別の分類

PROCESS	COUNTRY				TOTAL
	U. S. A.	U. S. S. R.	EUROPE	UNKNOWN	
ELECTRON BEAM WELDING	20 (4)	8 (9)	1	1 (1)	30 (14)
CONSUMABLE ELECTRODE WELDING	(1)	1 (7)	(1)		1 (9)
PLASMA ARC WELDING	(1)	(7)			(8)
COLD WELDING	7 (1)			(1)	7 (2)
SOLAR WELDING	(1)	2 (1)		1 (1)	3 (3)
EXPLOSIVE WELDING	2				2
DIFFUSION BONDING		1			1
OTHER METHOD OF WELDING	1 (1)		1	(1)	2 (2)
BRAZING AND SOLDERING	6 (3)	(2)	9 (4)	(1)	15 (10)
BEAM BUILDER	15				15
WELDING IN GENERAL*	11	26	11	1	49
TOTAL	62	38	22	3	125

() = Studied in "WELDING IN GENERAL"

しているこれらの溶接装置は非常に重いので、宇宙で使用するには思い切った軽量化が必要である。

地上における溶接では各種のアーク溶接法が圧倒的に広く使われている。こうしたアーク溶接法が宇宙溶接に適しているかどうかについてはいろいろと議論がある。アークの周囲の圧力が低下するとアークは段々大きくなりポーツとしてきて不安定になり、ある程度以下の圧力ではアークを発生、維持することができなくなってくる。それではアークの周囲に少量のガスを吹き付けアークの安定化を図ってはどうかと言う意見もある。私の個人的な意見ではガスタングステンアーク溶接を使用する可能性はあるが、複雑な溶融金属の移行を伴うガスマタルアーク溶接を宇宙で使う可能性は非常に少ないと思う。

スタッド溶接はアーク溶接と言っても圧接に近く溶融金属の移行がほとんど無くした全作業が自動化されているので宇宙での完全自動溶接に適していると思う。MITではスタッド溶接の宇宙での応用に関連してある程度の基礎実験を行った^{10,13)}。

なお参考文献14)は1966年に書かれたものであるが、9種類の溶接法について宇宙で使用した場合の長所および問題点について詳しい検討をしている。

4.2 宇宙溶接作業についての検討

4.2.1. 溶接の必要性の吟味。第一に宇宙における金属の溶接は本当に必要なのであろうか、あるとしたらどんな用途があるのかを考えて見る必要がある。溶接が機械接合や接着 (Adhesive bonding) に比べて優れている点は：

- (1) 広い温度範囲で強度の高い継手がえられる、
- (2) 継手の剛性が高い、
- (3) 気密及び水密性の高い継手が得やすい、

しかし、溶接には次の様な問題点もある：

- (4) 溶接と一口に言っても多くの方法があり、ひとつの方法を使うにしても材料の種類、板厚などにより溶接材料、溶接条件などを変える必要がある、
- (5) 溶接に際して高熱を使用するので材料が変質し、また残留応力や変形を生ずる、
- (6) 溶接作業を行うのに熟練を要する、
- (7) 溶接作業と一口に言っても以下のように異なった作業を必要とする：

- a) 部材を切断し接合面の開先を作製する、
- b) 溶接すべき部材を取り合わせ、溶接中移動しないように保持する、
- c) 溶接部の近くの表面を清浄にする、
- d) 溶接作業を行う、
- e) 溶接部の検査を行う。

従って溶接で工事を行う場合、溶接に関する熟練者の他に切断、取付け、非破壊検査などの熟練者を必要とする。地上での工事の場合はそれぞれの熟練者を容易することはそれほど困難ではないが、宇宙では作業員 (宇宙飛行士) の数は非常に制限されている。従ってこれほど面倒な事までして溶接をする必要があるのかと言うことが検討されることと思う。

4.2.2. 予想される溶接作業。宇宙で必要とされる溶接作業は勿論多種多様にわたるが、大別すると以下に分類

される：

第 1 種：機器その他の簡単な修理，製作，取付けなど。

第 2 種：主要構造物の修理。

第 3 種：構造物の宇宙での建造。

第 1 種は簡単な溶接作業でその一部のものは溶接作業に関して何ら経験のない作業員（宇宙飛行士）でも実施できると思う。私の研究室ではかねてより水中溶接の自動化について研究をしており，その一環としてインスタマティック溶接システムと言うアイデアを開発した⁹⁾。図 1 にその数例を示す。ここに示したような簡単な溶接作業ならば完全に無人化された器具で作業者が始動ボタンを押すだけで溶接が可能であろう。この考え方は最近におけるカメラ産業の傾向からヒントを得たものである。もう 15 年以上前になると思うがコダック社がインスタマティックカメラと名づけた簡単なカメラを開発したが，それが契になって世界中のカメラメーカーが誰でも操作できるカメラの開発を盛んに行った。初めのうちはその性能は余りよくなかったが，段々と性能が向上し最近のカメラは非常に高性能であり，最近では大型の高性能のカメラは一部のプロフェッショナル以外は使っていない。私の基本的な考えもこれと同じで，完全に無人化された溶接システムの開発が可能であると思う。初めは簡単な作業しか出来ないと思うが段々複雑な作業もできるものが開発できると思う。MIT の提案が NASA で採択された大きな理由はこのアイデアが受入られたものと思っている。

第 2 種の主要構造物の補修に関して NASA の関係者が非常に心配しているのは隕石その他の異物が宇宙ステーションに衝突して構造部材を破損する（例えば壁に穴をあける）ことである。最近グラマン社が NASA から依頼でこの問題について研究をおこなった¹⁵⁾。

第 3 種の大型構造物の溶接による新造はいずれは行われるであろうが，大分将来（例えば 2020 年代）のことになると思う。

4.2.3. 宇宙溶接作業の環境。宇宙空間での溶接作業が地上でのそれと異なることは：

(a) 真空中に非常に近い

(b) 重力が非常に小さい（スペースステーションの自転によりある程度の遠心力が発生する）

(c) 温度について言うと，太陽に向いている側の温度はかなり高いが，反対側の温度は非常に低い。ただしこれらの状態は宇宙ステーションのどこで溶接作業を行うかによって異ってくる。典型的な例として以下の三つのケースが考えられる（表 3 参照）：

ケース 1：完全に宇宙ステーション外での作業

ケース 2：宇宙ステーション上ではあるが外部に暴露している場所での作業

ケース 3：宇宙ステーション内の居住区での作業。

ケース 3 では後述するように居住区での環境汚染について非常に厳しい制限があると思われるので居住区での溶接作業が行われることは稀であると思う。

最も多くありそうなのはケース 2 である。宇宙ステ-

図 1 インスタマティック溶接システムの数例

表3 宇宙溶接建造の特長

(1) DIFFERENCES IN ENVIRONMENTS

	SPACE			EARTH
	Case 1 OUTSIDE SPACE STATION	Case 2 IN A CHAMBER INSIDE SPACE STATION	Case 3 INSIDE SPACE STATION	
GRAVITY	ZERO	ZERO	ZERO	ONE
ATMOSPHERE	VACUUM	VACUUM	AIR	AIR
TEMPERATURE	EXTREME	ROOM TEMPER- ATURE	ROOM TEMPER- ATURE	ROOM TEMPER- ATURE
SPACE SUIT	YES	NO	NO	NO

(2) REMOTENESS FROM THE EARTH

(A) TELEPRESENCE OF EXPERTS

(B) REMOTE MANIPULATION

(C) PACKAGING OF OPERATIONS INVOLVED IN

WELDING FABRICATION—"INSTAMATIC"® SYSTEMS—

ション上でありかつ外部に暴露している箇所、普通の家で言えばガレージで外部へ戸を開け放ったような状態で溶接作業をする確立は高いと思う。

ケース1で溶接作業をすることはいつかは行わなければならないであろうが、大分将来のことと思う。

宇宙ステーションには全体で8人ぐらしか乗員がおらず、しかもこの人数で何から何までしなければならぬから宇宙飛行士に溶接の技術まで要求することは極めて難しい。勿論溶接の必要が出たときに溶接の出来る宇宙飛行士をシャトル便で送ることは可能であるが溶接に関しては限られた知識と技能をもった作業員を使って溶接作業をできるようにして欲しいと言う強い要求がある。その方法としては次のことが考えられる：

- (a) エキスパートの遠隔存在、
- (b) 遠隔操作による溶接、
- (c) 溶接作業のパッケージングによる無人化、

第1は地球上、例えばジョンソン宇宙センターに溶接の専門家を呼んでおいて、宇宙飛行士と電話で話をして適当な指示を与えることである。第2は原子力関係の作業に良く使われているようなマスター／スレーブ遠隔操作装置を利用することである。第3はインスタマティック溶接システムのような溶接に関連したいろいろの作業を組み込んだ無人溶接装置を開発して使用することである。実際には以上の方法を組み合わせた方式が取られるのではないかとおもう。

マスター／スレーブ方式の遠隔システムを宇宙溶接に

使用した場合の基礎実験をMITで行ったが、地上と宇宙とでは距離が大きくマスター／スレーブでは溶接のようにデリケートなコントロールを必要とする場合には向かないと言う結論が出た⁹⁾。

4.2.4. 宇宙作業における特殊な制限。宇宙で溶接作業を行うに際しては地上では考えられない様な制限がある。そのいくつかについて以下に述べる：

(1) 電力の制限及び電源に対する衝撃的影響。宇宙ステーションでは電力が極めて制限されている。電力は主として太陽電池により50 KVA位と言われているが、この量はアメリカの一軒の民家にある電源の量と大体同じ位に過ぎない。しかも溶接の特徴は大電流をほんの短期間使用するので、電源に対して衝撃的影響を与え近傍にあるコンピュータなどデリケートな電子機器を狂わすことがある。

(2) 環境汚染に関する厳しい制限。溶接に際してはガスを使用したり、スパークを出したり、熱を発生したり、音を出したりする。一方宇宙ステーション、特に居住区内においては環境汚染について非常に厳しい制限を設けることになる。

(3) 限られた人力。前述した様に宇宙ステーションの乗員は8人位と言われている。しかも乗員にかかる費用は非常に高いのでこれらを出るだけ大切な実験や観測に利用し、溶接など修理作業は出来るだけ機械によって行いたいと言う要望が強い。

紙面の関係上これ以上の議論は行わないが宇宙での溶

接作業を行うにあたって多くの問題を解決する必要がある。

5. 将来の可能性, 宇宙溶接技術の他への応用

本文の冒頭で述べたように宇宙溶接技術の現状を一言で言えば夜明け前のようなものである。今後どのように発展して行くかは誰にもわからないが, 1990 年代には宇宙ステーションが建設される計画であるし, 将来にはさらに大きな宇宙構造物が建設され使用されることになるであろう。こうなればいづれは宇宙空間で溶接を使った修理や構造を行わざるを得ない。

私の意見としては宇宙溶接を成功させる鍵は溶接に伴ったいろいろな作業をすべて含め, かつ完全に無人化された“Integrated and automated fabrication system”を如何にして開発するかにあると思う。もしこうしたシステムが開発されれば, 水中工事, 高所での工事, 原子炉の修理など多くの方面に利用できると思うが, 紙面の関係もあるのでここでは省略する。

6. あ と が き

宇宙溶接の現状についてについて簡単に述べた。宇宙において溶接作業を実際に行うのは大分先の将来のことであるが, いずれは必ず達成されることと信じている。またそのための研究開発も近い将来に盛んになってくるものと思う。この論文が日本の溶接技術者, 特に若い研究者, に興味と夢を与えることが出来れば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Masubuchi, K., “Integration of NASA-Sponsored Studies on Aluminum Welding,” NASA Contractor Report CR-2064, prepared by Massachusetts Institute of Technology for G. C. Marshall Space Flight Center, NASA, June 1972, for sale by National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 22151
- 2) Masubuchi, K., *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, 1980
- 3) 増淵興一, “米国における溶接研究の概要と二, 三の実例”, 溶接学会誌, 第 39 巻, 第 2 号, 1970, 103-116
- 4) 増淵興一, “米国の宇宙開発における接合技術の展望—アポロ計画からスペースステーションまで”, ジョイテック, 第 5 巻, 第 8 号, 103-108, 1989
- 5) 阪野賢治, “宇宙基地計画の概要と構造に関連した技術上の課題”, 溶接学会誌, 第 55 巻 6 号, 1986, 370-376
- 6) Masubuchi, K., et al., “Feasibility of Remotely Manipulated Welding in Space—A Step in the Development of Novel Joining Technologies,” “Final Report under Contract No. NASW-3740 submitted from MIT to Office of Space Science and Applications, NASA Headquarters, Washington, D. C., September 1983 またこの報告書の要約は NASA Langley Research Center で開催されたシンポジウムにおいて発表され下記に掲載されている
NASA Conference Publication 2387, *Welding, Bonding, and Fastening*, 1984, 271-296
- 7) Paton, B.E., “Welding in Space,” *Welding Engineer*, Vol. 57, No. 1, January 1972, 25-29
- 8) Siewert, T. A., et al., “The Skylab Brazing Experiment,” *The Welding Journal*, Vol. 56, No. 10, 1977, Research Supplement, 291 s-300 s
- 9) Agapakis, J. E., Masubuchi, K., and von Alt, C., “Fundamentals and Advances in the Development of Remote Welding Fabrication Systems,” *The Welding Journal*, Vol. 65, No. 9, 1986, 21-32
- 10) 今北明彦, “宇宙溶接”, 日本造船学会誌, 第 707 号, 昭和 63 年 5 月, 277-282
- 11) Schollhammer, F. R., “Electron Beam Welder for Space”, National Symposium on Materials for Space Vehicle Use, Seattle, Washington, Society of Aerospace Material and Process Engineers, Nov. 1963, p. 51
- 12) Guza, D. E., “Inertia Friction Welding of Aluminum Alloys for Space Repair Applications,” M. S. Thesis, MIT, January 1988
- 13) Masubuchi, K., Imakita, A., and Miyake, M., “An Initial Study of Remotely Manipulated Stud Welding in Space Applications,” *The Welding Journal*, Vol. 67, No. 4, 1988, 25-34
- 14) Engquist, R. D., and Nord, D. B., “Study of Space Environment Fabrication and Repair Techniques—Feasibility Report”, Report Contract NAS 9-4548, from Hughes Aircraft Co. to NASA Manned Spacecraft Center
- 15) Grumman Aerospace Corporation, “Major Repair of Structures in an Orbital Environment,” Report No. SA-ROS-4 prepared under Contract NAS 8-36436 for G. C. Marshall Space Flight Center, NASA, June 1987