

スペース・デブリや隕石の衝突で損傷した

宇宙ステーションと圧壁の溶接修理技術

高松工業高等専門学校 西岡亮, 吹田義一, 富永英嗣, 正箱信一郎, 寺嶋昇, 十河宏行

Welding Repair Technology for Space Station Wall Damaged

in Collisions of Space Debris or Meteorites

Ryo Nishioka, Yoshikazu Suita, Eiji Tominaga, Shinichiro Shobako, Noboru Terajima and Hiroyuki Sogo

Takamatsu National College of Technology Chokushi, Takamatsu, Kagawa 761-8058

E-mail: suita@takamatsu-nct.ac.jp

Abstract: The space station may receive the damage by the collision of space debris or meteorites, because that operation period is longer than 10 years. We proposed the circular lap weld repair method which welds the pie plate-like disk put at the damaged wall of space station. The computer controlled automatic welding repair system which an astronaut could manipulate was developed in order to carry out the repair mission in the space station. It was confirmed that the welding repair system normally operate even in not only the flat welding position but also the vertical and overhead welding positions.

Key words ; International Space Station , The welding repair technology , Circular cover plate

1. 緒 論

宇宙にはデブリや隕石など、国際宇宙ステーション ISS に損傷を与える原因になるものが多く存在する。そのため、ISS の 10 年を超える長期運用中の補修に、また宇宙建造物の建造、月面基地建設などに宇宙加工技術が必要不可欠である。そこで、著者等は、1993 年に宇宙 GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接法を提案¹⁾し、基礎的な研究を実施して模擬宇宙環境での宇宙 GHTA 溶接が可能²⁾であることを示した。また、著者等は実際に GHTA 溶接法を宇宙で使用することを念頭におき、2005 年より宇宙人工ゴミ等による国際宇宙ステーション ISS の損傷を想定した修理技術を検討してきた。その結果、円形カバープレートで損傷部を被い、そのカバープレートを宇宙ステーション壁に重ね溶接する修理法が最も効率がよく短時間で修理が可能であることを示した。しかし、それらの研究は溶加ワイヤ供給が手動溶接により行われた。その結果、溶接修理には高度な溶接技能が必要なことがわかった。宇宙飛行士に高度な溶接技能を期待するのは困難であると考えられる。そのため、完全自動による溶接修理技術の開発が望まれる。本研究では宇宙飛行士が地上からの指示のみで、操作可能な宇宙ステーション内壁の溶接修理技術を開発した。溶接修理実験の結果、安全な場所

からの遠隔操作により、気密性の保たれた修理が可能であることを確認した。また、多層溶接も可能であり、自由度の高いシステムであることを確認した。

2. 開発した溶接修理システム

本研究で開発した溶接修理システムは、皿状の円形カバープレートで損傷部を被い、カバープレートと宇宙ステーション壁を重ね溶接する修理を対象とする。溶接修理システムは主に溶接修理装置本体、コントロールボックス、GTA(Gas Tungsten Arc)溶接機、溶加ワイヤ供給装置付き GTA 溶接トーチ、電流検知器、パーソナルコンピュータで構成されている。コントロールボックスには、IO ボード、信号変換基板、モータドライバ等の制御に必要な装置が内蔵されている。そのため、溶接機より発生する高周波および電磁波を防止するための対策を施している。また、市販の GTA 溶接機と溶加ワイヤ供給装置付き GTA 溶接トーチを使用することで、連続かつ安全な溶接を可能にしている。電流検知器は溶加ワイヤがアーク放電時以外に供給されるのを防ぐために設置した。アーク放電時以外の溶加ワイヤ供給は、宇宙飛行士の感電などに繋がる恐れがある。以下に本研究で開発した溶接修理システムを機械系部、電気系部、制御系部に分類して概説する。

2.1 機械系部

Fig. 2.1 に溶接修理システム本体の正面図を示す。このシステムは、4本の脚で支える構造である。実際に予圧壁に接触する箇所には、種の角度に傾くアジャスタフットを使用し、凹凸のある予圧壁にも対応できる。骨組みには、ねじの締め付け力のみで固定するアルミニウムフレームを使用しているため、後に発生した問題にも容易に対応できる。また、打上げ時には大きな振動や加速度が加わるために、十分な強度を持つ構造にした。

溶接装置部は、GTA 溶接トーチを固定し、それを回転させることで円形カバープレートの円周溶接を可能にしている。また、トーチは種々の角度に設定できる。そして、カバープレートを固定する固定具を採用して、溶接中のカバープレートのずれを防ぎ、円周溶接の中心取りを容易にしている。しかし、現時点での装置では、電極間隔、溶接トーチの傾き、溶接半径などの調整は宇宙飛行士が行う必要がある。

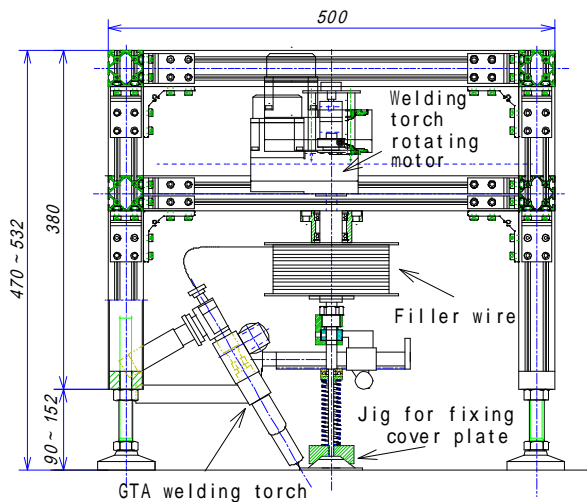


Fig. 2.1 Welding repair system

2.2 電気系部

本研究では、GTA 溶接トーチをパソコンで制御するため、パソコンからの信号を変換する信号変換基板を作製した。そこで、GTA 溶接トーチのアークトリガ等、スイッチ部品で構成される箇所にはリレースイッチを使用した。また、トーチ回転用のモータドライバの制御にもリレースイッチを用いた。溶加ワイヤ供給速度制御に使用していた可変抵抗器の代わりにオペアンプを使用し、可変抵抗器による電圧制御をパソコンにより行った。しかし、GTA 溶接トーチは溶接機と直接接続されているため、アーク発生時の高周波の影響を受ける。そのために、半導体素子のオペアンプはアーク発生時の高周波電圧により破損するので、ローパスフィルタにより高周波をカットする対策を行っている。

トーチ回転を担うモータにはロータリエンコーダ内蔵 DC サーボモータを使用して、トーチ位置を基準にした溶接速度制御を可能にしている。また、溶加ワイヤ供給速度の制御は溶加ワイヤを供給する DC モータをモータドライバで制御した。しかし、溶加ワイヤ供給用の DC モータは溶接トーチに接続されているために高周波の悪影響を受ける。そのため、溶加ワイヤ供給速度の制御には耐高周波性が高いものを用いた。溶接電流値の制御は溶接機本体の大幅な改造を必要とし、非常に困難であった。そのため、本システム開発では溶接速度のみを制御した。また、各装置のシステム構成図を Fig. 2.2 に示す。

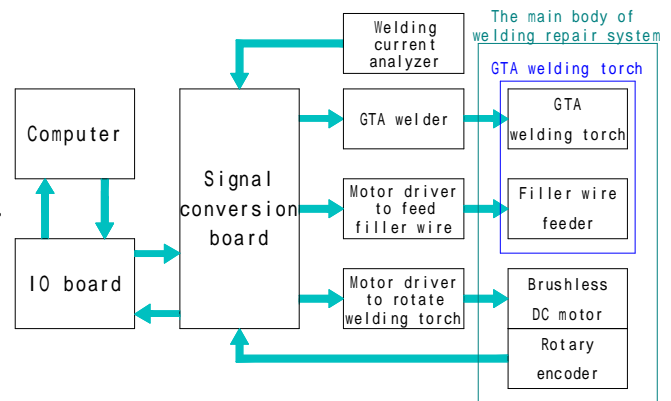


Fig. 2.2 System constitution diagram

2.3 制御系部

本研究で開発した装置の制御にはパソコンを使用した C 言語を用いた。溶接修理を対象とするため、溶接パラメータを即座に変更することが必要になる。また、地上から指示されたパラメータを入力し、パソコンの指示に従うだけで動作するプログラムが必要と考えた。

プログラムの流れを Fig. 2.3 に示す。このプログラムの構造は、アーク発生時に操作者に確認をとるプログラムである。また、緊急時の非常停止機能も備わっている。プログラムは溶接トーチの位置を随時確認し、位置を基に溶接速度制御を行う。また、リアルタイムの溶接速度を位置データから算出し、その値を設定値に追従させることで誤差を抑えている。宇宙飛行士に要求される入力項目は、トーチの回転角度、溶接速度の初速度および終速度、1 周あたりの溶接速度の変化数、溶接電流の 5 パラメータであるため、地上からの指示があれば容易に操作ができる。溶接修理の主な流れは、操作者により電極間隔、溶接トーチの傾き、溶接半径を設定する。パソコンに溶接速度の変化パターンを入力する。アークを点弧した後、溶接トーチは予熱のため一定時間停止、その後、指示された溶接速度のパターンでカバープレート周りを指示された周回する。最後に、クレー

タ電流に移行し、アークを停止して溶接修理終了となる。

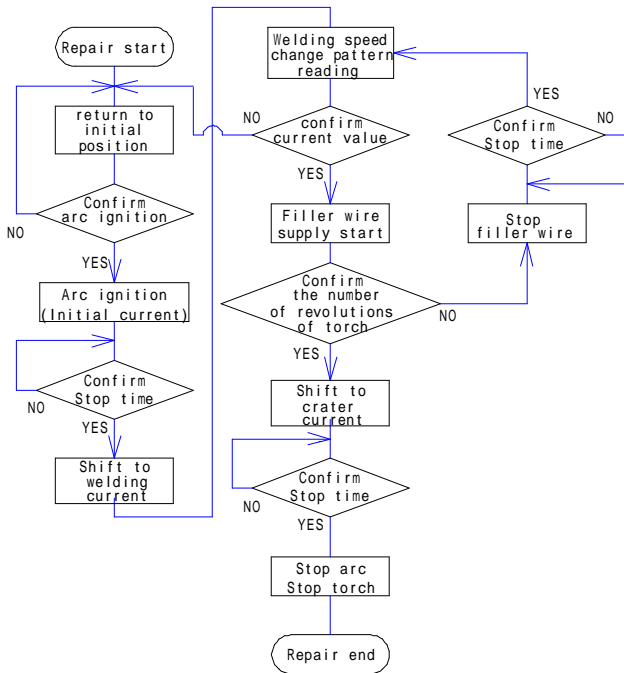


Fig. 2.3 Flow of movement of the welding repair device

3. 溶接修理実験

3.1 供試材およびカバープレート

本研究で使用する供試材(母材)には厚さ 4 mm の純アルミニウム A1100 を 120×150 の矩形に加工したものを宇宙ステーション壁として使用した。また、気密試験のために中心に 10mm の孔を開けた。カバープレートには Fig. 3.1 に示すように中心部に窪みを持つ 70mm の皿状円形カバープレートを使用した。窪みを付けることで、3 次元の変形を伴う宇宙ステーション壁損傷部を被うことが可能となる。円形カバープレートには母材と同じ純アルミニウム A1100 を使用した。純アルミニウムを用いたのは加工性と溶接性が良いためである。溶加ワイヤは 1(mm) の A1100 を使用した。また、これらの供試材を用いた溶接修理の模式図を Fig. 3.2 に示す。本研究で、対象にする溶接修理では Fig. 3.2 に示すように、トーチを円形カバープレートの円周縁上を走らせて、円形カバープレートと母材が重ね溶接される。

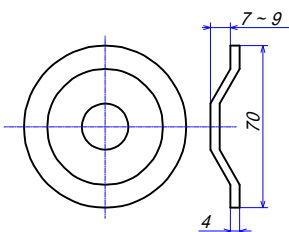


Fig. 3.1 Cover Plate

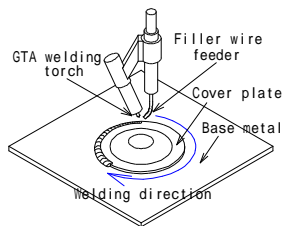


Fig. 3.2 Schematic view of welding repair

3.2 実験方法

厚さ 4mm のカバープレートを用いた本溶接修理実験では、2 層溶接による修理を行った。また、実験は空気の残った宇宙ステーションと圧部の壁を内部から修理すると仮定し、大気中での GTA 溶接を行った。本実験で主に目標にした溶接形状および溶接状況は以下の 3 点である。

- 溶落ちの無い溶接形状
→溶落ちは無予圧壁に孔が開くことを意味する
 - 十分な溶込みがあり、気密性が確保されている
→強度と気密性の確保に必要とされる溶込み量があるかを確認
 - 溶接中にスパッタリング現象および電極と溶加ワイヤの接触が無い
→安全かつ溶接欠陥の無い溶接であることの確認
- 実験で作製された試験体は、断面マクロ図観察による溶込み量の確認および真空装置を用いた気密試験を行った。気密試験は、Fig. 3.3 に示すように真空チャンバ窓を取り外し、そこに試験体を設置した状態でチャンバ内を減圧した。宇宙ステーション内部は大気圧と同じ気圧にされているため、油拡散ポンプでチャンバ内を 0.4 Pa まで減圧して気密性を調べた。また、上記の溶接修理実験の他に溶接修理システムの動作確認試験として、溶接トーチ回転用 DC サーボモータに内蔵されたロータリエンコーダから得たデータ確認およびシステムの動作が重力の影響を受けないことを確認するための、横向きおよび上向きでの動作確認実験を行った。重力の影響を確認する動作確認試験ではアークは発生させずに行い、システムの動作のみに注目した。

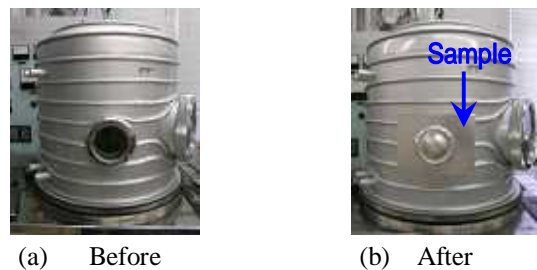


Fig. 3.3 Withstand pressure examination

3.3 最適溶接パラメータと動作実験結果

Table 3.1 に良好な溶接修理ができた最適溶接条件を示す。このパラメータでは 1 層目は 1 周にわたって等加速度溶接を行う。2 層目は最初の 90°間は等加速度溶接を行い、そこから 180°間、等速溶接を行った。そして最後の 90°は始点の最も熱が集中する部分に対応するために速度を 0.5 mm/s 速くして等速溶接を行った。また、このパラメータによる溶接結果および断面マクロ組織を Fig. 3.4 に示す。これから、

十分な溶込みがあり，溶接欠陥のない良好な溶接結果であることが確認できる．そして，気密試験により気密性が確保されていることも確認した．また，ロータリエンコーダから得た溶接速度変化を Fig. 3.5 に示す．これから，2層目の90°から360°間で行った等速溶接時の誤差が大きいことが確認できる．これは，溶加ワイヤ供給時に母材と溶加ワイヤとの間で生じる抵抗が原因であると考えられる．しかし，Fig. 3.4 の溶接結果から，この溶接速度の誤差による溶接欠陥は確認できない．そのため，この誤差は溶接修理において致命的な要因にはならないと考えられる．また，溶接速度の平均値は Table 3.1 に示すものとなっている．そのため，本研究ではこの誤差は許容範囲内であるとした．これらの結果より，本溶接修理システムは Table 3.1 に示すパラメータ通りの動作を示しており，装置の信頼性を確認できた．溶接修理中は溶融金属が飛散するスパッタリング現象や電極と溶加ワイヤの接触はなく安定していた．また，重力の影響を調査した動作確認試験により，本溶接修理システムは下向き，横向き，上向き姿勢でも同じ動作を行うことが可能であり，重力の影響を受けないことを確認した．そのため，本溶接修理システムを宇宙ステーションの与圧壁の修理へ適用できる可能性は十分にあると考えられる．

Table 3.1 Welding parameters

| | |
|---|---|
| Initial current | 120 (A) (Time : 20 s) |
| Welding current I | 140 (A) |
| Crater fill current | 50 (A) (Time : 5 s) |
| Electrode gap H_E | 5 (mm) |
| Electrode diameter D | 2.4 (mm) |
| Electrode angle θ_E | Radial direction : 60° |
| | Tangential direction : 60° |
| First step Welding speed v [Wire feed rate v_w] | (0-360°) Uniform acceleration |
| | Initial speed : 0.5 (mm/s) Acceleration : 0.068 (mm/s ²) [Initial speed : 19 (mm/s) Acceleration : 0.84(mm/s ²)] |
| | (90-270°) Equal speed |
| Second step Welding speed v [Wire feed rate v_w] | (0-90°) Uniform acceleration |
| | Initial speed : 2 (mm/s) Acceleration : 0.24 (mm/s ²) [Initial speed : 21 (mm/s) Acceleration : 0.84(mm/s ²)] |
| | (90-270°) Equal speed |
| | 4.5 (mm/s)[52 (mm/s)] |
| | (270-360°) Equal speed |
| | 5.0 (mm/s)[59 (mm/s)] |
| Wire feed position | Molten pond extremity |
| Wire feed angle | Clock circumference for coverplate tangent line 45° |
| Argon flow rate Q_{Ar} | 10 (ℓ/min) |

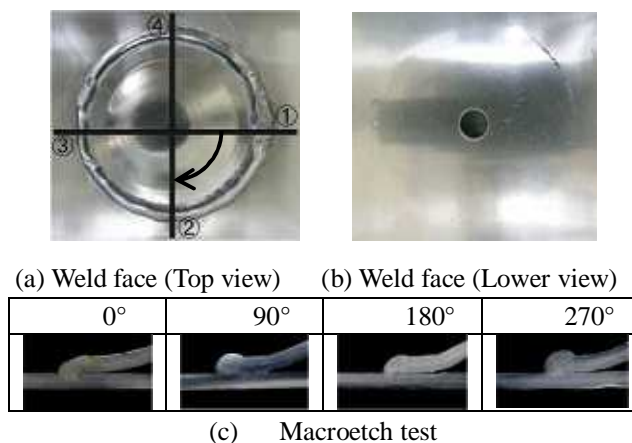


Fig. 3.4 Welding repair result

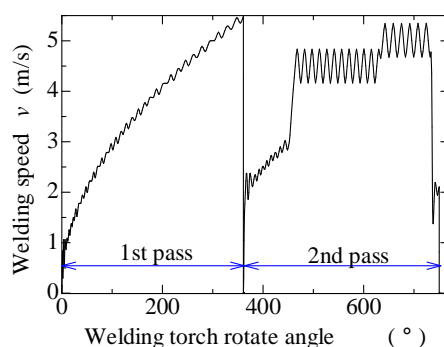


Fig. 3.5 Welding speed diagram

4. 結 論

本研究において溶接修理システムを開発し，溶接修理実験を行い，次の結果を得た．

- 1) トーチの回転角度，溶接速度の初速度および終速度，1周あたりの溶接速度の変化数，溶接電流の5パラメータで溶接修理ができる．
- 2) 自動溶接修理システムを動作させるプログラムは，地上からの指示があれば操作可能である．
- 3) 円形カバープレートを用いた修理は迅速かつ気密性の保たれた修理が可能である．
- 4) 溶融金属が飛散するスパッタリング現象や，電極の溶加ワイヤへの接触がない安全かつ溶接欠陥のない修理が可能である．
- 5) 開発した溶接修理システムの動作は重力の影響を受けない．

参 考 文 献

- [1] 吹田義一，佃 芳行，高木 隆，黄地尚義，増淵 興一：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，11(1993)，pp.423-427.
- [2] 吹田義一，大原将広，十川弘樹，松下和憲，正箱 信一郎 他：航空機を使用した模擬宇宙環境での宇宙 GHTA 溶接法によるアルミニウム管の溶接実験，溶接学会論文集，25 巻(2007)，4 号，PP.494-500