

# 横向姿勢用レールレス溶接台車の開発 -面倒なレール着脱作業を不要化し信頼性を確保-

小野 昇造\* 潘 慶竜\* 落合 彦太郎\* 植田 雅久\*\*  
岡田 直洋\*\* 木口 英之\*\* 木村 亮太\*\* 小野 宏\*\*\*

## Development of Rail-less Welding Carriage for Horizontal Position

Shozo ONO, Qinglong PAN, Hikotaro OCHIAI, Masahisa UEDA,  
Naohiro OKADA, Hideyuki KIGUCHI, Ryota KIMURA, Hiroshi ONO

In this study, a rail-less welding carriage was developed for plasma arc gouging and gas metal arc welding in the horizontal position. Newly developed front and rear wheels have independent steering control function. A vision sensor was applied to tracking a marking line which should be drawn before the gouging process. A tilt sensor was applied to maintaining the direction of the carriage. Both left and right directions were available which can make the welding process more efficiency.

The gouging and welding experiment was performed on mild steel plates of 12.5mm in thickness with V-groove. It has been shown that a good weld bead without lack of fusion and penetration could be produced by using the developed carriage, which satisfied JSQS and ISO5817. On top of that, the quality of weld bead was improved. No matter whether the operator is an experienced welder or not, a stable weld bead could be achieved. It will be an effective solution to the problem of lacking of experienced welders in the future.

造船ブロック同士の板継ぎ溶接工程への適用を目指し、横向姿勢用レールレス溶接台車を開発した。当該台車は、前輪及び後輪が独立の操舵制御機能を有し、画像センサによって墨出し線を做うとともに、傾斜センサによって台車の傾斜角度を一定に保持しながら、左右のいずれの方向にも做い走行ができる特長を有している。

当該台車を用い、横向姿勢にて作製した板厚12.5mmの軟鋼突合せ継手は、有害な表面欠陥、内部欠陥がなく、日本鋼船工作法精度標準（以下、JSQS）、ISO5817を満足するビード外観であることを確認した。熟練度が求められる横向き姿勢溶接に当該台車を適用することで、作業者の熟練度に依存しない安定した溶接品質が確保でき、造船業が直面する課題の一つである技能人材不足の解決に寄与できる可能性が示された。

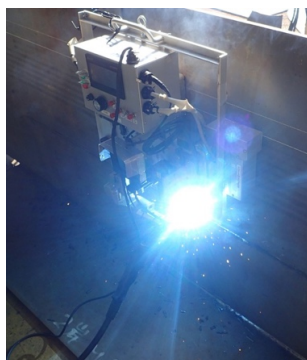


写真1 横向姿勢用レールレス溶接台車を用いた3パス目の自動溶接施工状況（右方向への走行）

Auto Welding Situation at the 3rd Pass by Developed Carriage and Surface Appearance of Weld Bead (Rightward Traveling)



写真2 3パス溶接後のビード外観  
Surface Appearance of Weld Bead after the 3rd Pass

\*三井E&Sデジタルサービス 技術開発部 基盤技術開発センター \*\*三井E&S造船 製造本部 玉野艦船工場 艦船建造部  
\*\*\*株式会社ロボノ金属機械

## 1. はじめに

少子高齢化や若年層の入職率低下に伴う熟練技能者不足を背景に、製造業では「技能人材」の確保が他の職種に比べ突出して難しい状況にあることが、経済産業省製造産業局の資料において報告されている<sup>1)</sup>。これらの観点から、自動機、ロボット等によって生産工程を自動化、省人化する必要性は、ますます高まっていくことが予想される。

このような中、造船の製造工数に占める溶接作業工数は30%になると言われており<sup>2)</sup>、溶接が造船の主要な製造技術となっているにもかかわらず、自動化、省人化が進んでいない現状がある。これは、対象となるワークが大型大重量で、継手も多様な上に、形状、寸法が毎回変わり、機械加工レベルの部材加工精度がないことなどに起因する。特に、バルクキャリア、艦艇、巡視船、練習船などをプロダクトミックスで建造している筆者らの事業所の場合、太宗船をシリーズ化し連続建造を行っているヤードに比べ、自動化設備の導入による同型船の効果を一層生み出しにくい環境にある。

このような状況に鑑み、大型の設備投資を前提とせず、人力での搬出入及びセッティングが容易な小型の横向姿勢用レールレス溶接台車を開発したので、その概要を紹介する。

## 2. 横向姿勢用レールレス溶接台車の仕様

### 2.1 適用箇所

船体の建造法は、屋内で加工し組み立てたブロックを、船台上やドック内に順次搭載していくブロック建造法であり、船台上やドック内でブロック同士の外板を繋ぎ合わせる板継ぎ溶接工程が存在する。その中で、立向姿勢の溶接箇所はエレクトログラスアーク溶接法が用いられ、大電流にて1パスで施工する。

一方、横向姿勢の溶接では、溶融池の保持等の観点により大電流での1パス溶接が困難であることから、炭酸ガスアーク溶接法による多層盛が用いられている。横向姿勢による板継ぎ溶接は、図1に示すように、①内面溶接、②外面ガウジング、③外面溶接の3工程により施工される。内面溶接工程は開先のギャップ変動が大きいため、自動化のためには溶接条件の適応制御が必須となる上に、トランス材が数m間隔で配置されることから、連続溶接長が短くなるため、自動化のメリットが得られにくい。

これに対し、外面溶接工程は連続溶接長が長いので、自動化のメリットが大きい上に、ガウジングを自動化することによって、形状変動の小さいガウジング溝を形成できれば、その後の外面溶接工程において、ガウジング溝形状の変動に応じた熟練溶接士による溶接条件調整が不要になるため、自動化のハードルは低くなる。以上の観点から、開発する横向姿勢用台車の適用ターゲットは、外面ガウジング及び外面溶接工程とした。

### 2.2 レールレス方式

造船や建築分野では、横向姿勢での現地溶接に関する報告事例があるものの、溶接線に沿って台車走行用のレールを敷設することが前提となっている<sup>3)4)</sup>。その場合、長い溶接長に対応するには、敷設作業を安全に行うための大型ゴンドラを設置するなど大掛かりな段取りが発生するため、現場に定着しにくいという問題点がある。このような問題点を回避するため、開発する横向姿勢用台車は、レールレス方式で人力での搬出入及びセッティングが可能な重量であることを大前提とした。

### 2.3 台車の構成

開発した横向姿勢用レールレス溶接台車の概念図を図2に示す。前輪及び後輪の2輪から成る台車に、傾斜センサを収納した操作盤、画像センサ、トーチホルダー、吸着用永久磁石を搭載した構成とし、電源は通常の簡易台車と同じAC100Vとした。

トーチホルダーはガウジング、溶接のいずれのトーチにも対応できるように、市販の溶接台車に用いられている汎用的なものを流用した。

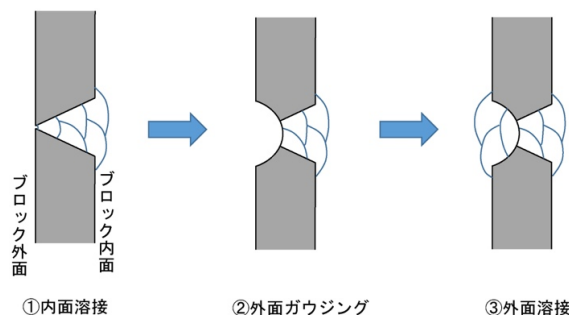


図1 横向姿勢での板継ぎ溶接工程

### Schematic Procedure of Butt Welding Process in Horizontal Position

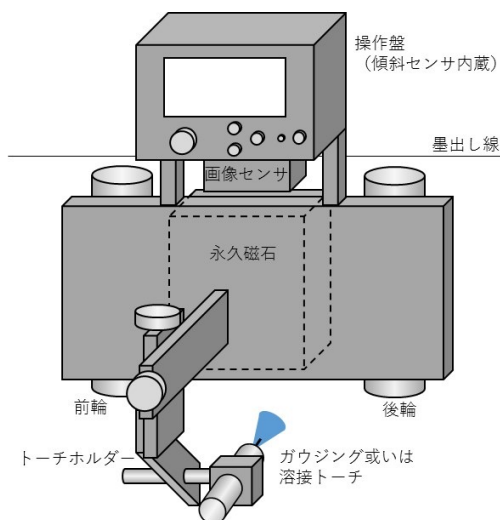


図2 横向姿勢用レールレス溶接台車の概念図  
Concept of Developed Welding Carriage

## 2. 4 操舵機構

レールレスで台車の走行制御を行う場合、操舵機構が必要になる。稲見らが開発した下向姿勢用のレールレス板継ぎ溶接ロボット<sup>9)</sup>では、左右輪の回転数を変えることによる操舵機構を採用している。これは下向姿勢であるために外乱が小さく、大きな舵を切る必要がないためである。一方で、横向往勢の場合、台車の自重による下向き大きな外乱を受けながら溶接線に沿って走行する必要がある。そこで、外乱に対して適切な操舵性を確保するため、大きな舵を切れるよう、前輪及び後輪の角度を変えることによる操舵機構を採用するとともに、前輪及び後輪は、それぞれ独立の操舵用モーター、駆動用モーターにより制御することとした。車輪は、約140mm幅のローラ形状とすることにより、鋼板との接触面を増やして摩擦力を大きくした。さらに、ローラ幅の中央を操舵の回転中心とすることにより、大きな舵を切れるようにした。

また、ガウジングとその後の多層盛溶接で同じ箇所を繰り返し走行することを想定した場合、台車の走行終了位置から逆走して次の溶接が開始できれば、走行開始位置まで台車を戻す手間が省ける。そこで、左右のいずれの方向にも做い走行ができるよう、左右対称の台車形状、機器配置となるよう留意した。最大走行速度は、通常のガウジング及びアーク溶接施工を考慮し、1.0 m/minとした。

## 2. 5 做い方式

稲見らが開発した下向姿勢用のレールレス板継ぎ溶接ロボット<sup>9)</sup>では、レーザセンサを用いて溶接前の開先形状から溶接線を認識し、左右輪の回転数を制御して做い走行している。しかしながら、想定している適用対象は内面溶接後の外面ガウジングと外面溶接であり、写真3に示すように、開先ギャップ等の変動要因に応じて、内面からの初層溶接による裏ビード形状が種々変化する。そのため、2次元的な形状から狙い位置を定めるのが困難である。そこで、画像センサによって墨出し線を做う方式とした。墨出し線の罫書き作業は、造船の現場において一般的なものであり、作業者の負荷が小さいことから、工場からの提案により外面ガウジング工程前に墨出し線の罫書き作業を行うこととした。

画像センサは、照明一体型の市販機（Keyence社製IV-Hシリーズ）を使用し、左右方向の対称性の観点から、台車の中央位置に当該センサを設置した。スパッタ付着を防止するとともに、アーク光及び太陽光等による外乱を抑制する観点から、画像センサの周囲は遮蔽用ボックスで覆った。



写真3 狙い位置の外観

Bead Appearance before Gouging

船台における横向往勢でのガウジング及び溶接を想定した場合、船台の傾斜角度に沿って台車が走行する必要がある。そこで、台車に市販の傾斜センサ（OMRON社製D5Rシリーズ）を搭載し、台車の走行開始時における傾斜角度を記憶することにより、走行中も当該角度を保持する方式とした。

## 2. 6 操作盤

操作盤内にはPLC、駆動及び操舵用モータドライバ、画像センサアンプ、傾斜センサ及び傾斜センサアンプを収納した。作業者が容易に取り扱えるよう、操作盤は、走行速度調整つまみ、自動走行開始・終了ボタン、走行方向設定ボタンのみとした。

## 2. 7 吸着方式

台車は磁力式の吸着機構とし、台車軽量化の観点から、電磁石ではなく永久磁石を採用した。近距離での吸着力が大きくなるよう、図3に示すように9個のネオジウム磁石を異極対向に配置した。

## 2. 8 重量

以上の機器類を搭載した台車の総重量は18kgであり、人力での搬出入、セッティングが可能なレベルに収まった。

## 3. 横向往勢用レールレス溶接台車の走行制御

### 3. 1 走行制御方式

画像センサによって映し出された鋼板上における白色の墨出し線の状況を写真4に示す。画像センサの視野は高さ8mm×幅13mmであり、当該視野を高さ方向で①から⑧のウィンドウに分割した。ウィンドウ内における暗部（鋼板）の面積に対し、明部（墨出し線）の面積が閾値を超えた場合に、ウィンドウ枠の色が赤色から緑色に切り替わっ

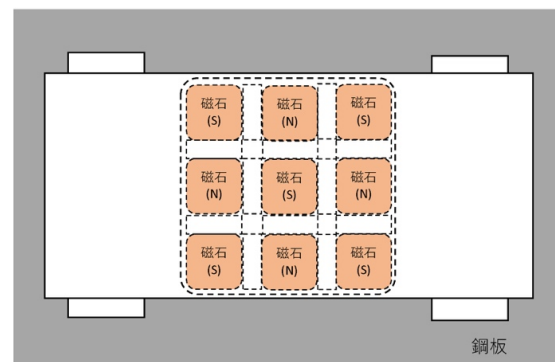


図3 吸着用永久磁石の配置

Arrangement of Permanent Magnets for Adsorption

て表示される。写真4では、ウィンドウ④の枠が緑色になっており、墨出し線として検出されていることが分かる。緑色の枠のウィンドウが、画像センサの視野中央に位置したまま走行するための操舵制御には、台車が傾斜角度を変えずに上下方向へ移動できるよう、図4(a)に示すように、前後輪を同方向に操舵する斜行制御を用いた。一方、傾斜センサからの出力に基づき、台車の傾斜角度を調整するための操舵制御には、図4(b)に示すように、前後輪を逆方向に操舵する旋回制御を用いた。

3. 2 走行性能の検証

斜行制御及び旋回制御を組み合わせた台車の走行性能を検証するため、倣い走行中における台車の位置、傾斜角度を計測した。台車の走行パターンは、水平方向と、船台の傾斜を想定して3°の傾きを与えた2ケースにおいて、それぞれ左方向、右方向の2方向に走行し、合計4パターンの走行性能を検証した。

墨出し線と平行な基準面からの台車の相対位置変化（初期位置からの高さずれ）をレーザセンサにて計測した結果を図5に示す。なお、走行開始時の位置をゼロとしてプロットした。また、4パターンにおける台車の相対位置の平均値 $\mu$ 及び標準偏差 $\sigma$ を表1に示す。左方向へ走行する際、スタート直後に台車位置が若干下がる傾向が認められたものの、 $\mu \pm 2\sigma$ の範囲は $\pm 1\text{mm}$ 以内に収まっており、ガウジング、アー

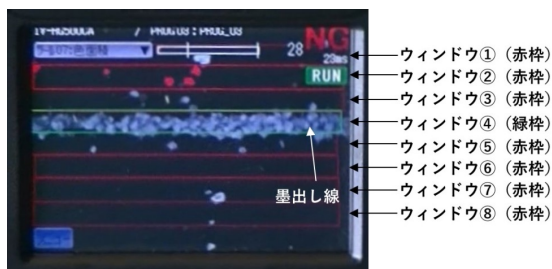
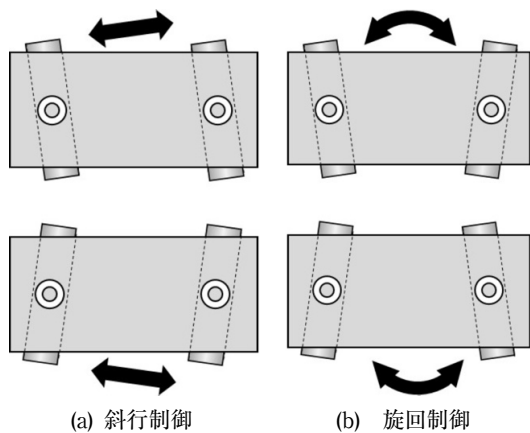


写真4 画像センサに映し出された墨出し線の状況  
Marking Line Projected by Vision Sensor



(a) 斜行制御 Skewing Control (b) 旋回制御 Turning Control

図4 前後輪の操舵パターン

Steering Pattern of Front and Rear Wheels

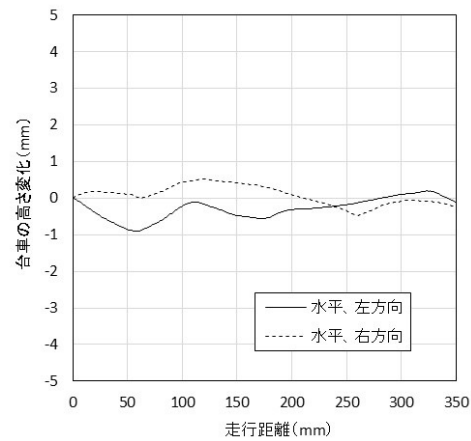
ク溶接の狙いずれ裕度を満足できるレベルであることを確認した。

次に、操作盤に収納した傾斜センサからの出力結果を図6に示す。なお、走行開始時の角度をゼロとしてプロットし、反時計回りへの角度変化をプラス側とした。水平に比べ、3°傾斜時の方が台車の角度変化が大きくなる傾向が認められたものの、最大でも0.4°の角度変化に収まっており、トーチ位置の変動に影響を及ぼすレベルでないことを確認した。

4. 施工試験

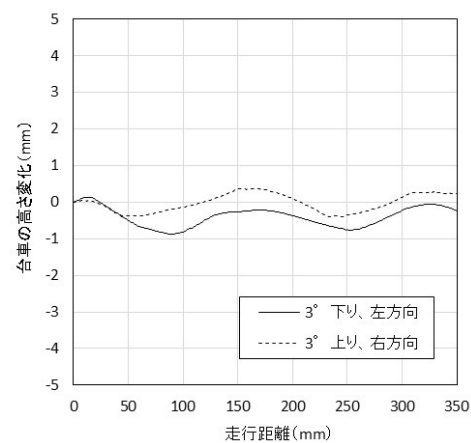
4. 1 ガウジング及び溶接試験

当該台車を用い、溶接長1m、板厚12.5mmの軟鋼突合せ継手を横向姿勢にて作製した。開先形状は図7に示すとおりで、開先角度50°、ルートフェース0mm、ルートギャップ0mmのV形



(a) 水平走行

Tracking in Horizontal Direction



(b) 3° 傾斜走行

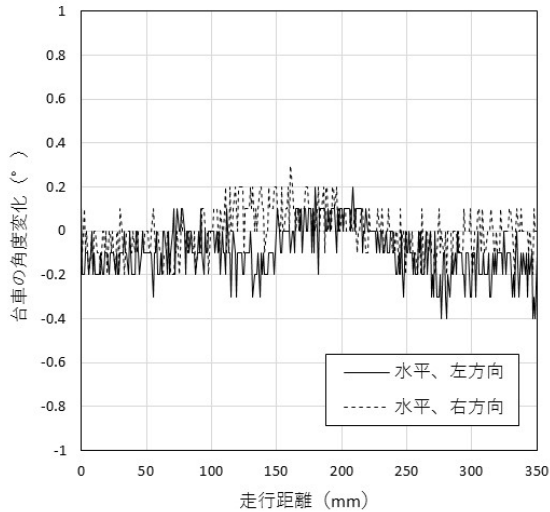
Tracking in 3° Tilted Direction

図5 倣い走行時における台車の相対位置計測結果  
Measurement Results of Relative Position of the Carriage during Tracking

表1 倣い走行時における台車の相対位置の平均及び標準偏差

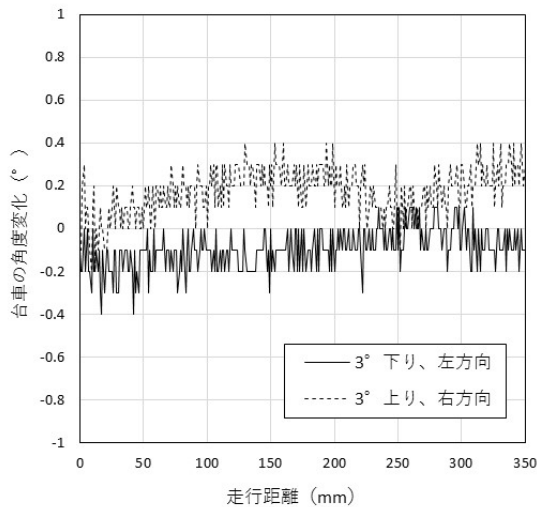
Averages and Standard Deviations of Relative Position of Developed Carriage during Tracking

	平均, $\mu$ /mm		標準偏差, $\sigma$ /mm	
	水平	3° 傾斜	水平	3° 傾斜
左方向	-0.29	-0.40	0.28	0.27
右方向	-0.07	-0.02	0.26	0.25



(a) 水平走行

Tracking in Horizontal Direction



(b) 3° 傾斜走行

Tracking in 3° Tilted Direction

図6 倣い走行時における台車角度の計測結果

Results of Measured Tilt Angle of Developed Carriage during Tracking

開先とした。造船ブロック同士の板継ぎ工程を想定し、開先側からは半自動の炭酸ガスアーク溶接にて多層盛した後、裏側から当該台車にて自動ガウジング及び自動溶接施工した。なお、造船現場では、エアークガウジング法が用いられるのが一般的であるが、消耗電極方式であるため自動化に不向きである

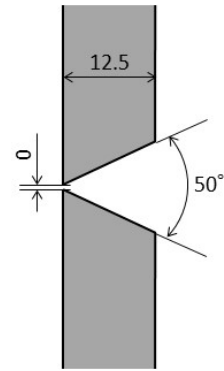


図7 自動ガウジング及び溶接試験体の開先形状  
V-Groove Preparation for Auto Gouging and Welding Experiment



(a) 自動ガウジング施工状況 (左方向への走行)  
Situation of Auto Gouging (Leftward Traveling)



(b) ガウジング溝の外観

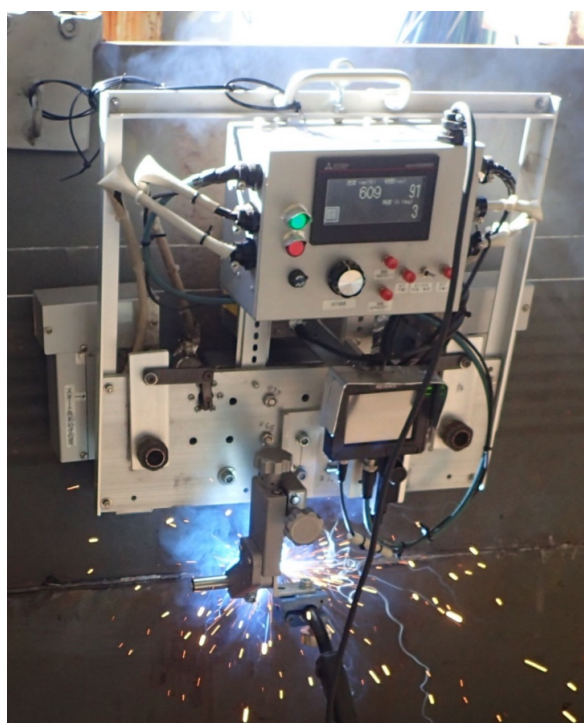
Surface Appearance of Gouging Groove

写真5 当該台車を用いた自動ガウジング施工状況並びにガウジング溝の外観

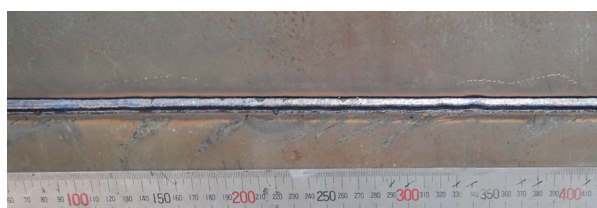
Auto Gouging Situation by Developed Carriage and Surface Appearance of Gouging Groove

ことから、プラズマガウジング法を用いた。溶接ワイヤは、径1.2mmφのslag系フラックスコアード (DW-100) を使用した。

当該台車を用い左方向へ走行した自動プラズマガウジング施工状況及び施工後の外観を、それぞれ写真5(a)及び写真5(b)に示す。直線性が高く、欠陥のない良好で均一なガウジング溝が形成できることを確認した。次に、当該台車が左右両方向に倣い走行できる利点を活用するため、自動プラズマガウジングの終了位置にて、ガウジングトーチを炭酸ガスアーク溶接トーチに交換後、逆方向へ台車を走行させ、1パス目の自動溶接を行った。そして、1パス目の自動溶接終了後、台車停止位置から逆方向へ台車を走行させることにより、残りの2パス目及び3パス目の自動溶接を行った。



(a) 1パス目の自動溶接施工状況（右方向への走行）  
Situation of Auto Welding at the 1st Pass  
(Rightward Traveling)



(b) 1パス溶接後のビード外観  
Surface Appearance of Weld Bead after the 1st Pass  
写真6 当該台車を用いた1パス目の自動溶接施工状況並び  
に溶接ビード外観

Auto Welding Situation at the 1st Pass by Developed  
Carriage and Surface Appearance of Weld Bead



写真7 当該台車を用いて作製した突合せ継手の放射線透  
過試験結果

Radiographic Testing Result of Weld Bead Produced by  
Developed Carriage

右方向へ走行した1パス目の自動溶接施工状況及び1パス  
終了後の溶接ビード外観を写真6(a)及び写真6(b)に示す。ま  
た、右方向へ走行した3パス目の自動溶接施工状況及び3パ  
ス終了後の溶接ビード外観を、写真1及び写真2に示す。ガ  
ウジング溝と同様に直線性が高く、良好な外観の溶接ビー  
ドが形成できることを確認した。



写真8 当該台車を用いて作製した突合せ継手のマクロ組  
織試験結果

Cross Section of Weld Bead Produced by Developed  
Carriage

作製した突合せ継手における内部欠陥の有無を確認する  
ため、放射線透過試験を実施した。写真7に示すように、融  
合不良、溶込み不良がなく、ブローホールなどの欠陥も  
ISO5817 LevelBを満足することを確認した。

作製した突合せ継手のマクロ組織試験結果を写真8に示  
す。横向姿勢特有の溶融金属の垂落ちに伴うアンダーカッ  
トがわずかに認められるものの、JSQSを満足するレベルで  
あった。また、開先側（半自動溶接側）に比べても、当該  
台車を用いた裏側はアンダーカットが小さくなっているこ  
とから、当該台車が溶接品質の向上、安定化に寄与できる  
可能性が示された。

#### 4. 2 下向姿勢への適用拡大検討

下向姿勢との併用を目指し、傾斜センサからの出力及び後  
輪の操舵制御をオフにし、画像センサからの出力のみにより  
前輪の操舵制御を行うプログラムを追加した。本プログラム  
による下向姿勢での適用性を評価するため、線状加熱用のガ  
ストーチを搭載して走行した状況を写真9に示す。約6mの  
走行長においても、墨出し線に沿った良好な走行特性を確  
認した。

#### 5. おわりに

造船ブロック同士の板継ぎ溶接工程への適用を目的とし  
て、人力での可搬性を考慮した小型の横向姿勢用レールレ  
ス溶接台車を開発した。当該台車を用いて横向姿勢で試作  
した突合せ継手は、有害な表面欠陥、内部欠陥がなく、  
JSQS、ISO5817を満足するビード外観であることを確認し  
た。すなわち、熟練度が求められる横向姿勢溶接に当該台  
車を適用することで、作業者の熟練度に依存しない安定し  
た溶接品質が確保でき、造船業が直面する課題の1つであ  
る技能人材不足の解決に寄与できる可能性が示された。ま

た、長距離を連続施工できることから、半自動溶接に比べアークタイム率が向上し、作業工数の削減とリードタイムの短縮にも寄与できるものと考えられる。

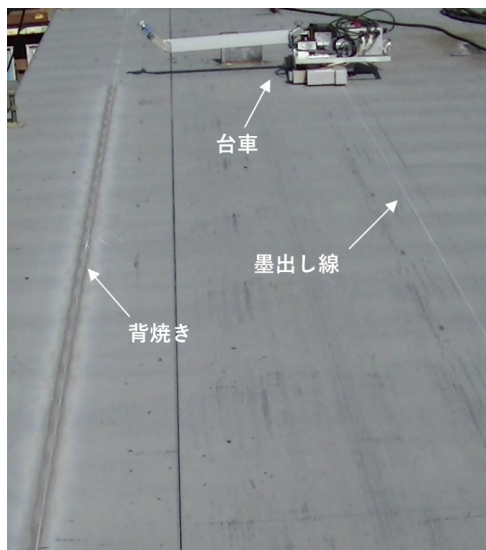


写真9 当該台車を用いた下向姿勢での線状加熱後における外観

Appearance after Line Heating in Flat Position by Developed Carriage

今後は、堅牢化等により完成度を高めるとともに、走行中に走行面の曲率が変化する場合のトーチ追従機能や、ブロック内面への適用に必要な開先形状に対応した溶接条件の適応制御機能の付加について、検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省：製造業における人手不足の現状及び外国人材の活用について、「製造業における外国人材受入れに向けた説明会」資料 (2018)
- 2) 奥本：溶接・接合技術の適用(造船), 溶接学会誌, 79, 6 (2010), p.51
- 3) 菅野. 外：高能率横向溶接法の開発, 溶接学会全国大会講演概要, 103 (2018), p.394
- 4) 吉田. 外：鉄骨中の現地横向溶接ロボットの開発, 三菱重工技報, 32, 6 (1995), p.387
- 5) 稲見. 外：レーザセンサを用いた造船ブロック用レールレス板継ぎ溶接ロボットの開発, 三井造船技報, 166 (1999-2), p.34

#### [問い合わせ先]

株式会社三井E&Sビジネスサービス 技術開発部  
TEL 0863-23-3041 小野 昇造

本報は、2020年2月28日に以下のホームページに公開しました。

<https://www.mes.co.jp/solution/research/>