

## 【工学】

## 研究論文

## 造船技術シミュレーター開発に関する基礎的研究

## —溶接シミュレーターにおける溶接アーク音の検討—

松岡 和彦<sup>\*1</sup>

## Preliminary Study on the Development of a Shipbuilding Technology Simulator

MATSUOKA Kazuhiko

## Summary

With regard to recent shipbuilding techniques, welding technicians with advanced skills in fabricating steel structures is decreasing. In particular, there is concern about a decrease in productivity and weld quality in the field where welding is used for various applications. The author has been working in cooperation with Nagasaki Prefecture since 2013 to develop a "shipbuilding technology simulator" to educate unskilled young technicians at the production site of the shipbuilding industry. He developed a simulator utilizing the ICT and performs the assessment of technicians welding skills and the visualization of technical knowledge. In this study, for the purpose of development of welding simulator, it was decided to investigate out a study on the determination of weld quality by the operator using the welding arc sound.

**Keywords :** CO<sub>2</sub> arc welding, welding quality, welding arc sound, semi-automatic arc welding

## 1. 緒言

近年、造船業をはじめとする鋼構造物を製作する生産現場において高度な技能を持った熟練溶接技術者が不足してきており、特に様々な用途に用いられているアーク溶接の分野で溶接品質と生産性の低下が懸念されている。また加速度的に熟練溶接技術者の退職が進み、加えて若者の製造業離れによる後継者不足もあり、今後、生産の中心となっていくであろう若手技術者への溶接技術の継承が危惧されている。

これまで若手技術者への溶接技術の教育と技術継承は、熟練溶接技術者による OJT (On the Job Training) や各地域の溶接協会や造船技術センター等による資格制度と溶接実技研修により実施されてきた。熟練技術者が若手技術者を直接指導する方法で、溶接作業の準備、溶接時

の作業姿勢、溶接電流の調整、運棒の速度や角度といった様々な溶接実技の技能動作を繰り返し教わることで習熟を図っている。

しかし従来の若手への教育方法では、教育に時間と手間がかかる、若手の指導にあたる熟練溶接技術者が教育者でないため指導方法や指導のポイントが不明瞭になる、溶接実技に関する基本技能動作は修得できても溶接品質の判定は熟練技能者の定性的な評価に大きく依存しており十分な指導が困難である、といった問題が指摘されている。

現在、著者は特に造船業の生産現場で建造作業にあたる若手の未熟練技術者を教育する「造船技術シミュレーター」の開発を平成 25 年度より長崎県と協力して進めている。建造作業の技能の中で溶接と塗装の訓練シミュレ

<sup>\*1</sup> 工学部 船舶工学科 准教授

ーターならびにぎょう鉄作業支援（電子曲げ型）の開発を進めている。中でも溶接作業に関して、ICT を活用したシミュレーターを開発し、溶接実技の技能動作の定量化と、これまで作業経験上からの「暗黙値」とされていた技術知識の可視化を行っている。このシミュレーターを活用した若手溶接技術者への教育と技術継承を行うことにより、指導方法や指導のポイントが明瞭になり教授側の熟練技術者の負担を減少させ、また学習者である若手技術者のコミュニケーションが円滑になることを目標として開発を進めている。これまでのところ溶接シミュレーターに関しては、溶接時の作業姿勢や運棒の速度、角度といった溶接実技の技能動作に関する判定機能を持ったプロトタイプ機が完成している。

そこで本研究では、溶接シミュレーターの教育機能の強化を目的として、溶接アーク音を用いた作業による溶接品質の判定に関する検討を行うこととした。

通常、溶接品質の判定は溶接作業完了後に放射線透過試験や超音波探傷試験を用いた非破壊検査により行われており、作業による溶接過程での品質判定は困難とされている。

一方で、これまでの研究で溶接アーク現象と溶接アーク音との間には密接な関連性のあることが荒田等によって報告<sup>1)</sup>されており、また溶接実技研修時に学習者である若手溶接技術者の溶接アークが安定して発生していることを目安として、溶接アーク音は熟練溶接技術者が指導するポイントにもなっている。

本研究では、造船業の建造現場で広く利用されているCO<sub>2</sub> 半自動アーク溶接を例に取り、溶接実技の熟練技術者と未熟練者のアーク溶接比較実験を行い、溶接アーク音を分析し教育機能を強化できるか検討を行った。

## 2. 造船技術シミュレーターの概要

平成 25 年度より著者が開発を行っている「造船技術シミュレーター」は、長崎県の造船・海洋・環境エネルギー分野のものづくり基盤を強化することを開発の目的としている。特に船舶や大型プラント、橋梁等の鋼構造物を建造するための基盤技術（溶接、塗装、ぎょう鉄）に関して、ICT を活用した教育シミュレーターとすることで若手技術者への技能伝承を円滑に進めることが狙いである。またこのシミュレーターを用いて、熟練技術者が

若手溶接技術者への教育と技術継承を図ることで、長崎県の熟練技術者が持つ技能を蓄積し、データベース化を図ることも考慮している。なおシステムは、旭エレクトロニクス株式会社と開発を行っている。

「造船技術シミュレーター」は、溶接、塗装、ぎょう鉄に関する 3 つのシステムから構成されている。始めに開発されたのは、仮想現実の技術を使用し、船舶の船体塗装作業に用いるスプレーガンによる塗装の技能訓練を行うことが可能な「塗装シミュレーター」であった。この訓練システムは、Fig.1 に示すように大型スクリーンにプロジェクターから立体投影した塗装ワークに対して、現場作業に用いる実物のスプレーガンを使用して模擬的に塗装を行うシステムであり、スプレーガンと専用メガネに超音波センサーを取り付けることで作業者の位置と姿勢を取得し、作業者の動作に追従した映像を再現して塗装作業を行えるシステムである。訓練作業後に塗装膜厚の分布状況を表示できる他、スプレーガン軌跡のリプレイ等の作業動作の分析が可能である。現在、長崎県下の造船所のシステム担当者へ協力を要請し、実際に現場作業に従事している熟練技能者の技能データの取得を行っている所である。

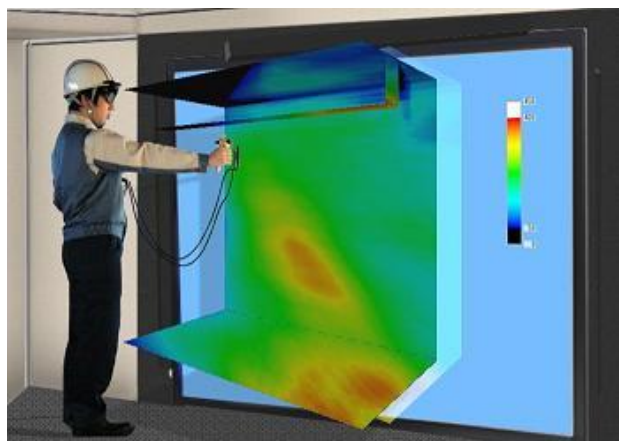


Fig.1 Paint Training System

\*旭エレクトロニクス株式会社 資料より

次に本研究の「溶接シミュレーター」は、「塗装シミュレーター」のシステム技術を応用して開発を行ったものである。超音波センサーによる作業者の位置と姿勢の取得や作業者の動作に追従した映像を再現する機能等を基本とし、溶接作業用に修正を行った。溶接シミュレー

ターを構成する機器となるセンサーやパソコン等のシステムの概要を Fig.2 に、訓練時の作業イメージを Fig.3 に示す。

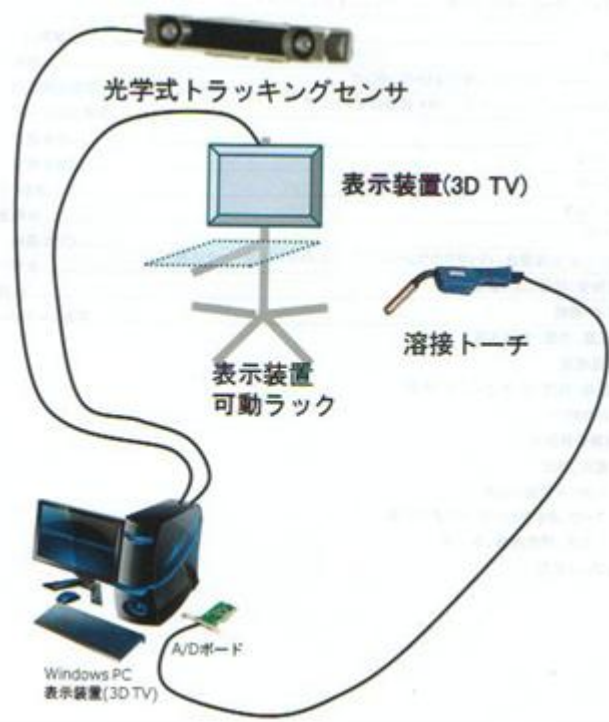


Fig.2 Welding Training System

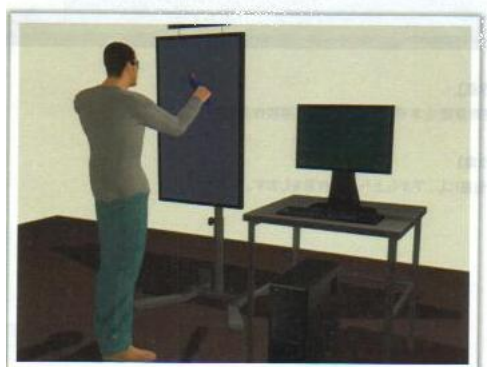
なお本訓練システムは以下に示す機能を開発中である。

- ・「板継溶接」と「隅肉溶接」の訓練を行うことが可能。
- ・「板継溶接」では下向き溶接と立向い溶接を訓練可能。
- ・溶接は多層盛溶接に対応可能。
- ・3D 立体視が可能なシステムとなっている。
- ・溶接時の音や光、スパッタの有無を再現し、訓練者への教示データとする。
- ・訓練時の溶接作業姿勢、運棒の速度や角度といったデータを取得し作業動作の分析が可能。

現在までに「板継溶接」に関する基本機能の開発が完了しており、平成 26 年度 10 月にプロトタイプ機が納品されたので、“モノづくり”教育のための自由課題講義である「プロジェクト」の講義時間を利用し、学生を対象にシミュレーターの使い勝手の調整と溶接シミュレーターを用いた訓練を実施しデータ取得を行った。



水平溶接作業イメージ



垂直溶接作業イメージ

Fig.3 Training Image

またぎょう鉄を作業支援するシステムは Fig.4 に示す「電子曲げ型システム」であり、平成 27 年度より実機を用いた研究開発を行っている。このシステムは、レーザープロジェクターとデジタルカメラを用いて構成されており、画像処理による鋼板の曲げ座標の計測ならびにレーザープロジェクターによる鋼板への計測結果の表示を行う。これまで鋼板の曲げの計測には、ぎょう鉄作業を一時休止して「木型」を用いて目視で確認を行っていた。本システムにより計測結果をリアルタイムに作業者に提示することで作業の定量化と効率化を図り、若手技術者の負担を軽減するのが開発の目的である。現在までに鋼板の曲げ座標の計測に関する基本機能とパソコン上での計測結果の確認が可能な開発が完了しており、計測実験を実施しているところである。

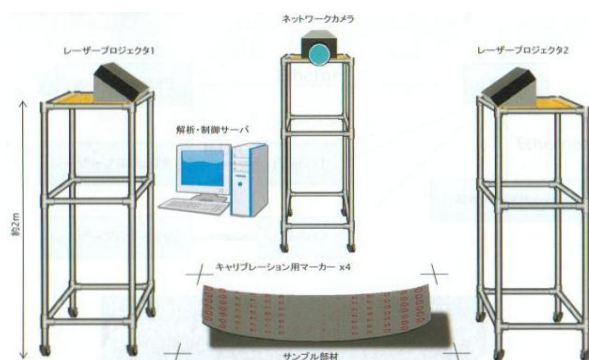


Fig.4 Bending measurement system

### 3. 溶接アーク音

ここで、「溶接シミュレーター」開発に関して、本研究ではアーク溶接時において、アーク溶接の進行過程において発生する溶接アーク音に着目して開発を進めた。

一般に溶接アーク音は、放電現象である溶接アーク発生時に溶接アーク近傍で圧力変化が生じることにより音波が発生すると考えられており、これに電磁氣的ノイズやシールドガスの流出音、スパッタの発生音等が合わされたものとして取り扱われている。

アーク溶接の教則本等<sup>2)</sup>では、適切な溶接アーク発生時の溶接アーク音は、「ジー」あるいは「パチパチ」といった小さな連続的な音が発生する、あるいは“キレの良い音”がする等と表現されていることが多い。一方で溶接アークが適切に発生していない時で、特にアーク長が長すぎる場合、適切なアーク発生音と比較すると不連続で間欠的に「パチパチ」と大きな音が発生する。またさらにアーク長が過大になると「ボー」あるいは「ボウボウ」と表現される音が発生する。これはアークが不安定になり、アークがふらつくためと考えられている。

溶接アーク現象と溶接アーク音との間に密接な関連性のあることを示した荒田等の研究では、CO<sub>2</sub> 半自動アーク溶接において溶接アーク音を周波数スペクトル分析した結果、溶接アーク音は広域的な連続スペクトルを有することが報告されている。

また溶接アーク音による溶接品質の判定に関する研究では、溶接異常の監視と検出に溶接アーク音を用いた研究<sup>3)</sup>が報告されている。原子力プラントの無監視化 TIG 溶接システムの開発に関する研究で、溶接異常時にアークが乱れると高レベルの溶接音が発生することが報告さ

れており、55db 以上の溶接音を異常として検出するよう無監視化 TIG 溶接システムに適用されている。

以上のように溶接アーク音は、波形、音圧、周波数スペクトルといった分析項目を持つ。しかし、本研究は溶接シミュレーター開発のための基礎的研究であり、シミュレーターにより電子的に溶接アーク音を再現し、溶接アーク音を学習者となる若手溶接技術者に“聴かせる”ことが重要となる。そこで本研究では、可聴域のアーク音を対象に、シミュレーターによる再現が容易な溶接アーク音の波形に関して分析を進めることとした。

### 4. 溶接アーク音の実験

本研究では、溶接シミュレーターの教育機能の強化を目的として、溶接アーク音を用いた作業者による溶接品質の判定に関する検討を行うこととした。そこで溶接アーク音の有する特性に関して、実験的検討を行った。以下に実験方法と実験状況を示す。

まず供試材料および溶接条件に関して以下に示す。

Fig.5 に示すような簡単な T 継手を試験体とした。実際の試験材料を Fig.6 に示す。また試験材料ならびに溶接条件を以下に示す。

- ・母材は、200mm×200mm 6mm の軟鋼材とする。
- ・母材に 75mm×6mm の平鋼材を隅肉溶接する。
- ・溶接は CO<sub>2</sub> 半自動溶接にて行う。ワイヤ系 8mm。
- ・溶接は 1 パス、脚長 5mm とする。
- ・溶接は電圧 24V、電流 170A とする。

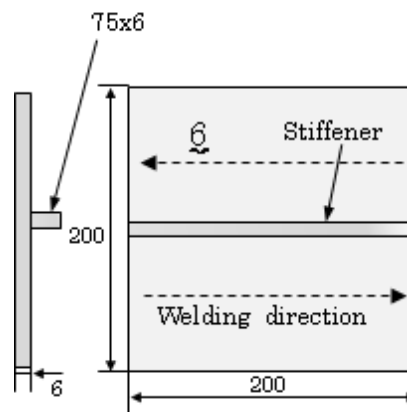


Fig.5 Welding specimen





Fig.6 Welding specimen

試験材料は、平鋼材の端部を点溶接にて母材に仮止めし、次に隅肉溶接を行い溶接アーク音を測定した。

次に溶接試験者に関して示す。本研究は訓練シミュレーターの開発を目的としている。そこで、熟練溶接技術者と若手溶接技術者の溶接作業では、発生する溶接アーク音に差異があるのかを検証する目的で以下に示す 2 名の溶接試験者を用意して溶接アーク音の測定実験を行った。

- ・試験者 A（熟練溶接技術者）：  
造船所に 43 年間勤務。  
NK 溶接士技量資格，ABS 溶接士技量資格を保有。
- ・試験者 B（若手溶接技術者）：  
実務経験なし。  
大学講義にて溶接体験をしたことがある。

また溶接アーク音の測定に関しては，Fig.7 に示すリオン株式会社製の普通騒音計 NL-42 を用いた。本騒音計は測定周波数範囲が，20Hz～8000Hz が測定可能なものとなっており，付属の「環境計測データ管理ソフトウェア AS-60」を用いて波形収録や FFT 分析が可能である。

溶接実験ならびに溶接アーク音測定の状態を Fig.8 から Fig.11 に示す。平鋼材の仮止め，本溶接ならびにアーク音の測定，溶接脚長の確認の手順で作業を行った。



Fig.7 NL-42 Sound level meter



Fig.8 Temporary weld joint



Fig.9 CO<sub>2</sub> Welding



Fig.10 Measurement of welding arc sound



Fig.11 Confirmation of weld leg length

## 5. 溶接アーク音の測定結果と分析

熟練溶接技術者である試験者 A と試験者 B による溶接アーク音の測定実験の結果を以下に示す。

試験者 A による溶接アーク音の測定結果の振幅波形をグラフにしたものを Fig.12 に、同様に試験者 B によるものを Fig.13 に示す。グラフは横軸に時間を、縦軸に振幅波形を取ったもので、縦軸の値は±130dB を最大値としている。

Fig.13 のグラフから明らかな様に試験者 B の波形振幅は増減が激しく、グラフ上の波形がノコギリ状になっている。これは溶接アークが不安定であり、溶接アーク近傍で大きな圧力変化が発生していることを示している。最大で約 120dB を超えるアーク音が発生していることが

分かった。またアーク音は不連続で間欠的に「パチパチ」と大きな音が発生していることも確認できた。一方で試験者 A による波形振幅は増減が少なく、90dB 前後の値で推移している。溶接アークが安定して発生していることを示しており、溶接アーク音は、「ジー」という小さな連続的な音が発生していることが確認できた。

今回の実験により溶接技能の差により溶接アーク音に明瞭に大きな差異が発生することが測定できた。

## 6. まとめ

本研究の溶接アーク音の測定実験の結果により溶接技能の差により溶接アーク音に大きな差異が発生することが確認できたので、今後、溶接シミュレーターの教育機能として溶接アーク音を取り入れることとした。

- ・溶接時の作業姿勢、運棒の速度や角度といった溶接実技の技能動作が基準範囲内で溶接アークが安定して発生していると判断される場合、測定した熟練溶接技術者である試験者 A の溶接アーク音をサンプリングしたものを溶接シミュレーターから発生させる。
- ・溶接アークが不安定と判断される場合、測定した試験者 B の溶接アーク音をサンプリングしたものに切り替えて訓練者に提示する。
- ・溶接アークが不安定と判断される場合、スパッタ発生之音や光、スパッタの表示を安定時より増加させる。
- ・溶接アークが不安定と判断される場合の溶接アーク音に関して、溶接シミュレーター上でデフォルメするかどうかは機能実装後に試用して検討する。

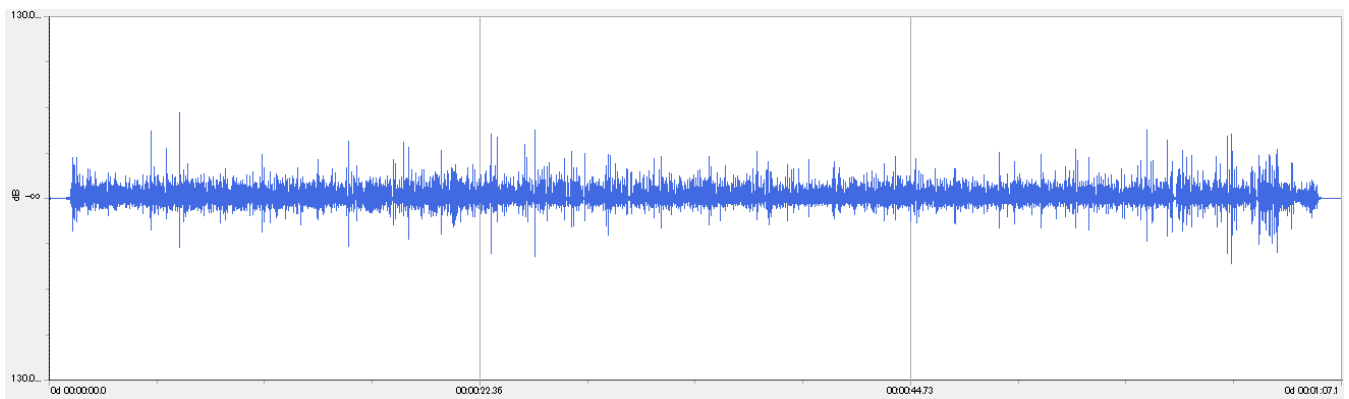


Fig.12 Amplitude waveform by tester A

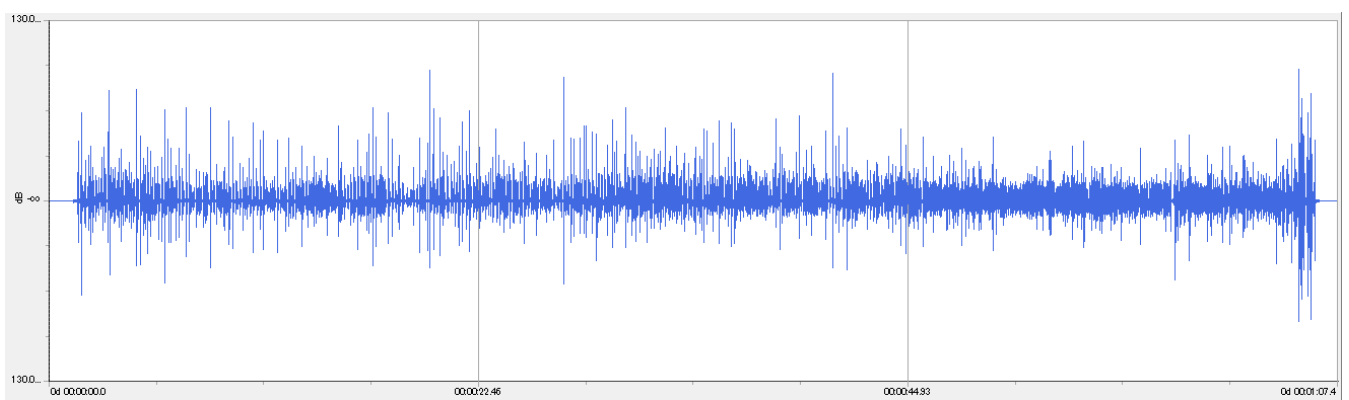


Fig.13 Amplitude waveform by tester B

## 謝辞

本研究は、厚生労働省の「戦略産業雇用創造プロジェクト」において、長崎県が実施する「ながさき海洋・環境産業雇用創造プロジェクト」の一部として共同研究中のものであり、ここに謝意を表する。

また本研究の溶接実験を担当した川口 保技術員に謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 荒田吉明, 丸尾大, 井上勝敬, 二俣正美, 棟徹夫: 溶接アーク音に関する研究 (第一報), 溶接学会誌, 第 47 巻, 第 7 号 (1978), pp.36-44
- (2) 野原英孝: 現場で役立つ溶接の知識と技術, 秀和システム, (2012) p.160
- (3) 名倉保身, 藤田憲, 藤谷泰之, 高岸正治: 無監視化 TIG 溶接の大型構造物への適用, 三菱重工技報, 第 32 巻, 第 6 号 (1995), pp.383-386