

プロジェクト報告

株式会社名村造船所

天下無類の挑戦 プロジェクト “横石”

～ 乾坤一擲 男達の闘い ～

内野 一成*

Uchino Issei



村上 純一**

Murakami Junichi



某上司は言った。「大型バルクキャリアの船側外板に自動溶接を適用出来ないか？」

著者らは心の中で叫んだ。“そんなの無理に決まっている。”

しかし、一端のサラリーマンである著者らはこう返した。「前向きに検討します。」

当社が建造する大型バルクキャリアには船側外板の上下を二分する横向姿勢の突合せ継手があり、30mmを超える板厚と片舷100mの溶接長を有するため、莫大な溶接工数を費やす施工箇所である。このような継手に対して自動溶接を適用すればコスト削減効果が得られることは至極当然のことであるが、施工を担う渠中工程の作業場所が“外業”であるが故に決定的な問題が容易に想像できた。従来、船側外板の溶接開先は天候の影響を受けにくい内側開先（船倉側から溶接）とすることが一般的であるが、船倉側にはホールドフレーム（船内肋骨）と呼ばれる補強材が一定間隔で配置されているため、連続溶接が持ち味の自動施工のメリットを十分に享受できない。即ち、船側外板の横向突合せ継手への自動溶接適用を成功させるためには、外板側から溶接する外側開先とする必要があり、外業の天敵である雨や風への真っ向勝負を意味する。更に渠中へのブロック搭載から数ヶ月前には該当継手の開先が切断されるため、本プロジェクトの決断は早々に下さなければならないプレッシャーと、仮に失敗した場合、無意味な外側開先を人の手で溶接させなければならない責任の重圧が著者らの肩にのしかかった。まさに天か地か、のるかそるかの大勝負を乾坤一擲の覚悟で挑んだ男達の軌跡を本書にて紹介する。

PJ phase 1 “始動！プロジェクト横石”

厚板かつ長尺の船側外板に対する自動溶接の適用は造船溶接技術者にとって長年の夢であり、幾度となく挑戦されてきた箇所である。当社でも遙か以前には簡易自動台車（自走する台車にトーチを保持させて溶接する自動機）を試用した事例もあると聞いているが、少なくともここ20年程は一切使用された実績はない。また同業他社においても自動化に向けた研究開発事例^{1) 2)}が挙げられているが、すぐに当社で扱える代物ではない。プロジェクトのキックオフ会議において声が挙がった。

「石松が使えないか？」

石松とはコベルコ ROBOTiX(株)製の溶接ロボットであり、写真1のような装置である。



写真1 小型可搬形溶接ロボット石松³⁾

原稿受理日：July 31, 2021

*株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 生産管理部 生産技術課

**株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 製造本部 船殻部 外業課

造船の溶接作業において広く使われる簡易自動台車は、トーチ操作は機械で行うものの、狙い位置の調整や溶接条件の設定はオペレータが自ら行う必要がある。一方、溶接ロボット石松は溶接開始前に、ワイヤタッチセンサによるセンシングを行うことで開先形状（板厚、開先角度、ルートギャップ等）を認識し、狙い位置や溶接条件（電流、電圧、溶接速度、ウィービング条件、積層パターン等）を自動で設定する機能を有している。当社の渠中工程では従来から下向突合せ継手に対して石松を適用していた実績があり、8 台の装置を保有していた。この石松がプロジェクト成功の鍵を握る。“石松による横向継手施工”略して“横石”という呼称をつけ、男達の闘い「プロジェクト横石」が始まった。

PJ phase 2 “ 難題！作業足場の選定 ”

プロジェクト開始直後、最初にして最大の難題にぶつかった。緒言でも述べたように、船側外板の継手を効率よく自動化するためには補強材のない外板側、外側開先としなければならないが、該当箇所は第1図のように渠底から約15mの高所となる。



第1図 石松施工イメージ

石松の設置、操作のためには安定した足場が必要となるため、二つの案を用意して検討を始めた。まず一つ目は写真2に示すような作業床の大きなテーブルリフタの利用である。テーブルリフタであれば自走することができるため、設置にクレーンなどを要さず、施工の自由度は格段に上がる。しかし、問題は高額なリース費用である。通常の高所作業車よりも作業床が広く、また15mまで昇床できるリフタは賃借台数も少なく、石松施工期間中占有するとなれば、

多職場との併用も難しい。関係者は頭を抱えた。



写真2 テーブルリフタ

もう一案は写真3に示すハッチコーミング（倉口）部に取り付けられる足場の利用である。この足場は手摺も含めて既製品として保有しているため、組立せずに架設することが可能である。しかし、設置のためには外板に足場用ピースを溶接し、施工後には当然除去しなければならない。更に作業スペースとして1mの幅しかなく、作業床は金網であるため、高所作業としての安心感に欠けた。今後、石松施工を担うオペレータはこの案を聞いて青ざめていた。



写真3 ハッチコーミング用足場

何か良い案はないかとプロジェクトメンバーが苦悶する中、救済の一声が挙がる。「あのステージが使えないか？」該当するステージの外観を写真4に示す。



写真4 LPG 船建造時 避難用ステージ

プロジェクト横石が始まる1年程前、当社ではフルレフ型のLPG運搬船を建造していた。液化することで極低温となるLPGタンクは、外面に引火性の高い防熱材を貼り付けるため、艀装岸壁係留中は不慮の火災に備えた緊急避難用のステージを写真4のように外板へ掛けていた。ステージは幅3m、長さ6m、台数も6基あった。外板の両弦に3台ずつ設置すれば、長さ18mにも及ぶ作業床を確保することができる。「これしかない！」満場一致で納得し、石松作業用ステージとすべく改造に取り組んでいくのであった。

PJ phase 3 “決断！横向プログラム導入”

当社では従来から石松を適用していたが、その施工は下向姿勢に限定しており、当社保有の8台は全て、下向専用機として購入していた。そのため横向姿勢に適用するためには、専用プログラムをインストールしなければならないが、この費用が即決できる代物ではなかった。そこでプログラム導入前に販売元であるコベルコ ROBOTiX(株)に依頼し、保有機械にプログラムを仮導入し、デモンストレーションを実施した。その様子を写真5に、得られたビード外観を写真6に示す。



写真5 デモンストレーションの様子



写真6 得られたビード外観

石松の能率に期待していた関係者の一部は反応が冴えなかった。船体の溶接に適用しているサブマージアーク溶接やエレクトロガスアーク溶接など、自動溶接に分類される施工法はどれも太径ワイヤ・大電流・高能率といった特徴

を持ち、装置設置や準備に時間は掛かるもののアークタイム(溶接の正味時間)で見れば圧倒的な能率を誇っている。しかし、石松の特徴は真逆である。人の手で溶接する際と同じ直径のワイヤを用い、設定する電流域もそう高くはないため、アークタイムのみを見れば自動溶接とするメリットがない。このままプロジェクトを進めるべきか、苦慮するメンバーが一喝される。

「人はどんなに頑張っているサボる時間がある、機械は絶対にサボらない」、「たとえ溶接正味時間であるアークタイムが変わらなくてもアークタイム率を上げれば勝算はある」。

アークタイム率とは、準備や片付けを含めた総作業時間に対するアークタイムであり、天候対策や移動に時間を費やす外業においては10~20%程度が平均値だと言われていた。アークタイム率を如何に向上させるかが勝負の明暗を分けることとなる。既によりかかった船、関係者は腹を括り、プログラム導入を決断した。

PJ phase 4 “登竜門！溶接施工法承認試験”

船体の溶接には新しい技術を何でも適用していいものではない。鋼種や板厚、溶接材料や溶接条件、適用姿勢など多岐に亘る項目毎に施工法承認試験を実施し、船級規則⁴⁾に定められる継手性能を満足する必要がある。言い換えれば承認を取得すれば問題はないのだが、これから石松を用いて下向姿勢と横向姿勢を兼用していく上では一つ問題があった。それは溶接材料の選定である。

従来から使用していた下向用の溶接ワイヤは比較的高い電流域に適した溶接材料であり、溶着金属の垂れを防止するために設定電流を低くする横向施工には不向きなワイヤであった。そこで目を付けたのが(株)神戸製鋼所において開発途中であったメタル系フラックス入りワイヤ：FAMILIARC™ MX-100ER⁵⁾である。もともと下向用として使用していたのはソリッドワイヤと呼ばれる断面同質のワイヤであり、深い溶込みが得られ、溶接後のスラグ(溶接時に生じる非金属物質)が少ないという多層盛りに適する性質を持っている。一方、フラックス入りワイヤとは中空の断面を持ち、アークの安定化などを目的としたフラックスを中空部に充填したワイヤであり、溶接時に発散する金属粒(スパッタ)を抑制する効果が得られる。開発中であったMX-100ERはフラックスに多量のメタル(鉄粉)を含み、ソリッドワイヤとフラックス入りワイヤの良いところ取りをする開発コンセプト、更に下向と横向の異なる電流域に対し

でも安定した溶接性能を得られる特徴を持つということであり、まさに今後の石松運用にうってつけの溶接材料であった。そこで、各種準備を整えた上で、船級の施工法承認試験を受験した。施工法承認試験の結果を第1表に、性能評価後の機械試験片の一例を写真7から写真11に示す。結果として船級規則に定められる全ての継手性能を満足し、溶接施工法承認を取得した。これによってプロジェクト遂行のための登竜門をくぐり抜け、決戦の日を待ち望むこととなった。

第1表 施工法承認試験の結果

試験詳細	TP No.	鋼種	板厚	溶接姿勢	溶接材料
	TP-1	EH40	36mm	下向	MX-100ER
	TP-2	EH40	36mm	横向	MX-100ER
非破壊検査	TP No.	外観検査	浸透探傷試験 (PT)	放射線透過試験 (RT)	
	TP-1	合格	合格	合格	
	TP-2	合格	合格	合格	
機械試験	引張試験	TP No.	試験片No.	規格値・判定基準	結果
		TP-1	1T1	引張強さ ≥ 510N/mm2	563 N/mm2
			1T2		565 N/mm2
			2T1		608 N/mm2
			2T2		593 N/mm2
	曲げ試験	TP-1	1B1, 1B2, 1B3, 1B4	有害な欠陥がないこと	欠陥無し
		TP-2	2B1, 2B2, 2B3, 2B4		欠陥無し
	硬さ試験	TP-1	1H	ビッカース硬さ ≤ 350HV	174~207 HV
		TP-2	2H		179~233 HV
	衝撃試験	TP-1	1A	試験温度 -20℃にて 最小平均吸収エネルギー ≥ 39J	Ave. 157 J
			1B		Ave. 183 J
			1C		Ave. 248 J
			2A		Ave. 115 J
			2B		Ave. 180 J
			2C		Ave. 257 J



写真9 試験後の曲げ試験片一例



写真10 マクロ断面 (横向姿勢)



写真7 承認試験の様子 (横向姿勢)



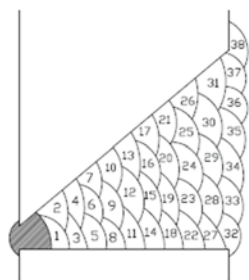
写真11 試験後の衝撃試験片一例



写真8 試験後の引張試験片一例

PJ phase 5 “奮闘！オペレータ訓練”

石松は溶接ロボットに分類される装置である。溶接ロボットと聞けば、ボタン一つで溶接が始まり、人の手は何も介さないとイメージされる方も多いであろう。しかし、横向姿勢の溶接というのは第2図のように溶接ビードを緻密に積み重ねていく必要があり、開先の精度だけでなく施工時の気温、パス間温度によるビードの垂れなどを見ながら、狙い位置や設定電流、溶接速度を細かく調整していく必要がある。特に船体建造の最終工程にあたる渠中では、前工程のブロック精度不良のしわ寄せがくるため、ある板厚に対する溶接条件を決めれば溶接ができる、という簡単なものではない。



第2図 横向施工 溶接積層の一例

もちろん石松は溶接ロボットであり、施工前のセンシングによって開先形状の認識、積層回数や溶接条件の設定を行うため、その他の自動溶接と比べれば圧倒的に人の介入は少ないが、完全にロボット任せとすることも難しい、という表現が適切かと思う。

石松による横向姿勢適用に向けて、石松オペレータの施工訓練が始まった。その様子を写真12に示す。



写真12 オペレータ訓練の様子

石松の初陣に向けて選抜されたオペレータは班長2人を含み8名。渠中工程は昼夜2交代の勤務体制をとっており、昼夜で石松をフル稼働させるための人数である。主に昼勤の終業後（夜勤の就業前）の時間を使い、一人一人が真剣に取り組んだ。時には「疲れたからやりたくない」という声も挙がった。渠中工程は船殻部屈指の激務職場、業務の合間を縫った訓練では当然だった。

しかし、今思い返せばこの訓練無しでは、石松による横向継手への適用は成し得なかったと筆者らは思う。訓練によって石松施工のノウハウを習得するだけでなく、機械の設置手順や装置の取り回し方、強風時の風対策、必要な備品の洗い出し、横向姿勢プログラムの修正など、数多くのアイデアをオペレータ同士で議論し、施工開始前に多くのトラブルシューティングを行うことができた。オペレータの努力とアイデア、全てを記載することはできないが、その例として写真13から写真16に概説する。



写真13 レールズレ防止のマグネット



写真14 扇風機を使って風対策実験



写真15 ビード繋ぎ部のプログラム修正



写真16 3mの大型試験片を使って実船を想定

練習記録を読み返すと、練習時間は合計 60 時間にも及んでいた。業務の合間を縫って必死に取り組んだオペレータ全員に最大限の敬意を表したい。

PJ phase 6 “ 決戦の日！実船適用 ”

ついにこの日が来た。2019 年 9 月 27 日、20 万 8,000 トン積載ばら積み貨物船の船側外板に対する石松の初陣に向けた石松作業用ステージの搭載が始まった。この日に向けて、ステージの改造を進めていた。写真 17 に示すような“渡り”を取り付け、装置ごとステージ間を移動できるように工夫を凝らした。また、ステージの外板取付け部は H 形鋼で天秤を作り、搭載作業の簡略化も図った。クレーンで吊った様子を写真 18 に示す



写真 17 ステージ間の“渡り”



写真 18 ステージのクレーン吊り状態

写真 19 のように片舷 3 基、長さ 18m の作業床が搭載された様子は圧巻であった。しかし、本題はここから。ステージの搭載に安堵はしたものの本当の闘いはこの日の夜から始まる。



写真 19 ステージ搭載状況

石松初陣は夜勤、関係者からは緊張が漂っていたが、心配をよそ目にオペレータは何事もなく施工を進めていく。これこそ、今まで実施した訓練の賜物である。その様子を写真 20 に示す。

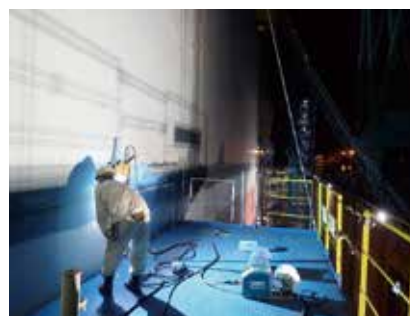


写真 20 石松初陣！！

施工は夜勤から昼勤に引き継がれ、オペレータが代わりながら昼夜 2 交代で施工を進めていく。溶接中に若干の微調整が必要とは言え、さすがは溶接ロボット、溶接のほとんどは機械任せにできることから、慣れてきたオペレータは石松を操作しながらグラインダ掛け、さらに写真 21 のようにオペレータ自身が溶接をするなど、+αの作業を始めた。これこそが石松の強みである。



写真 21 石松溶接 + 半自動溶接

ビード外観も写真 22 のように良好であった。オペレータの技量によって、若干の仕上がりの差はあるものの、著しい不良もなく、ビード外観検査も難なく合格した。



写真 22 実船での石松ビード外観

また、抜き打ちで放射線透過試験を実施したが、内部にも有害な欠陥がないことを確認し、石松施工によって高い品質を確保できることが証明された。

細かい改善事項は抽出されたものの、総評としては大きなトラブルもなく施工が完了し、プロジェクトは大成功を収めたと思われた。しかし、物語はここで終わらなかった。

「1 台ではあまりメリットがない、一人で 2 台持てるように検討をしろ」

プロジェクトメンバーも薄々気づいていた。石松の適用によって得られるメリットは多かったが、半自動溶接と同じワイヤ径、ほぼ同じ電流域を使用する石松を 1 台動かすだけでは完全に勝ちだとは言えなかった。再度プロジェクトメンバーは結集し、更なる改善に向けて動き始める。

PJ phase 7 “ 目指せ！多台持ち ”

石松を 1 人で 2 台操作するためにはステージの更なる改良が至上命題であった。そもそも 2 台操作のためには幅 3m × 長 6m のステージでは狭いという意見もあったが、何よりステージ 1 基分の溶接が完了した後、渠底から結線しているケーブル類を外して引き上げ → 次のステージへ装置を移動する → またケーブルを渠底に下ろして結線する、という面倒な作業が、単純に倍になってしまう。ステージを上方から見た様子を写真 23 に示すが、この狭いスペースで重量のある装置類を取り回さなければならない。



写真 23 ステージを上方から撮影

また、初期ステージは 3 基横並びで搭載することから、写真 24 のような吊りワイヤ間の石松施工不可区間があるだけでなく、写真 25 のように船体に架設された動力線を躲せず、未施工区間ができてしまう問題もあった。そのため、初期ステージ×石松 1 台施工で挑んだ大型バルクキャリア 2 隻の石松適用率(石松適用長／横向継手全長)は 75% に留まり、25%は従来通り人の手で溶接しているという実態であった。言い換えれば、まだまだ石松によるメリット創出のチャンスがあった。



写真 24 吊りワイヤ間の石松施工不可区間



写真 25 動力架設線を躲せずに隙間が発生

これらの問題を解決し、石松 2 台施工を安定運用するため、ステージの改造に乗り出した。改造後のステージ外観を写真 26 および 27 に示し、改造のポイントを列記する。



写真 26 ステージ Ver. 2 近景



写真 27 ステージ Ver. 2 遠景

＜石松ステージ改造ポイント＞

- 1) 幅3m×長6mのステージ2基を結合し、幅3m×長12mのステージとした。
- 2) 動力架設線を敷きやすいように外板にかける天秤部幅を狭くした（ステージ幅の半分）。
- 3) 天秤-ステージを直接吊らずに屋根を取り付けた。屋根はポリカーボネート製の波板を貼り付けており、更に外板から伝う雨水を遮断するよう外板との接触面にはパッキンを取り付けている。また強風時はステージ全体をサンネットで覆い、風対策も可能。
- 4) ステージに分電盤を取り付けた。これにより石松電源×2、手直し用溶接機×1、合計3本の一次ケーブルを付けたままでも、分電盤用のケーブル1本だけを外せばクレーン移動ができる。
- 5) ステージ昇降用のゴンドラを取り付けた。従来は高所作業車を占有する必要があったため、その他の高所作業に支障がでていた。

改造したステージと2台持ちによって得られた効果を第2表に示す。本書を見て頂いた方々にとって気になるのは半自動から石松としたことでどれだけ工数が下がったのか？という視点であると思料するが、適用船型によって板厚・溶接長が異なり、またブロック精度によってギャップ（開先断面積）が変動するため、様々な仮定の下に導出しなければならないのが現状であり、工数としてのメリット算出は本書では差し控える。

第2表 石松適用による効果

	アークタイム率※1	石松適用率※2
初期ステージ ×石松1台施工	40%	75%
ステージVer. 2 ×石松2台施工	65%	98%

※1 石松アークタイム[H]／石松計上時数 [H]

※2 石松適用長[m]／横向突合せ継手全長 [m]

アークタイム率を見れば、もともと外業では10～20%程度と言われていたものを、石松の適用によって40%に向上することができ、更にステージ改良と2台持ちによって65%まで向上した。石松適用率も初期ステージでは75%に留まっていたが、ステージを改造することで適用区間が増え、船側外板横向継手のほぼ全線に亘って自動溶接を適用することを実現した。

また板厚の厚い大型バルクキャリアの船側外板横向継手

は、船倉側の足場に大人数が載って作業をしている光景が当たり前であったが、外側から石松を先行させることで、船倉側の作業者を減らし、他の作業量の多いところへ配員し直すことが出来ている。配員の自由度が増すことで工程の安定化にも繋がり、いまや渠中工程にとって、外開先の石松施工はなくてはならない自動溶接法に昇華している。

最後に

当初、誰もが無理だと思っていた船側外板の横向突合せ継手に対する自動溶接を実現し、いまや当たり前の施工方法となっている石松による横向施工。なぜ実現できたのか？著者らは振り返る。ステージを設計・改造したもの、石松ステージをクレーンで動かすもの、石松施工のために開先を切り直してくれるもの、溶接材料の開発やプログラム修正をして頂いた(株)神戸製鋼所技術者の皆さま、必要な備品準備（無理難題）を受けて頂いた商社のご担当者様・・・数多くの方に支えられたことは間違い無い。携わった皆さまには多大なるご厚情に心より感謝申し上げる。しかし、なにより実現した原動力は「現場」にあった。

（写真28）成し遂げてやるという熱い決意と乾坤一擲の覚悟こそが、イノベーションを創造したのである。



写真28 プロジェクトを実現した男達（の一部）

参考文献

- 1) 小野昇造 他：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-，三井E&S 技報 No.3 2020年 pp7-13
- 2) 菅野博義 他：高効率横向溶接法の開発～水冷銅板とワイーピングによる熔融金属の垂れ下がり防止と高溶着化～，溶接学会全国大会講演概要 第103集 2018-9 pp394-395
- 3) 神戸製鋼所パンフレット：小型可搬形溶接ロボット石松
- 4) 日本海事協会 鋼船規則M編 溶接
- 5) 神戸製鋼所パンフレット：FAMILIARTM MX-100ER