残留応力制御型 T M C P 鋼板の有効性検証

— (第2報) 船体直線ブロック製作時の工作精度に及ぼす T M C P 鋼板の残留応力の影響 —

正員 谷 徳 孝*
大 江 憲 一*
中 島 義 男**

上 田 太 次*
宮 崎 建 雄**

Effects of “Residual Stress Controlled TMCP Steel Plate” on Accuracy of Ship Blocks
— (2nd Report) Influence of Residual Stress of TMCP Steel Plate on Precision of Fabricating Straight Blocks —

by Tokutaka Tani, *Member* Taiji Ueda
Ken-ichi Ohe Tatsuo Miyazaki
Yoshio Nakashima

Summary

A new TMCP steel plate, called as “Residual stress controlled TMCP steel plate”, was developed for use in fabricating the cargo tank and hull structure, which was expected to build accurately ship blocks and to increase productivity through mechanization/automation effectively. In the 1st report, the effects of residual stress of TMCP steel plate were discussed in slit-slot cutting. In this investigation, using thermal-elastic-plastic FEM and experiments in fabricating straight double hull blocks, the effects of residual stress of TMCP steel plate are quantitatively discussed in stiffener welding after slit-slot cutting and in inserting transverse panel into skin panel from longitudinal end. The results of this paper are as follows.

- (1) Residual stress of TMCP steel plate has great influence on the accuracy of transverse panel after stiffener welding.
- (2) In the construction of straight double hull blocks made of “Residual stress controlled TMCP steel plate”, construction error of this plate is smaller than that of conventional TMCP steel plate.
- (3) It was made clear that the productivity in inserting transverse panel into skin panel was increased by using developed plate.
- (4) In order to achieve high quality of block accuracy and improve productivity, it is effectively to build ship blocks using “Residual stress controlled TMCP steel plate”.

1. 緒 言

近年、造船各社ではコストダウンおよび生産性向上を目的として、船体直線ブロックの小組立や大組立の溶接作業を自動化し、さらに高効率なブロック組立方法が行われている。

例えば、単板ロンジ先行溶接法、外板ロンジ先行溶接法といったロンジを先付けし、トランスを引き込む工法が採用されている。これらの工法は、トランス溶接工程の自動化を阻む欠点であったトランスのスロット・カラープレート構造に対して、カラープレート溶接を省略するため、自動溶接の許容限界であるギャップ±1.5 mmのスリットでトランスをロンジ端部より引き込む高度な組立方法である。

しかし、これらの工作法の前提として、各部材に対して、高い工作精度が要求されており、トランスパネルや

* (株)神戸製鋼所
** 日立造船(株)

スキンパネルのスリットスペース/ロンジスペース等の精度によっては、トランス引き込みや引き込み後の溶接において、切断や溶接等の手直しが必要となる場合がある。これらの不具合の原因として、溶接条件のばらつきといった施工上の要因が考えられるが、鋼板に対しても、加工時の変形が少なく、変形ばらつきが安定した鋼板が求められており、変形の原因となる残留応力を低減する必要がある。

前報において、熱弾塑性 FEM 解析および実切断実験によりトランス材のスリットスロット切断時の切断精度に及ぼす残留応力の影響を明らかにした¹⁾。しかし、前報ではトランス材の切断精度のみを対象としており、実船のブロック組立においては、スリットスロット切断後にスチフナ溶接してトランスパネルを製作した後、板継溶接やロンジ溶接を行ったスキンパネルに対して、引き込みが行われるため、これらの工程を通しての工作精度に及ぼす残留応力の影響を検討する必要がある。

一方、船体ブロックの工作精度に及ぼす施工上の要因については、累積誤差の観点から検討した例が見受けられるが、鋼板の残留応力の観点から工作精度への影響を検討した例はない^{2)~4)}。

本報では、高い寸法精度が要求される直線ブロック組立におけるトランス材のスリットスロット切断からスチフナ溶接およびトランス引き込み工程を対象として、船体直線ブロックの工作精度と圧延残留応力分布の関係を調査することにより、残留応力制御型 TMCP 鋼板の有効性を検討した。

2. トランス材のスリットスロット切断からスチフナ溶接に至る工程での変形解析

2.1 解析方法

トランスパネル製作時のスリットスロット切断からスチフナ溶接に至る工程を対象として、汎用コード ABAQUS-STANDARD を用いた熱弾塑性 FEM 解析を行った。スリットスロット切断はプラズマによる切断を対象とし、解析手法および材料定数/機械的性質は前報と同様とした¹⁾。

トランス材のスチフナ溶接は、電流 310A、電圧 32V、溶接速度 280 mm/min の条件で隅肉溶接を行う場合を対象とした。溶接入熱は、移動熱源として取り扱い、次節の温度計測結果より、熱効率 0.7、ベースプレートに投与される熱量は $2/3Q_{net}$ とした⁵⁾。本報においては、スチフナ溶接時の変形は面内変形を対象としたため、4 節点の平面応力要素を用い、スチフナの両側の脚長に相当する領域に対して、スリット側からスロット側にかけて順次熱流束を付与した。

Fig.1 FEM mesh division of plate

解析に用いたモデルを Fig.1 に示す。解析対象は、 $20^{\circ} \times 3000^{\text{W}} \text{mm} \times 12000^{\text{L}} \text{mm}$ の YP32 級 TMCP 鋼板とした。切断前の残留応力状態は、①残留応力を制御した鋼板(Plate A)、②幅端部に圧縮応力を有する鋼板(Plate B)、③幅中央に圧縮応力を有する鋼板(Plate C)の、3 パターンとした。対象鋼板の明細および切断前の残留応力状態を Table1 および Fig.2 に示す。

鋼板 B,C は、実際の TMCP 鋼板の残留応力分布を想定して長手方向にも応力分布を与えた。鋼板の Top 部は長手中央部に比べ、応力状態が変化している。

Table1 List of cases for simulation

No.	Plate size	Stress distribution
Plate A	$20^{\circ} \times 3000^{\text{W}} \times 12000^{\text{L}}$	Controlled
Plate B	$20^{\circ} \times 3000^{\text{W}} \times 12000^{\text{L}}$	Uncontrolled
Plate C	$20^{\circ} \times 3000^{\text{W}} \times 12000^{\text{L}}$	Uncontrolled

Fig.2 Initial residual stress distribution

2.2 スチフナ溶接時の入熱量の決定

スチフナ溶接時の入熱量は、小型実験を実施して、溶接時の温度履歴を計測することにより算定した。小型実験は、 $16^{\circ}\text{mm} \times 400^{\text{W}}\text{mm} \times 900^{\text{L}}\text{mm}$ のベースプレートの幅中央に $16^{\circ}\text{mm} \times 100^{\text{W}}\text{mm} \times 900^{\text{L}}\text{mm}$ のスチフナを、電流 280A、電圧 36V、溶接速度 500 mm/min の条件で 1 層の CO_2 溶接を行った。その際、ベースプレートの長手方向中央において、溶接部から直角方向に 10 mm と 20 mm 位置の板厚中央位置の温度を CA 熱電対により計測した。

温度計測結果を Fig.3 に示す。この計測結果を基にベースプレートに投入される熱量を算定した。

Fig.3 Temperature history at fillet welding

2.3 解析モデルの精度検証

本解析モデルの精度検証のため、小型実験の結果と解析結果を比較した。

プラズマ切断に対しては、上田らの手法を参考にして、 $16^{\circ}\text{mm} \times 60^{\text{W}}\text{mm} \times 300^{\text{L}}\text{mm}$ の矩形板において、電流 260A、電圧 145V、切断速度 1500 mm/min の条件で板の中心線に沿って切断した場合の横曲がり量を比較した⁵⁾。結果を Fig.4 に示す。実験結果と解析結果はほぼ一致しており、プラズマ切断時の面内変形に対する解析モデルの精度が高いことがわかる。

Fig.4 Comparison of measured and calculated values in plasma cutting deformation

スチフナ溶接に対しては、前節の温度計測を行った試験体に対して、スチフナの両側に同一方向の隅肉溶接を

行う場合の横(幅)収縮量を比較した。横収縮は、溶接線から 50 mm 位置にケガキ線を引き、長手方向各位置において、3 次元計測装置を用いて変化量を計測した。計測値は、表裏面の変化量を平均することにより面外変形の影響を除外した。スチフナ溶接時の横収縮量の比較を Fig.5 に示す。溶接の終了側で計測値の絶対値がやや小さいことを除けば、解析値と計測値はほぼ一致しており、本解析モデルを用いて、スチフナ溶接時の幅収縮量を高精度に評価できるといえる。

Fig.5 Comparison of measured and calculated values of width shrinkage in stiffener welding

3. 解析結果

3.1 スチフナ溶接後におけるトランスパネルの形状

トランス材のスリットスロット切断に続くスチフナ溶接後の変形状態を評価した。残留応力を制御した鋼板 A のスチフナ溶接後におけるトランスパネルの形状を Fig.6 に示す。変形は 200 倍に拡大して表示した。スリットスロット切断およびスチフナ溶接により、長さが縮み、スリット幅が収縮している。また、スリット側からスロット側へのスチフナ溶接に起因して、若干の横曲がりが発生している。

Fig.6 Typical deformation in stiffener welding

鋼板 A~C に対して、スチフナ溶接後の真直度や平行度を評価した結果を Fig.7 に示す。スリットスロット切断およびスチフナ溶接時の熱歪や残留応力による変形、過渡変形に起因する切断誤差により、寸法精度や真直度/平行度/直角度が低下している。全てのスチフナに対してスリット側からスロット側への溶接を行ったため、ス

ロット側に比べスリット側の長さ方向(x方向)の収縮量が大きく、横曲がりが発生している。鋼板の残留応力に起因する変形や切断誤差により、鋼板Bでは横曲がりにより大きくなり、鋼板Cでは長手中央部では、横曲がり小さいものの、Top側では逆の形状となっており、残留応力により工作精度が低下することがわかる。

Fig.7 Plate shape after stiffener welding

以下では、トランス材の工作精度上重要なスリット位置の長手方向の変化量およびスリット幅の変化量の観点から残留応力の影響について論述する。

スチフナ溶接後におけるスリット位置の長手方向の変化量およびスリット幅の変化量をそれぞれ Fig.8, Fig.9 に示す。スリット位置の長手方向変化量およびスリット幅の変化量は、幅端部から 100 mm 位置における変化量を採用した。

残留応力を制御した鋼板 A は、No.13 スリット位置において長手方向に 2.5 mm 程度収縮しているのに対し、初期に残留応力分布を有する鋼板 B と鋼板 C は、いずれも収縮しているものの、鋼板 B は 4 mm、鋼板 C は 1 mm の収縮量であり、初期の残留応力パターンによってスチフナ溶接後の収縮量は大きく変化している。

スリット幅の変化量については、残留応力を制御した鋼板 A は全体的に 0.2~0.3 mm 程度狭くなっているのに対し、初期に幅端部に圧縮応力を有する鋼板 B は、全体的には 0.6 mm 狭くなり、No.1 スリットでは 2.0 mm 程度狭くなっている。幅中央に圧縮応力を有する鋼板 C は、0.3 mm 程度広くなっているスリットと 1.0 mm 程度狭くなっているスリットが混在している。

残留応力を有する鋼板 B, C において、長手方向の変化量およびスリット幅の変化量とも No.1 スリット位置での変化の度合いが大きい。これは、鋼板の先端の不均一

な応力分布によるものである。残留応力の長手方向分布により、各スリット位置において、変形量にばらつきが生じている。トランスパネル製作時の工作精度に及ぼす残留応力の影響は大きいといえる。

Fig.8 Longitudinal deformation after stiffener welding

Fig.9 Slit width deformation after stiffener welding

3.2 スチフナ溶接のみによる鋼板形状の変化

スチフナ溶接のみによる変形状態を評価した。スチフナ溶接によるスリット位置の長手方向の変化量およびスリット幅の変化量をそれぞれ Fig.10, Fig.11 に示す。ここでは、スリットスロット切断後の形状を基準としてスチフナ溶接単独による影響を評価した。

スチフナ溶接により、スリット側の長さは約 2.5 mm 程度縮み、スリット幅も、0.2~0.3 mm 程度狭くなっており、スチフナ溶接による変形の絶対値は大きい。

Fig.10 Longitudinal deformation by stiffener welding

Fig.11 Slit width deformation by stiffener welding

スチフナ溶接時の変形に及ぼす鋼板 A~C の違いによる差は小さく、Fig.8, Fig.9 のスチフナ溶接後の変形量差は、スリットスロット切断時の変形量の差に起因している。

3.3 スチフナ溶接による残留応力状態の変化

スチフナ溶接後の残留応力分布を Fig.12 に示す。残留応力を制御した鋼板 A, 初期に残留応力分布を有する鋼板 B, C のいずれにおいてもスチフナ溶接後の残留応力分布の差は少ない。前報で示したスリットスロット切断後の長手方向応力分布と比較すると、ほぼ同様の応力分布であり、スリットスロット切断によって、切断前の鋼板の残留応力は、大部分が解放されているため、スチフナ溶接時には、初期残留応力分布の違いによる変形量の差は小さいことが理解できる。

Fig.12 Longitudinal stress distribution after stiffener welding

3.4 トランス引き込み時の手直し発生に関する検討

以上の解析結果を基に、トランスパネルとスキンパネルの精度を比較することにより、トランス引き込みにおける手直し発生の有無について検討した。対象ブロックは、13 本のロンジ材を取り付けたスキンパネルに対して、スチフナを溶接した $20^t \times 3000^W \times 12,000^L$ のトランスパネルを引き込む場合を対象とした。スキンパネル側も板継ぎ溶接やロンジの取り付けにより変形が発生する

が、ここでは、椎野らの検討結果を参考にして、ロンジ溶接後の精度(ロンジスペース誤差 $L(n)$)を $2\sigma = \pm 1.83$ mm, ロンジウエブとスリットの隙間であるスリットギャップは弾性変形を考え、 $g = \pm 2.5$ mm と仮定した⁴⁾。また、トランス材およびスキン材は、切断および溶接による収縮量に相当する延べ尺や伸ばしを考慮した。スキンパネル側の誤差は鋼板 A~C で同じとした。

トランスパネルのスリットスペース誤差とスキンパネルのロンジスペース誤差を比較した結果を Fig.13 に示す。トランスパネルについては、切断/溶接による各スリット幅の変化量や長手方向の変化量を考慮した。具体的には、各スリット位置に対して、(1)(2)式で定義される値をトランス側の許容値とした。

$$T_U(n) = S(n) + g + W(n)/2 + \delta(n) \quad \dots (1)$$

$$T_L(n) = S(n) - g - W(n)/2 + \delta(n) \quad \dots (2)$$

ここで、

T_U : トランスパネルの許容値の上限

T_L : トランスパネルの許容値の下限

S : スリット位置の長手方向の変化量

g : スリットギャップの設定値(ここでは 2.5 mm)

W : スリット幅の変化量

δ : 延べ尺

n : n 番目のスリット位置 $n=1,2,3 \dots 13$

Fig.13 Estimation of inserting transverse panel

評価方法としては、各スリット/ロンジ位置に対して(3)式が成り立てば、スキンパネルのロンジスペース誤差 $L(n)$ がトランスパネルの許容値の範囲内にあることとなり、手直しは発生しない。逆にスキンパネル側のロンジスペース誤差 $L(n)$ の方が大きくなり、(3)式が成り立たなければ手直しが必要となる。

$$T_L(n) \leq L(n) \leq T_U(n) \quad \cdots \quad (3)$$

残留応力を制御した鋼板 A は、延べ尺により溶接時の収縮量を適正に補正できており、トランス側のスリット位置とスキン側のロンジ位置がほぼ一致し、スリットスペースの許容値の中に、ロンジスペース誤差が含まれている。それに対し、初期に残留応力を有する鋼板 B においては、全てのスリット位置において上限側がロンジと干渉し、鋼板 C においては、スリット 8～13 の下限側がロンジと干渉し、トランス引き込み時に手直しが必要となることが予想される。これらの残留応力に起因する変形に対しては、残留応力パターンに応じて変形状態が異なるため、延べ尺や伸ばしによる補正は困難であり、トランス引き込みにおいてトラブルを回避するには、鋼板の残留応力を制御することが重要である。

4. ダブルハルブロック建造時の工作精度の検証

4.1 適用部位および評価方法

ダブルハル VLCC の平行ブロック組立において、残留応力を制御した残留応力制御型 TMCP 鋼板と従来の TMCP 鋼板を小型ユニットブロック各 2 つずつに適用して工作精度を評価した。対象鋼板の明細およびブロックの明細をそれぞれ、Table2～4 に示す。

工作精度の評価においては、外板ロンジ先行溶接法を対象として、トランスパネルのスリットスペース誤差とスキンパネルのロンジスペース誤差、スリット幅の誤差を評価した。また、トランスの引き込み時間を計測することにより生産性への影響についても評価した。

スリットスロット切断は、NC プラズマ切断機を用いて、スチフナ溶接は、ツイントーチ方式 NC 門型溶接ロボットを用いて行った。スチフナ溶接後のスリット幅はノギスを用いて前報と同様の方法で計測した。スリットスペース誤差は、スリット側の幅端部から 100 mm 位置において、No.1 スリットを基準として各スリット位置までの長さを鋼製巻き尺(張力 2 kg/mm)を用いて計測し、図面値と比較して誤差を算出した。

スキンパネルについては、高速 FCuB 片面溶接装置を用いて 3 枚のスキン材の板継溶接を行い、ロンジ取り付

け位置をマーキングした後、鵜飼方式の 20 電極ラインウエルダーを用いて 13 本のロンジ溶接を行った。

ロンジスペース誤差は、ロンジ溶接後においてトランスパネル引き込み位置のロンジ間隔をインナーゲージにより計測し、図面値と比較してロンジスペース誤差を算出した。スリットスペース/ロンジスペースの計測方法を Fig.14 に示す。

なお、スキン材およびトランス材には切断や溶接による収縮量を考慮した延べ尺を設定している。

Table2 List of plate for transverse plate

Plate	Plate size	Number
Developed steel	20 ^t ×3000 ^w ×12000 ^L	8
Conventional steel	20 ^t ×3000 ^w ×12000 ^L	8

Table3 List of plate for skin plate

Plate	Plate size	Number
Developed steel	18.5 ^t ×4000 ^w ×20000 ^L	6
Conventional steel	18.5 ^t ×4000 ^w ×20000 ^L	6

Table4 VLCC straight block list

Section	Size
Block Size	3,000 ^b ×12,000 ^w ×20,000 ^L
Number of transverse	4
Number of skin	3
Number of longi	13

Fig.14 Measuring position of slit / longitudinal-space

4.2 適用結果

4.2.1 トランスパネルの工作精度

残留応力制御型 TMCP 鋼板および従来の TMCP 鋼板を適用したトランスパネルに対して、スチフナ溶接後のスリットスペース誤差を計測した。計測結果の一例を Fig.15 に示す。

残留応力制御型 TMCP 鋼板は、スリットスロット切断およびスチフナ溶接により、長手方向に収縮が発生しているが、延べ尺の設定により、ほぼ狙い通りのスリットスペースとなっている。一方、従来の TMCP 鋼板は、延べ尺の設定値以上の収縮が発生し、No.13 スリット位置においては累積誤差により約 1.5 mm 程度長さが短くなっている。

スリット幅の計測結果を Fig.16 に示す。スリット幅

についても、残留応力制御型 TMCP 鋼板は、狙いから 0.5 mm 程度狭くなっているものの、No.1~No.13 スリットにおいて、比較的安定したスリット幅となっている。それに対し、従来の TMCP 鋼板では、狙いより 2 mm 以上も狭いスリットがあり、また、No.1~No.13 スリットにおけるスリット幅のばらつきも大きい。

全トランスパネルのスリット幅の計測値に対して、平均値および最大/最小値を算出した結果を Fig.17 に示す。残留応力制御型 TMCP 鋼板のスリット幅は安定しているのに対し、今回計測した従来の TMCP 鋼板は、スリット幅が平均で狙いより 2 mm 近く狭くなっており、ばらつきも大きいことがわかる。

Fig.15 Longitudinal deformation after stiffener welding

Fig.16 Slit width measurement after stiffener welding

Fig.17 Slit width measurement after stiffener welding (all slits)

4.2.2 スキンパネルの工作精度

スキンパネル側の工作精度として、ロンジスペース誤差の計測結果の一例を Fig.18 に示す。従来の TMCP 鋼板と残留応力制御型 TMCP 鋼板の両方ともロンジスペース誤差が大きく、また、各ロンジ位置でばらつきがあることがわかる。

従来の TMCP 鋼板と残留応力制御型 TMCP 鋼板のロンジスペース誤差を比較すると、両者の差は小さい。これは、ロンジ取り付けにおけるマーキング精度およびロンジ配材精度の影響が大きいためである。

(a) Developed steel

(b) Conventional steel

Fig.18 Longi-space error measurement

4.2.3 トランス引き込み時の手直し発生の評価

トランスパネルのスリットスペース誤差およびスキンパネルのロンジスペース誤差の計測値を用いて、トランス引き込みにおける手直し発生の可能性について検討した。3.4 節と同様の手法で検討した結果を Fig.19 に示す。

残留応力制御型 TMCP 鋼板は、ロンジスペース誤差がトランスの許容値に入っており、問題なくトランス引き込みが行えるものと予想される。それに対し、従来の TMCP 鋼板は、トランスパネルの工作精度の低下に起因してトランス側の許容値が小さく、ロンジスペース誤差が許容値を超えている箇所が数カ所あり、トランス引き込み時に切断等の手直しが必要となることが予想される。

5. 結 言

熱弾塑性 FEM 解析を用いた検討および実船のダブルハルブロックへの残留応力制御型 TMCP 鋼板の適用により、本鋼板の有効性を検討した。

- ① スリットスロット切断からスチフナ溶接に至る工程において、スリット位置の長手方向の変化量およびスリット幅の変化量に及ぼす TMCP 鋼板の残留応力の影響は大きい。
- ② 従来の TMCP 鋼板に比べ、残留応力制御型 TMCP 鋼板のトランスパネルの変形ばらつきは小さい。
- ③ トランス引き込み工程において、従来の TMCP 鋼板はトラブルが発生するのに対し、残留応力制御型 TMCP 鋼板は、問題なく引き込み可能であり、本鋼板による生産性向上効果を実証した。

謝 辞

本論文の作成にあたり、貴重なアドバイスをいただきました東京大学環境海洋工学専攻：野本敏治教授、青山和浩助教授、武市祥司助手に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 谷, 岡田, 大江, 宮崎: 残留応力制御型 TMCP 鋼板の有効性検証 日本造船学会論文集 第189号 (2001), pp299~307
- 2) 奥本, 松崎, 椎野: 船殻の工作精度に関する考察 石川島播磨技報 第32巻(1992)第2号, p83~91
- 3) 奥本, 松崎, 柿元, 遠藤, 椎野: 船殻の高精度加工・組立システム 石川島播磨技報 第32巻(1992)第6号, p1~7
- 4) 椎野, 深見, 住友: 船殻の高精度加工・組立システム 石川島播磨技報 第34巻(1994)第1号, p39~43
- 5) 上田, 村川, 順, 奥本, 石山: 鋼板のガスおよびプラズマ切断による変形の FEM 解析 日本造船学会論文集 第175号(1994), pp307~315
- 6) 佐藤, 寺崎: 溶接残留応力・溶接変形におよぼす相変態の影響 溶接学会誌 第45巻(1976)第7号, pp560~566
- 7) 宮崎, 中島, 黛元, 竹内 他: 高速 FCuB 片面溶接法の開発 日立造船技報 第54巻(1993)第1号, pp71~85

Fig.19 Comparison of longi-space and slit space error

4.2.4 トランス引き込み結果

残留応力制御型 TMCP 鋼板および従来の TMCP 鋼板を適用したトランスパネルのスキンパネルへの引き込み時間を計測した結果を Fig.20 に示す。

残留応力制御型 TMCP 鋼板はトランス引き込み時に問題なく引き込めるのに対し、従来の TMCP 鋼板は、引き込み時に手直しが必要となり、スリットの切断等の修正に多くの時間を要した。さらに手直し切断後のスリットは、スリットギャップが 3 mm 以上となり、後の溶接工程においても、生産性が低下する結果となった。

Fig.20 Insert time of transverse panel into skin panel from longitudinal end