

(論文)

残留応力制御型 TMCP 鋼板の開発と有効性検証

谷 徳孝*・小林克壮**・大江憲一***・上田太次****・岡田順応****・宮崎建雄*****

*鉄鋼部門・厚板商品技術部 **鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター ***備前コベルコ科研 ****鉄鋼部門・加古川製鉄所・厚板部
*****九州日立造船㈱

Effects of "Residual Stress Controlled TMCP Steel Plate" on Block Shape Accuracy

Tokutaka Tani・Yoshitake Kobayashi・Kenichi Ohe・Taiji Ueda・Nobumasa Okada・Tatsuo Miyazaki

TMCP is a technique that makes it possible to obtain high strength plate characterized by high toughness and good weldability. The problem that occurs with TMCP plates is shape accuracy caused by residual stress. Residual stress controlled TMCP steel plate was developed by a technique that solves residual stress problems. In this study, using thermal-elastic-plastic FEM and various experiments, the effects of TMCP steel plate residual stress are quantitatively discussed in relation to slit-slot cutting and the insertion of transverse panels into skin panels.

まがき = TMCP 鋼板は、優れた溶接性と大入熱溶接の適用による高能率溶接が可能のため、日本の造船業とともに発展してきた。これまで、船舶の大型化及び軽量化に伴って、TMCP 鋼板は広く使用されてきており、例えば大型タンカにおいては、その比率はほぼ 70% に達している。しかし、TMCP 鋼板は、制御圧延及びそれに続く加速冷却により材質制御されるために、その過程で発生する不均一冷却に起因した残留応力分布により、時として面内 / 面外の形状不良が発生し、工作精度の低下を引起こすことがあった。

今回、TMCP 工程において、ハード・ソフト面から構成される形状・残留応力制御技術を構築することによって、従来の TMCP 鋼板の有する歪み及び形状の問題を解消した残留応力制御型 TMCP 鋼板(ヒズミレス鋼板)を開発した。

本報では、船舶を製造する過程において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トランスパネル引込みまでの工程(図1 ~)を対象として、切断後の鋼板形状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。

1. 残留応力制御技術の概要

従来の TMCP 鋼板の形状や歪みに係わる問題点として、例えば、TMCP 鋼板を切断・溶接加工すると、その残留応力に起因して大きな変形や変形量のばらつきが生

じることがある。これらの形状不良が発生した場合、施工能率の低下や矯正工程の追加などの不具合が生じることになる。

TMCP 鋼板の残留応力は、加熱・圧延・加速冷却条件の違いにより発生する不均一な温度分布が原因であることが一般に知られている¹⁾。そのため、その製造プロセスにおいて、温度分布を均一化するための方策として、局所加熱装置やスキッドシフトのような加熱時の温度偏差防止技術、加速冷却時の均一冷却の前提となる圧延形状制御技術、さらに加速冷却中の四周部の過冷却を防止する冷却技術などが行われている。

しかし、現状の技術レベルでは、加熱・圧延・加速冷却条件のわずかな変動により鋼板に不均一な温度分布が形成されるため、完全な温度分布の均一化は実現できていないことから、残留応力の均一化には至っていない。

そこで、図2に示す下記の3ステージから統合的に形状・残留応力を制御する技術を新たに構築することにより、前記の歪みや形状の課題を解決する残留応力制御型 TMCP 鋼板を開発した^{1)~6)}。

- 1) 加熱 / 圧延 / 加速冷却における形状制御及びスケール制御によって平坦度不良の防止を図るとともに、温度不均一の極小化を図ることにより、残留応力の発生を極力抑制する。
- 2) 加速冷却後の板面温度プロフィールに基づいて、オンラインでの残留応力予測により、鋼板及び切断後の形状を評価し、出荷判定を行う。

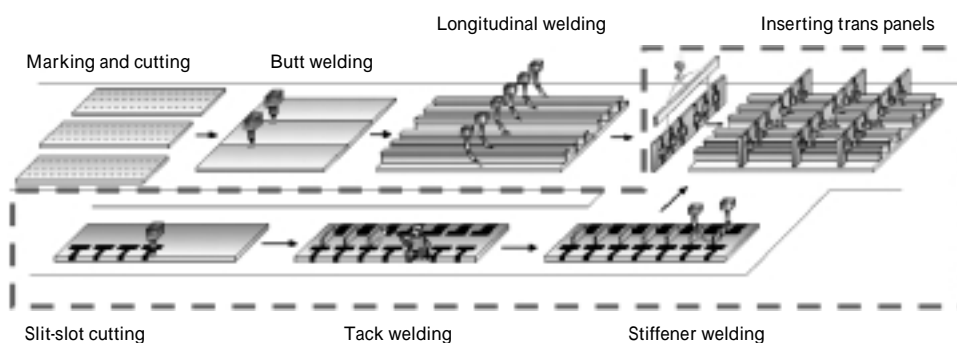


図1 直線ブロック組立工程概略
Fig. 1 Process of fabricating straight ship blocks

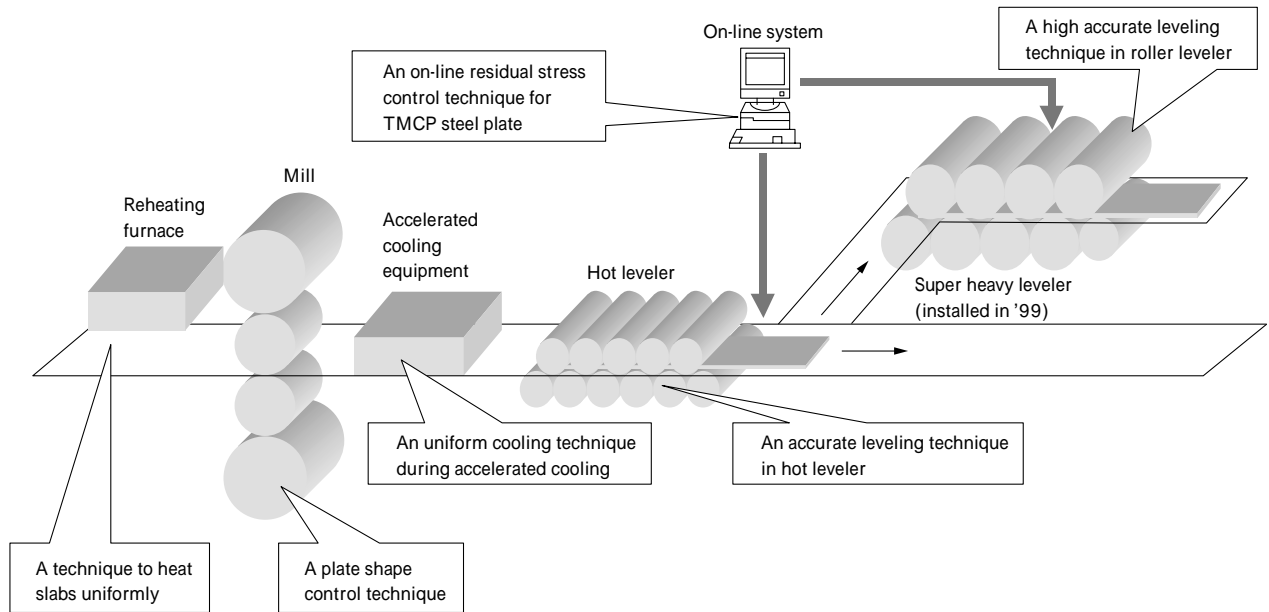


図2 鋼板形状・残留応力制御技術

Fig. 2 Plate shape and residual stress control techniques for TMCP steel plate

3) 要求レベルを満足しない鋼板については、後工程において残留応力予測に基づいて算定した条件で機械的 / 熱的手段により残留応力を制御する。

特に、機械的に残留応力を制御する手段のひとつであるローラレベラに関して、1999年に世界最大級の5000トンの多機能レベラを導入し、残留応力レベルの均一化に向けて戦力化を図っている⁶⁾。本レベラの特徴は、上部フレームとロールフレームとの間に複数の油圧シリンダを配置することにより、矯正過程でロールたわみをダイナミックに補償する制御機能を導入しており、高精度な残留応力制御を達成している。本技術を適用した残留応力制御型TMCP鋼板は、許容値以下に残留応力レベルを制御しているため、残留応力に起因する変形は発生せず、切断や溶接時の熱加工による歪みを定量的に把握しておけば、狙い通りの形状及び寸法精度の達成が可能になるものと考えられ、工作精度向上への寄与が期待される。

以下では高い寸法精度が要求される船体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トランスパネル引込み工程までを対象として、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する。

2. スリットスロット切断における鋼板の変形解析方法

2.1 解析方法

トランス材のスリットスロット切断時における熱変形解析は、汎用コードABAQUS-STANDARDを用いた熱弾塑性FEM解析を行った。熱切断に伴って形成される温度分布とそれに起因して発生する変形や応力は非連成として取扱った。切断時の非定常熱伝導解析においては、移動平面熱源を用いて、切断順序に従い順次切断位置の要

素に熱を付与し、トーチが到達した瞬間に要素は消滅するものとして取扱った。また熱弾塑性解析においては、熱源が通過後の要素は、剛性がないダミー要素として扱った。加熱・溶融に費やされる熱量については、切断溝の両側の要素にそれぞれ付与した。切断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た。解析に用いたモデルを図3に示す。

解析対象は、 $16^t \times 3000^w \times 12000^l$ mmのYP320MPa級TMCP鋼板とし、ホールの切断、トップ側の切断、スロット側の切断、ボトム側の切断、スリット側の切断、の順に切断するものとした。

残留応力状態は、実ラインでの加速冷却後の実温度分布から推定して、残留応力を制御した鋼板(Plate A)、幅端部に長手方向圧縮残留応力を有する鋼板(Plate B)、幅中央に長手方向圧縮残留応力を有する鋼板(Plate C)、の3パターンとした。鋼板B、Cは通常のTMCP鋼板の代表的な残留応力分布の一例である。

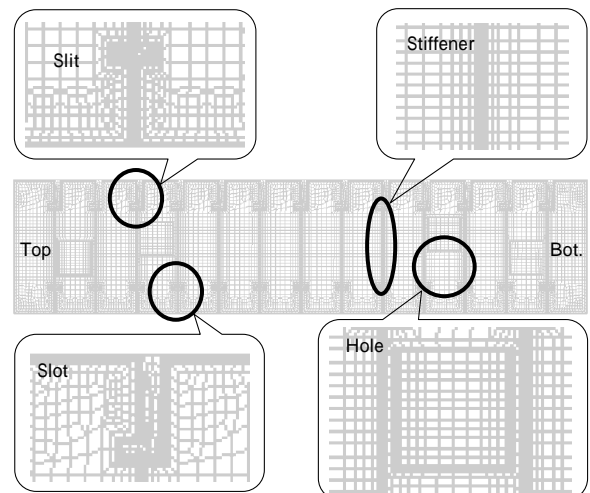


図3 FEM解析におけるメッシュ分割

Fig. 3 FEM mesh division of plate

鋼板 A の残留応力は、幅端部に圧縮応力を有した鋼板 B を強力レベラ矯正によって残留応力を制御した後の応力分布を採用した。対象鋼板の明細及び残留応力状態を表 1 及び図 4 に示す。

2.2 切断入熱の決定

切断方法は、プラズマを用いて熱切断する場合を対象とした。その際の解析条件を表 2 に示す。

切断入熱量は、小型実験を実施し、切断過程における温度履歴を計測することにより算定した。試験片は $16^t \times 200^w \times 400^l$ mm の YP320MPa 級 TMCP 鋼板であり、試験片の端部から 10mm 位置を切断し、切断線から直角方向に 3, 10, 20mm の 3 点における板厚中央位置の温度を CA 熱電対により計測した。またプラズマ切断は電流

表 1 対象鋼板明細

Table 1 List of cases for simulation of cutting

No.	Plate size (mm)	Stress distribution
Plate A	$16^t \times 3\,000^w \times 12\,000^l$	Controlled
Plate B	$16^t \times 3\,000^w \times 12\,000^l$	Uncontrolled
Plate C	$16^t \times 3\,000^w \times 12\,000^l$	Uncontrolled

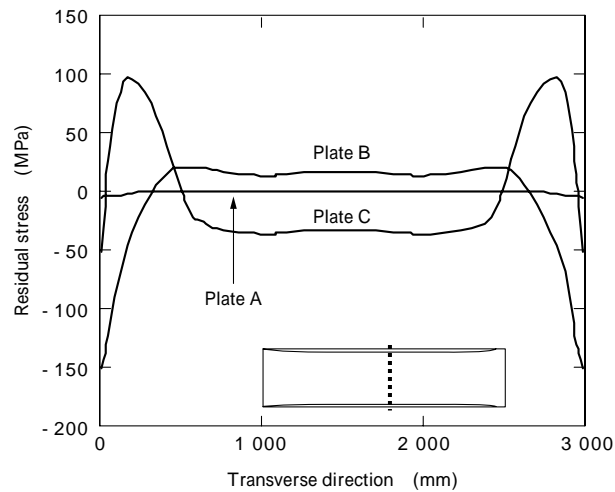


図 4 切断前の鋼板残留応力分布

Fig. 4 Residual stress distribution before cutting

表 2 プラズマ切断条件

Table 2 Cutting simulation conditions

Method	Velocity (mm/min)	Heat input (kJ/cm)
Plasma	1 500	5.6

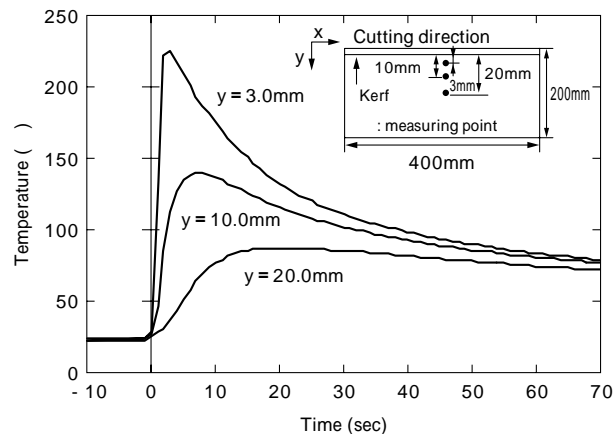


図 5 温度計測結果

Fig. 5 Measured temperature history at plasma cutting

260A, 電圧 145V の条件を用いて行った。温度計測結果を図 5 に示す。

3. スリットスロット切断における鋼板の変形解析結果

3.1 切断過程における鋼板形状の過渡変化

スリットスロット切断時の鋼板の変形挙動について述べる。

切断過程におけるスリット側の長さの変化に及ぼす初期残留応力の影響を定量的に評価した。スリット側の長さの過渡的な変化を図 6 に示す。

鋼板の残留応力分布の違いにより、変形量は大きく異なる。すなわち、残留応力を制御した鋼板 A は、切断の進行に伴い、切断中は熱膨張により 0.5mm 程度伸長しているものの、冷却後は 0.2mm 程度収縮している。それに対し残留応力を有する鋼板 B, C は、切断中及び切断後の変形や横曲がりによって、1 ~ 3mm 程度の大きな伸長や収縮が発生している。残留応力を制御した鋼板 A の変形は、ほぼ切断入熱に起因したものであり、鋼板 B, C は切断入熱と鋼板の残留応力の影響が重畳した結果としての変形である。残留応力による変形により寸法は大きくばらつき、その精度は低下するものと推察される。

3.2 切断入熱及び残留応力による鋼板形状の変形

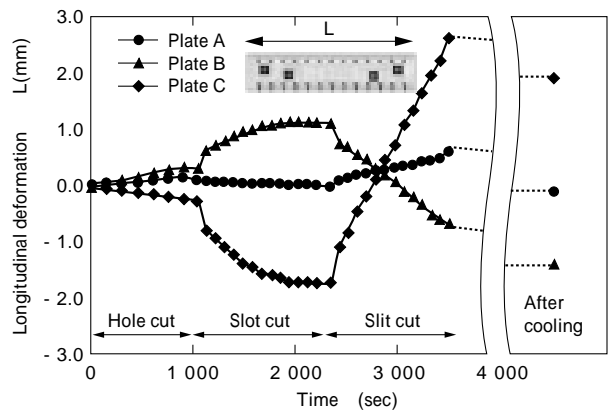


図 6 プラズマ切断における長手方向変形量

Fig. 6 Longitudinal deformation in plasma cutting

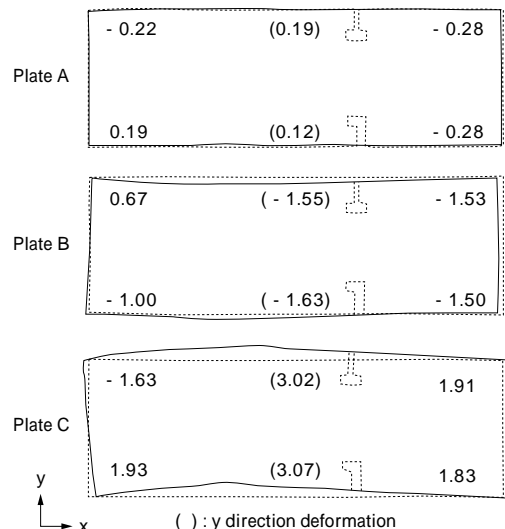


図 7 スリットスロット切断後の鋼板形状

Fig. 7 Plate shape after slit-slot cutting

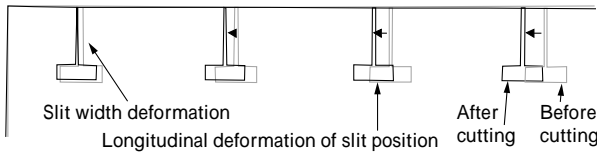


図8 スリット位置における変形
Fig. 8 Typical deformation in slit cutting

鋼板 A ~ C に対して、スリットスロット切断後の真直度や平行度を評価した結果を図7に示す。特に残留応力を有する鋼板 B, C において、スリットスロット切断時の熱歪み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。

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及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記述する。

スリット側の代表的な変形状態を図8に示す。鋼板をスリットスロット切断した場合、切断入熱による塑性歪みや鋼板の残留応力により、スリット位置が長手方向に変化し、さらにスリット幅も異なっている。

スリット位置の長手方向の変化量及びスリット幅の変化量をそれぞれ図9、図10に示す。ここでは過渡変形に起因する切断誤差を考慮している。

スリット位置の長手方向の変化量及びスリット幅の変化量は、幅端部から100mm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 スリット位置で0.2mm程度収縮し、それに応じて各スリット位置は若干変化している。スリット幅はわずかに広がっているが、変形量は小さい。一方、鋼板 B と C のスリット位置の長手方向変化量とスリット幅の変化量を比較すると、鋼板 B と C では全く逆の方向に変形しており、残留応力パターンによって切断後の形状は大きく変化している。幅端部に圧縮残留応力を有する鋼板 B は、切断により各スリット位置が収縮側へ変化し、スリット幅が狭くなっているのに対し、幅中央に圧縮残留応力を有する鋼板 C は、切断により各スリット位置が伸長側へ変化し、スリット幅が広がっている。これらの変形量の大きさは、No.13 スリット位置で±1.5mm程度、スリット幅で±0.4mm程度であり、トランス材に要求される工作精度を考えた場合、残留応力の影響は無視できないレベルである。

3.3 切断後の残留応力分布

スリットスロット切断後の長手方向残留応力の板幅方向分布を図11に示す。残留応力を制御した鋼板 A においては、切断入熱に起因した塑性歪みにより、切断部近傍では降伏応力相当の引張応力が発生している。切断前に残留応力を有する鋼板 B, C においても同様の応力が発生しているが、切断部以外の領域では、切断前の図4に比べて残留応力状態は大幅に変化している。幅中央部の残留応力は、切断後においてほとんど零になっており、鋼板 A ~ C の切断後の応力状態の差は小さい。

スリットスロット切断のように切断領域が多い場合、切断によって残留応力の大部分が解放され、その結果と

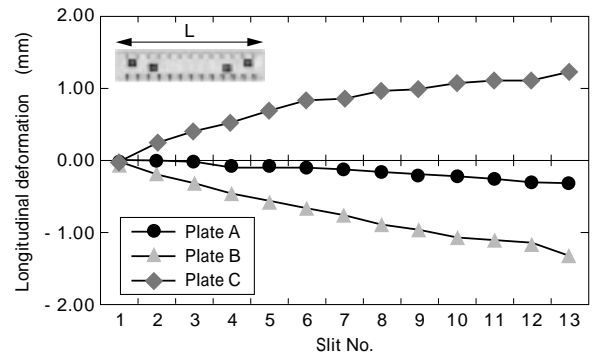


図9 切断後における鋼板長手方向変形量
Fig. 9 Longitudinal deformation in plasma cutting considering cutting error

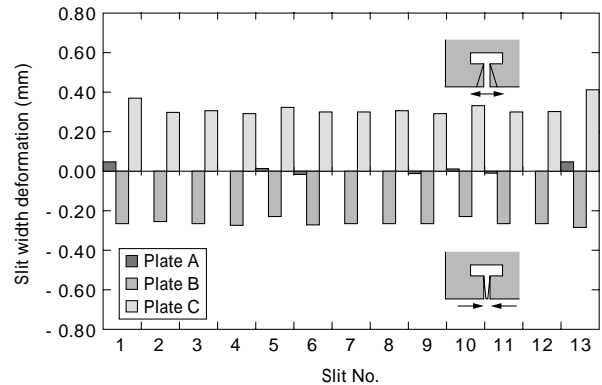


図10 切断後のスリット幅の変化量
Fig.10 Slit width deformation in plasma cutting considering cutting error

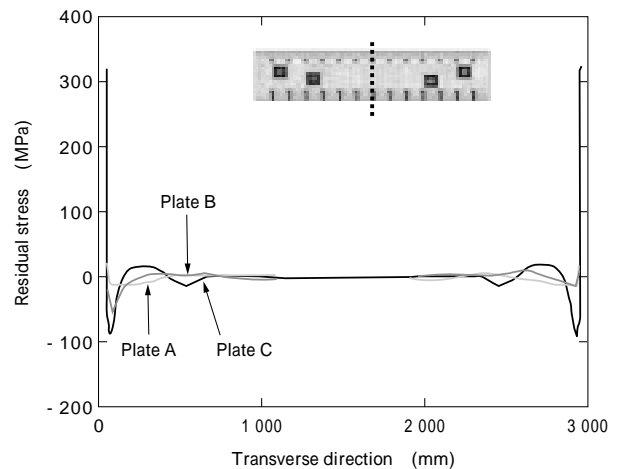


図11 切断後の鋼板残留応力分布
Fig.11 Residual stress distribution after plasma cutting

して、スリット位置の長手方向の変化が生じるものと言える。

4. ダブルハルブロック建造時の工作精度の検証

4.1 適用部位及び評価方法

ダブルハル VLCC の直線ブロック組立(ブロックサイズ $12\,000^w \times 3\,000^h \times 20\,000^d$ mm) 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及び生産性への影響を評価した。

工作精度の評価においては、トランスパネルの長さ精度及びスリット幅を計測し、生産性はトランスパネル引

込み時間を計測することにより評価した。

直線ブロック組立工程の概略は図1に示したとおりである。

4.2 トランスパネルの工作精度

残留応力制御型 TMCP 鋼板及び従来の TMCP 鋼板を適用したトランスパネルに対して、各スリット位置の長さを計測することにより、スチフナ溶接後のスリット位置のスペース誤差を計測した。計測結果の一例を図12に示す。スリット位置のスペース誤差は図面値と比較して算出した。

残留応力制御型 TMCP 鋼板は、スリットスロット切断及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、切断、溶接による収縮量を見込んだ延べ尺の設定により、ほぼ狙い通りのスリットの位置精度を確保している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 1.5mm 程度長さが短くなっている。

スリット幅の計測結果を図13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 0.5mm 程度狭くなっているものの、No.1 ~ 13 スリットにおい

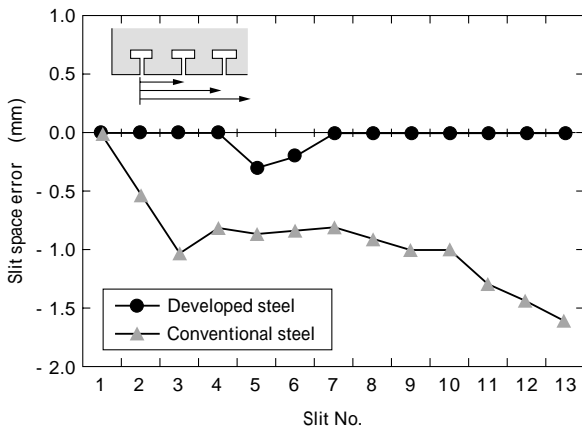


図12 スチフナ溶接後の長手方向変形量
Fig.12 Longitudinal deformation after stiffener welding

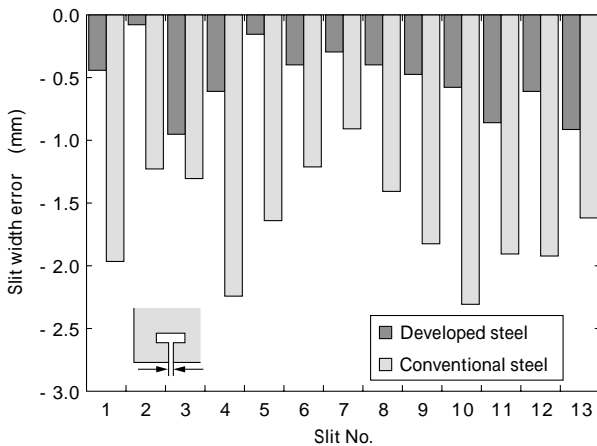


図13 スチフナ溶接後のスリット幅変化量
Fig.13 Slit width measurement after stiffener welding

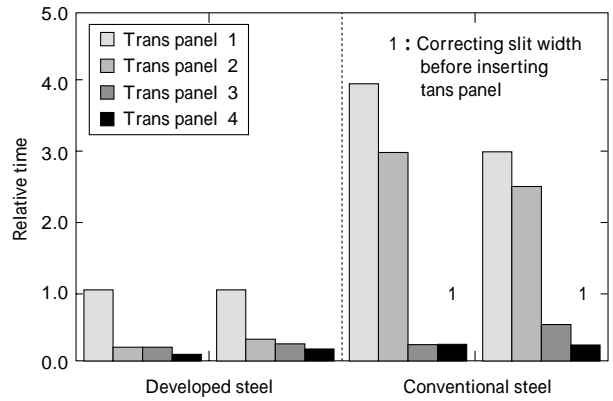


図14 トランスパネル引込み時間比較
Fig.14 Insert time of transverse panel into skin panel from longitudinal end

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 2mm 以上も狭いスリットがあり、また、No.1 ~ 13 スリットにおけるスリット幅のばらつきも大きい。

4.3 適用結果

残留応力制御型 TMCP 鋼板及び従来の 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込み時間を計測した結果を図14に示す。

残留応力制御型 TMCP 鋼板はトランスパネル引込み時に問題なく引込めるのに対し、従来の TMCP 鋼板は、引込み時に手直しが必要となり、スリットの切断など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 3mm 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。

むすび= TMCP 工程において、ハード・ソフト面から構成される形状・残留応力制御技術を構築することによって、従来の TMCP 鋼板の有する歪み及び形状の問題を解消した残留応力制御型 TMCP 鋼板(ヒズミレス鋼板)を開発した。

船舶を製造する過程において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を対象として、熱弾塑性 FEM 解析を用いた検討、及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、工作精度向上及び生産性向上への有効性を確認した。

参考文献

- 1) 大江憲一ほか：R & D 神戸製鋼技報 Vol.41, No.4 (1991) p.52.
- 2) 大江憲一ほか：鉄と鋼, Vol.85, No.11 (1999) p.793.
- 3) 大江憲一ほか：鉄と鋼, Vol.86, No.5 (2000) p.329.
- 4) 大江憲一ほか：材料とプロセス, Vol.7, No.1 (1994) p.408.
- 5) 大江憲一ほか：第 48 回塑性加工連合講演会 (1997) p.295.
- 6) 上田太次ほか：材料とプロセス, Vol.12, No.5 (1999) p.1095.