

ユニバーサル圧延法による T 形鋼製造技術の開発

Development of T-bar Production Technology by Universal Rolling

高嶋由紀雄 TAKASHIMA Yukio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
山口陽一郎 YAMAGUCHI Yoichiro JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 条鋼部 主任部員 (副課長)
高橋 英樹 TAKAHASHI Hideki JFE スチール 建材センター 建材企画部 主任部員 (部長)

要旨

近年、船舶の船体補強に用いられる造船用形鋼として、T 形鋼の使用が増加している。造船用に適した細幅の T 形鋼を熱間圧延で効率よく製造する新技術として、中間圧延と仕上圧延にユニバーサル圧延機を用いるユニバーサル圧延法を開発を行った。特に中間圧延工程には 2 台のユニバーサル圧延機と 1 台のエッジャ圧延機を用いたタンデム圧延を考案し、寸法精度と圧延能率の向上を図った。まず、ラボ鉛モデル圧延実験で本圧延法の変形特性を調査し、続いて実際に形鋼工場で T 形鋼の試作を行った。その結果、目標寸法の製品を圧延することができ、本圧延法で実際に造船用 T 形鋼が製造できることを立証した。

Abstract:

Application of T-bars in shipbuilding has increased recently. A new hot section rolling technology by universal rolling was developed to produce slim T-bars suitable for ships. The new process uses universal mills in intermediate and finishing rolling. In order to obtain higher productivity, a tandem rolling technology with two universal mills and an edger mill was developed for intermediate rolling. In the present study, the deformation properties of the tandem rolling was investigated by model rolling experiment. Then T-bar rolling test was carried out at an actual structural mill. As a result, T-bars with target dimensions were successfully produced, and the possibility of the T-bar universal rolling technology was clearly demonstrated.

1. はじめに

船舶には船体を補強するため、様々な形鋼が使用されている¹⁾。代表的な造船用形鋼には、不等辺山形鋼やバルブプレートがあり、これらは一般に熱間孔型圧延で製造されている。造船用形鋼は船体の剛性を確保する観点から、幅に対して高さが 2 倍以上の細幅断面が使用されることが多く、また船体軽量化のため様々な板厚の製品が必要とされる²⁾。

近年、造船用として T 形鋼の適用が増加している。しかし、孔型圧延法^{3,4)} や 3 ロール圧延法^{5,6)} などの従来の T 形鋼の圧延法では、船舶に適した断面形状の製造が困難であるため、鋼板を溶接組立して製造された溶接 T 形鋼が造船用として使われている。JFE スチールでは、ユニバーサル圧延機を用いた新たな T 形鋼の圧延法について研究を進めてきた。ユニバーサル圧延法は H 形鋼の製造に広く用いられており⁷⁾、多くの形鋼工場に普及している。また、水平ロールと縦ロールの間隔を独立して設定することができるため、同じロールで様々な板厚の製品を圧延するロール共用が可能である⁸⁾。

これまでの研究で、ウェブとフランジの圧下率を適切に設

定すれば左右の曲がりを防止しつつ T 形鋼を圧延できることを明らかにし、フランジ幅広がり等の変形挙動の調査を実施した⁹⁾。また、ラボ実験や有限要素解析を用いて、ユニバーサル圧延機とエッジャ圧延機を用いた一般的な H 形鋼製造設備で T 形鋼を圧延する技術を検討し、造船用に適した断面形状の T 形鋼を製造できる見通しを得た¹⁰⁾。さらに、実在する形鋼工場で T 形鋼を製造するための圧延技術を検討し、造船用 T 形鋼を試作した¹¹⁾。本報では、造船用 T 形鋼の圧延に実際に成功した新圧延技術について詳細に説明する。

2. T 形鋼ユニバーサル圧延法の概要

造船用 T 形鋼を製造するために開発した T 形鋼ユニバーサル圧延法の概要を図 1 に示す。最初に、加熱炉から抽出した素材を BD 圧延機による粗圧延工程で孔型圧延し、厚手の T 形断面に成形する。続いて、中間圧延工程で粗ユニバーサル圧延機 UR とエッジャ圧延機 E を用いた往復圧延を行う。最後の仕上圧延工程では、仕上ユニバーサル圧延機 UF で 1 パスの圧延を行い、目標の製品断面形状に成形する。これまでの研究では、中間圧延にユニバーサル圧延機と縦ロールを備えたエッジャ圧延機を 1 台ずつ使用する設備構成で T 形鋼の圧延法を開発してきた⁸⁾。

2018 年 2 月 9 日受付

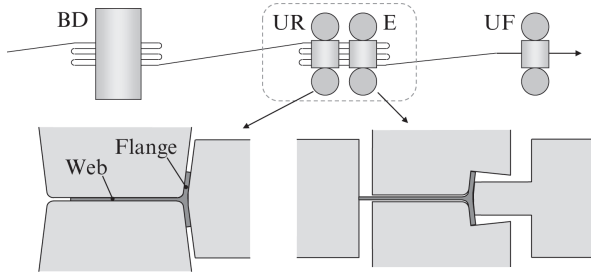


図 1 T 形鋼ユニバーサル圧延の概要

Fig. 1 Layout and roll shape of T-bar universal rolling

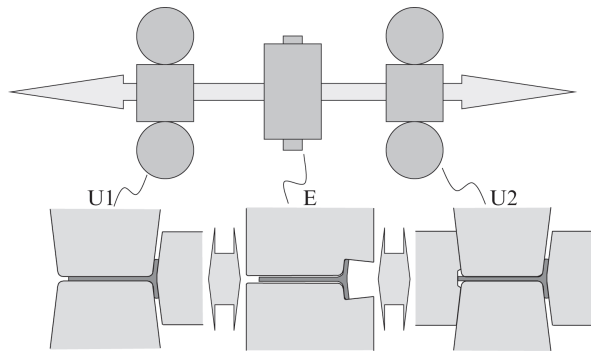


図 2 新中間圧延法の概要¹¹⁾

Fig. 2 Schematic of new intermediate rolling method¹¹⁾

これに対し、造船用形鋼を製造している JFE スチールの形鋼工場では、中間圧延機群が 2 台のユニバーサル圧延機と 1 台のエッジャ圧延機で構成されている。また、エッジャ圧延機は通常の 2Hi 圧延機で、縦ロールを有していない。これらの 3 台の圧延機を使用したタンデム圧延で所定の製品断面形状が圧延でき、かつパス数削減により圧延能力を向上させることが可能な新たな中間圧延法を開発することにした。

考案した新中間圧延法の概要を図 2 に示す。粗ユニバーサル圧延機 U1 とエッジャ圧延機 E は過去に検討した T 形鋼ユニバーサル圧延⁸⁾と同様のロール形状であり、U1 で厚みを、E でフランジ幅を圧下する。

もう 1 台の粗ユニバーサル圧延機 U2 は新たに考案したロール形状で圧延を行う。水平ロールのウェブ圧下幅が圧延材よりも狭く、片方の縦ロールでフランジ厚を圧下し、反対側の縦ロールでウェブ先端をウェブ高さ方向に圧下する。U2 はウェブ厚およびフランジ厚の圧下とウェブ先端圧下を同時に行うことができるため、エッジャ圧延でウェブ先端を圧下する必要がなく、さらに厚みを圧下する圧延機が増えて、中間圧延のパス数を削減できるというメリットが得られる。

一方、U2 ではウェブ先端が板厚方向に圧下されないで、ウェブ厚に段差が発生する懸念がある。しかし、この段差はその後の U1 または UF 圧延でウェブ全幅が水平ロールで圧下される際に平坦化されるので、最終製品のウェブ厚は

均一に仕上げることができると考えた。

この新中間圧延法により、全長にわたってウェブ高さが一定で、かつウェブ厚が均一で段差による表面疵もない T 形鋼が圧延できるかを検証するため、ラボ圧延実験を実施した。

3. ラボ実験

3.1 実験方法

ラボ実験¹¹⁾は実機の 1/5 のモデル比で実施した。ラボユニバーサル圧延機 2 台とラボ 2Hi 圧延機 1 台を準備し、図 3 に示す形状と寸法のロールを組み込んだ。2 台のユニバーサル圧延機の水平ロール側面と縦ロール外周の傾斜角は 6° とした。エッジャ圧延ロールは T 形鋼の形状に合わせて、片側だけにフランジ幅圧下部を有する孔型とし、フランジ部にはユニバーサル圧延機に合わせて 6° の傾斜を設けた。なお、ユニバーサル圧延機とエッジャ圧延機の圧延ロール入出側には、圧延材のウェブとフランジ内面に沿った形状の上下ガイドと、圧延材の左右に位置するサイドガイドを設置した⁸⁾。

モデル材料には純鉛 (99.99%) を使用した。実機の製品寸法はウェブ高さ H が 300 mm、フランジ幅 B が 125 mm (T300×125) とし、その 1/5 の寸法でラボ実験を行った。実験は、粗圧延で厚手の T 形断面となった素材を、中間圧延のユニバーサル圧延機とエッジャ圧延機で仕上圧延前の T 形材寸法まで圧延する想定で実施した。素材と最終目標の断面形状を図 4 に示す。素材のウェブ高さの関係で、本実験の目標ウェブ高さは製品寸法の 1/5 よりも小さい

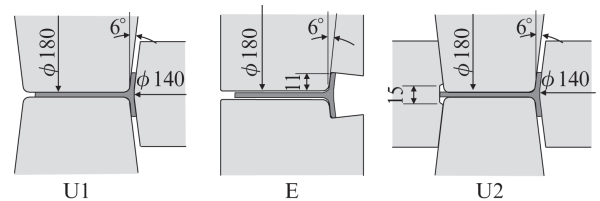


図 3 ラボ実験のロール形状¹¹⁾

Fig. 3 Dimensions of rolls in model experiments¹¹⁾

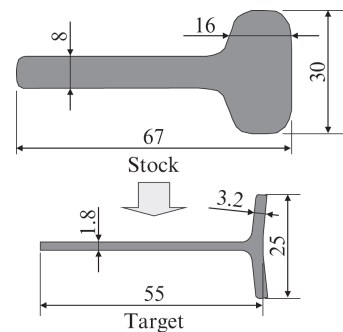


図 4 実験素材と目標の断面形状¹¹⁾

Fig. 4 Sections of initial stock and target after intermediate rolling¹¹⁾

表 1 ラボ実験のパススケジュール
Table 1 Draft schedule of experiment (mm)

Pass No.		Web thickness t_w	Flange thickness t_f	Flange width B
Stock		8.00	16.00	30.0
1	U1	7.20	14.40	
	E			29.4
	U2	6.05	12.10	
2	U2	5.14	9.92	
	E			27.3
	U1	4.32	8.33	
3	U1	3.67	6.83	
	E			25.9
	U2	3.08	5.74	
4	U2	2.62	4.71	
	E			24.8
	U1	2.20	3.95	
5	U1	1.87	3.24	
	E			24.1
	U2	1.84	3.21	

55 mm とした。

ラボ実験のパススケジュールを表 1 に示す。5パスの往復圧延を実施する想定で、各圧延機の圧延順を設定した。そのため、奇数パスと偶数パスでは 2 台のユニバーサル圧延機の順番が入れ替わっている。ユニバーサル圧延のパススケジュールは、U2 の 5 パス目を 1% に設定した他は、ウェブ圧下率 15%，フランジ圧下率 18% を基準にして設定した。なお、エッジ圧延後のユニバーサル圧延では、エッジ圧延でのフランジ厚増加を考慮して目標フランジ厚を決定した。ウェブ先端を圧下する U2 の縦ロール開度は、圧延材のウェブ高さ寸法を測定してから過大な圧下量とならない位置を決定した。エッジ圧延はウェブを圧延することがないように、入側ウェブ厚に 0.2 mm を加えたロール開度とした。

3.2 実験結果

計画したパススケジュールの圧延は、すべてのパスで問題なく実施することができた。実験で得られた鉛 T 形材の各パス圧延後の断面形状を図 5 に示す。1 パス目終了後のウェブ先端部には明瞭な厚み段差が認められるものの、2 パス目終了後の断面では段差が消滅しており、段差境界部の表面に折れ込み等の有害な欠陥は見られなかった。ウェブ全幅を圧下する U1 の水平ロールでウェブ厚が均一になるという予想通りの結果である。3 パス目以降の段差は小さく、5 パス目の圧延終了まで段差境界に有害な欠陥は発生しなかった。

ウェブ先端は 1 パス目から圧下されており、5 パス目終了後の圧延材はウェブ先端がほぼ直角に成形できた。また、エッジ圧延でのフランジ幅圧下も想定通りに実施でき、目

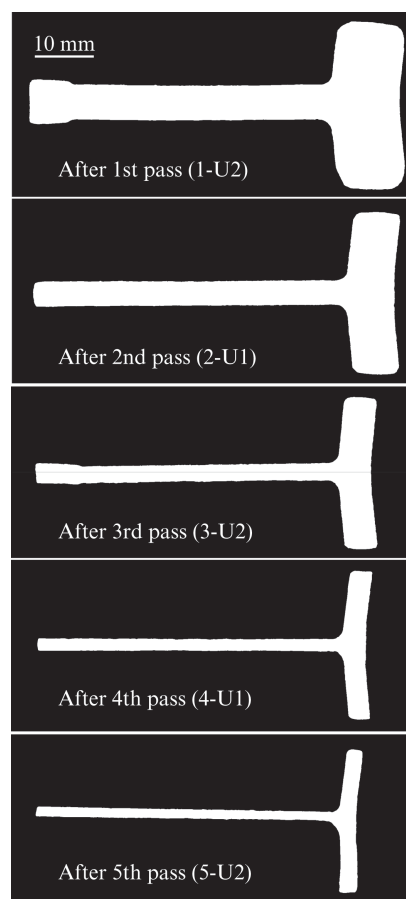


図 5 各パス圧延後の断面形状¹¹⁾

Fig. 5 Cross sections of rolled workpiece after each pass¹¹⁾

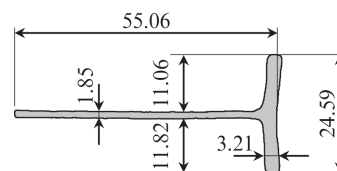


図 6 5 パス圧延後の圧延材断面形状¹¹⁾

Fig. 6 Dimensions of cross section of workpiece after 5th pass¹¹⁾

標とするフランジ幅に成形することができた。

圧延材の左右曲がりは、初期のユニバーサル圧延でフランジ側、エッジ圧延でウェブ側であったが、ウェブガイドやサイドガイドの拘束によって過大な曲がりが防止でき、後続パスの圧延に支障が生じることはなかった。

マイクロメータとノギスで測定した 5 パス圧延後の断面の各部寸法を図 6 に示す。最終的な圧延材の断面が、図 4 に示す目標どおりの寸法になっていることがわかる。

圧延終了後の鉛圧延材の先端部をウェブ正面から見た外観を写真 1 に示す。ウェブが一直線に成形され、圧延材端部までウェブ高さが一定になっている。ウェブ先端を圧下する U2 の縦ロールが有効に機能していることがわかる。

以上の結果から、新たに考案したタンデムユニバーサル圧延の中間圧延法で、T 形鋼の圧延が可能と判断した。

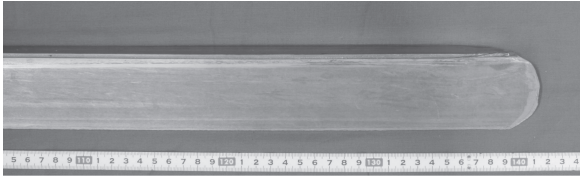


写真 1 鉛 T 形材先端部の外観¹¹⁾

Photo 1 Appearance of top end of rolled pure lead T-bar¹¹⁾

4. 有限要素解析

4.1 解析目的とモデル

新たに考案した U2 圧延での変形特性を詳細に調査するため、3次元の有限要素解析を実施した¹¹⁾。ウェブ先端圧下なし (U1) とウェブ先端圧下あり (U2) のユニバーサル圧延でどのような変形の違いが生じるかを調べるため、これら 2 種類のロール形状で有限要素解析を行い、圧延変形を比較した。また、ウェブ先端圧下ありの場合、先端圧下量が圧延変形におよぼす影響を調査する目的で、圧下量を変更した複数の解析を実施した。

解析には、汎用有限要素解析プログラム Abaqus Explicit Ver.6.12 を使用し、圧延材を先端からロール間に噛み込ませて全長を圧延する非定常な弾塑性解析を実施した。圧延される T 形材の断面の対称性から、上下が対称な 1/2 モデルを構築した。解析に使用した圧延材の初期断面形状を **図 7** に示す。圧延材の初期長さは 1500 mm とし、要素タイプはソリッド 8 節点低減積分要素 (C3D8R) を用いた。要素数は断面内分割数を 485、長さ方向分割数を 375 とし、全部で約 18 万要素とした。

ロール形状と寸法を **図 8** に示す。圧延ロールの入側には、破線で示す位置にウェブ面とフランジ内面を誘導するガイドを設けた。また、フランジ外面には垂直な板状のガイドを

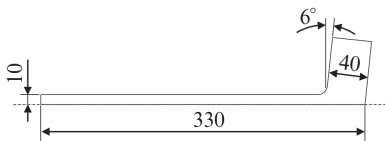


図 7 解析に用いた T 形鋼の断面形状¹¹⁾
Fig. 7 Cross section of half T-bar for FEA¹¹⁾

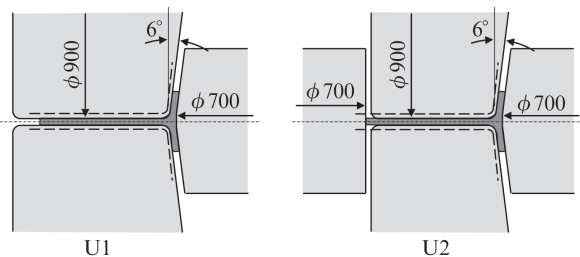


図 8 解析に用いたロール形状¹¹⁾
Fig. 8 Dimensions of rolls in FE model¹¹⁾

表 2 解析条件

Table 2 Numerical conditions of FEA

Horizontal roll rotation speed	40 rpm (4.19 rad/s)	
Target web thickness reduction	15%	
Target flange thickness reduction	18%	
Friction coefficient	Stock-roll	0.4
	Stock-guide	0.0
Young's modulus of workpiece	100 000 N/mm ²	
Poisson ratio of workpiece	0.3	

設置し、圧延ロール入出側での圧延材のフランジ側曲がりを拘束した。

ロールとガイドは解析的剛体としてモデルを作成した。上下の水平ロールは 40 rpm で駆動する条件を与え、縦ロールは無駆動の自由回転パートとした。各ガイドには完全固定の境界条件を与えた。

4.2 解析条件

主な解析条件を **表 2** に示す。ユニバーサル圧延の板厚圧下率は、ウェブが 15%、フランジが 18% になるよう、各ロールの位置を設定した。圧延材とロールとの摩擦条件はクーロン摩擦とし、摩擦係数は 0.4 とした。また、圧延材とガイドでは、摩擦係数を 0 に設定した。

圧延材の変形抵抗には、熱間鋼を対象に提案された美坂の式¹²⁾を用いた。まず、温度 1000℃、炭素量 0.15% とし以下式を作成した。

$$kf = 113.2 \cdot \varepsilon^{0.21} \cdot \dot{\varepsilon}^{0.13} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 kf は変形抵抗 (N/mm²)、 ε はひずみ、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度である。(1) 式を用いてひずみと変形抵抗のテーブルデータを作成し、解析に適用した。また、動的陽解法のマスケージングは 100 に設定した。

以上の条件で U1 のロール形状での解析を実施した。また、U2 のロール形状では、ウェブ先端側縦ロールがウェブ先端に接触しない状態の基準位置を定めて解析を行い、さらにそこから縦ロールを水平ロールに 5, 10 および 15 mm 近づけた設定でも解析を行った。すなわち、U2 では 4 条件のウェブ先端圧下量の解析を実施した。

4.3 解析結果

解析中の圧延変形の一例を相当塑性ひずみ分布とともに **図 9** に示す。フランジの外側には表示されていない垂直ガイドがあり、フランジ側への曲がりを拘束しながら圧延している。全条件の解析で問題なく全長の圧延が終了した。

解析により得られた圧延後の長さ中央における断面形状を各解析条件で比較し、ロール形状やウェブ先端圧下量が圧延変形におよぼす影響を調査した。ウェブ先端を板厚方向に圧下していない U2 では、先端まで圧下した U1 に比べ

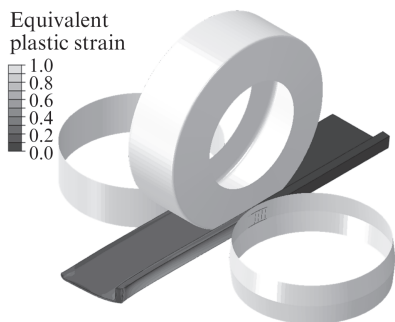


図9 解析で得られた変形とひずみ分布の例（ウェブ先端側縦ロール位置 10 mm の U2 圧延）¹¹⁾

Fig. 9 Example of deformation and strain in FEA (U2, web tip side vertical roll position 10 mm)¹¹⁾

ウェブ高さが 2.27 mm 減少した。また、ウェブ先端厚は 18.32 mm と水平ロールで圧下された部分よりも厚いものの、圧延前の 20 mm よりも減少していた。圧延により T 形材が延伸するため、非圧下部のウェブ先端にも延伸が生じ、ウェブ高さや板厚の減少が生じたと考えられる。また、フランジ先端の高さがわずかに減少し、U2 圧延後のフランジ幅は U1 圧延後よりも 0.38 mm 小さくなった。

次に、U2 においてウェブ先端側縦ロール位置を先端非圧下の基準位置、5、10、15 mm 移動位置の 4 条件に設定した圧延材の断面形状を比較した。ウェブ先端圧下量が大きくなるほど、ウェブ先端厚が増加した。また、フランジ幅はウェブ先端圧下量の増加に伴い減少していた。そこで、ウェブ先端を圧下しない条件のウェブ高さを基準として、ウェブ先端圧下時のウェブ高さとの差をウェブ先端圧下量と定義し、ウェブ先端厚およびフランジ幅との関係を調査した。

ウェブ先端圧下量とウェブ先端厚の関係を図 10 に示す。ウェブ先端圧下量が大きくなるほど、グラフの傾きが増加する傾向が見られる。ウェブ先端が厚いほど、続く U1 圧延で折れ込み等の欠陥が発生する可能性が高まるため、ウェブ先端圧下量はウェブ先端の平坦化と先尾端のウェブ高さの拡大防止が可能な最小圧下量に設定するべきと考えられる。

次に、ウェブ先端圧下量と圧延後フランジ幅の関係を図 11 に示す。圧延後フランジ幅はウェブ先端圧下量に応じて直線的に減少した。ウェブ先端圧下によってこの部分の延

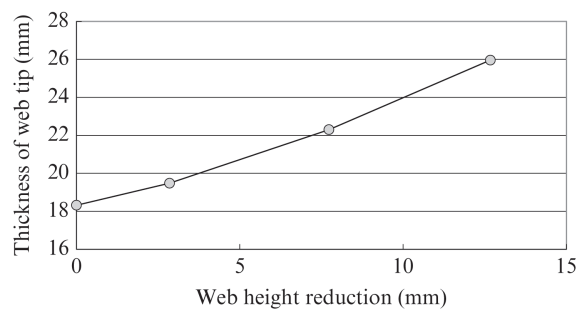


図 10 ウェブ高さ圧下がウェブ先端厚におよぼす影響¹¹⁾

Fig. 10 Influence of web height reduction on web tip thickness¹¹⁾

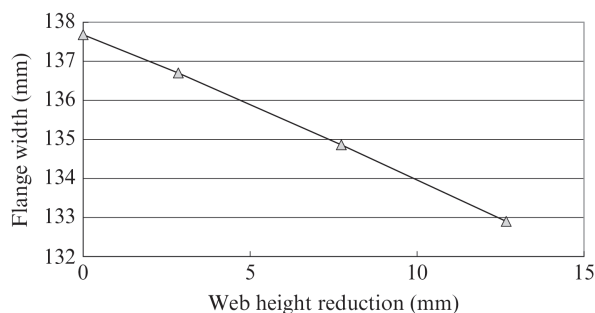


図 11 ウェブ高さ圧下がフランジ幅におよぼす影響¹¹⁾

Fig. 11 Influence of web height reduction on flange width¹¹⁾

伸方向の変形が増加し、ウェブ全体の延伸が大きくなった結果、フランジの延伸も増加して幅が減少したものと考えられる。フランジ幅が大きく減少すれば、製品寸法不良に繋がる懸念があるため、やはりウェブ先端圧下量は過大にならないように設定する必要があると考えられる。

5. 実機試作

5.1 実機試作設備と圧延方法

新たに考案した中間圧延法のラボ実験で鉛 T 形材が圧延できたことを受けて、形鋼工場での試作を行うことにした。JFE スチール西日本製鉄所（福山地区）の形鋼工場において、T300×125 の圧延実験を計画した¹¹⁾。図 12 に圧延ラインのレイアウトと圧延法の概略を示す。まず、BD と R1 で複数

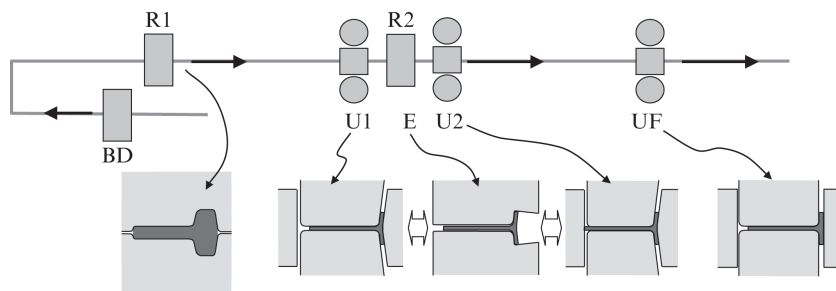
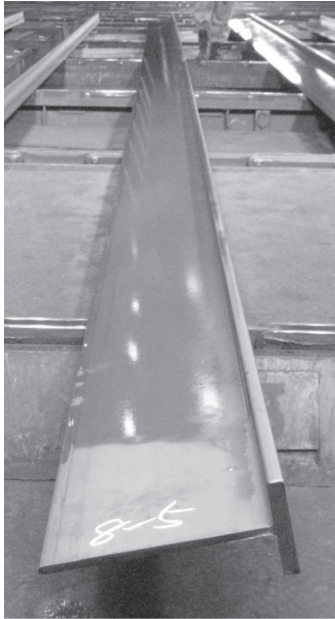


図 12 実機試作に用いた形鋼工場のレイアウトとロール形状

Fig. 12 Mill layout and roll shape used in T-bar rolling test

写真2 試作した圧延 T 形鋼の外観¹¹⁾Photo 2 Example of rolled T-bar¹¹⁾

の孔型を設けた上下ロールを用いて孔型圧延を行い、図4に示す素材に相当する中間圧延前の断面形状に成形することにした。中間圧延と仕上圧延のロール形状は、基本的にラボ実験で使用したロールと同様であるが、操作性を考慮して若干の修正を施した。例えば、ロールの零点設定を容易にする目的で、ユニバーサル圧延機のウェブ先端側縦ロールを円筒形に変更し、これに対応して水平ロールのウェブ先端側の側面も垂直な形状とした。

中間圧延のパス数は、ラボ実験と同様の5パスとした。パススケジュールも基本的にラボ実験を参考に決定したが、圧延材の温度変化を考慮して、ユニバーサル圧延前半の圧下率を後半よりも大きくする調整を加えた。ウェブ先端の圧下量は、ラボ実験と解析の知見に基づき、先端の平坦化と先端端でのウェブ高さ拡大防止が可能な範囲で、できるだけ軽圧下となるように計画した。ただし、実際の先端圧下量はユニバーサル圧延でのウェブ幅広がり量の影響を受けるため、ウェブ先端側縦ロールの圧下設定は、実機試作での製品形状を見て調整することとした。

また、中間圧延は3スタンドの連続圧延となるため、スタンド間で圧延材に圧縮力が働くと、座屈による通材不良が生じる恐れがある。そこで、常に張力が作用するように各スタンドのロール回転数を設定した。

仕上ユニバーサル圧延は1パスとし、フランジの傾斜を直線化するとともに、ウェブとフランジを軽圧下して板厚を均一化する役割を持たせた。

5.2 試作結果

ウェブ厚 10 mm、フランジ厚 19 mm を目標製品寸法として、T 形鋼の試作を開始した。試作当初は様々な問題が発

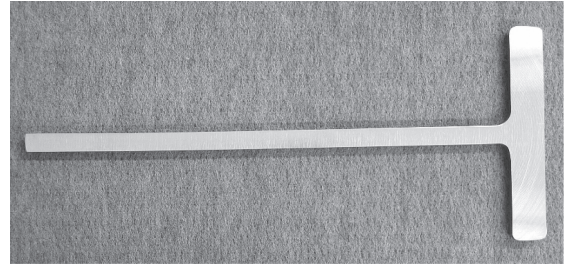
写真3 試作で得られた T 形鋼の断面形状¹¹⁾Photo 3 Dimensions of T-bar products¹¹⁾

表3 造船用 T 形鋼の製品寸法
Table 3 Dimensions of T-bar products

Series	Dimensions (mm)				
	H	B	tw	tf	tff/tw
T300×125	297	125	9	16	1.78
	300	125	9	19	2.11
	297	125	10	16	1.60
	300	125	10	19	1.90
	303	125	10	22	2.20
	300	125	12	19	1.58
	303	125	12	22	1.83
	306	125	12	25	2.08

生したものの、各圧延機のロール開度等の圧延条件調整を実施した結果、最終的に目標とする断面形状の製品を圧延することに成功した。また、ガイドの適用と圧延条件の調整により、圧延中の曲がりは無害なレベルに抑えることができた。

試作で得られた T 形鋼の外観を写真2に示す。ウェブ高さを始めとする断面寸法が長さ方向でほぼ一定の T 形鋼が得られている。また、試作した T 形鋼の断面形状を写真3に示す。外形寸法や各部の厚みは、目標寸法に対して JIS に規定された公差内であり、ウェブ先端の縦ロール圧下によってウェブ端面をほぼ平坦に仕上げることができた。

ユニバーサル圧延法の特徴として、水平ロールと縦ロールの開度を独立して調整することができるため、同じロールで異なる厚み寸法の製品が圧延できることが挙げられる。今回の実機試作では、同一ロールでの複数断面寸法の製造も試みた。具体的には、BD と R1 の孔型圧延でロール開度を変更することによって、中間圧延に供給する圧延材のウェブ厚を変更し、ウェブとフランジの厚み比を調整した上で、製品に適したパススケジュールでユニバーサル圧延を実施した。その結果、表3に示す様々な厚みの製品を同じロールで製造できる見通しが得られ、ユニバーサル圧延法のロール共用化メリットが確認できた¹¹⁾。

以上の実機試作結果より、新たに考案したタンデムユニバーサル圧延法を用いて、造船用に適した断面形状の T 形鋼を効率よく製造できることが立証された。

6. おわりに

ユニバーサル圧延機 2 台とエッジャ圧延機 1 台を中間圧延に使用することを特徴とする、T 形鋼のタンデムユニバーサル圧延技術を考案し、ラボ実験と有限要素解析で実現性や圧延変形特性を調査した上で、形鋼工場で実機試作を実施し、その実現性を検証した。その結果、目標断面寸法の T 形鋼の圧延に成功し、本圧延法で造船用に適した細幅断面の T 形鋼が製造できることを立証した。この圧延法は圧延能率が高くロール共用が可能な製造技術であることから、今後の造船用 T 形鋼の安定供給に大きく寄与することが期待される。

参考文献

- 1) Okumoto, Y.; Takeda, Y.; Mano, M.; Okada, T. Design of Ship Hull Structures. Springer, 2009, p. 116-117.
- 2) 鋼材倶楽部 鉄鋼製品普及協会編. 造船と鋼材. 鋼材倶楽部, 1993, p. 51-58.
- 3) Brayshaw, B. B. Rolls and Rolling, Blaw-Knox Company. 1958, p. 260-275.
- 4) Roberts, W. Hot Rolling of Steel. Marcel Dekker, Inc. 1983, p. 189-190.
- 5) 京井勲, 中島浩衛, 五十住公宏, 岸川官一, 渡辺和夫. 形鋼の多ロール圧延法 (2)~T バーの 3 ロール圧延~. 第 29 回塑性加工連合講演会講演論文集. 1978, p. 118-120.

- 6) 中内一郎, 平沢猛志. T 形鋼のフリーサイズ圧延 (形鋼のフリーサイズ圧延法-2). 鉄と鋼. 1987, Vol. 73, no. 12, p. 376.
- 7) 曾谷保博監修. トコトンやさしい圧延の本. 日刊工業新聞社, 2015, p. 50-51.
- 8) 中島浩衛. 形鋼圧延技術. 地人書館, 1999, p. 50-59.
- 9) Takashima, Y.; Hiruta, T. T-bar universal rolling and its deformation properties. ISIJ International. 2012, vol. 52, no. 7, p. 1323-1334.
- 10) Takashima, Y.; Nakata, N. T-bar rolling process with universal and edger mills. Journal of Materials Processing Technology. 2016, vol. 229, p. 149-159.
- 11) 高嶋由紀雄, 山口陽一郎, 高橋英樹, 堀田知夫, 中塚敏郎. タンデムユニバーサル圧延法による新 T 形鋼製造技術の開発. 塑性と加工. 2017, vol. 58, no. 672, p. 53-59.
- 12) 美坂佳助, 吉本友吉. 落下ハンマ法による普通炭素鋼の熱間平均変形抵抗. 塑性と加工. 1967, vol. 8, no. 79, p. 414-422.



高嶋由紀雄



山口陽一郎



高橋 英樹