
ウェブ薄肉圧延 H 形鋼の製造技術の開発

Develpoment of Process for manufacturing Rolled H-Shapes with Lght Web

吉田 博(Hiroshi Yoshida) 近藤 信行(Nobuyuki Kondou) 三浦 啓徳(Hironori Miura) 奥井 隆徳(Takanori Okui) 橋本 隆文(Takafumi Hashimoto) 河野 幹夫(Mikio Kouno)

要旨：

ウェブ薄肉圧延 H 形鋼の製造技術について検討し、以下の結果を得た。(1) ウェブ薄肉化を達成するには、残留応力を軽減しウェブ波を発生させないこと、およびウェブの圧延における温度低下を防止し材質劣化を起こさないことが必要である。(2) 残留応力を軽減するには、粗・仕上ユニバーサルミル間および仕上ユニバーサルミル後にフランジ水冷を行うことが有効である。(3) ウェブ温度低下を防止するには、粗ユニバーサルミルのタソデム化が有効である。これらの検討結果をもとに、当社の大形形鋼工場にフランジ水冷設備を設置し、同時に粗ユニバーサルミルの 2 基タソデム化の設備改造を行った。その結果、ウェブ薄肉圧延 H 形鋼の製造が可能となった。

Synopsis：

A process for manufacturing light-web rolled H-shape steels has been investigated. The results obtained are as follow: (1) To realize the light web, it is necessary to reduce the residual stress for preventing the web from buckling and not to decrease the web rolling temperature for preventing the material quality from worsening,(2) to reduce the residual stress, it is effective to cool the flange by water between the roughing and the finishing universal mills and also after the finishing universal mill and (3) not to decrease the web temperature, it is effective to carry out tandem rolling by roughing universal mills. Based on the above study, Kawasaki Steel Corp. has installed the water-cooling equipment and also revamped a roughing universal mill to the two-stand tandem universal rolling mills in the Wide Flange Beam Plant. As a result, it has become possible, as expected, to manufacture the light-web rolled H-shape steels.

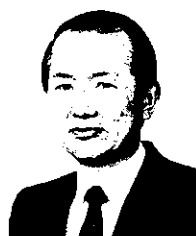
(c)JFE Steel Corporation, 2003

Development of Process for Manufacturing Rolled H-Shapes with Light Web



吉田 博
Hiroshi Yoshida

技術研究本部 加工・制御研究センター 主任
研究員(課長)・工博



近藤 信行
Nobuyuki Kondou

鉄鋼研究所 鋼材研究部
厚板条鋼研究室 主任
研究員(課長補)



三浦 啓徳
Hironori Miura

水島製鉄所 条鋼圧延部
条鋼技術室 主査(掛長)



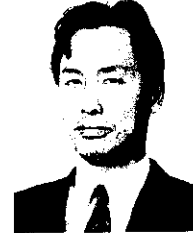
奥井 隆徳
Takanori Okui

水島製鉄所 条鋼圧延部
条鋼技術室



橋本 隆文
Takafumi Hashimoto

水島製鉄所 管理部条鋼
管理室 主査(課長補)



河野 幹夫
Mikio Kouno

水島製鉄所 管理部条鋼
管理室 主査(掛長)

1 緒 言

H形鋼を梁・柱等の構造部材として考えると、曲げ剛性に対するウェブの寄与率は非常に小さいため、ウェブ厚を極力薄くして単重を小さくすることが経済的な設計となることから、ウェブが薄肉のH形鋼に対する要求が高まりつつある。

平板を溶接して作るH形鋼(溶接H形鋼)では、溶接により生ずるウェブの残留応力が小さいため、座屈による形状不良(ウェブ波)が発生しにくく、比較的容易にウェブを薄くすることができる。これに対して、熱間圧延で製造されるH形鋼(圧延H形鋼)では、ウェブとフランジの板厚差により圧延および冷却過程において温度差が発生し、これに起因して長手方向の残留応力(ウェブに圧縮、フランジに引張り)が生じる^{1,2)}。圧延H形鋼においては、ウェブの薄肉化は残留応力を増大させるとともにウェブの臨界座屈応力を低下させるため³⁾、ウェブ波が発生しやすくなる。また、ウェブの圧延温度も低下するため、降伏比 YR (降伏強さ/引張り強さ)の上昇などの

要旨

ウェブ薄肉圧延H形鋼の製造技術について検討し、以下の結果を得た。(1)ウェブ薄肉化を達成するには、残留応力を軽減しウェブ波を発生させないこと、およびウェブの圧延における温度低下を防止し材質劣化を起こさないことが必要である。(2)残留応力を軽減するには、粗・仕上ユニバーサルミル間および仕上ユニバーサルミル後にフランジ水冷を行うことが有効である。(3)ウェブ温度低下を防止するには、粗ユニバーサルミルのタンデム化が有効である。

これらの検討結果をもとに、当社の大形形鋼工場にフランジ水冷設備を設置し、同時に粗ユニバーサルミルの2基タンデム化の設備改造を行った。その結果、ウェブ薄肉圧延H形鋼の製造が可能となった。

Synopsis:

A process for manufacturing light-web rolled H-shape steels has been investigated. The results obtained are as follow: (1) To realize the light web, it is necessary to reduce the residual stress for preventing the web from buckling and not to decrease the web rolling temperature for preventing the material quality from worsening, (2) to reduce the residual stress, it is effective to cool the flange by water between the roughing and the finishing universal mills and also after the finishing universal mill and (3) not to decrease the web temperature, it is effective to carry out tandem rolling by roughing universal mills. Based on the above study, Kawasaki Steel Corp. has installed the water-cooling equipment and also revamped a roughing universal mill to the two-stand tandem universal rolling mills in the Wide Flange Beam Plant. As a result, it has become possible, as expected, to manufacture the light-web rolled H-shape steels.

材質劣化も生じやすい。これらの問題により、圧延H形鋼ではウェブでの薄肉化が困難であり、Fig. 1 に示すように、ウェブ薄肉H形鋼は溶接H形鋼のみが供給されていた。圧延H形鋼で薄肉H形鋼が製造できるなら、安価な製造コストおよびフィレット部(フランジとウェブの境界部)の安定品質などのメリットがある。

当社では長年の間、ウェブ薄肉圧延H形鋼を製造するための技術開発に取り組んできた。その結果、粗ユニバーサルミル(RUミル)でのタンデム圧延と仕上ユニバーサルミル(FUミル)の前後でのフランジ水冷によりウェブ薄肉化を達成できることが明らかとなった。以下に、このウェブ薄肉化技術の詳細を報告する。

2 ウェブ薄肉化の達成手段の選択

圧延H形鋼においてウェブ薄肉化を達成するには、フランジとウェブの最終仕上温度差(FUミル圧延温度差)および圧延後の冷却速

* 平成2年11月1日原稿受付

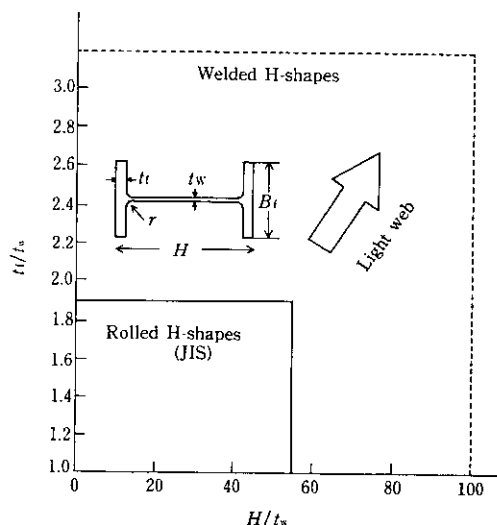


Fig. 1 Comparison of product size between rolled and welded H-shapes

度差を極力小さくすることにより、残留応力を軽減しウェブ波の発生を防止する必要がある。また、ウェブ材質を保証する点からは、ある一定以上の仕上がり温度の確保が必要となる。これらを達成する手段として、以下の方法が考えられる。

2.1 残留応力軽減方法

2.1.1 フランジ水冷

FU ミルの圧延前あるいは圧延後に肉厚の厚いフランジを水冷すれば、残留応力が大幅に軽減することはよく知られている^{4,7)}。FU 圧延前のフランジ水冷は、フランジとウェブの仕上温度差を小さくし、圧延後から室温までのフランジとウェブの熱収縮量差を小さくすることにより残留応力を軽減させようとするものである。一方、FU 圧延後のフランジ水冷は、圧延後の冷却中の熱応力で生じるフランジとウェブの塑性ひずみ差を利用することにより残留応力を軽減させようとするものである。ただし、フランジ内面を水冷するとウェブ面への水乗りにより逆に温度差を助長するおそれがあるため、外面のみの水冷とすることがある。また、フランジ幅方向を均一に冷却し幅方向温度分布を均一化する冷却方法、およびウェブ波を防止すると同時に材質劣化を起こさない水冷条件とする必要がある。

2.1.2 ウェブ保温および加熱

FU ミルの圧延前あるいは圧延後に肉厚の薄いウェブを保温（鏡保温、断熱材保温）^{4,8)} または誘導加熱⁹⁾ すれば、フランジとウェブの温度差が小さくなるため、フランジ水冷と同様な考え方で、残留応力が軽減する。ただし、フランジ水冷と比較すると、残留応力軽減効果が小さいために処理時間が長くなり生産能率を阻害すること（特に保温の場合）、電力使用による製造コストの上昇（誘導加熱の場合）などの問題がある。

2.1.3 低温仕上圧延¹⁰⁾

圧延による塑性ひずみが残留する低温領域（650℃以下）でフランジを引張圧延（フランジ圧下率＞ウェブ圧下率）することにより、室温までのフランジとウェブの熱収縮量差と長さを均衡させ、残留応力を軽減させることが可能である。ただし、この方法は材質の劣化（YR の上昇、靱性の劣化）が懸念される。

有効な残留応力軽減法としては、以上の三つが考えられるが、生産能率を阻害せず、しかも残留応力軽減効果（ウェブ波発生防止効果）の大きいフランジ水冷を選択した。

2.2 ウェブ材質保証

2.2.1 粗ユニバーサルミルのタンデム化

RU ミルのタンデム化により圧延時間が短縮され、RU 圧延および FU 圧延のウェブ仕上がり温度が高くなる。当社では、アタッチドエッジミル¹¹⁾の採用により、従来のエッジミルをユニバーサルミルに変更することで比較的容易にタンデム圧延が行える。また、タンデム圧延は、ウェブ温度低下の抑制のほかに圧延能率の向上という副次的効果も大きい。

2.2.2 ウェブ加熱

RU 圧延または FU 圧延のウェブ仕上がり温度を保証するために、RU ミルまたは FU ミル入側でウェブ加熱を行うことが考えられる。しかしウェブで加熱は、タンデム圧延と比較すると、加熱時間確保のための圧延能率低下、電力使用による製造コストの上昇などの問題がある。

ウェブ材質保証については、上記二つの方法が考えられるが、圧延能率向上という副次的効果の大きい RU ミルタンデム化を選択した。

3 フランジ水冷の検討

3.1 フランジ水冷方法

フランジ水冷設備を導入するにあたり、材質劣化を伴うことなく効率よく残留応力を軽減（ウェブ波発生を防止）する冷却方法を確立しなければならない。

圧延 H 形鋼では、フィレット部の肉厚が厚いため、水冷前にはフランジ幅中央部が最も高い幅方向温度分布となる。したがって、効果的に残留応力を軽減するには、フランジ幅方向の温度分布の均一化を図ったうえで、さらにフランジ温度をウェブ温度へ近づけることが有利である。また、フランジ内面への水冷は、ウェブ面への水乗りにより逆にウェブ温度を低下させフランジとウェブの温度差を大きくするおそれがあるため、フランジ外面のみの片面水冷を採用する。Fig. 2 に示すように、[フランジ幅方向分布を均一化する方法として、フランジ幅の大部分を冷却するフラット水冷と幅中央部を中心に冷却するスポット水冷を長手方向で交互に行う。これらの二つの水冷はそれぞれ流量制御が可能で、かつフランジ幅方向の冷却位置の上下調整も可能である。冷却位置の上下調整は、落水水によるフランジ幅下面の冷却過多を防止するために必要である。

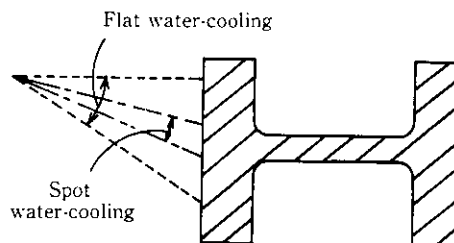


Fig. 2 Method for cooling flange by water

3.2 温度・熱応力の解析シミュレータ

前記フランジ水冷方法が可能なフランジ水冷設備の詳細な仕様(設備設置位置, 水冷長さ, 水量密度, 水冷幅等)を検討する手段として, フランジ水冷時の温度および熱応力を予測する解析シミュレータを開発した。本シミュレータは, 著者らが既に開発したシミュレータ¹⁾の機能を拡大したものであり, その特徴および概要を以下に示す。

- (1) 長手方向の熱流を無視し, 交互陰解差分法¹²⁾により断面内の温度を計算する。
- (2) 一般化平面ひずみ(長手方向)を仮定し, 弾塑性応力解析を行う。
- (3) H形鋼 1/2 断面(左右対称)を対象とし, 室温での反りを予測する¹³⁾。
- (4) ウェブ部の圧縮熱応力分布によりウェブ波発生の有無を計算する。
- (5) フラット, スポットの両水冷に合ったフランジ幅方向水量密度を計算する (Fig. 3 参照)。
- (6) 水量密度から水冷時の熱伝達係数を三塚の式¹⁴⁾を用いて計算する。
- (7) 等温変態曲線を利用して相変態の計算をし, 相変態による物

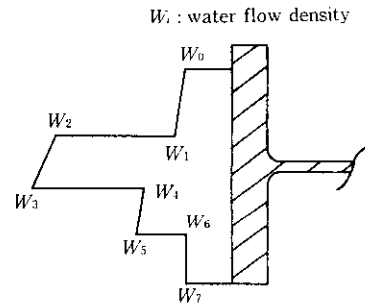


Fig. 3 Schematic distribution of water-flow density

性値(比熱, 熱伝導率, 変態潜熱, 線膨張係数, 降伏応力)の変化も考慮する¹⁵⁾。

- (8) 室温での材質(引張り強さ TS, 降伏応力 YS, 伸び El, 硬さ HV)を予測する¹⁶⁾。

上記の(3), (5), (6), (8)が新しく追加した機能である。本シミュレータの計算の全体の流れを Fig. 4 に示す。

シミュレータの予測精度を調べるため, フランジ水冷材について, 表面温度(FU ミル出側)および残留応力の計算値と実測値との比較を行った。その結果を Fig. 5 および 6 に示す。ただし, 水冷

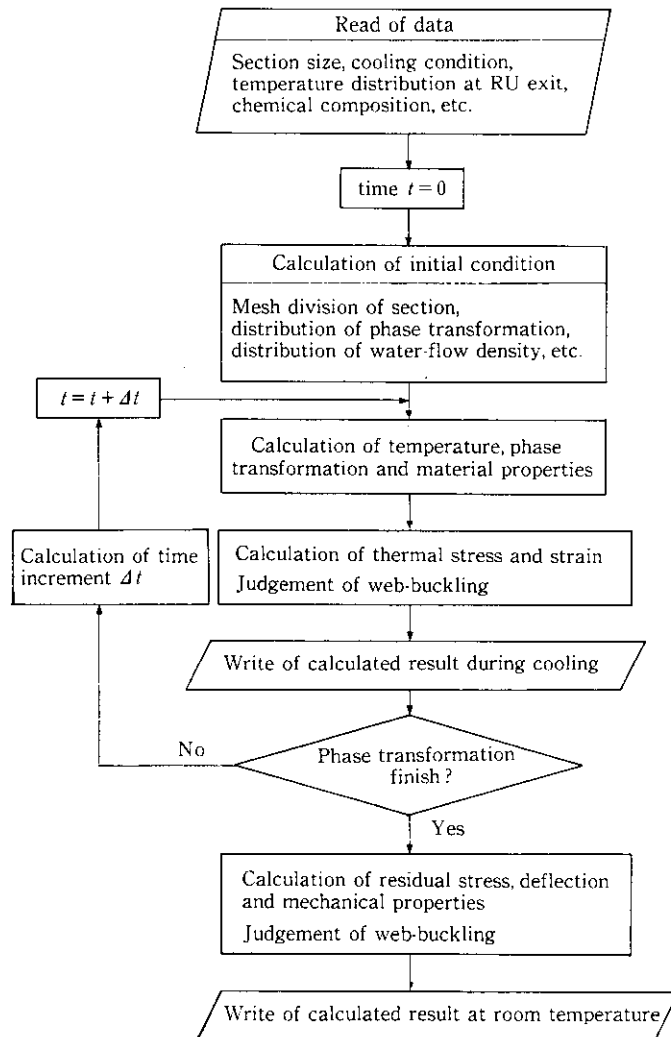


Fig. 4 Whole flow of the mathematical simulator

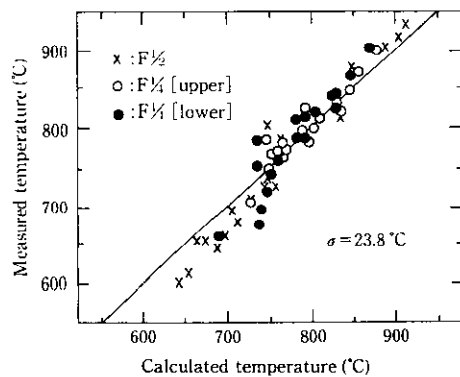


Fig. 5 Comparison between calculated and measured temperatures on outer flange surface

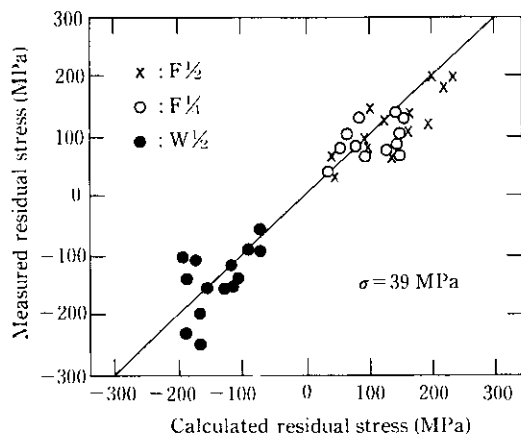


Fig. 6 Comparison between calculated and measured residual stresses

は RU~FU 間で行い、温度はフランジ外面を放射温度計で、残留応力(板厚平均値)はひずみゲージ法で実測した。実測値と計算値との差の標準偏差 σ は、温度が 24°C、残留応力が 39 MPa であり、フランジ水冷を行った場合でもかなりの精度で予測が可能である。

Table 1 Dimension of light-web H-shapes

Thickness ratio (t_f/t_w)	≤ 3.0
Web depth (H)	400~900 mm
Flange width (B_f)	150~300 mm

Table 2 Criteria for determining on specification of water-cooling equipment

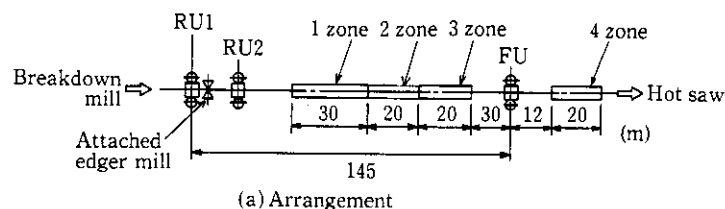
Item	Criterion
Web wave by buckling	Not occurred
Microstructure	Ferrite+Pearlite (No Martensite and Bainite)
Deflection amount	≤ 10 mm/10 m-length
Residual stress at center of web	≤ 100 MPa

3.3 フランジ水冷設備の仕様検討

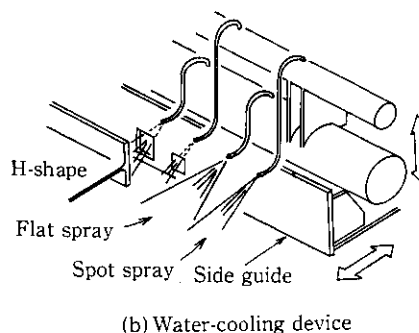
温度・熱応力解析シミュレータを使用して、ウェブ薄肉化に対応するフランジ水冷設備の仕様検討を行った。Table 1 に対象とした薄肉 H 形鋼の寸法を、Table 2 に水冷設備を検討する際の満足すべき条件を示す。検討結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) ウェブ薄肉 H 形鋼を製造するには、RU~FU 間および FU 後の両方に水冷設備を設置する必要がある。
- (2) RU~FU 間は強水冷、FU 後は弱水冷の条件とする必要がある。
- (3) RU~FU 間の水冷設備は三つのゾーンに分割し、それぞれのゾーン毎に流量調整可能とする必要がある。
- (4) 形状不良(ウェブ波、反り、ねじれ)を防止し、かつ材質特性を満足させるには、フラット水冷とスポット水冷を併用する必要がある。
- (5) 反り、ねじれ対策のため、水冷条件に応じて水冷ノズルの上下位置を調整する必要がある。
- (6) 鋼種 SS 41 は鋼種 SM 50 よりも強水冷条件とする必要がある。

本検討結果をもとに、Fig. 7 に示す水冷設備を当社の形鋼工場に設置した。Table 3 に本水冷設備の仕様を示す。



(a) Arrangement



(b) Water-cooling device

Fig. 7 Water-cooling equipment

Table 3 Specifications of water-cooling equipment

Zone No.	Length (m)	Flat spray		Spot spray	
		Width (mm)	Water flow density ($l/m^2 \cdot min$)	Width (mm)	Water flow density ($l/m^2 \cdot min$)
1	30	150	900~2 000	40	400~900
2	20	150	600~1 350	40	400~900
3	20	150	600~1 350	40	400~900
4	20	100	400~900	60	250~550

4 粗ユニバーサルミルのタンデム化の検討

ウェブ薄肉化に伴うウェブ圧延温度の低下によって、前述の残留応力(ウェブ波)の問題のほかにウェブの材質劣化という問題が生じてくる。ここで、材質劣化とは降伏比 YR の上昇を意味し、Fig. 8 に示すように、ウェブの RU 仕上がり温度が Ar_3 変態点以下になると YR の上昇が顕著になる。FU 仕上がり温度の材質に及ぼす影響も考えられるが、通常 FU ミルにおけるウェブで圧下率は数%程度と非常に小さいため、材質はほとんど変化しないと考える。

H 形鋼の YR に対する規制はまだ明確になっていないが、SM 50 クラスのフランジについては厚板同様に 80% 以下という要求が出つつある。一方、ウェブについては、溶接 H 形鋼の代替として考えるならばフランジと同等の材質であることが望ましい。しかし、構造部材としてのウェブの寄与率が低いこと、通常ウェブのほうが低温で圧延されるという圧延特性から、フランジと同等の材質を得ることはかなり困難である。このため、フランジに対して +5% の YR を製造目標とした。この目標 YR の達成可能な温度域は、Fig. 8 より SM 50 ではほぼ 730°C、SS 41 ではほぼ 770°C 以上に相当する。

RU ミル 2 基でのタンデム化により、ウェブ厚 6 mm の極薄肉サイズにおける温度確保の可能性を、すでに開発済みの圧延温度シミュレータ¹⁷⁾を使って調査した。まず、シミュレータの温度予測精度を確認するため、タンデム圧延時の RU ミル入側での表面温度(パス入側表面温度)の計算値と実測値との比較を行った。その結果を Fig. 9 に示す。タンデム圧延の場合にも十分な精度で圧延温度が予測できることがわかる。

本シミュレータを用いて、タンデム圧延および単基圧延のそれぞれについて、RU ミルでのウェブで仕上がり温度に及ぼすアズロール長さ、パス回数の影響について調査した。その結果を Fig. 10 に示す。図より以下のことが認められる。

- (1) タンデム圧延を行うと単基圧延よりも大幅にウェブ仕上がり温度が上昇する。
- (2) アズロール長さが長くなり、パス回数が増えるほど、ウェブ仕上がり温度は低くなる。この低下傾向は、タンデム圧延よりも単基圧延のほうが激しく、タンデム圧延の場合にはウェブ仕上がり温度に及ぼすアズロール長さ、パス回数の影響が鈍感になる。
- (3) 材質劣化を生じないウェブ仕上がり温度 770°C 以上 (SS 41 の場合)、かつ生産率および歩留まりを低下させないアズロール長さ 100 m 以上を確保することは単基圧延では不可能であるが、タンデム圧延(18 パス以下)では可能である。

ミルのパス回数は、少ないほど圧延能率は向上するが、ミルの能力(最大許容荷重、トルク、動力)で制限される。当社の形鋼ミルで

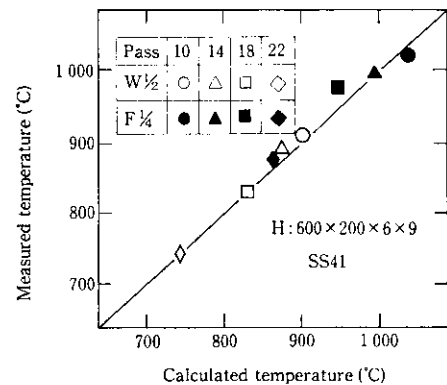
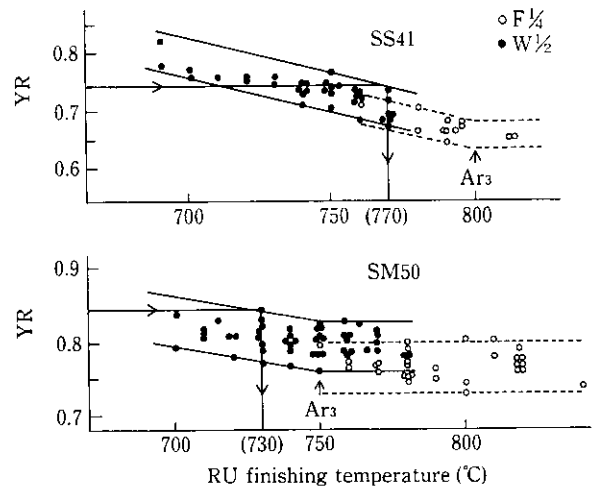


Fig. 9 Comparison between calculated and measured surface temperatures at RU1 mill entry

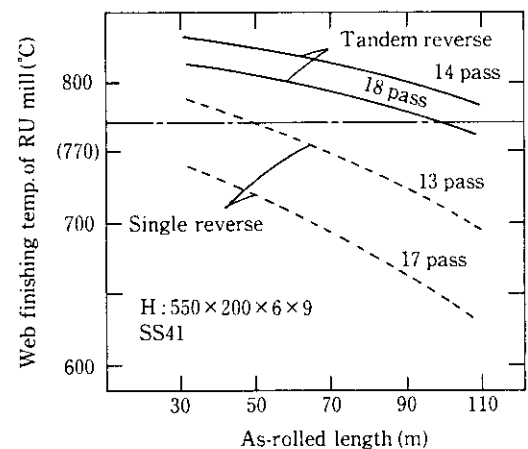


Fig. 10 Influence of as-rolled length and pass number on web finishing temperature of RU mill

H : 550×200×6×9 を RU 2 基のタンデムで製造するには、18 パス必要である。

5 実設備でのウェブ薄肉 H 形鋼の製造

当社の形鋼工場では、ウェブ薄肉 H 形鋼を製造するために、前述の検討結果に基づき、RU~FU 間および FU 後に水冷設備を設置し、合わせて RU ミルの 2 基タンデム化の設備改良も行った。これにより、ウェブで薄肉 H 形鋼が予想どおり製造可能となった。代表例として、最も製造が困難な H: 550×200×6×16 の製造条件および製品品質を Table 4 に示す。

6 結 言

ウェブ薄肉圧延 H 形鋼の製造技術について検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) ウェブ薄肉化を達成するためには、残留応力を軽減しウェブ波を発生させないこと、およびウェブ圧延温度低下を防止し材質劣化を起こさないことが必要である。
- (2) 残留応力を軽減するには、RU~FU 間および FU 後にフランジ水冷を行うことが有効である。
- (3) ウェブ温度低下を防止するには、RU ミルのタンデム化が必要である。

これらの検討結果をもとに、当社の大形形鋼工場の RU~FU 間および FU 後に水冷設備を設置し、合わせて RU ミルの 2 基タンデム化の設備改造も行った。その結果、予想どおり JIS サイズの H 形鋼に比べて大幅なウェブ薄肉サイズの圧延 H 形鋼が製造可能となった。

Table 4 Manufacturing conditions and product qualities (H: 550×200×6×16)

Manufacturing condition	Steel grade	SM50		
	Pass number			
	BD	9		
	RU1+RU2	18		
	FU	1		
Product quality	Water flow density ($l/m^2 \cdot min$)	[1 zone]	[3 zone]	[4 zone]
	Flat spray	1 000	1 000	800
	Spot spray	400	400	300
	Shape defect			
	Web buckling	Not occurred		
	Twist	Negligible		
	Deflection	Negligible		
	Dimension accuracy	Equivalent to that of welded H-shape		
	Mechanical Properties			
	TS (MPa)	520~570 (490~610)* ¹		
Product quality	YS (MPa)	370~400 (≥ 320)* ¹		
	El (%)	20~26 (≥ 17)* ¹		
	HV	163~177		
	Residual Stress (MPa)	≤ 50		

(*)¹: JIS

参 考 文 献

- 1) 吉田 博, 佐々木 徹, 近藤信行, 田中智夫, 橋本隆文: 鉄と鋼, 69 (1983) 3, 412
- 2) H. Yoshida: Trans. ISIJ, 24 (1984), 401
- 3) 長柱研究委員会: 「弾性安定便覧」, (1973), 401, [コロナ社]
- 4) 吉田 博, 佐々木 徹, 近藤信行, 田中智夫, 奥村 寛: 鉄と鋼, 69 (1983) 14, 1623
- 5) H. Yoshida: Trans. ISIJ, 24 (1984), 471
- 6) 日下部 俊, 能勢二郎, 吉田常松, 米原隆三, 脇本尚武, 三原 豊: 日本鋼管技報, (1973) 59, 25
- 7) 中内一郎, 市之瀬弘之, 義之廣雄, 森岡清孝: 鉄と鋼, 67 (1981) 13, S1043
- 8) 吉田 博, 佐々木 徹, 近藤信行: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S736
- 9) 畠中 淳, 瀬戸恒雄, 藤本洋二, 中西輝行, 東岡晃二, 小松重之: 材料とプロセス, 3 (1990) 2, 496
- 10) 住友金属工業(株): 特開昭 63-140703
- 11) 藤本洋二, 朝生一夫, 斎藤晋三, 畠中 淳, 中島英二, 藤岡克志: 材料とプロセス, 2 (1989) 2, 1570
- 12) G. D. Smith 著, 藤川洋一郎訳: 「偏微分方程式の解法」, (1970), 42, [サイエンス社]
- 13) 吉田 博, 片岡健二, 佐々木 徹, 田中智夫: 塑性と加工, 24 (1983) 270, 715
- 14) 日本鉄鋼協会: 「鋼材の強制冷却」, (1978), 16, [日本鉄鋼協会]
- 15) 吉田 博, 佐々木 徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 鉄と鋼, 68 (1982) 8, 965
- 16) M. Saeki, K. Tsunoyama, H. Yoshida and Y. Ito: "Computer Simulation for Designing Mechanical Properties of Hot Rolled Sheet Steel", Proceedings of The 29th Mechanical Working and Steel Processing Conference, Iron and Steel Society of AIME, Tronto (Canada), October (1987)
- 17) 林 宏之, 片岡健二, 斎藤晋三, 奥村 寛, 長山栄之: 鉄と鋼, 72 (1986) 12, S1239