

形鋼圧延技術の現状

北浜正法

Masanori Kitahama

川崎製鉄(株) 技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員

Shape Rolling Technologies

1 はじめに

形・棒・線等の条鋼製品は現在わが国の鉄鋼圧延製品の全生産量の約40%を占める。条鋼製品の約15%はH形鋼であり、その生産量は年間約500万トン強である。H形鋼は図1に示すような断面形状であり、断面係数が高く、土木・建築分野で広く用いられている。わが国におけるH形鋼の圧延は、表1に示すように1960年代に本格化し、現在までに多くの技術が開発されてきた。しかし、H形鋼の圧延においては、板材の圧延と異なり3次元的な材料変形となるために、その圧延技術は板材圧延と比較するとまだ完成されたものとは言えず、今後の課題も多い。本解説では、条鋼製品の中でH形鋼の圧延における最近の技術動向をまとめる。

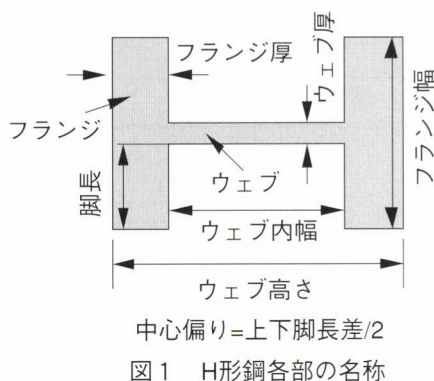


図1 H形鋼各部の名称

表1 H形鋼の主要製造技術および新製品

	1960	1970	1980	1990	年代
製造技術	H形鋼本格生産	Uミルの連続圧延 ミル計算機制御	ウェブ高さ制御技術 (幅可変Hロール, スキューロール)	URミル油圧AGC	
		ビームブランクCC	仕上げAGC	CBP (ニアネット シェイプCC, XH圧延)	
		CCスラブH			
新製品	縞H形鋼	突起付H形鋼	SUS-H形鋼	非水冷型 TMCP H形鋼	
		非調質600MPa H形鋼	外法一定H形鋼	耐火H形鋼	
			水冷型TMCP H形鋼		

2 H形鋼圧延概要および圧延設備

H形鋼の製造に用いられる圧延機およびそれらの機能を図2および表2に示す。スラブ、ブルームあるいはビームブランクを素材として、加熱炉で昇温された後にブレイクダウンミル (BDミル) において粗成形される。BDミルではカリバロールが用いられ、成形の段階によりカリバ位置を変えて圧延される。粗成形された素材は粗ユニバーサルミル (URミル) によってウェブ・フランジの減厚・延伸加工およびエッジャーミル (Eミル) によってフランジ先端の幅圧下がなされる。URミルは水平ロールと非駆動の垂直ロールで形成されるロール間隙によりフランジとウェブが同時に圧延される。URミルで所定の板厚まで圧延された後、仕上げユニバーサルミル (UFミル) によってフランジの角度起こしと板厚の最終調整がなされる。

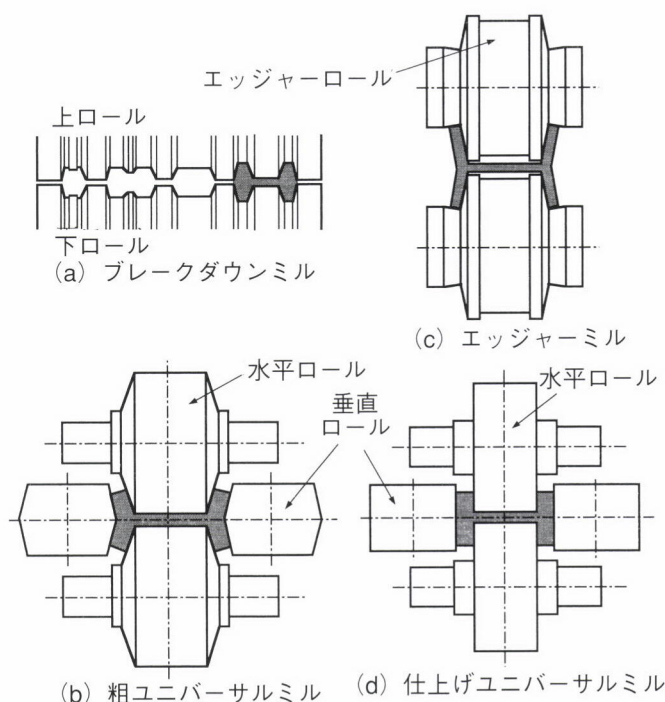


図2 H形鋼圧延機の種類

表2 各圧延機の機能

機能	設備	ブレーク ダウン 圧延機	ユニバーサル圧延機		
			粗	エッ ジャー	仕上げ
ウェブ・フランジ造形		○			
ウェブ・フランジ厚圧下			○		
フランジ幅圧下				○	
中心偏り修正				○	
フランジ角度起こし					○
ウェブ・フランジ厚仕上げ					○

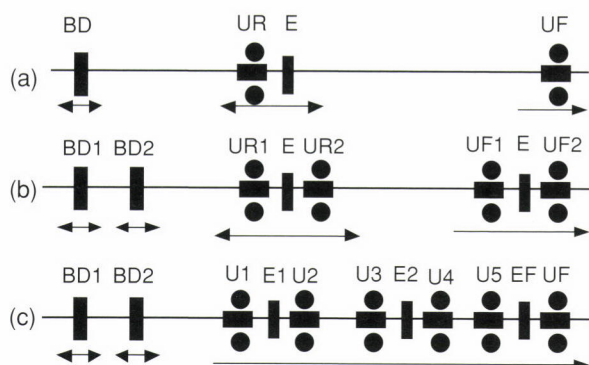


図3 H形鋼圧延設備の代表的なレイアウト

このような圧延機を配置する圧延設備のレイアウトの例を図3に示す。(a)は各1基の可逆式BDおよびURミル、非可逆式UFミル1基からなるものであり、最も一般的なレイアウトである。(b)は二基の可逆式BDミル、可逆式粗ユニバーサルミル群(URE-UR)および非可逆式仕上げユニバーサル群(UF-E-UF)からなるもので、タンデムリバース圧延法式と呼ばれる。ジュニアサイズHなど比較的薄物の温度の下がりやすいH形鋼の圧延に適している。また(c)は二基の可逆式BDミルとそれ以後の非可逆式圧延機群からなるジュニアサイズHなどの多量生産に向くレイアウトであり、生産性が非常に高いのが特徴である。

3 H形鋼圧延技術の現状

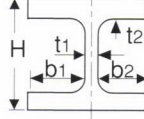
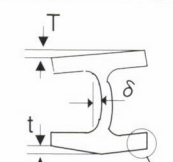
3.1 寸法形状制御技術

H形鋼の寸法形状品質としては表3に示すような項目が挙げられる。表3の多くの項目の許容値がJISで定められているほか、用途によって需要家の特別な要求に答えているのが現状である。

3.1.1 ウェブ・フランジ厚さ

ウェブおよびフランジの厚さはユニバーサルミルの水平ロールおよび垂直ロールの間隙で決定される。通常の板圧延と同様に、圧延荷重および圧延機の変形量を予測し、ロ

表3 H形鋼に要求される寸法形状品質

[寸法] ウェブ厚：t1 フランジ厚：t2 フランジ幅：B 中心偏り：S ウェブ高さ：H	 $S = (b_1 - b_2) / 2$
[形状・その他] 直角度：T フランジ折れ：t ウェブ反り：δ 曲がり フランジ角落ち ウェブ波 フランジ波	 曲がり フランジ角落ち

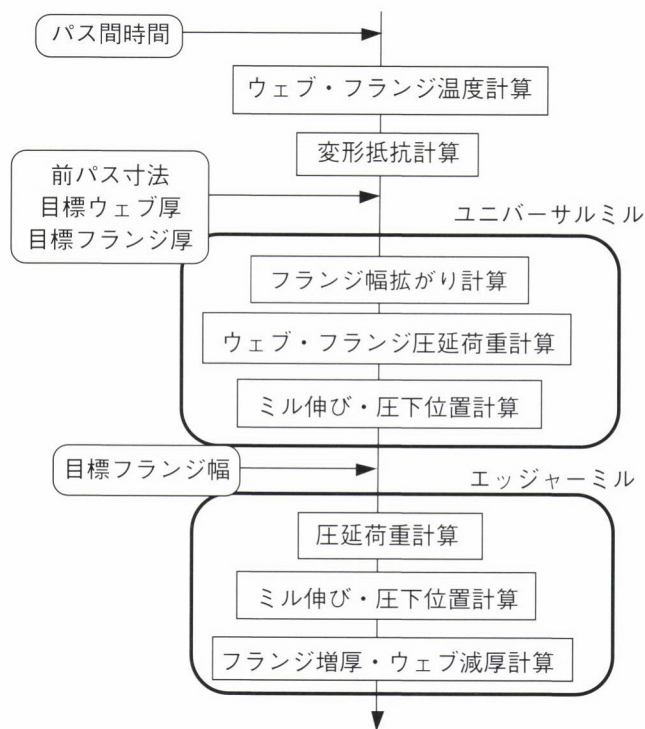


図4 H形鋼セットアップシステム例
(UR-E奇数パスの例)

ール間隙を設定する方法が種々検討されている^{1),2)}。H形鋼の圧延においてはフランジとウェブ圧延状態が相互に影響しあうために、板圧延のように圧延理論から一般的な形で荷重式を導くのは困難である。そこで、ラボ圧延や実機データの解析によって実際の圧延現象を表せるような数式モデルが作成されている。モデルの特徴は、ウェブとフランジの相互の影響を表すパラメータ、たとえば両部位の圧下率差や相互間のメタルの移動量を考慮している点である。また、Eミルによるフランジ幅圧下では、フランジ先端の

バルジングによる増厚や非圧延部であるウェブの引張りによる減厚があり、続くユニバーサル圧延時の荷重に影響を与えるので、エッジングによるフランジ増厚・ウェブ減厚を表現するモデルも必要となる。これらの影響を考慮した荷重式により圧延荷重を推定し、圧延機の弾性変形量は別途測定したミルストレッチのモデルにより、目標板厚となる水平・垂直ロールの圧下位置が決定される。H形鋼圧延における代表的なセットアップシステムのフローを図4に示す。なお、目標板厚のスケジュールは、現状では圧延負荷、厚さ、フランジ幅、形状等で問題が発生しないように経験的に作成されるのが一般的である。

また、粗ユニバーサルミルでは通常リバースで多パス圧延が行われる。各パスの圧延条件の最終製品の寸法品質に及ぼす影響を影響係数としてモデル化し、各パスの圧延条件を最適化する影響係数モデル³⁾が提案されており、寸法精度の向上が期待される。

さらに、新しいユニバーサルミルでは圧下装置として油圧圧下が採用される場合が多く、油圧圧下を用いたAGCにより板厚精度が向上した報告⁴⁾もある。

3.1.2 フランジ幅・中心偏り

ユニバーサルミルではフランジの先端は自由端であり、フランジ幅および中心偏りの制御は困難である。フランジ幅を圧延するEミルにおいても、通常カリバ先端とウェブ面の間には数ミリ程度の間隙があり、フランジ幅の制御は可能なものの中心偏りの修正には一定の限界があった。最近、図5に示すエッジャーロールを二重構造とし、カリバ先端を回転自由とし、さらに偏芯ブッシュによってカリバ深さを可変とした脚長可変エッジャー⁵⁾が発表されている。本ロールでは、カリバ深さを圧延材の脚長に合わせ、さらにカリバ先端でウェブを拘束しつつ圧延するので、フラン

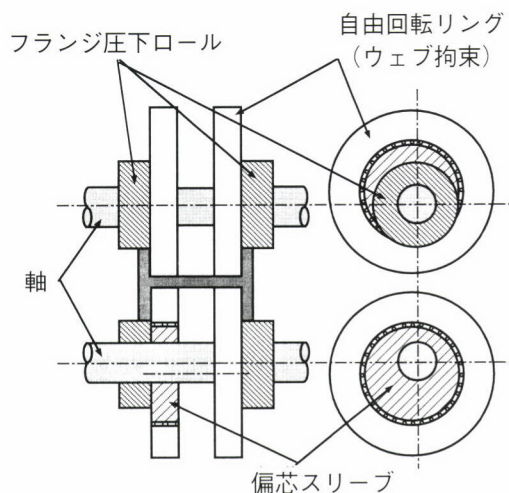


図5 偏芯スリーブ式脚長可変エッジャーロール

ジ幅・中心偏りの制御効果が大きいことが示されている。

また、中心偏りには入出側のガイド拘束、材料の進入角度および反り等の影響も大きく、入出側のガイド位置の可変高精度化、フランジローラーガイドによるユニバーサルミル直近での拘束等が有効とされている。

3.1.3 ウェブ高さ

従来のユニバーサルミルではウェブ内幅は水平ロールのロール胴幅で決定されており、フランジ厚の変化にしたがってウェブ高さが変化していた（内法基準）。H形鋼の使用者からは、施工上の問題からフランジ厚によらずウェブ高さが一定の外法一定H形鋼の開発が望まれていた。1989年にUFミルでウェブ高さの縮小圧延を行う方法と、UFミルの前にウェブ高さの拡大を行う方法の2種の異なる方法が発表された。

ウェブ高さ縮小圧延法⁶⁾においては、UFミルの水平ロールに図6に示す分割型の幅可変ロールが用いられ、垂直ロールによるウェブ高さの縮小圧延とともに、ウェブ・フランジの厚さ仕上げ、フランジの角度起こしを行う。URミルでの予成形およびUFミルの圧下条件の適正化、およびガイド拘束の強化等によって形状不良やウェブの板厚段差を防止している。

ウェブ高さ拡大圧延法⁷⁾においては、UFミルの前に図7に示す幅拡大用のスキュー圧延機によりウェブ内幅を引き延ばす。UFミルではウェブ高さ縮小圧延法と同様に幅可変水平ロールが用いられる。

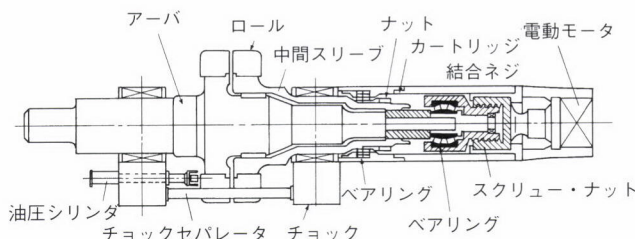


図6 幅可変水平ロール

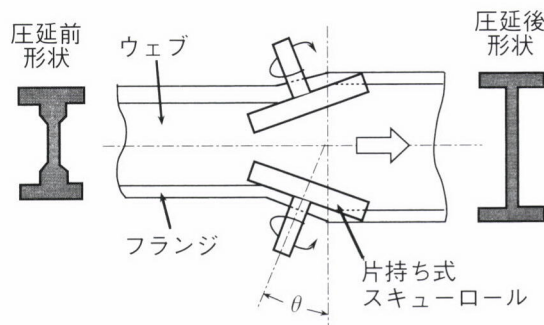


図7 ウェブ内幅拡大用スリーブロール

これらの方法によってウェブ高さの制御が可能となり、外法一定のH形鋼の製造が可能となった。

3.1.4 形状・その他

H形鋼では寸法性能だけでなく、表2に示すような形状品質も要求される。このような形状品質は、圧延においてはBD後の断面の対称性、URミルにおける各パスの圧下スケジュール、フランジとウェブの圧下率差の配分、材料・各ガイドおよび圧延機のパスライン、入出側のガイド拘束度等、多岐の要因によって影響を受ける。さらに、材料の水冷条件、圧延材の水冷ゾーンの通過速度の不均一などの温度外乱の影響も受ける。各形状品質への影響が大きい調整項目が経験的に把握されている。しかし、各項目の影響が独立ではないために、形状不良が発生した場合にそれらの調整項目を組み合わせ、すべての形状品質が管理範囲に収まるよう徐々に修正しているのが現状である。

3.2 スケジュールフリー圧延技術

形鋼圧延においては種々のウェブ高さとフランジ幅の組み合わせ（シリーズ）の製品を製造している。したがって、圧延材のシリーズが変わる毎にユニバーサルおよびエッジャーミルのロールおよびミル前後のガイド等を取り替える必要があり、生産性の阻害要因となっていた。圧延スケジュールの制約条件を緩和するために、(1) ミル前後のテーブル昇降、(2) ミル入出側ガイドの昇降・幅アジャスト、(3) ユニバーサルミルのスタンド昇降、(4) ユニバーサルミルの幅可変水平ロール、(5) エッジャーミルの脚長可変ロール、などのハード面の自由度を向上させる設備が開発されている。

3.3 ニアネットシェイプ圧延法

従来、H形鋼は連続鋳造（CC）スラブ、ブルームあるいはビームブランク（BB）を素材として製造されていた。最近では主に電炉分野で素材ウェブ厚を100mm以下の薄肉としたBB用のCCが実用化されている。続く圧延ライン

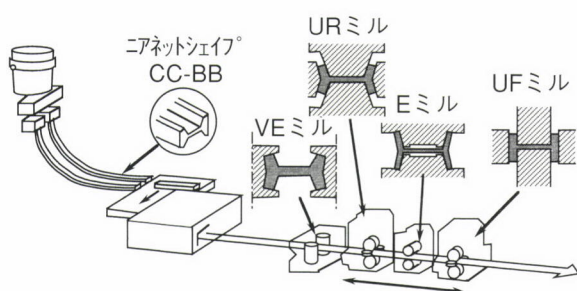


図8 CBPプロセスのレイアウト

ではBDミルを置かず、縦ロールミル（VEミル）、UR-E-UFミルを連続配置し、厚さ、ウェブ高さおよびフランジ幅を圧下して製品サイズが作り分けられる。このようなレイアウトは図8に示すCBP[®]（Compact Beam Production）と総称されている。また、URとUFミルを近接配置したタンデムリバース圧延方法は、そのフランジ形状からX-H圧延と称されている。X→H圧延（UR→UF）は従来のUF圧延と同様であるが、H→X圧延（UF→UR）ではUF圧延後の真直なフランジをテーパ角度を有するURミルで圧延することになる。このときフランジ内面に疵の発生やHロールへの噛込が懸念されるが、少なくとも600×300以下のサイズではガイドによる案内性の向上等により特に問題は発生しないとされている。

3.4 温度・残留応力制御技術

構造部材としてのH形鋼では、曲げ剛性に対するウェブの寄与は小さいために、ウェブを薄肉化して軽量化を図る傾向にある。ウェブ薄肉H形鋼の圧延においては、ウェブとフランジの板厚差のために温度差が発生し長手方向の残留応力が大きくなり、かつウェブの臨界座屈応力が低下するために形状不良（ウェブ波）が発生しやすくなる。ウェブ波を防止するために、仕上げユニバーサル圧延前後でフランジ部を水冷しウェブとの温度差を小さくし、残留応力を低減する方法が多く用いられている。水冷条件を決定するためには、温度および熱応力を精度良く予測するモデルが必要であるが、材料の相変態による物性値（比熱、熱伝導率、線膨張係数など）の変化も考慮した温度・熱応力解析手法が開発されている。図9にフランジ温度の予測値と実測値の比較例⁹⁾を示すが、実用上十分な精度で温度を推定することができる。残留応力に関しても精度良い予測ができ、このような温度計算手法の活用により残留応力を軽減する水冷条件の設定が可能となっている。

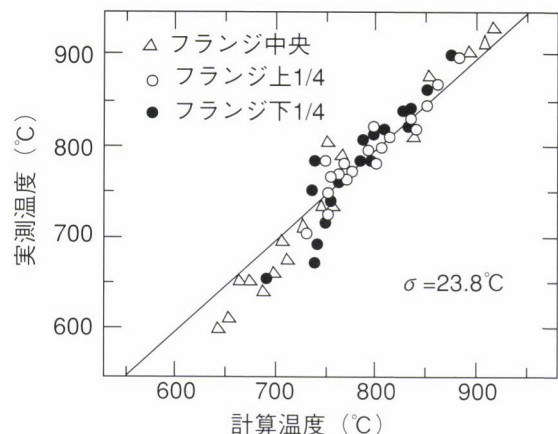


図9 実測温度と計算温度の比較例

3.5 計測技術

形鋼圧延においては圧延材の形状が複雑であることから、オンラインでは幅・厚さなど単純な項目しか測定できなかった。このため圧延後のサンプルを切り出し、マニュアルで測定し、その結果を次材あるいは次次材の圧延に反映させるのが一般的であった。最近、超音波やレーザ距離計を応用したオンライン寸法計が開発されている。センサーの配置により寸法測定が可能な部位は異なるが、特に図10に示す複数の走査型2次元レーザ距離計を用いて走間状態の圧延材の外形形状を測定し、データ処理により任意点の寸法や各部の断面積を求める高精度の熱間寸法計¹⁰⁾が注目される。図11に熱間寸法計による外形形状の測定例と、データ処理によるフランジ脚長の測定精度を示すが、標準

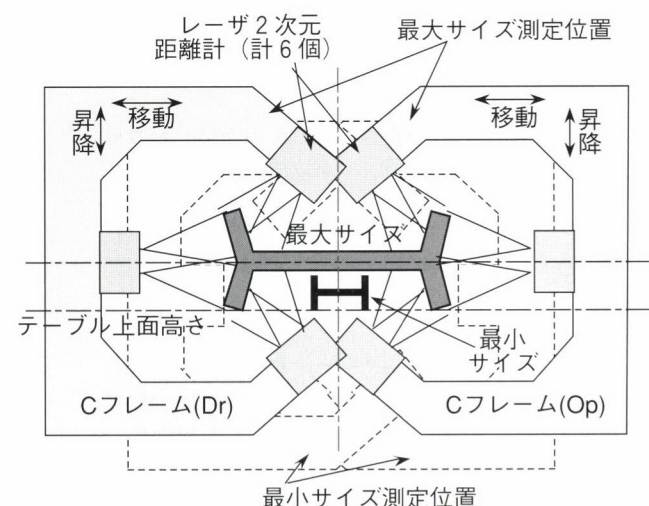


図10 UR熱間寸法計の概要

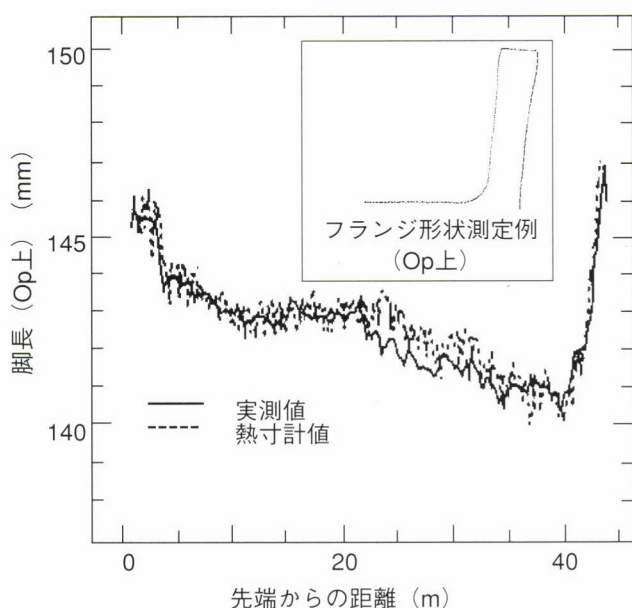


図11 UR寸法計の測定精度

偏差0.3mm以下の精度での測定が可能である。これら寸法計を用いることにより、寸法精度の向上や品質保証体制の確立が期待される。

3.6 材質制御技術

建築構造物の大型化・高層化に伴い、H形鋼にも極厚化・高強度化など高機能な特性が要求されるようになってきた。材質制御技術は厚板分野が先行しており、その成果を形鋼に応用する形でTMCP鋼、低YR鋼、耐火鋼などの新機能H形鋼が開発されてきた。

TMCP鋼は、圧延中および水冷時に温度制御を行うことにより溶接性・強度・靱性の優れた材料を得ようとするものであり、非水冷型と水冷型に大別できる。非水冷型のTMCP鋼は、厚板圧延におけるCR(Controlled Rolling)をH形鋼に適用したものであり、未再結晶 γ 温度域での圧下量を強化して α 粒を微細化する制御圧延が行われる。これによって、材料の高強度強靱化が図られる。通常圧延よりも低温域での強圧下が必要となり、圧延機の耐荷重の増大が指向される。また、水冷型の例としては、QST(Quench and Self-Temper)法¹¹⁾がある。最終圧延後に全表面を強水冷してマルテンサイト化し、その後の復熱過程で焼き戻しマルテンサイト組織として材質を確保するものである。

現在の建築物の耐震設計法では、以前の弾性設計に変わり、鋼材が降伏後最大強さに至るまでの塑性変形能力を活用し、地震入力エネルギーを吸収させて建物の耐震性を確保する塑性設計が採用されている。このため降伏比（ $YR=YS/TS$ ）の低い鋼材が望まれている。低YR鋼の製造では圧延仕上がり温度を制御する必要があり、厚さの薄いサイズほど製造が難しくなる。薄肉サイズで仕様を満足するためには、強圧下によるパス数減などにより圧延時間を短縮し温度の制御を行うとともに成分の調整が必要である。

耐火鋼は高温での耐力低下を低減した鋼材であり、これにより建築用鋼材の耐火被覆を大幅に軽減できるものである。耐火鋼は600℃の耐力が常温規格値の2/3以上を保証することなどの条件を満足するために、Moなどの析出元素を添加した鋼種である。この場合も、常温と高温強度を両立する最適組織に制御するための適正な圧延条件と、それに合った成分系の選択が必要である。

3.7 解析技術

最近の計算機的能力向上とともに、3次元有限要素法が実用的な問題を取り扱えるようになった。なかでも、剛塑性有限要素法は計算ステップを比較的大きくとっても安定した解が得られることから、熱間鋼の3次元圧延解析に広く用いられている。形鋼圧延においては、材料の変形およ

びロールの形状が複雑であるため、変形の進行とともに要素を再分割するリメッシング手法や、材料とロールの接触判定の改良などの点で工夫がなされ、ブレイクダウンおよびユニバーサルミルの圧延解析がなされている。

H形鋼のBD圧延においては、圧下条件とカリバ形状によって材料の充満特性が決定される。従来、カリバ設計時にはロールの幾何学的形状の表示やカリバ面積の定量化にCAD等が用いられていたが、材料の変形挙動については設計者の経験で判断されていた。剛塑性有限要素法により、材料のカリバへの充満やカリバからはみ出し、圧延負荷特性などが計算できるようになり、カリバ設計時の指針とされている。図12に一般化平面歪みFEMによるBD圧延の解析例¹²⁾を示す。また最近では、FEMによる計算結果をデータベース化し、エキスパートシステムとの組み合わせによるカリバ形状の決定¹³⁾や、FEMと最適化手法の結合によるカリバ形状の特性値の最適化¹⁴⁾などによりカリバ設計の自動化が試みられている。現状では、カリバ形状の良否を決定するパラメータが必ずしも明確でなく、またクロップ形状や材料の噛込性など実操業では重要な特性を計算結果のどのような指標で表すかなどの問題があり、今後さらに検討が望まれる。

ユニバーサル圧延においては、図13に示すようにロールバイト内の圧延圧力をプラスティシンによる実験値と比較することにより剛塑性有限要素法の精度検証がなされている¹⁴⁾。この解析結果から、ウェブに作用する圧縮応力を軽減し、圧延ウェブ波を防止する圧延方法が提案されている。また、図14にフランジ内面における水平ロール側面との相対速度分布の解析例¹⁵⁾を示す。材料とロール間の相対速度

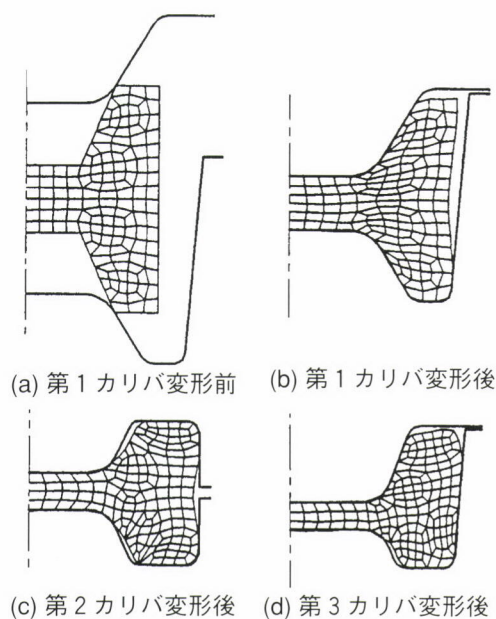


図12 一般化平面歪みFEMによるBD圧延時の変形解析例

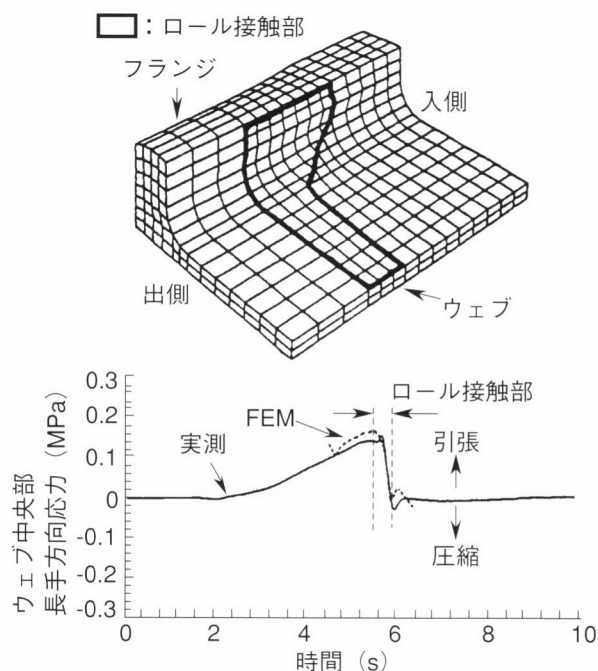


図13 3次元剛塑性FEMによるユニバーサル圧延時の変形・応力解析例

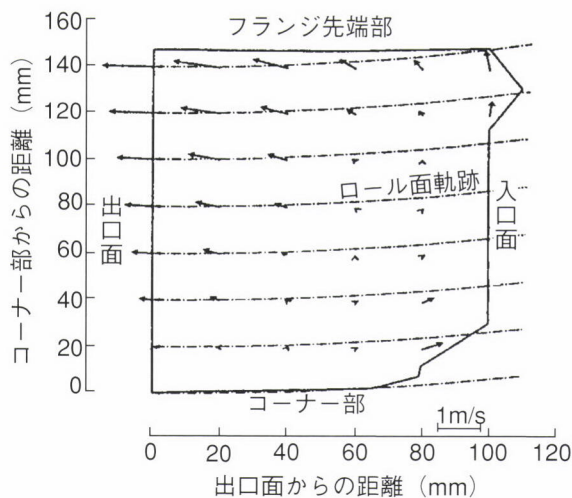


図14 3次元剛塑性FEMによる水平ロール側面とフランジ面との相対速度の解析例

と水平ロールの側面に作用する応力とを算出し、水平ロール側面の摩耗を推定しようとするものであり、UR圧延におけるエッジャー圧下量の軽減が偏摩耗の抑制に効果があるとの結論を得ている。

さらに、BDミルからUFミルを通じて材料の温度解析と圧延時の変形解析を連成し、温度分布の材料変形に及ぼす影響も考慮した詳細な検討¹⁶⁾もなされている。

このように、剛塑性有限要素法とエキスパートシステム、温度解析、最適化手法等を組み合わせ、さらに有用な解が得られるようになった。解析手法はFEM本体の高機能化

および他の手法との連成・結合によって今後とも発達し、圧延時の変形挙動の解明や圧延操業条件の最適化に寄与するものと期待される。

4 まとめ

近年のH形鋼圧延技術を中心に解説した。最近の形鋼圧延分野の技術的な進歩はめざましいものがある。しかし、条鋼分野でも棒鋼を中心に韓国製等の輸入鋼材が増大しており、国内競争とともに厳しい国際競争にもさらされつつある。鋼材の機能向上・品質向上・コストダウン等の需要家からの要求に応えるべく、さらに技術開発を進める必要がある。本解説が今後の技術開発課題を探索する上で役立てば幸いである。

参考文献

- 1) Eichholz E., Schulze D. : *Metall. Plant Technol.*, 3 (1990), p.37
- 2) 林宏之, 斉藤晋三, 片岡健二, 長山栄之, 高橋一成: 鉄と鋼, 79 (1993), p.1338
- 3) 有泉孝, 平沢猛志, 中内一郎, 盛岡清孝, 脇本信幸: 鉄と鋼, 79 (1993), p.409
- 4) Steel Times Int., Jan (1994), p.20
- 5) 西野胤治, 生田和重: 平成3年度塑性加工春季講演会論文集 (1991), p.577
- 6) 瀬戸恒雄, 畠中淳, 中川豊, 朝生一夫, 三浦啓徳, 藤本洋二: 材料とプロセス, 3 (1990), p.488
- 7) 生田和重, 西野胤治, 青柳幸四郎, 戸次健二, 川並高雄: 第40回塑性加工連合講演会論文集 (1989), p.389
- 8) Cygler M., Engel G. : *Metall. Plant Technol.*, 5 (1994), p.60
- 9) 吉田博, 近藤信行, 三浦啓徳, 奥井隆徳, 橋本隆文, 河野幹夫: 川崎製鉄技報, 23 (1991), p.23
- 10) 片山二郎, 飯田永久, 藤本洋二, 井上研司, 黒田康徳: 材料とプロセス, 9 (1996), p.282
- 11) Franz A., Becker F. : *Metall. Plant Technol.*, 3 (1989), p.94
- 12) 森謙一郎: 機械の研究, 45-4 (1993), p.423
- 13) 井田真樹, 関和典, 林慎也, 浜渦修一: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1396
- 14) 井口貴朗, 林宏之, 鎌田征雄: 塑性と加工, 35-403 (1994), p.959
- 15) 三浦洋介, 林慎也, 西野胤治, 渡辺和夫: 平成7年度塑性加工春季講演会論文集 (1995), p.107
- 16) 小森和武, 香村克彦, 小野宗憲: 平成8年度塑性加工春季講演会論文集 (1996), p.388

(1996年8月22日受付)