
圧延研究 10 年の歩み

Recent Activities in Research of Rolling Technologies

鍵田 征雄(Ikuo Yarita) 北浜 正法(Masanori Kitahama) 剣持 一仁(Kazuhito Kenmochi)

要旨：

当社におけるこの 10 年の圧延研究として、圧延理論、弾性・塑性理論、トライボロジー、FEM などの数値解析の各技術をもとにして、設備生産性の大幅な向上や高付加価値製品の品質向上を目的に、熱間圧延エンドレス圧延技術を例とするさまざまな開発がなされてきた。本報告では、これらの研究活動について主として以下の具体例を紹介する。(1) 薄板熱間圧延技術として、スケジュールフリー圧延、熱間圧延トライボロジー技術、および千葉製鉄所第 3 ホットストリップミルにおける新技術、(2) 薄板冷間圧延技術として、K-WRS ミルの開発と発展、およびステンレス鋼板の光沢向上技術、(3) H 形鋼圧延技術、(4) 解析技術。

Synopsis：

For the purpose of improving the productivity and quality of high value added steel products, various rolling technologies such as sizing press, fully continuous finishing hot rolling, edge drop control, have been developed on the basis of rolling theory, elasticity and plasticity theory, tribology, numerical analysis by finite element method and finite difference method in the last ten years. In this paper, the research activities of the rolling technologies are described. Representative technologies are as follows: (1) Hot strip rolling: schedule free rolling, tribological technology and new technologies in No. 3 hot strip mill in Chiba Works, (2) Cold strip rolling: development of K-WRS mill and its application to edge drop control, and improvement of surface brightness of stainless steel strip, (3) H-shape rolling: dimension control and cooling control and (4) Numerical analysis of rolling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Recent Activities in Research of Rolling Technologies



鑑田 征雄
Ikuro Yaritha
技術研究所 加工・制御研究部門長・工博



北浜 正法
Masanori Kitahama
技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(部長補)



剣持 仁
Kazuhito Kenmochi
技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(課長)

要旨

当社におけるこの 10 年の圧延研究として、圧延理論、弾性・塑性理論、トライボロジー、FEM などの数値解析の各技術をもとにして、設備生産性の大幅な向上や高付加価値製品の品質向上を目的に、熱間圧延エンドレス圧延技術を例とするさまざまな開発がなされてきた。本報告では、これらの研究活動について主として以下の具体例を紹介する。(1) 薄板熱間圧延技術として、スケジュールフリー圧延、熱間圧延トライボロジー技術、および千葉製鉄所第 3 ホットストリップミルにおける新技術、(2) 薄板冷間圧延技術として、K-WRS ミルの開発と発展、およびステンレス鋼板の光沢向上技術、(3) H 形鋼圧延技術、(4) 解析技術。

Synopsis:

For the purpose of improving the productivity and quality of high value added steel products, various rolling technologies such as sizing press, fully continuous finishing hot rolling, edge drop control, have been developed on the basis of rolling theory, elasticity and plasticity theory, tribology, numerical analysis by finite element method and finite difference method in the last ten years. In this paper, the research activities of the rolling technologies are described. Representative technologies are as follows: (1) Hot strip rolling: schedule free rolling, tribological technology and new technologies in No. 3 hot strip mill in Chiba Works, (2) Cold strip rolling: development of K-WRS mill and its application to edge drop control, and improvement of surface brightness of stainless steel strip, (3) H-shape rolling: dimension control and cooling control and (4) Numerical analysis of rolling.

1 緒 言

最近 10 年間の圧延技術の動向は、連続化・同期化・自動化のさらなる進展から、製造コストの低減を目指した設備生産性の向上や、高付加価値製品の徹底した品質向上を図る制御技術の開発に向けられてきた。またこの間、高機能形状制御ミル、高速油圧圧下装置、ミル主駆動 AC モータの適用による圧延技術の飛躍的進歩があり操業技術が確立するとともに、国内では当社の千葉製鉄所第 3 ホットストリップミルにおける熱間圧延仕上エンドレス圧延技術、国外ではコンパクトホットストリップミルの相次ぐ建設など、21 世紀への光明となる圧延技術の開発がなされた。

圧延材料の観点からは、薄鋼板を例にとると IF 鋼板、高強度・薄物鋼板が主流となり、圧延プロセスでの寸法・形状精度や表面品質の向上が大きな課題となった。

このような状況下において、当研究部門は圧延理論、弾性・塑性理論、トライボロジー、FEM を初めとする数値解析などの専門技術をもとに、薄鋼板の熱間圧延、冷間圧延および H 形鋼圧延に関する課題に取り組み成果をあげてきた。Fig. 1 に研究活動の概要を示す。

薄鋼板の熱間圧延では、1980 年代後半にはサイジングプレスによる大幅圧下技術やスケジュールフリー圧延を達成するためのクラウン・形状制御技術、蛇行制御技術の開発に注力してきた。1990 年代は千葉製鉄所第 3 ホットストリップミルの建設・稼動に際し、仕上エンドレス圧延技術、板厚・板幅・クラウン・形状制御技術、仕上圧延から巻き取りまでの一貫温度 (FDT, CT) 制御技術などの開発に取り組んだ。さらに新製品の開発や表面品質の向上を図るため、粗・仕上ミルにおけるコイル全長におよぶ潤滑圧延技術の開発にも注力した。

冷間圧延では、連続圧延プロセスにおける片テーパワークロールシフト (K-WRS) ミルによる電磁鋼板やぶきき原板のエッジドロップ制御技術、ステンレス鋼板の光沢向上・タンデム圧延技術など薄物・難圧延材の高品質・高能率圧延技術を重点課題として研究開発してきた。また、光輝焼鈍炉内でのステンレス鋼板のカヌーイング現象、ぶきき材料の精整プロセスにおけるクロスバックルや反り形状などの矯正技術についても、弾塑性 FEM により解析し改善を図った。

H 形鋼の圧延では、ウェブ内幅縮小法による外法一定 H 形鋼の圧延技術、寸法・形状精度の向上、冷却、温度制御技術の開発に寄与するとともに、最近では大形工場の粗ミルの更新にともなうユニバーサルミルや自動セットアップモデルの開発に傾注してきた。

これら研究成果から学・協会の技術賞や論文賞などを受賞すると

* 平成10年12月21日原稿受付

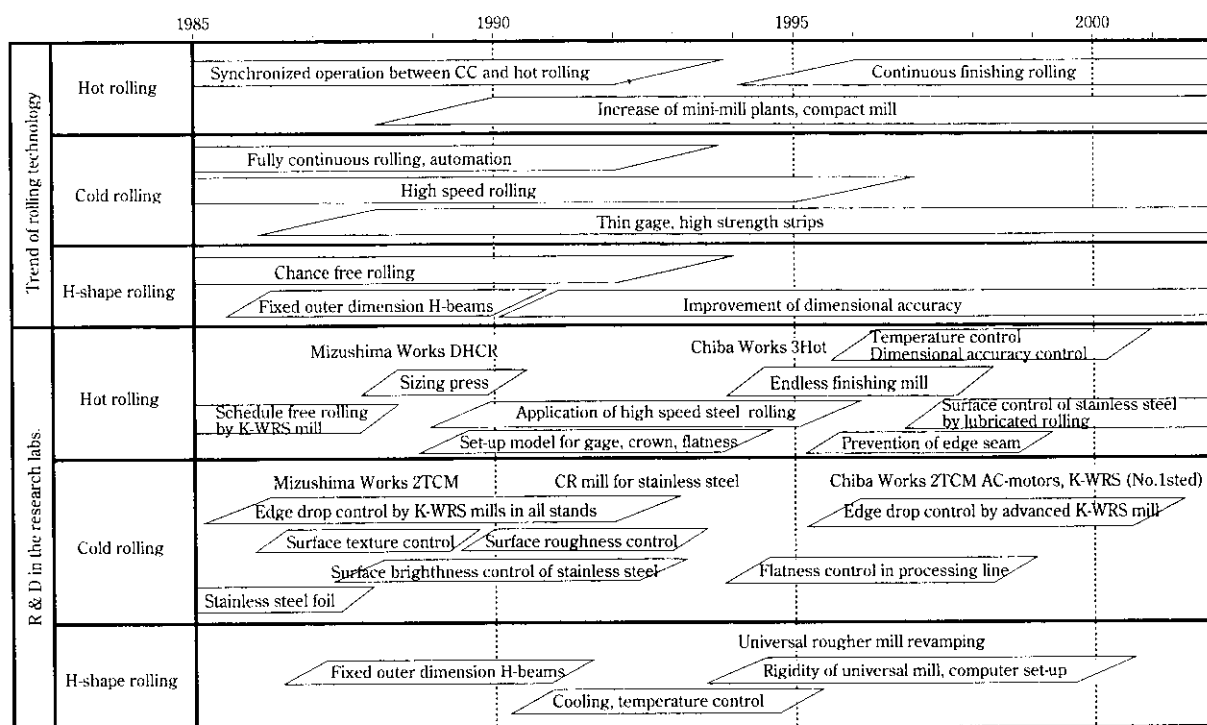


Fig. 1 Recent activities on steel rolling technology in the last ten years

ともに、熱間圧延サイジングプレスや K-WRS ミルの技術は国内、国外の圧延メーカーに採用され、多くの圧延プロセスに導入されている。

2 薄板熱間圧延技術

2.1 スケジュールフリー圧延技術

2.1.1 サイジングプレスによる幅集約技術

製鋼-熱間圧延同期化操業を実現するためには、同一スラブ幅からさまざまな板幅の製品を作り分ける必要がある。従来のエッジング圧延では、変形域が幅端部に限定されるために、板幅の変更能力は限られていた。当研究部門では、プレス方式の幅圧下では変形域が板幅内部にまでおよび、続く水平圧延における幅戻りが小さく、板幅を効率的に変更できることを見出した。さらに、サイジングプレスによる幅圧下時の変形機構、先後端非定常部の幅変化挙動を理論的および実験的に解明し、それらを基に幅変化モデルを作成して計算機による板幅制御に結びつけた。本サイジングプレスによるスラブ幅集約技術は DHCR (direct hot charged rolling) 操業になくしてはならない技術として急速に普及しつつある。

2.1.2 形状・クラウン制御技術

従来、熱間仕上げ圧延においては、ロール摩耗の影響を避けるために、板幅の広い材料から狭い材料へと圧延順を決定していた。製鋼-熱間圧延同期化操業では、圧延順の制約を最小とするために、幅戻り圧延（幅狭材の後に幅広材を圧延）を達成する必要があった。当研究部門では、ロールの摩耗・サーマルクラウン分散効果を発揮する K-WRS ミルによるサイクリックシフト法を開発し、600 mm 程度の幅戻り圧延を可能とした。さらに、サーマルクラウンや摩耗によるロールプロファイルの経時変化を予測するモデルおよび圧延ロールのたわみや扁平などの弾性変形のモデルを開発し、ロールのシフト位置やベンダー力を設定計算することにより、スケジュールフ

リー圧延の条件下でも良好な板形状、クラウン精度を得た²⁾。

2.2 熱間圧延トライボロジ技術

2.2.1 ハイスロール使用技術

熱間圧延用ロールとして耐摩耗性に優れたハイスロールが開発されたが、当初、ハイスロールでは圧延時の摩擦係数が高く、鋼板表面にスケール疵が発生する問題があった。これを解決すべく、鋼板表面温度におよぼす摩擦係数の影響を定量化し、熱間潤滑圧延および鋼板冷却の最適化によりスケール疵の防止が可能であることを見だし、ハイスロールの使用技術を確立した³⁾。

2.2.2 熱間強潤滑圧延技術

従来は先端部のスリップのために強潤滑圧延が不可能であった粗・仕上げ両ミルにおいて、圧延油およびその供給方法の最適化により、摩擦係数を安定して低減し、ロールと材料の焼き付き疵も防止する全長強潤滑圧延技術を確立した。熱間強潤滑圧延技術は、普通鋼およびステンレス鋼板の表面品質向上、および熱間圧延時の低摩擦圧延による新材質の創製に寄与している。

2.3 千葉製鉄所第3ホットストリップミルにおける新技術

新しい機能を盛り込んだ 21 世紀の熱間圧延鋼板製造ラインとしての千葉製鉄所第3ホットストリップミルを建設するに際して、当研究部門においても設備仕様の検討および最新鋭の設備を最大限に活用するための各種圧延制御技術の開発に参画してきた。

2.3.1 温度制御技術

仕上げ入り側温度を起点として、仕上げ圧延機、仕上げ側ランアウトテーブルからコイラーに至るまでを一貫し、長手方向全長にわたる温度制御を行う方式（切り板制御モデル）を開発・実機適用し良好な温度制御精度を得るとともに、高張力鋼板を代表とする新製品の開発とその均一な品質制御にも寄与している⁴⁾。

2.3.2 寸法・形状制御技術

第3ホットストリップミルでは、最高レベルの寸法・形状制御を実現するために、高応答の制御装置（全スタンド油圧圧下、圧延機主駆動 AC モータなど）と、各種センサー（スタンド間板厚計・板幅計・クラウン計など）を適用した。当研究部門では、板厚制御、分散制御系によるルーバ張力制御⁶⁾、粗・仕上げ圧延における板幅制御、クラウン・形状制御、走間板厚変更など、仕上げ圧延機の設定および制御に必要なモデルを開発し、高精度な制御システムの実現に寄与した⁶⁾。

2.3.3 エンドレス圧延技術

第3ホットストリップミルの最大の特徴は、粗圧延機と仕上げ圧延機の間でシートバーを接合し、連続して仕上げ圧延機に供給するエンドレス圧延技術である。エンドレス圧延の実現のためには、シートバーの接合技術、高精度ミルベising技術、仕上げミル通板技術、高速切断・巻き取り技術など多くの課題を解決する必要があった。当研究部門では、接合部を破断することなく仕上げ圧延する仕上げミル通板技術に注力した。

接合部の幅方向端部 50 mm 程度は接合時の昇温が幅中央部よりも小さいために接合強度が不十分であり、圧延により幅端部が開口し、板破断に至ることが懸念された。圧延時の板端開口部の亀裂の進展を防止するため、アルミニウム帯板を用いた圧延実験を行い、接合部の安定通板条件を検討した。Fig. 2 に示すように、ロールバ

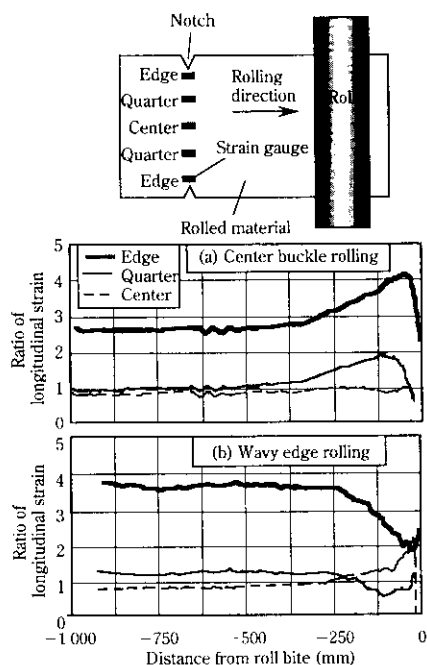


Fig. 2 Change of longitudinal strain in inlet zone

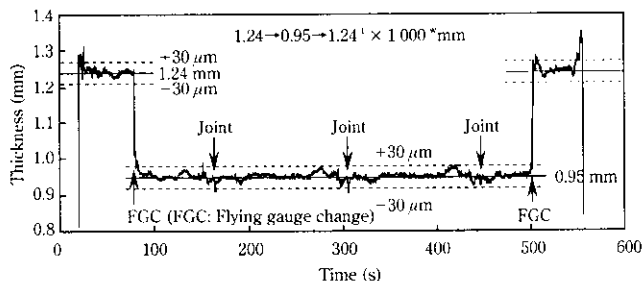


Fig. 3 Example of thickness accuracy of ultra-thin hot strip

イト近傍では、腹伸び形状の圧延の場合には板端部の長手方向歪みが大きくなり、板端部に大きな張力が集中する。一方、耳伸び形状の圧延においては、ロールバイト近傍で幅端部の長手方向歪みが減少しており、幅端部の開口の進展防止に有効であることを見出した。この知見に基づき破断限界張力を明確にするとともに、前述の高応答板厚・張力制御、接合部平坦度制御などを実機適用し、接合部を安定的に仕上げ圧延する技術を確立した⁷⁾。

エンドレス圧延技術を活用した新製品としては、極薄熱間圧延鋼板、薄物広幅熱間圧延鋼板、薄物高張力鋼板、高加工性鋼板などが挙げられる。極薄熱間圧延鋼板は従来の熱間圧延鋼板の最小板厚である 1.2 mm 未満の製品であり、第3ホットストリップミルでは 1 mm あるいは 1 mm 未満の熱間圧延鋼板の製造を行っている。Fig. 3 に 0.9 mm 材の板厚チャートの例を示す。また、前述の熱間潤滑圧延技術をエンドレス圧延に適用することにより、冷延後の r 値が 3 以上の高加工性鋼板を高歩留まりで製造することが可能となった。なお、ステンレス鋼板についてもエンドレス圧延が可能であることが確認されており、近く本格的なエンドレス圧延が開始される予定である。

3 薄板冷間圧延技術

3.1 K-WRS ミルの開発と発展

薄鋼板の板厚精度に対する要求は年々厳しくなっており、特に、圧延において板幅方向端部で板厚が急激に減少するエッジドロップについて、その低減が重要な課題となっている。エッジドロップによる板厚不均一は、電磁鋼板ではモータコア材などの積層作業の自動化の妨げとなり、また、ぶりきや自動車用鋼板ではプレス成形および剪断などの加工工程で加工不良や割れの発生などの問題を生じるため、冷間圧延後に鋼板端部の板厚不均一部分を耳切りして除去している。したがって、エッジドロップ低減は、お客様の二次加工における自動化、材料の省資源化に貢献するとともに、当社における生産性や製品歩留まりを向上することができる。

当社では従来より熱間・冷間圧延において、K-WRS 圧延法による板クラウン・エッジドロップ制御技術を先駆的に開発してきた⁸⁾。

Fig. 4 に K-WRS ミルの概要を示す。本ミルは、ロールの片側端部にテーパを付与したワークロールを軸方向にシフトさせることを特徴とするミルである。Fig. 5 に、実機冷間圧延ミルの単スタンド圧延でのエッジドロップ低減効果を示す。K-WRS ミルでは、シフト量を大きくするにしたがってより大きなエッジドロップ低減効果が得られ、ワークロールのテーパを圧延材の最適な位置にシフトさせることで、均一な板幅方向板厚精度を得ることができる。これらに基づいて、K-WRS ミルの冷間タンデムミルの複数スタンドへの適用による完全矩形断面鋼板圧延技術を確立した。さらに、母板の

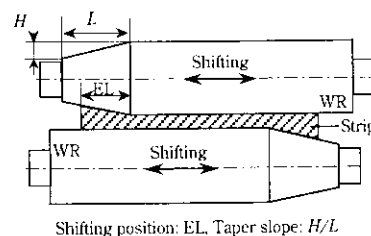


Fig. 4 K-WRS mill

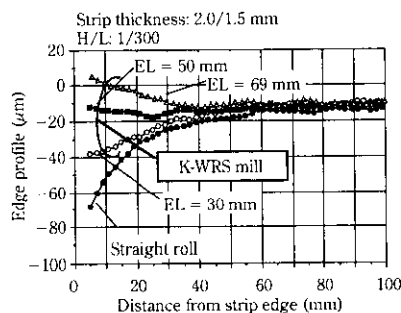
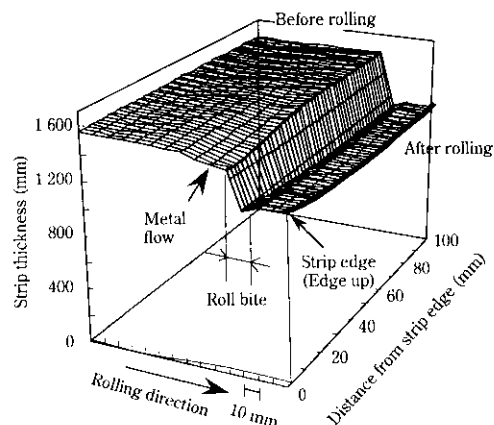
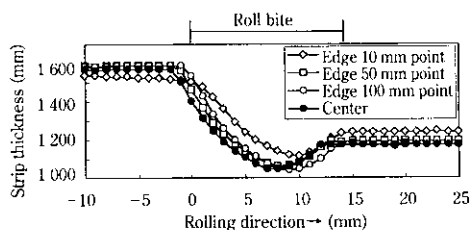


Fig. 5 Improvement of edge drop by K-WRS mill



(a) Edge profile before and after the roll bite (EL = 50 mm)



(b) Thickness change before and after the roll bite (EL = 50 mm)

Fig. 6 Mechanism of improving edge drop by K-WRS mill

板厚プロフィールや圧延条件に応じてワークロールシフト位置を制御するフィードフォワード制御、圧延機出側に配置したエッジドロップ計を用いたフィードバック制御を確立し、圧延材の板幅方向の全長、全幅にわたり高精度化制御技術を達成した⁹⁾。Fig. 6 に示すようにロールバイト入側から出側に至るまでの板端部の変形挙動を調査、解析して、K-WRS ミルによるエッジドロップ低減機構についても明らかにした¹⁰⁾。

さらに、多機能化して単スタンド適用による高効率な矩形断面鋼板圧延技術として、WR シフトとクロスを組み合わせて高機能を図ったアドバンスド K-WR シフトクロスミルを開発し、実機に適用中である。

K-WRS 圧延法は、水島製鉄所の No. 2 冷間タンデムミル (4 スタンド) の全スタンド¹¹⁾、および千葉製鉄所の No. 2 冷間タンデムミル (6 スタンド) の第 1 スタンド¹²⁾に適用するとともに、国内、国外に幅広く技術供与され、数多くのミルに導入されて良好な効果を上げている。

3.2 ステンレス鋼板の光沢向上技術

ステンレス鋼板の重要な品質には、表面光沢、疵防止、寸法・形状があり、当社では千葉製鉄所での高能率一貫生産、および、西宮工場での薄物・BA 材の高品質化を目指して技術開発を行ってきた。当研究部門にて開発に寄与した技術には、高速圧延における光沢制御、強圧下圧延、板厚制御、形状制御の各技術、および、光輝焼鈍炉内のカヌーイング現象の解析と疵防止技術がある^{13,14)}。

3.2.1 光沢制御技術

ステンレス鋼板の品質として最も重要な光沢について、鋼板表面の微小表面欠陥により光沢が大きく影響されることを見出して、微小欠陥ごとの定量的な生成機構を明らかにした¹⁵⁻¹⁸⁾。また、これらに基づく対策を熱間圧延鋼板の焼鈍酸洗、冷間圧延、仕上げ焼鈍酸洗および調質圧延にいたる設備および製造条件に反映させている。

3.2.2 強圧下圧延技術

難加工材であるステンレス鋼板において、SUS304 はマルテンサイト変態が生じるために圧延温度によって変形抵抗が大きく変化して著しく圧延しにくい鋼板であったが、高精度に予測可能な変形抵抗式を構築する¹⁹⁾ ことによって、強圧下圧延を可能とし板厚精度の向上も図っている。

3.2.3 板厚、形状制御技術

最大圧延速度 800 mpm の 5 フィート幅クラスターミルをステンレス圧延に適用し、これにともなっていち早く FF-AGC、BISRA-AGC などの制御を立ちあげて、板厚精度を従来よりも大幅に向上した。また、ロール本数が多大な 12 段ミル、20 段ミルの複雑な形状制御について、高精度の解析モデル²⁰⁾ および形状セットアップモデル²⁰⁾ を構築して、安定した高速圧延を可能にした。

これらの開発技術は、千葉製鉄所での汎用鋼板の一貫生産および西宮工場での高光沢鋼板の製造に大きく寄与している。また、ステンレス機能材のタンデム圧延における品質向上にも役立っている。

4 H 形鋼圧延技術

形鋼圧延分野では、外法一定 H 形鋼の圧延技術、圧延チャンス規制の低減技術および冷却歪み防止技術などを中心に開発を進めた。中でも、他社に先がけて開発した外法一定 H 形鋼はお客様のニーズと合致したことから、新しい製品分野として広く受け入れられている。

従来の H 形鋼はユニバーサル圧延機の水平ロール幅の制約のため、ウェブ内法が一定であった。このため、施工時には多くの当て板を用いて H 形鋼の接続を行っていた。Fig. 7 に示すように、仕上げユニバーサル圧延機の水平ロールを幅可変とし、仕上げユニバーサル圧延時にウェブ内幅を縮小することにより、ウェブ外法が一定の H 形鋼の製造が可能となった。仕上げユニバーサル圧延機におけるウェブ内幅の縮小圧延時には、ウェブの座屈や疵の発生を防止するために、粗ユニバーサル圧延後の断面形状の適正化、仕上げユニバーサル圧延におけるウェブおよびフランジの圧下率・圧下率バランスの適正化、および水冷条件の最適化を行い、実用化に至った^{21,22)}。本開発による外法一定 H 形鋼の断面形状を Photo 1 に示すが、フランジ厚に関わらずウェブ外法が一定であることが分かる。

また、最近では水島製鉄所大形工場の粗ユニバーサル圧延機の更新にともない、圧延機の剛性および機械精度の製品品質に及ぼす影響を検討し²³⁾、圧延機の仕様を反映した。さらに、圧延時の負荷、圧延機および材料の変形を予測するモデルを作成し²⁴⁾、自動セット

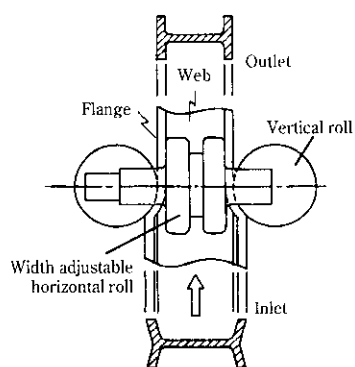


Fig. 7 Web inner height reducing rolling

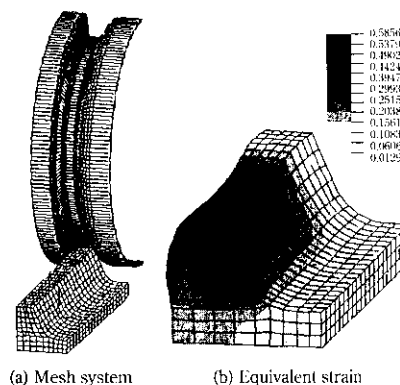


Fig. 8 Analysis of break down rolling of H-beam by dynamic explicit elasto-plastic FEM

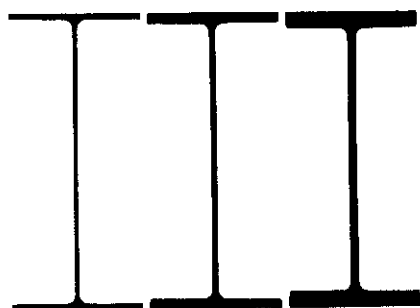


Photo 1 Cross section of fixed outer dimension H-beams (450 × 200 series)

アップ技術の開発に寄与した。

5 解析技術

最近の計算機的能力向上とともに、2次元・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。当研究部門においても、圧延や薄板矯正過程の変形や応力・歪みを詳細に解析するための有限要素コードを開発してきた。

3次元剛塑性有限要素法では、薄板圧延時の板曲がり（キャンバー）解析²⁵⁾、H形鋼のユニバーサル圧延時の応力・変形解析による形状不良防止²⁶⁾、熱間圧延鋼板のプレス・粗ミルの多パス圧延時のスラブ端部回り込み挙動解析によるエッジシーム疵防止技術²⁷⁾などに取り組んだ。弾塑性有限要素法では、H形鋼のブレークダウン圧延時の応力・変形解析（Fig. 8）、ロールの弾性変形との連成による薄

板のクラウン・形状解析²⁸⁾、ステンレス鋼板の光輝焼鈍炉内のカスーイング現象の発生メカニズムの解明と防止²⁹⁾、テンションレベラーやローラーレベラーによる薄板の矯正過程における曲げ曲率の定量化による矯正条件の適正化³⁰⁾や設備改造などに反映させている。

6 結 言

加工・制御研究部門における最近 10 年間の圧延技術の研究について概要を示した。高速化する連続プロセスにおいて、寸法・形状、表面性状、材質など均一で高品質に、かつ低コストで製造するための圧延技術を重点に研究を進め、成果を挙げてきた。特に、千葉製鉄所第3ホットストリップミルの建設は当研究部門にとってこれまで培ってきた技術の集大成であり、最重要の研究課題として、仕上エンドレス圧延を初め、板厚・板幅・クラウン・形状制御、温度・冷却（FDT・CT）制御、潤滑圧延による表面品質制御などに注力し、製鉄所と一体になり開発を遂行してきた。

21世紀に向けて連続化・自動化・省工程化が進む圧延プロセスのなかで、高速・強圧下の条件下で高機能な製品材質を均一かつ安定に造り込む技術に対する要求は一層強まっている。また、グローバル化する社会環境のなかで、お客様のニーズに合致する製品を造り込む技術の確立とともに、製品を使う立場に立った利用加工技術の提案が強く望まれている。我々の専門技術である塑性加工の原点（1）精度良く形を造る、（2）材質を均一に造り込む、（3）表面品質を造り込むに立ち返って圧延研究課題を設定するとともに、圧延製品を使う立場からの加工技術の研究にも取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- 1) 比良隆明、磯辺邦夫、阿部英夫、二階堂英幸、藤津 武、頭山 奨：川崎製鉄技報、**21**(1989)3, 188
- 2) 北浜正法、菅田聡一郎、鎌田征雄、成田健次郎：塑性と加工、**33**(1992)383, 1386
- 3) 関 春彦、蛭田敏樹、山下道雄、今江敏夫、富永賢二、小出正人：材料とプロセス、**9**(1996)5, 972
- 4) 中田直樹、橋本高男、前田一郎：第 48 回塑性加工連合講演会論文集、(1997)、293
- 5) 浅野一哉、山本和宏、川瀬隆志、野村信彰：第 36 回計測自動制御学会講演論文集、(1997)、223
- 6) 今江敏夫、野村信彰、三吉貞行：川崎製鉄技報、**28**(1996)4, 219
- 7) 玉井良清、竹林克浩、鎌田征雄、二階堂英幸：平成 10 年塑性加工春季講演会論文集、(1998)、139
- 8) 北村邦雄、鎌田征雄、菅沼七三雄、中西敏修、豊島 貢：川崎製鉄技報、**23**(1991)4, 265
- 9) 蛭田敏樹、赤木 功、水島成人：川崎製鉄技報、**28**(1996)2, 103
- 10) 館野純一、剣持一仁、鎌田征雄、金子智弘、山田恭裕：第 48 回塑性加工連合講演会論文集 (1997)、577
- 11) 水上 進、小野智隆、黒田 茂、侍留 誠、広畑和宏、北村邦雄：材料とプロセス、**2**(1989)、465
- 12) 禮場 勉、今井久雄、金子智弘、深谷敏弘、館野純一、剣持一仁：材料とプロセス、**10**(1997)、1105

- 13) 渡辺裕一郎、剣持一仁、狩野裕隆、神丸秋信、山田順也、山本準一：第 46 回塑性加工連合講演会論文集，(1995)，309
- 14) 狩野裕隆、渡辺裕一郎、剣持一仁、宮嶋 明、梅津 明、神丸秋信：第 46 回塑性加工連合講演会論文集，(1995)，307
- 15) 剣持一仁、鎌田征雄、阿部英夫、福原明彦、小松富夫、垣内博之、岸田 朗：鉄と鋼，**78**(1992)10, 1546
- 16) 剣持一仁、鎌田征雄、河澄英輔、小堀克浩、清野芳一：鉄と鋼，**81**(1995)8, 809
- 17) 剣持一仁、鎌田征雄、阿部英夫、小堀克浩、吉岡正浩、清野芳一：鉄と鋼，**83**(1997)8, 485
- 18) K. Kenmochi, I. Yarita, H. Abe, A. Fukuhara, T. Komatsu, and H. Kaito: *J. Materials Proc. Tech.*: **69**(1997), 106
- 19) 星 泰雄、渡辺裕一郎、剣持一仁、鎌田征雄、永井 肇、河澄英輔：平成 6 年度塑性加工春季講演会論文集，(1994)，9
- 20) 館野純一、星野将史、渡辺裕一郎、斎数正晴、剣持一仁、深谷敏広：第 46 回塑性加工連合講演会論文集，(1995)，321
- 21) 林 宏之、鎌田征雄、斎藤晋三、藤本洋二、河村有透、竹林克浩：川崎製鉄技報，**23**(1991)1, 16
- 22) 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)1, 23
- 23) 駒城倫哉、北浜正法、吉田 博、林 宏之、丸川邦彦：平成 9 年度塑性加工春季講演会論文集，(1997)，489
- 24) 駒城倫哉、北浜正法、吉田 博、今江敏夫、林 宏之：第 48 回塑性加工連合講演会論文集，(1997)，279
- 25) 井口貴朗、鎌田征雄：第 41 回塑性加工連合講演会論文集，(1990)，75
- 26) 井口貴朗、林 宏之、鎌田征雄：塑性と加工，**35**(1994)403, 959
- 27) 井口貴朗、北浜正法、鎌田征雄：第 49 回塑性加工連合講演会論文集，(1998)，21
- 28) 井口貴朗、D. R. J. Owen, G. Q. Liu：第 48 回塑性加工連合講演会論文集，(1997)，63
- 29) 渡辺裕一郎、神丸秋信、狩野裕隆：川崎製鉄技報，**28**(1996)2, 119
- 30) 狩野裕隆、剣持一仁、鎌田征雄：第 48 回塑性加工連合講演会論文集，(1997)，447