



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-11

我が国の圧延技術開発

Recent Development of Rolling Technologies in Japan

益居 健

住友金属工業(株) 社友

Takeshi Masui

1 はじめに

日本鉄鋼業は1953年に戦前の生産量を凌駕して以来、高度経済成長のもと、その生産量を飛躍的に増加させ、1970年代初頭には1億トンを超え、世界有数の鉄鋼国への変貌を遂げた。その後も1億トン強の生産量を堅持しつつ世界のトップ技術の維持・向上に努めている。

我が国の鉄鋼業の発展は戦後の欧米諸国からの技術導入をベースに、いち早く改善・改革に取り組み、独自技術の開発が行われた結果である。圧延プロセスに関しては、1960年から1970年代にかけての高速化技術、1970年から1980年代の連続化技術、並びに1980年代以降の高寸法精度・高品質化およびスケジュールフリー化技術とそれを実現する新形

式圧延機の開発であり、最近では環境課題に対応した圧延プロセスが注目されている(図1)¹⁾。

本報では主として1980年以降の主要な我が国の独自圧延技術に焦点を当て、その発展過程を概観する。

2 圧延理論および圧延ロール・工具の進展

2.1 圧延解析

日本の圧延技術が理論をベースに、世界を常にリードしてきたことは周知の通りである。板圧延における形状・クラウンを解析するには圧延機の弾性変形条件と被圧延材の塑性変形条件との連立解を求めることになる。曲げとせん断たわみ

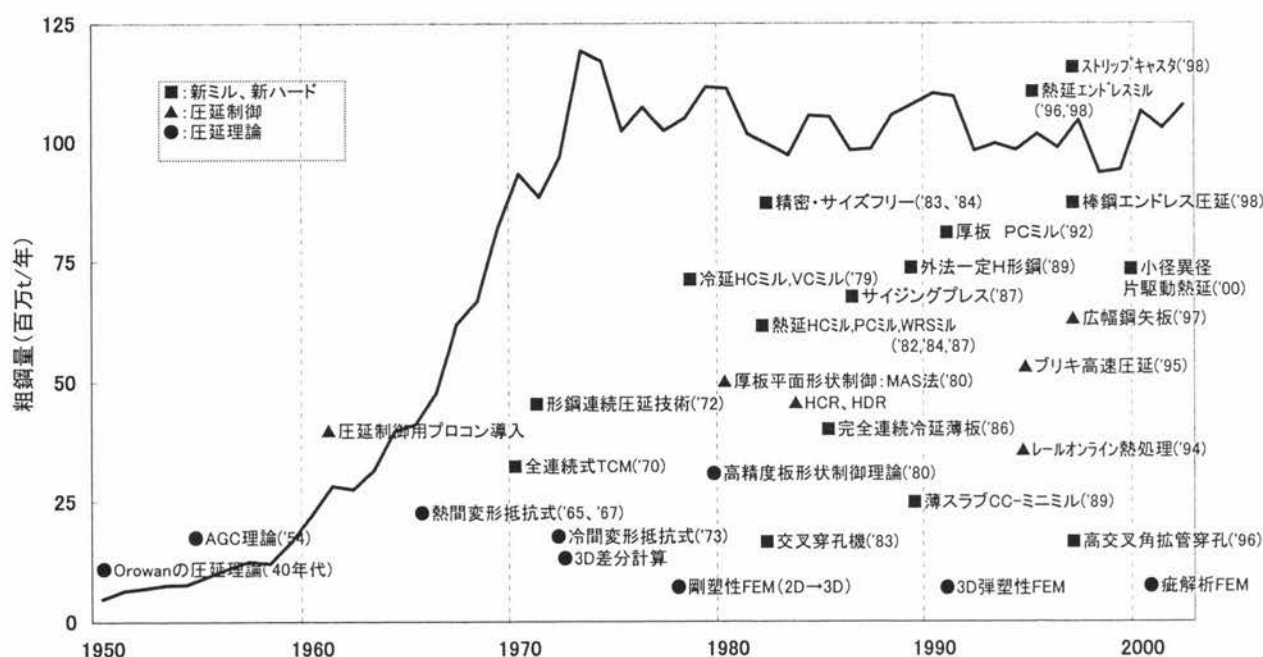


図1 圧延技術の進展

を考慮した材料力学的なモデルを拡張あるいは補正した方法で、各種ミル形式に対する解析法がほぼ確立された²⁾。一方、材料の塑性変形については、二次元理論^{3, 4)}から高精度化に向けて三次元解析法が導入されてきた。解析法としては従来からのスラブ法を発展させ、板厚方向で変形が均一であるとする以外は変形を支配する方程式を忠実に数値計算で解くいわゆる三次元解析法^{5, 6)}、仮想した速度場から上界定理を基礎として解を求めるエネルギー法⁷⁾、計算容量の増大につれ多用されるようになった剛塑性FEM^{8, 9)}、弾塑性FEM¹⁰⁾、さらには計算時間の短縮を狙ったこれらの組み合わせ解析法^{11, 12)}が進展した。図2¹³⁾はスラブ法三次元解析による計算例である。圧力分布は測圧ピンによる実測値と一致し、板厚分布も実験結果と良く一致することが報告されている。また、板幅中央部の広い範囲で平面ひずみ変形に近い変形をし、板幅端部のみが三次元的に流れていることが判る。なお、上下・左右非対称圧延や蛇行解析も進展した¹⁴⁾。

孔型圧延では純理論的取扱いが一般的にきわめて困難であり、便宜的な手段として孔型圧延を適当な矩形断面材の平圧延に置き換える、いわゆる矩形換算法が行われてきたが高精度は望めなかった。精度を高めるための実験式や半理論式も孔型や圧延条件の変更に伴う変形特性、負荷特性の簡便な見積もりには依然として有効な手段であるが、現在ではFEM解析¹⁵⁾が一般的に利用されている。FEMの登場により材料の三次元流れを解くことができるようになり、板材は勿論のこと、形材、棒線材、管材についても圧延圧力、圧延荷重、トルク、幅拡がりを求めることが可能である。図3^{16, 17)}は棒線圧延、形鋼圧延のFEM解析例である。(a)はスクエアオーバル圧延で先端がロールギャップ内にかみ込まれるときの三次元変形形状(素材の1/4断面)を、(b)はビレットから6パスでアングルとなす最終パス三次元変形形状を示す(図中陰付部は上ロールとの接触領域)。解析結果は実験結果とも良く一致しており、三次元FEM解析が有効な解析ツールとして認知されている。

今後、圧延温度解析や圧延加工時の材料組織変化、更には

疵解析システムをも含めた統合圧延理論へと進展が期待される。

2.2 変形抵抗

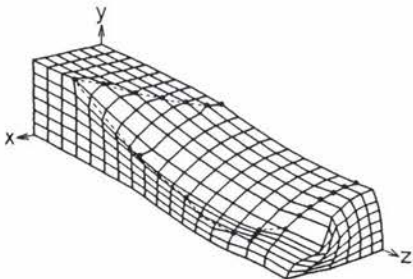
変形抵抗値は圧延理論を実際問題に組み込んだ荷重やトルクを計算する際の重要な物性値である。鉄鋼協会圧延理論部会を共同研究の場として、我が国の研究が際立って充実しており、データの集積と数式モデル化が進められた¹⁸⁾。

熱間変形抵抗では多パス高速連続加工での累積ひずみ効果を考慮した変形抵抗式により予測精度が顕著に向上した。材料組織変化を考慮した圧延理論を展開するため、硬化、回復、再結晶等の現象を同時にフォローできる理論体系と合金成分に対応した冶金現象の定量化データの蓄積が望まれる。

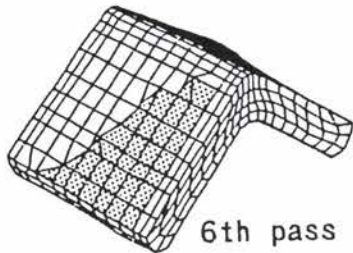
冷間変形抵抗では温度とひずみ速度依存性を考慮した動的変形抵抗式が常用されている。最近では $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^3$ レベルで容易に応力-ひずみ線図がとれる高速材料試験機が開発され戦力化されている。

2.3 圧延潤滑とロール・工具

冷間圧延速度の高速化(Max2800 mpm)に伴う摩擦係数の定量的値を得るための高速圧延シミュレータや2円筒すべり試験機が開発され、流入油膜厚み算定の厳密化、焼付きの評価、表面光沢推定・制御システムが提案され¹⁹⁾、併せて潤滑油の改善が進展した。ワークロール材質としては一般に



(a) 棒線圧延先端部



(b) 形材圧延

図3 FEM解析例

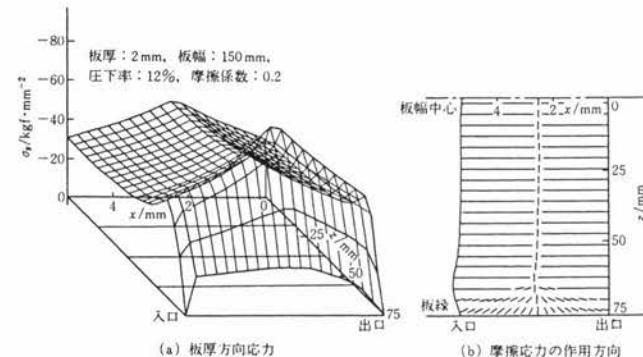


図2 三次元解析板厚方向応力分布と摩擦力の方向

は高炭素Cr系鍛造材の表面焼入れで完全なマルテンサイト基地に微細な炭化物を多数析出させて高硬度組織となすが、圧延サイドからの要求は高まる一方である。そこでCrめっきやWC-Co溶射による耐摩耗性の向上、ハイスやセラミックの新材質研究が進んでいる。ロール表面の粗度加工もショットブラストから放電加工、電子ビーム、レーザビームなどによる均一加工と適正パターン付与に変わりつつある。

熱間圧延においては材料のかみ込み性を確保した上での耐摩耗性の向上や焼付き防止が主要課題である。現状ではハイスロールが多用されているが、更なる高圧下圧延に向けた高荷重ロールや工具の開発が望まれる。

ロールや工具の耐摩耗性、耐事故性、耐肌荒れ性の向上は圧延技術の飛躍に欠かせない重要要素技術であるが、今後は環境負荷軽減潤滑の視点が重要となる^{20, 21)}。

3 鋼板

3.1 連続化・直結化

1968年にセンジミアミルの全連続式タンデムコールドミル (TCM) が、1970年に4段ミルの全連続式TCMが日本で初めて開発されて以来、連続化は進展し、現在国内の主要圧延機は完全連続化されている²²⁾。完全連続ミルの技術は圧延機の上下工程との連結を可能とし、1986年には酸洗-TCM-連続焼鈍の一貫設備が誕生している。完全連続化にはミルの総合特性に基づく走間スケジュールフリー化、安定溶接技術、ストリップ安定走行技術、進行方向変換装置等の開発があった。冷延での連続化に次いで1996年には世界初の熱延の連続化技術が開発された²³⁾。これは粗圧延終了後の前後の圧延材を仕上圧延機の手前で接合し (誘導加熱、レーザ、重ねせん断)、仕上げ圧延機をエンドレス状態で圧延する技術であり、先後端部での品質操業上の問題を解決する

とともに極薄鋼板や新材質鋼板の製造技術の可能性を秘めている。

1989年に50～100 mm厚の薄スラブCCと圧延機列が直結されたミニミルが誕生して以来、その建設が年々増加し、最近では50基以上のミニミルが海外で稼働している²⁴⁾。ミニミルの特徴は設備投資の抑制と短納期化であるが、スキッドマークのない等温圧延や長尺スラブによるセミエンドレス圧延も可能となり、今後益々その適用と高品質化が進むものと予測される。なお、将来的にはストリップキャストの動向が注目される。

3.2 新形式ミル

圧延機のロールギャップコントロールに関しては、ロールベンダーが主流であったが、1970年代後半の6段シフトミル (HCミル、UCミル) の出現を契機に、ペアクロスミル (PCミル)、ダブルショックベンダー (DC-WRB)、小径WRにサイドサポートを装備した6段FFCミル、Z-Hiミル、クラスター型CRミル、KTミル、ロール本体に制御機能を持たせた可変クラウン型VCロール、TPロール、NIPCOロール、更には研削によるオンラインロールグラインダ (ORG) などほとんど日本で開発された新型圧延機が世界の圧延業界に貢献していることは周知の事実である (図4)²⁵⁾。なお、1スタンド多パス圧下の思想を取り入れた種々の圧延機の研究開発もなされたが、その適用は特殊材対応に限られている。

3.3 クラウン・形状制御

板圧延のクラウン制御、形状制御は同一現象を対象とする技術であるが、前者は数 μm ～数10 μm 程度の精度で十分であるのに対し、後者は0.1 μm あるいはそれ以下の精度で制御する必要があるので、別の技術として認識されている。クラウンは比較的板厚が大きい熱間圧延で制御し、冷間圧延

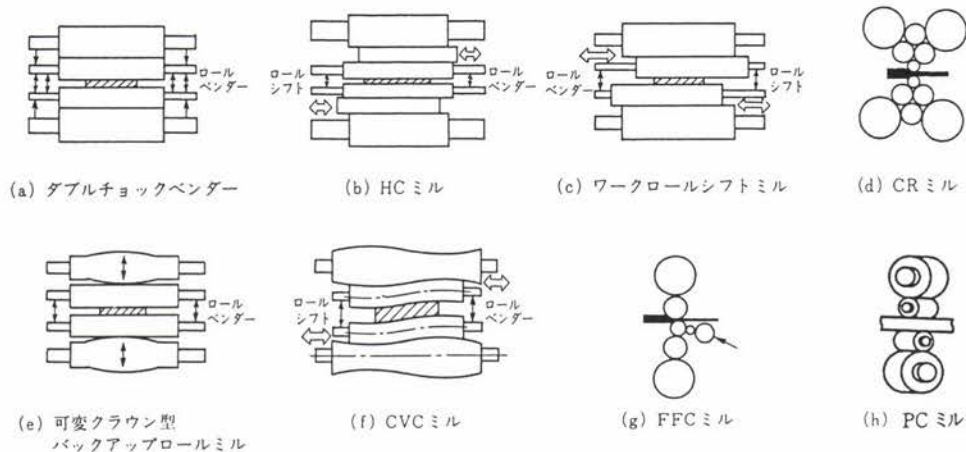


図4 高機能新形式圧延機

ではクラウン比率を一定に保持しつつ、形状に配慮して圧延薄肉化してゆくのが常道であるが、板端部は3次元変形が起りやすいのでエッジクラウンを制御する技術開発が行われた。エッジャーで板端部を盛り上げて続く圧延でのエッジドロップを低減させる方法、圧延機上下ロール間で円盤状水平ロールを板の両縁に押し付け、幅を拘束しながら圧延する方法、テーパ付きワークロールシフトミル、ベアクロスミルによる方法である²⁵⁾。この様に3次元変形の積極活用によるクラウン制御が今後も追求されることになる。

形状制御で要求される板厚（ロール間隙プロファイル）制御の精度がきわめて厳しいのは、わずかの板厚差が大きな形状不良となるためである。急峻度0.5%以下を形状良好とすれば伸率差では 6.2×10^{-5} (6.2Iunit) となり、1mmの板厚の圧下量差としては $0.06 \mu\text{m}$ となる。このように厳しい精度の圧延が実現できているのは、ロールの局部フラットニングと材料のラテラルフローによる緩和および張力の安定化作用にあるわけだが、圧延中のロール間隙プロファイルを板のクラウンに一致させることが形状制御の基本である。形状不良外乱となる両者のずれにはロールのたわみ、ヒートクラウン、母材プロファイル、機械試験値のばらつき、ロール摩耗等が影響する。優れた形状制御には低次関数から高次関数までの広い範囲にわたる形状外乱を修正する必要があるため、新形式ミルの形状制御アクチュエーターを組み合わせ、これを多変数制御理論などの複雑かつ精密な制御で対応する傾向が強まっている²⁶⁾。

3.4 板厚制御

鋼板製品の板厚精度に対する需要家要求は、自動化の進んだ加工プロセス工程でのトラブル排除のため一層厳しいものとなっている。バックアップロールの油膜軸受からローラベアリング軸受への切替えや高性能油圧圧下装置によるロール偏心除去制御が進展した。圧延機用ドライブシステムとしてはすべてデジタル化したACドライブが標準となった。ACドライブは構造的に完全ブラシレス化と単機容量増大、性能的には高精度、高応答化と可変速範囲拡大という長所を有する²⁷⁾。

従来の板厚制御にはゲージメーターAGC (Automatic Gauge Control)、モニターAGC、FFAGCや、ヴァーニアAGCがある。最新のタンデムミルではこれらに加え、ミル速度系のデジタル化、ロール偏心制御、マスフロー板厚を使用したAGC、スタンド間非干渉制御、走間板厚変更制御などが開発実用化されている。特に連続ミルでは圧延機入側で順次溶接された鋼種、板厚、板幅の異なる材料に対して圧延機を停止することなく圧延を継続するために、各スタンドのロール位置、速度その他の操作端を過渡的な張力変動を抑

止して協調的に変更する走間板厚変更技術は重要となる。これにより通板・戻抜きによるロールきず発生とオフゲージの大幅減少や小ロット注文品に対する対応力強化が図れる²⁸⁾。また、ミニミルのエンドレス圧延には不可欠の技術である。

3.5 平面形状、板幅制御

厚板や熱延鋼板製造プロセスにおける板幅造り込み技術は、1980年代にその基盤技術が確立された。厚板では歩留を飛躍的に向上させた新平面形状制御技術MAS (Mizushima Automatic Plan View Pattern Control System) 圧延法や水平ミルに近接したアタッチドエッジャ設備がある。MAS圧延は圧延終了後の平面形状制御変化量を個々の鋼板について予測し、その量に応じて圧延中のスラブ厚さプロファイルに変化を与え、最終的に平面形状を矩形化する方法である(図5)²⁹⁾。熱延では連続鑄造機(CC)と圧延機の効率的なプロセス直結化を実現したスラブ幅サイジング技術、熱延鋼板の幅精度を大幅に向上させた熱延粗バー板幅制御技術、仕上圧延でのスタンド間エッジャや張力制御による高寸法精度化、更には冷延TCMやプロセスラインでの板幅制御技術はいずれも世界に先駆けて独自開発された技術である³⁰⁾。

4 鋼管

ここ20年の進歩では、まず継目無鋼管用素材の連続鑄造化があげられる。丸鋼片の品質の改善、製管技術の進歩により熱間押出法で製造されていた13%Cr鋼やオーステナイト系ステンレス鋼が圧延方式に置き換わってきた。最近ではラウンドCCと製管、熱処理の直結化技術が開発された。

4.1 穿孔圧延

角鋼片を用いるPPM (プレスロール穿孔機) が丸鋼片を用いる傾斜ロールピアサに置き換えられてきた。穿孔法の変化として注目されるのはコーン形ピアサあるいは交叉穿孔機と

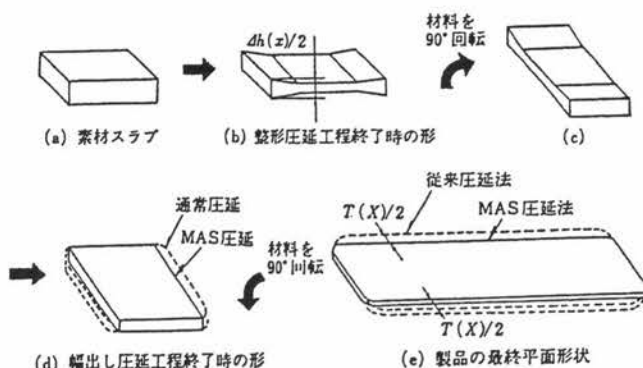


図5 平面形状矩形化MAS圧延法

呼ばれるクロスロールピアサの発展である。コーン形ピアサの利点は回転鍛造効果と円周方向せん断ひずみが抑制されるために内面疵の抑制に効果があり、難加工性の材料の穿孔に向いていること、さらに拡張、薄肉穿孔が可能なことである。従来のピアサでは肉厚/外径比 (T/D) がおよそ6%が限界であったが、3.2%程度の薄肉管の穿孔が可能となった(図6、図7)^{31, 32)}。

4.2 延伸圧延

マンドレルミルでは大型化と(最大16-3/4"ミル)とコンパクト化が進展した。また、これまでのフルフロートマンドレルミルに変わって圧延中バー速度を一定に保つバーのリテインド技術が定着した。上述の拡張、薄肉穿孔が可能となったことによりマンドレルミルのコンパクト化、即ちスタンド数が7~9スタンドから4~5スタンドにコンパクト化され、ピアサ、マンドレル圧延に要する合計エネルギー消費量は20%程度低減できた。

マンドレルミルの制御技術では、その後のストレッチレデ

ューサにおける管端厚肉によるクロップロスを減少するためにマンドレルミルで管端を予め薄く予成形する技術開発がなされ、鋼管ミルとして初めて油圧圧下装置が導入された³³⁾。

4.3 絞り・定径圧延

最終的に外径を整える、絞り、定径圧延では特筆すべき進歩はないが、大径管サイズのサイザにも3ロールが用いられることが多くなった。3ロールでの問題点はロールギャップが変更できないため、ハウジング保有台数が多くなることであったが、最近ではロールギャップ可変のミルも出現してきたし、4ロールレデューサーの提案もなされている。今後マンドレルミルとサイザー、ストレッチレデューサーの直結化技術も注目される³⁴⁾。

以上鋼管分野では高合金穿孔用のプラグ開発、マンドレルバーやディスクガイドの潤滑剤開発等、トライボロジー技術に依存していることが大きいので、高寿命化技術の更なる進展が望まれる。

5 形鋼

第一次石油ショックを契機に形鋼においても転炉一造塊一分塊を経た素材プロセスは転炉-CCというプロセスとなり、粗造形プロセスは一変した。ビームブランクから多シリーズ形鋼を製造する技術やスラブからH形鋼を圧延する技術であり、形鋼ミルの素材はCC鋳片への転換を遂げた。特にここ10年の進展は、軌条、鋼矢板、H形鋼等の大形形鋼分野で著しい。

5.1 外法一定H形鋼

建築構造物の高度化に伴い、断面性能が高くかつ経済性に優れた外法一定H形鋼がスキューロール圧延法³⁵⁾、ウェブ高さ縮小圧延法³⁶⁾により実用化された(図8)。前者は仕上圧延前でウェブ外法が一定となるようにウェブ内法を拡張し、後者は仕上げ圧延機内でウェブ高さが一定となるようにウェブ高さを縮小する。これに伴い、水平ロールの幅をオンラインで変更出来る胴幅可変水平ロール(図9)や、エッジミルの孔型深さを可変とする偏心エッジャーミルも実用化されている^{37, 38)}。また、ユニバーサルミルへの油圧圧下の導入で圧延機は非常にコンパクトになった。大断面化に伴い従来の片持矯正機では能力不足となり、両持矯正機が開発されたが、広いスペースとロール交換作業の複雑化が避けられず、更なる改善が望まれる。

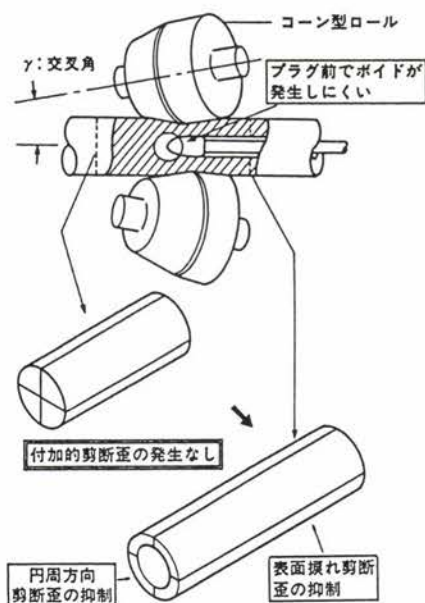


図6 交叉穿孔機

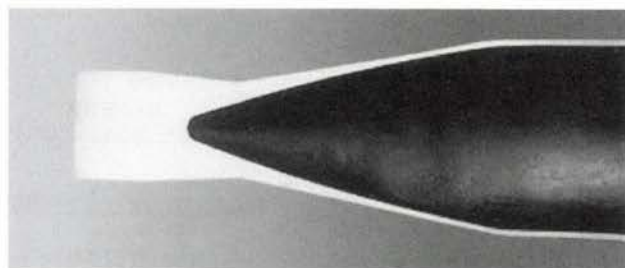


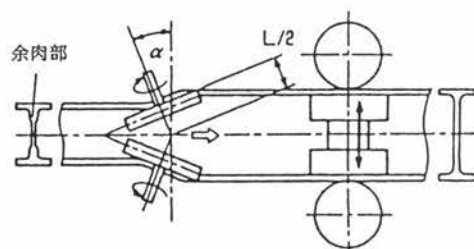
図7 モデルミル拡張穿孔ストップ材の一例

5.2 広幅鋼矢板

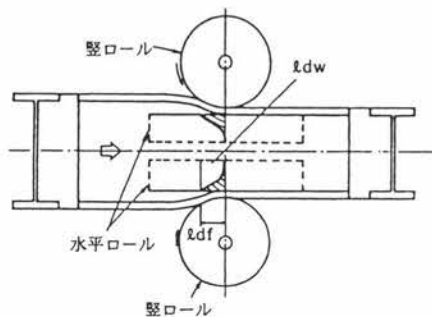
従来は400 mm幅のU形鋼矢板が主流であり、通常CCブルームから3～4台の2重式圧延機で8～10個の孔型を用いて往復圧延で製造されていたが、H形鋼のミルラインでH形鋼用のスタンドを交換せずにロールだけ交換し、鋼矢板を製造する方法も開発された。ユニバーサル粗ミル、仕上ミル、水平ロールに孔型を刻設し、複数パスで造形圧延する技術である。また、工事の大型化や施工能率向上の要望から600 mm U形鋼矢板、900 mm幅ハット型鋼矢板が商品化された³⁹⁾。

5.3 軌条

通常複数台の2重式圧延機で孔型圧延をする方法で製造されていたが、製品寸法、品質要求の高度化やロールコスト低減目的から、中間圧延や仕上げ圧延をユニバーサルミルで行う技術が主流となりつつある。レールの摩耗で特に問題とな



スキューロール圧延 傾可変仕上げ形
(a) スキューミルによるウェブ高さ拡大



(b) ウェブ高さ縮小圧延

図8 外法一定H形鋼製造方法

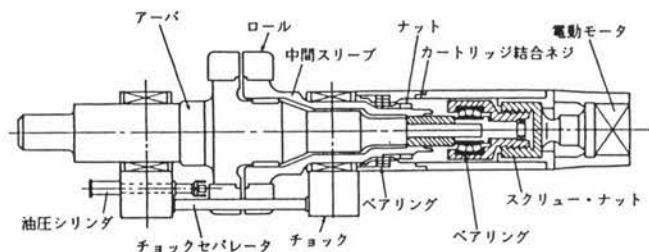


図9 幅可変水平ロール

るのは、線路曲線部での車輪フランジ部との摩擦摩耗であり、1994年には摩耗対策として頭部全断面インライン熱処理レールに全面的に置き換わった⁴⁰⁾。

なお、阪神大震災を契機に厚板分野で発展したTMCP法やオキサイドメタラジ技術の建築用鋼材への適用が進み、TMCP極厚H形鋼、低降伏比外法一定H形鋼や耐火H形鋼が商品化された。

6 棒鋼・線材

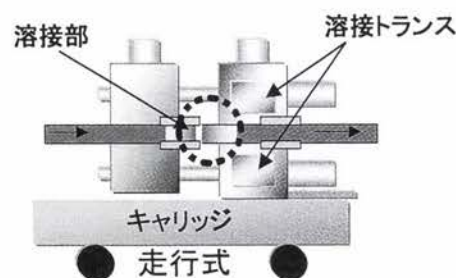
棒鋼・線材圧延では高生産性の追求と、市場ニーズに対応する高寸法精度と高品質化、フリーサイズ圧延、制御圧延・制御冷却による新機能の創製が進展した。

6.1 エンドレス圧延

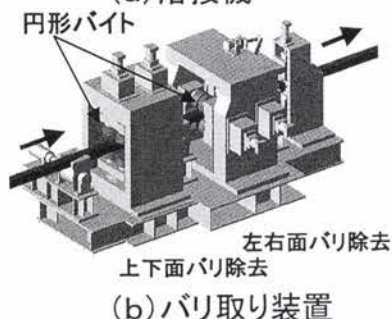
棒線製品は材料および製品の種類が極めて多く、圧延の非定常部が多い。小投資で短尺、乱尺を無くし、大単重コイル化実現、ミスロール解消による増産等を狙った熱間角ビレット溶接による連続圧延設備（直流式フラッシュ溶接機とバリ取り装置）が開発実用化された（図10）⁴¹⁾。今後適用ケースが増えてゆこう。

6.2 高速圧延と制御冷却

線材の仕上げ圧延は高ひずみ速度と短いパス間時間が特徴であり、設備のコンパクト化のためには圧延後の急冷が必要



(a) 溶接機



(b) バリ取り装置

図10 棒鋼線材ミルのエンドレス化

となり、材質制御の手段にも利用される。

1980年前後には最大60～75 m/sec程度であったものが、1990年頃には100 m/secへと向上し、現在では100～120 m/secに加速され、線材の高生産性が達成された。これには潤滑の改善とミル剛性の向上が大きく寄与している。

線材の圧延温度の最適化と圧延後の冷却を緩冷却化することにより、冷間鍛造用鋼の軟化焼鈍省略がはかられた。また、自動車向けを中心に機械構造用鋼はコストダウン、リードタイム短縮の観点から非調質化が大きく進展した。更に、地球環境の観点から鉛フリー快削鋼が実用化された⁴²⁾。

6.3 高寸法精度化とフリーサイズ圧延

精密、フリーサイズ圧延を実現するには既存ミルに制御システム(ソフトウェア)を付加し、ロール回転数制御による張力制御や仕上寸法セットアップ、無張力セットアップ技術等を行う方法⁴³⁾とサイジングミル等のハードウェアによる方法がある。後者の2ロール方式ではミル剛性を飛躍的に高め、±0.1 mmの精密圧延を可能とするとともに、ロール圧下調整により約1 mmの範囲内でのサイズフリー圧延が可能となった⁴⁴⁾。更には幅拡がりが少ない特性を持つ3ロール、4ロール方式サイジングミルも開発され、棒線圧延のニーズや環境に合わせて選択されている⁴⁵⁻⁴⁷⁾。

7 おわりに

我が国の主要な独自圧延技術について概説した。新形式ミルの開発を中心に圧延解析、トライボロジ、新計測・制御技術を駆使して高生産性と寸法、形状、機械特性の全長、全幅に亘る均一性を追求してきた。定常部についてはかなり高精度を確保出来るようになったが、トップ、ボトムや加減速などの非定常部については精度的に不満が残る。一つの解決策が連続化であり、今後適用が拡大されると予測できる。無人化を目指したコンパクトな設備を開発し、均一化の極限追求を図り、ファインスチール化で時代要請に応えらるとともに、異形断面材や傾斜機能といった不均一性の自在付与という要求も併せて考えておく必要がある。

人類が21世紀も持続的な発展を遂げるために、地球環境負荷の少ない資源循環型社会の構築が迫られており、科学技術の更なる発展で克服する以外に道は無さそうである。

鉄は、社会基盤材料としてその重要性は揺らぐことはない。圧延技術は形づくりから強度・靱性・耐食性等材料機能を飛躍的に向上させたりサイクル容易製品を最小限のエネルギーで創製する加工技術へと発展してゆくに違いない。技術発展の最後の決め手は材料である。

最後に、日本鉄鋼業の今日の隆盛、世界屈指の技術レベル

とその蓄積は金属学、塑性学、機械工学等を統合した圧延理論に基づくコンピューター制御が大きく寄与しており、圧延理論部会での共同研究や技術討議の成果が生産現場で生かされた結果である。今後益々の発展を期待したい。

参考文献

- 1) 菊間敏夫：塑性と加工，43 (2002-9) 500，9.
- 2) Shohet, K.N. and Townsend, N.A.：J.Iron and Steel Inst., 206 (1968)，1088.
- 3) 栗津原博，安田健一，志田茂，梶原利幸：昭52春塑加講論，(1977)，25.
- 4) 中島浩衛，菊間敏夫，松本絃美，栗津原博，木村智明，志田茂，梶原利幸：塑性と加工，23 (1982) 263，1172.
- 5) 都築信男，鈴木弘：昭46春塑加講論，(1971)，21.
- 6) 戸澤康壽，中村雅勇，石川孝司：塑性と加工，17 (1976) 180，37.
- 7) 加藤和典，室田忠雄，熊谷敏彦：塑性と加工，21 (1980) 231，359.
- 8) Li, G.J. and Kobayashi, S.：Numerical Methods in Industrial Forming Processes，(1982)，Pineridge Press，777.
- 9) Mori, K. and Osakada, K.：ibid., 747.
- 10) 鏑田征雄，佐藤祐作：CAMP-ISIJ，1 (1988) 2，462.
- 11) 木内学，柳本潤：昭62春塑加講論，(1987)，135.
- 12) 辛平，木原諄二，相澤龍彦：38回塑加連講論，(1987)，9.
- 13) 石川孝司，戸澤康壽：CAMP-ISIJ，1 (1988) 2，446.
- 14) 木内学，黄永茂，新谷賢：塑性と加工，30 (1989) 344，1316.
- 15) 柳本潤：217塑性加工シンポ，(2002)，1.
- 16) 柳本潤，木内学，紫田一良：塑性と加工，36 (1995-7) 414，713.
- 17) 森謙一郎，小坂田宏造：機械学会論文集 (A編)，57 (1991-6) 538，79.
- 18) 鉄鋼便覧第4版第3 (1) 巻，圧延基礎
- 19) 小豆島明：鉄と鋼，74 (1988) 4，129.
- 20) 佐野義一：塑性と加工，44 (2003-2) 505，48.
- 21) 清水茂樹，神保安広：塑性と加工，44 (2003-2) 505，54.
- 22) 藤野伸弘，杉山徳治，清水五雄：日立評論，72 (1990) 5，1.
- 23) 後藤太，野村信彰，武智敏貞，高野武：材料とプロセス，10 (1997) 5，1088.
- 24) Fleming, G and Hensgen, K.E.：MPT International，1 (2000)，54.

- 25) 益居健：塑性と加工，32 (1991-4) 363，419.
- 26) Matsumoto, Y., Kondo, K., Ooi, T., Komine, K., Takemoto, Y., Iyama, S. and Masui, T. : Proc. 5th Int. Steel Rolling Conf., (1990), 242.
- 27) 安部可治，舟橋拓夫，江連久，加藤寿彦，関口邦男：塑性と加工，28 (1987) 318，666.
- 28) 谷清博，鈴木栄一，菊地弘介，鷺田武宣，岡下博，北村章：神鋼技報，38 (1988) 3，70.
- 29) 柳沢忠昭，三芳純，坪田一哉，菊川裕幸，池谷尚弘，磯山茂，旭一郎，馬場和史：川崎製鉄技報，11 (1979) 2，168.
- 30) 佐々木保：参考文献15)，57.
- 31) C.Hayashi, M.Utakoji and K.Yoshioka : The 3rd Int. Conf. on Steel Rolling, (1989), 174.
- 32) 山川富夫，下田一宗，林千博：住友金属，46 (1994) 1，106.
- 33) C.Hayashi, M.Utakoji, T.Yamada, M.Watanabe and R.Nakanishi : Trans. ISIJ, 28 (1988), 440.
- 34) 山田建夫：圧理100回記念シンポ，(1996)，127.
- 35) 生田和重，青柳幸四郎，稲垣彰，藤田和夫，川田勇，戸次健二：CAMP-ISIJ, 4 (1991)，1462.
- 36) 林宏之，鏈田征雄，土井彌彦，朝生一夫，斎藤晋三：CAMP-ISIJ, 4 (1991)，1454.
- 37) 三浦啓徳，笹田幹雄，瀬戸恒雄，中西輝行，林宏之，藤本洋二：CAMP-ISIJ, 2 (1989)，498.
- 38) 西野胤治，村木正典，佐々木靖人，阪田貞一，長谷川博行：CAMP-ISIJ, 4 (1991)，511.
- 39) 鋼矢板技術研究委員会，鋼矢板標準製品仕様書改訂第2版，(2000)
- 40) 古川遵：157，158回西山記念講座，日本鉄鋼協会編，(1995)，119.
- 41) 大川進：産業機械，10 (2003)，37.
- 42) 田中哲三：174回塑性加工シンポ，(1999)，9.
- 43) 野口幸雄，馬場勘次，石井仁，馬場誠，大貝晴俊，岡敏博：41回塑加連講論，(1990)，335.
- 44) 佐々木健，長瀬忠広，山口桂一郎，稲守宏夫，小林秀雄：参考文献34)，31.
- 45) 武田了，山中栄輔，金堂秀範，井野清治，国田憲男，丹下武志：CAMP-ISIJ, 6 (1993)，1455.
- 46) Ammerling, W.J. : CAMP-ISIJ, 8 (1995)，418.
- 47) Shore, S.M., Roy, C., & Shore, T.M. : CAMP-ISIJ, 11 (1998)

(2005年4月5日受付)