



圧延理論と寸法制御

中島 浩衛*

Rolling Theory and Its Application for Size and Precision Control

Koe NAKAJIMA

Key words: advance and prospect; rolling theory; size and precision control; strip; plate; bar and rod; shape; pipe; finite element method; flow stress.

1. 緒言

鉄鋼圧延製品の寸法精度向上の必要性は、市場および製造者側の両者のニーズから発生している。近年、需要家の品質要求は多様化、厳格化の一途をたどってきており、圧延プロセスは寸法精度、機械的性質（強度、加工性など）および表面性能など品質を構成する全てに深く関わっている。なかでも寸法精度は最も直接的な影響をうけることから寸法制御技術は、圧延プロセスの設計およびその操業に際して最も主要な基幹技術であるということが出来る。

いっぽう寸法精度の維持・向上のための寸法制御は、上述の需要家の使用性能（品質の造り込み）の面からのみではなく、コスト、納期、労働環境という面からのニーズであるプロセスのFMS化を支える重要な技術課題でもある。このような観点から、寸法制御技術はプロセスの連続化、自動化あるいは最近ではスキルフリー、サイズフリー、スケジュールフリーまたはチャンスフリーなどの新技術の根幹ともなっている。

圧延現象は鉄鋼材料に寸法形状と同時に材質、機能を付与することのできる極めて有効な手段であり、その現象を解明するのが広義の圧延理論である。圧延理論はそのような圧延現象を解析的、実験的解明によって体系化したものであり、その基本は寸法および形状精度を確保・向上するための圧延技術から出発して、連続化、自動化などの圧延プロセスの変革をもたらした。さらに近年では、表面特性に関しても例えば肌荒れや光沢など、さらに圧延工具の長寿命化といった加工に伴うトライボロジー現象の解明へと対象が広がってきている。ここでは板厚、板幅、形状などといった狭義の寸法制御に限定して考えることにする。寸法を制御するためには圧延理論と制御理論の複合が不可欠であり、特に圧延理論は制御理論に対して制御対象の正し

い状態（数式）モデルを提供することになる。より高精度な制御技術を開発していくためには、より高精度に圧延の実態を表現できる理論の高度化と同時に、圧延現象を正確に把握できる計測技術とそれらを実現できるハード（制御端）技術の開発が極めて重要である。

以上述べたように、圧延理論と寸法制御の間には密接な関連性があり、圧延現象の解明および実用化を目指して37年の長い共同研究の歴史を担ってきたのが圧延理論部会である。その歴史的発展を振り返ると、この部会を発足させて、発展させてきた先輩達の先見性と指導性に深く敬意を表するものである。

2. 圧延理論と寸法制御技術の歴史的発展

2・1 1960年代までの圧延技術

圧延理論の始まりは1925年Karman¹⁾, Siebel²⁾らの研究にさかのぼるが、板圧延の寸法制御に関してはBISRAによるロードセルAGC³⁾, Hessenberg, Jenkinsによるタンデム圧延理論⁴⁾が1954~1955年に提案されている。これ以前に2次元圧延理論の原型はほぼ固まっている。これらの提案時期と同じ1955年には、日本鉄鋼協会の第1回圧延理論分科会（当時は分科会としてスタートし1972年に部会となる）が開かれ、圧延理論に関する共同研究が開始された。圧延理論部会の発足（1955年）以後の鉄鋼生産量推移の中に圧延理論部会のイベントおよび圧延理論と関係する圧延の革新技術を時代の変化と関連させて図1に示した。

1960年代末から日本における本格的な圧延機の計算機制御が始まった。圧延理論の応用における基本的課題は変形抵抗の数式化でありこれに関する共同研究が、鉄鋼メーカーおよび大学間で盛んに行われ、それらの成果が「圧延理論と変形抵抗」⁵⁾として1960年に出版されている。1960年代

平成4年10月19日受付 平成4年12月8日受理 (Received on Oct. 19, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼展望)

* (社)日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会長 (Chairman, Rolling Theory Committee, The Joint Research Society, The Iron and Steel Institute of Japan, 1-9-4 Ohtemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100)

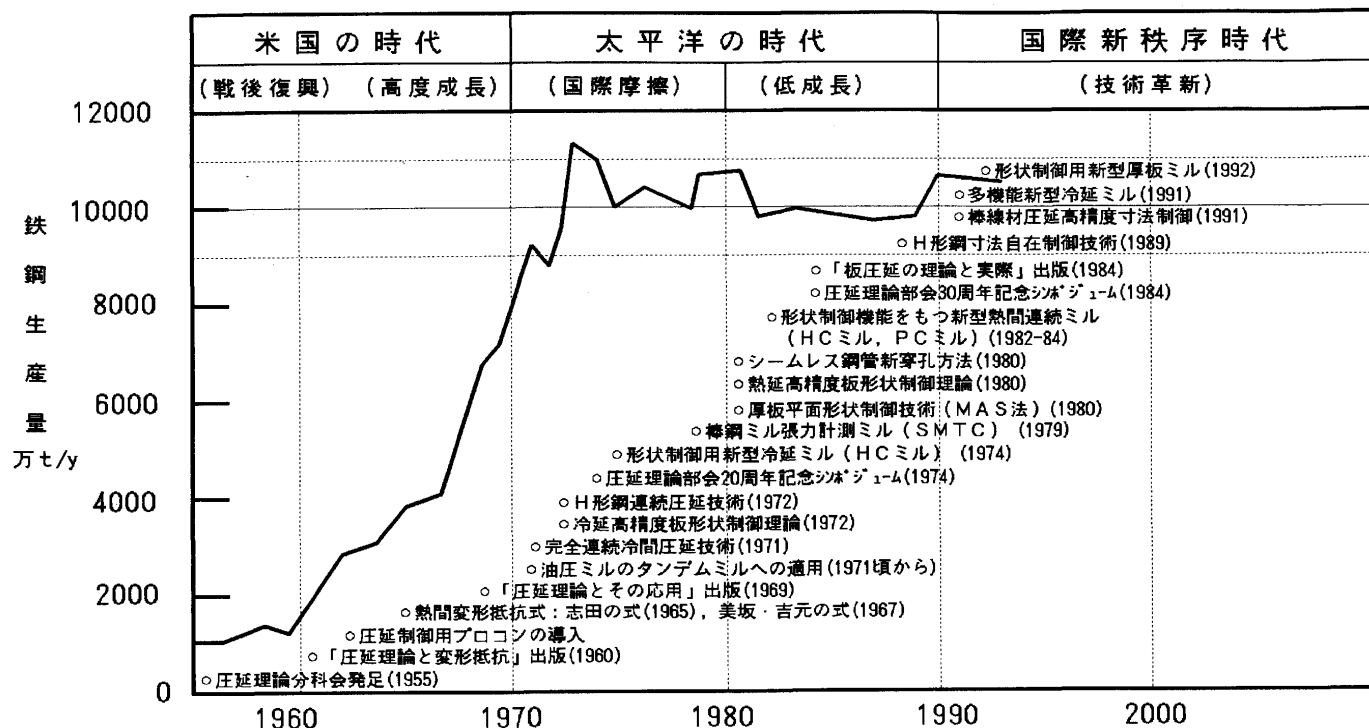


図1 日本の鉄鋼生産量推移と圧延理論部会の主要イベントおよび圧延技術革新

の後半に圧延理論の本格的応用時代を迎えて、1969年には「圧延理論とその応用」⁶⁾が圧延理論部会から改訂されて出版されている。これには古典圧延理論に加えて実用的な変形抵抗式、摩擦特性、ミル剛性、板厚の自動制御および計算機制御などについてまとめられている。

2・2 1970年代の圧延技術

1970年代の始めから半ばにかけて、1960年代の高度成長時代も終わりを迎え、二度にわたるオイルショックを経験し、省エネルギーを含めて本格的な圧延プロセス技術の革新への要求が強まった。この時代に寸法制御圧延技術の方向を示唆する画期的な自主技術開発の発展があった。これらの技術は何れも高寸法精度化ニーズのみならず、サイズフリー／スケジュールフリー化、連続化ニーズに応えるべく開発されたものでもある。

またちょうどこの時期の終わり(1974年)にこれまでの圧延理論・技術・設備に関して総括する圧延理論部会20周年記念シンポジウムが開催されている⁷⁾。したがってこの時期の詳細はそちらを参照していただくこととし、特徴的なことを以下に列挙する。

(1)1971年冷間タンデムミルにおける完全連続圧延技術(走間板厚変更)の実現⁸⁾

この技術はミル入側での材料溶接による連続圧延で、キーテクノロジーである走間板厚変更技術は、多スタンドの相互影響をも考慮できる連続圧延問題を解く圧延理論の発展にもとづき導出されたものである。その後このような新圧延技術は、前後工程との連結へと急速な発展をみ、現代の代表的な中核圧延技術となっている。

(2)1971年頃からの油圧圧下ミルのタンデムミルへの適用

これは、高精度な板厚を実現するための強力な制御手段であり、この開発によって高速圧延状態のもとでの板厚精度を著しく向上させた。一方、連続圧延機(熱間、冷間)への適用に際して、圧下制御と張力(速度)制御の応答性のアンバランスによる相互干渉の回避という新たな課題を提起した。これは前記(1)に触発された連続化指向のなかで圧延理論モデルと制御モデルを組み合わせた連続圧延の総合デジタルシミュレーション技術の開発へと発展し、全体制御系の最適化によって、その能力を最大限に発揮することになった。最近では、ロール変形(ミル剛性)解析精度の向上、入側板厚計、板速計などの導入により絶対値AGC、あるいはフィードバック制御では本質的な応答遅れから困難であったロール偏芯制御などにも対応できるフィードフォワードAGCへと発展してきている。

(3)1974年従来型の4 Hiミルに比べて強力なクラウン・形状制御機能を持った6段式新型形状制御ミル(HCミル)出現⁹⁾

本ミルは6 Hi構造とすることによりWRを小径化でき、かつ中間ロールを軸方向にシフトさせることによりロール変形形状の制御性を高めたもので、冷間圧延用に実用化された。このミルの出現を契機にクラウン・形状制御ミルの自主開発ラッシュがあり、これらの形状制御ミルの開発および実用化にむかって、形状、クラウン制御の高精度化をねらいとした圧延理論の著しい発展をみた。それまで進めていた3次元変形解析と数式モデル化、ロール変形解析など圧延理論の進展と相まって、これ以降薄板製品の形状お

よびクラウン制御性は大幅に向上した。また板圧延におけるスケジュールフリー圧延技術開発に希望を抱かせた。

(4) 1972年H形鋼および形鋼圧延へのユニバーサル圧延の本格的適用と連続圧延技術の実現¹⁰⁾

この技術は、条鋼圧延の2 Hi孔形方式からの脱却とサイズフリー／スケジュールフリーの先駆けであった。連続圧延で最も寸法変動に影響を与える張力変動をモーター電流変化としてとらえる電流メモリー制御方式 (AMTC) により、連続圧延の高生産性を損なうことなく高寸法精度の確保をルーパーを使わないで実現したものでもあった。その後の棒鋼・線材を含めルーパーを使わない場合の連続圧延における高寸法精度圧延を支えるスタンド間張力制御技術開発に大きな影響を与えた。

2・3 1980年代の圧延技術

1970年代後半以降の圧延理論と各種寸法制御技術の進展のようすは、図1からわかるように、薄板、条鋼、鋼管、厚板、形鋼の全分野にわたって圧延技術の技術革新がなされた。圧延理論部会におけるこれらに関する発表論文の件数の推移を項目別に図2に示した。同図には新ミル・新機能の開発およびその実機化の時期を板圧延および条鋼圧延分野についてあわせ示した。

1984年にはこれまで圧延技術者の教典として利用されてきた前記2種類の圧延理論に関する出版物を板圧延に限定して、さらにその後の進歩発展を反映した理論の体系化を継承し「板圧延の理論と実際」¹¹⁾が出版されている。また1985年には、圧延理論部会30周年記念公開シンポジウム¹²⁾も開催されている。

2・3・1 板圧延技術

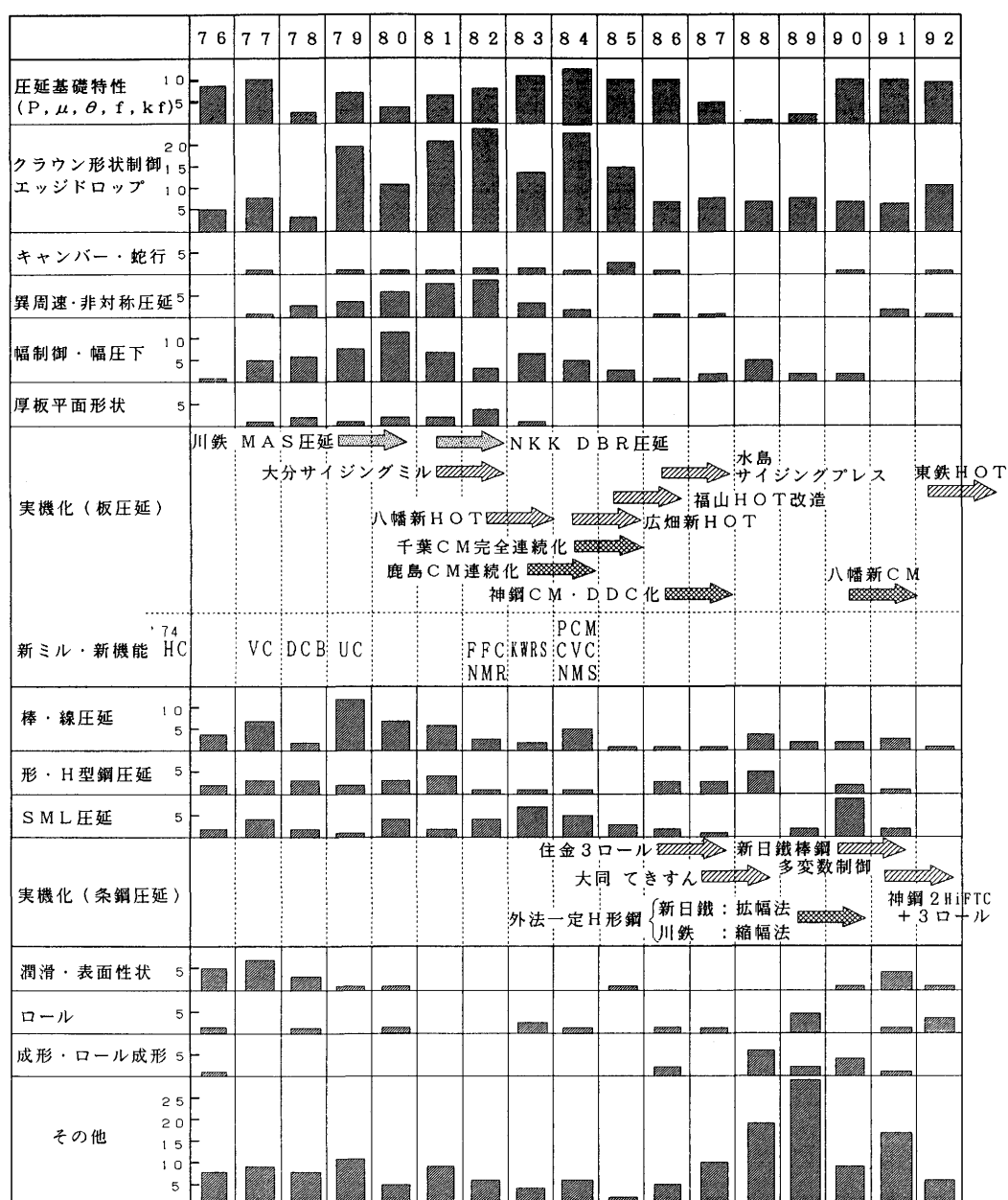


図2 圧延理論部会における分野別論文発表の推移 (1976~1992)

1980年代半ばにかけて熱延、冷延および厚板圧延のクラウン・形状・エッジドロップ制御に関する技術開発が急速に進展したことが図2の発表件数、新ミル・新機能の開発状況および実機設備稼働状況などに特徴的に表われている。ロールシフトタイプ(HCミル¹³、CVCミル¹⁴、K-WRSミル¹⁵)など、ロールクロスタイプ(PCミル¹⁶)、パレル形状可変タイプ(VCミル¹⁷)、ロール水平曲げタイプ(FFCミル¹⁸)、分割BURタイプ(NMRミル¹⁹、NMSミル²⁰)、垂直ベンダー強化タイプ(DCB²¹、UCミル²²)などの各種新形式ミルのもつ新機能を使った制御システムが開発され、実ラインの新設および改造につながった。図3の熱延F4スタンド想定クラウン制御機能の計算例²³)に示すように、従来4Hiミルに比べて新形式ミルのクラウン制御範囲は著しく拡大している。またロール変形(撓み変形、偏平変形、サーマルクラウンなど)の解析もこの時期に大きく進展した。冷延後の薄手高強度材料の形状修正に関してハイドロレベル²⁴)も開発された。

クラウン・形状制御の進展と同時期に、熱延幅精度の向上および鋳造スラブのサイズ集約²⁵)のため、幅圧下・幅制御技術の開発が進められた。V-H方式の粗圧延時の幅圧下・幅戻りモデル式による幅圧下設定と、先後端非定常部は圧下パターン制御、中間部は入側幅実測値を用いたフィードフォワード制御および実績幅圧下量から推定した計算出側幅誤差のフィードバック制御などの自動幅制御(AWC)システムが開発された²⁶)。これらの新圧延技術によって幅精度の向上および先後端クロップロスの低減がはかられた。また油圧圧下の採用など幅制御に対してもAGCと類似の装備化の進展があった。

厚板圧延では、熱延以上に先後端の平面形状の制御は重要であり、早くからその制御技術の開発が行われた。端部の自由変形とその幅だしによる圧延方向変化の影響をモ

デル化し、圧延中のロール開度変更によって板厚分布を付け、仕上げ圧延後の平面形状が矩形となるように途中パスの板厚分布をコントロールする新方式の圧延技術(MAS法²⁷、DBR法²⁸)およびエッジャー圧延による幅圧下法²⁹)などが開発され実機化されており、図4に示すような制御効果を上げている。

その他板圧延分野では、異周速・非対称圧延³⁰)と小径WR化の荷重低減効果による高圧下圧延技術の開発、厚板や熱延粗でのキャンパーおよび蛇行の制御技術開発なども行われている³¹)。

2・3・2 条鋼圧延技術

ユニバーサル圧延の3次元変形の解析が進展し、ウェブおよびフランジ圧下の相互干渉を考慮にいたった板厚制御システム³²)、冷却時の熱ひずみ解析による形状制御技術などが開発されてきた。特筆すべきことは、1989年、建設用鋼材として市場のニーズに対応する外法一定H形鋼の製造技術が開発されたことで、①水平ロール胴幅可変ユニバーサルミルによるウェブ縮幅法³³)、②ウェブ付根に付与した余肉を圧下しつつスキューロールによってウェブを拡幅する³⁴)2つの新圧延法があり形鋼の寸法制御技術は一段と進展した。

棒鋼・線材分野では、高速連続圧延下における寸法制御のためにはカリバー内へのメタルの充満性に加え、荷重、

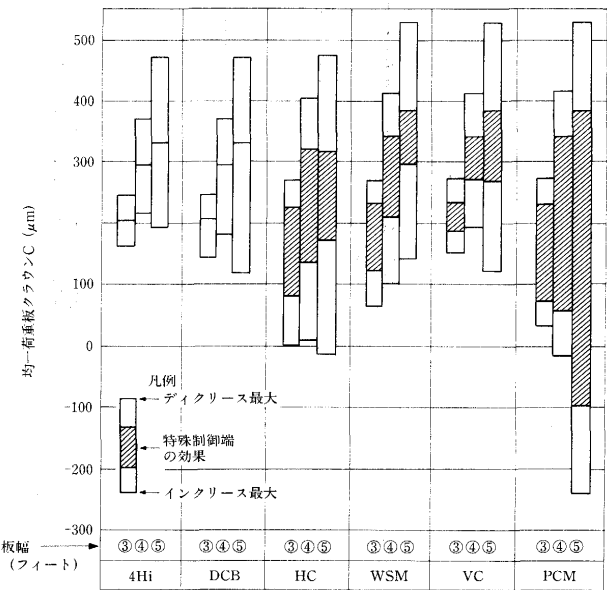


図3 各種ミルのクラウン制御機能の計算例

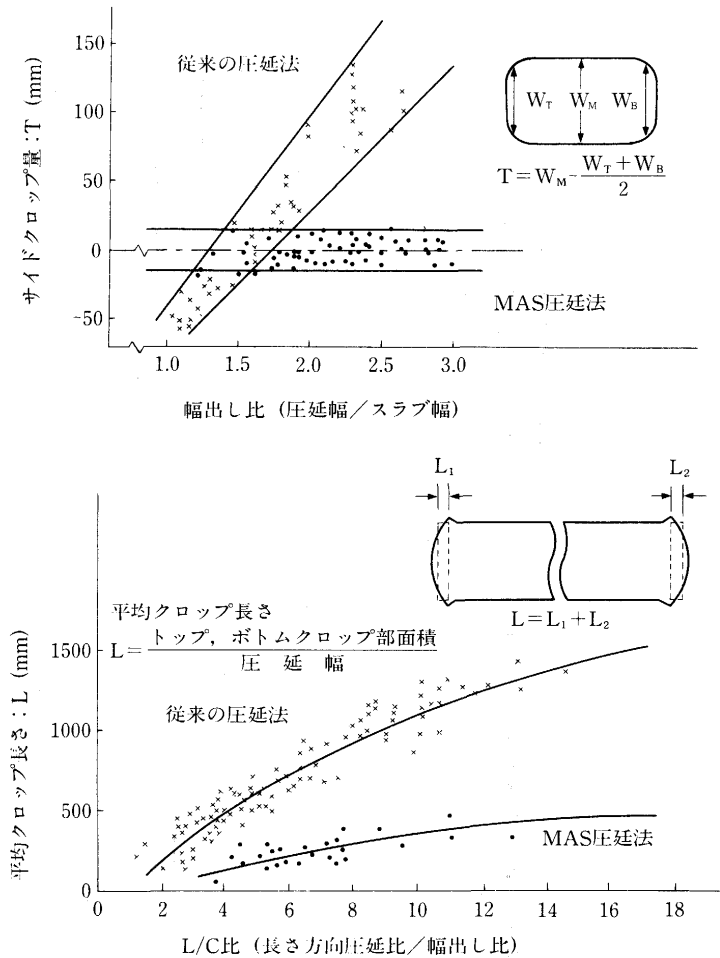


図4 MAS圧延法による平面形状の改善

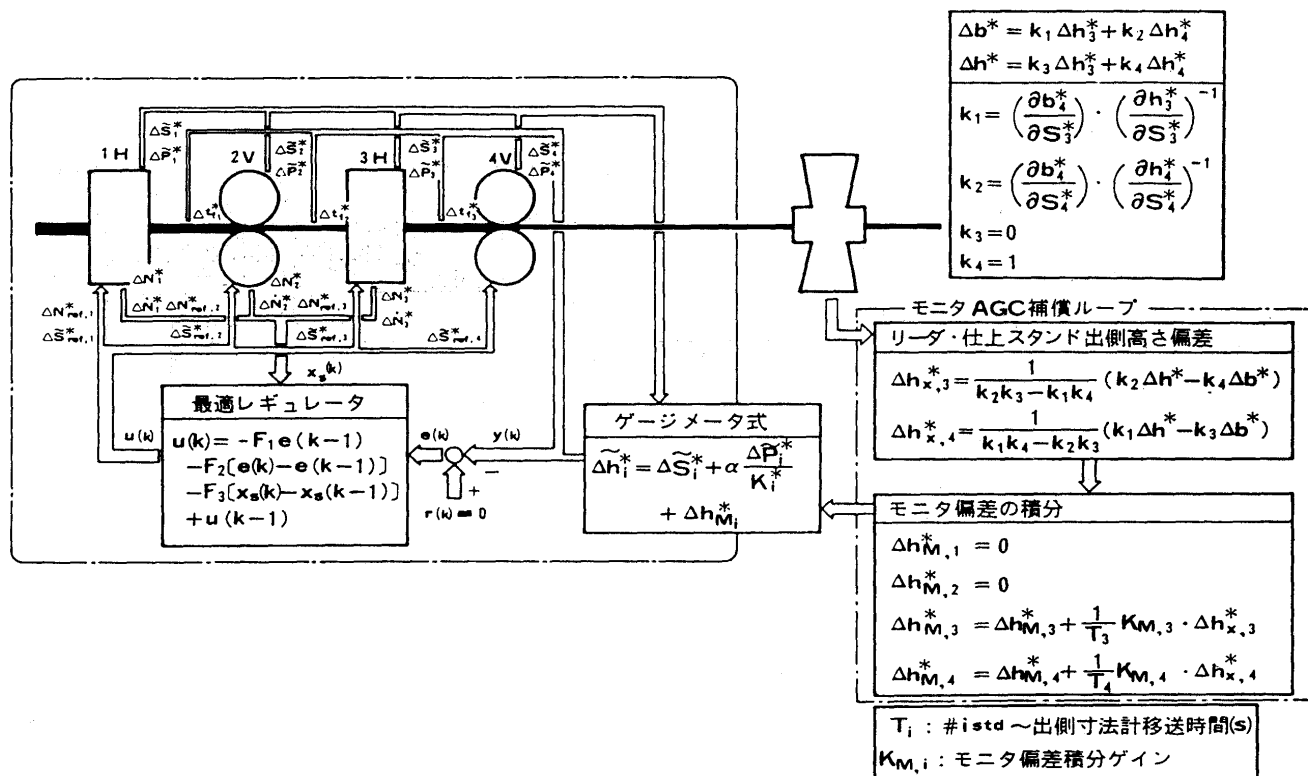


図5 棒鋼圧延の多変数制御

幅広がりおよび先進率などの圧延諸特性³⁵⁾³⁶⁾をスタンド間張力との関係³⁷⁾³⁸⁾も含めて数式モデル化する必要があり、実験と理論の両面から検討されている。スタンド間張力の検出方法は前述した①電流メモリー方式 (AMTC) から、②ロールチョックに作用する水平力を直接測定するSNTC³⁹⁾、③荷重とトルクを実測し両者と張力の理論的關係から間接推定する方法⁴⁰⁾⁴¹⁾へと高度化してきている。

棒線の高寸法精度化に応える精密圧延を実現する方法として、①ミルハードウェアによる方法、②既設2 Hiミルに制御システムを付加する方法がある。前者には、幅広がり少ない3 ロールミルによる軽圧下圧延法⁴²⁾、2 ロール方式による軽圧下圧延法 (てきすんミル)⁴³⁾がある。後者には、張力の間接推定によるロール回転数のみのフィードバック制御方法⁴⁴⁾、および各スタンドのロール回転数と圧下位置を最適レギュレータ理論に基づく多変数制御する方法(図5)⁴⁵⁾があり、いずれも図3にみるように実機として稼働している。

3. 寸法制御の圧延基礎技術の最新の動向と展望

板圧延において寸法 (圧延変形後の断面形状) を決める各種要因の3 次元的な因果関係を図6に示す。正確な寸法を得るためには、材料とロールの3 次元変形を連成して考えなければならない。通常操作できるものは、ロール位置 (圧下位置、シフト位置)、初期ロール形状、バンディング

力、圧延速度である。制御するためには(1)材料の変形および負荷モデル、および(2)ロールギャップ形状モデルが必要である。図6に示すように材料側に関してさらに材料温度、材料強度 (変形抵抗) および摩擦係数などの要素モデルも関係している。またロール変形側ではサーマルクラウン (熱膨張) と摩擦形状が関係している。以下これらの高精度モデル化の最近の動向について、従来の考え方から大きく変化してきている熱間圧延を主として対象に展望する。

3・1 材料変形側のモデル化

3・1・1 荷重モデル

熱間圧延では、従来固着摩擦 (材料表面の摩擦応力がせん断降伏応力に等しい) を前提に荷重式を検討してきた。したがって荷重式としてSimsの式⁴⁶⁾あるいはその簡易式である志田の近似式 (および張力がある場合への拡張式)⁴⁷⁾や吉田らの2 次のオーダーのTaylor展開近似式⁴⁸⁾などが使われている。

しかし最近後述するように摩擦係数が圧延条件、鋼種により変化することが明らかになり、荷重精度向上のために混合摩擦を取り扱える荷重式が摩擦係数の推定モデルとセットで使われるようになりつつある⁴⁹⁾。

冷間圧延では、Bland & Fordの理論⁵⁰⁾あるいはそのHillの近似式⁵¹⁾が良く用いられている。軽圧下域では誤差があることから、ダルロールを用いた調質圧延荷重式⁵²⁾、スキンプラス圧延の荷重式⁵³⁾が個別に検討されている。

3・1・2 摩擦係数および先進率

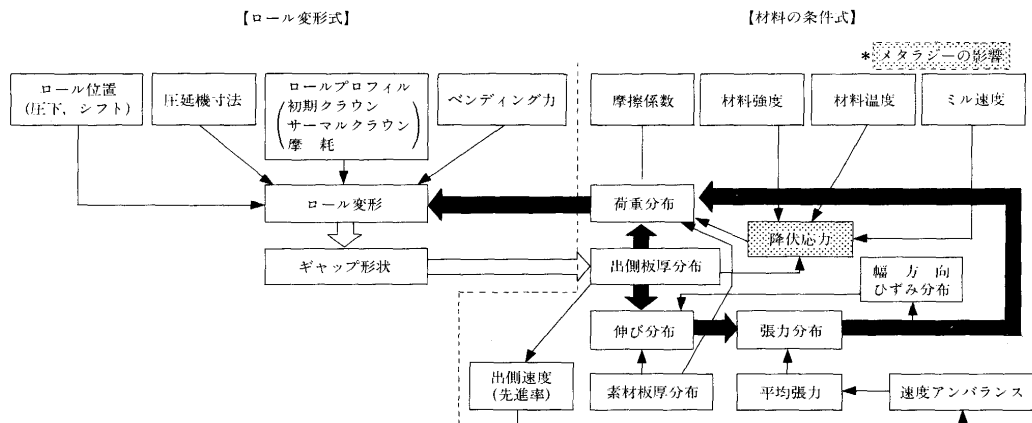


図6 板圧延の寸法を決める要因の3次元的關係

冷間圧延では、従来から潤滑性の評価と荷重推定精度向上のため圧延荷重から摩擦係数が逆算されてきている。最近熱間圧延でも、圧延荷重の高精度推定のためには摩擦係数の推定が重要となってきた。ミルセットアップに使用する摩擦係数の推定値を求める方法として、先進率の実測値からOrowanの理論、あるいはその重回帰簡易式からの逆算法などが試みられている。後者の実機適用結果が報告されており、ステンレス鋼や電磁鋼の摩擦係数は普通鋼よりかなり高いこと、普通鋼と電磁鋼の交互圧延時の摩擦係数の挙動などが明らかにされた(図7)⁴⁹⁾。またモデル実験データにより摩擦係数と温度およびスケール厚の影響についても検討されている(図8)⁵⁴⁾。

3・1・3 材料変形のモデル化

すでに述べたように強力なクラウン・形状制御能力を有する種々の形式の圧延機を使いこなすためには、図6のような因果関係にある3次元変形状態を簡易な数式モデルで表現する必要がある。厳密な数値解析⁵⁵⁾結果をもとに、統計的手法によって板クラウン予測式を個別ミル形式毎に求める⁵⁶⁾ことができる。しかしながら、より汎用性のあるモデルとするために、ミルの弾性変形のみ依存する要因と、主として圧延材の塑性変形に依存する要因とに分離してモデル化⁵⁷⁾した高精度モデルが提案されて実用化されている。

$$\frac{C_h}{h} = \xi \frac{C}{h} + \eta \frac{C_H}{H}, \quad \xi = 1 - \eta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta \epsilon_h = \xi \left(\frac{C_h}{h} - \frac{C_H}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式のCは荷重分布が板幅内で均一であるとしてロール系の弾性変形計算により求めるギャップ形状(均一荷重板クラウン)である。(1)式はロールギャップのつくるクラウン比率C/hの出側への転写量(ξ:転写率)と入側クラウン比率C_H/Hの塑性変形による出側への遺伝量(η:クラウン比率遺伝係数)との和として出側板クラウン比率C_h/hが決まるとしている。ξ, ηは塑性変形に依存するパラメータで実験的に求められる。この汎用性のある実験的パラメータの導入により図6のロール側と材料側を連成させている。

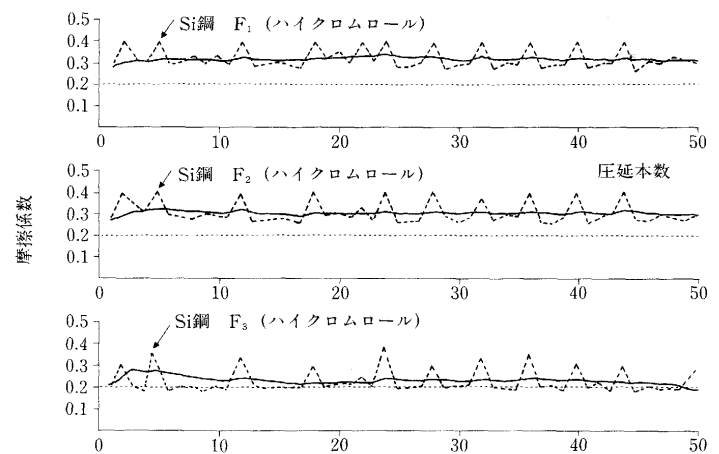


図7 普通鋼とSi鋼の交互圧延時の摩擦係数

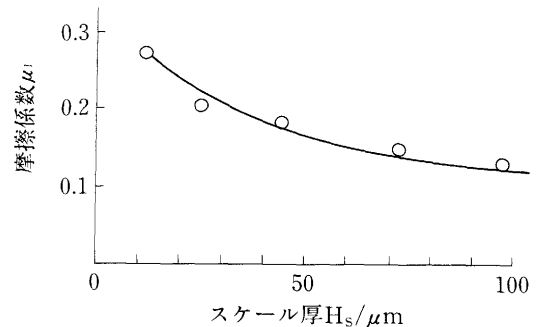


図8 摩擦係数と酸化スケール厚の関係

(2)式は図6の材料内部の関係を表すもので、材料変形(クラウン比率変化)と出側形状(伸びひずみ差Δε_h)を実験的に求める形状変化係数ξで関係づけている。

3・1・4 ロール変形解析

ロール変形解析は、撓みを求めるために必要なロール間の接触荷重分布が撓みそのものに依存するという不静定問題を解かなければならず、数値解析的手法⁵⁸⁾がこれまで提案されている。これに対しロール間接触荷重分布を2次または4次曲線で近似し、ロール間の適合条件から荷重分布をもとめ撓みを計算する方法⁵⁹⁾がある。図9にそのひとつの考え方⁶⁰⁾を示す。求められたロール変形を圧下支点のスパンで考えハウジング伸びなどその他要因を考慮すれば、板厚制

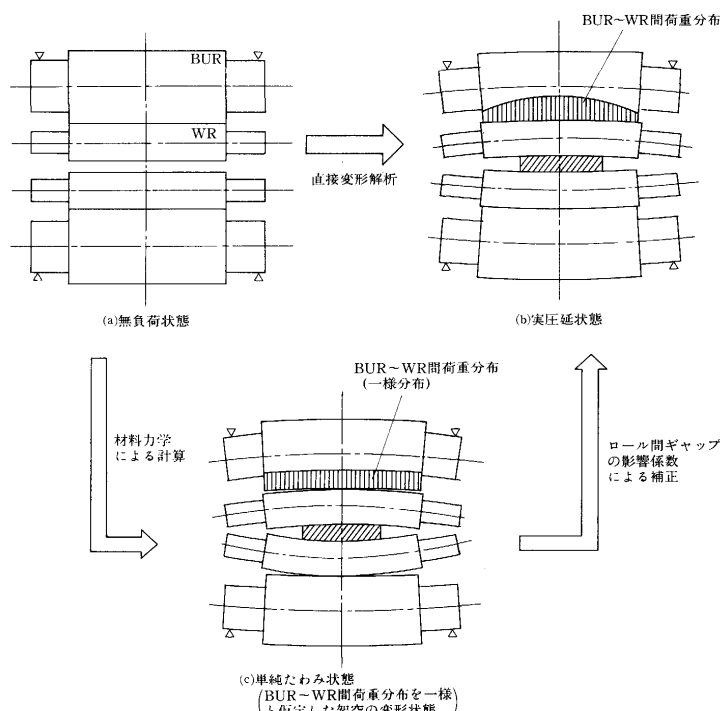


図9 ロール変形解析の考え方

御のためのミルストレッチ量およびゲージメータ式の弾性係数であり、圧延材の幅で考えれば上述の均一荷重板クラウンである。

3・1・5 変形抵抗

従来熱間圧延における変形抵抗は、前パスの影響は次パスまでの間に消滅するという前提で考えてきた。高寸法精度を追求するなかで連続圧延の後段の荷重精度不良が顕在化しはじめた。また厚板および薄板の熱延での加工熱処理(TMCP)の適用など圧延温度域が2相域までの低温化がすすみ、さらにパス間のひずみ回復を抑制する微量元素の添加などによって、変形抵抗にひずみ累積効果およびそのための動的再結晶など冶金現象を考慮しなければならなくなってきた。圧延履歴の考慮方法として、冷間圧延のように前パスのひずみがある比率で残留累積とする方法⁶¹⁾⁶²⁾、加工中の硬化と動的再結晶、加工後の静的回復・再結晶および粒成長の同時進行をモデル化した転位密度の累積で考える方法⁶³⁾などが開発された。前者の場合は従来使用している変形抵抗式に累積させたひずみを用いることもでき実用的な方法であるが、残留率のモデル化にやや手間がかかると思われる。図10は後者を実機に適用した結果であり、従来に比べて変形抵抗の予測精度が熱延後段スタンドまで維持されることがわかる。

冷間圧延では、木原の提案⁶⁴⁾になる温度およびひずみ速度に依存しない静的変形抵抗と依存する動変形抵抗の和とする変形抵抗式が定着している。

3・2 圧延解析への新しい手法の導入

圧延解析は初期には主として板圧延を対象としてスラブ法による2次元解析が行われ、その成果は各種の圧延モデ

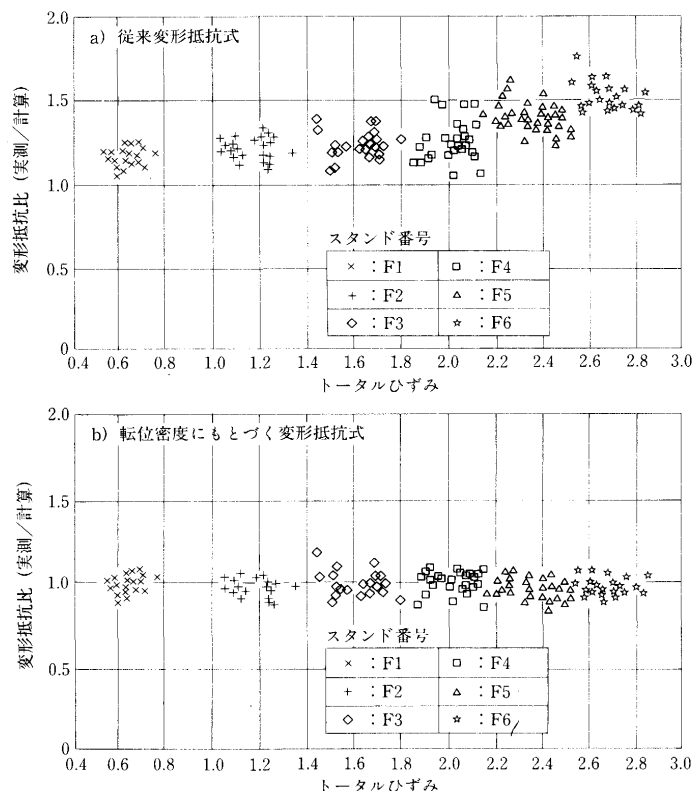


図10 従来型と転位密度型の変形抵抗推定精度比較

ルとして現在も多少の修正を加えながらも活用されている。しかしながら、本来圧延は3次元変形であることから2次元解析では充分解明しきれない部分があった。これまでは実験的あるいはその知見からの帰納的仮説を前提にした近似解析的アプローチに拠るしかなかった。例えば板圧延のエッジドロップや幅広がりといった自由端の変形特性、および孔形圧延の幅広がりや充満性への孔形状、パスラインの影響などについて解析的アプローチが望まれていた。

スラブ法による2次元圧延解析が一応の成熟をみた1960年代初期から、スラブ法の3次元解析への拡張が試みられるようになった。当初は摩擦力の方向、板厚方向の応力・ひずみの均一性などの仮定を置いた解析がなされていた。1970年代の初期に鈴木ら⁶⁵⁾、戸沢ら⁶⁶⁾によって、摩擦力の方向を仮定しない3次元板圧延解析が最初に試みられている。その後同じスラブ法で釣合方程式にせん断力を正確に考慮した3次元解析が提案された⁶⁷⁾。またこれまでのスラブ法による3次元解析は解析効率にかけることから、最近幅広がり関数を導入したマトリックス解法⁶⁸⁾による解析も試みられている。

一方、スラブ法にやや遅れて有限要素法による解析も始められた。当初は弾塑性理論による2次元解析⁶⁹⁾⁷⁰⁾が行われたが、収束性および解析効率の問題から3次元圧延解析への適用にはいたらなかった。直近では解析用の市販コード(DYNAあるいはABAQUSなど)での弾塑性3次元圧延解析が行われるようになってきつつある⁷¹⁾⁷²⁾。

現在最も活発に行われているのは剛塑性有限要素法である。ラグランジュ乗数法⁷³⁾、ペナルティー法⁷⁴⁾および圧縮性材料特性法⁷⁵⁾などの定式化がある。これまでに行われている剛塑性有限要素法による3次元圧延解析例として、板圧延では、エッジドロップ、幅広がり、反り、エッジング圧延解析など、鋼管圧延では、ストレッチレジューサ、マンドレル圧延解析などがある。また条鋼圧延では有限要素法によりやっと近似の少ない理論的な解析ができるようになったこともあり、棒鋼、H形鋼をはじめ各種孔形の圧延解析が行われ始めた。図11⁷⁶⁾、図12⁷⁷⁾にその例を示している。

また、ロール変形や温度と連成させた解析⁷⁸⁾、さらに一步進んで前述の変形抵抗のところで述べたように加工工程におけるプロセスメタラジの進展をうけて、変形-温度-メタラジを連成させた圧延解析⁷⁹⁾も試みられている。

このように近年の有限要素の発達および各種連成解析手法の進展により、従来の圧延理論では解析できなかった複雑な3次元変形形状や材料内部の変形状態を、メタラジや温度の影響も含めたより実際に近い状態で把握できるようになり、今後の寸法制御圧延技術の進展への大きな貢献が期待される新理論解析時代を迎えたといえよう。

このような圧延理論解析の一層の高度化をめざし、解析基盤を体系的に充実していくため、圧延理論部会内に理論解析研究小委員会(委員長:木内東大生産研教授)が設置されて活動を開始しておりその成果を期待したい。

4. 結言

寸法制御におけるこれから解決していかなければならない残された課題および新たなニーズについて次のようなことがあげられる。

(1) FMSのいっそうの推進下における高寸法精度の確保

あらゆる操業条件の変動にも耐えうるスキルフリー、サイズフリー/スケジュールフリーあるいはチャンスフリー圧延技術の確立を果たさなければならない。そのためには、圧延理論や制御理論に裏付けられた高度圧延制御技術(ソフト)とそれを具現化する設備技術(ハード)および高度な制御に耐えうるあるいは新たな知見を提供するセンサーの発展が不可欠である。

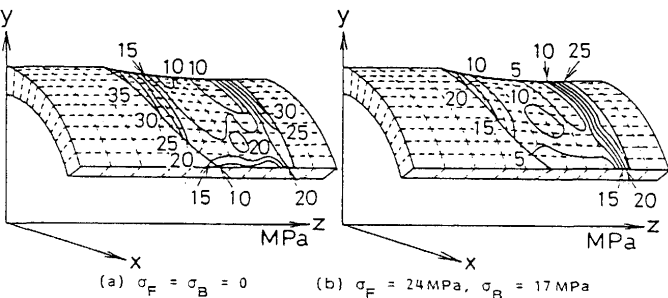


図11 ストレッチレジューサの面圧分布

(2) 圧延トライボロジーの定量化、理論化およびロールの高耐久化

加工するためには、ここ当分はロール・工具および潤滑の問題を避けて通ることはできない。上述のFMS化においてはなおさら重要な課題である。これまでの実験的評価による選択的アプローチから、理論化・定量化による制御ができる手段革新をはかることが必要であろう。

(3) 製品の総合品質のいっそうの向上と高付加価値化

寸法精度以上に機能的品質の造り込みニーズが高まってきており、以下に寸法精度と合わせて関連課題を列挙してみた。

- ・全長、全幅での品質(寸法、形状、材質)均一性の向上
- ・複合化材料などの新機能材の造り込み
- ・表面欠陥レス圧延および表面品質などの高機能化の実現
- ・難加工材料の量産圧延技術

上述してきたように、圧延理論は2次元から3次元へと進展した。また圧延理論と制御理論の連携がここまで寸法精度の向上に大いに貢献してきた。最近になり圧延理論とメタラジの連携の兆しも見えてきた。わが国の鉄鋼生産が高度成長期を経て成熟期にはいって20年たった今日、圧延諸特性の理論解析技術および材質制御の面での材質予測技術が飛躍的な進歩をとげようとしている。このことから圧延理論-制御理論-メタラジの連携がようやく可能な時代となってきた。このような手法革命によって、寸法精度を含め鉄鋼製品の総合的な品質技術および生産技術の新たな飛躍が期待できる時代が到来したといえるであろう。

文 献

1) Th. von Karman : Z. ang. Math. u. Mech., 5 (1925), p.139
2) E. Siebel : Stahl u. Eisen, 45 (1925), p.1563
3) R. B. Sims and P. Briggs : Sheet Met. Ind., 31 (1954), p.181
4) W. C. F. Hesseberg and W. Jenkins : Proc. Inst. Mech.

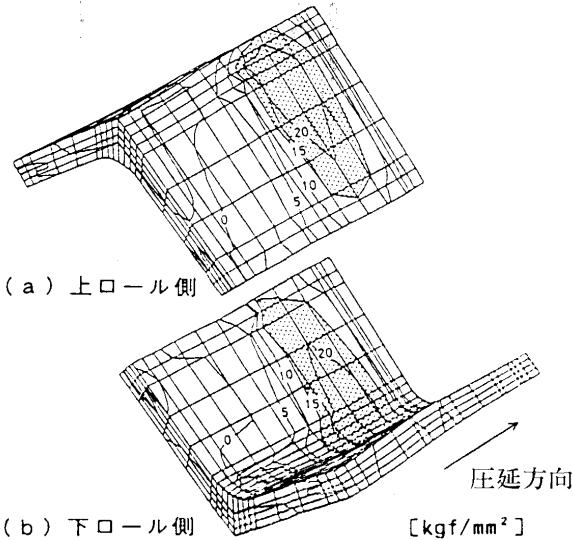


図12 山形鋼圧延の面圧分布

- Engr., **169** (1955), p.1051
- 5) 圧延理論と変形抵抗 (鉄鋼技術共同研究会編), (1960)
- 6) 圧延理論とその応用 (日本鉄鋼協会編), (1969)
- 7) 圧延理論部会20周年記念シンポジウムテキスト (日本鉄鋼協会編), (1974)
- 8) 鎌田正誠, 鍛本 紘, 岩藤秀一, 後藤桂三, 千場石根, 石田雅之: 日本鋼管技報, (1984) 105, p.15
- 9) 梶原利幸, 藤野伸弘, 西 英俊, 志田 茂: 日立評論, **56**(1974) 10, p.919
- 10) 原田利夫, 中島浩衛, 岸川官一, 中俣伸一: 圧延理論部会20周年記念シンポジウムテキスト (日本鉄鋼協会編), (1974), p.275
- 11) 特別報告書 No.36 板圧延の理論と実際 (日本鉄鋼協会編), (1984)
- 12) 圧延理論部会30周年記念公開シンポジウムテキスト (日本鉄鋼協会編), (1985)
- 13) 中島浩衛, 松本紘美, 菊間敏夫, 増田一郎: 製鉄研究, (1979) 299, p.92; 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 栗津原博, 木村智明, 志田 茂, 梶原利幸: 塑性と加工, **23** (1982), p.1172
- 14) K. Klama: Stahl u. Eisen, **104** (1984) 22, p.64
- 15) 北浜正法, 北村邦雄, 鎌田征雄, 佐々木徹, 音田総一郎, 足立明夫, 豊島 貢: 昭59塑加春講論, (1984), p.115
- 16) 例えば, 大森舜二, 中島浩衛, 塚本顕彦, 森本磨瑛雄, 日野裕之, 中沢 吉: 33回塑加連講論, (1982), p.419
- 17) 益居 健, 山田純造, 長井俊彦, 西野隆夫: 塑性と加工, **23**(1982), p.1188
- 18) 鍛本 紘, 塩崎宏行, 藤田文夫, 木崎院司, 佐藤一幸: 塑性と加工, **23** (1982), p.1259
- 19) 川並高雄, 中島浩衛, 的場 哲, 大森舜二, 塚本顕彦, 林 寛治, 守屋胸男: 32回塑加連講論, (1981), p.89
- 20) 川並高雄, 山本普康, 白石利幸, 菜畑和三: 塑性と加工, **27**(1986), p.606
- 21) 高島義昭, 鎌谷章博, 寺川雅智, 平世和雄, 木崎院司, 江森 隆, 本城 恒, 原 勉: 石川島播磨技報, **19** (1979), p.133
- 22) 西 英俊, 芳村泰嗣, 吉本健一, 二瓶充雄: 33回塑加連講論, (1982), p.127
- 23) 松本紘美, 竹本 統, 川並高雄: 製鉄研究, (1988) 328, p.49
- 24) 浜地一孝, 西村邦雄: 日本塑性加工学会第1回中国・九州地方技術懇談会テキスト, (1980), p.44
- 25) 今村幸高, 梁井俊男, 溝口信正, 渡辺和夫, 杉田公義: 鉄と鋼, **69** (1983), A225, p.73
- 26) 例えば, 河野輝雄, 美坂佳助, 高橋亮一, 芝原 隆, 布川 剛: 鉄と鋼, **69** (1983), A237, p.85
- 27) 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), p.168
- 28) 升田貞和, 平沢猛志, 市之瀬弘之, 平部謙二, 小川幸文, 鎌田正誠: 鉄と鋼, **67** (1981), p.2433
- 29) 笹 治峻, 久津輪浩一, 堀部 晃, 野原由勝, 山田稔久, 渡辺和夫: 鉄と鋼, **67** (1981), p.2395
- 30) 例えば, 塩崎宏行: 第92・93回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1983), p.193
- 31) 例えば, 河野信博, 島山哲郎, 大力 修, 浅野博之, 前田 稔, 植村和明: 鉄と鋼, **71** (1985), S327, p.41
- 32) 田中 実, 高田 努, 遠山一郎, 川口忠雄, 白杵正好, 福谷和彦, 平松洋之, 野呂弘幸: 製鉄研究, (1985) 317, p.48
- 33) 林 宏之, 鎌田征雄, 土井彌彦, 朝生一夫, 斎藤晋三: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1454
- 34) 生田和重, 青柳幸四郎, 稲垣 彰, 藤田和夫, 川田 勇, 戸次健二: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1462
- 35) 篠倉恒樹, 高井耕一: 鉄と鋼, **67** (1981), p.2477
- 36) 斎藤好弘, 高橋洋一, 森賀幹夫, 加藤健三: 塑性と加工, **24**(1983), p.1070
- 37) 青柳幸四郎, 南部好機, 太田国照, 柳本左門: 27回塑加連講論, (1976), p.50
- 38) 高橋洋一, 森賀幹夫, 山口善弘, 市田 豊: 塑性と加工, **30**(1989), p.406
- 39) 浅川基男, 近藤勝也, 緒方俊治, 美坂佳助, 松井利光: 塑性と加工, **20** (1979), p.841
- 40) 安部可治: 昭53塑加春講論, (1978), p.213
- 41) 高橋洋一, 森賀幹夫, 市田 豊, 谷川文男, 河瀬昌博: 塑性と加工, **30** (1989), p.989
- 42) 小坂鎮雄: 材料とプロセス, **2** (1989), p.1561
- 43) 小林秀雄, 山口桂一郎, 佐々木健, 小牧藤男, 高井慶和, 稻守宏夫: 材料とプロセス, **2** (1989), p.1559
- 44) 上村真彦, 前田征良, 市田 豊, 三越賢次, 高橋洋一: 神戸製鋼技報, **35** (1985) 2, p.28
- 45) 野口幸雄, 馬場勘次, 荒木誠之, 大貝晴俊, 石井 仁, 岡 敏博: 平2塑加連講論, (1990), p.301
- 46) R. Sims: Proc. Instn. Mech. Engr., **168** (1954), p.191
- 47) 志田 茂, 安田健一, 栗津原博, 津村右文: 26回塑加連講論, (1975), p.37
- 48) 吉田 博, 伊藤 庸, 浜田圭一, 広瀬勇次, 須藤象洞: 鉄と鋼, **63** (1977), A25, p.25
- 49) 小田高士, 浜渦修一, 田中 晃, 菊間敏夫, 田中正二: 昭59塑加春講論, (1984), p.29
- 50) D. Bland and H. Ford: Proc. Instn. Mech. Engr., **159** (1948), p.144
- 51) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity, (1950), [Oxford Univ. Press]
- 52) 益居 健: 27回塑加連講論, (1976), p.84
- 53) 梶原哲雄, 森本和夫, 中野恒夫, 福山五郎: 42回塑加連講論, (1991), p.465
- 54) 小関智史, 吉田博, 磯邊邦夫: 41回塑加連講論, (1990), p.105
- 55) 例えば, 石川孝司, 中村雅勇, 戸澤康壽: 塑性と加工, **21**(1980), p.902
- 56) 例えば, 本城 恒, 瀬川佑二郎, 樋口均一, 坪田一哉, 江森 隆, 井上正敏: 昭52塑加春講論, (1977), p.41
- 57) 小川 茂, 松本紘美, 浜渦修一, 菊間敏夫: 塑性と加工, **25**(1984), p.103
- 58) 例えば, 塩崎宏行: 塑性と加工, **9** (1968), p.315
- 59) 例えば, 美坂佳助: 20回塑加連講論, (1969), p.29
- 60) 小川 茂, 浜渦修一, 田中 晃, 松本紘美: 塑性と加工, **27**(1986), p.579
- 61) 山本定弘, 藤田米章, 大北智良, 大内千秋, 大須賀立美: 鉄と鋼, **67** (1981), A49, p.49
- 62) 斎藤良行, 榎並慎一, 田中智夫, 井上正敏: 鉄と鋼, **67**(1981), A45, p.45
- 63) 瀬沼武秀, 矢田 浩, 松村義一, 浜渦修一, 中島浩衛: 鉄と鋼, **70**(1984), p.1392
- 64) 五弓勇雄, 木原諄二, 小豆島明: 塑性と加工, **14** (1973), p.718
- 65) 都築信男, 鈴木 弘: 昭46塑加春講論, (1971), p.21
- 66) 戸澤康壽, 中村雅勇, 石川孝司: 塑性と加工, **17** (1976), p.37
- 67) 池田充宏, 松本紘美, 川並高雄: 37回塑加連講論, (1986), p.1
- 68) 梶原哲雄, 大森舜二, 荒谷博史, 小川幸保: 平2塑加春講論, (1990), p.73
- 69) 三好俊郎, 小出誠二, 市原 直, 新谷定彦: 昭51塑加春講論, (1975), p.327
- 70) 鎌田征雄, R. L. Mallett, E. H. Lee: 昭58塑加春講論, (1983), p.285
- 71) N. Rebelo, J. C. Nagtegaal, L. M. Taylor and R. Passmann: NUMIFORM'92, (1992), p.99
- 72) J. Edberg: NUMIFORM'92, (1992), p.713
- 73) R. Hill: J. Mech. Phys. Solids, **5** (1956), p.66
- 74) O. C. Zienkiewicz, P. N. Godbole: J. Strain Analysis, **10** (1975) 3, p.180
- 75) 森謙一郎, 島 進, 小坂田宏三: 28回塑加連講論, (1977), p.156
- 76) 森謙一郎, 中土井一光, 三原 豊, 平川智之, 小坂田宏三, 福田正成: 36回塑加連講論, (1985), p.137
- 77) 柳本 潤, 木内 学, 柴田一良: 43回塑加連講論, (1992), p.199
- 78) 例えば, 辛 平, 木原諄二, 相澤龍彦: 平3塑加春講論, (1991), p.593
- 79) 浜渦修一, 山田健二, 菊間敏夫, 瀬沼武秀, 矢田 浩: 材料とプロセス, **1** (1988), p.482