

ISIJ International 掲載記事概要

ISIJ International, Vol. 31 (1991), No. 6
掲載記事概要Special Issue on Recent Advances in
Rolling Technology

General Reviews

A Review on Theoretical Analyses of Rolling in Europe

By P. MONTMITONNET *et al.*

A review of works on modelling of hot and cold rolling in the European area during the last few years is presented. First, the mechanical and mathematical features of the papers reviewed are presented (rheological assumptions; friction law and contact treatment; time integration schemes; thermomechanical coupling; methods of solutions). Then the results obtained by the various research groups are presented. First hot rolling is investigated; the major problems addressed are then product geometry and thermal evolution with some applications to metallurgical evolution. Finally papers about cold strip rolling are discussed, they mainly analyze elastic roll deformation (flattening by plane strain approaches, 3D roll bending studies) and its consequences on profile and flatness.

Recent Progress of Rolling Technologies in Japan

By C. HAYASHI

1988 年から 1990 年までの 3 年間に発表された英文誌を参考に、我が国における圧延技術の最近の進歩について展望した。1985 年 9 月に開催された G5 のプラザ合意により、円高が急速に進行し、我が国の鉄鋼業は未曾有の経営危機に遭遇した。幸いにも日本政府の輸出振興策から内需拡大策への政策転換が功を奏し、輸出比率が比較的小さい薄鋼板や条鋼線材および大形形鋼は市況を回復し、1990 年度は逆に未曾有の活況を呈し、ミルのリフレッシュ、新規の設備投資も相次ぎ、関連する技術開発も盛んである。しかしながら、厚鋼板、鋼管、なかんずく、継目無鋼管は海外市場に負うところがきわめて大きいため、今なお、苦しい経済的環境にあり、生産量の大幅削減を余儀なくされ、ミルの閉鎖も行われた。しかしながら研究開発意欲は健在であり、すばらしい研究成果が報告されている。総じて、日本鉄鋼業は今なお健在である。

Theoretical Analyses

Application of Boundary Element Method to Rolling Technology with Special Respect to Flatness on Crown of Plate and Sheet (Review)

By J. KIHARA

この報文は境界要素法の概念と定式化及びその圧延工学への応用例として平圧延における形状問題への応用例を紹介したものである。境界要素法の逆解析での使い勝手についても検討し圧延板の残留応力解析への応用と幅方向への圧延圧力分布解析への応用を数値解析例として示した。

境界要素法によって、板幅のパレル長さに対する比が板クラウンにどのように影響するかを調べ、板幅が大きくなるにつれてクラウンが減少することを示した。また圧延板の残留応力に及ぼすロールベンダー力の影響の計算例を示した。

2-dimensional Lateral-material-flow Model Reduced from 3-dimensional Theory for Flat Rolling

By H. MATSUMOTO

本報の一般化二次元理論は、板圧延における形状・クラウンの現象、および幅広がりに関係する三次元的な変形を解析することを目的とする。その方程式系は、厳密な三次元理論における幅方向、および長さ方向の釣合い方程式を

非連成にすることによって導かれる。長さ方向の釣合い方程式は平面歪み圧延理論に、また幅方向のものはある簡単な常微分方程式に帰着する。これらの導出にあたって用いられた近似は三次元解析によって裏付けられる。得られたモデルは単に種々の実験と一致するだけでなく、幅方向の圧力丘や幅広がりなどの材料の変形挙動に対して直観的な把握を可能にする。

3-dimensional Analysis of Flat Rolling by Rigid-plastic FEM Considering Sticking and Slipping Frictional Boundary

By T. IGUCHI *et al.*

ロールバイト内における固着摩擦とクーロン摩擦則に基づくすべり摩擦を厳密に考慮した摩擦境界条件を剛塑性 FEM に取り入れ、板圧延解析に適用した。二次元平面歪み圧延の解析では、ロールと材料間の相対すべり速度が 0 となる固着摩擦域が中立点の周辺に計算された。この固着摩擦領域では摩擦力の絶対値は小さくなり、接触域を通して摩擦力が連続的に変化する。この結果は弾塑性 FEM の結果と一致するものである。次に本解析法を三次元板圧延の解析に拡張して適用した。その結果、境界上の中立線周囲に固着摩擦域があり、その周囲のすべり摩擦域では、相対すべり速度が上記固着摩擦域を中心に周辺に向かって放射状に広がるように分布しているようすが計算された。また摩擦力の分布は接触域内で二次元的に連続となる。また、材料の板幅/板厚比が小さくなると、相対すべり速度の幅方向成分が増加し、かつ固着摩擦域が幅方向に狭くなるという結果も得た。これらの計算結果は妥当なものであると考えられる。

Two-dimensional Thermo-mechanical Analysis of Flat Rolling Using Rigid-plastic Finite Element Method

By K. YAMADA *et al.*

板圧延における変形解析は、一般に圧延中に生じる温度変形を考慮せずに行われることが多い。しかしながら、実際には変形と温度は相互に影響しあうものであり、厳密にはこれらを連成解析する必要がある。本論文では、板圧延の定常温度解析用の FEM コードを作成し、剛塑性 FEM による変形解析と合わせ、加工発熱、ロールへの放熱、変形抵抗の温度、ひずみ、ひずみ速度依存性を考慮した連成計算を行い、熱間圧延(厚板、薄板)を例に、温度との連成が変形解に与える影響について検討した。その結果、変形解析のみを行った場合に比較して、圧延中の板内部に生じる応力分布および圧延後の相当(塑性)ひずみ分布に少なからず変化が生じることが明らかとなり、ロールバイト内の応力、ひずみ分布を正確に評価するためには、温度と変形の連成解析が不可欠であることがわかった。

An Integrated Mathematical Simulation of Temperature, Rolling Loads and Metallurgical Properties in Hot Strip Mills

By H. YOSHIDA *et al.*

ホットストリップミルにおける総合シミュレーターが開発された。このホット総合シミュレーターは、加熱炉出側から巻取りまでの温度(材料、ロール)、圧延負荷(圧延荷重、トルク等)、材料の金属学的諸特性を同時予測することができる。本シミュレーターは温度、圧延、材質の三つのシミュレーターから成っており、精度よく予測するため各シミュレーター間の連成関係を考慮している。

(1) 温度シミュレーターは材料およびロールの温度変化を計算するものである。

(2) 圧延シミュレーターは圧延時の荷重、トルク、モーター動力、変形抵抗、板厚方向ひずみ分布を計算するものである。

(3) 材質シミュレーターはオーステナイト(γ)粒径および相変態の変化、室温での材質(降伏応力 $Y.S.$ 、抗張力 $T.S.$ 、伸び EL 、ピッカース硬さ HV)を計算するものである。

ホット総合シミュレーターの活用範囲は非常に広く、現在、ホットストリップミルの種々の問題の解決の有効なツ-

ルとして使用されている。

A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-solid Materials

By S. TOYOSHIMA *et al.*

固液共存状態における金属材料の特性は冷間および熱間状態におけるものとは異なるため、そこでの特性を利用して複合材料や機能化材料を製造および加工しようとする方法が実験を主体に検討されている。しかし、この分野における数値解析的な検討は一次元的な簡略解析による半溶融状態の円柱ビレットの圧縮解析だけである。本報告は、固液共存状態の金属を対象とする鍛造や圧延の数値シミュレーションを目的とするものであり、加工時における液相の分布な加工荷重の予測、金型形状や圧延条件などの製造過程の最適化などに利用しようとするものである。固相部に対しては多孔質体の構成則を用い、液相部にはダルシー則を用いて液体の流動を表し、釣合式と連続条件式を同時に満たす解を有限要素法を用いて求めている。ただし、熱連成に関してはここでは無視している。数値計算例として、押出し、鍛造、圧延の解析を行い、既往の実験結果との比較検討を行った。

Plates and Strips

Relation between Camber and Wedge in Flat Rolling under Restrictions of Lateral Movement

By T. SHIRAIISHI *et al.*

板厚精度の厳格化を背景とするクラウン制御技術の進歩により、板クラウンは目ざましく低減されつつあるが、一方、板クラウンが小さくなることにより蛇行・キャンパー・ウェッジが発生しやすくなるという問題が深刻になりつつある。

特に、熱延では、粗ミルでのエッジ+水平圧延や、仕上げミルでの張力圧延のごとく、板の横方向の動きを拘束する特有の圧延状態が存在し、それらの影響に起因すると考えられる複雑なキャンパー現象、すなわち、圧延材の長手方向でキャンパー曲率が変化する現象が認められている。

そこで、キャンパーの圧延材長手方向の変化に着目して、ホットストリップミルの粗圧延と仕上げ圧延をシミュレートしたラボ実験と理論的検討により、キャンパーに及ぼすエッジング圧延の影響、および、前後方張力の影響について検討した。

Development of On-line Roll Grinding System for Hot Strip Mill

By K. HAYASHI *et al.*

熱間圧延機のロール摩耗および肌荒れ対策技術として非駆動式カップ形オンラインロールグラインダーを考案し実操業条件を想定した実機サイズの研削実験により本方式がオンラインロールグラインダーとして優れた性能を有していることを確認した。

さらに、この研削精度をより向上させるため回転中のロールプロフィールを非接触で計測できるオンラインロールプロフィールメーターを搭載し、この測定データをフィードバックすることにより所要の形状に研削するオンラインロール研削システムを開発した。

本報では、これらの原理と特徴およびロールプロフィールの測定精度とフィードバック研削精度の実験結果について述べる。

Shape Controllability in New 6-high Mill (UC-4 Mill) with Small Diameter Works Rolls

By K. YASUDA *et al.*

新たに開発した UC-4 ミルは、クラスターミル並みの小径ワークロールを有している。UC-4 ミルの形状制御能力及びフラット形状圧延能力を、実験及び解析を通して調べ、ステンレスを始めとする硬質材料の薄物圧延に適していることを明らかにした。また、UC-4 ミルのロール配置は前後で非対称となるが、この影響についても検討し、パス方向の違いによって形状制御特性が変化しないことを確かめた。薄板を小径ロール圧延するとクロスバックルが問題と

なるが、UC-4 ミルにおいては、小径ワークロールを使用しているにもかかわらず、クロスバックルの発生が顕著になることはなかった。現在、実機が 3 プラントで稼動中である。

Prediction of Flatness of Fine Gauge Strip Rolled by 12-high Cluster Mill

By S. OGAWA *et al.*

金属箔の圧延後の平坦度を予測するための解析モデルを開発した。本モデルによると、箔圧延を行う場合にしばしば生じるロールキス圧延をも正確に取り扱うことができ、また、あらゆる形式の板圧延機の解析が可能である。本モデルを用いて、12 段圧延機においてロールキス圧延となるような箔圧延の計算を行い、各種形状制御装置の能力の検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 作業ロールベンディング力の形状制御能力はロールキス圧延となる場合には非常に小さい。

(2) 中間ロールシフトは、中間ロールの片側にテーパ部を設け、このテーパ部を圧延材の中に押し込んだ場合、有効な形状制御能力を発揮するが、テーパを付与しない場合の形状制御能力は非常に小さい。

(3) 補強ロールベアリングのクラウン調整および中間ロールベンディング力は、ロールキス圧延においても有効な形状制御能力を発揮する。

Shape Controllability for Quarter Buckles of Strip in 20-high Sendzimir Mill

By K. HARA *et al.*

20 段センジミアミルの圧延形状を高精度に予測するシミュレーションモデルを開発した。本モデルを用いて、硬質材の圧延で問題となるクォーター伸び形状の防止方法を検討した。得られた知見は以下のとおりである。

(1) 本シミュレーションモデルの精度を 20 段センジミアミルを用いて検証した結果、圧延形状を予測するのに有効であることを確認した。

(2) センジミアミルの形状制御手段である第 1 中間ロールシフト、テーパプロフィール、AS-U 調整クラウン及び各ロールへの正弦曲線状のクラウン付与等のみではクォーター伸びのない平坦な圧延形状を得ることが困難であることを明らかにした。

(3) クォーター伸び形状を防止するには、第 1 中間ロールの一部にコンケーブ状のプロフィールを付与したコンケーブロール状による圧延が効果的であることを明らかにした。20 段センジミアミル圧延機にコンケーブロールを適用し、圧延実験を行った結果、クォーター伸びのない平坦な圧延形状が得られることを確認した。

Bars and Pipes

Characteristics of Rolling in a Continuous Billet Mill with Drive-free Vertical Rolls

By H. SHIKANO *et al.*

垂直ロールを無駆動とする H-V-H 配列のコンパクトなビレット用連続圧延機を開発した。本圧延機においては、材料は上流側の駆動水平スタンドにより無駆動の垂直スタンドに押し込まれ、下流側の駆動水平スタンドにより引き抜かれる。

この方式の圧延機を実用化するには、スタンド間で生じる材料の座屈と駆動水平スタンドで生じる材料のスリップおよびスタンド間張力に起因する圧延材の寸法変動といった現象を把握し、適切な圧延条件を明確にする必要があり、無駆動垂直ロールを有するビレット用連続圧延機の圧延特性を実験的に調査した。

その結果、垂直ロールの圧下率は水平ロールの圧下率とはほぼ同等で、最適圧延条件下では 23 % に達する。さらに、スタンド間張力あるいは圧縮力の変動は 1.5×10^5 N 内であり、圧延材の寸法変動は幅で 6.6 %、厚みで 1.1 % 内である。

それゆえに、この方式の圧延機はビレット用連続圧延機や棒鋼圧延機の粗列に使えるとの結論を得た。

Development and Features of Rotary Reduction MillBy K. NAKASUJI *et al.*

1パスで高圧下圧延が可能である独自の傾斜圧延機を開発した。この傾斜圧延機の特徴は次のとおりである。

(1)パスライン周りに3個のコーン型ロールが配設されている。

(2)そのロール軸は、ロール傾斜角に加えロール交叉角によって傾斜(交叉)せしめられている。この時、交叉角が正で、かつ高傾斜角が可能な構造となっている。

(3)そのロール支持形式は両端支持形式である。

本研究では、独自開発した傾斜圧延機(ロータリリダクションミル)の特性について詳細な検討を行った。第1に、ロータリ圧延プロセスの原理について検討し、第2に、ロータリリダクションミルの工学的特徴を示し、第3に、圧延材の寸法精度および表面品質について調査し、最後に、ロータリリダクションミルにより圧延された材料の機械的性質について詳細に検討している。

Development of Manufacturing Technology for Electric Resistance Welded Steel Pipes with Ultra-heavy Wall ThicknessBy T. YAZAWA *et al.*

電縫鋼管は、その製法上の特徴から薄肉分野を中心に発展してきたが、素材品質の向上や、成形・溶接の著しい進歩ならびに非破壊検査技術の発展につれ、用途分野が拡大し、冷間ロール成形の寸法精度や外観性状の優位性を生かした、縫目無鋼管サイズの極厚肉管の開発が要求されるようになってきた。

この極厚肉管のニーズに対応するために、NKKは新成形技術(NKK式複合成形技術)を中心に極厚肉電縫鋼管製造技術の開発を行った。

本製造技術の開発により、従来の技術では限界といわれた肉厚と外径比(t/D)が20%をはるかに超える26%の極厚肉管の成形・溶接そして品質保証が可能となった。

Development of New Hot-welded Steel Pipe-making ProcessBy E. MIKAMI *et al.*

小径溶接鋼管は帯鋼を管状に成形した後、その突合せ部を溶接したもので、その製法としては鍛接法(CW)及び電気抵抗溶接法(ERW)に分類される。CW法は熱間連続製管であり、生産性、耐溝食性、加工性に優れている。一方ERW法は冷間連続製管であり、溶接部の信頼性、寸法精度、表面性状が優れている。

近年、鋼管の使用条件がますます厳しくなり、それに伴い高品質化要求が強くなってきた。この対応策としてCW法、ERW法両者の長所を併せ持った画期的な製造プロセスである、熱間での電気抵抗溶接法(SW)を開発した。このプロセスの主な特徴は下記のとおりである。

- 1)CW法と同等の高生産性。
- 2)溶接部の信頼性はERW法と同等。
- 3)熱間溶接であり、周方向組織が均一。従ってCW法と同等の耐溝食性、加工性を有する。
- 4)CW法と比べ、エネルギー消費が少ない。

Others**Development of Rib Plate Manufacturing Technique**By T. FURUMAI *et al.*

コンクリート充填リブ付き鋼管柱は、高い剛性と優れた

強度性能に加え、型枠工事が不要であるなどの施工上のメリットが多く、近年研究開発が盛んに行われ実工事にもしだいに適用されている。この素材であるリブ付き鋼板としては、今後のビル高層化に伴う大型柱用厚鋼板の需要増加が予想される。

今回、このリブ付き厚鋼板を圧延製造する場合のリブ成形特性について鉛・熱間炭素鋼を用いて確性し、その結果を基にNKK福山厚板ミルにて実機試作し多パス圧延による製造技術を確立した。実機製造における圧延パススケジューリングは、必要リブ形状の確保、ラップ疵、圧延歪み防止を考慮し、各パス圧下配分最適化及びワークロールシフト・ワークロールベンダーを用いた形状制御を組み合わせることにより成立する。この結果、多パス圧延法にて効率良く形式の優れたリブ鋼板を製造することが、可能となった。

Development of Nonferrous Clad Plate and Sheet by Warm Rolling with Different Temperatures of MaterialsBy A. YAHIRO *et al.*

軽量かつ熱伝導率が高く、電気抵抗が小さい等の特徴を持つアルミニウムと炭素鋼、ステンレス鋼、チタンとを組み合わせたクラッド板の開発を行った。まず、モデルミルでの基礎検討を行い接合条件を明らかにした。高温ほど低圧下率で接合可能であり、薄板クラッドでは圧延温度250℃以上、圧下率25%以上で接合することがわかった。次に接合機構について考察を行い、圧延中にアルミニウムの酸化膜が破壊され新生界面が露出し圧下力で塑性変形仕事、摩擦仕事による発熱が加わり鋼との間に拡散が生じて金属結合がなされると推察した。次に実機で製造したクラッド板について性能評価を行った。アルミニウム・クラッド鋼板については、せん断試験、板厚方向引張試験、曲げ試験、曲げ疲労試験、熱処理・熱サイクル・溶接を行った後のせん断試験及びEPMAを実施した結果、十分な接合強度と耐久性を有することを確認した。薄板クラッドについては熱的特性を調べるほか引張試験、せん断試験、絞り試験を行い、十分な接合強度と成形性を有することを確認した。

Mechanical Properties of Uniaxially and Biaxially Rolled Polymer SheetsBy Y. HIGASHIDA *et al.*

板厚20mmのポリプロピレン(PP)およびポリエチレン(PE)を融点直下の温度で、一方向および二方向に圧延し、圧伸比が強化特性および高分子構造に及ぼす影響について調べた。一方向に圧延した場合、延伸比の増加に伴い、圧延方向の強度はPP、PEともに著しく向上するが、幅方向の強度はほとんど変化しない。強度等方の圧延板を得るためには、一軸圧延時の延伸比 λ_1 にかかわらず、延伸比 $\lambda_2=1.5$ で二軸目の圧延を行えばよい。PPでは、 $\lambda_1=5$ 、 $\lambda_2=1.5$ の条件で引張強さ $\sigma_L=\sigma_C=100$ MPaの強度等方板が得られた。この延伸比の組合せは、見かけ上、強度等方板を得るには不釣り合いと思えるが、二軸圧延時の再加熱による一軸圧延板の熱収縮を考慮すれば、両方向で等しい加工度になっていると考えられる。複屈折度が示す配向の度合いが、強度の向上特性と良く一致することから、強度特性は配向度によって決まるといえる。結晶化度は、一軸、二軸圧延にかかわらず、延伸比が大きくなるにつれて減少する。

会員には「鉄と鋼」あるいは「ISIJ International」のいずれかを毎号無料で配布いたします。「鉄と鋼」と「ISIJ International」の両誌希望の会員には、特別料金5000円の追加で両誌が配布されます。