

剛塑性有限要素法による三次元圧延変形の解析



二階堂 英幸*

Rigid-Plastic FEM-Analysis of 3-Dimensional Rolling Deformation

Key Words : Rigid-Plastic FEM-Analysis, 3-Dimensional Deformation

1. 圧延の課題は三次元変形

我々の身近に存在する自動車や家電製品あるいは住宅やビルディングと言ったものは、圧延により製造された鋼板や形鋼をふんだんに使用している。このように非常に身近でしかも豊富に供給される鉄鋼製品であるが、その製造工程である圧延作業は、一般には、回転しているロール間に素材であるスラブやビレットを挿入することにより断面積を低減するという比較的単純な作業として認識されているに過ぎない。しかしながら、圧延製品を目標とする精度で、しかも歩留りの低下や平坦度を阻害することなく得ることは、必ずしも容易なことではない。

最も生産量の多い熱間圧延における代表的な例として、次のものが挙げられる。その1つは、粗圧延前段で行われる素材のスラブ幅を製品幅に作り込む幅変更圧延に関するものである。幅を圧下するエッジング圧延では、幅端部が圧延方向に突出するフィッシュテイルと呼ばれる非定常変形を発生する。この部分は、仕上圧延における10m/sを越える高速の通板を阻害するため、仕上ミルの入側にて切除される。同時に、

幅変更を行うと幅に変動を生じる。これは、次工程で耳切りの対象となる。このようなフィッシュテイルの切除や耳切りの実施は、歩留りの低下となる。もう1つの例として、仕上圧延において幅方向の板厚変化を目標精度に作り込む板クラウン制御を示す。板クラウン制御では幅方向のロール間隔を変える制御を主として実施するが、過大クラウンの発生や薄物材の圧延においては板波と呼ばれる平坦度不良を生じることがある。平坦度不良については、製品にならないばかりか絞りの発生に継がり、圧延の続行そのものを困難にすることさえある。同様の課題は、H形鋼の圧延におけるウェブ波の発生や、棒鋼の圧延における割れなどの表面きずの発生など、種々の圧延において見られる。

以上に示したような課題はすべて三次元変形にともなって生じるものであり、これらの解決には、三次元変形特性の解明とその制御方法の開発が重要である。しかしながら、従来の実験を主体とした研究では、ロール間の三次元変形を詳細に把握することは容易でなく、実機の操業に反映するには多くの時間と労力を必要とした。また、解析的な対応についても、特に圧延解析の分野では、塑性変形の解析手法が十分に確立されていなかったことや、三次元変形解析に不可欠となる繰り返し計算を行えるだけの計算機の能力が十分でなかったことから、プロセス開発をリードするものではなかった。

筆者らは、熱間の鋼の圧延における三次元変形の解析法の開発に取り組み、熱間圧延にお



* Hideyuki NIKAIDO
1956年2月5日生
1980年大阪大学大学院工学研究科
博士前期課程修了
現在、川崎製鉄(株)千葉製鉄所、
西工場新設備建設班、主査(課長)、
工学博士、塑性加工学
TEL 043-262-2055

る生産性や歩留りの向上を目的としたプロセス開発を行ってきた。ここでは、剛塑性有限要素法が三次元変形の解析に対して有効であることを検証しつつ、圧延の現場にてこれらを実機に適用してきた筆者らの研究成果の一端を紹介する。

2. 剛塑性有限要素法による圧延解析の特徴

圧延のような塑性変形を対象とした有限要素法には、材料の弾性変形と塑性変形とを厳密に扱う弾塑性有限要素法と、弾性変形を無視して材料全体が塑性変形を生じると仮定する剛塑性有限要素法とがある。熱間の鋼を扱う場合には、弾性変形は無視しうるほど小さいので、剛塑性変形を仮定した解析でも問題は生じない。

剛塑性有限要素法は、次に示す汎関数 Φ を最小とする運動学的に可容な速度場 \mathbf{v} を求めることが基本的な計算過程である。

$$\Phi = \iint \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} dV + \int \tau_f \Delta v dS - \int \bar{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{v} dS \quad \dots\dots(1)$$

- ここで、 $\bar{\sigma}$: 変形抵抗 (相当応力)
- $\dot{\epsilon}$: 相当ひずみ速度
- τ_f : 材料表面の摩擦せん断応力
- Δv : ロールと材料との相対速度
- $\bar{\mathbf{T}}$: 既知の単位面積あたりの張力ベクトル
- \mathbf{v} : 運動学的に可容な速度ベクトル

この剛塑性有限要素解析法により圧延変形を解析することは、弾塑性有限要素法など他の方法に比べて優れた点がいくつかある。

その第1点は、計算過程において応力を増分としてでなく応力値そのものを扱っているため、繰り返し計算において誤差が累積せず解が発散しにくいことである。三次元変形を解析する場合には、計算時間や記憶容量の制限から要素分割を十分に小さくすることができないが、解が発散しにくいので比較的粗い要素分割においても解析が可能である。

第2点は、変形抵抗を次式のようにひずみ、ひずみ速度の関係式として扱うことができる点である。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) \quad \dots\dots(2)$$

一般に熱間鋼の変形抵抗はひずみ、ひずみ速度の関数として表されており、従来の研究データの蓄積を積極的に活用することができる。この利点は、以降に示す変形特性のシミュレーションにおいてより一層明確となった。

第3点は、ロール面の境界条件にクーロン摩擦条件や摩擦せん断係数などを容易に取り込めると同時に、ロールとの相対速度を境界条件として取り込む必要がないことである。圧下中の材料速度は、通常、ロールの入口近傍でロール速度よりも小さく、出口に向かってしだいに増速し、出口近傍では逆にロール速度よりも速くなる。幅広がりを生じる場合には、ロールとの相対速度の変化はより一層複雑となる。このような変化を境界条件として取り込むことは、ほとんど不可能に近い。森・小坂田¹⁾は、式(1)の第2項である摩擦エネルギーを、摩擦力の大きさ τ_f と次に示す相対速度の絶対値 Δv との積で表し、この問題を解決した。

$$\Delta v = \sqrt{\{\mathbf{v} - \mathbf{v}_R\}^T \cdot \{\mathbf{v} - \mathbf{v}_R\}} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 \mathbf{v}_R : ロール周速ベクトル

すなわち、上式を汎関数に適用すると、与えられたスカラーの摩擦力は相対速度の成分の方向に分配された摩擦力ベクトルと等価となり、相対速度は未知変数として取り込まれる。境界条件としては、表面の摩擦条件(例えばクーロン摩擦)に対応した τ_f のみを与えればよい。この方法は、三次元変形解析における境界条件の設定を容易にすると同時に、実際の現象を精度良くシミュレートするために非常に重要である。

このように剛塑性有限要素法による圧延解析には優れた点が少なくないが、この剛塑性有限要素法がより複雑な三次元変形の解析に対して適用できるようになったもう1つの理由は、森²⁾により提案された次の関数により初期値が容易に求められるようになったことである。すなわち、式(4)を最小とする速度場を初期値とすることが提案されており、具体的にこの停留条件を定式化すると、速度に関する線形1次方程式が得られる。

$$G = \frac{\sqrt{\sum (\bar{\sigma} \dot{\epsilon} V)^2 + \sum (\tau_f \Delta v S)^2}}{\sum \{\pm (\mathbf{T} \cdot \mathbf{v} S)^2\}} \dots\dots\dots (4)$$

この関数は、必ずしも三次元解析を想定して考案されたものではないが、多くの三次元解析に対して良い初期値を与える。

剛塑性有限要素法が、実際のプロセスに対して適用できるためには、材料形状あるいはロール形状が複雑に変化する圧延、例えばエッジング圧延やカリバー圧延、さらにはロールの偏平や曲げなどの弾性変形との連成解析が、精度良く得られなければならない。剛塑性有限要素法の優位性を検証しつつ、三次元変形解析の適用範囲を順次拡大してきた結果を以下に示す。

3. 三次元変形解析への適用例

3.1 幅変更圧延

スラブを幅方向に圧下するエッジング圧延の解析モデルを図1示す。図からも明らかなように、エッジング圧延ではスラブ表面の大部分が自由表面となっており、材料特性が変形形状に及ぼす影響を評価するための最適な例題でもある。図2に、エッジング圧延されたスラブの非定常変形を三次元的に示す。エッジング圧延による先後端部のフィッシュテイルや幅端部が増

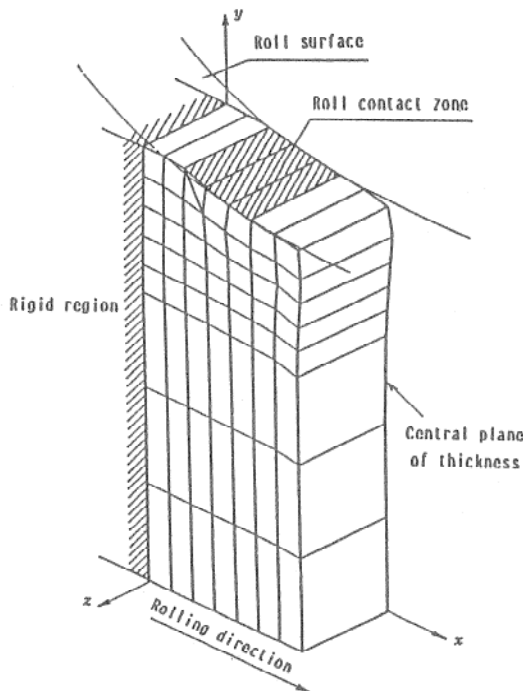


図1 エッジング圧延の3次元変形の解析モデル

厚するドッグボーンが精度良くシミュレートできている。また、先端部の幅がロール間隔よりも小さくなる幅落ちと呼ばれる現象も、圧延中における要素の面圧が負となった場合、すなわち要素がロールに引付けられる場合には、要素をロールから離してロールの接線方向に進めるという手法を適用することによりシミュレート可能となった。さらに、一連の解析から材料定数とドッグボーン寸法との関係が検討され、当然のことであるが、熱間鋼の材料定数を取り込むことにより、格段に精度が上昇するという結果が得られた。このように自由表面の占める割合の多い圧延変形は、剛塑性有限要素法により初めてシミュレートできるようになった。

図3には、ドッグボーンを生じたスラブを円

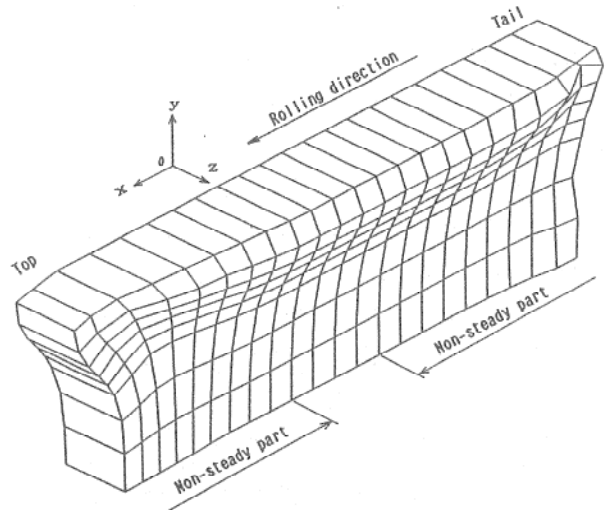


図2 エッジング圧延後のスラブの三次元表示

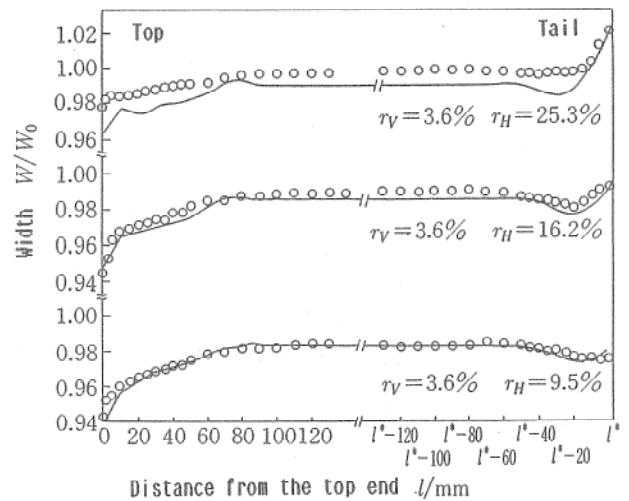


図3 ドッグボーンスラブの水平圧延後の幅

柱ロールで圧延した後の幅を示す。この解析では、ロールと材料との接触条件と接触面の摩擦エネルギーを精度良く計算することに重点を置いた。入側のスラブ断面が均一でない場合の圧延変形も精度良くシミュレートできている。

これらの解析から、ドッグボーン材の水平圧延における詳細な幅広がり挙動や水平圧延の圧下率と圧延方向の応力との関係が定量的に示され、従来のエッジング圧延による幅変更の課題が明確に示された。また、圧延条件を変えたエッジング圧延の解析結果により、ロールによる大幅変更では、これらの欠点を克服することが非常に難しいと結論づけられた。

3.2 熱間圧延における蛇行現象の解析³⁾

粗圧延後段から仕上圧延にかけて発生する蛇行により、通板位置を決めるサイドガイドに板の後端がせり上がって折れ込み、2枚重ねの状態の圧延となってロールに損傷を与えることがある。従来、このような蛇行現象の解明には、二次元圧延理論が適用されてきたが、より厳密な現象の把握のために、剛塑性有限要素法による解析が行われた。

図4に、左右の圧下率を変えた場合の板の蛇行の進展を示す。板の後端がロールの入側で大

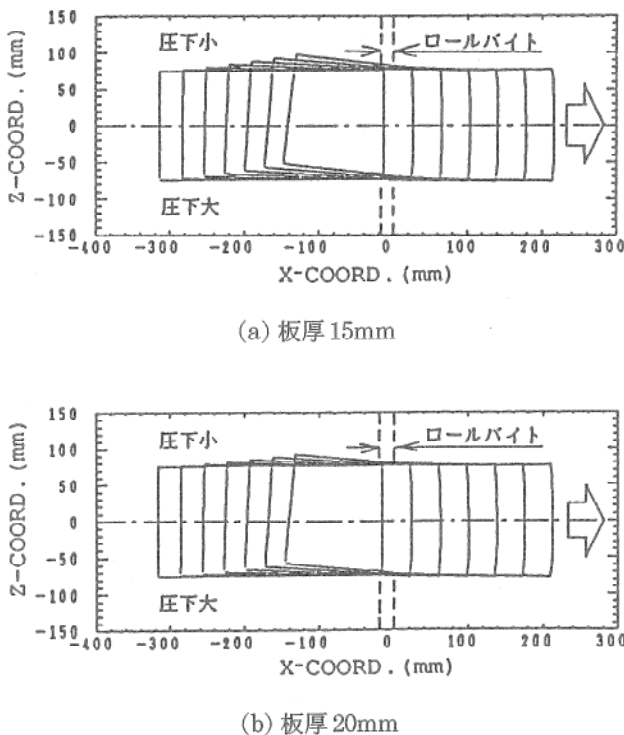


図4 圧延における蛇行の計算結果

きく回転を生じていることが示されている。この結果は、従来 of 初等解析の結果とはほぼ同じ傾向であるが、詳細にみると蛇行量は板幅と板厚の比により異なっている。これを示したのが、図5である。ここでは板幅と板厚の比により蛇行量が変化しない初等理論を基準として計算結果を実験結果と比較している。板幅に対して板厚が厚い場合には、蛇行を表す曲率が小さくなっており、蛇行量が減少することが示されている。このような結果は、解析に関して言えば、三次元剛塑性有限要素法が適用されて初めて得られたものと考えている。

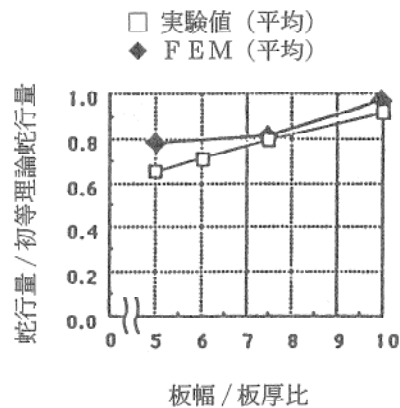


図5 板幅 / 板厚の比が蛇行に及ぼす影響

3.3 カリバー圧延の解析

カリバー圧延とは、幅方向に径が異なるロールで材料を圧延することを言う。このカリバー圧延では、ロールと材料との接触長が幅方向に

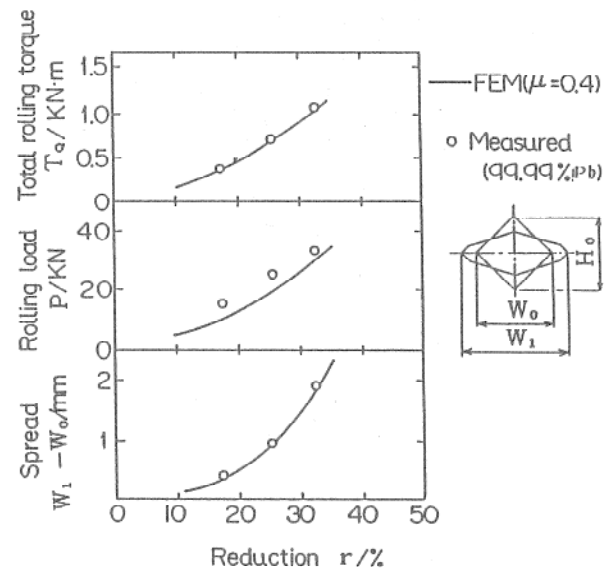


図6 スクエア・ダイア圧延の計算結果と実験結果との比較

異なっている。このような圧延については、収束計算の過程におけるロールと材料との幾何学的な接触条件の処理と速度境界条件の処理、および摩擦エネルギーを精度良く計算することが重要となる。

図6には、正方形断面の鉛ピレットをダイヤ形に圧延するスクエア・ダイヤ圧延の計算例を示す。幅広がり量や圧延荷重、圧延トルクについて実験結果と比較したものであるが、いずれの項目についても計算結果は実験結果と非常に良く一致している。この結果から、カリバーロールのようにロール径が異なる圧延も解析が可能であることが示された。さらに、従来の上界法などでは示すことができなかった応力分布なども、図7に示すように明確に示すことができた。このように応力が定量的に得られた結果は、特に割れなどのきずの発生に関して厳しい線材圧延における操業方法の改善や操業工程そのものの見直しを可能としている。線材圧延の粗圧延工程ではカリバーロールを使用することがほとんど常識となっていたが、このような解析結果を考慮した結果、カリバーロールよりもフラット(円柱)ロールを用いたほうが有利であることが示され、実機にも導入されている。

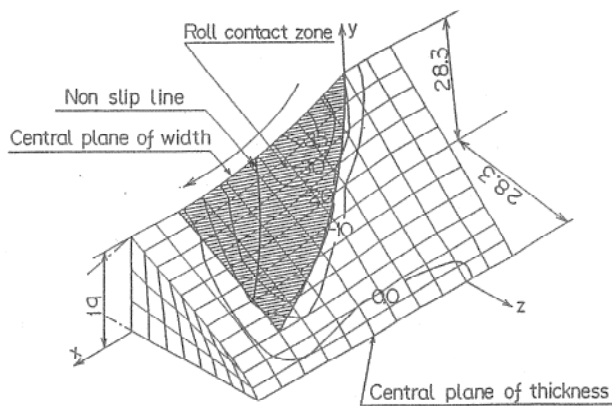


図7 スクエア・ダイヤ圧延における圧下方向の応力分布

3.4 H形鋼の圧延における応力分布⁴⁾

H形鋼の曲げ強度はフランジの断面積により決まりウェブはフランジを接続する役割しかないという材料力学的な見地から、H形鋼の圧延ではウェブをより薄くすることが積極的に行われている。このような圧延では、ウェブに圧縮

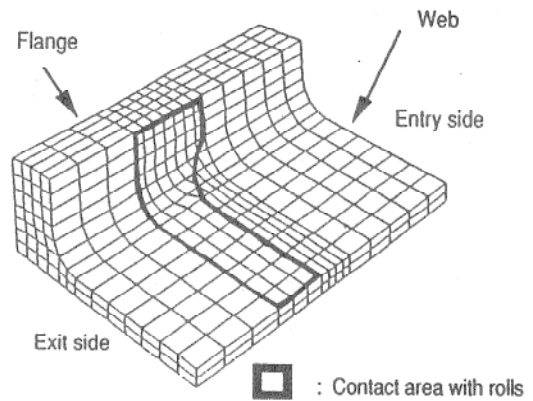
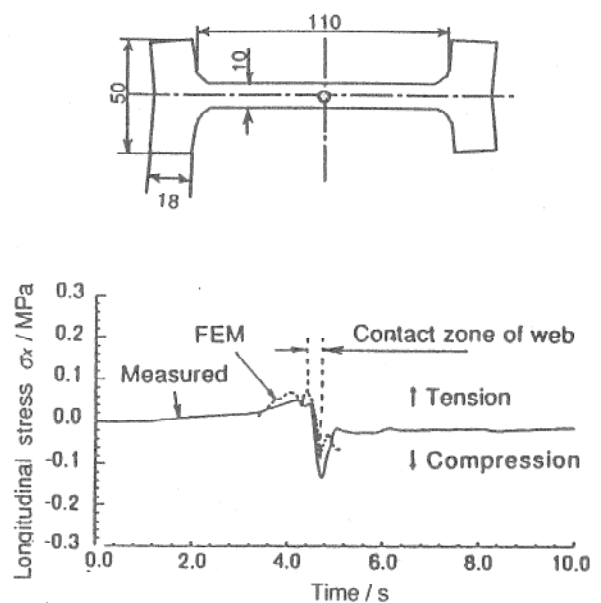


図8 H形鋼圧延の解析モデル



(Web reduction ratio 8.2%, flange reduction ratio 9.3%)

図9 ウェブ中心における圧延方向応力の計算値と実験値との比較

応力が発生し、ウェブ波と呼ばれる座屈を発生する。

このようなH形鋼に発生する圧縮応力を定量的に把握することを目的として行ったH形鋼圧延の解析モデルを図8に示す。また、この解析により得られたウェブセンタの応力の変化をプラスチック実験と比較したものが図9である。ロール入口においてフランジのみが圧下されウェブに引張応力が発生し、その後ウェブも圧下されて大きい圧縮応力となっている。この圧縮応力はロール出側に向けて低下している。この結果は実験結果と非常に良く一致しており、このような複雑な応力変化も、剛塑性有限要素法に

よる解析が有効であることが示された。

4. 実機のプロセス開発への適用

剛塑性有限要素法によるシミュレーションの有効性は、実機のプロセス開発における変形挙動の予測や荷重などの設備仕様の決定に対して非常に重要な役割を果たす。ここでは、熱間圧延工場における幅サイジングプレスの開発における剛塑性有限要素法シミュレーションの適用例および板クラウン解析の例を示す。

4.1 サイジングプレスの開発

従来のロールによる幅変更圧延では、先後端に大きいフィッシュテイルができることや幅端部に大きいドッグボーンが生成することが解析により明確に示された。また、この原因はスラブとロールとの接触長が小さいことにあることが示された。したがって、ロール径を大きくすることが最も有効な方法であるが、設備規模の巨大化に伴う投資効率の低下や、設備やロールの維持費の増大をもたらすという現実的な制約から実現には至っていない。

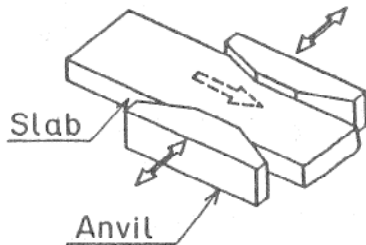


図10 幅サイジングプレスの概念図

この対策として創案されたものが、幅サイジングプレスである。サイジングプレスは、図10に示すように、入側に角度の小さい傾斜部を、それに続く出側に平行部をつけた金型で比較的小さい振幅で大きく幅圧下を行うものである。

サイジングプレスの実機化において、最も重要な検討課題は、サイジングプレス圧下におけるドッグボーンや先後端の突出量を示すクロップ量の定量的な把握と、それらのエッジング圧延による幅圧下との比較によりサイジングプレスの優位性を検証することである。これらの計算における1例として、図11に幅圧下量に対するドッグボーンの最大厚を比較して示す。こ

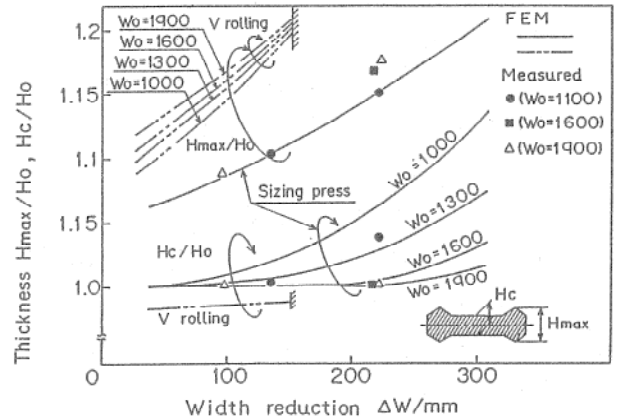


図11 サイジングプレスとエッジング圧延との断面手法の比較

の図は、実機化に先立って行われた計算結果であるが、実機稼働後のデータと良く一致している。また、サイジングプレスのドッグボーンはエッジング圧延のそれよりも非常に小さくなることが予想された。同様に、サイジングプレス圧下によるスラブ先後端の突出量や、幅圧下の加工エネルギーなども、エッジング圧延に比べて小さくなることが示され、大幅圧下にはサイジングプレスの方が優れているという結論が下された。

サイジングプレス圧下における特殊な課題としてスラブの座屈がある。スラブは、厚さ/幅の比がおよそ3から10の矩形断面である。したがって、幅圧下量を大きくするとスラブに座屈が発生することが推定される。従来のロールによる幅圧延では、幅圧下量を大きくするとすべりが発生してスラブがかみ込まれなくなるという別の要因のため、スラブの座屈が検討された例は非常に少ないが、サイジングプレスではかみこみ限界が問題とならない範囲に金型の傾斜角を設定できるため、座屈解析が重要となる。

サイジングプレスによる幅圧下において生じる座屈は、弾性体に見られるような分岐問題というよりも幅圧下にもなるスラブの曲げ変形の進展というべきものである。

図12に、座屈解析によるスラブ先端の変形形状を示す。座屈量は幅の広いスラブにおいて大きくなっている。この座屈は、図13に示すようにスラブの先端の圧下と後端の圧下とで異なっている。すなわち、先端では平行部間で発

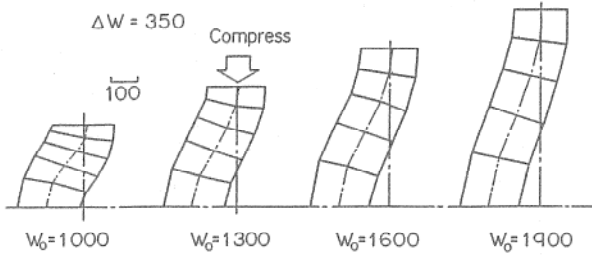


図12 幅圧下におけるスラブ先端の座屈形状

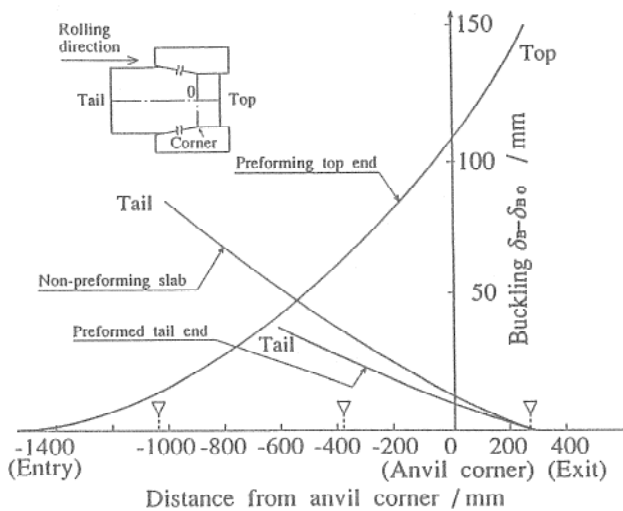


図13 スラブ先後端と金型との位置関係とスラブ長さ方向の座屈量の分布

生し、後端では金型の傾斜部間で発生している。したがって、座屈を防止するためには、座屈防止押さえを金型の平行部と傾斜部の両方に設置する必要のあることが明らかになった。この結果は、実機に適用され実操業において座屈の防止に成果を挙げている。

4.2 板クラウン解析

幅中央から幅端部に向けて板厚の小さくなる板厚分布を板クラウンと呼ぶ。仕上圧延ではこの板厚分布を目標範囲に制御する。このため圧延による変形特性の把握および制御モデルが必要となる。このような課題に対する剛塑性有限要素法の適用は最近多くの研究者により行われている。これらはいずれも、板の塑性変形とロールの弾性変形とを交互に計算して定常圧延状態の解を得るものであり、ロール変形の修正量を板厚あるいは収束の段階で変えるなど収束方法に工夫を凝らしている。

図14には、ロール替え直後の熱膨張も摩擦もないロールによる仕上圧延の全スタンドの変

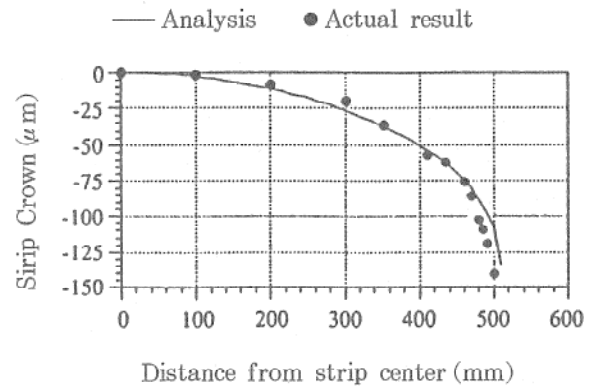


図14 仕上7スタンド圧延後の板クラウンの計算値と実測値との比較

形を順次解析したことにより得られた仕上出側の板クラウンの計算値と測定値とを比較して示している。計算結果は、実験結果と非常に良く一致している。仕上圧延では、対象スタンド入側の板クラウンが出側のクラウンに影響を及ぼす、いわゆるクラウンの遺伝と、ロールクラウンの板への転写を定量的に把握することが重要である。剛塑性有限要素法ではロールの弾性変形との連成解析により、これらの点についても実機の制御モデルを作成するレベルに達している。仕上スタンド間では板クラウンを実測することはほとんど不可能に近いため、解析結果は実測値による十分な検証を受けていない状況であるが、現実にはこれに先行して実機の制御モデルに適用されている。

5. おわりに

圧延の現場における三次元変形に関する代表的課題である幅変更、カリバー圧延、板の蛇行H形鋼のウェブ波などの変形解析について述べた。また、サイジングプレスの開発、クラウン制御の実施においては、剛塑性有限要素法が重要な場面で役立ったことを紹介した。

圧延解析では、今だ汎用解析のプログラムは見当たらないが、その解析レベルは確実に進んでおり、一部とは言え、剛塑性有限要素法は実機設計の支援ツールとしての役目を果たしつつある。新しいプロセスの開発には、変形挙動の詳細な把握という観点だけでなく、開発の効率化、開発期間の短縮といった局面からもこのような解析法の発展が期待される。

生産と技術

なお、本研究を進めるにあたって数々の御指導をいただいた大阪大学教授 小坂田宏造先生に深く感謝致します。また、執筆の機会をいただいた大阪大学教授 久保司郎先生に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Mori, K. & Osakada, K. : Numerical Methods in Industrial Forming Processes, (1982), 747
- 2) Mori, K. : Analysis of Metal Forming Processes by Finite Element Method for Compressible Rigid-Plastic Materials, (1983), 27, Doctor Thesis of Kyoto Univ.
- 3) 井口ら : 第41回塑性加工連合講演会, (1990), 75
- 4) 井口ら : 塑性と加工, 35-403 (1994), 959

