

剛塑性有限要素法による条鋼圧延の解析

Analysis of Long-product Steel Rolling by Using Rigid-Plastic Finite Element Method

関 和 典^{*⁽¹⁾} 山 田 健 二^{*⁽²⁾} 井 田 真 樹^{*⁽³⁾} 濱 渦 修 一^{*⁽⁴⁾}
Kazunori SEKI Kenji YAMADA Shinji IDA Shuichi HAMAUZU

林 慎 也^{*⁽¹⁾} 阿 高 松 男^{*⁽⁵⁾}
Shin-ya HA YASHI Matsuo ATAKA

抄 録

三次元定常剛塑性FEMコードと、解析の初期条件として合理的な流線形状を作成するプリ処理コードを開発し、条鋼圧延の汎用解析システムを構築した。本システムは、任意の材料形状、ロール形状及びロール配置に対応することができ、条鋼圧延のほぼ全てのプロセスのシミュレーションが可能である。システムの適用例として、中空材の圧延、山形鋼の圧延、H形鋼の拡幅圧延について解析を行った。

Abstract

Three-dimensional steady-state rigid-plastic FEM codes and pre-processing codes to create a reasonable streamline as the initial conditions for analysis, have been developed, and a generalized analysis system for long-product rolling has been constructed. The system can be applied to any cross sectional shape of materials, any roll caliber geometry and any roll arrangement, making it possible to simulate almost all rolling processes for long-product. As examples of the system's application, rollings of hollow bloom and angles, and widening rolling of H-beam have been analyzed.

1. 緒 言

条鋼の圧延は、三次元変形であり、多様な孔型及びミル形式が用いられることから、理論的な取扱いが困難であり、その工程設計には熟練者の経験が重要な役割を占めてきた。条鋼の圧延特性を解明する試みは主に実験によって行われてきたが、広範囲かつ体系的な情報を得ることは困難であった。

近年、計算機の大容量化・高速化に伴い、三次元剛塑性有限要素法(FEM)を用いた条鋼圧延の解析が行われるようになり¹⁻⁴⁾、棒鋼⁵⁾及びアングル材⁶⁾の変形・負荷特性の検討、FEMの解析結果のデータベース化によるH形鋼のブレイクダウン工程のエキスパートシステムの構築⁷⁾などが行われている。著者等も三次元剛塑性FEMコードを開発し、マンドレル圧延⁸⁾、H形鋼のユニバーサル圧延⁹⁾の解析を行っている。

条鋼の圧延解析を効率的に行うためには、解析の精度に加えて、汎用性が必要とされる。そこで、汎用プリ処理コードを作成し、既報の三次元剛塑性FEMコード⁹⁾と併せて、条鋼圧延の汎用解析システムを構築した。本論文では解析システムの概要と、中空材の圧延、山形鋼の粗圧延及びH形鋼の拡幅圧延について解析例を示す。

2. 条鋼圧延の解析システム

2.1 解析システムの概要

本システムによる圧延解析の流れを図1に示す。入力データは、材料の入側断面形状、ロールの形状及び配置であり、これらをパラメータで入力する。プリ処理では、解析に必要な初期流線形状(要素分割)及び境界条件が自動で設定される。変形解析では、圧縮性材料の塑性力学に基づく方法¹⁰⁾による速度場解析と、接触解析に基づく流線形状の修正が行われ、節点速度、歪み、応力などが計算される。解析結果の出力は一般的なプリ・ポストプロセッサを用いて行う。また、当該パスのFEM解析結果から次パスの入力データを作成するコードも有しており、多パス圧延の解析も可能である。

以下では、本システムの特徴である、流線形状の修正方法、及び初期流線形状の仮定方法について述べる。

2.2 流線形状の修正方法

速度場解析に必要な境界条件を決定するためには、材料の表面形状を仮定する必要がある。定常解析では、この仮定した材料形状と、得られた速度場を積分して計算される流線形状とは最終的に一致する必要がある。ところが、一般には両者は必ずしも一致しないので、

*⁽¹⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 圧延プロセス研究部 研究員
 *⁽²⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 圧延プロセス研究部 主任研究員
 *⁽³⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 部長代理

*⁽⁴⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 圧延プロセス研究部 部長
 *⁽⁵⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 圧延プロセス研究部 研究審議役 工博

両形状の不整合を修正し、境界条件を修正する方法が必要となる。解析の精度及び収束性は、この流線形状及び境界条件の修正方法によって大きく変化する。

本システムの流線形状及び境界条件の修正方法⁹⁾を図2に示す。流線形状の修正は2段階に分けて行われる。第1段階は、材料の表面節点のロールとの接触・非接触を決定するための収束計算であり、以下に示す操作が境界条件の収束まで繰り返される。

- (1) 仮定した境界条件の下で得られた速度場を積分し、材料の流線形状を求め、ロール形状と比較する。
- (2) ロールと非接触と仮定した節点がロールに侵入している場合は、

境界条件を修正し、ロールに接触する節点とする。

- (3) ロールに接触すると仮定した節点がロールから離れている場合は、その流線上でロールと接触を開始する節点の境界条件を変更し、ロールと非接触とする。
- (4) ロールと接触する節点をロール表面上に移動する。
- (5) ロールと接触する節点の移動に対応して、材料内部及び自由表面の節点も移動し、流線形状が滑らかになるようにする。

第2段階では、ロールと材料の接触領域を厳密に決定するために、材料の表面節点の圧延方向位置を調整する。第1段階と同様に速度場を積分し、流線形状を求め、ロール形状との比較を行う。流線がロールに侵入している場合は、ロールと接触を開始する節点の位置を上流側に移動し、ロールに接触する節点がロールから離れている場合は、接触開始位置を下流に移動する。以上の操作を接触領域が収束するまで繰り返す。本方法によって、材料とロールの接触開始位置近傍の要素分割を細かくできない場合でも、接触領域を精度良く求めることができる。

2.3 材料の初期流線の仮定方法

前節に示した境界条件の修正方法を導入しても、解析初期に仮定する流線形状及び境界条件が不適切な場合は、計算の精度及び収束性が悪化し、解が得られない場合もある。

一般に圧延の定常解析の初期流線は、材料とロールとの交絡計算によって決定される。しかし、図3に示すように、材料の上面あるいは下面のみがロールと接触する場合は、材料はせん断を生じ、材料のロールと接触していない部分も変形する。本システムでは、このせん断変形を考慮し、以下に示すように初期流線形状を決定する(図4参照)。

- (1) 材料の入側断面形状を圧延方向に引き延ばし、圧延方向の各分割点毎にロールのプロフィールと比較する。
- (2) 材料のロールと交絡する部分はロール表面上に移動する。

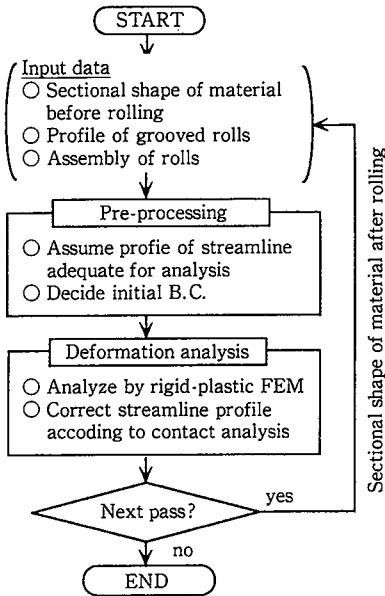


図1 解析のフロー

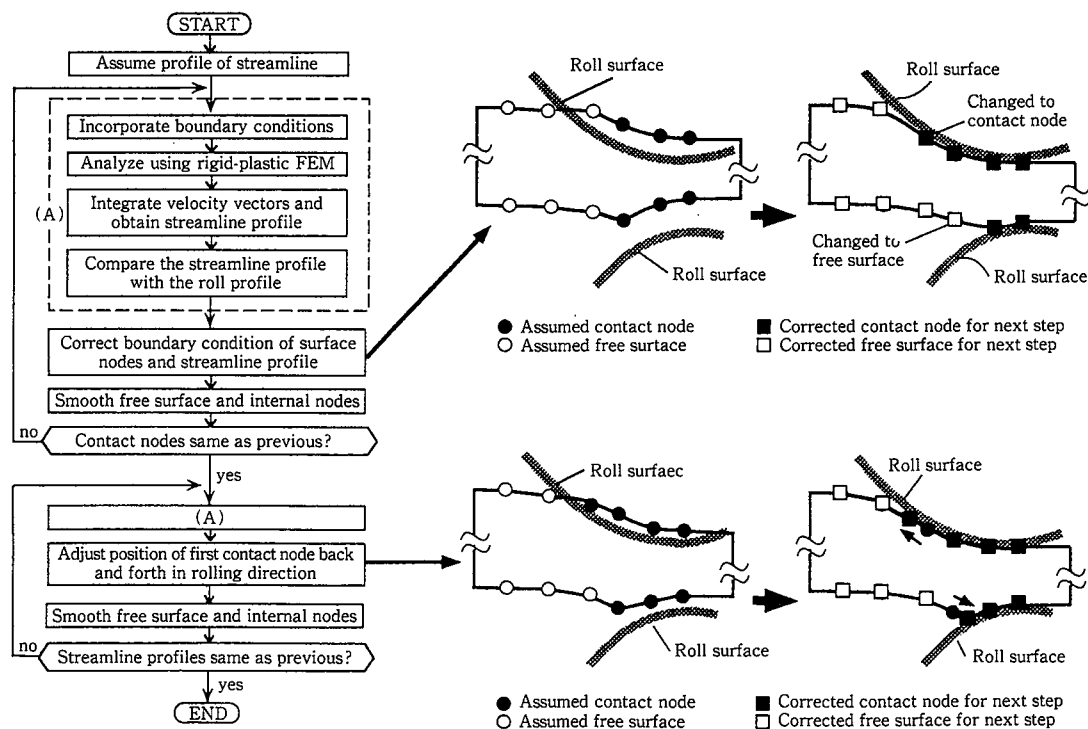


図2 流線形状及び境界条件の修正方法

- (3)上記の移動に対応して、材料の逆側の表面を移動させる。
- (4)再度、材料形状とロールのプロフィールを比較し、材料のロールに侵入している部分をロール表面に移動する。

3. 条鋼圧延の解析

3.1 中空材圧延の解析

連続鋳造の後期に未凝固部を含むブルームを圧下することによって、中心偏析やセンターポロシティが低減されることが知られている¹¹⁾。しかし、未凝固部をふくむ鑄片の圧下は内部割れの原因となる。これらの現象は、凝固シェルの変形によって生じる液相の流動、及びシェルの内面に発生する応力と関係があると考えられる。これまでに連続鋳造での圧下を対象とし、液相を含む材料の圧延解析が行われている¹²⁾が、凝固シェルが圧着するような圧下率の大きい条件についての解析は行われていない。そこで、本システムを用いて、圧下率が大きい場合の未凝固圧下の特性を調査した。

3.1.1 解析方法及び解析条件

凝固シェルが圧着するような圧下量が大きい条件では、シェルの変形に及ぼす液相の影響は小さいと考え、液相を含まない中空のブルームについて解析を行った。解析モデルを図5に示す。対称性を

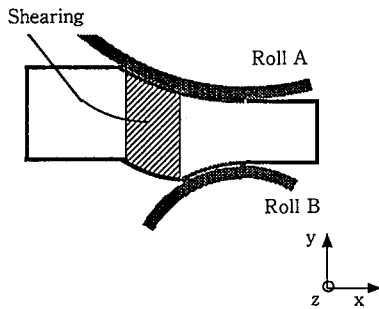


図3 せん断による材料の変形

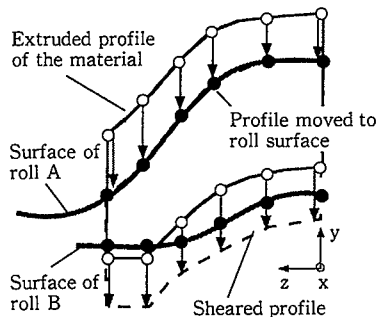


図4 初期流線形状の仮定方法

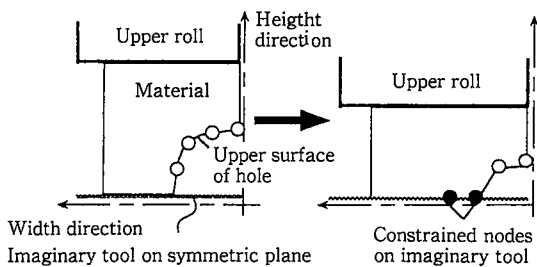


図5 中空材圧延の解析モデル

考慮して1/4断面について解析を行った。圧延ロールの他に対称面上に摩擦係数0の平行工具を仮定した。中空部の表面上の節点が対称面に達すると、この工具によって、拘束されるので圧下方向の速度成分は0となり、中空部の上・下面の圧着を模擬することができる。

解析モデルの精度を確認するためのプラスチシン実験との比較と、変形特性に及ぼすカリバー形状の影響の検討を行った。解析条件を表1及び表2に示す。検討したカリバーの形状を図6に示す。幅中心部の形状(円弧あるいはフラット)と幅拘束を変化させた。

3.1.2 解析結果

中空部の初期直径が35mmの場合について、圧延によるブルームの断面形状の変化の解析結果及び実験結果を図7に示す。中空部の形状は円から楕円に変化し、その後、側面部から圧着を開始する。この条件では、ロールバイト出口で中空部は完全に閉鎖する。圧延中の中空部高さ変化の解析結果及び実験結果を図8に示す。同一の圧延方向位置では、中空部の初期直径が大きいほど、中空部高さの減少量は大きくなる。いづれの条件でも、解析結果は実験結果とよく一致している。

圧延中の中空部面積の推移に及ぼすカリバー形状の影響を図9に示す。今回解析を行った範囲では、カリバー形状を変更しても、中空部面積の推移はほとんど変化しない。

圧延中に中空部表面の幅中心部に発生する圧延方向応力に及ぼすカリバー形状の影響を図10に示す。応力は降伏応力で無次元化した。圧延方向応力はロールバイトの中央部で最大となり、中空部が圧着した後の応力は圧縮になる。この特性に及ぼすカリバー形状の影響は小さい。

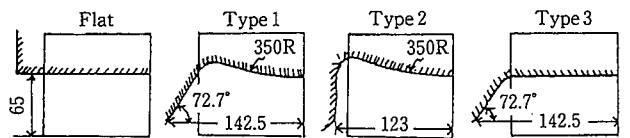
圧延中の中空部表面の幅中心部に発生する幅方向応力に及ぼすカ

表1 中空材圧延の解析条件 (実験との比較)

Initial dimension of bloom/mm	110×110
Initial diameter of hole/mm	15,25,35
Roll diameter/mm	350
Caliber geometry	Flat
Reduction in height/%	40
Peripheral speed of roll/m·min ⁻¹	1.0
Coefficient of friction	0.3(Lubrication of talc)
Yield stress/MPa	$\sigma = 0.182\epsilon^{0.11}$

表2 中空材圧延の解析条件 (カリバー形状の影響)

Initial dimension of bloom/mm	220×220
Initial diameter of hole/mm	30,50,70
Roll diameter/mm	700
Reduction in height/%	40
Peripheral speed of roll at width center/m·min ⁻¹	2.0
Coefficient of friction	0.3
Yield stress/MPa	$\sigma = 72\epsilon^{0.21}\epsilon^{0.13}$



Type	Flat	1	2	3
Profile of width center	Flat	Arc	Arc	Flat
Constriction	None	Weak	Firm	Weak

図6 カリバー形状

リバー形状の影響を図11に示す。幅方向応力はロールバイトの入口で最大となり、中空部が圧着した後の応力は圧縮となる。幅拘束が強いあるいは中心部が平坦なカリバーを用いると、中空部が圧着した後に発生する幅方向の圧縮力が大きくなる。

圧延方向及び幅方向応力の最大値に及ぼす中空部の初期直径及びカリバー形状の影響を図12に示す。圧延方向応力の最大値は中空部の初期直径及びカリバー形状の影響をほとんど受けず、降伏応力の

約90%と大きい。このことから、L断面割れの発生が懸念される。幅方向応力の最大値は、中空部の直径が大きくなるに従って大きくなる。また、幅中心部が円弧のカリバーを用いると大きくなる。中空部の初期直径が70mmのブルームを幅中心部の形状が円弧のカリバーを用いて圧延する場合は、幅方向応力と圧延方向応力の最大値はほぼ等しくなる。このことから、圧延条件によって、割れの変化することが予想される。

3.2 山形鋼の圧延

3.2.1 解析条件

材料形状が上下非対称な圧延においては、パスラインを変更すると、圧延後の材料形状が変化する。このパスラインの影響を山形鋼

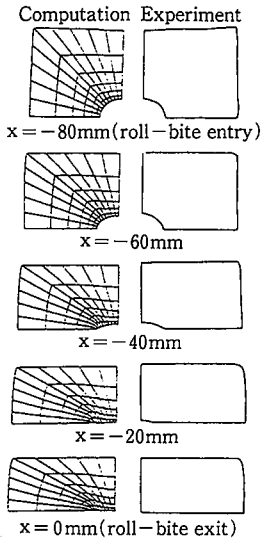


図7 圧延中の材料断面形状の変化 (中空部初期直径35mm)

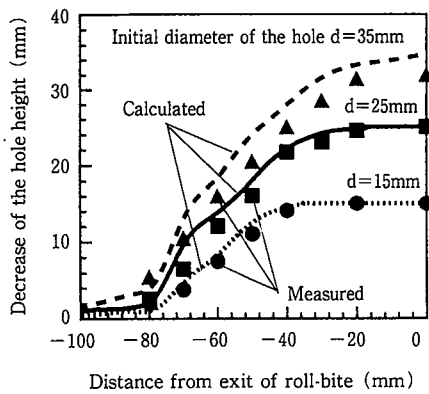


図8 圧延中の中空部高さの推移

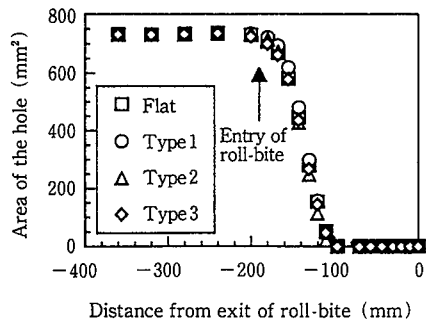


図9 圧延中の中空部面積の推移 (中空部初期直径30mm)

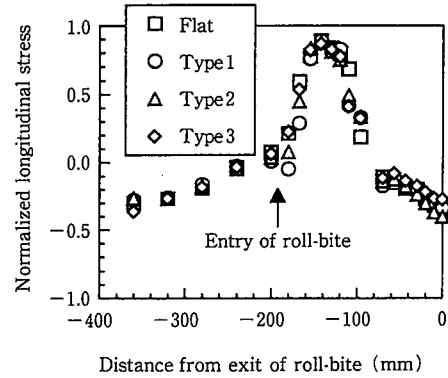


図10 中空部幅中心部に発生する圧延方向応力に及ぼすカリバー形状の影響 (中空部初期直径30mm)

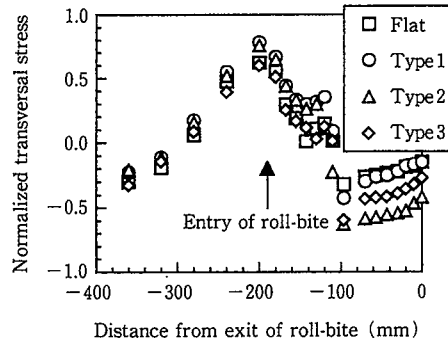


図11 中空部幅中心部に発生する幅方向応力に及ぼすカリバー形状の影響 (中空部初期直径30mm)

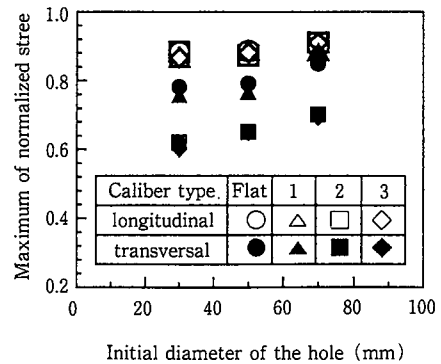


図12 圧延方向応力及び幅方向力の最大値に及ぼす中空部初期直径とカリバー形状の影響

の圧延を例にとって検討した。解析を行った材料形状及びロール形状を図13に示し、解析条件を表3に示す。なお、材料が上下ロールと同時に接触を開始する場合のパスラインを0とし、上ロールに先に接触する場合を+とした。

3.2.2 解析結果

解析初期に仮定した接触領域及び収束後の圧延圧力分布を図14に示す。パスラインが-5mm及び0mmの場合は圧延圧力分布は同様の傾向を示すが、パスラインが+5mmの場合は、下ロールの幅方向

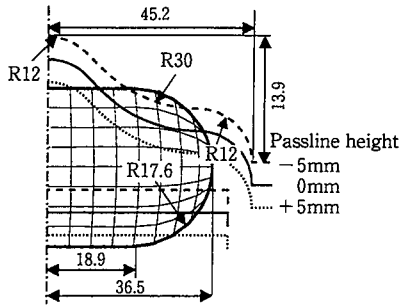


図13 圧延前の材料形状とロール形状

表3 山形鋼圧延の解析条件

Roll diameter at width center/mm	120 (Upper) 130 (Lower)
Peripheral speed of rolls at width center/m·min ⁻¹	4.0
Passline height/mm	-5, 0, 5
Coefficient of friction	0.3
Yield stress/MPa	$\sigma = 82\epsilon^{0.21}\epsilon^{0.13}$

端部の圧延圧力がロールバイト入口付近で大きくなる。これは、パスラインが-5mm及び0mmの場合は下ロールと材料との接触開始がほぼ同時であるのに対して、パスラインが+5mmの場合は上ロールの圧下によって材料の幅方向端部が下側に移動し、幅方向端部から接触を開始することに起因する。解析初期に仮定した接触領域と収束後の接触領域を比較すると、予変形によって接触開始位置は変化するが、両者の形状はほぼ一致しており、本システムの初期流線の決定方法が妥当であることが分かる。

圧延後の材料形状に及ぼすパスラインの影響を図15に示す。パスラインを下げるほど、すなわち、下ロールとの接触長が長いほど、頭頂部への充填及び幅広がりが増加する。材料の相当歪分布に及ぼすパスラインの影響を図16に示す。材料の上ロールと接触する面で相当歪は最大になり、この部分では、パスラインの影響は小さい。

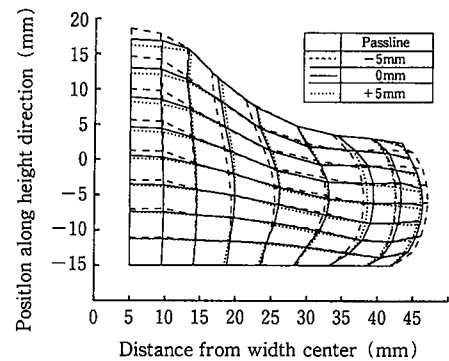
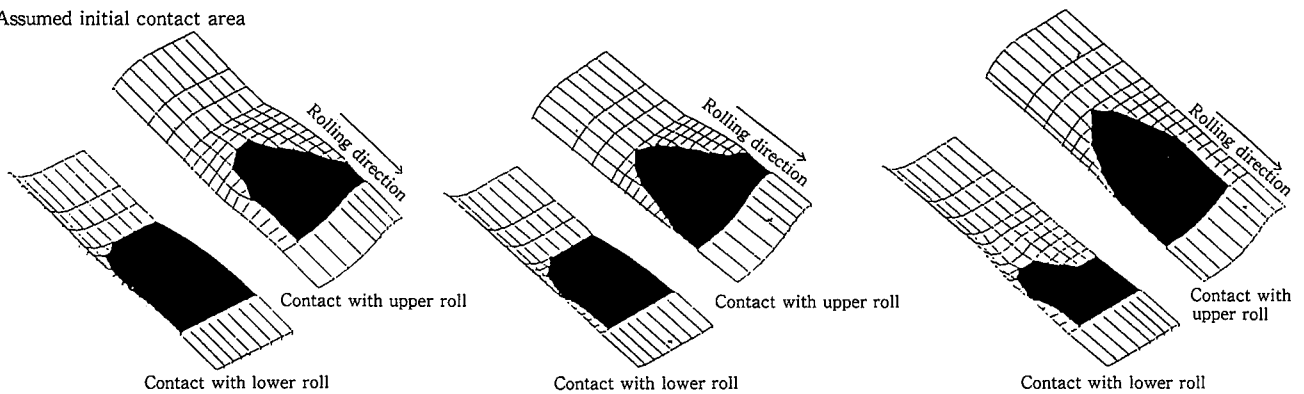


図15 圧延後の材料形状に及ぼすパスラインの影響

Assumed initial contact area



Distribution of rolling pressure

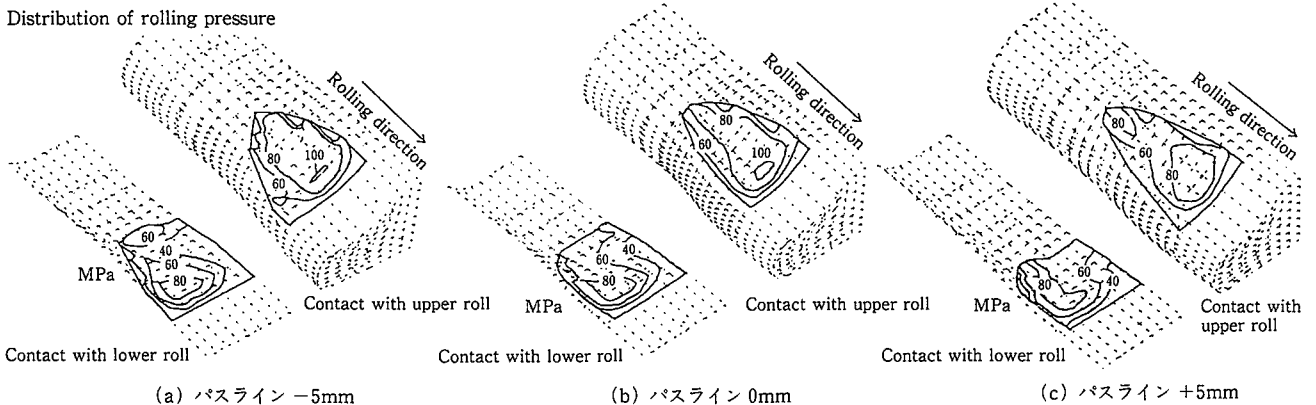


図14 初期接触領域及び圧延圧力分布

下ロールと接触する面の板幅方向端部の相当歪はパスラインを上げるに従って大きくなる。

3.3 H形鋼の拡幅圧延

外法一定のH形鋼を製造する技術として、スキューロールミルを用いて、ウェブを拡幅する技術がある¹³⁾。スキューロールミルによる拡幅圧延法を図17に示す。上下、左右4本のロールが、圧延方向に対してクロス角 α 、鉛直方向に対してロール傾斜角 β を持つように配置されて、ロールの側面によってフランジを押し広げつつ、ウェブ高さ方向の端部を圧下し、ウェブを拡幅する。

3.3.1 解析条件

解析条件を表4に示す。クロス角を0,5,10とし、その影響を調査した。スキューロールミルによる拡幅圧延では、ロール間隔が一定の場合、クロス角を大きくするにしたがって、拡幅量が大きくなる。そこで、本解析では各条件の拡幅量が等しくなるようにロール間隔を調整した。

3.3.2 解析結果

圧延後の断面形状に及ぼすクロス角の影響を図18に示す。クロス角を大きくするに従って、フランジの倒れ角及びフランジ幅が増加する。クロス角によって、フランジ幅が増加する理由は以下のように説明できる。スキューロール圧延では、ロールバイトの前後に、フランジの内側面を押し広げることによって拡幅が行われる領域が

存在する。ロールバイト前の領域では、フランジ内側面がロールによってすり下げられるので、フランジ幅が減少する。ロールバイト後の領域では、フランジ内側面がロールによってすり上げられるので、フランジ幅が増加する。ロールバイト前後の領域はクロス角によって変化し、クロス角を大きくすると、ロールバイト前の領域の拡幅が減少し(ロールのすり下げを受ける領域が狭くなり)、ロールバイト後の領域での拡幅が増加する(すり上げを受ける領域が広がる)ので、フランジ幅は増加する。

表4 H形鋼の拡幅圧延の解析条件

Initial dimension of H-beam/H×B× t_w/t_f	570×200×9.8/14.7
Roll diameter/mm	900
Cross angle/degree	0,5,10
Inclination angle/degree	5
Web height expansion/mm	30
Coefficient of friction	0.3
Yield stress/MPa	$\sigma = 150 \varepsilon^{0.21} \varepsilon^{0.13}$

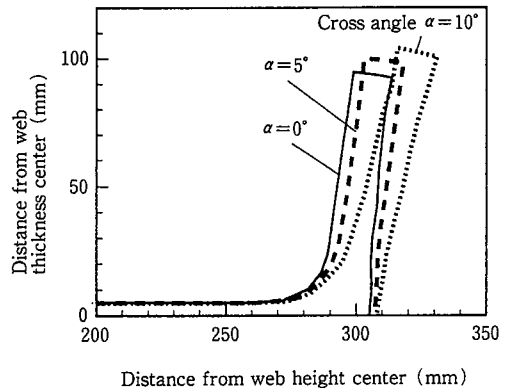


図18 圧延後の材料形状に及ぼすクロス角の影響

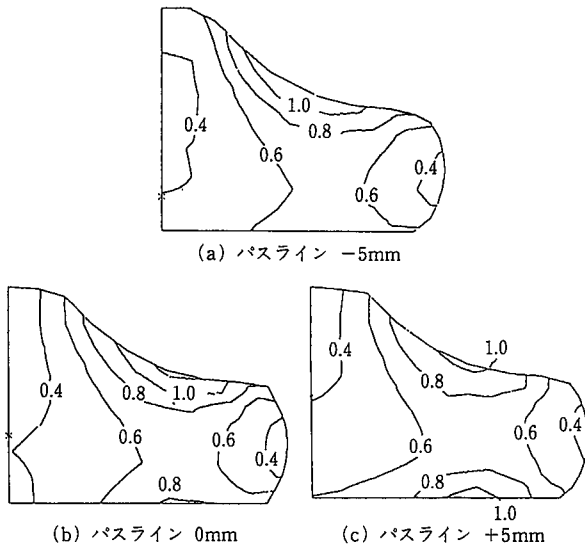


図16 相当歪み分布に及ぼすパスラインの影響

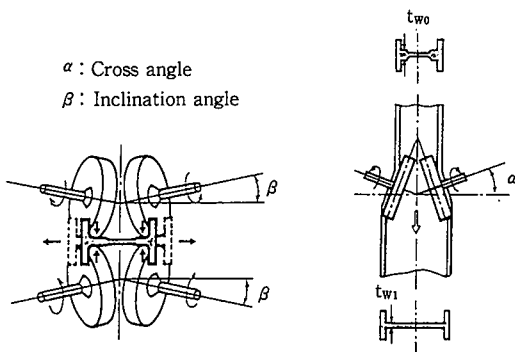


図17 スキューロールミルによる拡幅圧延

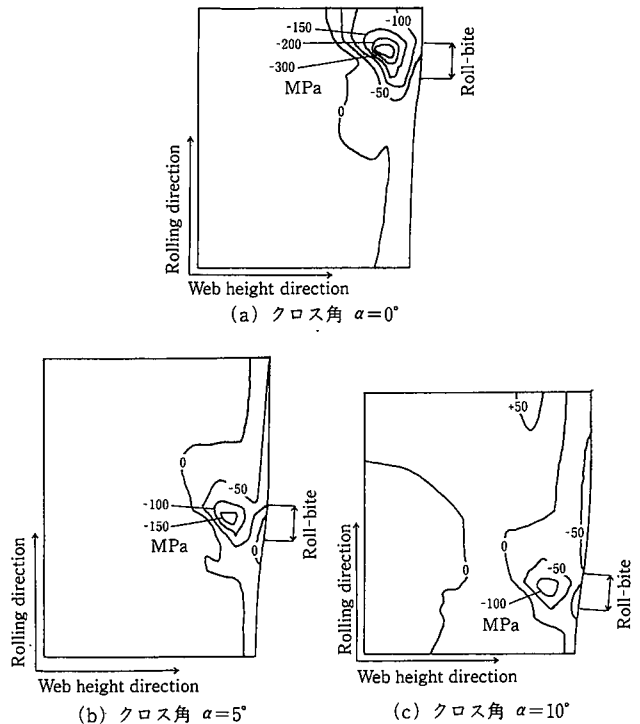


図19 圧延方向応力分布に及ぼすクロス角の影響

図19に厚さ方向中心部について、圧延方向応力分布に及ぼすクロス角の影響を示す。圧延方法応力はクロス角によって大きく変化する。特に、クロス角を大きくすることで、ウェブ高さ方向の端部の圧縮力が低減する。これはクロス角を大きくすることによって、材料がウェブ高さ方向に流動しやすくなり、ウェブ高さ中央部と端部との延伸差が低減することに起因する。

4. 結 言

剛塑性有限要素法を用いた条鋼圧延の解析システムを開発した。本システムは、任意の材料形状、ロール形状及びロール配置に対応した圧延解析が可能であり、研究・開発及び既存プロセスの操業条件の改善などに活用されている。

参 照 文 献

- 1) Bertrand, C. et al. : NUMIFORM 86. 1986, p207-212
- 2) Mori, K. et al. : NUMIFORM 89. 1989, p337-343
- 3) 二階堂英幸 ほか：塑性と加工. 31(350), 378(1990)
- 4) 豊島史郎 ほか：塑性と加工. 31(350), 398(1990)
- 5) 柳本潤 ほか：塑性と加工. 34(384), 75(1993)
- 6) 柳本潤 ほか：塑性と加工. 36(408), 41(1995)
- 7) 森謙一郎 ほか：塑性と加工. 34(384), 100(1993)
- 8) Yamada, K. et al. : NUMIFORM 89. 1989, p375-308
- 9) 井田真樹 ほか：平成2年度塑性加工春季講演会講演論文集. 1990, p61-64
- 10) 森謙一郎 ほか：日本機械学会論文集A. 45(396), 965(1979)
- 11) 竹原鋭郎 ほか：鉄と鋼. 60(7), 138(1974)
- 12) Pawelski, K. et al. : NUMIFORM 92. 1992, p743-747
- 13) 生田和重 ほか：第40回塑性加工連合講演会講演論文集. 1989, p389-393