特 集 6
研究解説
UDC 621.771.06：621.7.011：539

数値圧延機の開発と応用

Development and Application of the Computational Rolling Mill

柳 本　　潤*
Jun YANAGIMOTO

薄板材・厚板材などの板材圧延ならびに棒・線・形材などの異形材圧延に用いる圧延機・ロール・加工工程などの設計ならびに最適化には，圧延加工時の被加工材の三次元塑性変形の解明が必須の条件となる．本解説では，圧延加工時に被加工材に生じる多様な三次元塑性変形の系統的な解明を目的として構築された，数値圧延機の概要ならびに適用事例を示す．

1．緒　　言

薄板材・厚板材などの板材圧延ならびに棒・線・形材などの異形材圧延においては，被加工材に多様な三次元塑性変形が生じる．圧延加工に用いる圧延機・ロール・加工工程などの設計ならびに最適化には，この三次元塑性変形の系統的な解明が必須の条件となる．従来より，板材圧延ならびに異形材圧延それぞれの分野において，さまざまな理論解析技術の開発が行われてきた．

薄板材・厚板材などの板材圧延においては，圧延機ならびにロールの変形が，被圧延材の三次元塑性変形に及ぼす影響を無視し得ない場合が多い．そのため，圧延機およびロールの弾性変形と被圧延材の塑性変形とを連成して解析し得る手法の開発が行われてきた．また板材圧延は，異形材圧延に比較して被加工材の塑性変形が単純であるため，解析的近似が容易である．したがって，この分野を対象とした従来の解析手法の多くは，スラブ法（初等解析法）に基づく被圧延材の三次元塑性変形解析手法を，弾性学・材料力学的手法に基づくロールならびに圧延機の三次元弾性変形解析手法（分割モデル）と連成させることにより構築されている[1)~4)]．また，被圧延材の三次元塑性変形の解析を，三次元剛塑性有限要素法（以下FEM）により行った研究も報告されている[5)~7)]．

一方，棒・線・形材などの異形材圧延では，圧延機ならびにロールの変形が被圧延材の三次元塑性変形に及ぼす影響を無視し得る場合が多い．反面，圧延加工中の被加工材には，複雑な純三次元的塑性変形が生じるため，解析的近似を行いスラブ法の適用をはかることが困難である．そのため，異形材圧延の分野における理論解析技術の進展は板材圧延に比較して大幅に遅れていたが，近年，エネルギ法ならびに剛塑性FEMに基づく三次元解析手法の開発に関する研究が盛んに行われつつある[8)~13)]．

上述のごとく，板材圧延ならびに異形材圧延における理論解析技術は，それぞれの分野で独自の進展を遂げてきており，圧延加工技術の高度化に大きな役割を果たしてきた．しかしながら，いずれの分野においても，さまざまな新しい圧延技術の開発が急速に進展している．そのため，従来板材圧延ならびに異形材圧延それぞれの分野において開発されてきた解析技術を統合化し，さらに高精度化・汎用化をはかることへの要求は，ますます高まりつつある．

このような要求にこたえるため，筆者は，板材圧延ならびに異形材圧延いずれの分野においても，高精度な解析を可能とする新しい連成解析システムを新たに構築した．本連成解析システムは，三次元剛塑性FEM，三次元弾性FEM，分割モデルの三種類の解析手法の連成により構築されており，板材圧延ならびに異形材圧延における圧延機・ロール・加工工程の最適化に不可欠な数値実験装置としてのさまざまな機能を有している．本解説では，図1に示す数値圧延機CORMILL（Computational Rolling Mill）Systemの構成につき述べるとともに，板材圧延ならびに異形材圧延への適用事例を示す．

2．数値圧延機CORMILL Systemの概要

以後に，本解析システムで導入した，ラグランジェ乗数法三次元剛塑性FEM，ロール変形モデルおよび接触解析法につき述べる．なお座標軸としては，軸方向をx軸，厚さ方向をy軸，圧延方向をz軸とする．

2．1　ラグランジェ乗数法三次元剛塑性FEM

ラグランジェ乗数法剛塑性FEMによる三次元解析は従来ほとんど行われていないが，その原因としては，静水圧応力を未知数とするため解析の際に対象とする連立方程式の次元数ならびに計算時間が増大すること，およ

*東京大学生産技術研究所　第2部

び，マトリックスのバンド化が煩雑であること，をあげることができる．しかしながら，ラグランジェ乗数法剛塑性FEMは，体積一定条件を高い精度で容易に満足させることができ，また，体積一定条件を厳密に満足した状態でも応力分布の厳密な解析を容易に実行することが可能である，という優れた特徴を有する．

本解析システムでは，ラグランジェ乗数法剛塑性FEMにより，被圧延材の三次元塑性変形を解析する．その汎関数ならびに停留原理は，式(1)(2)により表される[14),15)]．

$$\Phi=\int_V\left(\int\sigma'_{ij}d\dot{\varepsilon}_{ij}\right)dV-\int_{S_F}T_i\dot{u}_i dS$$

$$-\int_{S_c}F_i\tilde{\dot{u}}_i dS+\int_V\lambda\dot{\varepsilon}_{kk}dV \qquad (1)$$

$$\delta\Phi=0 \quad For\ any\ \dot{u}_i,\ \lambda \qquad (2)$$

$$\tilde{\dot{u}}_i=\dot{u}_i-\dot{U}_i$$

ただし，$\dot{u}_i$は被圧延材の速度ベクトル，$\dot{U}_i$はワークロール周速ベクトル，T_i，F_iはそれぞれ表面力および摩擦力ベクトルである．λはラグランジェ乗数であり，汎関数Φの停留時には，静水圧応力に等しい．

本解析システムでは，並列処理の導入が容易となるように，式(1)(2)の偏差応力項の離散化ならびに積分には，安定化マトリクス[16)]を併用しつつガウスの1点積分を適用し，ニュートン・ラフソン法により解を求める．また，摩擦応力としては速度依存性法則を用い，表面積分には5×5ガウス積分を適用する．

上記の式(1)(2)を各要素eについて有限要素表示し，さらに節点速度ベクトル$\{\hat{\dot{u}}^e\}$の摂動量（修正量）$\{\Delta\hat{\dot{u}}^e\}$につき展開し，三次以上の項を省略すると次式が得られる．

$$\left\{\int_{V^e}\left(g[D]+\frac{g}{\bar{\sigma}}\frac{\partial g}{\partial\dot{\bar{\varepsilon}}}\{\beta\}\{\beta\}^T\right)dV\right.$$

$$\left.+\int_{(S_c)^e}[H]dS\right\}\cdot\{\Delta\hat{\dot{u}}^e\}^N$$

$$+\int_{V^e}[B]^t\{A\}[\phi]dV\cdot\{\hat{\dot{\lambda}}^e\}^N$$

$$=\{\hat{f}_F\}+\{\hat{f}_C\}-\int_{V^e}g\{\beta\}dV \qquad (3)$$

$$\int_{V^e}[\phi]^T\{A\}^T[B]dV\cdot\{\Delta\hat{\dot{u}}^e\}^N$$

$$=-\int_{V^e}[\phi]^T\{A\}^T[B]dV\cdot\{\hat{\dot{u}}^e\}^{N-1} \qquad (4)$$

$$g=\frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\bar{\varepsilon}}} \qquad (5)$$

$$\frac{g}{\bar{\sigma}}\frac{\partial g}{\partial\dot{\bar{\varepsilon}}}=\frac{4}{9\dot{\bar{\varepsilon}}}\left[\frac{1}{\dot{\bar{\varepsilon}}^2}\left(\dot{\bar{\varepsilon}}\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\dot{\bar{\varepsilon}}}-\bar{\sigma}\right)+\frac{\Delta\dot{\bar{\varepsilon}}^*}{2}\left\{\frac{1}{\dot{\bar{\varepsilon}}}\cdot\frac{\partial^2\bar{\sigma}}{\partial\dot{\bar{\varepsilon}}^2}\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{2}{\dot{\bar{\varepsilon}}^3}\left(\dot{\bar{\varepsilon}}\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\dot{\bar{\varepsilon}}}-\bar{\sigma}\right)\right\}\right] \qquad (6)$$

$$\Delta\dot{\bar{\varepsilon}}^*=\Delta\dot{\bar{\varepsilon}}^N\fallingdotseq\alpha\Delta\dot{\bar{\varepsilon}}^{N-1} \qquad (7)$$

$$\{\hat{f}_F\}=\int_{(S_F)^e}[\phi]^T\{T\}ds \qquad (8)$$

$$\{\hat{f}_C\}=\int_{(S_c)^e}[\phi]^T\{F\}ds \qquad (9)$$

$$\{\dot{u}\}=[\phi]\{\hat{\dot{u}}^e\} \qquad (10)$$

$$\{\dot{\varepsilon}\}=[B]\{\hat{\dot{u}}^e\} \qquad (11)$$

$$[D]=[B]^T[S][B] \qquad (12)$$

$$\{\beta\}=[D]\{\hat{\dot{u}}^e\}^{N-1} \qquad (13)$$

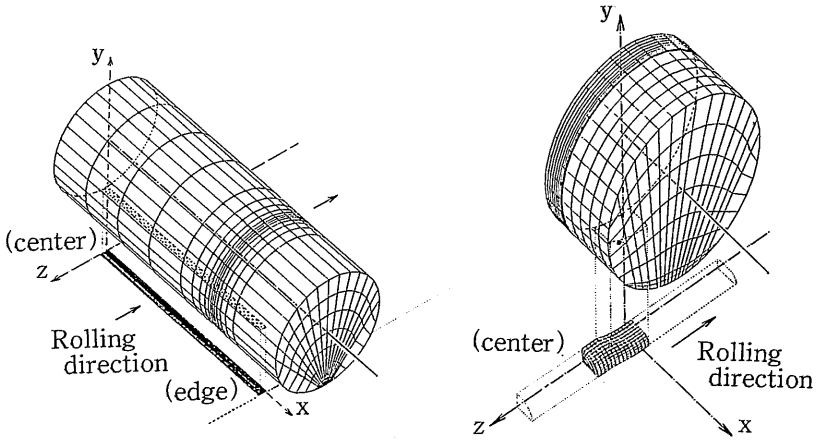
$$[H]=-h[\phi]^T[\phi] \qquad (14)$$

$$h=-f\left\{\frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{|\tilde{\dot{u}}|}{a}\right)\right\}\frac{1}{|\tilde{\dot{u}}|} \qquad (15)$$

$$a=\frac{|\dot{u}|}{1000}$$

$$\{F\}=h(\{\dot{u}\}-\{\dot{U}\}) \qquad (16)$$

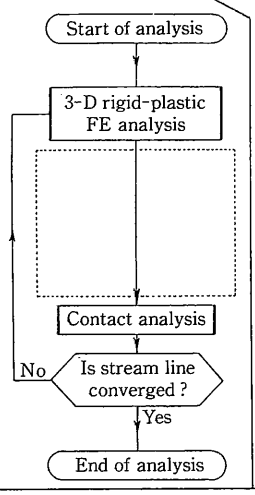
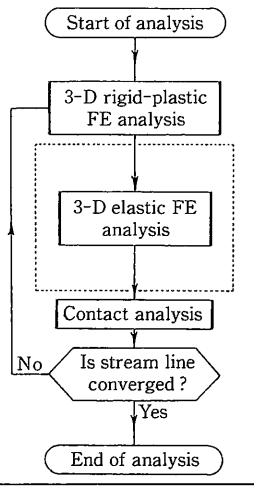
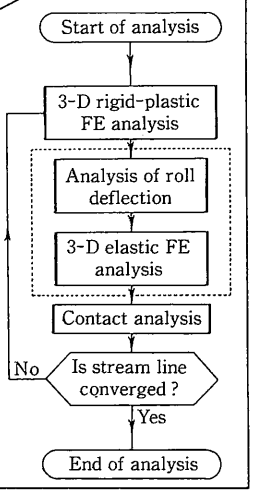
ただし，$N-1$，はそれぞれ$N-1$回目ならびにN回目



（a）板材圧延への適用例　　（b）線材圧延への適用例

図1　数値圧延機　CORMILL Systemの構成

表1　ロール変形モデルとフローチャート

ロール変形モデル		モデルⅠ－1	モデルⅠ－2	モデルⅡ－1	モデルⅡ－2
ワークロールの弾性変形の取り扱い		ワークロールの弾性変形を考慮しない	ワークロールの弾性変形を考慮する		
ワークロールたわみの取り扱い		ワークロールたわみを既知量とする		ワークロールたわみを未知量とする	
				2 Hiミル	4 Hiミル
要素解析技術	剛塑性FEM	○	○	○	○
	弾性FEM		○	○	○
	分割モデル				○
フローチャート					

の反復計算において求まる量を意味する．

式(3)～(6)は，摂動量$\{\Delta\hat{u}^e\}$についての線形二次方程式となるが，その次数を低減することを目的として式(7)を導入している．なお，式(7)中の係数αとしては，経験的に定めた値（$\alpha=0.8$）を用いる．$\alpha=0.0$の場合，式(3)～(6)は，従来の剛塑性有限要素法で適用されてきた摂動方程式に一致する．

上式を，解析対象とする領域全体についての節点速度ベクトル$\{\hat{u}^e\}$と摂動量$\{\Delta\hat{u}^e\}$とのノルム比ならびに節点力の不釣り合い量が十分小さくなるまで，摂動量$\{\Delta\hat{u}^e\}$により$\{\hat{u}^e\}$を修正しつつ反復計算することにより，節点速度$\{\hat{u}^e\}$の最適解をもとめる．

境界条件は以下に示すとおりである．

Entrance：$\dot{u}_x=0$，$\dot{u}_y=0$，$\dot{u}_z=$(uniform)　(17)

Exit：$\dot{u}_x=0$，$\dot{u}_y=0$，$\dot{u}_z=$(uniform)　(18)

Contact surface：$\dot{\boldsymbol{u}}\cdot\boldsymbol{n}=0$　(19)

2.2　ロール変形モデルならびにフローチャート

本解析手法では，対象とする圧延条件およびミル形式に対応して，**表1**に示す各種ロール変形モデルを適用し，被加工材の塑性変形とロールおよび圧延機の弾性変形との連成解析を実行する．以後に，本解析システムで導入した各ロール変形モデルの概略を示す．

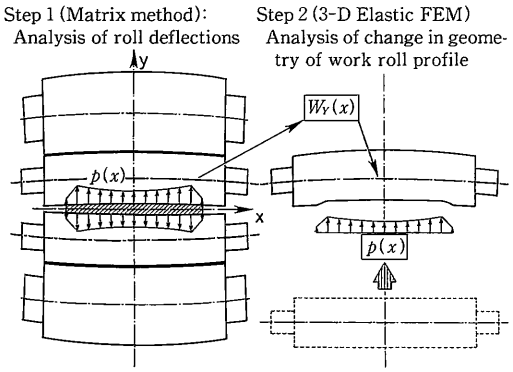


図2　多段ミルによる圧延加工を対象とする場合のロール変形の取扱い方

2.2.1　ワークロールたわみが既知である場合のロール変形モデル

ワークロールたわみが被圧延材の三次元塑性変形に及ぼす影響を無視し得る場合や，各種ワークロールたわみの及ぼす影響の系統的な解明を行う場合には，ワークロールたわみを既知として解析を実行する．

多くの熱間線材圧延のようにワークロールの表面変形の影響を無視して支障ない場合には，ワークロールを剛体と仮定して解析を実行する（モデルⅠ－1）．

板材圧延のように，ワークロールの表面変形が被加工

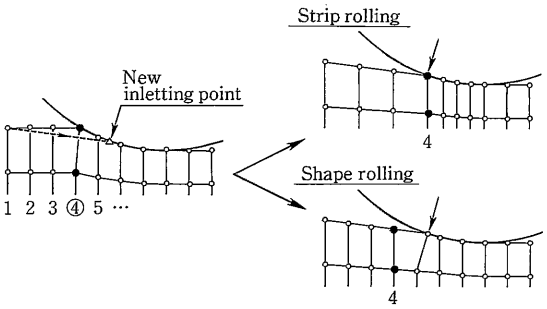


図3　接触解析法

材の塑性変形に及ぼす影響を厳密に考慮する必要がある場合には，ワークロールたわみを強制変位として与えつつ三次元弾性FEMによる解析を行い，ワークロールたわみや偏平変形に起因する表面形状の変化を考慮する（モデルⅠ－2）．

2.2.2　ワークロールたわみが未知である場合のロール変形モデル

ワークロールたわみを未知として解析を行う場合には，対象とするミル形式に対応して，以後に示す2種類の方法を適用する．

2 Hiミルによる圧延加工を対象とする場合には，ワークロール軸心線上ネック部の節点変位を拘束し，それ以外のワークロール軸心線上にある節点の変位を自由とし，三次元弾性FEM解析を行う（モデルⅡ－1）．

4 Hiミル等多段圧延機を解析対象とする場合には，分割モデルによるロールたわみ変形の解析手法と三次元弾性FEMとにより，ワークロールの変形解析を実行する．すなわち，図2に示すように，三次元剛塑性FEMによる被圧延材の塑性変形解析により得られた線荷重分布を境界条件とし，まず分割モデルによりワークロール軸心たわみを計算し，次にこのワークロール軸心たわみを強制変位とした三次元弾性FEM解析を行い，ワークロールたわみや偏平変形に起因する表面形状の変化を求める（モデルⅡ－2）．

2.3　接触解析法

定常三次元剛塑性FEM解析においては，定常流線を定める際に導入する接触解析法が解析の精度を左右する一つの要因となる．本解析手法では，被圧延材幅方向にみた接触弧長の差が小さい場合（たとえば一般の板材圧延の場合）と，被圧延材幅方向にみた接触弧長の差が大きい場合（たとえば棒材・線材圧延の場合）について，それぞれ異なる接触解析法を適用する．以下に図3に示す各方法について簡単に述べる．

2.3.1　被圧延材幅方向にみた接触弧長の差が小さい場合（方法1）

本方法では，圧延方向にみたある節点列が常に噛み込み線と一致するものとし，この条件のもとで噛み込み位置および流線の修正を行う．予変形域・ロールギャップ・出側被圧延材の節点座標は，各流線上での圧延方向要素長さがそれぞれの領域内で等しくなるように，接触解析を行うたびに求まる流線上に再配置する．本方法は，被圧延材幅方向にみた接触弧長の差が小さい場合（板材圧延）に対して有効である．

2.3.2　被圧延材幅方向にみた接触弧長の差が大きい場合（方法2）

本方法では，各節点の圧延方向座標を解析開始時に定めておく．接触解析に際しては，それぞれの流線上で噛み込み位置に相当すると判断された節点についてのみ，圧延方向座標を修正する．それ以外の節点については，幅方向・厚さ方向座標のみを修正する．本方法は，被圧延材幅方向にみた接触弧長の差が大きい場合（棒材・線材圧延）に対して有効である．

3．解　析　結　果

以後に，CORMILL Systemの板材圧延[17)~20)]ならびに線材圧延[21)~27)]への適用例を示す．

3.1　板材圧延への適用例

3.1.1　ワークロール径の偏平変形，たわみおよび板幅方向板厚分布に及ぼす影響

まず，ワークロールたわみがない状態（$W_y(x)=W_z(x)=0$）を想定しつつ，ワークロール径Dを400mm，575mm，750mmの3とおりに変化させ，ワークロールの偏平変形に及ぼす，ワークロール径の影響を調査した結果を示す[19)]．使用した解析モデルは，モデルⅠ－2である．計算条件は表2を参照されたい．

表2　計算条件－1

ワークロール径　D[mm]	400,575,750
ワークロールネック部径　D_{WN}[mm]	240.0
ワークロールネック部長さ　D_{WL}[mm]	350.0
ワークロールベンディング力　F[ton]	0.0
バックアップロール径　d[mm]	1150.0
バックアップロールネック部径　d_{BN}[mm]	700.0
バックアップロールネック部長さ　d_{BL}[mm]	350.0
ワークロール周速　V[MPM]	240.0
ロールバレル長　L[mm]	1400.0
初期板幅[mm]/板厚[mm]	1000.0/4.2
圧下率[%]	28.57
変形抵抗式[kgf/mm²]	$\bar{\sigma}=4.5(1+2\bar{\varepsilon})^{0.21}\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.31}$
まさつ係数	$\mu=0.25$
前後方張力[kgf/mm²]	$T_b=T_f=0.0$
ワークロールたわみ	既知($Wy(x)=Wz(x)=0.0$) 未知（分割モデルと連成）
剛塑性FEM要素分割	$N_x=10$，$N_y=4$， $N_z=(4+8+3)$
ヤング率E[kgf/mm²]	21000.0
ポアソン比ν	0.3

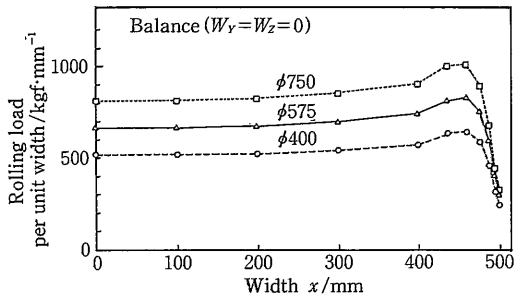


図4　線荷重分布（ワークロールたわみがない場合）

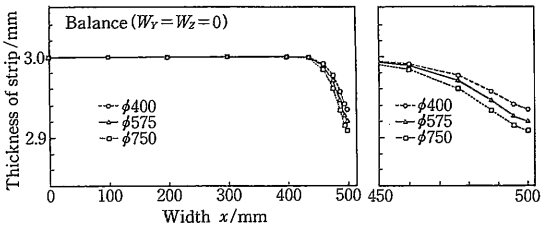


図5　圧延後板厚分布（ワークロールたわみがない場合）

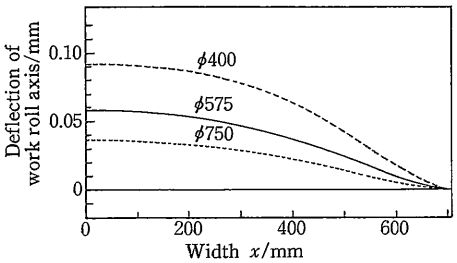


図6　ワークロールたわみ（ワークロールたわみが未知の場合）

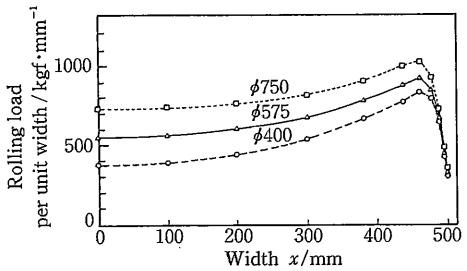


図7　線荷重分布（ワークロールたわみが未知の場合）

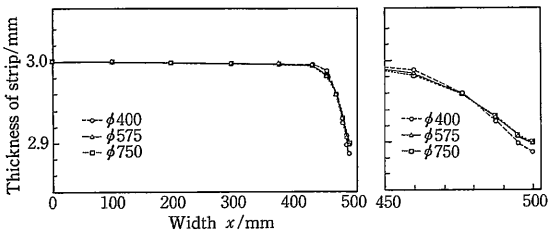


図8　圧延後板厚分布（ワークロールたわみが未知の場合）

図4に線荷重分布を示す．ワークロールの小径化に伴う圧延荷重の低減効果が明確に現れている．図5に圧延後板厚分布を示す．圧延荷重の減少にともない偏平変形が減少するため，ワークロール径が小さいほど板厚偏差も小さくなる．

次に，4 Hiミルによる圧延を想定しつつ，弾性および剛塑性FEMに加え分割モデルを連成させたモデルII－2による解析を行い，ワークロール径がワークロールたわみ，線荷重，圧延後板厚分布に及ぼす影響を調査した結果を示す[19]．計算条件を表2に示す．

図6にワークロールたわみ曲線を，図7に線荷重分布を示す．ワークロール径を減少させることにより圧延荷重は減少するが，ワークロールの曲げ剛性が大きく減少するため，ワークロールたわみは大きく増加する．しかしながら，図8に示す圧延後板厚分布については，ロール径の影響が明確ではない．その原因としては，本解析法ではポアソン比の影響を考慮しつつワークロールたわみに伴う表面形状変化を求めていること，および，ワークロールたわみと偏平変形に起因するワークロール表面形状の変化が互いに相殺しあう関係にあることをあげることができる．

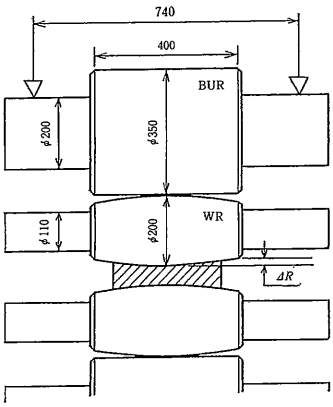
3.1.2　モデルテスト結果との比較による CORMILL Systemの精度の確認

表3に示す板材圧延につき解析を行い，本解析システムの精度の確認を行った結果を示す[20]．実験は，図9に示すモデル4 Hiミルにより行い，圧延後板厚分布を，モデルII－2による解析結果と比較することにより，本解析システムの精度の評価を行った．

図10に，解析ならびに実験により得られた圧延後板厚

表3　計算条件－2

ワークロール径　D[mm]	200.0
ワークロールネック部径　D_{WN}[mm]	110.0
ワークロールネック部長さ　D_{WL}[mm]	170.0
ワークロールベンディング力　F[ton]	0.0
バックアップロール径　d[mm]	350.0
バックアップロールネック部径　d_{BN}[mm]	200.0
バックアップロールネック部長さ　d_{BL}[mm]	170.0
ワークロール周速　V[MPM]	55.0
ロールバレル長　L[mm]	740.0
初期板幅[mm]/板厚[mm]	250.0/3.0
圧下率[%]	30.00
変形抵抗式[kgf/mm^2]	$\bar{\sigma}=16.0\,\bar{\varepsilon}^{\,0.21}\,\dot{\bar{\varepsilon}}^{\,0.31}$
まさつ係数	$\mu=0.25$
前後方張力[kgf/mm^2]	$T_b=T_y=0.0$
ワークロールたわみ	未知（分割モデルと連成）
剛塑性FEM要素分割	$Nx=10$, $Ny=3$, $Nz=(4+8+3)$
ヤング率E[kgf/mm^2]	21000.0
ポアソン比ν	0.3



材　質	SPCC
試片寸法	3.0 t × 250 w
圧下率	30%
圧延温度	900℃
圧延速度	55m/分
WRクラウン（ΔR）	0 μm/半径

図9　実験に用いたモデル4Hiミル

分布を比較して示す．板クラウン・エッジドロップとも，数μm以下の範囲で両者は一致している．このことより，本解析システムを用いることにより，板材圧延における圧延後板厚分布ならびに三次元塑性変形を，高い精度で予測可能であることがわかる．

3.2　線材圧延への適用例

本節では，近年各所で導入がはかられている3ロール圧延を取り上げ，従来用いられてきた2ロール圧延との比較を行った結果を示す[22),23)]．圧延方式の概要は図11を，計算条件は表4を参照されたい．なお，本節に示す計算事例は，モデルI－1により得られたものである．

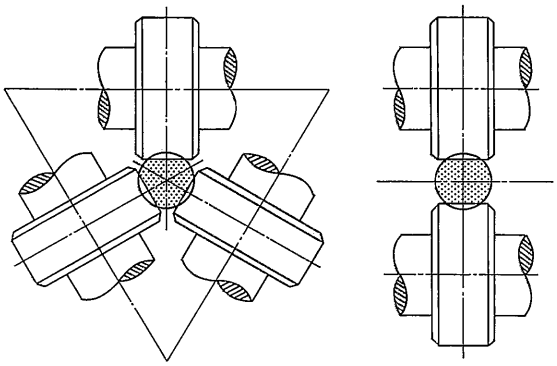
図12に，ラウンド～フラットパスによる2ロール圧延および3ロール圧延の三次元変形形状を，比較して示す．圧延方向・軸方向へのロールとの接触領域の広がりが，本解析により的確にとらえられていること，また，ロールとの接触領域の形状は，2ロール圧延と3ロール圧延でほぼ相似であることがわかる．図13に，ラウンド～フラットパスにおける，排除断面積率r_a*（幅広がりがないとした場合の減面率）と実減面率r_aとの関係を示す．3ロール圧延の場合，幅広がりが小さく延伸効率に優れているため，r_a*とr_aはほぼ等しい．これに対し2ロール圧延では3ロール圧延に比較して延伸効率が劣るため，排除断面積率r_a*の約70%程度の実減面率しか得ることができないことがわかる．

表4　計算条件－3

圧延方式：2ロールおよび3ロール

ロール径D[mm]	500.0
ロール周速V [MPM]	180.0
ロールバレル長L[mm]	200.0
初期線径[mm]	50.0
孔型半径r_g[mm]	120.0, ∞（フラット）
排除断面積率r_a*[%]	10.0, 20.0, 30.0, 40.0
変形抵抗[kgf/mm²]	$\bar{\sigma}=4.5(1+2\bar{\varepsilon})^{0.21}\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.31}$
まさつ係数	$\mu=0.25$
前後方張力[kgf/mm²]	$T_b=T_f=0.0$
FEM要素分割（$Nx/Ny/Nz$）	2ロール：11×4×(4+8+2) 3ロール：8×4×(4+8+2)

図14は，ラウンド～フラットパスについて，2ロール圧延および3ロール圧延による圧延後相当ひずみ分布を比較して示す．なお，図14に示す解析結果の実減面率は，ほぼ一致していることに注意されたい．2ロール圧延の場合，幅方向中央部より端部にかけて単調に減少する傾向が得られており，端部自由表面部で最小値となる．これに対し3ロール圧延では分布形態そのものが2ロール圧延と大きく異なり，端部自由表面部に加え被圧延材中央部にも相当ひずみの小さい領域が現れる．また最大値も2ロール圧延に比較して小さい．3ロール圧延では幅広がりが小さいため，圧延方向横断面内の不均一変形，すなわち面内ひずみ成分（ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{xy}）が2ロール圧



（a）3-roll　　（b）2-roll

図11　2ロールならびに3ロール圧延

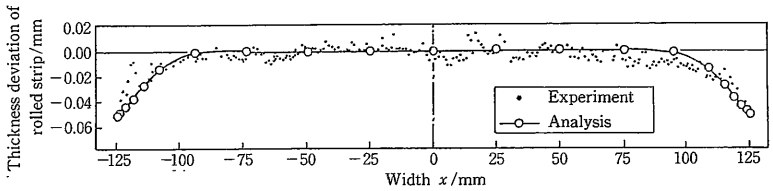
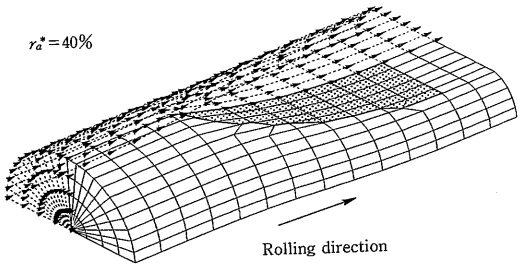
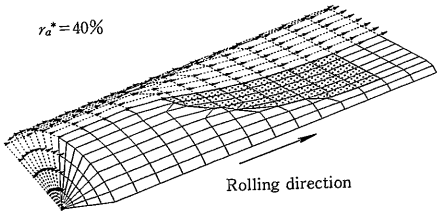


図10　圧延後板厚分布の比較



（a）　2ロール圧延



（b）　3ロール圧延

図12　三次元変形形状

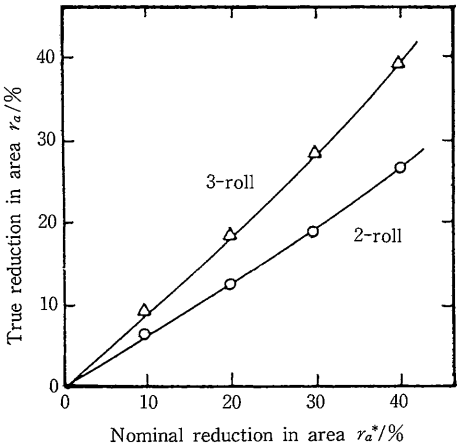
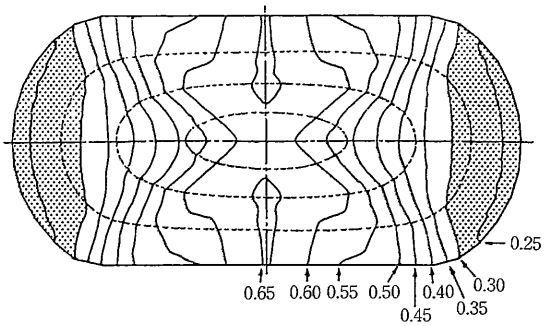


図13　排除断面積率と実減面率との関係

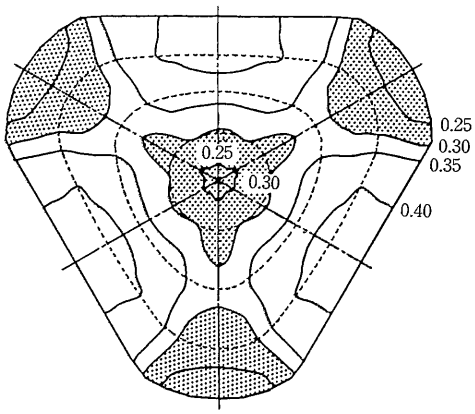
延に比較して小さくなる．したがって，同一実減面率（同一延伸率）の場合に，3ロール圧延の相当ひずみ値が2ロール圧延のそれより小さいことは，当然の結果である．ただし，3ロール圧延では被圧延材中央部での相当ひずみが小さいことを，本圧延方式によるパススケジュールの選定を行う際には十分考慮すべきである．

図15は，圧延後相当ひずみ分布に及ぼすロール径の影響を，ラウンド～オーバルパスについて調査した結果の一例であり，ロール径の減少にともない，圧延後相当ひずみ分布のばらつきがより大きくなることがわかる．ラウンド～オーバルパスの場合の変形・負荷特性ならびに相当ひずみ分布についての検討結果の詳細な内容については，別報[24)~27)]を参照されたい．



Equivalent strain (r_a=19.2%)
r_a^*=30%

（a）　2ロール圧延



Equivalent strain (r_a=18.7%)
r_a^*=20%

（b）　3ロール圧延

図14　圧延後相当ひずみ分布に及ぼす圧延方式の影響

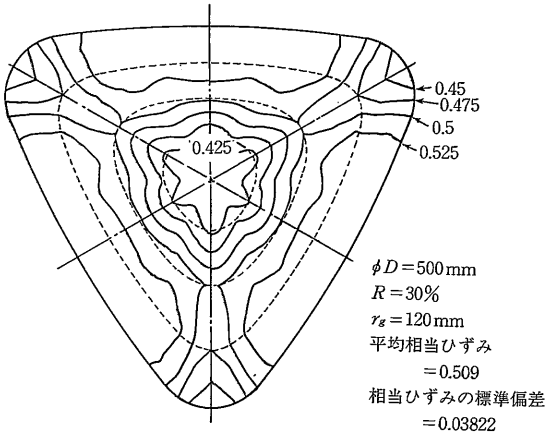
4．ま　と　め

数値圧延機CORMILL Systemの構成について述べるとともに，板材圧延ならびに異形材圧延への適用例を示した．本解析システムは，現在さまざまな圧延加工の特性解析ならびにパススケジュールの選定や，圧延機・ロール設計に用いられている．今後は，温度分布との連成解析を可能とすべく，さらに機能の拡張をはかる予定である．

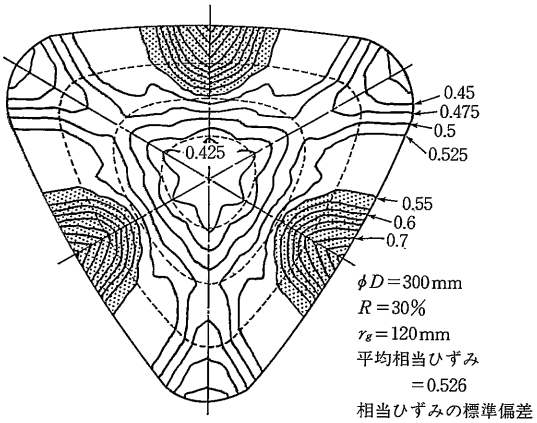
（1991年8月12日受理）

参　考　文　献

1)　Shohet, K.N. et. al: J. Iron & Steel Inst., 206 (1968), 1088.
2)　戸澤ほか：塑性と加工，23-263 (1982), 1181.
3)　松本ほか：塑性と加工，23-263 (1982), 1201.
4)　梶原ほか：平2春塑加講論 (1990)，77.
5)　渋谷ほか：33回塑加連講論 (1982)，147.
6)　山田ほか：41回塑加連講論 (1990)，63.



（a）$\phi D=500$mm



（b）$\phi D=300$mm

図15　圧延後相当ひずみ分布に及ぼすロール径の影響

7) 豊島ほか：41回塑加連講論（1990），71.
8) Bertland. C. et. al: NUMIFORM 89, (1989), 303. Balkema.
9) 森ほか：機論A，56-525（1990），1288.および56-528（1990），1893.
10) 小森ほか：塑性と加工，31-350，（1990），357.および364.
11) 柳本ほか：生産研究，42-6（1990），327.
12) 辛ほか：塑性と加工，30-343，（1989），1180.
13) Kennedy, K.F.: Trans. ASME, J. Eng. Ind., 95 (1988), 223.
14) Lee, C.H. et. al: Trans. ASME, J. Eng. Ind., 110 (1973), 865.
15) Li, G.J. et. al: Trans. ASME, J. Eng. Ind., 104 (1982), 55.
16) 冨田ほか：塑性と加工，30-338（1989），426.
17) 柳本ほか：塑性と加工，32-367（1991），1000.
18) 柳本ほか：塑性と加工，32-367（1991），1006.
19) 柳本ほか：41回塑加連講論，（1990），67.
20) 佐々木ほか：平3春塑加講論，（1991），157.
21) 柳本ほか：41回塑加連講論，（1990），351.
22) 柳本ほか：41回塑加連講論，（1990），355.
23) 木内ほか：平3春塑加講論，（1991），599.
24) 木内ほか：42回塑加連講論，（1991），425.
25) 柳本ほか：42回塑加連講論，（1991），413.
26) 中村ほか：41回塑加連講論，（1990），359.
27) 中村ほか：42回塑加連講論，（1991），433.