研究速報

UDC 621.771.001：539.374

ラグランジェ乗数法剛塑性有限要素法に基づく圧延加工の三次元塑性変形の解析結果
——数値圧延機の開発 II——

An Application of Lagrange Multiplier Rigid-Plastic FEM for Three-Dimensional Plastic Deformation in Rolling Processes
——Research on Computational Rolling Mill II——

柳本　潤*・木内　学*
Jun YANAGIMOTO and Manabu KIUCHI

1．緒　言

薄板材・厚板材や棒材・線材あるいは形材の圧延加工に際しては，被圧延材内部には複雑な三次元塑性変形が生じる．実圧延加工に要するロール形状・パススケジュールその他の加工条件の最適化や，新たな圧延機の開発のためには，この三次元塑性変形の定量的な予測が必須の条件となる．

本研究は，板材圧延ならびに棒・線・形材圧延において被圧延材に生ずる多様な三次元塑性変形の高精度な解析を可能とし，実圧延加工に要するロール形状・パススケジュールその他の加工条件の最適化や新たな圧延機の開発を行うための応用技術としての発展性を有する実用的な統合型連成解析システムの開発を目的としている．前報[1]では，上述の解析システムを構築するのに不可欠である被圧延材の三次元塑性変形解析技術に関連した内容，すなわち，ワークロール表面上の幾何学的情報の処理方法およびラグランジェ乗数法に基づく定常三次元剛塑性FEMの構成について示した．本報では，前報[1]にて示した解析手法を薄板材圧延加工に適用し，スラブ法に基づく三次元解析結果と比較するとともに，予変形域の要素分割数，接触解析およびワークロール水平たわみの及ぼす影響について検討を加える．さらに線材圧延加工の解析を行い，ロール孔型（カリバー）半径の変化に伴う被圧延材の塑性変形特性の変化に関する結果を示す．

2．解析結果

以後の説明では，板幅方向をx軸，板厚方向をy軸，圧延方向をz軸とする．

2．1　Siebelの条件についての検討

Siebelの実験条件ならびに池田らの計算条件[2]を参照しつつ，表1のCase 1につき解析を実行した結果を以下に述べる．本解析条件は，被圧延材の幅方向塑性流動が顕著に発生しやすい板幅比が小さい場合を対象としており，スラブ法による三次元解析結果[2]と比較し，本解析手法の機能を確認することを目的として設定したものであ

表1　計算条件（Case 1）

Roll diameter /mm	200.0
Rolling speed /MPM	6.0
Initial width of strip /mm	30.0
Initial thickness of strip /mm	2.0
Reduction in thickness /%	16.3
Flow stress /Kgf・mm^{-2}	$\bar{\sigma}=25.46$
Friction coefficient	0.1
Total front tension /ton	0.0
Total back tension /ton	0.0
Mesh system $N_x \times N_y \times N_z$	$6\times3\times(4+12+2)$
Roll deflection	$W_Y(x)=W_Z(x)=0.0$

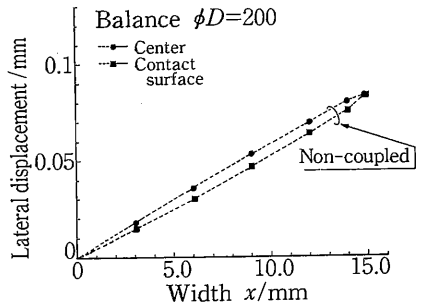

図1　板幅方向塑性流動（Siebelの圧延条件）

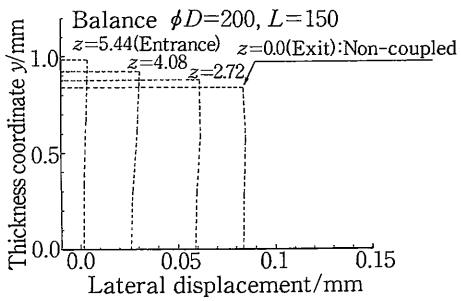

図2　幅広がり形状（Siebelの圧延条件）

*東京大学生産技術研究所　第2部

表2　収束条件

Norm ratio of velocity vector	0.00002
Change in thickness of rolled strip /mm	0.001
Normalized inequilibrium stress	0.002
Maximum volummetric strain / Averaged equivalent strain	0.001

表3　計算条件（Case 2）

Roll diameter /mm	750.0
Rolling speed /MPM	240.0
Initial width of strip /mm	1000.0
Initial thickness of strip /mm	4.2
Reduction in thickness /%	28.57
Flow stress /Kgf・mm^{-2}	$\bar{\sigma}=4.5(1+2\bar{\varepsilon})^{0.21}\times\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.31}$
Friction coefficient	0.25
Total front tension /ton	0.0
Total back tension /ton	0.0
Mesh system $N_x\times N_y\times N_z$	10×4×(2,3,4,5,6+8+2)
Roll deflection	$W_Y(x)=W_Z(x)=0.0$

る．接触解析は，前報[1]の2.3.1節に示した方法1により行った．収束判別は表2に示す項目および条件値により行った．

図1に板幅方向塑性流動量を示す．板幅ひずみは板幅方向に均一分布しており，また，スラブ法による三次元解析結果とほぼ一致している[2]．スラブ法による三次元解析では，板厚方向に均一な変形を想定してモデルの構成が行われているが，剛塑性FEMによる純三次元解析では，板厚方向に不均一な変形を考慮することができる．そのような解析結果の例として，図2にロールギャップ内での幅広がり形状の推移を示す．入口面近傍においてはワークロールとの接触部での幅広がりが最大であるのに対し，ロールギャップ内での圧下の進行に伴い，いわゆるダブルバルジ形状に遷移する傾向が見られる．図3に板厚方向に平均化した板厚方向応力σ_{yy}の分布を示す．本結果はスラブ法に基づく三次元解析結果[2]にほぼ一致しており，このことから見て，妥当な解析結果であるものと判断できる．

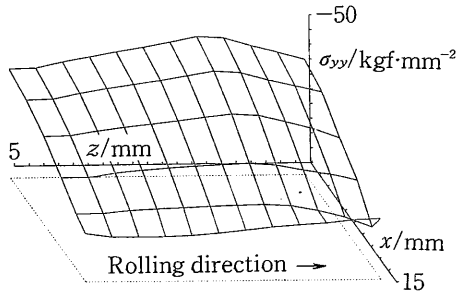

図3　圧延圧力分布（Siebelの圧延条件）

2.2　板幅比が大きい場合に関する基礎的検討

以後に，スラブ法に基づく解析モデルでは被圧延材の幅方向塑性流動の詳細な解明が困難とされてきた，板幅比が大きい場合をとりあげ，本解析手法の機能を確認するとともに，予変形域長さ・接触解析の有無・ワークロール水平たわみの有無が，被圧延材の塑性変形挙動に及ぼす影響に関し検討した結果を述べる．収束判別は前節と同様，表2に示す項目および条件値により行った．

2.2.1　予変形域長さの及ぼす影響

本来弾塑性遷移領域である予変形域を，剛塑性近似のもとで解析する場合の解析精度の問題については，さまざまな角度から研究がなされている[3)4)]．本節では，表3のCase 2に示す計算条件につき，予変形域中の要素数（予変形域長さ）を変化させて解析を実行し，弾塑性遷移領域を剛塑性近似のもとで解析する場合の解析結果につき検討した結果を示す．なお，本節にて示す解析結果については，接触解析は実行していない．

図4，図5に線荷重分布ならびに出口面張力分布を示す．考慮する予変形域長さを増加させるにともない，板端部での線荷重値は増加し，出口面張力分布は減少する

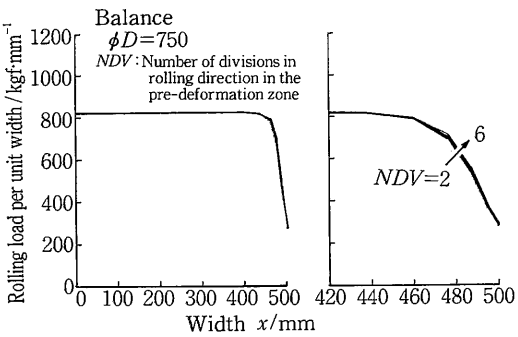

図4　予変形域長さの線荷重分布に及ぼす影響

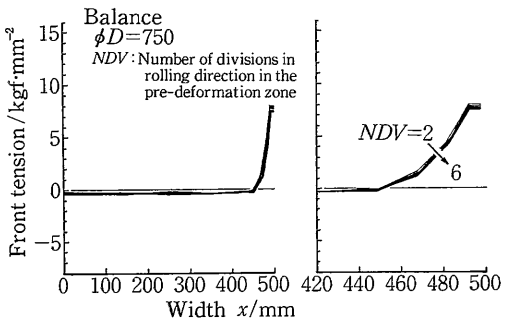

図5　予変形域長さの出口面張力に及ぼす影響

表4　計算条件（Case 3）

Roll diameter /mm	750.0
Rolling speed /MPM	240.0
Initial width of strip /mm	1000.0
Initial thickness of strip /mm	4.2
Reduction in thickness /%	28.57
Flow stress /Kgf・mm^{-2}	$\bar{\sigma}=4.5(1+2\bar{\varepsilon})^{0.21}\times\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.31}$
Friction coefficient	0.25
Total front tension /ton	0.0
Total back tension /ton	0.0
Mesh system $N_x\times N_y\times N_z$	10×4×(4+8+2)
Vertical deflection of work-roll	$W_Y(x)=0.0$

傾向にある．しかしながら，差はごくわずかである．上述の結果ならびに予変形域中に必要とされる変形自由度等により判断すると，予変形域内の圧延方向要素列数NDVが3以上の場合には，妥当な解析結果が得られるものと判断できる．しかしながら，既述のごとく，予変形域は本来弾塑性遷移領域であるため，この領域を剛塑性近似の元で解析を行う際の近似精度その他の問題については，今後とも継続して検討を行う必要がある．

2.2.2　接触解析の及ぼす影響

表4のCase 3に示す条件につき解析を行い，接触解析の有無が解析結果に及ぼす影響について調査した結果を以下に示す．導入した接触解析法は，前報[1]の2.3.1節にて示した方法1である．ワークロール水平たわみ$W_Z(x)$および垂直たわみ$W_Y(x)$はそれぞれ$W_Y(x)=W_Z(x)=0$とした．

図6，図7にそれぞれ線荷重分布ならびに投影接触長さの変化を示す．接触解析を実行することによる上記諸量の変化は特に板端部（$x\geqq300$mm）で大きい．これらの結果は，本解析手法による厳密な接触解析を実行することにより，従来必ずしも明らかにされていなかった圧延時の被圧延材内部の速度分布の詳細を把握し得ることを意味しており，また，ロールギャップ間隙分布が全く無い状態においても，幅方向のかなり広い領域にわたる板幅方向塑性流動が生じ，対応した線荷重分布の変化が起こり得ることを，などを知ることができる．

2.2.3　ワークロール水平たわみの及ぼす影響

ワークロール水平たわみが塑性変形特性に及ぼす影響について検討した結果を示す．計算に用いたワークロール水平たわみ$W_Z(x)$を図8に示す．ただし，$W_Z(x)$が正である場合には，ワークロールが圧延方向に見て上流側にたわんでいることを意味する．計算条件は表4と同一であり，ワークロール垂直たわみ$W_Y(x)$はないものとした．また，本節の結果を得るのに際して導入した接

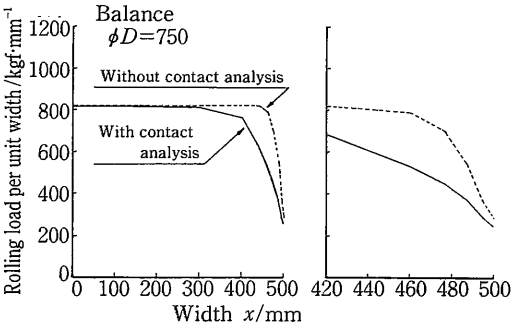

図6　接触解析の実行にともなう線荷重分布の変化

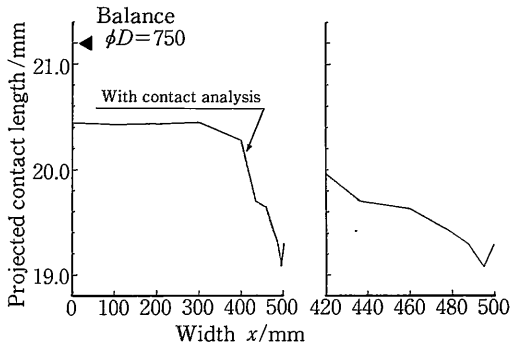

図7　接触解析の実行にともなう投影接触長さの変化

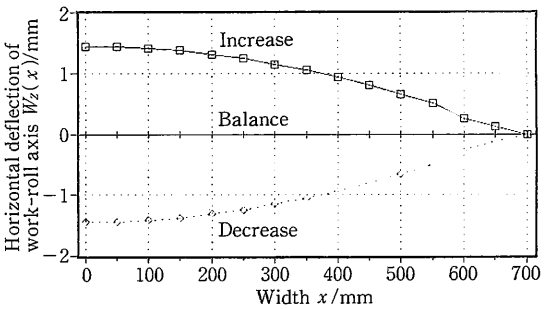

図8　ワークロール水平たわみ

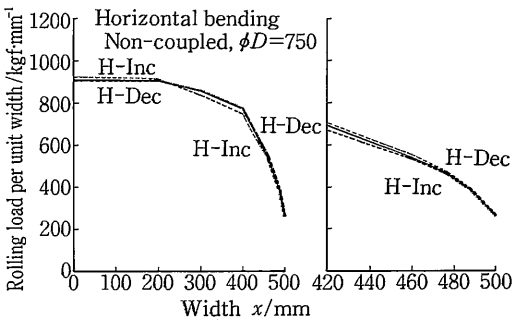

図9　ワークロール水平たわみの線荷重分布に及ぼす影響

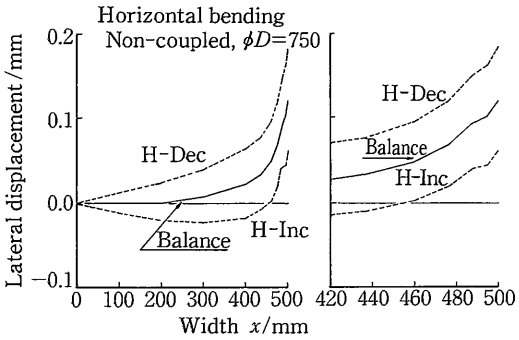

図10　ワークロール水平たわみの板幅方向塑性流動に及ぼす影響

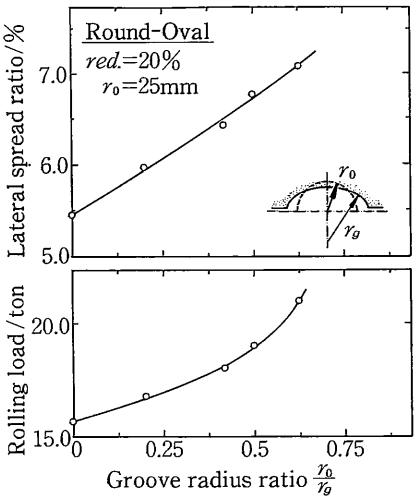

図11　孔型半径比の変化に伴う圧延荷重ならびに幅広がり率の変化（ラウンド～オーバル圧延）

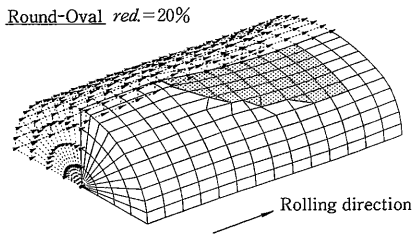

図12　三次元変形形状（ラウンド～オーバル圧延）

触解析法は，前報[1]の2.3.1節に示した方法1である．

図9より，ワークロール水平たわみをDecrease（H-Dec）→Balance→Increase（H-Inc）と変更することにより，板中央部での線荷重値がわずかに増加し，反対に板端部ではわずかに減少する．これは，ワークロール水平たわみに起因するロール周速ベクトルの幅方向成分に対応して，表層せん断応力σ_{zx}が変化することに対応している．しかしながら，上述の線荷重については，ワークロール水平たわみによる影響は小さい．図10にワークロールとの接触面での板幅方向塑性流動量を示す．ワークロール水平たわみIncrease（H-Inc）の場合には，板幅方向の広い領域においてわずかに板幅方向内向きの塑性流動が生じている．これは上述のワークロール水平たわみにより生ずるロール周速ベクトルの板幅方向成分に対応している．

なお，本解析結果における変形域出口面と入口面における体積流量のアンバランスは，各条件とも0.1%以内であり，体積一定条件を精度良く満足していた．

2.3　線材圧延の解析結果

線材圧延についての解析結果を以下に述べる．本解析は，Round-Ovalパス，Round-Flatパスを対象としつつ，本解析手法の特性について基礎的な検討を行うことを目的として行ったものである．接触解析は，前報[1]の2.3.2節に示した方法2により行った．解析に導入した孔型半径r_gは40mm，50mm，60mm，120mm（Round-Ovalパス），∞（Round-Flatパス），素線半径r_0は25mm，ロール径は500mm，圧延速度は180MPM，圧下率は20%である．その他の解析条件および収束条件については，表4を参照されたい．

図11は，孔型半径比r_0/r_gの変化に伴う幅広がり率ならびに圧延荷重の変化である．孔型半径の減少に伴う幅広がりおよび圧延荷重の増大が，本解析法により的確にとらえられていることがわかる．図12に，孔型半径r_g=40mmの場合の三次元変形形状を示す．

3．結　　言

ラグランジェ乗数法による定常三次元剛塑性FEM解析の，薄板圧延ならびに線材圧延への適用結果を示した．圧延加工時の被圧延材の負荷特性および塑性変形特性を精密に解析するためには，ワークロールのたわみおよび偏平変形に代表される弾性変形と，被圧延材の塑性変形との連成解析が不可欠である．本報にて示した塑性変形解析手法と，ロールの弾性変形解析手法との連成方法ならびに応用結果は次報以後に示す．

（1991年1月23日受理）

参考文献

1) 柳本　潤・木内　学：生産研究，43-3（1991），172.
2) 池田充宏・松本紘美・川並高雄：37回塑加連講論，（1986），1.
3) Kopp, R. & Cho, M. L.: Proc. 2nd ICTP Vol. 1, (1987), 43.
4) Shivpuri, R. & Chou, P. C.: Int. J. Mach. Tools Manufact., 29-3 (1989), 305.