

高機能圧延機開発のための 板圧延三次元変形解析システムの開発

東京大学 生産技術研究所

助教授 柳本 潤

(平成元年度奨励研究助成 AF - 89025)

1. 研究の背景

薄板材・厚板材などの板材圧延ならびに棒・線・型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。従って、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。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。

板材圧延における上述の理論解析技術は、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、何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、板材圧延の分野における理論解析技術

をさらに高精度化することへの要求は、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、板材圧延の高精度な三次元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。

2. 研究成果の概要

本研究にて新たに開発した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。以下に、開発した数値圧延機 CORMILL（Computational Rolling Mill；図1参照）Systemの構成につき述べるとともに、板材圧延への適用事例を示す。

2・1 CORMILL Systemの構成

2・1・1 ロール変形モデル

本解析システムでは、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。

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が既知である場合

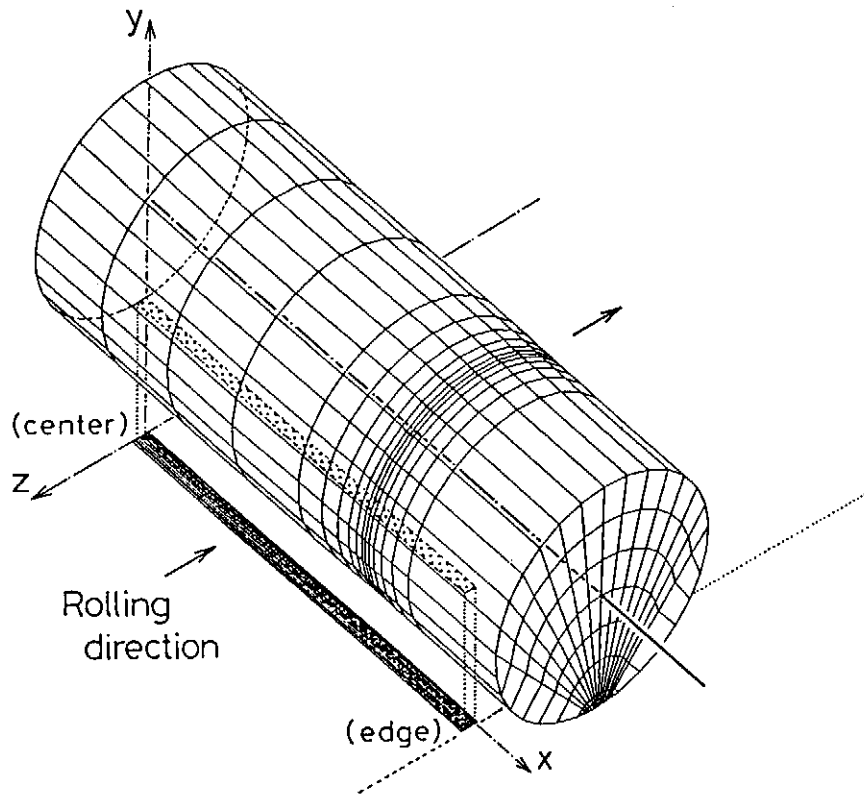


図1 数値圧延機CORMILL SYSTEMの構成

を想定したモデルⅠを用いて解析を実行する。

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。

2Hi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)。

4Hi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。即ち、図2に示す様に、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・1・2 ラグランジュ乗数法三次元剛塑性FEM

本解析システムでは、ラグランジュ乗数法剛塑性FEMにより、被圧延材の三次元塑性変形を解析する。ラグランジュ乗数法剛塑性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

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 2H i ミル	4H i 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	モデルI-1	モデルI-2	モデルII-1	モデルII-2
	Start of analysis	Start of analysis	Start of analysis	Start of analysis
3-D rigid-plastic FE analysis	3-D rigid-plastic FE analysis	3-D rigid-plastic FE analysis	3-D rigid-plastic FE analysis	3-D rigid-plastic FE analysis
3-D elastic FE analysis		3-D elastic FE analysis	Analysis of roll deflection 3-D elastic FE analysis	Analysis of roll deflection 3-D elastic FE analysis
Contact analysis	Contact analysis	Contact analysis	Contact analysis	Contact analysis
Is stream line converged?	Is stream line converged?	Is stream line converged?	Is stream line converged?	Is stream line converged?
End of analysis	End of analysis	End of analysis	End of analysis	End of analysis

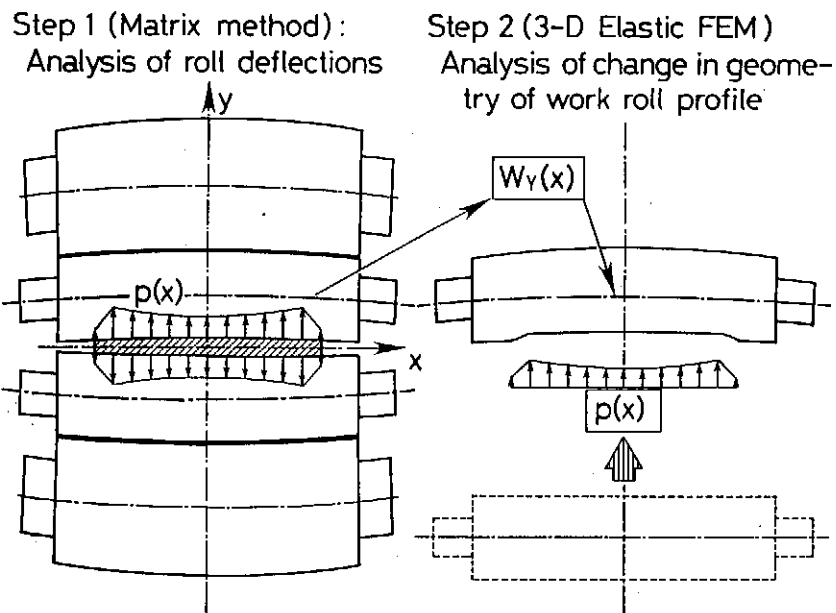


図2 多段ミルによる圧延加工を対象とする場合のロール変形の取扱い方

可能である、という優れた特徴を有する。その汎関数ならびに停留原理は、式 (1) (2) により表される。

$$\Phi = \int_V (\sigma'_{ij} d\epsilon_{ij}) V - \int_S T_i \dot{u}_i dS - \int_S F_i \dot{u}_i dS + \int_V \lambda \dot{\epsilon}_{kk} dV \quad (1)$$

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

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

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 はラグランジュ乗数であり、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 のガウス積分を適用する。

境界条件は以下に示す通りである。

$$\text{Entrance : } \dot{u}_x = 0, \dot{u}_y = 0, \dot{u}_z = (\text{uniform}) \quad (3)$$

$$\text{Exit : } \dot{u}_x = 0, \dot{u}_y = 0, \dot{u}_z = (\text{uniform}) \quad (4)$$

$$\text{Contact surface : } \dot{u} \cdot n = 0 \quad (5)$$

2・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2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。実験は、図3に示すモデル4Hi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4に、解析ならびに実験により得られた圧延

表2 計算条件

ワークロール径 D [mm]	200.0
” ネット径 D _{WN} [mm]	110.0
” ネット長さ D _{WL} [mm]	170.0
” 圧延力 F [ton]	0.0
バックアップロール径 d [mm]	350.0
” ネット径 d _{BN} [mm]	200.0
” ネット長さ d _{BL} [mm]	170.0
ワークロール周速 V [WPM]	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]	$\sigma = 16.0 \epsilon^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.12}$
まさつ係数	$\mu = 0.25$
前後方張力 [kgf/mm ²]	Tb = Tf = 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

後板厚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。

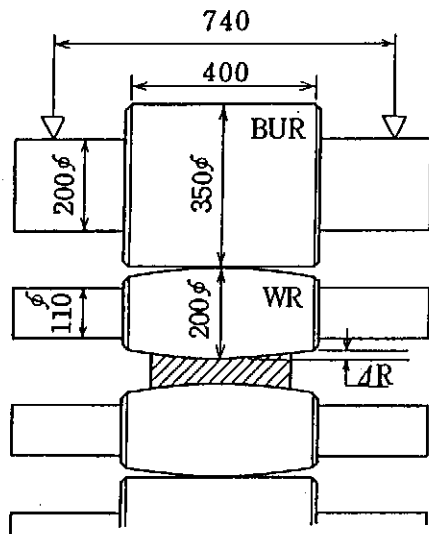
本解析システムは、現在板材ならびに異形材圧延加工の特性解析ならびにパススケジュールの選定や、圧延機・ロール設計に用いられている。今後は、温度分布との連成解析を可能とすべく、更に機能の拡張をはかる予定である。

3. 謝 辞

本研究を行うにあたり、(財)天田金属加工機械技術振興財団より助成を受けたことを記すとともに、深く感謝致します。

4. 発表論文

- 1) 柳本 潤・木内 學・中村 充・倉橋 隆郎：塑性と加工、32-367 (1991)、1000。
- 2) 柳本 潤・木内 學：塑性と加工、32-367 (1991)、1007。
- 3) Yanagimoto, J. & Kiuchi, M.: 19th MANR Conf., (1991), 15.
- 4) 柳本 潤：生産研究、43-11 (1991)、512。
- 5) 柳本 潤・木内 學・中村 充・倉橋 隆郎：



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	55 m/分
WR	試片 A ; 0 μm/半径
クラウン	B ; -50
(ΔR)	C ; 50

図3 実験に用いたモデル4Hiミル

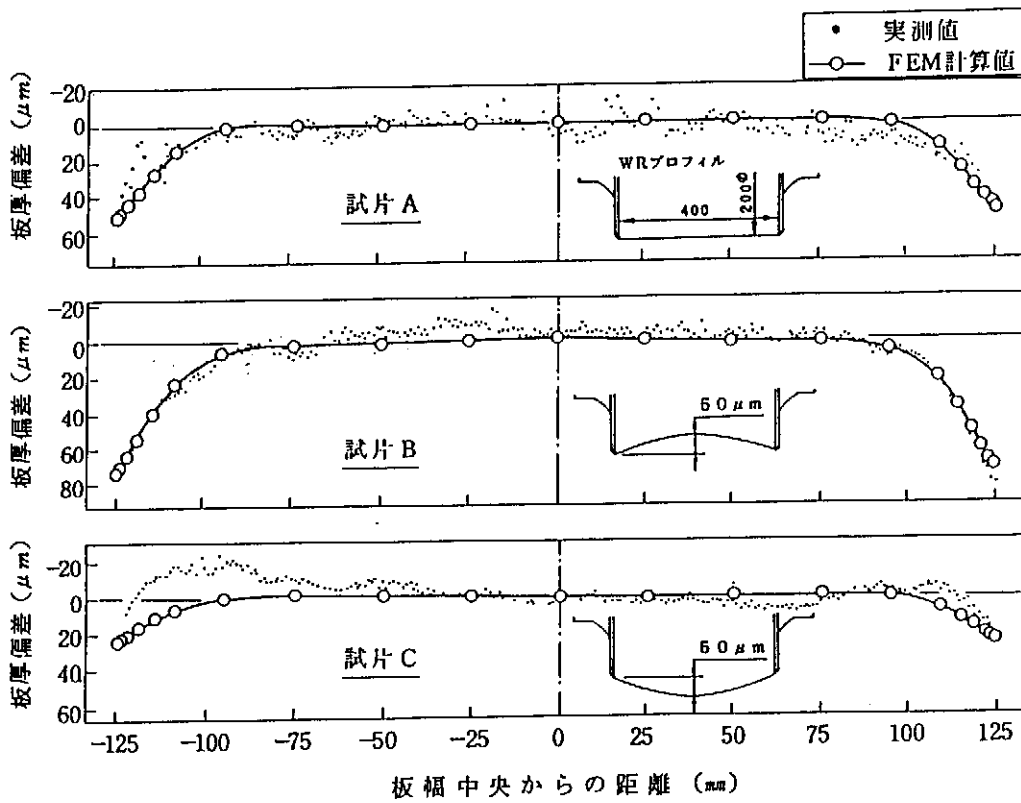


図4 圧延後板厚分布の比較

平2春塑加講論、(1990)、53。

6) 柳本 潤・木内 學・中村 充・倉橋 隆郎：
平2春塑加講論、(1990)、57。

7) 柳本 潤・木内 學：41回塑加連講論、
(1990)、67。

8) 柳本 潤・木内 學：41回塑加連講論、
(1990)、351。

9) 佐々木 保・柳本 潤・河野 輝雄・木内
學：平3春塑加講論、(1991)、157。