

4 段圧延機を用いたモデル薄板圧延実験との比較による 数値圧延機の精度の確認

—数値圧延機の開発 III—

Experimental Verification of CORMILL System through Strip Rolling Test using 4-Hi Mill

—Research on Computational Rolling Mill III—

柳 本 潤*
Jun YANAGIMOTO

1. 緒 言

熱間ならびに冷間薄板圧延加工時の負荷特性ならびに 3 次元変形特性, すなわち圧延圧力分布・圧延後の幅方向板厚分布 (板クラウンならびにエッジドロップ) などの諸量を定量的に求めるためには, 圧延機・ロールの弾性変形と, 被圧延材の 3 次元塑性変形との連成解析が必須である. この分野については, 従来スラブ法による被圧延材の塑性変形解析に基づく各種の連成解析モデルが提案されており, 板クラウンについては実用的な精度での解析が実行可能であることが報告されている. しかしながら, 板端部に局所的に生じる 3 次元塑性変形 (エッジドロップ) の純 3 次元解析を, スラブ法により広範囲な圧延条件にわたって実行することは一般に困難である. そのため, 近年, 剛塑性 FEM による純 3 次元解析に基づく連成解析モデルの開発が, 数多く試みられている.

本報では, 筆者が開発した圧延加工の 3 次元連成解析

システム (Computational Rolling Mill [CORMILL] System: 図 1 参照) の構成について述べる^{1)~5)}. また, 本システムによる薄板圧延加工の解析結果とモデル圧延テスト結果⁴⁾との比較を通し, 解析精度について検討を加える.

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 3 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, 幅方向を x 軸, 厚さ方向 y 軸, 圧延方向を z 軸とする.

2.1 ラグランジェ乗数法 3 次元剛塑性 FEM

ラグランジェ乗数法剛塑性 FEM では, 静水圧応力を未知数とするために最も厳密な解析が可能である. その汎関数ならびに停留原理は次式により表される⁶⁾.

$$\Phi = \int_V (\int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}) dV - \int_S T_i \dot{u}_i dS + \int_V \lambda \varepsilon_{kk} dV \quad (1)$$

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

σ_{ij} は偏差応力, \dot{u}_i は速度, ε_{ij} は \dot{u}_i より導かれるひずみ速度, T_i は外力, 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. 上式は節点速度に関する非線形方程式となり, ニュートンラフソン法による反復計算を行い, 解を求める. 式(1)のマトリックス表示については, 文献⁵⁾を参照されたい.

速度境界条件は, 以下に示すとおりである.

1) ワークロール表面にて: $\dot{u} \cdot n = 0$ (2)

2) 変形域入口面にて:
 $\dot{u}_x = 0, \dot{u}_y = 0, \dot{u}_z = (Uniform)$ (3)

3) 変形域出口面にて:
 $\dot{u}_x = 0, \dot{u}_y = 0, \dot{u}_z = (Uniform)$ (4)

ただし n は, ワークロール表面の単位法線ベクトルである.

2.2 ロール変形モデルならびにフローチャート

本解析システムでは, 対象とする圧延条件およびミル

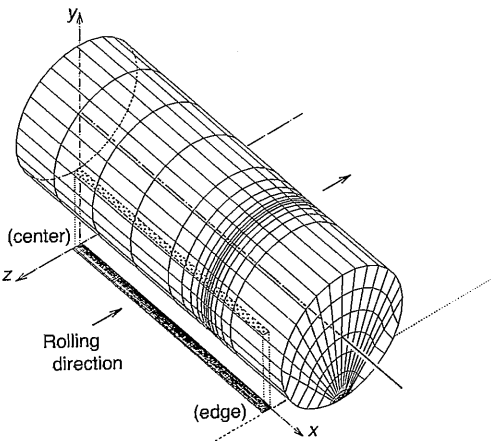


図 1 CORMILL System の構成および 3 次元 FEM 要素分割

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

表 1 各種の圧延機に対応したロール変形モデルならびにフローチャート

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

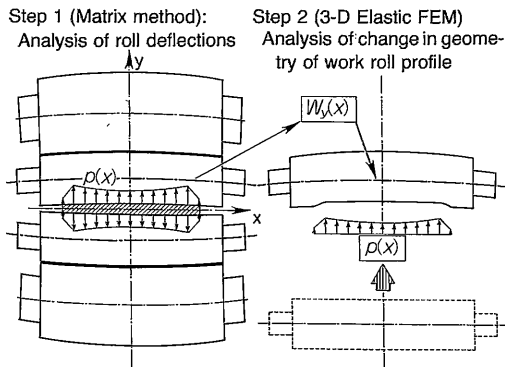


図 2 ワークロールの 3次元弾性変形解析の進め方

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。

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にたわみ変形の解析手法と 3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 (モデル II-2)。すなわち、図 2 に示すように、3次元剛塑性 FEM による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 3次元弾性 FEM 解析を行い、ワークロールたわみや扁平変形に起因する表面形状の変化を求める。このロールの 3次元弾性解析の結果求められたロールギャップ分布を用い、被圧延材の 3次元剛塑性 FEM 解析を実行する。

なお本解析システムでは上述のごとく、ワークロール変形の解析に 3次元弾性 FEM を適用している。そのため、ワークロール表面変形の厳密な 3次元解析を実行することができ、また、棒線材など異形材の 3次元解析にも適用が可能であるという特徴を有する。

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

モデル 4 Hi ミルによる薄板圧延実験と、本解析システムによる解析結果との比較をとおり、CORMILL System の精度の評価を行った結果を以下に述べる⁴⁾。表 2 に圧延条件を、図 3 に実験に用いた 4Hi ミルの概略図を示す。本圧延条件は仕上げミルの F2~F3 スタンドに対応している。ワークロールには、半径あたり $-50\mu\text{m}$, $0\mu\text{m}$, $+50\mu\text{m}$ の 2次元曲線クラウンを付与した。以後、ワークロールクラウン $= -50\mu\text{m}/\text{半径}$ (凹

研 究 速 報

表 2 圧延条件

ワークロール径	D [mm]	200.0	
〃 ネック部径	D_{WN} [mm]	110.0	
〃 ネック部長さ	D_{WL} [mm]	170.0	
〃 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	
〃 ネック部径	d_{BN} [mm]	200.0	
〃 ネック部長さ	d_{BL} [mm]	170.0	
ロールバレル長さ	L [mm]	740.0	

ワークロールクラウン	ΔR [μm]	試片 A	0
		試片 B	-50
		試片 C	+50

ヤング率	E [kgf/mm ²]	21000.0	
ポアソン比	ν	0.3	

初期板幅	[mm]	250.0	
初期板厚	[mm]	3.0	
圧下率	[%]	30.0	
圧延温度	[°C]	900.0	
ワークロール周速	V [MPM]	55.0	
被圧延材材質		SPCC	
変形抵抗式	[kgf/mm ²]	$\bar{\sigma} = 16.0\bar{\epsilon}^{0.21}\bar{\epsilon}^{0.13}$	
まさつ係数	μ	0.25	
前後方張力	[kgf/mm ²]	$T_b = T_f = 0.0$	
剛塑性 FEM 要素分割		$N_x = 10, N_y = 3, N_z = (4 + 8 + 3)$	

ワークロールクラウン) で圧延した試片 B, $0\mu\text{m}$ /半径で圧延した試片 A, $+50\mu\text{m}$ /半径 (凸ワークロールクラウン) で圧延した試片を試片 C と呼ぶ. 圧延テスト試片の初期板クラウンはほぼ $0\mu\text{m}$ であることを確認してある. 被圧延材のミル入り側温度は 900°C , ミル入り出側の張力は零である. 解析は, 出側板厚分布が $1\mu\text{m}$ 以下に収束するまで行った.

図 4 に, 解析ならびに実験により得られた圧延後板厚分布を比較して示す. CORMILL System による解析結果と実験結果とは, 板クラウン・エッジドロップとも, 数 μm 以下の範囲で一致している. 特に圧延後板クラウンが大きい試片 B・試片 A では, 解析結果と実験結果との対応は良好である. 以上より, 本解析システムを用いることにより, 板材圧延における板クラウンならびにエッジドロップを, 高い精度で予測可能であることがわかる.

図 5 は, 圧延荷重ならびに前後方張力についての解析結果である. ワークロールクラウンを, $-50\mu\text{m}$ (試片 B), $0\mu\text{m}$ (試片 A), $+50\mu\text{m}$ (試片 C) と変化させることにより, 板幅方向圧延荷重 (線荷重) 分布の形態が大きく変化する様子がわかる. すなわち, 凹ワークロールクラウンを付与した試片 B では, 板端部に鋭い極大値を有する線荷重分布が得られているのに対し, 凸ワークロールクラウンを付与した試片 C では, 板中央部で線荷重分布の極大値が得られる.

板幅方向塑性流動 $\Delta W(x)$ についての解析結果と実験結果との比較を図 6 に示す. 本図に示す実験結果は, 板クラウン比率と伸び差率の実測値より, 以下の式により算出したものである⁷⁾.

$$\begin{aligned} \Delta W(x) &= \int_0^x \epsilon_{xx}(x) dx \\ &= \int_0^x \left(\frac{h_c - h(x)}{h_c} - \frac{l(x) - l_c}{l_c} + \epsilon_{xx}(0) \right) dx \end{aligned} \quad (5)$$

ただし, h_c は板幅方向中央での板厚, $h(x)$ は幅方向位置 x での板厚, $\frac{l(x) - l_c}{l_c}$ は伸び差率であり, プロフィールメータにより実測した. また, 板幅方向中央での板幅方向ひずみ $\epsilon_{xx}(0)$ は零であるとした. 板幅方向塑性流動に関する解析結果と実験結果とは, 試片 B・試片 A では良く一致しているが, 試片 C では食い違いが見られる. 試片 C のようにワークロールに凸クラウンを付与した場合には, 圧延荷重分布が他の 2 条件と大きく異なっている. このことから考えて, 凸クラウンの場合には板幅方向分割数をより増加させ, 板幅方向塑性流動についての解析精度をより向上させる必要があるものと考えられる. この点に関しては, 今後さらに検討を進める予定である.

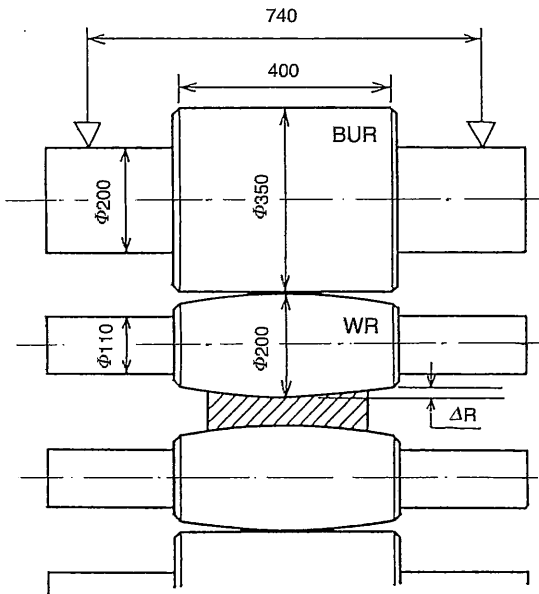


図 3 実験に使用したモデル圧延機

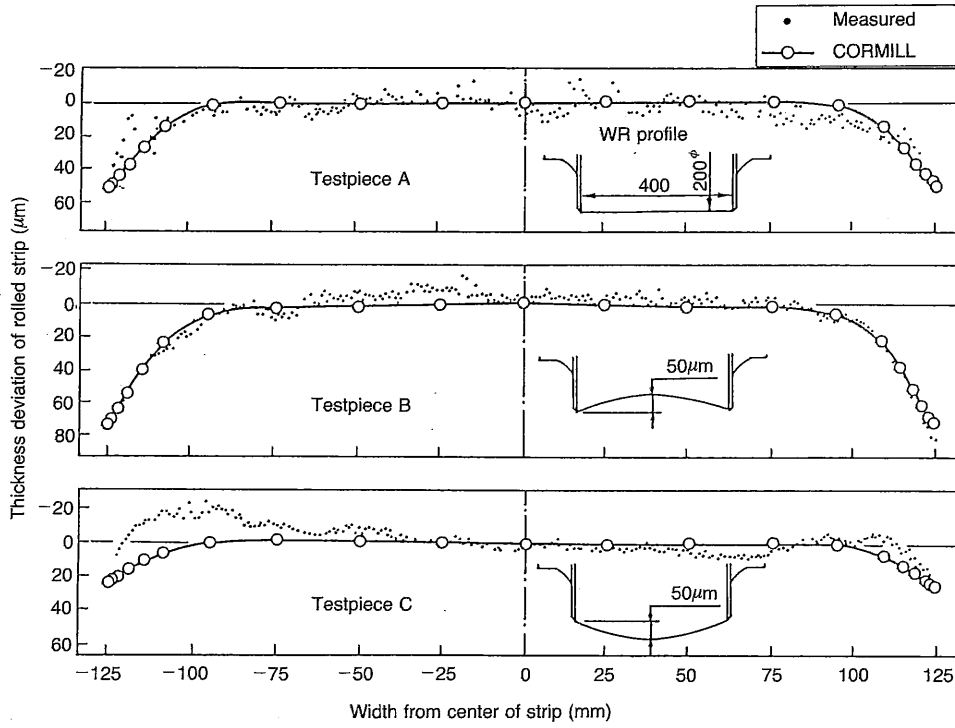


図4 板幅方向板厚分布についての実験結果と解析結果との比較

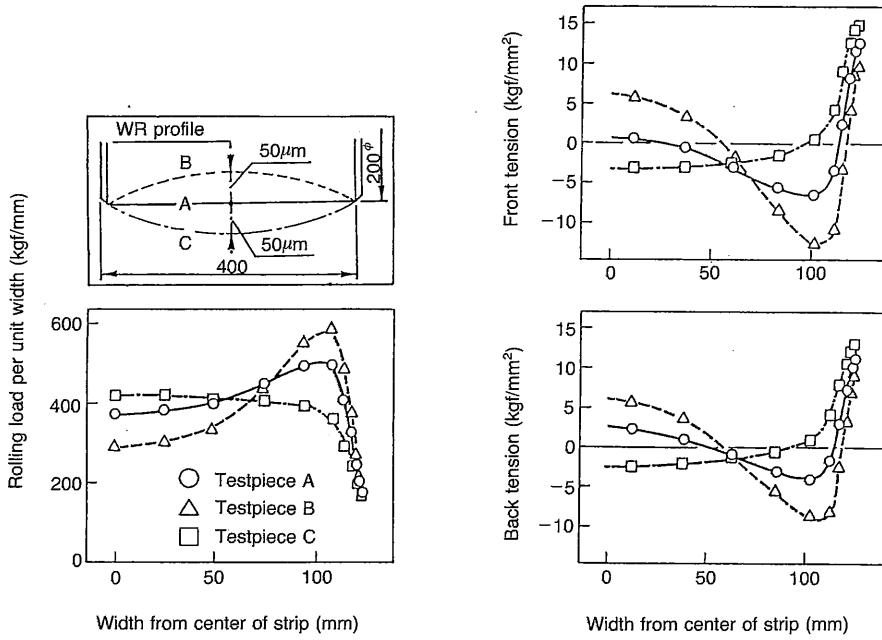


図5 板幅方向圧延荷重分布, 後方張力分布および前方張力分布の解析結果

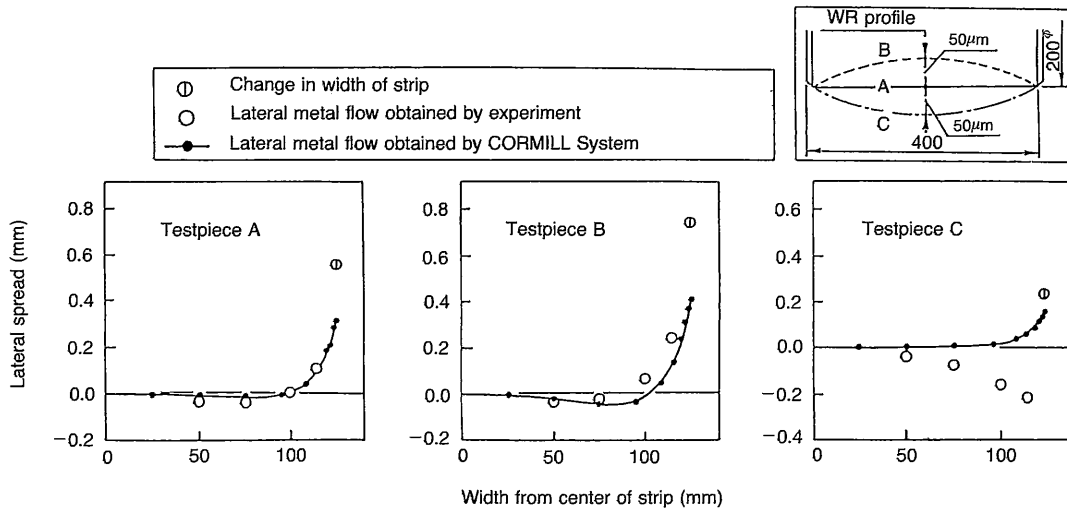


図 6 板幅方向塑性流動についての解析結果と実験結果との比較

4. 結 言

参 考 文 献

数値圧延機 CORMILL System の構成について述べるとともに、モデル 4 Hi ミルによる圧延テスト結果との比較をとおして、本解析システムの精度につき検討を加えた。低板クラウン（凸ワークロールクラウン時）の場合の解析結果については今後も検討する必要があるものの、高板クラウン時には、板クラウン・エッジドロップについての高精度な解析を、CORMILL System により実行することが可能であることが確認できた。

- 1) 柳本ほか：塑性と加工, 32-367 (1991), 1000.
- 2) 柳本ほか：塑性と加工, 32-367 (1991), 1006.
- 3) 柳本ほか：41回塑加連講論 (1990), 67.
- 4) 佐々木ほか：平 3 春塑加講論 (1991), 157.
- 5) 柳本：生産研究, 43-11 (1991), 512.
- 6) Li, G. J. et al.: *Trans. ASME, J. Engng. Ind.*, 104 (1982), 55.
- 7) 佐々木ほか：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1391.

(1992年 4 月 21 日受理)