

薄物箔圧延用多段ロール計算シミュレータの開発（第1報）

— シミュレータの概要 —

Development of Cluster Mill Simulator for Thin Strip and Foil Rolling (I)

— Outline of Simulator —

| | |
|---------|----------------------------------|
| 田 添 信 広 | IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長 |
| 梶 井 邦 彦 | 株式会社トライボロジー 解析技術研究所 代表取締役 博士（工学） |
| 石 井 肇 | 株式会社アイメック 産業機械設計部 部長代理 |
| 松 澤 司 | IHI メタルテック株式会社機械技術部 課長 |
| 石 塚 仁 | 株式会社アイメック 産業機械設計部 課長 |

薄物箔材用の通常4段および6段X、10段X圧延機のロール変形、板クラウンなどを統一的に解析可能な計算シミュレータを開発した。これによって、薄物箔材圧延で特徴的なキスロール圧延（板厚が薄いためにワークロール両幅端部が弾性接触しながら板圧延も同時進行する）領域を詳しく解析できるようになった。またその際のミル出側板クラウンへのロールベンダーなどのアクチュエータの効果を精度良く算定できるようになった。本稿では本シミュレータの概要を紹介する。

A rolling simulator for the Cluster Mill, especially the 6Hi X and 10Hi X type mills besides the conventional 4-high mill, has been developed for evaluation of rolling thin strips and foils. The evaluation includes roll deflection, pressure of rolls in contact, roll exit thickness distribution, and so on. Characteristics of kiss rolling (edge parts of work rolls are in contact, except material width) was clarified with this simulator, and the effect of roll actuators on mill delivery thickness distribution was estimated. The outline of the simulator is described.

1. 緒 言

これまで薄物箔圧延の負荷特性、ロール変形などに関しては以前から多くの報告がなされている。しかし、いずれも被圧延材とミル形式は一種類に限定された範囲での個々の解析例が見受けられるケースが多い。また、例えば圧延負荷を取っても、統一的な箔圧延負荷計算式が確立されている訳ではなく、未だ解明されていない領域の一つである。

現状の薄物箔圧延では、被圧延材の材質は鉄系硬質材、ステンレス鋼材、非鉄系ではアルミ合金、銅合金、チタンなどが挙げられ、ミル形式も4段ミルから6段、10段、12段、20段などの多段ミルが採用されている。一般的には硬い材料ほど、多段ミルの小径ワークロールによって1パス当たりの圧延荷重を小さくし、複数パスで箔製品が生産されている。

当社はこれまで、多くの薄物箔ミルの実績をもっている。しかし、被圧延材によってミル形式が異なっており、これらを統一的に解析できるシミュレータはこれまでもっていなかった。

そこで、今回筆者らは、これらの薄物箔ミルを統一的に解析するため、当社実績のあるミルを対象として、そのシミュレータの開発を行った。本シミュレータは薄物箔圧延に限らずもっと板厚の厚い通常の板圧延に適用することもでき、今回の対象ミル以外のミル形式に改造も容易である。

薄物箔ミル設計時のミル主仕様決定に重要なシミュレータとしての機能は、

- (1) 板厚が薄くなった場合、上下ワークロール端部が弾性接触（キスロール）しながら圧延する状況の圧延シミュレーションができること。すなわち、被圧延材の圧延圧力分布とワークロール弾性接触圧力分布を同時に正確に解析できること。
- (2) 多段ロールでの各ロール間の接触、非接触の状況を解析でき、接触部の面圧分布、ロールたわみ分布を精度良く解析できること。
- (3) アクチュエータとの組合せによって、その板プロフィール（幅方向板厚分布）が計算できること。特に、キスロール圧延時のロールベンダーの板クラウンに及ぼす効果を定量的に把握できること。

(4) 計算時間をできるだけ短くして、多量の解析ケースが処理でき、また精度良い結果が得られること、などが挙げられる。

今回、被圧延材はアルミ合金、銅合金、鉄系材料を対象とした。ミル形式は、アルミ合金用として4段圧延機、銅合金、鉄系薄物用として6段Xミル、10段Xミルを採り上げた。

先に述べた箔圧延負荷計算式は従来板圧延で使用されている Stone の式、および Hill の式（張力圧延の場合にも計算可能なように美坂が拡張補正した式⁽¹⁾）を採用した。これらの式を使って、薄板圧延領域から箔圧延領域までの実機データと解析値を比較することによって、いずれの式が実際に良くシミュレートできるかも調査した。

2. シミュレータの内容

2.1 計算方法の概要

本シミュレータは4段ミル、6段Xミル、10段Xミルの多段ロール圧延機の圧延負荷、ロール変形を計算する。第1図に計算対象ミルを示す。

圧延機を構成する各BUR（バックアップロール）、IMR（中間ロール）、WR（ワークロール）のサイズ、材質は同じであり、その配置は $Y=0$ 面、 $Z=0$ 面について対称であるとする。上部のBUR軸箱を支持し、下部

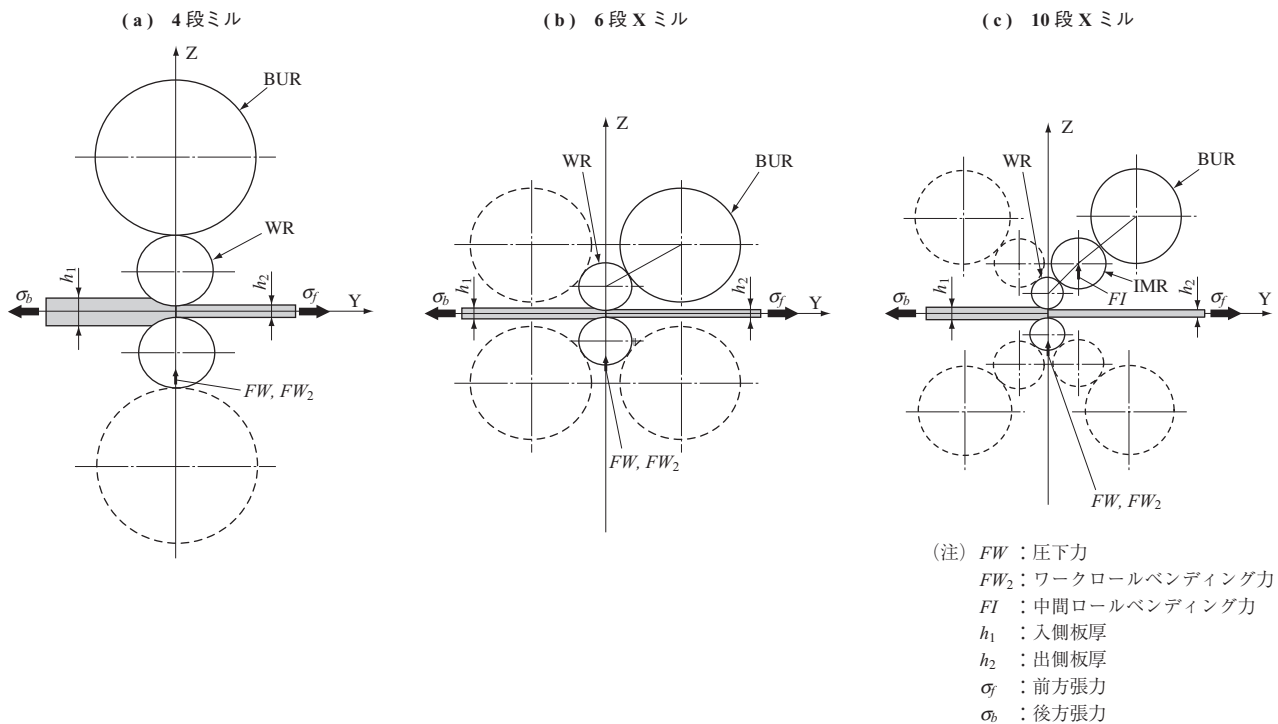
BUR軸箱にZ方向の荷重を掛けるものとする。

第1図ではこの対称性を考慮して計算対象ロールを実線で示している。対象ロールのX軸方向の共通区間 W を NX 等分し、分割モデルによって計算する。各分割中点のX座標を $X_i (i=1 \sim NX)$ とし、 X_i での物理量を計算する。物理量は出側板厚、圧延分布荷重、対象ロールの軸芯たわみ、ロール間接触面圧、ロールのYZ方向移動量などである。

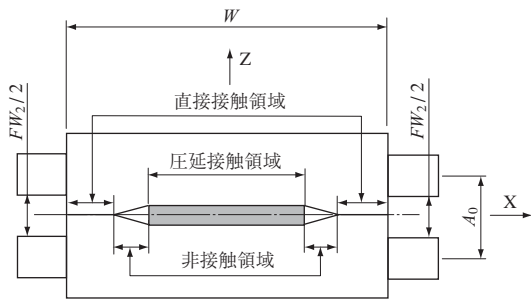
ロールが互いに直接接触する場合の変形計算には $x=X_i$ の各断面で円柱相互の接触に対するヘルツの理論解を使用する。圧延材とWRが接触する圧延接触領域については各 $x=X_i$ 断面で無限円柱によって圧延される場合の解を使用する。圧延荷重式はStoneの式または張力圧延に拡張したHillの式を使用する。

ロールのたわみはせん断変形を考慮した梁のたわみ式によって計算する。出側板厚の板幅方向の分布によって前方張力 σ_f の分布が変化する。この効果（張力フィードバック）を考慮した。

圧延材が薄い場合には第2図に示すように、上下ワークロールの端部で互いに直接接触することがある。この計算を可能にするため各 $x=X_i$ 断面でその都度、非接触、直接接触、圧延接触の判定を行い、反復法で計算する。連立方程式を解く方法ではあらかじめこれらの領域区分を仮



第1図 計算対象ミル
 Fig. 1 Calculated multi-rolls



第2図 WR 相互の接触
Fig. 2 Contact between work rolls

定しなければならないため煩雑である。

2.2 ワークロールのへん平変形反力の計算

ワークロールは圧延荷重によって局部的に第3図に示すようにへん平変形し、次の Hitchcock の式⁽²⁾が成立するものとする。

$$R' = R \cdot (1 + C_0 \cdot q_E / \Delta h) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$L = \sqrt{R' \Delta h} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$L_0 = \sqrt{R(h_1 - A + 2R)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

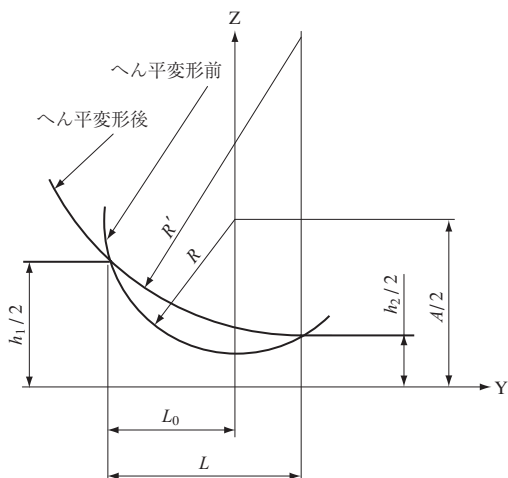
$$L - L_0 = C_0 \cdot q_E \cdot R / (2L) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C_0 = 16(1 - \nu^2) / (\pi E) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

- R, R' : へん平変形前後のロール半径
- L, A : 投影接触長さ, 軸芯距離
- h_1, h_2 : 入側, 出側板厚
- q_E : 単位幅当たりの圧延荷重
- E, ν : ロールのヤング率, ポアソン比
- $L - L_0$: へん平変形前後の曲率半径中心のずれ



第3図 ワークロールのへん平変形
Fig. 3 Roll flattening of work rolls

(1), (2) 式から次式が成立する。

$$q_E = (L^2 - R \Delta h) / (RC_0) \quad \dots\dots\dots (7)$$

A, R, h_1, h_2, L が与えられたとき, (7) 式から q_E を求めることができる。

2.3 圧延荷重の計算

圧延材は厚さ h_1 から h_2 まで圧延される。単位幅当たりの圧延荷重 q_S は Stone の式⁽³⁾では次のように与えられる。

$$q_S = k_m \cdot L [1 - (\sigma_b + \sigma_f) / (2k_m)] \cdot [\exp(c) - 1] / c$$

$$c = \mu L / h_m, \quad h_m = (h_1 + 2h_2) / 3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

美坂が張力圧延の場合に拡張した Hill の式⁽¹⁾は次のように与えられる。

$$q_S = k_m \cdot L \cdot [1 - (0.7\sigma_b + 0.3\sigma_f) / k_m] \cdot f$$

$$f = 1.08 + 1.79 \cdot a \cdot r \cdot \sqrt{1-r} - 1.02 \cdot r$$

$$r = (h_1 - h_2) / h_1, \quad a = \mu \cdot \sqrt{R' / h_2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

- k_m : 二次元変形抵抗
- σ_f, σ_b : 前方, 後方張力
- μ : 圧延摩擦係数

A, R, h_1, h_2, L が与えられたとき, (8) 式または (9) 式から q_S を求めることができる。

2.4 出側板厚の計算

ワークロールのへん平変形反力と圧延材の圧延反力は等しくなければならない。 A, R, h_1, L が与えられたとき, 次式を満足する h_2 を探し出す。

$$q_E(h_2) = q_S(h_2) = q(h_2), \quad 0 \leq h_2 \leq h_1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

2.5 投影接触長さの計算

(4) 式から次式が成立する。

$$2L(L - L_0) = C_0 \cdot q \cdot R \quad \dots\dots\dots (11)$$

(1) 式を (2) 式に代入し, (3) 式を (4) 式に代入した後, C_0 を消去して 2 次方程式を解けば次式が得られる。

$$L = L_0 + \sqrt{L_0^2 - R \Delta h} \quad \dots\dots\dots (12)$$

これから, 次式が得られる。

$$L_0 \leq L \leq 2L_0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

(13) 式の範囲で (11) 式が成立するように L を調整する。

2.6 軸芯距離が与えられた場合の単位幅当たりの荷重の計算

軸芯距離 A が与えられた場合, 第4図に示すように三

つの場合に分けて単位幅当りの荷重 q を計算する。 $x = X_i$ 断面のクラウニングを考慮した上下ロールの半径をそれぞれ R_1, R_2 とする。ワークロール相互の接触では $R_1 = R_2 = R$ である。 h_1 は入側板厚であるが、ロールが圧延材を挟んでいない場合には $h_1 = 0$ とする。ロールが圧延材を挟んでいる場合でも圧延材がない部分では $h_1 = 0$ である。

(1) 第4図-(a) $A \geq R_1 + R_2 + h_1$ の場合

ロールは接触しないから $q = 0$ である。

(2) 第4図-(b) $A < R_1 + R_2 + h_1, h_1 = 0$ の場合

ロールが互いに直接接触する。ヘルツの理論解から次式が成立する。

$$R_1 + R_2 - A = 2q/\pi \cdot (1 - \nu^2)/E^2 \cdot \{ 2/3 + \log [2\pi (R_1 + R_2)/q \cdot E/(1 - \nu^2)] \} \dots\dots\dots (14)$$

この式を解析的に解くことは困難であるから、数値計算によって q を求める。

(3) 第4図-(c) $A < R_1 + R_2 + h_1, h_1 > 0$ の場合

ロールが圧延材を挟んで接触する。次の手順によって q を求める。

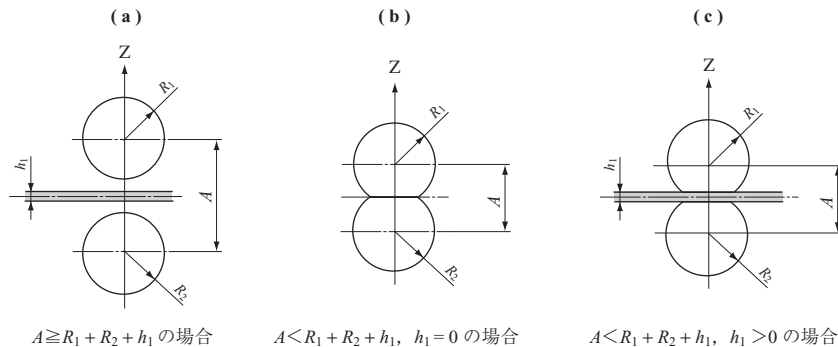
- (a) (13) 式の範囲で L を仮定する。
- (b) $0 \leq h_2 \leq h_1$ の範囲で h_2 を仮定する。
- (c) (7) 式から q_E を求め、(8) 式または (9) 式から q_S を求める。
- (d) (10) 式が成立するように h_2 を調整する。
- (e) (11) 式が成立するように L を調整する。

収束するまで (c), (d), (e) を繰り返す。

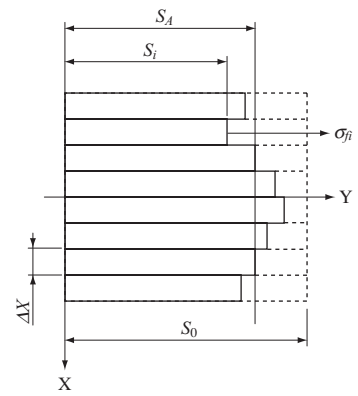
2.7 張力フィードバックの考慮

圧延された長さ S_0 の部分を切出した後、それを ΔX の幅の短冊状に切断したとする (第5図)。この結果、短冊片が S_i まで縮んだとする。短冊片の平均長さ S_A よりも長いものは圧縮の応力増分を受け、 S_A よりも短いものは引張りの応力増分を受ける⁽⁴⁾。

短冊片の長さのばらつきは出側板厚分布によって発生



第4図 荷重 q の計算
Fig. 4 Calculation of load q



第5図 張力フィードバックの概略
Fig. 5 Illustration of tension feedback

する。 h_{1i} の平均値を h_{1A} とし、 h_{2i} の平均値を h_{2A} とする。 Δh_{1i} と Δh_{2i} を次のように定義する。

$$h_{1i} = h_{1A} + \Delta h_{1i}, h_{2i} = h_{2A} + \Delta h_{2i} \dots\dots\dots (15)$$

Δh_{1i} と Δh_{2i} は平均値と比較して小さいとする。すなわち、

$$|\Delta h_{1i}/h_{1A}| \ll 1, |\Delta h_{2i}/h_{2A}| \ll 1 \dots\dots\dots (16)$$

このとき、塑性変形が体積一定の変化であることを考慮して式を変形すれば、前方張力が次式で与えられることが分かる。

$$\sigma_{fi} = \sigma_f + E \cdot (\Delta h_{2i}/h_{2A} - \Delta h_{1i}/h_{1A}) \dots\dots\dots (17)$$

ここで σ_f は平均前方張力、 E は板のヤング率であり、 $\sigma_{fi} \ll E$ であると仮定した。

2.8 ロール間分布荷重の計算

これ以降、物理量 $f(X_i)$ ($i = 1 \sim NX$) を $f(x)$ と表記する。ワークロールに掛かるベンダーの外力 FW_2 (第2図参照) と YZ 方向の WR 以外の接触ロールからの外力分布荷重 $q_{OZ}(x), q_{OR}(x)$ が与えられているとする。ワークロール間分布荷重を $q(x)$ とするとき、次式が成立する (第2図参照)。

$$\int q(x) dx + FW_2 = \int q_{OZ}(x) dx \dots\dots\dots (18)$$

計算手順は次のとおりである。

- (1) ロール端部軸芯距離 A_0 を仮定する。
- (2) $q(x)$ を仮定する。
- (3) 与えられた分布荷重 $q(x)$, $q_{OZ}(x)$, $q_{OY}(x)$ から、せん断変形を考慮した梁のたわみ式によってロールのたわみを計算し、軸芯距離の分布 $A(x)$ を求める。
- (4) 2.6 節の手順に従って $q(x)$ を求める。
- (5) 2.7 節の手順に従って $\sigma_r(x)$ を補正する。
- (6) $q(x)$ が収束するまで (3), (4), (5) を繰り返す。
- (7) (18) 式が成立するように A_0 を調整する。

ロールが圧延材を挟んでいない場合にも同じ手順でロール間分布荷重を計算することができる。

2.9 多段ロールの計算

第1図 - (c) に示す 10 段ロールを例として多段ロールの計算手順を示す。

- (1) 上部 WR と下部 WR のロール間分布荷重 $q_{WL}(x)$ を仮定する。
- (2) IMR と上部 WR のロール間分布荷重 $q_{IW}(x)$ を仮定する。
- (3) BUR と IMR のロール間分布荷重 $q_{BI}(x)$ を 2.8 節の手順に従って計算する。
- (4) IMR と上部 WR のロール間分布荷重 $q_{IW}(x)$ を 2.8 節の手順に従って計算する。
- (5) 上部 WR と下部 WR のロール間分布荷重 $q_{WL}(x)$ を 2.8 節の手順に従って計算する。
 $q_{BI}(x)$, $q_{IW}(x)$, $q_{WL}(x)$ が収束するまで (3), (4), (5) の処理を繰り返す。

BUR と IMR の接近量は IMR の Z 方向変位に換算され、IMR と上部 WR の接近量は上部 WR の Z 方向変位に換算され、上部 WR と下部 WR の接近量は下部 WR の Z 方向変位に換算される。

3. 解析結果

3.1 薄物材（含む箔材）の圧延機出側厚みの実機データと解析結果の比較

実機操業データおよび試作機圧延データと同じ条件で圧延機出側板厚の解析を行った結果の比較を、第6図に示す。

客先別のミル形式、ロール寸法を第1表に、被圧延材の材質、材料寸法、圧延圧下率などを第2表に示す。各

社での実圧延では、圧延条件に適したロールクラウンが付いており、これらを考慮して解析を行っている。

解析上も実機と同じく、下プッシュアップシリンダーによる圧下力を与え、入側、出側張力値、ワークロールベンダー値などは操業値を使い、変形抵抗値を入れて、ロールギャップ間の板厚を計算している。

A 社、B 社は通常の 4 段圧延機でアルミ合金の薄物材（含む箔材）の圧延を、C 社は 10 段 X ミルでの軟鋼薄物材の圧延を実施した例⁽⁵⁾である。第6図 - (a), - (b), - (c) は通常 4 段圧延機でのアルミ合金の薄物材（含む箔材）圧延のケースであり、各結果を次に示す。

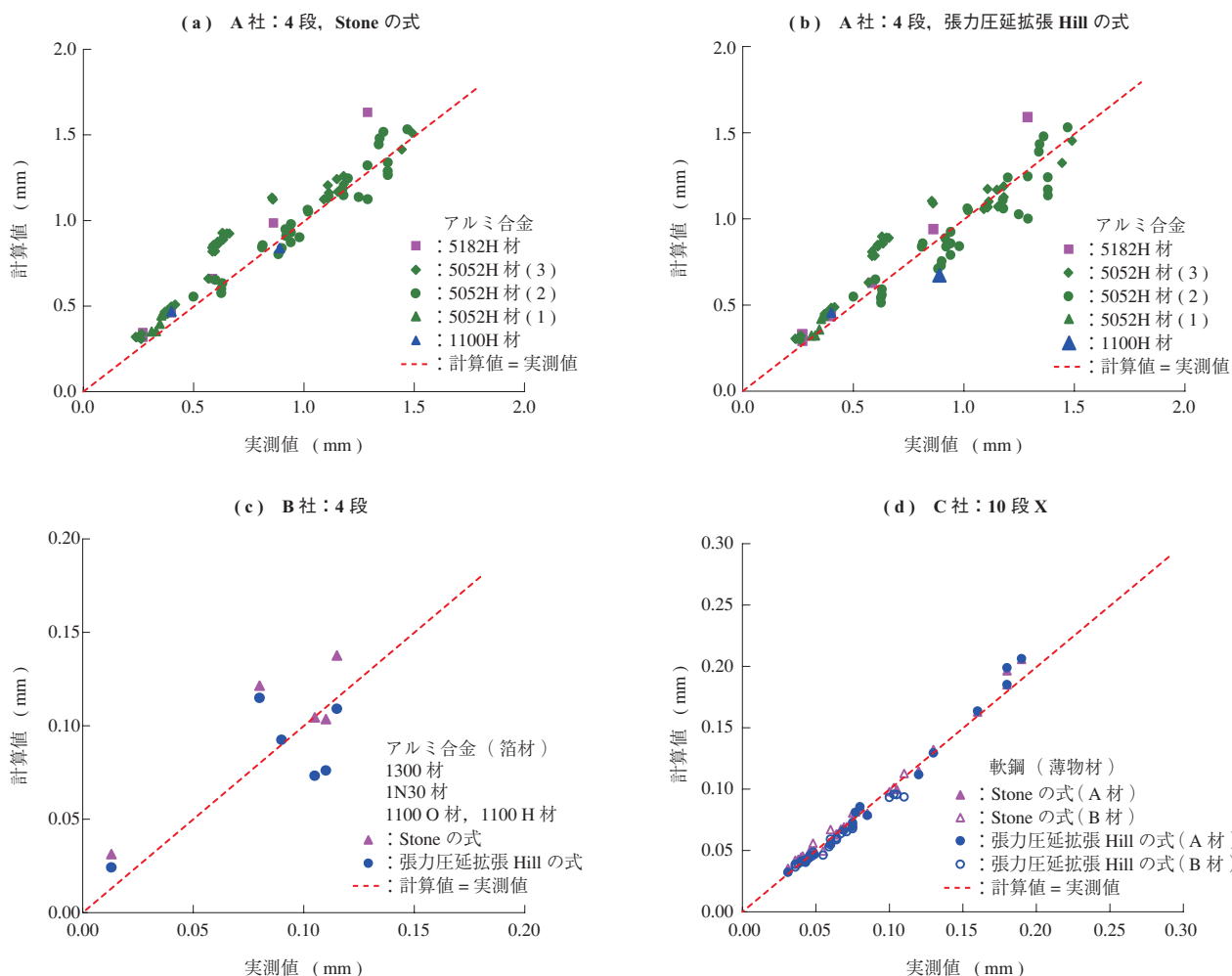
- (1) 第6図 - (a), - (b) の結果から、アルミ合金の材質を軟い 1 100 番から硬い 5 000 番台へ変化させても実機データと解析結果は良い一致をみる。
- (2) 第6図 - (c) はアルミ箔材のケースであり、実機データと計算値はおおむね一致する。
- (3) 第6図 - (d) は、10 段 X ミルでの軟鋼薄物材圧延のケースで、こちらも実機データと解析結果は良く一致する。
- (4) 圧延荷重式の Stone の式と Hill の式の差はあまり見受けられないが、特に軟鋼薄物材の第6図 - (d) は両式ともに差がなく、良く一致している。第6図 - (a), - (b) のアルミ合金の比較では Stone の式の方が、全体のばらつき幅が小さく、若干良いように見受けられる。
- (5) 板厚が薄い方でも比較的精度良く解析できるのは、キスロール領域で、全圧下力を正味圧延荷重と幅短部のキスロール荷重とに精度良く分離できていることも一因と思われる。

3.2 多段ロールでの解析結果の例

本シミュレータを使って 6 段 X ミル、10 段 X ミルにおける各ロール変形、ロール間接触圧力分布解析など行った結果を次に述べる。

3.2.1 6 段 X ミルの解析例

第3表に解析条件を示す。ワークロール (WR) 径 $\phi 140$ mm, バックアップロール (BUR) 径 $\phi 320$ mm, ロール胴長 900 mm, ワークロールベンダー ± 9.8 kN/チョックの仮想のミルを想定し解析を行った。第4表に解析結果を示す。出側板厚は 0.05 mm となり、圧下率は 29% となった。また、今回のケースではインクリーズ (INC) 時、ベンダー 0 とともに、WR 接触荷重が 0、すなわちワークロール両端部にすき間がある通常圧延であり、ディク



第 6 図 出側板厚の実測値と解析結果との比較
 Fig. 6 Delivery strip thickness comparison between measured values and analysis results

第 1 表 ミル仕様
 Table 1 Mill specifications

| 客 先 | ミル 形 式 | ロール寸法 | | | |
|-----|-----------|----------------|-----|-----|-------------|
| | | ロール径最大 (mm) | | | 胴 長 (mm) |
| | | BUR | IMR | WR | |
| A 社 | 4 段 | 1 220 | — | 470 | 1 850/1 900 |
| B 社 | 4 段 | 820 | — | 280 | 1 950/1 950 |
| C 社 | 10 段 X | 250 | 70 | 36 | 284/300 |

第 2 表 圧延条件
 Table 2 Rolling conditions

| 客 先 | 材 質 | 板 幅 (mm) | 被 圧 延 材 板 厚 (mm) | | 圧下率 (%) | 張 力 (MPa) | | バンダー使用範囲 kN/チョック | 圧延荷重式 |
|-----|-------|-------------|------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|---------------------|-------|
| | | | 入 側 | 出 側 | | 入 側 | 出 側 | | |
| | | | A 社 | アルミ合金 | | 800 ~ 1 350 | 0.37 ~ 2.10 | 0.24 ~ 1.50 | |
| B 社 | アルミ合金 | 950 ~ 1 670 | 0.03 ~ 0.17 | 0.03 ~ 0.11 | 35.0 ~ 60.0 | 20 ~ 48 | 18 ~ 36 | 608 ~ -29 | |
| C 社 | 軟 鋼 | 100 ~ 250 | 0.06 ~ 0.21 | 0.03 ~ 0.19 | 9.5 ~ 45.6 | 76 ~ 204 | 114 ~ 235 | — | |

リーズ (DEC) 時にキスロール圧延となっている。そのロール間同士の接触程度は小さく、接触荷重は 1.0 kN であった。

第 7 図に 6 段 X ミルのロール軸芯変位とロール面圧分布を示す。第 7 図 - (a) はバックアップロールの軸芯変位を示すが、バンダー荷重が小さいためいずれの場合も同一曲線上に乗っている。

第 7 図 - (b) はワークロールの軸芯変位を示し、各バンダー設定方向にワークロール軸芯もたわんでいることが

第3表 6段Xミル解析条件
Table 3 6Hi X type mill analysis conditions

| ケース | 色区分 | ロール径 (直径) | | ロール胴長 | 圧延荷重 | ベンダー | 張力 | | 板幅 | 入側板厚 | 圧延荷重式 | 荷重イメージ |
|---------|-----|-----------|---------|-------|------|------|---------|--------------|-----|------|-------|---------|
| | | BUR (mm) | WR (mm) | | | | Pr (kN) | FW (kN/チョック) | | | | |
| 1 (INC) | ■ | 320 | 140 | 900 | 785 | 0 | 9.8 | 74 | 177 | 700 | 0.07 | Stoneの式 |
| 2 (0) | ■ | | | | | | 0 | | | | | |
| 3 (DEC) | ■ | | | | | | -9.8 | | | | | |

第4表 6段Xミル解析結果
Table 4 6Hi X type mill analysis results

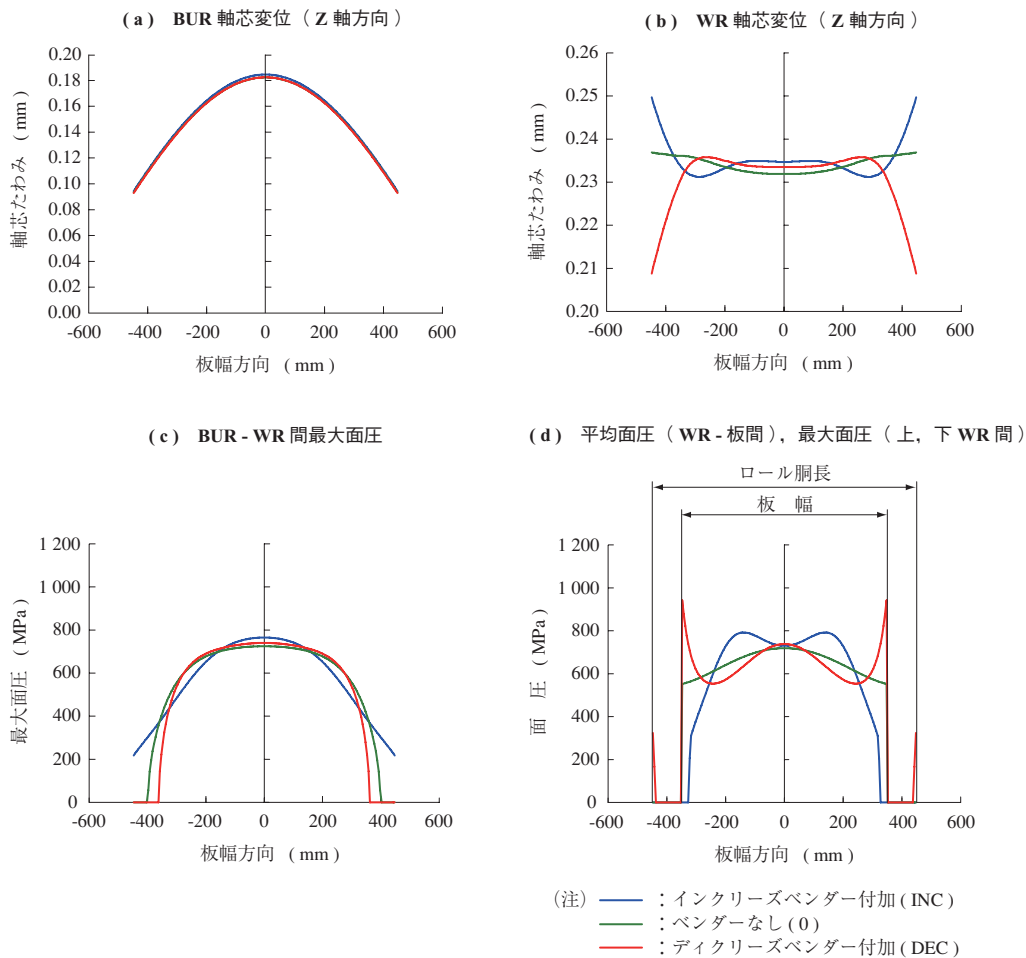
| ケース | 出側板厚 | 圧下率 | WR接触荷重 (kN) | 正味圧延力 (kN) |
|---------|---------|------|-------------|------------|
| | 中央 (mm) | | | |
| 1 (INC) | 0.0497 | 29.0 | 0.0 | 775 |
| 2 (0) | 0.0499 | 28.7 | 0.0 | 785 |
| 3 (DEC) | 0.0496 | 29.2 | 1.0 | 793 |

分かる。ベンダー 0 でワークロール軸芯が若干 INC 側に曲がっているのは、バックアップロールのインisialクラウン付与の影響のためである。

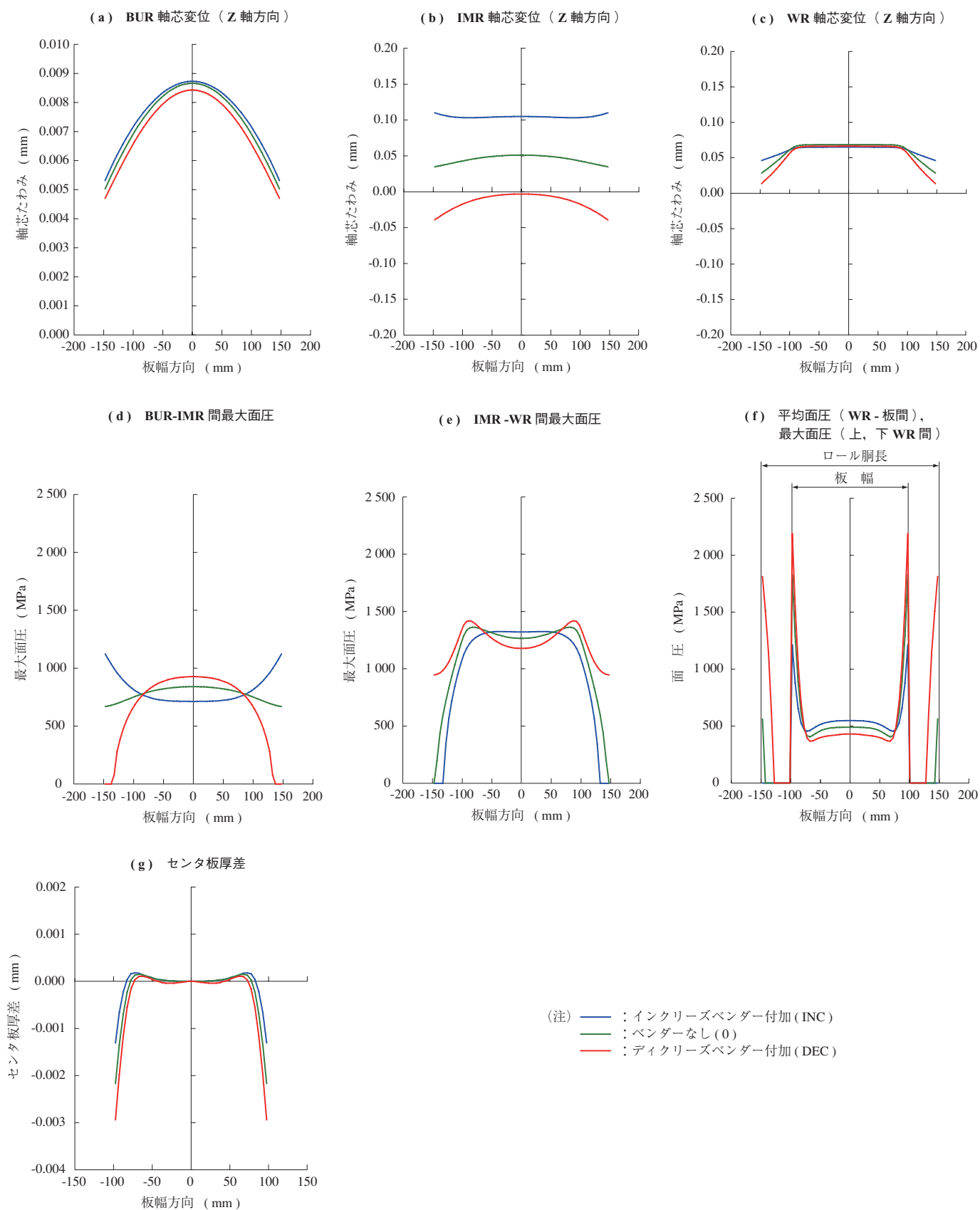
第7図-(c)はその時の BUR-WR 間の接触面圧分布を示す。第7図-(d)はロールギャップ内の板とワークロール間の圧延方向平均面圧分布、およびワークロール同士間の接触面圧分布を示す。

3.2.2 10段Xミルでの板クラウン解析の例

第8図に10段Xミルのロール軸芯変位およびロール面圧分布と板厚分布の解析例を示す。各ロール寸法、圧延



第7図 6段Xミルのロール軸芯変位とロール面圧分布
Fig. 7 6Hi X type mill roll deflection and rolling pressure distribution



第 8 図 10 段 X ミルのロール軸芯変位およびロール面圧分布と板厚分布
 Fig. 8 10Hi X type mill roll deflection, rolling pressure distribution and strip thickness distribution

第5表 10段Xミル解析条件
Table 5 10Hi X type mill analysis conditions

| ケース | 色区分 | ロール径 (直径) | | | ロール胴長 BUR/WR (mm) | 圧延荷重 Pr (kN) | ベンダー FI (kN/チョック) | 張力 (MPa) | | 板幅 W (mm) | 入側板厚 (mm) | 圧延荷重式 Stoneの式 | 荷重イメージ |
|---------|-----|-------------|-------------|------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------------|-----|-----------------|--------------|------------------|--------|
| | | BUR (mm) | IMR (mm) | WR (mm) | | | | 入側 | 出側 | | | | |
| 1 (INC) | 青 | | | | | | 9.8 | | | | | | |
| 2 (0) | 緑 | 250 | 70 | 36 | 300 | 211 | 0 | 119 | 114 | 200 | 0.209 | | |
| 3 (DEC) | 赤 | | | | | | -9.8 | | | | | | |

第6表 10段Xミル解析結果
Table 6 10Hi X type mill analysis results

| ケース | 出側板厚 | 出側 板クラウン (μm) | 圧下率 中央 (%) | WR 接触荷重 (kN) | 正味 圧延力 (kN) |
|---------|------------|----------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| | 中央 (mm) | | | | |
| 1 (INC) | 0.0798 | 1.0 | 61.8 | 0.0 | 191.2 |
| 2 (0) | 0.0727 | 1.8 | 65.2 | 0.6 | 210.3 |
| 3 (DEC) | 0.0749 | 2.5 | 64.1 | 16.1 | 214.4 |

諸元は文献⁽⁵⁾に基づいた。ワークロール径 $\phi 36$ mm, 中間ロール径 $\phi 70$ mm, バックアップロール径は $\phi 250$ mm で各ロール胴長は 300 mm 一定の小型ミルである。

また、文献⁽⁵⁾のミルはベンダー付きではないが、ここではベンダー付きとし、ワークロール径は小径のため、ベンダーは中間ロールベンダーとした。ベンディング力は INC 側 ~ DEC 側で 9.8 ~ -9.8 kN/チョックとした。解析条件を第5表に示す。圧延材は文献⁽⁵⁾にあるとおり、材質は軟鋼帯板で、入側板厚 0.209 mm, 板幅 200 mm, 圧延設定荷重は 211 kN, 入側, 出側張力は順に 119 MPa, 114 MPa と文献⁽⁵⁾の値を使用した。

解析結果を第6表および第8図に示す。第6表から、中間ロールベンダーが INC 側の場合は、キスロール圧延ではなく、ベンダー 0 および DEC 側ではキスロール圧延領域であることが分かる。

キスロール圧延時のワークロール同士の接触荷重はベンダー 0 の場合、0.6 kN と小さい。しかし、-9.8 kN の DEC 側ベンダーの場合は 16.1 kN と増加している。

また第6表から、圧延後の板厚（幅方向中央位置での）は 72 ~ 80 μm と変化した。これは圧下設定荷重が 211 kN と小さいため、ベンダー力の補正（圧下設定荷重に INC 側はベンダー力分だけマイナス、DEC 側はベンダー力分だけプラス）の影響を受ける。さらに、キスロール圧延領域では、ワークロールの接触荷重の影響を受け、ベンダー力補正後の荷重に、さらにワークロール接触荷重を差し引いた値が純粋に圧延に使用される正味の圧延力となったためである。したがって、ケースごとに正味の圧延

力が異なる結果、出側板厚も小さい範囲ではあるが変化することになる。

ミル出側板厚分布の解析結果を第8図-(g)に示す。ベンダーの条件以外に、板厚解析では張力フィードバックを考慮している。またバックアップロール、中間ロールはクラウンなしのストレートロールであり、ワークロールには 10 μm の放物クラウンを付けた結果である。またその板クラウン（幅方向センタ板厚と板端板厚との差）を第6表に示す。この表から、その絶対値は小さいが中間ロールベンダーを INC 側 ~ DEC 側に変化させると 1.0 ~ 2.5 μm と板クラウンは変化することが分かる。

第8図-(f), -(g)からこの条件のキスロール圧延では、通常圧延とは異なった傾向を示し、DEC 側ほど、すなわち、キスロール圧延のワークロール同士の接触荷重が高いほど、板幅方向両エッジの材料とワークロール間の面圧も最も高く、その高面圧でワークロールが材料側から押されるため、板幅中央部と比較して幅端部板厚が厚いインクリーズベンダー相当の効果が発生するものと思われる。すなわち、通常圧延と比較して板クラウン値は、小さい値を示す結果となる。

つまり、キスロール圧延領域では、DEC 側ベンダーの能力が大きいほど、通常圧延でのインクリーズベンダー相当の効果がある。すなわち、ベンダーの板厚分布に対する逆転現象があることが予測される。

4. 結 言

- (1) 従来、解析による計算が難しかった薄物箔材圧延領域を対象として、4段、6段X、10段Xミルのいずれにも共通対応可能なロール変形、板クラウンを精度良く計算できる解析シミュレータを開発した。
- (2) 複数のミル形式（4段、6段X、10段X）において、薄物箔材圧延時の上下WRのロール両幅端が弾性接触しているキスロール圧延時の、圧延正味荷重とWR接触荷重の解析を同時に精度良く行うことができるようになった。この結果、これまでキスロ

ール圧延かどうかの判定が難しかった領域での詳細検討およびその接触の有無の判定が容易に行えるようになった。

- (3) 薄物箔圧延での圧延負荷式は、従来の Stone の式と美坂が張力圧延の場合に拡張した Hill の式ともに出側板厚計算においてその優位さに差はなく、両式ともに使用可能である。ただアルミ合金の実測板厚データと解析値の比較において、Stone の式の方が若干良い一致をみた。
- (4) 10 段 X ミルの板クラウン解析結果から、キスロール圧延領域では、ロールベンダーの DEC 能力が大きいほど、ミル出側板クラウン値が小さくなる通常圧延時のインクリーズベンダー相当の効果、すなわち、ベンダーの出側板厚分布に関しての逆転現象があることが予測される。
- 今後、本シミュレータは箔圧延機の実機設備の仕様決定

において、各種のシミュレーションに有効に活用していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 美坂佳助：コールドタンDEMミルの影響係数
塑性と加工 第8巻-75号 1967年4月 pp. 188 -
200
- (2) 日本塑性加工学会編：塑性加工技術シリーズ7
板圧延 コロナ社 1993年2月 pp. 58 - 60
- (3) 日本鉄鋼協会編：圧延理論とその応用 誠文堂
新光社 1970年4月 pp. 65 - 67
- (4) 中島浩衛, 松本絃美, 上堀雄司：昭和47年塑加
工春講演 1972年5月 pp. 173 - 176
- (5) 横手義胤, 吉沢 勇, 嶋本康治, 丸山洋一, 新谷
定彦：300 mm 逆転式十段冷間圧延機 芝共ニユ
ース 43号 1966年 pp. 6 - 22