研究速報
特集 15
UDC 621.77.019：539.388.2

極限解析の圧延加工への応用 (第5報)
——非対称圧延による曲がりの発生に関するシミュレーション——

Application of Limit Analysis to Rolling Process·5th Rerport
—Simulation of Curvature of Product in Asymmetrical Rolling—

木内 学*・向 四海*
Manabu KIUCHI and Su-Hai HSIANG

1. はじめに

筆者らは，極限解析の手法を応用して圧延加工時の被圧延材の変形をシミュレートする解析モデルの開発を行っている．前報.[1] では，非対称圧延を総合的に扱うことができる解析モデルを提案し，その速度場の妥当性について検討した．本報ではロール径・ロール周速あるいは摩擦条件などの非対称条件を有する圧延時に発生する被圧延材の曲がりのシミュレーションを行い，得られた結果といくつかの実験結果と比較して，入側の外乱が製品の曲がりに与える影響について検討した結果を報告する．

2. 解析モデルおよび速度場の計算例

解析モデルを図1に示す．動的可容速度場には，被圧延材の入口速度 u_i, 上ロールの接触角度 α_1, 上下ロールの影響領域の割合を表す変数 ξ, 塑性変形域の長さ l などの可変パラメータが含まれている．その詳細については前報.[1] を参照されたい．これらのパラメータの最適化により，最小全変形エネルギが求められ，また出側の製品の流出速度の板厚方向分布（すなわち製品の先端の曲がりに対応）も求められる．解析に際しては，上述の4パラメータによる最適化のほか，上下ロールにかかる圧延荷重の釣合条件を導入する場合についても検討した．また，外乱としては，被圧延材の入側での傾斜角 λ, あるいは入側での被圧延材の上下方向への平行移動を導入し，出側の製品の曲がりに対するそれらの影響を調べた．

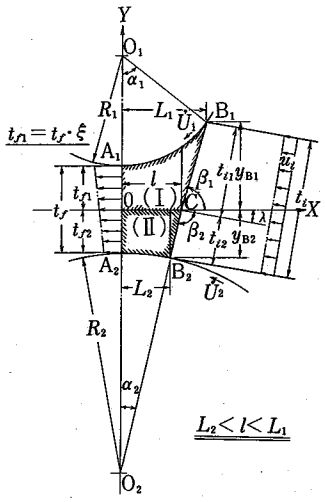


図1　解析モデル

本解析モデルより求めた，異径同周速圧延，あるいは異径異周速圧延の速度場の数値計算例を図2，図3に示す．図2には，異径同周速圧延で，入側での傾斜角2°の外乱が存在する場合の計算結果を示す．入側での傾斜角 λ が同一であっても，圧下率の増減によって出側の製品の曲がりの発生状況がかなり変化することが判る．図3は異径異周速圧延の解析結果である．入側の傾斜角が負の場合は，被圧延材が上側に傾きつつ進入してくることを示す．これらの図中に，最適化した各パラメータの値と出側で板材の厚さ方向の速度分布 q_f などが示されている．

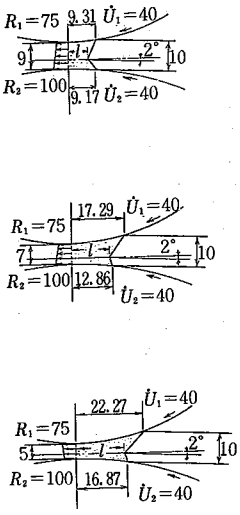
3. 従来の研究範囲

これまで非対称圧延に関する研究は各所で進められているが，製品の曲がりに関する検討は少なく，しかも実験による検討がほとんどである．製品の曲がりに関する従来の研究およびその検討範囲を表1に示す．実験供試材としては純アルミニウム，鉛や深絞り用冷延鋼板などが用いられている．これらの実験で得られた結果は各実験ごとに変化しており，それらの結果を統一的に理解するのは困難である．

4. 製品の曲がりの解析と実測値との比較

解析に際して，上下ロールにかかる圧延荷重の釣合を考慮する場合には，上述の4パラメータ (u_i, α_1, ξ, l) の

* 東京大学生産技術研究所　第2部

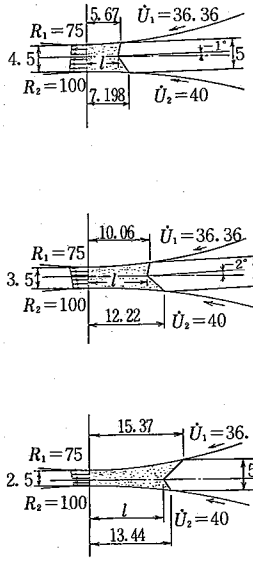


$r=10\%$
$u_t=36.56$
$l=7.246$
$\alpha_1=0.1244\mathrm{rad}$
$\alpha_2=0.0918\mathrm{rad}$
$\xi=0.681$
$q_r=-0.341\times10^{-2}$

$r=30\%$
$u_t=29.04$
$l=12.62$
$\alpha_1=0.2326\mathrm{rad}$
$\alpha_2=0.1289\mathrm{rad}$
$\xi=0.7375$
$q_r=-0.4899\times10^{-2}$

$r=50\%$
$u_t=21.85$
$l=16.05$
$\alpha_1=0.3015\mathrm{rad}$
$\alpha_2=0.1696\mathrm{rad}$
$\xi=0.714$
$q_r=0.5024\times10^{-2}$

図2　異径同周速圧延の解析結果



$r=10\%$
$u_t=35.64$
$l=5.46$
$\alpha_1=0.0756\mathrm{rad}$
$\alpha_2=0.072\ \mathrm{rad}$
$\xi=0.456$
$q_r=-0.626\times10^{-2}$

$r=30\%$
$u_t=29.1$
$l=9.58$
$\alpha_1=0.1345\mathrm{rad}$
$\alpha_2=0.1225\mathrm{rad}$
$\xi=0.425$
$q_r=0.104\times10^{-1}$

$r=50\%$
$u_t=21.92$
$l=12.07$
$\alpha_1=0.2064\mathrm{rad}$
$\alpha_2=0.1348\mathrm{rad}$
$\xi=0.631$
$q_r=0.96\times10^{-2}$

図3　異径異周速圧延の解析結果

表1　製品の曲がりに関する研究とその検討範囲

	同径異周速	異径同周速	異径異周速		ロール粗さ
	異速比：$\dot{U}_1/\dot{U}_2$	異径比：R_1/R_2	異径比：R_1/R_2	異速比：$\dot{U}_1/\dot{U}_2$	
中島ら	1.05～1.5	0.75	0.75	0.8～0.95	
本村ら	0.5～1.0	0.25～0.5	0.25～0.5	0.25～2.0	
COLLINS	0.92～0.97		0.95～1.03	0.95～1.03	$m_1=m_2$
JOHNSON	0.55～0.84	1.52～1.82	1.52～1.82	0.55～0.84	$m_1\neq m_2$
塩崎ら	0.5～1.5		0.8～1.5	0.8～1.5	

中で，ξ を釣合パラメータとして導入する．この場合全変形エネルギの最適化（最小化）を行う際に常に上下ロールに作用する圧延荷重が釣合の条件を満足するようにパラメータ ξ の値を選ぶ．ところで，一般に入側で傾斜角 λ が存在する場合の変形エネルギは，傾斜角の存在しない場合（$\lambda=0°$）の全変形エネルギより大きくなるが，通常，$\lambda=0$ の最適条件を実現することは困難であり，入側支持条件の不備により $\lambda\neq0$ となってその影響が現れる．

以下，本解析結果といくつかの実験結果との比較を示す．中島ら[2]は鉛を用いて，同径異周速，異径同周速，異径異周速などの非対称圧延実験を行い，製品の曲がり特性を調べた．まず，異径同周速圧延の実験としては，板厚が10 mmと5 mmの場合がある．その実験結果と本解析手法による計算結果との比較を図4と図5に示す．図中の破線部分は中島らの実験結果を示す．実験結果によると，同一圧延条件の下で，入側板厚あるいは圧下率が変化すると得られる製品の曲がり特性はその方向も含めて大幅に変化する．一方，解析結果によると，入側での被圧延材の傾斜がない場合（$\lambda=0°$），圧延後の製品の曲がり特性は，入側板厚または圧下率によって曲率の絶対値は変わり得るが，曲がりの方向は同じである．この解析結果と実験結果の相違を説明するためには，図に示すように入側の被圧延材の進入方向に関して0°～5°の傾斜角の影響を考慮することが妥当であると思われる．次に，異径異周速圧延の実験結果と解析結果を図6に示す．図から判るように，圧下率10%と30%の場合，解析値と実験値との対応をみるためには，被圧延材が入口で上側へ1°～2°の傾斜を有していたものと考えれば，無理なく説明できる．また，圧下率50%の場合では，被圧延

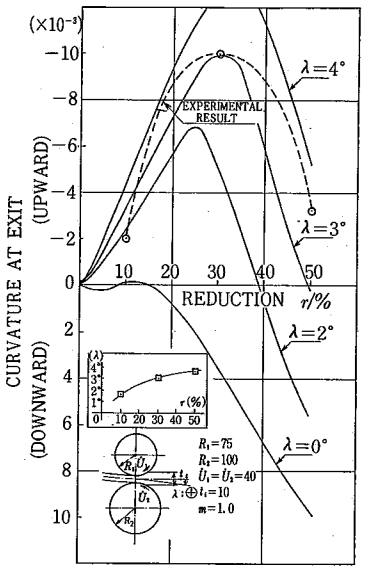


図 4　異径同周速圧延の実験結果と本解析結果の比較 ($t_i=10$)

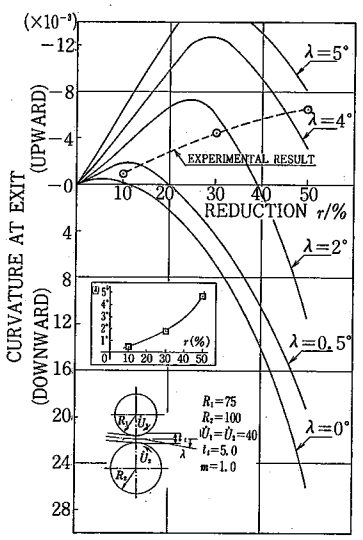


図 5　異径同周速圧延の実験結果と本解析結果の比較 ($t_i=5$)

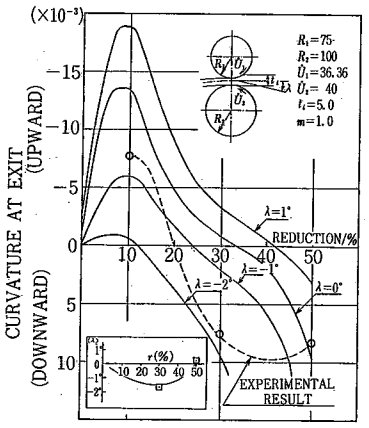


図 6　異径異周速圧延の実験結果と本解析結果の比較

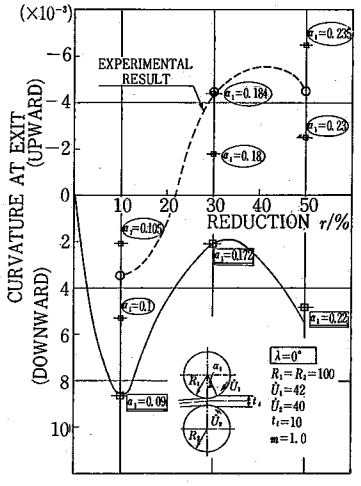


図 7　同径異周速圧延の実験結果と本解析結果の比較

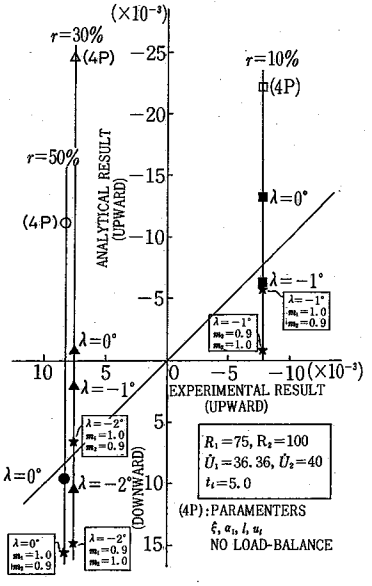


図 8　摩擦条件の影響

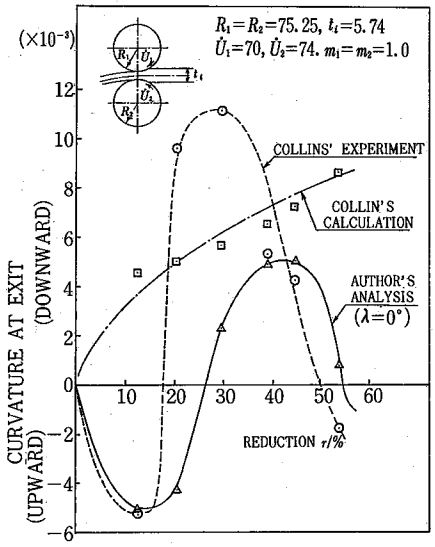


図 9　本解析結果と Collins らの結果と比較

材が下側へ1°程度の傾斜角を有するものと考えればうまく説明できる．最後に，同径異周速圧延の場合，被圧延材の平行移動の影響のみに注目して実験値と解析値の対応関係を検討した．その結果を図7に示す．図中の破線は中島らの実験結果，実線は入側での傾斜角がなく（$\lambda=0°$）その代わりに上下方向に平行移動する場合の解析結果を示す．図より，実線で得られた上ロールの接触角（α_1）より大きな角度を上ロールの接触角とすると，すなわち被圧延材が上方向に移動した位置から進入してくるものとすると実験結果と解析結果とよく一致することが判る．また，上下ロールの周速の相違あれいはロール表面の粗さの相違による上下ロールの摩擦条件の不同が，製品の曲がりに与える影響を図8に示す．図より，上下ロールの摩擦定数 m_1, m_2 が変わると，出側の製品の曲が

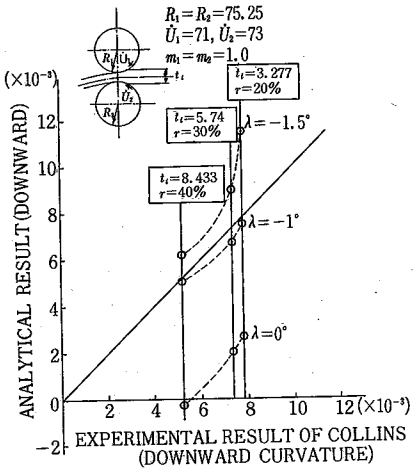


図10　同径異周速圧延の実験と本解析結果の比較(入側の傾斜角の影響)

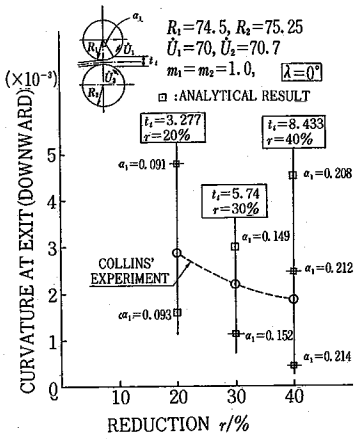


図11　異径異周速圧延の入側の平行移動の影響

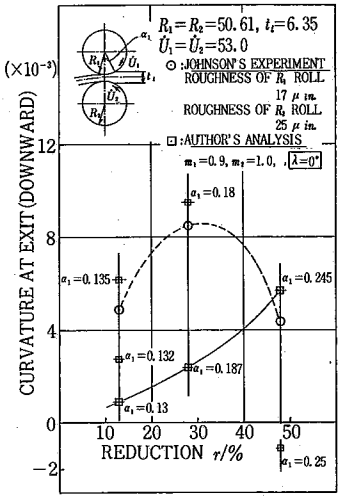


図12　Jonson らの実験結果との比較(同径同周速，ロール表面の粗さ不同)

りも変化することが判る．

Collins ら[3]はすべり線場法を用いて，非対称圧延における被圧延材の曲がり方向および曲率の大きさを予測し，また，実験では，供試材として鉛を用い，2-H_i ミルで同径異周速圧延および異径周速圧延を行った．まず，同径異周速圧延については，圧下率を12.5%から53.6%，異周速比 $\dot{U}_1/\dot{U}_2$ を0.92から0.97の間(常に下ロールの周速が速い）の実験およびすべり線場法による計算を行った．図9は異周速比 $\dot{U}_1/\dot{U}_2=70/74$ の場合のCollinsの結果と本解析手法を用いた計算結果との比較である．Collinsらの実験において上下ロールの粗さが均一で，被圧延材との間に常に，sticking friction の状態を保つように処理されているため，解析では摩擦定数 $m_1=m_2=1.0$ とした．Collinsは実験結果と計算結果との相違が，鉛の加工硬化特性によるとしているが，本解析結果と中島らの実験結果との比較によって指摘したように，Collinsらの実験においても，入側での外乱による影響も十分に考えられる．図10はCollinsらの実験に対応する同径異周速圧延の場合の入側での傾斜角の影響を調べたものである．異周速比 $U_1/U_2=71/73$ の下で，圧下率の変化によってそれぞれの板厚が違う場合での実験結果を示す．図より，実験する際の，入側での $-1°$～$-1.5°$ の傾斜角の発生による影響が現われていることが考えられる．また，Collinsらは上下ロール径の相違が非常に小さい場合（たとえば1%～5%）の異径異周速（異径同角速度）圧延も行っているが，その結果と本解析結果の比較を図11に示す．図から判るように，これらの場合においても入側での被圧延材の平行移動による影響を受けていることが十分に予想される．

Johnson ら.[4]は表面の粗さが異なるロールを組み合わせ，同径および異径ロールによる各種非対称圧延を行った．供試材は1/4×1″×6″の鉛板である．図12は彼らの実験結果と本解析の結果との比較である．ただし，上下ロールの表面の粗さが異なることに対応し，解析に際しては，上ロールの摩擦定数 $m_1=0.9$ とし，下ロールの摩擦定数 $m_2=1.0$ とする．図中の実線は本解析結果，破線は Jonson らの実験結果を示す．図より，同径同周速の圧延において，上下ロール表面粗さの相違の影響により，製品の曲がりも大きく変化することが判る．また，実験値と解析値との相違は入側での平行移動その他の外乱による影響と考えられる．

5. ま と め

非対称圧延の被圧延材の変形挙動を検討するために，汎用性のある変形モデルすなわち動的可容速度場を提案し，極限解析の手法を応用して数値計算を行い，一部の実験結果との比較を行った．圧延による製品の曲がりに影響する外乱としては，入側での傾斜，上下の平行移動などが考えられる．これらの外乱の影響を考慮することにより，実験結果を統一的に説明できることを明らかにした．

(1983年11月22日受理)

参 考 文 献

1) 木内・向：第34回塑加連講論，No. 201
2) 中島ら：第31回塑加連講論，P. 455
3) Collins ら：Int. J. Mech. Sci., Vol 16(1974), p. 389
4) Johnson ら：Int. J. Mech. Sci., Vol 8 (1966), P. 443