



薄板圧延におけるプロファイル・形状制御技術の現状と展望

Status and View in Profile and Shape Control Technology of Sheet Rolling

藤田 文夫 JFE スチール (株) スチール研究所
Fumio Fujita 主席研究員

1 まえがき

特に薄板製品においては、二次加工工程などの自動化が進み、安定な操業のために薄板製品の寸法平坦度の精度が厳密化してきている。また、省エネルギーのための軽量化を目的とする高強度鋼の採用も増加してきているが、高変形抵抗によるより厳しい圧延条件下で、寸法、平坦度ともに高い精度を維持することが求められてきている。この三十年間の形状・プロファイル制御に関する研究から形状・プロファイル制御の大きな潜在能力をもった圧延機が開発され導入されてきたが、上述の状況を反映して、近年更にこれらを十分に使い切るための制御モデルの見直しなども行われてきている。本解説では、プロファイル・形状制御技術の現状を解説し、展望したい。

2 プロファイル・形状制御装置の現状

油圧圧下を導入されて、ほぼAGCの適用が行き渡り始めた1960年代から、最後に残された課題としてプロファイル・形状制御についての研究開発が盛んになった。研究開発でのコンピュータの使用が一般化し、種々の解析が可能になったことも大きな動機になっていると考えられる。4段ロールの弾性変形解析として分割モデルによる解析¹⁾が行われ始めたのもこのころからであり、それ以前の解析解²⁾とくらべてより広範な条件の解析が可能となったわけである。この解析による大きな成果の一つは、我が国独自の圧延機形態が開発されたことである。中間ロールシフトを有する6段ミルHCミル、UCミルや、ペアクロスミル(PCミル)などである。これらのミルの導入実績例を表1に示す。

2.1 HC、UCミル⁵⁾

ワークロールベンダーは一般的な形状制御手段であるが、バックアップロールがワークロールの全長にわたって接しているために、ワークロールを曲げようとしてもその効果がバックアップロールによって制限されてしまっていること、また、圧延材の幅がロールの胴長よりも短いために、バックアップロールからの接触力によってワークロールの曲がりが大きくなりがちである。この問題を解決する方法としてバックアップロールの胴端部にテーパをつけてロール胴端部での接触圧力を小さくするなどの方法⁴⁾が考えられたが、板幅の変化に追従できないなどの問題点を有していた。このような問題を解決したのがHCミルである。軸方向にシフトする中間ロールを配して、ワークロールへのバックアップロールからの接触力を板幅部分のみに限定することで、ワークロールの曲がりを小さくし、圧延荷重変化に対しても形状変化が少なくなる機能を有する。このミルの導入によって、冷間圧延機の形状制御範囲が飛躍的に広がった。

また、4段圧延機の形状不良の一つに、幅端部の幅1/4部分の形状不良(クォーターバックル)または、幅端部と中央部の両方の平坦度が悪い複合形状不良があるが、従来のワークロールベンダーでは、ロールの弾性変形が幅端部と1/4とでほぼ同じ比率でしか変化せず、これらの形状についてはほとんど無力であった。UCミルはワークロールベンダー

表1 PCミル、HC & UCミル導入実績³⁾

Mill 型式	適用分野		国内初号機稼動年月		海外初号機稼動年月		累計 Plant 数		累計 Stand 数	
PC Mill	厚板圧延	1991 年 9 月		1997 年 9 月		2	28 Plant	2	96 Stand	
	熱間圧延	1984 年 8 月		1987 年 2 月		25		91		
	冷間圧延	1993 年 4 月		—		1		3		
HC & UC Mill	厚板圧延	1986 年		—		2	209 Plant	2	386 Stand	
	熱間圧延	1982 年 2 月		1987 年		38		111		
	冷間圧延	HC	1974 年	HC	1980 年	169		273		
		UC	1982 年	UC	1984 年					

とともに中間ロールにもベンダーを設置することによって、異なる曲がり曲線によって、複合形状制御を行う構想のものであった。現実のUCミルはワークロールと中間ロールで大きく異なるロール径を使わないのが一般的であり、両者の弾性曲がり曲線の違いはさほど大きくなく、複合形状制御はあまり有効となっていない。HC、UCミルは一時、熱間圧延機にも導入されたが、通板安定性に影響を及ぼす左右剛性が小さくなる点と、ロールたわみの制御量が小さいため熱間圧延機でもっとも重視されるプロファイル制御が十分にできないこと、ロール本数が多くなるためにロール費用がかさむなどの問題点があり、国内では広く採用されるにいたっていない。

2.2 ワークロールシフトミル

熱間圧延のプロファイル制御には、従来のワークロールベンダーでは不十分であるとの認識から、ワークロールを軸方向にシフトして、ロールプロファイルの位置を変えることで、ロールギャップ分布を変化させるワークロールシフトミルが開発された。日本においては、ロール胴端部の片側にテーパをつけてこの部分を幅端部に合わせる制御として開発されたが⁶⁾、熱間圧延では比較的大きい板の蛇行に追従することが難しいこと、上下ワークロールの摩耗量が異なるために幅左右の制御量を同一にできないなどの問題のため、一般的にはシフトを間歇的に行ってワークロールが圧延材に接触する幅方向の部分を変化させてワークロールの摩耗を分散させる手段に用いられるにとどまっている。

同様のコンセプトに基づいてCVCロール⁷⁾が欧州で開発されている。これは、ワークロールに上下ロールで位相の異なる3次曲線のプロファイルを持たせ、上下ロールを軸方向に互いに反対方向にシフトすることで、次式で表す2次曲線的なロールギャップ変化を得るものである。

$$\begin{aligned}\Delta g(x) &= \{a(x+L)^3 + b(x+L)^2 + c(x+L) + d\} \\ &\quad - \{a(x-L)^3 + b(x-L)^2 + c(x-L) + d\} \\ &= b'x^2 + c'x + d' \dots\dots\dots (1)\end{aligned}$$

ここに、 x は幅方向位置、 $\Delta g(x)$ はロールギャップの幅方向分布変化、 L は上下ロールのシフトによる位置の差である。この技術も上下のワークロールのプロファイル変化を利用するものであり、摩耗や熱膨張で上下のロールのプロファイルが異なる形状になると、左右非対称なプロファイル変化になるなどの前述の技術と同様の問題点もあるが、比較的容易に導入できる装置として欧州を中心に広く採用されている。

一方、冷間圧延機のプロファイル制御には片テーパワークロールシフトが採用され⁸⁾、熱間圧延機で発生し冷間圧延機で助長されるエッジドロップの制御に用いられている。従

来、冷間圧延機ではプロファイル制御は不可能であると考えられていたが、冷間圧延においてもエッジドロップが増大する事実から、逆に制御が可能ではないかとの発想から開発されたものである。特に板厚の厚い条件では、板幅端部から100 mm程度までの範囲で制御が可能であることが明らかにされており、実機においては主に第1、第2スタンドでプロファイル制御が行われる。テーパ角度によって転写率が異なるなどの現象や、ロールクロス機構と併用すると効果が大きくなるとの報告もある⁹⁾。転写率は実験等で求められているが、精度の高い制御のためには、これらの特性を説明できるようなメカニズムを明らかにすることが求められている。

2.3 ペアクロスミル¹⁰⁾

熱間圧延のプロファイル制御に必要とされる大きなロールギャップ分布変化を得る機構として、ワークロールとバックアップロールをペアにして上下で反対方向にクロスさせるPCミルが開発された。材料へのせん断変形が生じるためロール摩耗が大きくなること、通板性悪化、スラスト力によるベアリングの短寿命化などの問題が懸念されたが、各装置部分の検討によって克服され、実用化されている。当初の設備では無負荷時にしかクロス角を変更できなかったが、クロス角度変更のメカニズムの改良などで、圧延中にも変更できる装置になり、現在では熱間圧延機の標準的な装備になりつつある。また、厚板ミルにも導入されて強力なプロファイル制御装置となっている。このミルによれば、次式に示すようにわずかなクロス角度で大きなロールギャップ分布の変化が得られる。

$$\Delta C_M = \frac{(x \cdot \theta)^2}{R} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ΔC_M はロールギャップ分布変化、 x は板幅中央からの距離、 θ はロール一本当たりのクロス角度(ラジアン)、 R はワークロール半径である。例えば、ワークロール直径600 mm、板幅1200 mmの時に、クロス角度0.02ラジアン(約1.15度)で480 μ mのロールギャップ分布の変化が得られることになる。

ペアクロスミルは、単独のプロファイル制御能力はさほど大きくは望めないにもかかわらず冷間圧延機にも導入されている¹¹⁾。ロールの周速方向と材料の進行方向がクロス角度だけ異なることによって、材料の表面粗度が変化し光沢度を向上させる効果が副次的に得られている。

2.4 オンラインロールグラインダー¹²⁾

熱間圧延では、ロールの摩耗がプロファイル・形状の変化に及ぼす影響が大きい。このため、同一幅の圧延量の制限や、幅を順次狭くするような圧延サイクルが取られるなど、操業

上の大きな足かせであったが、オンラインロールグラインダー (ORG) の開発によって、これらの制約が大幅に緩和されることになった。さらに、ロール表面を研削すると同時にロールのプロファイルを計測する装置も組み込んで、必要な部分のみをより高精度に研削する方法や、従来のロールよりも摩耗の少ない、より硬度の高いハイスロールも効率よく研削できる装置も開発されている。

2.5 クラスター圧延機の形状制御装置

ステンレスなどの特殊鋼分野では、20段のセンジミアミルが用いられるのが一般的であったが、ロール変形解析などで、バックリングベアリングの軸をたわませることによる形状制御可能な範囲が狭いことが明らかにされた¹³⁾。この制約を取り除くために、個々のバックリングベアリングの軸心を偏芯させることによる12段圧延機 (CRミル) が開発され¹⁴⁾、極薄の特殊鋼以外では近年広く採用され始めている。また、20段ミルについても、バックリングベアリングの軸をよりたわませ易い構造としてサドル効果をより大きくし、形状制御効果を大きくする改造なども行われている¹⁵⁾。これらのミル形式におけるサドル制御は板幅方向に複数配置されているため、幅方向の各位置の形状を比較的自由に制御できると思われるが、サドルの制御は中間ロールの弾性変形を介して、ワークロールの変形を制御するものであるため、ロール表面のダメージなどの制限のため、大きな量の複雑な曲がり変形を得ることはできず、実質的に可能な制御は幅方向にほぼ2次曲線的な変化であると考えられる。このため、耳波、中伸びの共存する複合形状制御のためには他の制御手段と組み合わせる必要があり、片テーパ付ワークロールシフトが組み込まれたミルが開発されている¹⁶⁾。

2.6 ロール冷却による形状制御装置

形状不良は左右非対称であったり、幅方向に局所的に発生するものもあり、ロールベンダーなどの左右対称、比較的広い部分のたわみを制御する方法では対応が不可能である。このような形状不良に対しては応答が遅い欠点はあるものの、局所的な対応が可能なロール冷却による方法、いわゆる熱膨張制御が開発され、幅方向に複数の水冷ノズルを配したきめ細かな形状制御を達成している¹⁷⁾。また、冷却水の温度を変えて、制御の効率を上げる方法も開発されている¹⁸⁾。

2.7 その他のプロファイル・形状制御ミル

その他、開発された圧延機として、ワークロールの水平曲がりを利用した圧延機¹⁹⁾、ロールをアーバーとスリーブからなる構造として、両者の間に油圧やくさびによる装置を設けてスリーブを膨張させる形式のロール^{20, 21)}などが開発さ

れているが、広く導入されるにはいたっていない。

3 プロファイル・形状制御装置の展望

現状までに開発された多くの各種制御ミルの特性は、ほぼ板幅に渡って2次曲線的な変化を加えるものであり、板幅中央と端部の差といった大きなプロファイル・形状能力についてはほぼ満足できる能力を持っていると考えられる。また、冷間圧延での板幅端部の局所的なプロファイル変化であるエッジドロップについても、片テーパ付ワークロールシフトミルなどによってほぼ制御が可能である。しかしながら、幅方向の一部の局所的な形状変化などについては、ロールの弾性変形などを用いる方法では制御不可能で、ロール冷却によるロール熱膨張制御が唯一の手段と言えるが、応答性の問題が残る。

熱間圧延での、プロファイル・形状測定は最終スタンドの後では、X線板厚計、距離計などを用いた形式が実用化されているが、実質的に大きな量のプロファイルを制御する前段スタンドや、後段スタンドでの通板の安定化などの要求から、スタンド間での左右非対称を含めたプロファイル・形状の測定が求められている。

以上のように2次曲線的なプロファイル、中伸び耳波の単純形状の制御については比較的大きな能力を有する制御ミルが開発導入されてきているが、特にプロファイル制御の精度の要求は十分には満たされていない。その理由として、形状制御のようなフィードバック制御システムが主流ではなく、プロファイルを予測して制御装置をプリセットするシステムが用いられ、これらのシステムの高精度化、特にプロファイル・形状推定モデルの精度に向上の余地があることが挙げられる。

また、形状制御については、複合形状不良に対してはまだまだ課題が残っている。6段ミルのワークロールベンダーと中間ロールベンダーのような似かよった特性を持つ複数の装置の組み合わせで制御することは、効率的ではなく、本来の中伸び耳波制御範囲を狭めることにもなりかねない。テーパ付ワークロールシフトを組み込む¹⁶⁾などのようなまったく異なる特性の装置を導入することが必要になると考えられる。タンデムミルの場合には、最終スタンドで形状制御が行われるが、中間スタンドでは、プロファイル制御はもとより幅制御にベンダーなどが用いられるようになってきた。板厚、板幅、プロファイル、形状の4つの寸法を制御するには、単独の制御装置では不十分になってきている。各スタンドの圧延荷重を含めたロール変形に関する各要因をダイナミックに制御可能な制御システムが開発されることが望まれる。

4 プロファイル・形状推定モデルの現状

プロファイル・形状の要因の一つであるロールの弾性変形のモデル化については弾性理論と梁の理論を用いて、板幅方向に離散化された分割モデル¹⁾として表され、有限要素法などによってその精度の確認や、式の修正が試みられ、ほぼ完成していると考えられる。この分割モデルに形状変化係数による張力フィードバック効果を導入して、近似的に板クラウンの絶対値を計算するモデルも開発されているが、このモデルでは実際にプロファイルの変化する板幅端部での定量的な推定は難しい。この板幅端部での3次元応力場による材料の変形に関しては戸澤らが擬似三次元解析モデルを開発し^{22, 23)}ロール変形の分割モデルとの連成によって種々の解析を行った。その後、解析的な研究がいくつか試みられ^{24, 25)}、剛塑性有限要素法での解析²⁶⁾も行われているが、微妙な歪分布の問題であることから必ずしも適切な結果が得られているとはいえない。

実操業のプロファイル推定モデルとしては、メカニカル板クラウンの転写と、圧延前の板クラウンの遺伝を用いて次式で表されている²⁷⁾。

$$C_i = \eta' \cdot C_{Mi} + \zeta' \cdot C_{i-1} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 C_i は*i*スタンドの板クラウン（幅方向の規定の位置と幅中央の板厚の差）、 C_{Mi} はメカニカル板クラウン、 η' 、 ζ' はそれぞれメカニカル板クラウンの転写率、入り側板クラウンの遺伝係数である。メカニカル板クラウンは、ロールのプロファイルに、幅方向に均一な圧延荷重のときのロール変形を加えたロールギャップ分布によるクラウンと定義されている。メカニカル板クラウンのモデル式は、ロール変形の分割モデルによる解析結果を回帰した式や、分割モデルそのものを組み込むなどして、精度の高い推定が可能となっている。この(3)式は実験結果からの考察から表された式であるが、板プロファイル比率変化による張力分布のフィードバック効果などの荷重分布変化によるロール変形の考察から、

$$\frac{C_i}{h_i} = \frac{C_{Mi}}{h_i} + \zeta \cdot \left(\frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_{Mi}}{h_i} \right) \dots \dots \dots (4)$$

または、

$$\frac{C_i}{h_i} = \eta \cdot \frac{C_{Mi}}{h_i} + \zeta \cdot \frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} \dots \dots \dots (5)$$

として、メカニカル板クラウン比率 C_{Mi}/h_i の転写の比率 η と、入り側板クラウン比率 C_{i-1}/h_{i-1} の出側板クラウンへの遺伝係数 ζ とでプロファイル形成のメカニズムを表す式を導出している²⁸⁾。また、この考え方によれば、(4)、(5)式から転写率と遺伝係数の関係式は、

$$\eta + \zeta = 1 \dots \dots \dots (6)$$

で表される。この式における転写率と遺伝係数は一部解析も行われているが実験圧延や実機の実績などから推定されている²⁹⁾。

これらの式を組み込んだプロファイル制御システムにおいては、形状（平坦度）との両立が重要となる。形状を表す式として、クラウン比率の変化の一部が圧延方向の歪分布変化になるという考察から、

$$S_i = \xi \cdot \left(\frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_i}{h_i} \right) \dots \dots \dots (7)$$

の式が用いられる。形状変化係数と呼ばれる ξ は厚板圧延、熱間圧延を対象として実験圧延機や実圧延機の実験などによって求められている²⁹⁾。

また、近年、実験や解析などで転写率の幅方向分布の形が明らかにされ、これを考慮した制御システムも開発されている³⁰⁾。冷延でのエッジドロップ制御には、片テーパ付ワークロールシフトや、これとペアクロスミルを組み合わせた装置が導入され、実験によって、転写率が幅方向に分布すること、板厚で異なること、テーパの角度で異なることなどが既に明らかになっている。転写率の値を左右する要因や、分布の仕方についての明解なモデル化は前述のようにまだ行われていない。

5 プロファイル・形状推定モデルの展望

ペアクロスミルなどの効率的なプロファイル制御装置が導入されてきたが、プロファイルの高精度な制御は実現が難しい。この理由の一つがロールのプロファイルを変化させるロール摩耗や、熱膨張（サーマルクラウン）の推定精度が不十分であることによると考えられている。しかしながら、上記(3)、(4)、(7)式のプロファイル・形状推定モデルの基本的な考え方はほぼ確立されているものの、これらのモデルの精度や実際のプロファイル制御への適合性についてはあまり議論されていないようである。

まずメカニカル板クラウンの転写率、板クラウンの遺伝係数について考察する。冷間圧延や、熱延仕上げ圧延機の最終に近いスタンドでの圧延のような板厚の薄い場合には、材料の三次元変形の領域が幅端部の狭い領域に限定されるため、幅方向のほとんどの部分が平面歪状態であると仮定でき、上記(4)式におけるメカニカル板クラウンの仮定はほぼ適切である。しかしながら、特に板厚の厚い条件では、三次元変形の影響領域が幅端から数100 mmにも及ぶと考えられるため、クラウン比率が一定であってもメカニカル板クラウンの

定義である一定荷重分布とはならない^{22, 23)}。極端な条件での解析として、ロールを剛体と仮定した解析例²²⁾があるが、これによれば圧延荷重分布は幅方向に放物線分布となる。これはロールギャップ分布が均一であるために材料が幅方向に均一に変形して、幅方向変位が幅中央から線形に増加する。幅方向の変形の拘束の要因である、未圧延部の材料との間に発生するせん断歪による拘束と、ロール表面との摩擦力の幅方向成分の増分がこの幅方向変位に比例するため、幅方向の圧縮応力分布が幅方向に放物線分布となるためである。薄板圧延でのロールギャップ内が平面歪状態になるためには、幅端部から積み重なる幅方向の圧縮応力が幅端部の0の状態(平面応力)から増大して、ある値以上になることが必要である。板厚が薄い圧延の場合はロール扁平変形量の板厚に対する比が大きいので、扁平変形によって形成されるエッジドロップによる材料の幅方向変形のみで幅方向の圧縮応力を平面歪条件に達するに十分な値とする。板厚の厚い場合には、ロール扁平変形量の板厚の対する比が小さくなるため、扁平変形では平面歪状態を達成するには十分でなく、相対的に剛体ロールの場合に近く、圧延荷重の分布する範囲が幅端から広い範囲になると考えられる。このため、比較的板厚の厚い熱間圧延の仕上げ中段のスタンドまでは、メカニカル板クラウンを基準とした上記のクラウン推定式は、少なくとも圧延荷重の分布の分だけの誤差を生じることになる。

また、(4)式は、メカニカル板クラウン比率と、入り側板クラウン比率がロール変形に同等の作用をすることを表している。冷間圧延でのテーパワークロールシフトとベアクロスのプロファイル制御実験の比較⁹⁾から、テーパシフトによる転写率のほうが、ベアクロスによる転写率よりも大きい事などが明らかになっている。この結果からも、メカニカル板クラウンと入り側板クラウン変化のロール変形への作用の仕方は、それらの幅方向分布の形態によって異なるものと推定される。例えばベアクロス圧延機の場合メカニカル板クラウンの変化は幅全体にわたる2次曲線で表される。このため、入り側板クラウンが同様に2次曲線に近い変化をする場合は(6)式の関係で表すことができる。しかしながら、エッジドロップのような高次の曲線で表される板クラウン変化の場合には転写率と遺伝係数は必ずしも(6)式関係を満足するとは限らない。また、転写率の値そのものもロールメカニカル板クラウンの変化の仕方によって変るものであり、ロール摩擦やサーマルクラウンの変化のように高次の曲線成分の変化の場合には、転写率の値そのものへの影響も考慮する必要があると考えられる。

形状の評価の式にも考慮すべき課題がある。形状が問題となる板厚の薄い条件では、幅端部を除いて転写率がほとんど0となり、プロファイル制御の操作によってロールギャップ

分布を変化させても板厚分布がほとんど変化しない。これは、微小な板厚分布変化によって大きな張力分布が生じてロールが弾性変形しているためであると解釈できるが、逆に言えば板厚分布がほとんど生じていなくとも形状が変化していることであり、式(7)を用いて適切な形状を評価するためにはクラウン比率変化の推定が高精度であることが必要となる。クラウン比率変化の推定精度は現状のモデルではせいぜい 10^{-3} 程度であると考えられ、ほとんど平面歪状態での形状変化に相当するもう一桁下の精度での予測は難しい。プロファイル制御では形状を乱さない範囲での制御が不可欠であるが、上記のような理由から、式(7)を形状評価式として用いたプロファイル制御ロジックでは後段スタンドでもプロファイル制御を行う大きな操作量を出力する場合があります、スタンド間での形状が大きく乱れることが懸念される。このため、さらに操作量を限定するようなロジックを付け加えるなどの、制御の幅を意図的に狭めるような修正が加えられたりしている。このような問題は、形状変化の予測が的確であれば解決するものであり、プロファイル比率変化のみを用いる(7)式とは異なる新しい形状評価式が必要である。

以上のような、プロファイル・形状変化の基礎的な特性は、条件が容易に変更でき、計測誤差の配慮の要らない数値解析によって明らかにされるべきであると考えられる。たとえば圧延解析に多く用いられている剛塑性有限要素法においては、ロールギャップの外(予変形域)での変形の取り扱いなどで微妙な変形歪の変化が生じ、薄板圧延時の微小な歪変化を取り扱う際には誤差の要因になりやすい。一方、戸澤らの解析モデルに代表される差分モデルにおいては境界条件の設定を仮定することで各要因の傾向が明確に解析できるが、逆に実現現象でも確認されている予変形域での変形が取り扱えないという欠点を有する。また、板厚が薄い場合のような微妙な歪分布を取り扱う際には弾性歪の量も相対的に大きな影響を持つと考えられ、剛塑性体の仮定ではこの誤差も有する。今後、このような点を考慮して、弾塑性有限要素法解析などのより精細な解析が行われるようになると考えられる³¹⁾。特に実操業でのプロファイル制御の高精度化のためには、このような解析やこれまでの実験の結果を系統的にまとめあげて、転写率、遺伝係数を含むプロファイル推定の新たなモデルの考え方や、形状の評価の仕方などが提案されるべきであろう。

6 まとめ

熱冷延におけるプロファイル・形状制御はほぼ研究の段階は終了し、実用化の段階ではあり、制御装置の能力、実用モデルにおける精度などの実情は下記状況と考えられる。

①実操業で用いられる形状プロファイル制御のハード面では6段ミルや、ペアクロスミルなどの開発によってほぼ要求を満たす状況であると考えられる。

②プロファイル・形状制御システムに必要なモデルの内、圧延機の変形などに関しては、ロールの弾性変形はほぼ満足できる精度のモデルに達成していると考えられるが、ロール摩耗、サーマルクラウンのモデルは基本的な形はできているがまだ精度向上の余地があると考えられる。また、これらの量のオンライン計測や学習の方法などの開発も必要である。

③材料の変形に関しては、転写率や遺伝係数の基本的な傾向はほぼ解明されていると考えられるが、実用モデルの推定精度の要求に対してはまだ十分な解明が進んでいないと考えられる。

これらの特性はより精度の高い弾塑性有限要素法や差分法などの各種の解析によって順次明らかにされ、詳細なメカニズムの解明が行われるものと思われるが、現状までの各種実験結果や、解析結果からも3次元的な変形を考慮したメカニズムを表すモデルを構築することが可能であり、このようなモデルの構築は実操業での高精度化のためにも急務であると考えられる。

参考文献

- 1) 戸澤康寿, 上田雅信: 塑性と加工, 11 (1970) 108, 29.
- 2) K. N. Shoet and N. A. Townsent: Jarnal of Iron and Steel Institute, Nov. (1968), 1088.
- 3) 三菱日立製鉄機械(株)社内資料より.
- 4) 升田貞和, 平沢猛志, 大西良弘, 権田暁: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1153.
- 5) 西英俊, 芳村泰嗣, 吉本健一, 安川健一: 塑性と加工, 24 (1983) 268, 449.
- 6) 北浜正法, 北村邦雄, 田中富夫, 豊島貢: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1165.
- 7) W. Bald, G. Beisemann, H. Feldmann, and T. Schultes: Iron and Steel Engineer, 64 (1987) 3, 32.
- 8) 福武惇, 釜瀬敏秀, 実川正治, 社領武, 尾崎大輔, 藤田文夫: NKK技報, 134 (1991), 36.
- 9) 舘野純一, 剣持一仁, 北浜正法, 金子智弘, 斎藤輝弘, 山田恭裕: 塑性と加工, 43 (2002) 492, 56.
- 10) 大森舜二, 塚本穎彦, 日野裕之, 中島浩衛, 中沢吉: 塑性と加工, 28 (1987) 321, 1067.
- 11) 梶原哲雄, 橋本正一, 古元秀昭, 富澤淳, 浜田龍次, 伊山彰一: 塑性と加工, 37 (1996) 426, 717.
- 12) 森茂, 近藤繁俊, 木ノ瀬亮平: 日立評論, 78 (1996) 6, 447.
- 13) 水田篤男, 服部重夫, 山口喜弘: 塑性と加工, 28 (1987) 321, 1042.
- 14) 福原明彦, 加地孝行, 葉山安信, 寺戸定, 阿部光博, 福山五郎: 三菱重工技報, 25 (1988) 4, 331.
- 15) 相沢敦, 久保達博, 原健治, 内島治: 第53回塑性加工連合講演会講演論文集, (2002) 610, 125.
- 16) 舘野純一, 小廣善丈, 桂重史, 北浜正法, 半谷陽一: 塑性と加工, 44 (2003) 513, 1044.
- 17) 木川佳明, 水田篤男, 谷清博, 伊藤重晴, 小久保一郎, 伴誠二, 寺本晶, 塑性と加工, 27 (1986) 304, 587.
- 18) 斉藤武彦, 吉田尚志, 平間幸夫: 第54回塑性加工連合講演会講演論文集, (2003) 414, 105.
- 19) 楢本紘, 塩崎宏行, 藤田文夫, 木崎皖司, 佐藤一幸: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1260.
- 20) 益井健, 山田純造, 長井俊彦, 西野隆夫: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1188.
- 21) A. Quenhen and D. Boulot: 4th International Steel Rolling Conference, (1987), E21. 1.
- 22) 戸澤康寿, 中村雅勇, 石川孝司: 塑性と加工, 17 (1976) 180, 37.
- 23) 石川孝司: ふえらむ, 7 (2002) 5, 336.
- 24) 柳本潤, 木内学, 西山泰行: 塑性と加工, 36 (1995) 410, 254.
- 25) 梶原哲雄, 橋本正一, 大森舜二, 金子学: 塑性と加工, 36 (1995) 410, 260, 姜周泰, 戸澤康寿, 石川孝司: 塑性と加工, 27 (1986) 308, 1066.
- 26) 佐々木保, 柳本潤, 河野輝雄, 木内学: 鉄と鋼, 79 (1993) 3, 360.
- 27) 中島浩衛, 松本紘美, 菊間敏夫, 増田一郎: 製鉄研究, 299 (1979), 13148.
- 28) 小川茂, 松本紘美, 浜渦修一, 菊間敏夫: 塑性と加工, 25 (1984) 286, 1034.
- 29) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 栗津原博, 木村智明, 志田茂, 梶原利幸: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1172.
- 30) 本郷裕一, 梁井俊男, 常田弘: 塑性と加工, 38 (1997) 433, 61.
- 31) M. Fukumura, M. Fujikake, F. Fujita and Y. Fujita: Proceedings of the 7th International Conference on Steel Rolling, (1998) B4-3, 260.

(2003年11月28日受付)