

## 4.2 加工基盤技術の進歩

### 4.2.1 変形の理論解析

#### (1) はじめに

近年、圧延加工各分野における数値解析技術の進歩には目覚ましいものがあり、板・棒・線・形・管材などの生産の場で、主として有限要素法、一部エネルギー法（上界法）、の応用が急速かつ広範囲に進みつつある。具体的には、①被圧延材の部分的・全体的変形挙動の系統的な解明、②製品の形状・寸法精度の適確な予測と圧延条件がそれらに与える影響の解明、③ロールの弾性変形の正確な把握とそれらが製品の寸法精度に与える影響の定量的予測、④製品の内部組織や残留応力分布の推定、などが試みられており、さらに、それらの結果を利用した、⑤'ロールプロファイルあるいはロール孔形の合理的設計、⑥'パススケジュールまたは圧延工程の合目的化および最適化、⑦'新しい圧延方式・圧延機・圧延システムの開発、⑧'圧延制御技術・制御システムの高機能化および高精度化支援、⑨'製品品質の高度化と品質つくり込み技術の開発、などが続けられており、すでに多くの成果が得られている。

そこで、以下、剛塑性有限要素法を中心とする被圧延材の

変形挙動の解析技術の発展経過と、現在までに得られている各種の成果、あるいは残されている問題点などの概要を述べる。

#### (2) 剛塑性 FEM による圧延加工解析技術の進化

圧延加工の解析技術としては、長い間、いわゆるスラブ法が用いられ、極めて大きな成功を収めてきた。現行の先進的な圧延技術も、その基礎はスラブ法の活用によって確立されたといっても過言ではない。

しかしながら、コンピュータの利用環境の整備とともに、有限要素法、特に剛塑性 FEM の応用技術が急速に進み、現在、圧延加工の各分野において広範囲に利用されている。解析の結果得られる情報量の多さとそれらの多様さ、結果の精度および信頼性、解析手法としての柔軟性と汎用性、などの面から、剛塑性 FEM は、今後の発展が期待される弾塑性 FEM とともに、将来へ向けて最も高いポテンシャルを有する解析技術と考えられている。

ところで、有限要素法の圧延加工への適用は、1970 年代前半に提案された剛塑性 FEM の登場により本格的に始まったと考えることができる。以来我が国においても多くの研究成果が発表されてきたが、「圧延理論部会・理論解析小委員

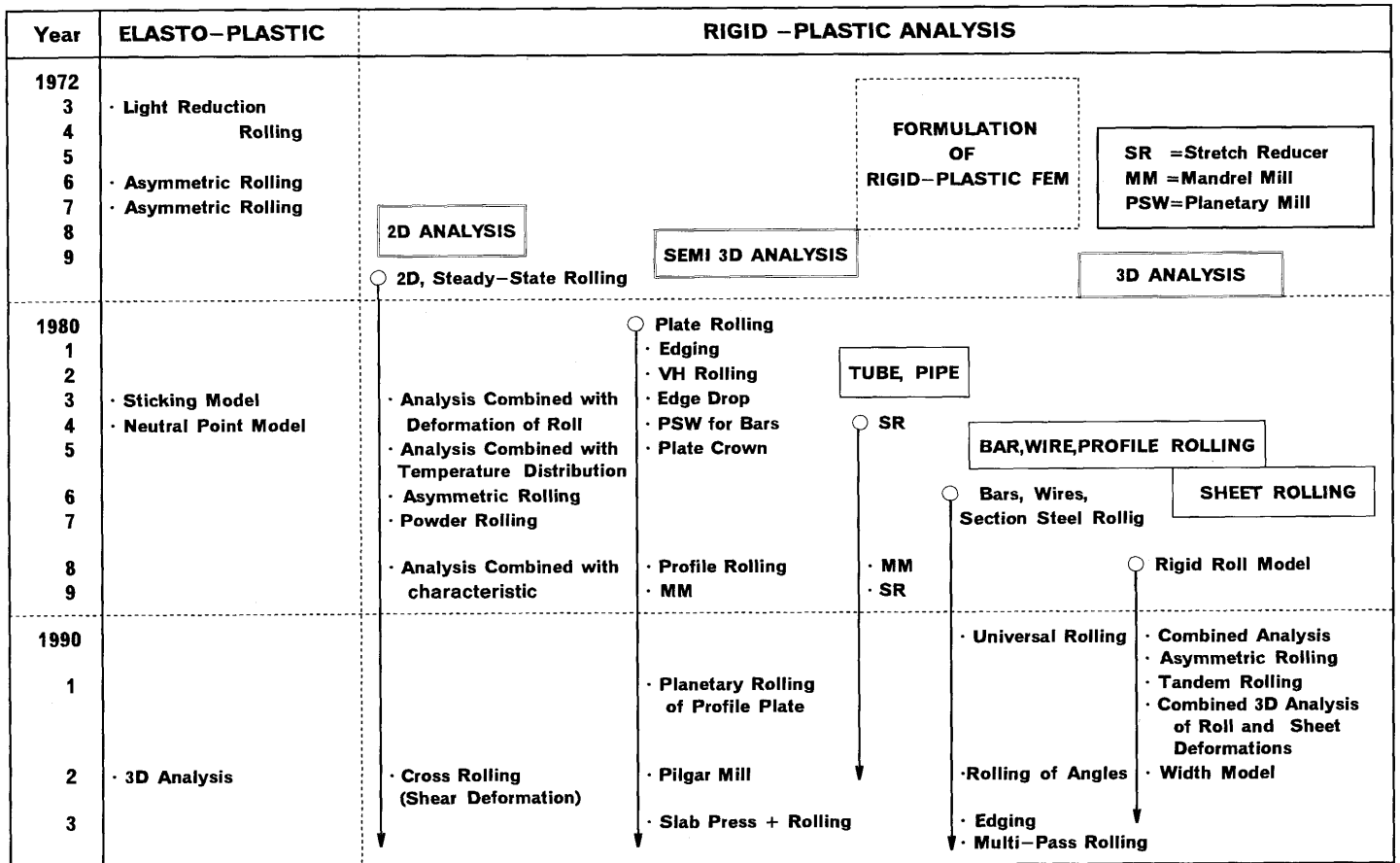


Fig. 4.1. Trend of FEM analysis of rolling processes.

会」においてそれらを取りまとめ整理した結果を Fig. 4.1 に示す。図より、2次元解析から近似3次元解析へ、さらに完全3次元解析へ向かって、種々の物理モデルや計算手法に関する検討をふまえて、解析技術そのものがしだいに進化し拡張されていった経過と、それらが板圧延、管圧延、棒・線圧延、および関連する多様な圧延加工の解析あるいは数値シミュレーションに利用されてきた発展の流れが容易に理解できる。

### (3) 圧延加工解析のための剛塑性 FEM の現状

現在、各所で開発および応用が進められている剛塑性 FEM には、解析モデルの構成および数値解析技術に関連して、いくつかの異なる考え方あるいは手法が導入されており、それらを整理して示すと Table 4.1 のようになる。

実際の解析に際しては、基本的なモデルの構成にかかわる問題以外に、以下に示すような物理モデルの構成にかかわる問題、境界条件の取扱いにかかわる問題、あるいは計算条件に属する問題などがある。

- ① 摩擦力のモデル、摩擦応力の算出方法、中立点の取扱い方、固着・すべりの判定方法
- ② 連立方程式の解法、収束判定方法および判定条件
- ③ 定常変形条件の判定方法および判定条件
- ④ 非変形域の取扱い方法、その判定条件
- ⑤ 上・下流側に設定すべき解析（変形）領域の考え方・設定方法
- ⑥ 解析対象領域に対する境界条件の与え方
- ⑦ 被圧延材とロールとの入・出口における接触判定条件および判定方法
- ⑧ 圧延荷重・トルクの定義、計算方法
- ⑨ 用いる要素の選び方、要素への分割の仕方、分割数
- ⑩ 被圧材の構成式の形・物性定義

これらのモデルや考え方・方法については、現在、各機関・各研究者の間にかなり相違がある。学会、研究会などにおける議論を通じてそれぞれ独自にモデルの修正・改良を

行っているが、統一化あるいは標準化が進んでいるとはいえず、これらのモデルや考え方の相違が、各所で得られた結果の客観的評価や比較検討に際して、若干の障害となっている。

### (4) 板材圧延の3次元解析

1980年代後半から、3次元剛塑性 FEM による板材圧延の数値解析が本格的に試みられるようになり、実用に供しうる成果が得られるようになった (Fig. 4.1 参照)。各所で展開された解析研究の主たる目的は①エッジドロップを含む圧延後の板形状（クラウン）の詳細な予測、②板形状の制御機能の高度化を目指して考案された各種の圧延機および圧延ロールの機能の解明、③それらの最適設計支援および使用条件の整備、などにあったが、現在なお続けられている種々の数値実験により、これらの目的はしだいに達成されつつある。

1990年代に入り、ロールの弾性変形解析技術と3次元剛塑性 FEM とを結合し、圧延後の板クラウンに与える圧延条件の影響を詳細に調べる研究なども積極的に行われるようになった。それらの結果として、ワークロールを小径化することによりエッジドロップを低減できること、極小径ワークロールの水平面内ベンディングが被圧延材の幅方向流れに影響を与え、ひいてはエッジドロップの低減に有効であること、などが見いだされた。

さらに、ロール表面の弾性変形を解析する3次元弾性 FEM をも組込んだ解析システムを用いて、熱間圧延時の板クラウンの変化を詳細に解析し、実測値との対比を通して、実用に供しうる精度の圧延製品の形状予測が可能であること、なども示されている。

薄板の冷間圧延では、ロールの出口近傍での被圧延材の弾性変形挙動の影響が無視できない場合や残留応力の解明が欠かせない場合もあり、3次元弾塑性 FEM の導入の必要性も指摘されている。しかしながら3次元弾塑性 FEM の適用は、剛塑性 FEM の場合に比して格段に難しく、簡便に使用しうる実用性の高い解析手段となるためには、今後検討を要

Table 4.1. Rigid-plastic FEM programs developed and being used by active institutions.

Strategy of analysis		Methods based on principle of virtual work			Method based on upper bound theorem	
		Direct utilization of principle of virtual work	Utilization of stationary condition of functional with penalty term		Minimization of energy function	
Constitutive equation	Unification of law	No restriction		Unified flow law based on upper bound theorem		
	Contractability of material	Contractable or non-contractable material	Contractable material	Non-contractable material	Contractable or non-contractable material	
Velocity field		Whole area	Limited area (Rigid-plastic FEM)		Whole area	Limited area
Method for solving		Hill's general method	Contractable material model Elastic volumetric strain	Lagrange multiplier method Penalty method	Energy method	UBET

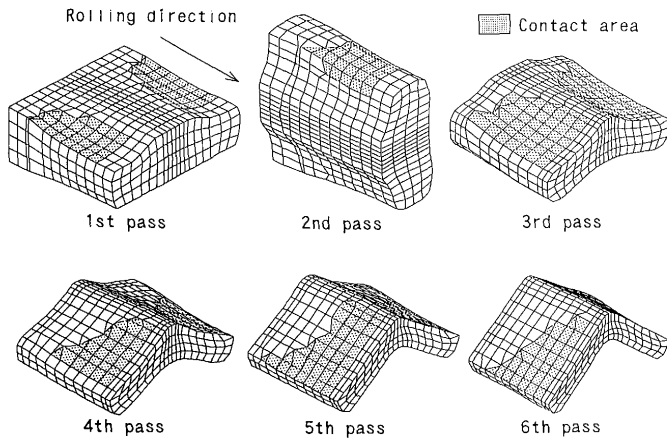


Fig. 4.2. Results of 3-D analysis of shape rolling.

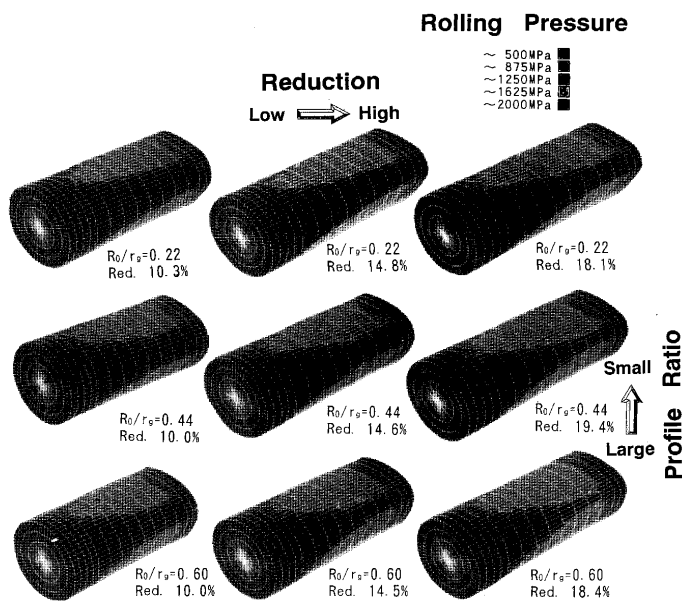


Fig. 4.3. Results of 3-D analysis of wire rolling.

する計算技術上の問題がいくつか残されている。

(5) 棒・線・形材圧延の3次元数値解析

この分野への3次元剛塑性FEMの適用は、棒・線材圧延のラウンド→オーバルパスなど、被圧延材が比較的単純な断面形状を有する場合から始まり、アングル材など各種形材の圧延、H形鋼のユニバーサル圧延、あるいは3ロールによる棒・線材の圧延の解析へと拡大してきた (Fig. 4.2 参照)。解析手法としてほぼ確立された観のある3次元剛塑性FEMは、ロールの孔形設計や工程設計の分野にも組み込まれつつあり、現行の圧延工程の評価手段や診断方法としても活用されている。一方、特定の製品分野については、3次元剛塑性FEMにより、各種の条件下での圧延工程を体系的かつ網羅的に解析し、その結果を整理して実用的なデータベースを構築し、それをを用いてパススケジュールの最適化や実操業条件の決定を行う試み (Fig. 4.3 参照) も行われている。さらに、そのようにして蓄積したデータとエキスパートシステムあるいはニューラルネットワーク理論などを組み合わせて、孔形やパススケジュールの設計をより効率的に行う試みなども始まっている。いずれにせよ、3次元剛塑性FEMは、既にこの

分野の要素技術として不可欠になっており、その利用なくしては、今後の技術革新に対応できないといえる。

しかしながら、3次元剛塑性FEMをロール孔形やパススケジュールの設計現場におけるツールとして利用するためには、計算に要する時間が長すぎるという問題が依然として残されている。そのため、利用者が文字どおり会話形式で解析の実行と結果の引出しを行いうるような手段あるいはシステムを開発することは、依然として極めて重要な技術的課題である。このような要求に応えるために、①複合要素法、②一般化平面ひずみ法、③変形モード法、などが提案されている。これらの方法では計算時間の大幅な短縮が期待できるので、解析技術としての改良を加え、上記の要求を満足しうる設計用ツールとして改良していくことが望まれる。

(6) 管材圧延の3次元数値解析

管材圧延の3次元変形解析は、①被圧延材ならびにロールおよびプラグ・マンドレルなどの幾何学的関係が複雑であり、解析に要する要素数が必然的に増すこと、②ロールと被圧延材との接触判定が煩雑であること、③ロールギャップ内で被加工材各点が描く空間的軌跡すなわち流線が複雑となり、定常流れの条件を満足させることがむずかしいこと、などにより、他の圧延分野に比較して若干遅れて進行している。そのため、これまでに報告されている3次元解析の事例は、管材圧延の中でも上記問題が比較的扱いやすいマンドレル圧延およびレデュースング圧延を対象とする数例に過ぎないが、被圧延材の変形挙動の解明やロール面に加わる接触圧力分布の把握に3次元剛塑性FEMが極めて有効であることが示されている。他方、上述の一般化平面ひずみ法の利用も検討されており、その結果はパススケジュールの設計や操業条件の選択に十分利用できると思われる。

4.2.2 トライボロジー

(1) 最近の進歩の概略

塑性加工の工具と材料界面のトライボロジー挙動に関して、潤滑メカニズムについて従来の簡単な混合潤滑モデルではなく、Fig. 4.4 に示すような界面のマイクロ接触状況を詳細に検討し、新しい潤滑モデルの提案がなされている。このモデルは従来の混合潤滑域において界面に持ち込まれた材料表面の凹部にトラップされた潤滑油に静水圧が発生し、中程度の速度で相対すべりをさせるとき新たに凹部の潤滑油がその周辺の真実接触界面に浸出して流体潤滑作用をするマイクロ

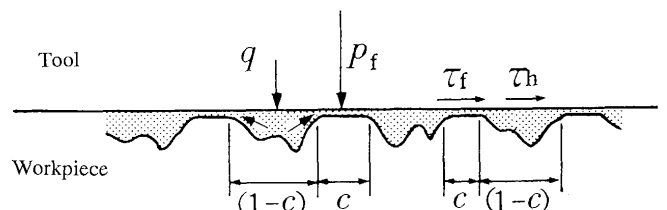


Fig. 4.4. Model of hydrostatic-micro-plasto-hydrodynamic lubrication mechanism.