

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

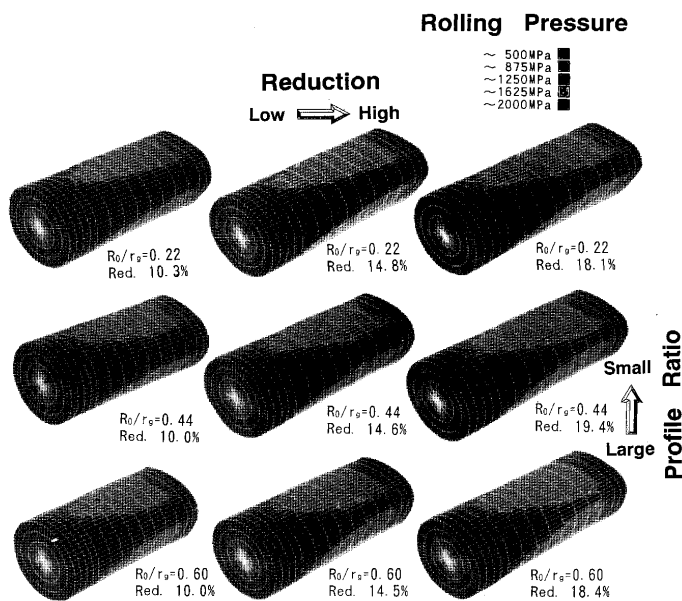


Fig. 4.3. Results of 3-D analysis of wire rolling.

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

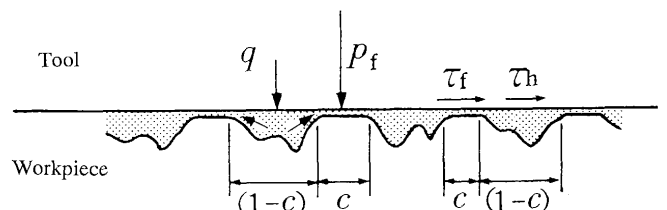


Fig. 4.4. Model of hydrostatic-micro-plasto-hydrodynamic lubrication mechanism.

性流体潤滑である。そのマイクロ塑性流体潤滑は低摩擦係数で材料の表面性状を改善するために有効であることが確認されている。

最近の圧延のトライボロジーに関しては、高能率化、高付加価値化に対応して、材料表面欠陥の発生防止、表面品質の改善、ロール材質、および圧延油の改良などの問題に対して盛んに研究が行われている。焼付きの研究に関しては優れたシミュレーション方法の開発がなされ、表面性状の研究に関しては表面光沢推定システムの提案がなされ、実機での各パス後の表面光沢が推定できるようになり、さらにロールと材料間のマイクロ接触状況についてもマイクロ塑性流体潤滑メカニズムを考慮した材料表面突起の平滑化メカニズムにまで推論を進められた。ロール材質においても冷間・熱間圧延とも長寿命化のための新しい材質の急激な進展を見ている。

ここでは、表面欠陥、表面性状、ロール材質、および圧延油についての最近の進歩について説明する。

## (2) 表面欠陥

ヒートクラッチと呼ばれる表面欠陥である焼付きは、ロールと材料間での界面温度が最も重要な因子であることが従来の研究で理解されていることをベースにして、最近の研究が行われている。界面温度の計算と焼付きの関係について、

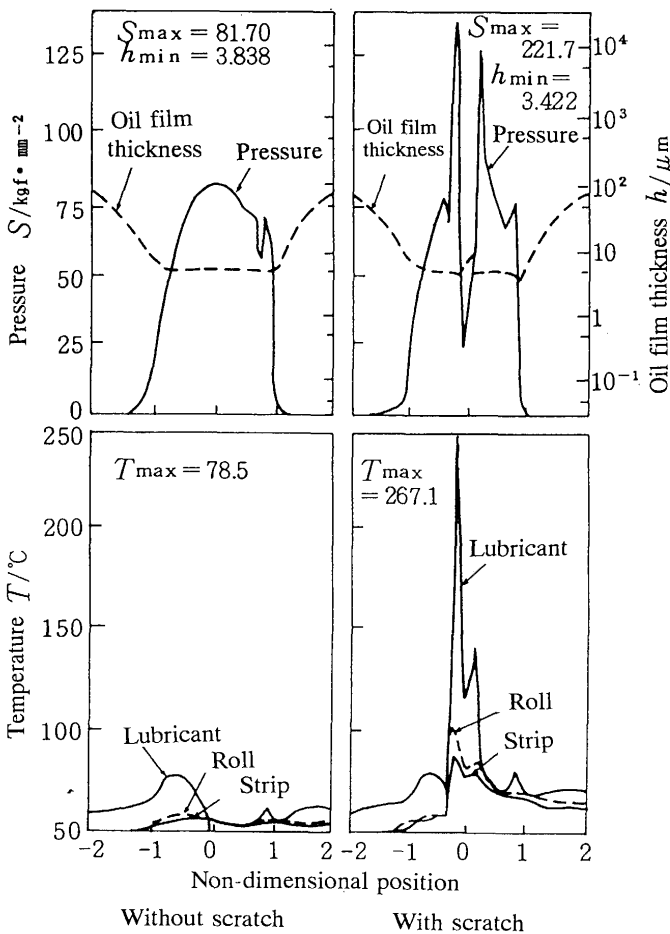


Fig. 4.5. Influence of the roll scratch on oil film thickness, pressure and temperature. (*Tetsu-to-Hagané*, 67 (1981), p. 2152)

ロール表面にスクラッチなどの傷があると、Fig. 4.5 に示すようにその部分で局部的に温度が上昇し、油膜の破断を起して焼付きに至ることを EHL 理論を用いた解析により定量的に求められている。一方、実験シミュレーションとしては従来の基礎的試験機とは大きく異なった Fig. 4.6 に示す評価試験機が開発された。この試験機はロール回転時も材料が同時に塑性変形するように、材料をロール周速に比べて 1/10 の低速度で移動させるように設計されており、実機と同じ相対すべり速度を得るためのロール周速は実機の約 1/10 でよく、試験機を小型で安価にすることが可能となった。さらに、この評価試験機から得られた焼付き限界のデータから実機使用のための評価を行うためのシステムの提案がなされた。このタイプの評価試験機が最近使用され、焼付きが評価されるようになってきている。

ステンレス鋼の耐焼付き性評価にもこの評価試験機が用いられ、鋼板に比べ非常に焼付きやすいことが示され、ステンレス鋼冷間圧延をタンデムミルで行う場合、現在 Z ミルで使用されているエマルジョン圧延油を用いると約 100 m/min の圧延速度で焼付きを発生しうることをシミュレーションしている。この結果は、将来タンデムミルを用いて 500 m/min の圧延速度でステンレス鋼板の冷間圧延を試みる場合、表面光沢を犠牲にして高潤滑性の圧延油を選ぶか、新しいロール材質を開発するかのどちらかの方法を現状として模索していく必要があることを示唆している。

## (3) 表面性状

最近の表面性状に関しては、圧延後の表面性状に及ぼすトライボロジー的影響について定量的に把握するための研究が新たに行われ、表面制御のためのデータベースを集めることが試みられている。さらに、このデータベースを基にして、表面制御するシミュレーション方法の提案、マイクロ接触状況の詳細な検討による実機圧延パスにおける表面平滑化へと大きな発展を示している。具体的には、鏡面ワーク

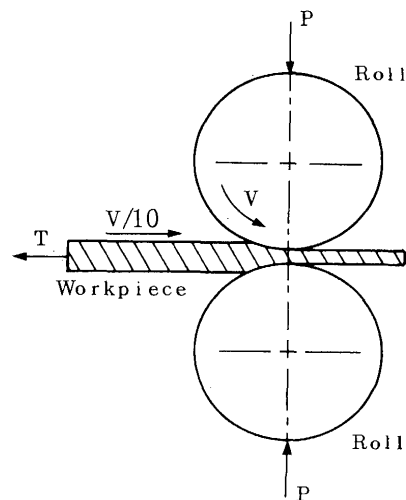


Fig. 4.6. Schematic diagram of the simulation testing machine. (*Tetsu-to-Hagané*, 74 (1988), p. 696)

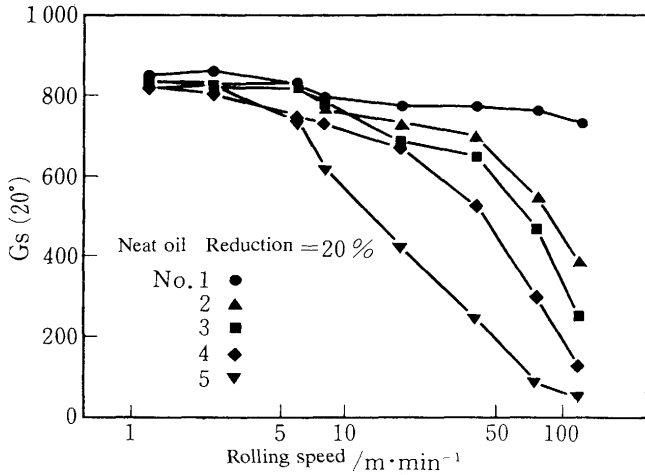


Fig. 4.7. Relation between surface brightness and rolling speed at a rolling reduction of 20% using lubricants of Nos. 1 to 5. (*Tetsu-to-Hagané*, 76 (1990), p. 576)

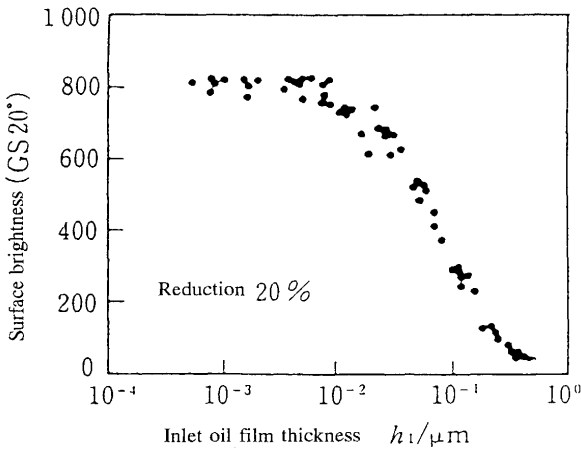


Fig. 4.8. Relationship between surface brightness and inlet oil film thickness when the surface roughness were smooth. (*Tetsu-to-Hagané*, 76 (1991), p. 576)

ロールを用いた各種圧延油粘度に対する表面光沢に及ぼす圧延速度の影響について Fig. 4.7 のように調べられ、体系的なデータベースが再構築され、その結果を Fig. 4.8 に示す表面光沢と入口油膜厚みの関係からストライバック線図と同様、一つの線ですべての実験点がプロットされることが示された。この関係は、圧延前のロールと材料の表面粗さの影響を考慮すると、表面光沢を

$$Gs = Gs(h, R_{a0}^{\text{ロール}}, R_{a0}^{\text{材料}}) \dots \dots \dots (4-1)$$

でまとめることができることが示されている。(4-1)式をベースにしてステンレス鋼の冷間圧延における表面光沢推定システムが提案され、実機での各パス後の表面光沢を実験室レベルの圧延機を用いて簡単に推定できることが示された。また、最近では、以上の定量的な理解の上に立ち、ロールと材料間のマイクロ接触状況を詳細に検討し、材料の表面の平滑化メカニズムについてまで議論が進められている。

(4) ロール材質

現在、圧延用ロールに最も必要とされている要請事項は、

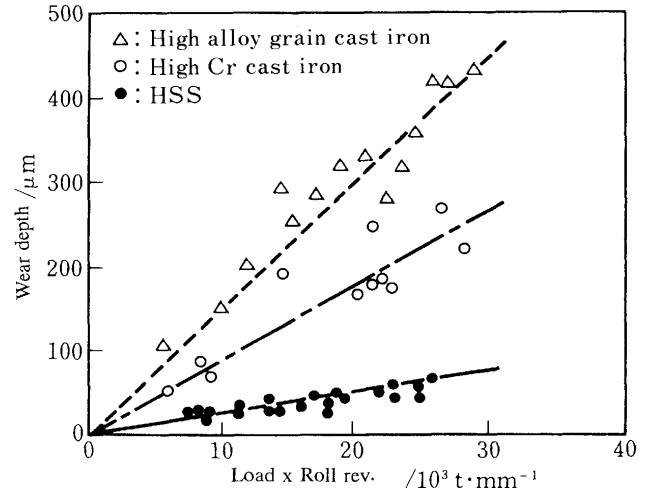


Fig. 4.9. Wear of hot strip finishing work rolls. (*CAMP-ISIJ*, 4 (1991), p. 450)

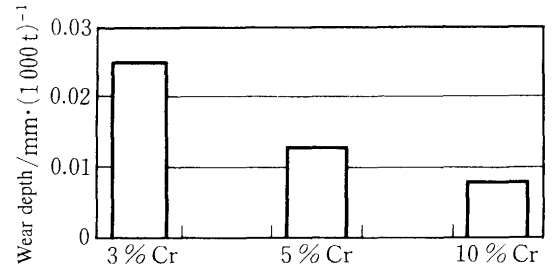


Fig. 4.10. Wear of forged steel high Cr roll. (*CAMP-ISIJ*, 4 (1991), p. 474)

ロール原単位の向上やロール組替え時間の減少を可能とするロール摩耗を減少させることである。最終的にはロールをメンテナンスフリーにすることにより、将来無人化工場を可能とするための大きな課題である。仕上げ熱延用ワークロールとしては前段にアダマイト系、後段にニッケウグレン铸铁が一般に用いられるが、耐摩耗性の点から鋼クロム铸铁や高クロム铸铁が用いられてきている。さらに、耐摩耗性の向上のために現在ハイス系ロールの使用が検討され、一部実用に供されるまでに至っている。Fig. 4.9 に示すようにハイス系ロールを使用すると従来のロールに比べて耐摩耗性が約 1/5 になることが多くのシミュレーション試験から確認されている。ハイス系ロールの製法には、铸造法、鍛造法、粉末法があるが、その評価が現在行われているところである。铸造法としては主に CPC プロセスを利用して複合ロールが作られている。

冷間圧延用ワークロールとしては、1.8% Cr 系鍛鋼からはじまり 3% Cr 系鍛鋼が用いられ、現在 5% Cr 系鍛鋼が用いられてきている。この 5% 系 Cr 鍛鋼においても、セミハイス系や Ti 添加型などの新しいロール材質が耐摩耗性の観点から開発されており、さらに高 Cr 化の延長線上で 10% Cr 系鍛鋼が使用されている例もある。Fig. 4.10 に高クロム鍛鋼ロールの摩耗量について示す。このようなロール材質は難研削であるので十分注意が必要である。

一方、硬質クロムめっきした表面処理ロールが広く用いら

れている。クロムめっきロールをスキンプラスに用いると3～10倍の耐摩耗性の向上効果が確立され、通常の冷延ロールとして用いても約3倍の寿命増加が示されている。これ以上の寿命延長を考えると、新しい表面処理ロールの開発、セラミック材料の使用について今後研究をつづけていく必要があろう。

#### (5) 圧延油

最近圧延油の改良は盛んであり、冷間圧延においては強圧

下化、高速化のための高潤滑性、冷却性、および圧延機まわりの清浄性の優れた圧延油の開発が圧延メーカーと圧延油メーカーとの共同で行われるようになった。そのため基油として合成エステルの使用が増加し、乳化剤として高分子カチオン分散剤が使用されることもある。一方、熱間圧延においては高潤滑性を得るために金属せっけんグリースなどの半個体潤滑剤および黒鉛などの個体潤滑剤が添加されるようになってきている。

## 4.3 板圧延技術の進歩

### 4.3.1 圧延設備

#### (1) はじめに

ここ10年間に生産性の向上、省エネルギー、歩留り向上などの目的から圧延技術は格段に進歩を遂げた。

特に製品の各種形状や板クラウン、エッジドロップの向上に対してより多大の労力が払われた結果これまでにない全く新しい形式の水平圧延機、垂直圧延機、幅プレス設備などの出現に至った。

ここでは、特に最近の板圧延関連の新設備、装置をとりあげその特徴を述べ、また電動機駆動系の進歩についても触れる。

#### (2) 水平圧延機

これまでの DCB (ダブルチョックベンダ)、NBCM (ニューバックアップロールクラウンミル) に引き続き新たに水平ベンドを利用した FFC ミルが出現した。小径ワークロールを持ち、そのロールを多分割ロールで水平方向に押しして形状制御を行う方式のミルである。さらには、熱延のエッジドロップ制御、クラウン制御の目的で、極小径ワークロール (アイドル) を片側にもちもう一方は通常のワークロール径にて駆動する ME ミル (ミニマムエッジドロップミル) も出現した。

またすでに開発済の HC ミル (6 段圧延機、中間ロールを

ロールバレル方向に移動させロール軸心たわみをコントロールする) を基本としてその後にはワークロールシフトミル、UC ミルなどが生まれた。

同じくワークロールをシフトさせるがワークロールに特殊な関数のカーブをつけることによりクラウン制御を行う CVC ミルも開発された。カーブとシフトの組合せにより板断面が凸から凹まで得られる点を特徴としている。

また、バックアップロールの中央部に油室をもち、高圧の油を入れて膨らませる VC ロールはすでに実用化されているが、逆にバックアップロールの両端にテーパ室を設け中のピストンに軸方向に油圧を作用させ端部径を変化させる TP ロール (テーパピストンロール) も実機化された。

さらに、通常ミルのワークロール間にクロス角を与えると格段のクラウン効果が得られることは知られていたがスラスト力が過大であり実用化を妨げていた。しかしその対策としてワークロールとバックアップロールを対でクロスさせる PC ミル (ペアクロスミル) が実機化された。バックアップロールとワークロール間のスラストは発生させずに、圧延材とワークロール間のみスラスト力を受ける構造としたもので、このミルの出現によりこれまでの新形式ミルによる熱間圧延のクラウン制御能力競争は一段落の感も否めない。しかし、つい最近になって、ワークロールクロスミルの実機化予定が公表になった。理論的にはペアクロスよりもそのクラウ

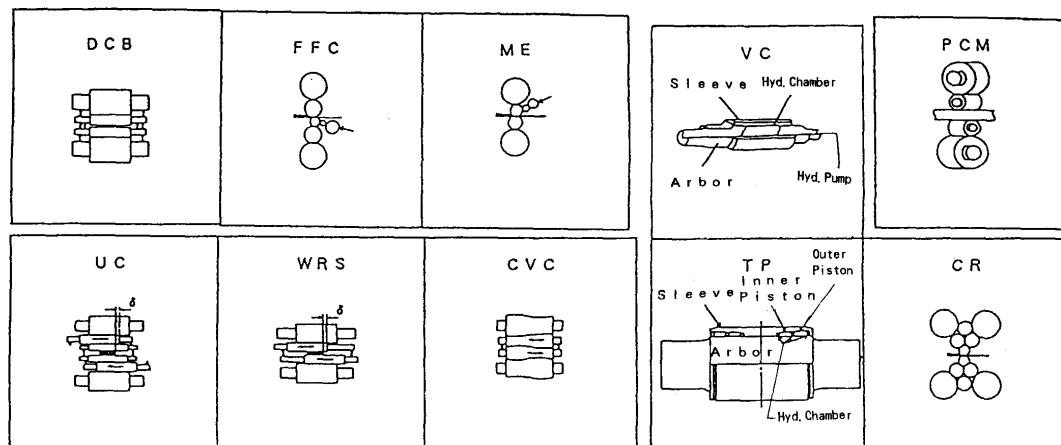


Fig. 4.11. New strip crown, shape control mills. (Memo. Symp. of 100th R.T.C., p. 270)