

1. 形づくりから強度・靱性・耐食性等材料機能を飛躍的に向上させたりサイクル容易製品を最小限のエネルギーで創製する加工技術（新加工法、複合加工、多軸加工、超精密加工、工具フリー加工等と材質制御）
  2. 研究開発ではシミュレーション活用（バーチャルトライ）による実験の大幅削減（コスト&時間）という効率追求。逆に原点に戻り、手作り装置・手法による人間の感性を重視した開発
  3. 基盤技術としての工具特性の飛躍（ここが大抵ネック）と地球に優しい潤滑技術の開発（ドライ、セミドライ、環境潤滑等）
- となろうか。欧米に負けない日本得意の製造技術の基盤として加工技術を何とか堅持したい。技術発展の最後の決め手は材料である。材料創製加工技術の知恵出しが1つの突破口である。

## 3.2 加工基盤技術の進歩

### 3.2.1 変形の理論解析

圧延における理論・数値解析は、他の加工分野同様、一種の道具として現場サイドでも利用されるようになってきており、板圧延のみならず棒、線材、型材、管材圧延に対して、製品の寸法精度と形状の予測、被圧延材の材料流動、荷重・ひずみ・温度分布等の解析、ロール弾性変形との連成解析とその製品への影響の解明、製品の材質・組織・残留応力等の予測、圧延条件の最適化、圧延設備の合理的設計などに適用されている。最近では3次元有限要素解析（FEM）の応用が急速に進んでいる。特に、日本の圧延技術が理論をベースにして発展を続け、世界を常にリードしてきたことは周知の通りであり、今後も圧延分野への理論解析の貢献は重要である。

1980年代後半以降、板圧延解析は、3次元FEMが主力となりロールの弾性変形解析と組み合わせて、板クラウン・エッジドロップの詳細な予測およびその制御、板形状制御の高度化、圧延機・圧延設備の効率的設計支援等に利用され今日に至っており、ほぼ実用レベルに達しているといえる。もちろんタンデム圧延への適用や左右非対称圧延、蛇行の解析も試みられている。板の変形解析には3次元剛塑性FEMが普通用いられているが、計算時間が短く、現象の理解が容易な擬似3次元解析法の提案もある。一方、圧延後の残留応力が問題となる場合やスキパス圧延等には剛塑性ではなく弾塑性で考える必要があるが、3次元弾塑性FEMは、まだ計算時間、解析精度等に問題がある。

熱間圧延の分野では、材質・予測制御が重要であり最近では、3次元FEMを利用してこの両者を統合する圧延加工統

合解析モデルの開発が進んでいる。そのモデルは図3.1に示すように、(1) 3次元変形解析モデル、(2) 3次元温度解析モデル、(3) 材質予測モデルを連成し、(4) 冷却/変態モデル、(5) 内部組織・機械的性質予測モデルよりなっている。超微細粒鋼の開発プロジェクトでもそのモデル化が取り上げられ成果が期待されている。

圧延製品の製品品質や操業効率を著しく損なう表面疵は、古くからその場しのぎの解決策がとられてきたが、原因を理論的に早期に発見して解決できるようにするため、疵の変形解析システムを開発する研究会が日本鉄鋼協会に設置され成果をあげている。圧延材の体積に比して疵部は非常に小さいため、解析には工夫が必要である。図3.2は結果の一例で、幅方向に存在した矩形疵を圧延したときの変形過程を示している。

アルミニウム圧延の分野では、集合組織予測シミュレーションが開発され、成形性の優れた圧延板の製造に使われようとしている。これは、3次元剛塑性FEMと結晶塑性モデルを組み合わせ、FEMで得られる速度場より結晶回転を求め、集合組織の変化を計算するもので、図3.3に解析例を示

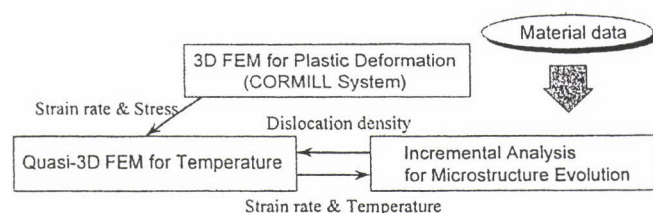


図3.1 熱間加工における材質予測法 (ISIJ Int., 40 (2000), 65.)

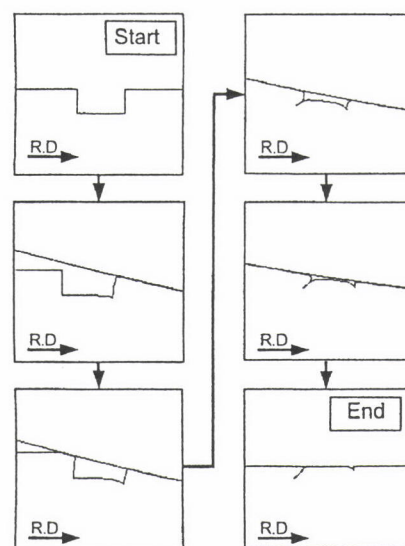


図3.2 板圧延における矩形表面疵の変形解析 (鉄と鋼, 89 (2003), 1142.)

す。今後は鉄鋼材料などへの展開が期待できる。このように今後は「形」と「質」の両方を同時に考慮できる理論モデルの開発が進むものと思われる。

棒、線材に対して高寸法精度、サイズフリー、低コスト化、高品質化の要求が増えてきており、それらの要求に対応するため、3方ロール圧延、2Hi精密ミル、4方ロールミルなどに多変数制御理論、AI・Fuzzy理論などの新しい制御理論が適用されている。3次元剛塑性FEMも棒、線材圧延の孔型設計に利用され、製品の高精度化に貢献している。日本鉄鋼協会棒線FEM研究会では、パソコンで動くシミュレータの開発が進められ、数十分の計算時間で解を得ることが可能で、現場での孔型設計に利用可能となった。

棒、線材圧延でも材質制御のための制御圧延技術が検討され、急冷、徐冷装置の設置により工程省略を可能にしている。結晶粒径変化の予測にFEMが利用され、最適条件の有効決定に活用されている。棒・線材の多パス圧延における内部組織予測のためには、被加工材断面内の不均一な変形と温度分布を解かなければならず、3次元連成解析が不可欠である。図3.4に示すような棒材内部のオーステナイト結晶粒径分布を得ている。

今後はさらに寸法精度の向上、自動化、高品質化が推進され、板材の熱間圧延と同様、材料変形＋熱＋ロール変形解析の連成、さらには材質予測技術も取り込んだ総合的な解析システムが必要とされる。

H形鋼圧延に対しても3次元剛塑性FEMの適用が進んで

いる。ユニバーサル圧延に対しても3次元剛塑性FEMによる材料流れや応力分布等の検討が報告されている。H形鋼圧延の3次元剛塑性FEM解析では、ロールと被加工材との接触域の取り扱い、Vロールが無駆動であることへの取り扱い、ウェブとフランジ部の変形域のずれからくる微小変形部の取り扱い等解析上工夫すべき点があり、また、被加工材内部の温度分布が材料流れに影響すること考えられる。今後は建築物の大型化、耐火性、耐震性向上の要求により、H形鋼への制御圧延、制御冷却技術(TMCP)が導入され、H形鋼の高精度化、高品質化がよりいっそう進展することが予想される。したがって、理論解析として、変形場解析-温度場解析-内部組織・材質解析の連成解析、さらには圧延後製品温度が冷えた後の残留応力分布までも解析できる手法の確立が望まれる。アングル・チャンネル材や鋼矢板の3次元剛塑性FEM解析も可能になってきている。これらの変形はより複雑で、接触解析や自動要素分割、要素再分割の検討が必要である。

穿孔圧延は、素材中央部分のマンネスマン効果による破壊現象と、プラグとロールの間の複雑な変形のため解析は容易ではなく、また、完全な3次元FEMでは要素分割や計算時間の点で現状問題が多い。そのため、一般化平面ひずみによる近似3次元解析が行われている。穿孔圧延の剛塑性FEM解析が実施されており、素材の中央に穴があいてそれが楕円に変形していく様子が計算できている。マンネスマン効果によりプラグ先端前方で割れが生ずると管内面の欠陥となるため、割れの発生を抑えるための圧延条件の選定は重要である。割れの発生が原因となる内面疵には、ロール傾斜角だけでなく交角、素材加熱温度、穿孔速度、加工度などが影響するため、上記モデルに温度場も考慮できる総合的な理論モデルが必要となる。

近年価格的には非常に安価なパーソナルコンピュータの性能が向上し、シミュレーションも手軽に実行できる環境になっている。また、各種圧延シミュレータや汎用の解析ソフト

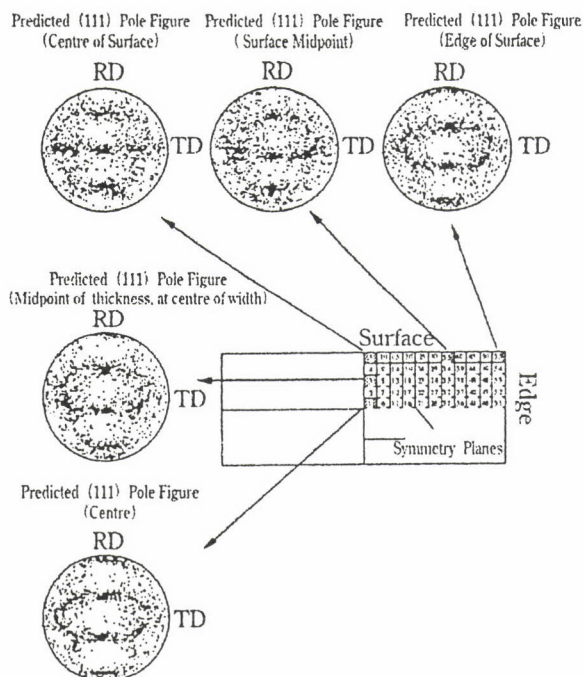


図3.3 圧延板の集合組織の予測  
(J. of JSTP, 40 (1999), 591.)

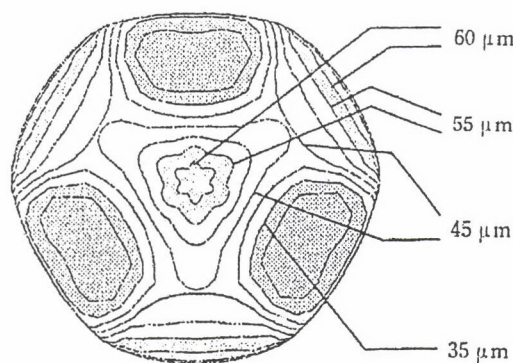


図3.4 棒鋼圧延におけるオーステナイト粒径の予測  
(ISIJ Int., 41 (2001), 1510.)

も機能アップとともに使いやすくなり、若い技術者でもある程度の基礎知識があれば容易に机上実験が可能になるものと思われる。高精度、高品質製品製造のための圧延条件、操業条件の最適化、ロール孔型・形状設計の効率化等にシミュレーションが手軽に利用され、日本の圧延技術が今後も世界の技術の牽引車となっていくことを期待する。

### 3.2.2 塑性加工におけるトライボロジー

最近10年のトライボロジー技術による革新的なブレークスルーの開発事例および環境問題に対するトライボロジー技術の進展について概説する。

#### (1) 冷間圧延における超高速圧延

1990年代に入ると製缶用の極薄板に対して、さらなる板厚の減少が求められるようになった。このような板厚が0.2 mm以下になるよう、圧延において生産性を向上させるためには超高速圧延が最も効率が良く、2,800 m/minの最高速度が可能な圧延が開発された。この2,800 m/minの圧延を可能にしたのは、高潤滑性圧延油の開発、耐摩耗性ワークロールの開発、ベアリング焼付き防止技術の開発などによる。従来は天然パーム油が圧延油として用いられ、供給システムとしてはダイレクト方式で採用されていた。高速化を可能とするためには圧延油を効率よく鋼板の上にプレートアウトさせることがどうしても必要であるので、ESI (Emulsion Stability Index) 値の低下と新しい領域の圧延油により圧延荷重を大きく低下させ、2,800 m/minの超高速圧延を可能とした。

次に、このような冷間圧延における超高速圧延を可能にするための重要なトライボロジー上の問題としては焼付きの発生をいかに抑えるかも検討されている。焼付き発生を防止するために、ロール表面上の炭化物間隔を抑制して、潤滑性を向上させたロールの開発が行われている。炭化物制御タイプ高クロム鋼ロールが、タンデム圧延機に適用され、圧延速度の向上に寄与している。このように、革新的ロールを開発することにより、焼付きの発生する界面温度を上昇させ、焼付き防止することにより超高速圧延が可能となろう。

#### (2) 塑性加工品表面の超鏡面加工

塑性加工界面のマイクロ接触状況において、材料表面凹部にトラップされた潤滑油に周辺の接触部の面圧にほぼ等しい静水圧が発生すると、中程度の速度で相対すべりをさせたとき、新たにポケットの凹部の潤滑油がその周辺の接触界面に流出して接触面全域で塑性流体潤滑作用を呈するマイクロ塑性流体潤滑が直接観察から実証された。このマイクロ塑性流体潤滑の接触状況での摩擦係数は工具と材料間に介在する油膜厚

さが同程度の他のマイクロ接触状況における摩擦係数に比べるとかなり低くなり、鏡面をもつ材料が塑性加工できる。

ステンレス鋼板の冷間圧延加工において、加工後の表面を高精度化させるような鏡面加工を行うためには、これまで界面を境界潤滑として、焼付きなどの表面欠陥が発生しない低い加工速度および圧下率で加工が行われていた。しかし、生産性を向上させ、ほどほどの鏡面加工が可能な方法を考えると、このマイクロ塑性流体潤滑が非常に有効な潤滑メカニズムとしてあげられる。

### (3) 環境負荷軽減潤滑剤

塑性加工において潤滑剤の環境負荷軽減を図るために次の開発が重要である。

- (1) 地球環境に無害な潤滑剤
- (2) 洗浄を必要としない潤滑剤
- (3) 使用量の少ない潤滑
- (4) 無潤滑

上記の潤滑の開発について、最近10年の塑性加工の中の冷間鍛造加工および板成形加工について概説する。

#### (a) 冷間鍛造加工

従来の冷間鍛造用潤滑剤としては、りん酸塩被膜＋金属石けんが一般に用いられてきた。この潤滑処理においては、りんを含む多量の排水の廃棄物が発生する。地球環境に無害な潤滑剤の観点から、これに替わる潤滑剤が開発されている。普通鋼に対しては、反応油系や高粘度油系の油系潤滑剤およびエマルション系の水系潤滑剤並びに水系1液型乾燥皮膜が開発されている。

#### (b) 板成形加工

地球環境に無害な潤滑剤として、特に塩素フリーの潤滑剤の開発が必要となっている。極圧添加剤としての塩素化パラフィン「発ガン性」の問題とともに、最近ではダイオキシンの発生源として環境汚染の世界的な問題となっている。そのため、塩素系フリー加工用潤滑剤の開発が急務となっている。しかしながら難加工材の重加工において使用する潤滑剤に配合される代替添加剤の開発はなかなか難しい状況にある。現在、代替添加剤として挙げられているのは硫黄系添加剤、リン系添加剤、有機金属化合物、過塩基性スルフォネート、固体潤滑剤などであるが、そのなかでは硫黄添加剤が効果があるとして考慮されている。次に、無潤滑加工は環境対策からすると理想となろう。この場合は、新しい金型材料や表面処理技術の開発が必要となり、実験室レベルでは、セラミックス金型、DLC (Diamond Like Carbon) 膜をコーティングした金型により無潤滑加工の可能性が検討されている。