

# 材料製品を支える塑性加工と要素技術

服部重夫 (工博)

技術開発本部・生産技術研究所

## Metal Working Processes and the Technology Supporting the Qualities of Metal Products

Dr. Shigeo Hattori

This report introduces an outline of current research topics concerning the basic technology for metal working processes at Kobe Steel. Various kinds of numerical simulation models and experimental procedures have been developed. Some metal product qualities such as accuracy, surface qualities, and mechanical properties, have been improved by applying these results to various metal working processes.

まえがき = 昨今の地球環境問題への対応や国際競争力の維持向上に向けて、自動車や電子機器をはじめ各種製品の高機能化、軽量化、低価格化が急速に進められている。これらを実現するためには、構成材料の主力を占める金属材料の役割が大きい。たとえば、自動車のCO<sub>2</sub>排出対策に対し、高強度鋼線材、高加工性高張力鋼板、高成形性アルミニウム板、軽量アルミニウム押出型材、アルミニウム精密鍛造品などは低燃費化を通じて直接寄与するもので、自動車産業界と協力しつつ開発が続けられている。また、電子機器製品では、コンピュータの大容量化の要求に対し、磁気記録用アルミニウム基板の高精度化や、リードフレームの薄肉・高品質化の開発が進められている。これらの金属材料の大半は、圧延や押出し、鍛造などの塑性加工プロセスを経て作り込まれるもので、このプロセス内で寸法精度や表面性状はもちろん、材質特性も決定される。そのため、塑性加工プロセスにおいても新しい機能を持つ新製品の開発や品質向上とコスト削減を狙いとした技術開発をタイムリに進めなければならない。

本稿では、金属材料製品における塑性加工の位置づけ、および、塑性加工技術とその周辺技術に関わる基盤・要素技術について、当社での取組み状況を中心に紹介する。なお、詳細については本誌の各記事を参照されたい。

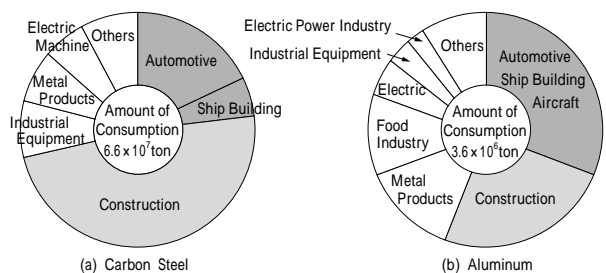
### 1. 金属材料製品における塑性加工の位置づけ

第1図に、国内の普通鋼鋼材およびアルミニウムの1994年の用途別消費比率を示す<sup>1)2)</sup>。鉄鋼材料は高強度で加工しやすく、かつ、安価な材料でアルミニウムやほかの金属材料にくらべて圧倒的な量を維持しているが、各種工業製品の生産量の飽和や、小型軽量化の動きもあって長年消費量は伸びていない。しかし、新製品の開発など鋼材の高品質化は、鉄鋼需要産業の発展の一翼になっている。用途別では、土木・建築で約1/2、自動車・造船で1/4近くを占める。前者では、厚板、薄板、棒材、型材が、後者の自動車では、薄板、棒線材、造船では厚板や鍛造鋼品が主にもちいられる。

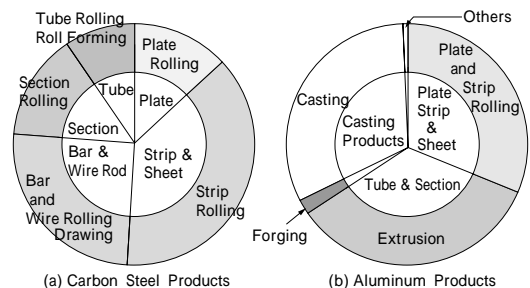
アルミニウム材料はもともと生産量が少ないため、古くは家屋用の窓枠(アルミサッシ)に始まり、自動車や

二輪車のエンジン、車両用ホイール、近年では飲料缶など、新しい市場ができると伸び率が大きい材料分野である。用途別では、輸送用(自動車、二輪車、船舶、航空)で約1/3、建築用で1/4、金属製品・食料品で1/4を占める。輸送用では、これまで自動車や二輪車のエンジン廻りあるいはホイールが主体で、鍛造品やダイキャスト品が多くもちいられてきたが、最近では、パネルやスペースフレーム、足廻り部品などに板材、押出し材、鍛造品が活用され始めている。建築用の約2/3は押出サッシであり、金属製品の1/3は箔用材料、食料品の90%は飲料缶用板材である。

第2図は、普通鋼鋼材およびアルミニウムの製品形態と、製造プロセスの中での主な加工法の分類を示す。普通鋼鋼材のすべてが圧延を代表とする塑性加工プロセスを経て製品となる。アルミニウムでは圧延プロセスを経る板材、押出プロセスを経る型材および管材と鍛造プロセスで製造される鍛造品やダイキャスト品がそれぞれ約1/3ずつに分類される。ほかに銅やチタンにおいても



第1図 普通鋼鋼材とアルミニウムの用途別消費比率  
Fig. 1 Distribution ratio of consumption of steel and aluminum products



第2図 金属製品の形態と加工法の構成比率  
Fig. 2 Distribution ratio of products shape and metal working process

類似の状況で、板圧延を始め、銅管の押し出し、チタン合金の鍛造などの塑性加工プロセスを経て1次製品となる。これらの1次製品の一部は、さらにプレス加工や伸線、冷間鍛造といった塑性加工、また必要な場合には切削などの機械加工が加えられた後、組立られて完成品となる。

これら金属材料の品質特性は、合金成分や精錬・凝固、塑性加工、熱処理、ものによっては表面処理の各プロセスを経て作り込まれる。とくに塑性加工プロセスにおいては、板材や棒線材の高精度化に代表される寸法・形状精度や表面性状を決定し、また、加工熱処理の積極的な活用などにより、強度や延性などの機械的性質、成形性や内部品質などを向上させる役割を担っている。次章では塑性加工プロセスで重要な基盤・要素技術について紹介する。

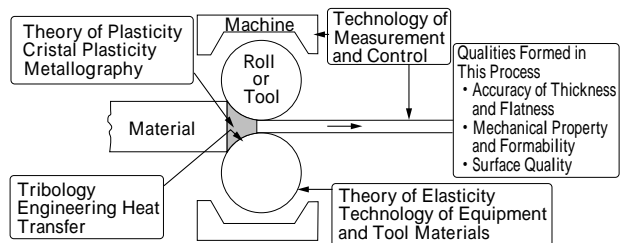
## 2. 塑性加工プロセスの基盤・要素技術

第3図に圧延プロセスを例として、えられる製品特性とそれに関連する基盤技術を模式的に示す。塑性加工においては、被加工材の一部あるいは加工法によっては全域が工具に拘束されて変形するため、材料変形のみでなく、工具変形および材料と工具の界面での潤滑剤も含めた接触状況を議論する必要がある。寸法・形状精度は、材料の塑性変形と、工具および加工機械の弾性変形、熱変形、工具の磨耗などによって決定される。板圧延の場合にはこれらの変動量をロール間の間隙を制御することによってある程度補償されるが、押し出しや精密鍛造においては、材料変形が工具形状で規定されるため加工中の制御は難しく、工具形状の設計が重要となる。表面性状については、材料が潤滑剤を介して工具と接触するため、工具の表面性状、潤滑剤の種類や粘度、厚みなどによって支配される。材料特性に関しては、変形中の歪みの累積、歪速度や温度などによって変形中の再結晶粒径や集合組織が支配される。

以下では材料変形、工具変形、材料と工具の界面状況に分けて最近の取組状況を述べる。

### 2.1 材料の変形

当社で扱う塑性加工プロセスでは、圧延、鍛造、押し出しといった大きな断面減少をとともなう大変形と、板材や棒、管材の形状矯正や、その後の二次加工である板成形や型材の曲げ成形のような断面減少の比較的小さい小変形に分けられる。大変形においては、熱間加工であれ冷



第3図 製品特性を満足させるために必要な基盤技術

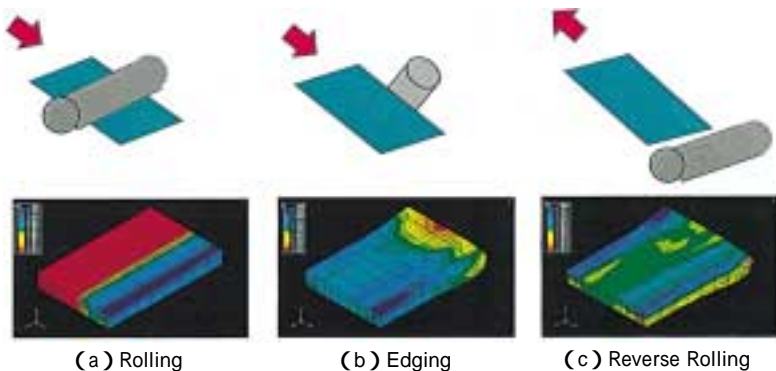
Fig. 3 Basic technologies necessary to satisfy qualities formed in this process

間加工であれ寸法精度や表面性状に加えて材質への影響とその制御が重要である。小変形においては、成形前の素材が持つ金属組織や成形性、残留応力などが、成形品の成形限界や寸法精度に影響を及ぼす。ここでは塑性変形のみでなく、材料の弾性変形も同時に考慮しなければならない。

塑性変形の基礎理論として塑性力学<sup>3</sup>がある。これは、材料内に加わる力の釣合方程式、応力と歪みの関係式、および材料が塑性変形を開始する条件を示す降伏条件式を基礎式としており、これを境界条件のもとに解くことによって、荷重や変形状態を知ることができる。その解法にはスラブ法、エネルギー法、有限要素法（FEM）など種々の方法があり、知ろうとする目的や対象によって使い分けられる。

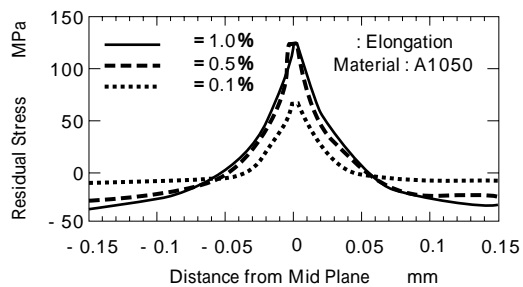
板厚の比較的厚い圧延を対象としたFEMによる変形解析例を第4図に示す。左から1パス目の水平圧延、エッジ圧延、2パス目の水平圧延時の相当歪み分布を表している。これらの結果は、厚板圧延での平面形状精度の向上や反りの防止<sup>4</sup>、アルミニウムクラッド圧延でのクラッド率の均一化<sup>5</sup>などに活用している。また、類似の解析手法を棒線材圧延に適用し、高い寸法精度をえるためのロール孔型設計などに利用している。さらに、鍛造においても材料流れを解析によって求め、欠陥を予測したり、それを防止するために粗地形状を適正化することなどに活用している（本号 p 64 参照）。

比較的板厚の薄い薄板圧延で、板クラウンや平坦度の制御のために解析する場合には、ロールの弾性変形や熱変形と連成するため、材料変形についてはこれまで板厚断面内で変形を均一とする簡便なスラブ法をもちいることが多かった。しかし、最近とくに板端での板厚精度や幅精度など、これまで以上に高い精度の解析が必要となる場合もあり、FEM解析の高精度化を進めている（本



第4図 厚板圧延における相当歪みのFEMによる計算例

Fig. 4 Example of calculated equivalent strain by FEM during plate rolling



第5図 矯正中に生じる残留応力の計算結果<sup>7)</sup>

Fig. 5 Calculated results of residual stress induced into strip during leveling process

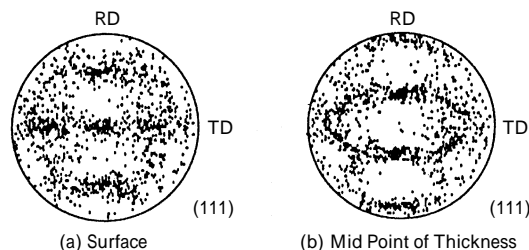
号 p 6 参照)

薄板の形状矯正については、小変形のため弾性変形と塑性変形の混ざった領域であるが、板材の曲げ理論を拡張した比較的簡便な解析手法をもちいている<sup>6)</sup>。第5図は、矯正中に生じる残留応力の計算例で<sup>7)</sup>、この結果および実験結果をもとに矯正条件を最適化し、矯正後の残留応力の解放によって生じる変形の問題を抑制している。

塑性変形的基础には、上記の力学的問題に加えて、変形によって材料の性質がどのように変化するかという材料学的問題が存在する。加工中に作り込まれる材料特性に関して、たとえば熱延鋼板については変形によって生じる歪み、歪み速度、温度の履歴と、各工程での回復、再結晶、粒成長などの冶金現象を表すモデル<sup>8)</sup>を組合せることによって組織予測が可能となっており、材料開発への適用をはじめとして、圧延、冷却条件の検討などに使い始めている。

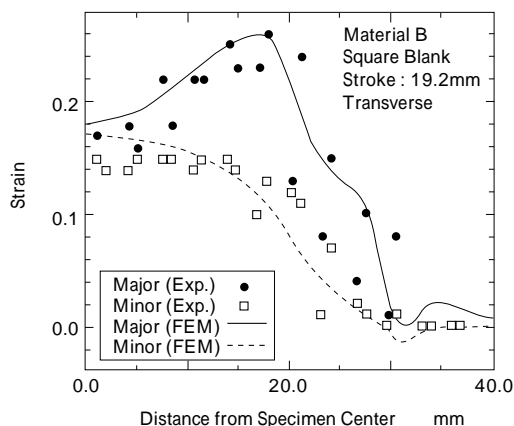
また、結晶塑性論にもとづく力学モデルとマクロな剛塑性 FEM 解析との連成により、アルミニウムの冷間圧延中に生じる集合組織の板厚内での分布を予測可能にした(本号 p 31 参照)。第6図は計算結果の一例で、とくに板表面では摩擦によるせん断変形の影響を強く受けることがわかる。これをもとに潤滑条件や圧下率など、適正な集合組織をえるための圧延条件の検討が可能となった。また、集合組織から塑性変形の基本となる降伏曲面(降伏条件を多軸応力下で表した曲面)の形状を予測することもできる(本号 p 31 参照)。塑性力学の基礎方程式の一つに降伏条件式があることはすでに述べたが、この条件式は実験結果にもとづく実験式で、等方性材料については古くから一般的にもちいられている式がある。しかし、異方性材料、とくに鋼板にくらべてアルミニウムについては十分なデータがなく、集合組織からの予測が有効な手段の一つである。この結果あるいは直接測定した降伏曲面を降伏条件式で表現し、弾塑性 FEM 解析に導入することで、板成形時に生じるアルミニウム特有の破断限界や異方性に起因する絞り成形時の耳の発生量が予測可能となった。第7図は、絞り成形時の板厚精度を実験結果と比較した結果で、高い予測精度を有することがわかる<sup>9)</sup>。これらは、成形性に優れた自動車パネル用アルミニウム板材の製造技術の開発に活用される。

ほかに、変形中や冷却過程での温度変化も材質を支配する重要な要素である。たとえば、厚板や熱延鋼板の圧延出側での水冷による材質制御、線材の圧延ライン内で



第6図 圧延変形集合組織の予測計算例

Fig. 6 Predicted results of deformed texture after rolling



第7図 張出成形における歪み分布の計算値と実測値の比較<sup>9)</sup>

Fig. 7 Comparison between calculated and measured strain distribution after stretch drawing

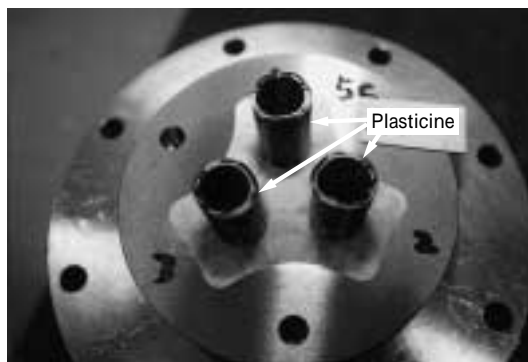


写真1 ポートホールダイ押出しのシミュレーション実験  
Photo.1 Experiment to simulate port-hole die extrusion

の水冷制御(本号 p 35 参照)や出側のコンベヤ上での空冷制御などにも解析と実験による予測技術が組み込まれている。

以上は基礎理論にもとづく予測技術を主体として述べたが、先の基礎方程式を解くための境界条件や、材料の応力と歪みの関係(変形特性)を決める際には必ず実験的検討が必要である。また、現状の解析や計算機の能力では詰めきれない複雑形状の鍛造や押出加工、あるいは恒温加工や半溶融加工などの新しいプロセスの開発には実験手法が不可欠である。

写真1は、アルミニウムのポートホールダイをもちいた押出しにて管材を3本同時に押出す場合の変形状態をプラスチックを使用してモデル実験をおこなった例である。ポートホールダイではダイス内の初期に材料を一旦分流し、出口の前で再度圧着するアルミニウム特有の押出法であり、解析で変形を予測するのは容易ではないが、モデル材をもちいた実験は比較的簡単に材料流れ

を再現でき、ダイスの形状設計などに活かされている。

## 2.2 機械と工具の変形

工具の変形には、弾性変形、熱変形と磨耗が挙げられる。圧延では、ロールおよびそれを支える圧延機が弾性変形や熱変形を生じるため、初期に設定したロール間隙そのままでは目標の寸法がえられない。そのため、圧延された材料の寸法が一定になるよう主に圧下量が制御される。とくに平坦度や板クラウンが問題となる薄板圧延では、ロールの弾性変形と熱変形および実験的に求められる磨耗量と、材料変形を連成して解析することによって平坦度や板クラウンが予測される。第8図は、20段圧延機を対象とした平坦度予測シミュレーションモデルを開発し実験結果と比較した結果で、比較的良好一致を示している<sup>10)</sup>。このシミュレーションモデルをもちいて、多段圧延機用の自動形状制御システムを開発するとともに<sup>11)</sup>、12段圧延機(KTミル)の開発や、当社内で銅板圧延用に使われている20段圧延機の操業条件の適正化を進めてきた。

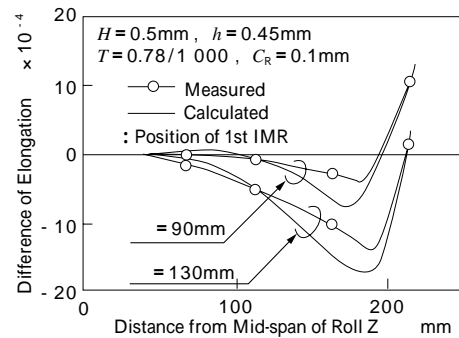
アルミニウムの精密鍛造や押し出し(本号p.72参照)においても、とくに広幅で薄肉の製品を加工する場合には工具の弾性変形が問題になる。薄肉材の精密鍛造を対象として、材料の変形を剛塑性FEMで、工具の変形を弾性FEMで連成して計算し、この結果をもとに工具の弾性変形をあらかじめ考慮した工具設計も可能となっている<sup>12)</sup>。

工具の磨耗に関しては、すべての加工法において寸法精度に直接影響するため、鋼板熱延へのハイスロールの適用(本号p.10参照)をはじめ、材質の改善や表面硬化処理の検討が続けられている。

## 2.3 材料と工具の界面

加工後の材料の表面性状の多くは、潤滑剤を介した上で工具表面との接触によって決定される。そのため、材料の表面性状は、材料と工具間の相対すべり量、工具の材質および表面粗度、潤滑剤の導入量、粘度、添加剤の種類などによって影響を受ける。界面での課題の多くは、摩擦抵抗を減らすことによって荷重を低減し、加工限界を上げることや、焼付きなどの潤滑不良に起因する表面欠陥を防止することであり、これを目的として潤滑剤の改良などがおこなわれている。アルミニウムの熱間圧延にDP(Dispersed Phase type)油を採用し、荷重低減や油原単位の低減に大きく寄与したことは好例である(本号p.27参照)。また鋼板の熱間圧延では、IF鋼を対象に潤滑性を高めて、成形性を阻害している板材表面の摩擦によるせん断変形域を減少させ、高r値を狙う試みが見られる(本号p.14参照)。

また、潤滑剤の選択に止まらず表面性状の不良原因の解明から取り組むことも重要である。たとえば、アルミニウムの冷間圧延時に生じる磨耗粉の問題は、同分野の永年の課題であるが、種々の実験結果<sup>13)</sup>や分析技術の進歩で板上に残る磨耗粉の形態も確認できており、発生原因が特定されつつある。



第8図 20段圧延機でえられる平坦度の計算値と実測値の比較<sup>10)</sup>  
Fig. 8 Comparison between calculated and measured flatness of rolled strip in 20-high mill<sup>10)</sup>

アルミニウムの板成形では、鋼板にくらべて現状では成形性が劣ることが知られているが、潤滑剤の開発によりかなり改善効果もみられるようになってきている<sup>14)</sup>。

むすび= 塑性加工プロセスは、大量生産の手段として広く普及したが、昨今の多品種少量生産においては、単に生産性を追求するのみでなく、寸法精度や表面性状、材料特性などの品質に関わる多様な要求に対し、低コストで、かつ自在に作り分ける技術が必要となっている。このためには、加工中の材料変形や材質変化、界面現象をより忠実に把握し、その上で対象に応じた最適なプロセス条件を見出すことが重要である。本稿で紹介した各種要素技術や数値シミュレーション技術は、加工中の現象を把握する上で重要な役割を担っているが、材質変化や界面現象の予測などまだまだ開発すべき課題も多い。

また、最適なプロセス条件を見出した後に、量産段階でいかに安定した品質の製品を作り分けかが次の課題であり、材料変形や温度、表面状況、工具磨耗などを計測あるいは予測し、自在に制御することが望まれる。

さらに、今後は、品質やコストのみでなく、環境負荷の観点からも工程を最適化した新しい塑性加工プロセスが追求されよう。

このように、塑性加工プロセスに対する要求は、今後ますます多様化するものと考えられるが、関連する幅広い技術領域を融合し、これらの要求に応えていきたい。

## 参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼統計要覧, (1995).
- 2) 日本アルミニウム連盟: アルミニウムデータブック (1995).
- 3) たとえば益田森治ほか: 工業塑性力学, (1989), 養賢堂.
- 4) 森賀幹夫ほか: 第39回塑加連講論, (1988), p.605.
- 5) 串田 仁ほか: 第90回軽金属春季講論, (1996), p.61.
- 6) 服部重夫ほか: 塑性と加工, Vol.28, No.312 (1987), p.34.
- 7) S.Yanagi et al.: 5th ICP Vol. , (1996), p.639.
- 8) 十代田哲夫: R&D 神戸製鋼技報, Vol.47, No.1 (1997), p.5.
- 9) Y.Hayashida et al.: NUMI FORM 95 (1995) p.717.
- 10) S.Hattori et al.: 1st ICTP, Vol. , (1984), p.1230.
- 11) 前田恭志ほか: 塑性と加工, Vol.32, No.363 (1991), p.476.
- 12) 金丸信夫ほか: 平成元年塑加春季講論 (1989), p.455.
- 13) 森田章靖ほか: 第48回塑加連講論 (1997), p.591.
- 14) 松井邦昭ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.47, No.2 (1997), p.13.