

(解説)

# 塑性加工分野における高度数値シミュレーション技術の応用

## Application of Advanced Numerical Simulation Technology in Plastic Working



前田恭志\*(工博)

Dr. Yasushi MAEDA

The recent advancement of computer technology has enabled the application of numerical simulations to practical problems in plastic working. Particularly, applications to large-scale, complex problems are becoming feasible. However, many problems remain unsolved in the surface properties of plastic working, the transformation of microstructure during plastic working and the effect of the microstructure on plastic formability. These are the applications expected to be developed in the near future. This paper describes examples of these applications and points out possible future work.

まえがき = 当社の製品は、鋼板、線棒、アルミ板、銅板、チタン板のような板材・線材をはじめとする素材製品や、鍛鋼製品、アルミ鍛造製品、チタン合金鍛造製品、押出材、リードフレーム材などの最終部品に近い製品まで、幅広い金属素材の製造を行っている。さらに、当社の製品は、二次加工ユーザにて塑性加工を用いて製品に成形されるため、製品の加工性も要求される。このため、寸法・形状のみならず、材料特性を発現させるためにも、塑性加工は重要な役割を担っており、当社のオンリーワン製品はプロセスの適正化を通して塑性加工技術を駆使して製造されている。

従来、寸法・形状・材質の造り込みは現場のノウハウとして構築されてきた。ところが、コンピュータ技術がめまぐるしい進歩を遂げた1970年代より、数値解析を用いて製造条件や制御方法を理論的に導き出そうという試みがなされている。例えば、1970年代後半から有限要素法(FEM)を用いた解析技術が発達し、複雑な実現象の工学的なモデル化が可能となり始めた。ただし、塑性変形は非線形方程式に基づいて記述され、工具との接触の問題や加工発熱などを伴うことから計算時間は莫大となり、さらなる計算機能力の向上を待たざるを得なかった。

当社は、オンリーワン製品の製造技術を確立するために、1980年代後半からより高速で信頼性の高い塑性加工解析に適用可能なFEM解析システム(NASKA：3次元非定常鍛造解析, 2次元温度連成鍛造解析, 3次元定常圧延解析, 2次元非定常圧延解析が可能)を他社に先駆けて実用化してきた<sup>1)</sup>。このようなオンリーワン技術をベースに、1990年代以降はより複雑な現象に対して他社に先駆けて数値解析を適用してきた。本報では、オンリーワン技術として当社の製品に適用されている高度塑性加工シミュレーション技術について解説する。

### 1. 塑性加工における大規模問題への適用

塑性変形では材料の変形挙動が非線形性を示し、また加工工具との接触・非接触による非線形性や温度分布などの変形の不均一性など、弾性変形と比べて非常に複雑な解析となる。しかしながら、近年の計算機能力の向上と解析手法の高度化により、そうした複雑な解析に加えて大規模問題の解析も可能となってきた。

当社においても、複雑な3次元変形を対象とした解析が進められ、実際の製造プロセスの工程設計や微小な不具合の原因究明に活用されつつある。図1<sup>2)</sup>は、RR鍛造と呼ばれる一体型クランク軸の実形状と成形シミュレーションによる形状を比較したものである。RR鍛造は、図2に示すように、水平(X)方向の金型圧縮であるアップセットと、上下(Y)方向の金型の動きであるオフセットを組合せた3次元鍛造工程である。このような複

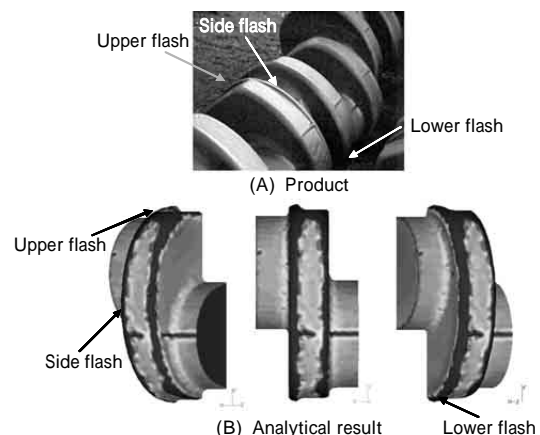


図1 RR鍛造による成形部品の形状(A)とシミュレーションから予測した形状(B)の比較

Fig. 1 Comparison between forged shape (A) from product and numerical simulation (B)

\*技術開発本部 材料研究所

雑な動きをする金型の中で、装置の力量から決まる荷重制約を受けながら歩留まり良く製品を製造するためには、金型形状や材料温度などの工程条件を決める必要がある。しかしながら、製造中の素材の材料温度を考慮して、小型のモデル実験を行うことは不可能であるため、数値シミュレーションに頼らざるを得ない。このような目的で3次元の変形-温度連成シミュレーションを行った結果が図1である。図1(B)を見ると、図1(A)に見られる実製品のバリ形状がシミュレーションによって良好に再現できていることが分かる。設備の荷重制約の中で、素材の適正な加熱温度や形状の決定、金型形状を設計する際に本シミュレーションが活用されている。

また、図3は、厚板圧延における板先端部近傍に発生する表面きずのシミュレーション<sup>3)</sup>である。このような表面欠陥(折込きず)はしばしば見られるが、その原因は必ずしも明確ではなかった。実際の厚板圧延では、図4に示すように、スラブ幅方向の圧下(幅出し圧延)お

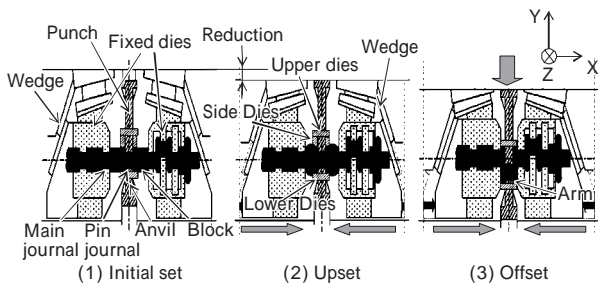


図2 RR 鍛造の成形工程  
Fig. 2 Schematic figure of RR forging process

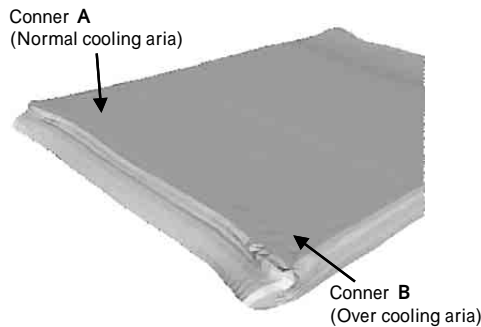


図3 厚板圧延における先端欠陥のシミュレーション  
Fig. 3 Simulation of surface defect at top of slab by over coiling thermal distribution

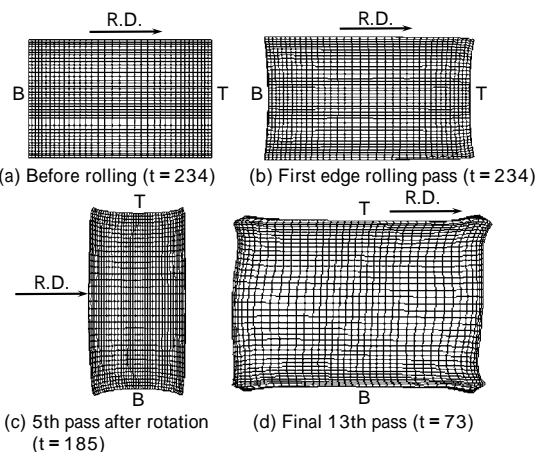


図4 厚板圧延での平面形状変化  
Fig. 4 Simulated plan view pattern of plate in multi-pass rolling process

よびスラブ長手方向の圧下を繰返すことによって、板の幅方向および長手方向の変形(平面形状)が形成される。さらに、先端近傍では局所的な温度低下のため、局所的な変形が発生する。図4は、このような複数パスを対象に、3次元の温度分布を考慮した圧延変形のシミュレーションを行った結果であり、実機と対応した箇所に初期スラブコーナーから発生した折込きずが発生している。本シミュレーションより、このようなスラブ端の局所温度分布(過冷部)が最終製品の表面品質に影響を及ぼすことが確認された。このような知見に基づき、圧延工程全体の適正化などの改善策を進めている。

## 2. 塑性変形における表面問題への適用

前章で示したように塑性加工の大規模問題への適用は進みつつあるが、それでもなお限界が存在する。その一例は、表面性状など微細表面形態に関する課題である。塑性加工では、素材形状を作り込むとともに、工具と素材が接触しながら成形される。このため、塑性加工により表面形態も作り込まれる。このような表面形態の創出においても、数値シミュレーションを活用して設計を行う試みがなされている。しかしながら、塑性変形を受けている素材に対して表面形態は非常に小さい。例えば、薄板圧延の場合、板厚は数mmであるのに対して表面形態は数 $\mu\text{m}$ であり、1,000倍の違いがある。このようなオーダの解析を同時に行うのは、現状の計算機能力をもってしても現実的ではない。

このような問題の一例として、圧延におけるロール表面凹凸の転写シミュレーション<sup>4)</sup>を考える。ロール表面の転写は、圧延材の表面性状を決定する重要な工程である。しかしながら、転写性に影響を及ぼすロール表面と素材の相対すべり量、面圧分布は材料自身のマクロな変形によって決まり、これらの量によりロール表面と素材の転写を決める表面の塑性流動が決まる。このため、マクロ変形は平面ひずみによる2次元問題として解析を行い、この結果として得られる工具-材料の相対すべり量と面圧を境界条件として与えることにより、3次元のミクロ変形を求めることができる。

図5は、凹凸表面を持つロールによる圧延を2次元平面ひずみ問題として取扱った場合の解析モデルである。実際のロール表面は3次元形状を有しているが、このよ

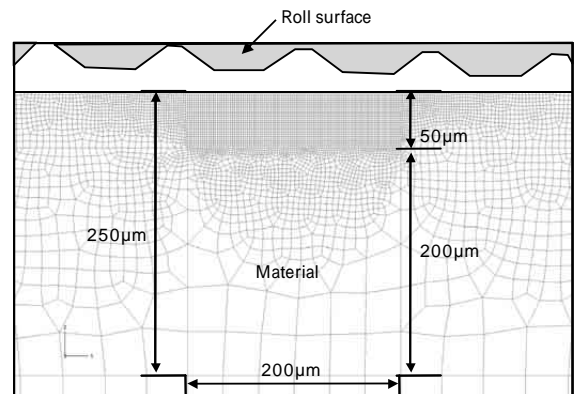


図5 表面転写のための2次元FEM解析モデル  
Fig. 5 2-D finite element model for surface transcript

うなモデルで求めた転写形状は2次元である。そこで、3次元表面凹凸形状は、この2次元のマクロ変形モデルから求めた境界条件を表面近傍のみの3次元変形モデルに与えることによって求める。図6に、計算結果と実測結果の比較を示す。形成した突起高さの形状も良好な一致を示している。このように、表面形態の予測に基づいた圧延条件の適正化やロール表面形状の設計が可能であり、今後高機能表面材料の製造に活用されていくものと期待される。

上記は冷間加工での問題であったが、熱間加工では表面にスケールなどが形成されるため、その考慮が必要となる。アルミ合金の圧延などでは、ロールコーティングと呼ばれる現象によりロール表面層と板材表面間の凝着・はく離が圧延後の表面品質へ影響を及ぼす。このコーティング層は非常に薄いため、未だに数値シミュレーションが困難な状況にある。これに対して、鉄鋼材料のスケールは数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ であり、その破壊やはく離が表面きずへ影響を及ぼすことから、数値解析への取組みが行われつつある。しかしながら、破壊やはく離に関しては、その数学的な取扱いやメカニズムの解明が十分でないため、数値シミュレーションを適用するためには特性調査が必要である。そこで、熱間圧延時のスケール変形挙動を調べた。高温圧縮・引張試験を用いて、大気加熱により1組の試験片の表面にスケールを形成させ、その場で圧縮しスケール界面を圧着させた後、はがす方向に引張ることによりスケールと母材間をはく離させた。この時に測定した母材・スケール間のはく離強度を図7に示す<sup>5)</sup>。圧縮力の増加により、はく離応力も増加する傾向にあることがわかる。また、材料Aと材料Bで

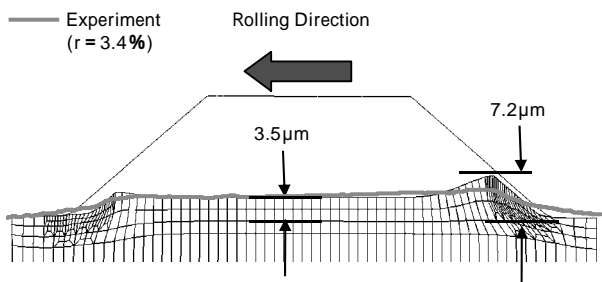


図6 3次元FEMによる転写形状の予測結果と実験結果の比較  
Fig. 6 Comparison between the transcript shapes of measured result and predicted one by 3-D FEM

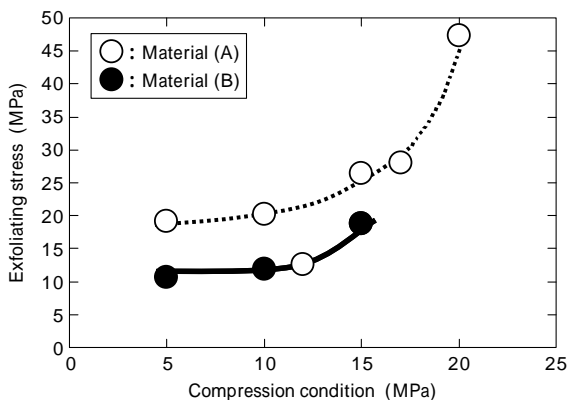


図7 圧縮条件とはく離応力の関係

Fig. 7 Relationship between compression condition and exfoliating stress

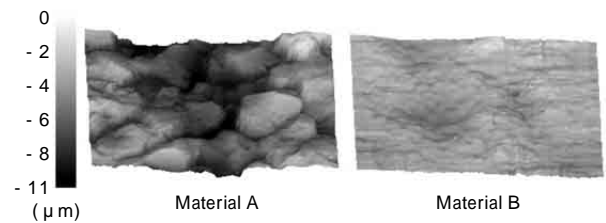


図8 はく離後の母材表面形状

Fig. 8 3-D profile on boundary side of scale and metal after pickling

は、材料Aのはく離応力が高くなっている。はく離後の表面を比較すると、図8に示すように、材料Aの凹凸が激しいことがわかる。このことから、スケール界面の凹凸が母材・スケールのはく離応力に影響を及ぼしたと考えられる。すなわち、圧延圧力や成分元素によるスケール界面の凹凸がスケールのはく離応力に影響を及ぼすことが示唆される。こうしたはく離現象を対象とした解析は、実機への適用までにはもう少しの時間を要するが、熱間加工における表面への課題としては重要である。

### 3. 塑性変形による組織制御問題への適用

前章までに述べたように塑性加工の役割として、寸法・形状の作り込みや加工表面の作り込みに加えて、材料内部品質（組織）の作り込みも重要な役割である。材料の内部品質である熱間加工時の再結晶粒径やその後の冷却変態率などは、塑性変形による温度・ひずみ・ひずみ速度の影響を受け、プロセス条件により変化する。また、熱間・冷延加工で受けたひずみ分布により、内部品質の一つである集合組織も変化する。これらの、塑性加工による内部品質もシミュレーションの対象となる。組織変化自身を記述する組織予測モデルに加え、プロセス条件による温度・ひずみ・ひずみ速度の分布を加味した素材全体の組織予測により最終的な特性を求めることができる<sup>6)</sup>。しかしながら、これらの特性予測には組織予測モデルが必要であり、種々の取組みがなされているが実用的なレベルには至っていない<sup>7)</sup>。このため、従来の実験式レベルから脱却して、数値計算をより活用しようとの試みがなされている。新しい計算方法の試みとしては、モンテカルロシミュレーションによる結晶粒径の予測<sup>8)</sup>やPhase Field法による加工転位組織の予測<sup>9)</sup>、粒内フェライト核から変態組織予測<sup>10)</sup>などの取組みがなされている。しかしながら、未だに十分とはいえず、今後のさらなる発展が期待されている。

他方、圧延による結晶方位の変化は、集合組織の成長として、その後の板成形性に影響を及ぼす。結晶方位回転は、力学モデルの一種である結晶塑性論により表現可能であり、ミクロレベルのシミュレーションがなされている<sup>11)</sup>。結晶塑性は、塑性変形が結晶のすべり面に対してすべり方向へ滑ることにより変形が起こることを用いて多結晶体の各結晶粒の回転を表現するモデルである。圧延されたAl-Mg合金を対象に、実測した極点図（結晶方位の集中度合い）を等高線によって、また、計算によって求めた各結晶粒の方位を点で示したのが図9である。両者は良く一致しており、結晶塑性モデルが妥当な

Al-2.5%Mg (Initial thickness 5mm)

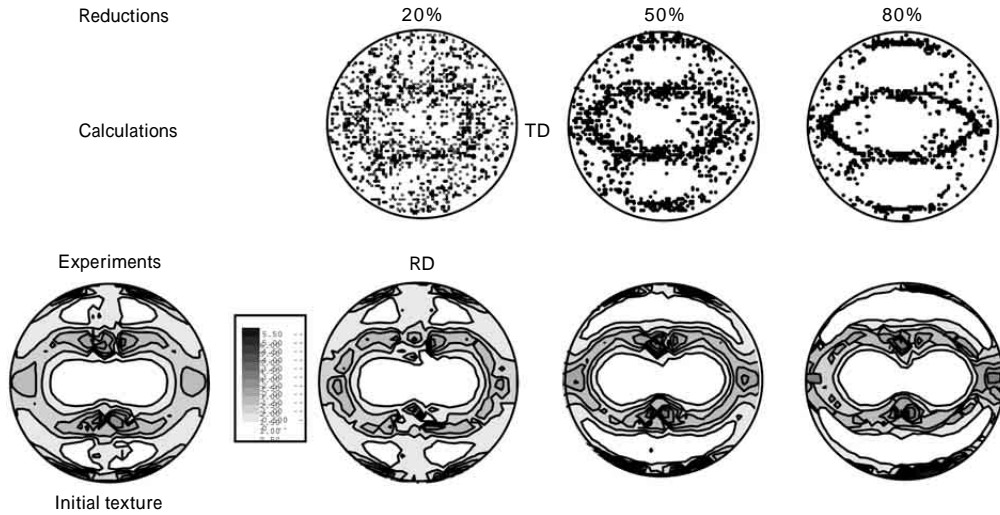


図9 圧下率による計算と実測の集合組織の変化

Fig. 9 Change of texture with reduction (calculations and measurements)

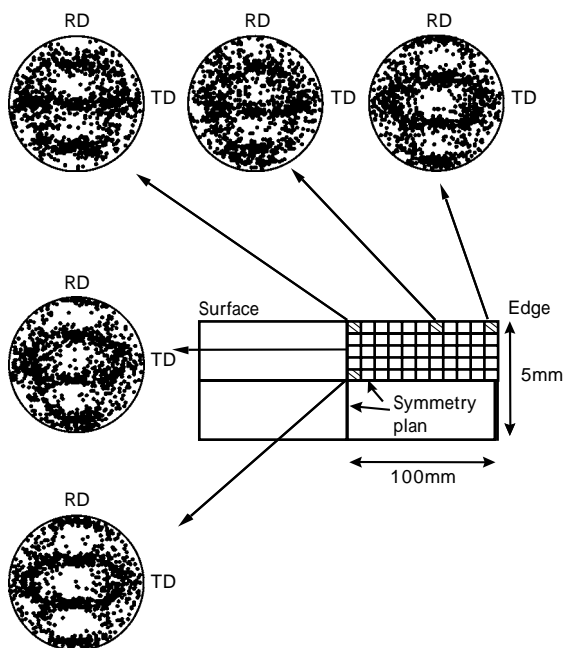


図10 圧延によるAl合金の板断面内の集合組織分布 ( $\mu = 0.3$ )

Fig.10 Texture distribution on cross section of rolled Al-alloy sheet with  $\mu = 0.3$

結果を与えることがわかる。また、摩擦係数によって板断面内のひずみ分布が変化するため、材料全体の集合組織には断面内のひずみ分布を考慮する必要がある。図10に断面内のひずみ分布を考慮して求めた集合組織分布を示す。ロールと材料の摩擦の影響により、板表面近傍は中心部の集合組織とは異なり、せん断集合組織と呼ばれる集合組織が成長していることがわかる。このように、塑性変形のシミュレーションを通して製造プロセス条件と組織モデルを結びつけることによって、実生産における種々の内部品質の予測が可能であり、製造条件の適正化などに活用されつつある。

#### 4. 塑性変形に及ぼす内部組織の影響

当社の製品は最終ユーザにおいて種々の部品に加工される。このため、ユーザから要求される加工性を満足す

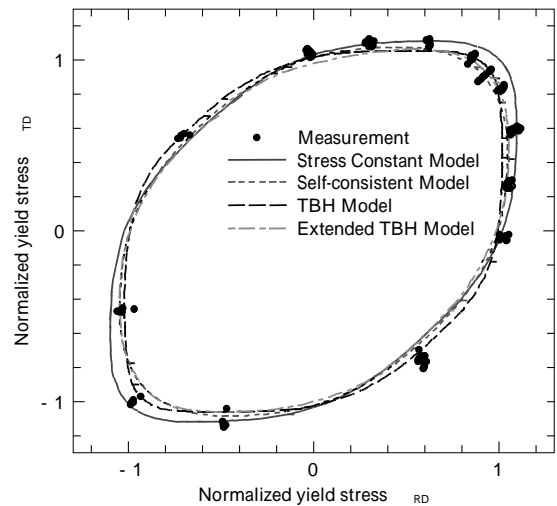


図11 集合組織から予測される降伏曲面と実測値の比較

Fig.11 Comparison of yield surface between measured and calculated ones by using several models

る製品を製造する必要がある。前章で述べたように、素材の内部組織を設計するためには、必要特性を顕現させる理想組織を求めることが必要である。このような、加工性と内部組織の関連も塑性加工の重要な分野である。

図11は、Al-Mg合金を対象に、塑性変形による異方性（塑性異方性）を表現する降伏曲面を集合組織から求めた計算結果であり、実測した降伏曲面と良い一致を示している<sup>12)</sup>。このような計算も前述の結晶塑性論から導かれる結果である。塑性異方性は板材のプレス成形時のひずみ分布に影響を及ぼし、成形形状不良を引起す一因である。このため、塑性異方性を考慮した構成方程式をFEM解析に導入し<sup>13)</sup>、成形性の評価を行うことによってユーザの使いやすい板材の設計や加工方法の検討への活用を進めつつある。さらに、Al合金より異方性の大きいチタン合金に対しても検討を開始したところ<sup>14)</sup>、より複雑な構成方程式が必要であることがわかってきた。

塑性変形の特徴である塑性異方性をはじめ、局部伸びなど加工性に影響する多くの特性は、最終的には数値モデルを用いて内部組織と関連付けて表現されるはずであ

るが、現状では未知な部分も多い。加工性と内部組織の関連を数値シミュレーションで精度良く予測することができれば、理想的な組織形態を決めることが可能となることから今後の発展が期待される。また、前章で述べたプロセス制御による組織制御と組合せることにより、要求される加工性を実現するためのプロセス設計・制御を数値シミュレーションで予測するようなことができれば、工程の省略や成分元素の削減、プロセスによる種々の特性の作り分けなど、大幅なコスト低減や生産性の向上が可能になると期待される。

むすび=本報では、塑性加工の課題における高度数値シミュレーション技術の現状と今後について述べた。現在もなお、コンピュータ技術の進歩によって計算機の能力は向上し続けており、その能力を有効に活用することによって、大規模問題はさらに詳細な条件を考慮することが可能になるとうとしている。たとえば、超並列コンピュータを使用することにより、大規模問題に詳細な条件を加味すると同時に、様々な境界条件(思考実験)を一度に計算することができ、最適条件の探索を迅速に行うことができるものと期待される。以前、結果を得るのに数週間かかっていた大規模問題の計算が、今では数日で得られるようになった。今後は、複数の境界条件を与えた大規模問題が数日レベルで計算できるようになると思われる。そのような状況になると、数値シミュレーションを使ったプロセス設計も、これまでとは違ったよりシステムのなアプローチによって迅速に結果が得られるかも知れない。

他方、後半に述べた表面、組織、特性予測に関しては、物理モデルにおける課題も山積している。例えば、表面の問題における摩擦係数の物理的な解釈には、根源的には分子レベル、原子レベルでの現象の理解が必要である。塑性加工によってサブミクロン、ナノオーダの表面性状が制御できれば、これまでと異なった製品も可能となると考えられる。とくに、組織予測に対しては、塑性加工面からのアプローチよりもむしろ、冶金現象のモデ

リングにおけるさらなる高度化が必要と思われる。特性予測に関しても、ミクロンレベルやナノレベルにおいて、塑性力学の適用性が保証されているわけではない。例えば、複相組織を考えるとときの界面の取扱いや、単相組織での結晶粒界の取扱いに対しては、まだまだ解決すべき点が多くある。これらの問題は、計算機能力の向上だけでは解決できるものではなく、モデルベースの大幅な改善が必要と思われる。

塑性力学を基礎にして発展した塑性加工シミュレーション技術は、その適用例は本報以外にも多く報告されており、当社の製造技術の高度化に大きく貢献しているといえる。しかしながら、当社が要求される製品品質・機能もますます高度化しており、今後の課題に対しては塑性力学のみでは対応できないと考えられる。このため、既存のシミュレーションを有機的に結合して系統的に答えを導くことや、よりミクロな現象をモデル化することにより、塑性力学を超える体系に基づいた問題としてアプローチすることが必要であると思われる。この意味において、塑性加工分野を対象とした数値シミュレーション技術は、今後もさらなる高度化を進めて行く必要があると考える。

#### 参考文献

- 1) 豊島史郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.48, No.1 (1998) p.6.
- 2) 柿本英樹ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.3(2005) p.26.
- 3) 林田康宏ほか：材料とプロセス，Vol.12 (1999) p.1088.
- 4) Y. Fujii, et al.: IX International Conference Computational Plasticity COMPLASIX (2007) p.787.
- 5) 串田 仁ほか：材料とプロセス，Vol.20, No.5, p.138.
- 6) 難波茂信：R&D 神戸製鋼技報，Vol.51, No.3 (2001) p.36.
- 7) 瀬沼武秀：第270回塑性加工シンポジウム，(2007) p.47.
- 8) 前田恭志ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.47, No.1, p.43.
- 9) 前田恭志ほか：第57回塑性加工連合講演会，(2003) p.391.
- 10) 前田恭志ほか：環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発プロジェクト第4回シンポジウム，(2007) p.33.
- 11) 前田恭志ほか：塑性と加工，Vol.40, No.461 (1999) p.591.
- 12) 前田恭志ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.48, No.1(1998) p.31.
- 13) Y. Hayashida, et al.: Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications, (1995) p.717.
- 14) 林田康宏ほか：第58回塑性加工連合講演会，(2007) p.227.