

(解説)

# 材料製品の高品質化を支える塑性加工シミュレーション

前田 恭志 (工博)

技術開発本部 生産技術研究所

## Numerical Simulations for Plastic Deformation

Dr. Yasushi Maeda

Recently, numerical simulations for plastic deformations related to rolling, forging and sheet metal forming processes have become an important tool for designing quality processes that control the shape of the material well as its mechanical properties. In this paper, various process applications using such numerical simulations are explained: for example, pass schedules for rolling, leveling conditions, die design for forging. Recent developments towards more realistic models for future material property prediction and total process design are also introduced.

まえがき = 近年の金属材料への要求品質として、最終組立製品の高機能化や需要家での加工組立時のコストダウンに寄与することが期待されている。これに応えるには寸法・形状精度や材料特性の厳格化がますます必要となっている。このような要求のもと、近年の急激なコンピュータ処理能力の向上を活用して、実操業に即した複雑な現象を数値モデルとして取扱い、数値シミュレーションによるプロセスの改善が可能になりつつある。このため、金属材料加工のプロセス開発において、数値シミュレーションは必要不可欠な技術要素になりつつある。本報では、これらの金属材料の製造における塑性変形を対象とした数値シミュレーションの方法とその適用例について紹介する。

### 1. 数値シミュレーションの方法

#### 1.1 塑性変形の基礎方程式<sup>1)</sup>

変形を取扱う基礎方程式として、応力の釣合い方程式は式(1)で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0 \dots\dots\dots(1) \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} &= 0 \end{aligned}$$

ここに、歪み(ε<sub>ij</sub>)と応力(σ<sub>ij</sub>)の関係式(構成方程式)を与えることにより、式(1)を解くことができる。構成方程式として、弾性、弾塑性(弾性変形と塑性変形を考慮)、剛塑性(塑性変形のみを考慮)が考えられ、これらを対象とする変形形式により選択する。例えば圧延などの変形量の大きい場合は現象の多くが剛塑性変形で説明できるが、矯正など変形量が小さい場合は弾塑性的な取扱いが不可欠である。この構成方程式の例として、式(2)に塑性ポテンシャルを用いた弾塑性構成方程式を歪み速度 $\dot{\epsilon}$ (弾性歪み速度を $\dot{\epsilon}^{el}$ 、塑性歪み速度を $\dot{\epsilon}^{pl}$ として、全歪み速度を $\dot{\epsilon}^{Tot} = \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{pl}$ で表す)、及び応力速度 $\dot{\sigma}$ で表現した例を示す。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{Tot}_{ij} &= \dot{\sigma}^{el}_{ij} + \dot{\sigma}^{pl}_{ij} = (C^{el}_{ijkl} + C^{pl}_{ijkl}) \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \\ C^{el}_{ijkl} &= \frac{1}{2G} \left\{ \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{1}{1+\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right\} \dots(2) \\ C^{pl}_{ijkl} &= \frac{3}{2H} \frac{1}{\epsilon_{eq}^2} (\delta_{ij} - \delta_{m}) (\delta_{kl} - \delta_{m}) \end{aligned}$$

ただし、 $\nu$ は弾性域では0、塑性域では1をとり、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタ、 $\delta_m$ は静水圧応力、 $\nu$ はポアソン比、 $G$ は横弾性係数である。また、 $H$ は $H = d_{eq} / d_{eq}$ で表される加工硬化係数、 $\epsilon_{eq}$ は相当応力、 $\epsilon_{eq}$ は相当歪みである。

この式(2)と、材料に変形を生じさせるための外力(金型やロールにより材料に伝えられる力)を式(1)の境界条件として与えて解くことにより、加工中の材料変形量と応力が求められる。

#### 1.2 初等解法

上記の基礎方程式の解法として、微分方程式を簡易化することにより解析解を求めることができる場合(例えば圧延におけるBland & Fordの圧延荷重式)は非常に少なく、通常は微分方程式を差分方程式として数値積分する方法が行われている<sup>2)</sup>。板材を対象とした平面歪み状態の矯正工程や圧延などの単純な変形であれば、このような手法によりプロセス設計(例えば板平坦度予測<sup>3)4)</sup>や矯正後の反り・残留応力予測<sup>5)</sup>)に適用できる。しかしながら、工具の接触条件などが複雑にかかわってくる場合には、差分方程式を解くことが困難になるため、次節の有限要素法解析に頼らざるを得ない。

#### 1.3 有限要素法解析(FEM解析)

実際の加工では、材料の3次元変形や材料と工具の接触状態の変化による境界条件の変化のため、差分方程式の適用は困難である。このため、材料を有限領域に分割し、各領域の外力と内部応力の釣合いから変位(実際には速度場)を求めるFEM解析が広く使われている<sup>6)</sup>。FEM解析では、要素分割数に伴い連立方程式のサイズが大きくなるため、大規模なモデルでは莫大な計算時間がかかっていた。しかしながら、計算機の能力が向上するのに伴い、従来では計算できなかったサイズのモデルも実用的なレベルになりつつある。また、大規模モデルへ

の適用には、計算方法の改良による寄与も大きく、変形の進行に伴い微小時間ごとの力の釣合いを解く静的陰解法から、塑性変形のみを扱うことにより速度場から直接応力を求める剛塑性有限要素法（静的陽解法とも呼ばれる<sup>7)</sup>）や運動方程式を直接解くことにより計算の高速化を目指す動的陽解法が発達してきた。特に、動的陽解法では、各瞬間ごとの力の釣合いを満足する必要がないため工具と材料の接触の取扱いが容易になること、力の釣合いを解くための逆マトリクス計算が不要になることなどのメリットが大きい。近年の塑性加工のFEM解析では主流になりつつある<sup>8)9)</sup>。

## 2. 適用結果

本章では、上記の解析モデルを実操業へ適用した結果について述べる。

### 2.1 板・棒線材圧延工程への適用

板圧延では、平坦度・板クラウンなどを主体とした解析が行われている。コイル圧延を対象とすると、板圧延では多くは定常状態であり、ロールと材料の変形を考慮した板平坦度・板クラウン予測が行われている。ロール変形（たわみ、扁平変形）は解析解をベースとした弾性変形、板は短冊状に分割した要素とし、圧延荷重とロール変形を連成させてロールギャップ分布を求め、かつ、短冊状の分割要素間での張力フィードバックを考慮したスリットモデルが用いられている。実際の圧延機での平坦度制御などのオフラインシミュレーションにこのようなモデルを適用し、制御アルゴリズムの設計や制御モデルパラメータの事前調整を行った<sup>3)4)</sup>。

他方、板端部のエッジドロップや板幅制御を考えると、材料の3次元変形を考慮する必要がある。このような3次元変形解析には剛塑性FEM解析を用いている。さらに、材料温度分布に起因して、断面内の変形抵抗が不均一になると、変形は複雑になる。変形抵抗に分布を持つ例の一つとして、変形抵抗の異なる3層クラッド圧延の解析事例<sup>10)</sup>を示す。図1は、クラッド圧延における圧延後の各材料層の層厚比（クラッド比）の幅方向分布を示す。変形抵抗の差によって各層の伸び方が異なるため、幅方向でクラッド比の分布が助長される。したがって、このような解析から圧下条件と材料強度を適切に選ぶことにより、所望のクラッド比を得るために必要な素材の板厚比を設計することが可能となる。

さらに、厚板圧延などで生じる先端部の形状変化（平面形状）では、非定常な3次元変形が大きく影響を及ぼす。しかも、複数パスで圧延されることを考えると、前パスで生じた形状が次パスでの形状変化へ影響を及ぼすため、複数パスの連続解析が必要になる。このため、従来の解析方法では計算時間が莫大となり、動的陽解法を用いたFEM解析の適用が進んでいる<sup>9)</sup>。図2に、圧延時の平面形状の変化の計算結果を示す。圧延が進むに従い、圧延方向に対して非対称な変形が進んでいることが分かる。これらの解析を用いて、パススケジュールによる平面形状変化を予測することにより、粗圧延と仕上げ圧延の適切な移送厚の検討などに活用している。

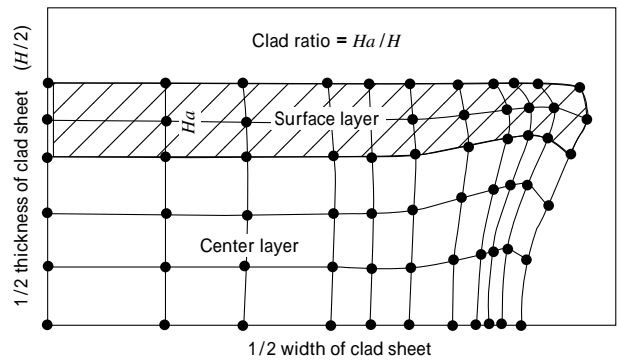


図1 クラッド材の出側断面での板厚分布  
Fig. 1 Distribution of thickness on clad sheet

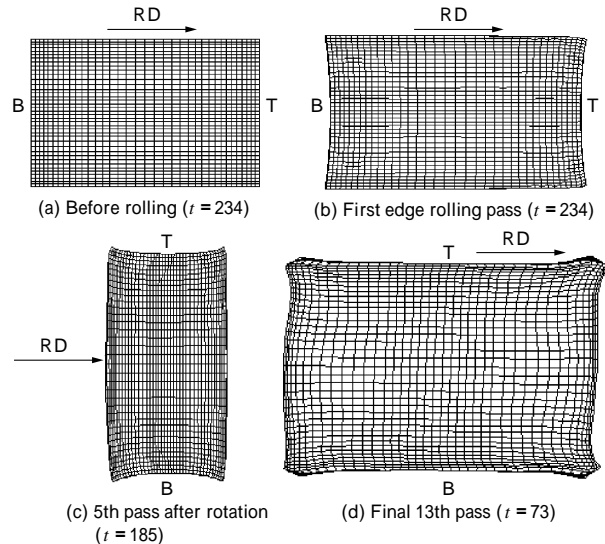


図2 厚板圧延での平面形状変化  
Fig. 2 Simulated plan view pattern of plate in multi-pass rolling process

さらに非定常な3次元変形が生じるのが、サイジングプレスなどの幅圧下と圧延が組合わされる薄板の粗圧延である<sup>11)</sup>。ここでは、スラブの温度分布が、サイジングプレスによる幅圧下及びその後の平圧延での板キャンバの発生原因となりうる。図3に、スラブ左右に温度差を有している場合のサイジングプレス後の板キャンバの様子と長手方向の歪み分布の計算結果を示す。これらの計算結果を用いて、板キャンバ防止のための炉内スラブ温度管理の厳格化などの対策を講じている。

棒線圧延では、さらに複雑な3次元変形を示す。これらの予測には、さらに高速な計算が必要であり、疑似3次元計算である一般化平面ひずみ解析<sup>12)</sup>を活用している。図4に、各スタンド出側の断面形状を示す。これらの断

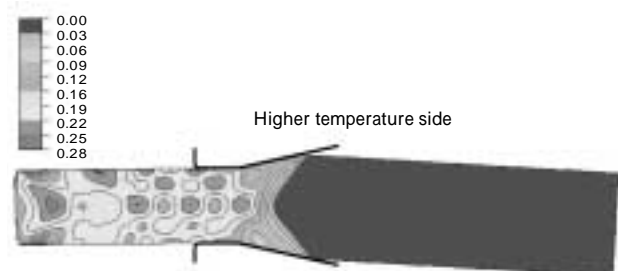


図3 サイジングプレス後の長手方向歪み分布  
Fig. 3 Longitudinal strain after sizing press

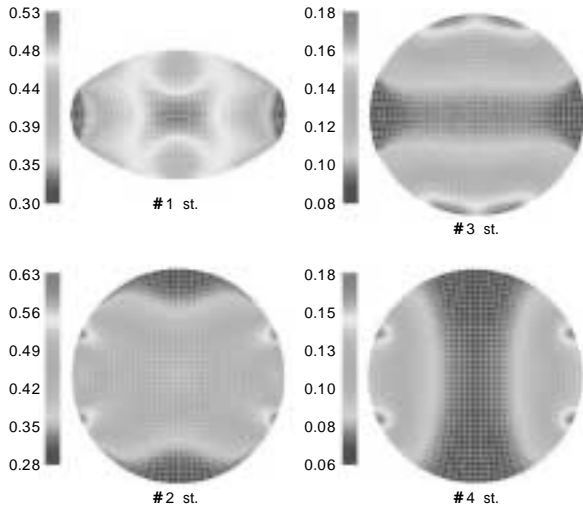


図4 サイジングミルにおける各スタンド出側での相当歪み分布  
Fig. 4 Calculated equivalent strain at exit of each rolling stand in sizing mill by FEM

面形状の予測結果を参考に、ロールのカーバ形状を適正化することにより高精度棒線材の生産を実現している。

## 2.2 板矯正・曲げ工程への適用

矯正・曲げ加工では、板の弾性変形と塑性変形が同程度に残留応力や加工後の形状に影響を及ぼす。このため、弾塑性の取扱いが必要となる。板の矯正工程の一つであるテンションレベラの数値解析への適用例を示す<sup>5)</sup>。ここでは、広幅の薄板を対象とするため平面ひずみ状態と仮定でき、しかも形状が単純であるため初等解法が適用できる。図5に、2種類のテンションレベラに対して、反りに及ぼすインターメッシュの影響の計算結果と実験結果を示す。インターメッシュの設定は、矯正工程の重要なパラメータであるが、この結果が示すように設備構造により適正なインターメッシュ（反りを0とする）の範囲が異なり、Type Bの構造をとることにより安定なインターメッシュの領域を広くとることができる。

一方、レベラでも板厚が厚くなると単純な平面ひずみ

では板端部の変形（あるいは残留応力）を適切に評価することはできない。このような場合には、やはり3次元FEM解析に頼らざるを得ない<sup>13)</sup>。図6は、厚板レベラでの端部残留応力を予測するために行った矯正中の長手方向応力分布の解析結果である。板端部を切断して使用するような厚板では、端部の残留応力も重要であり、このような解析結果から端部残留応力の低減方法の検討を進めている。

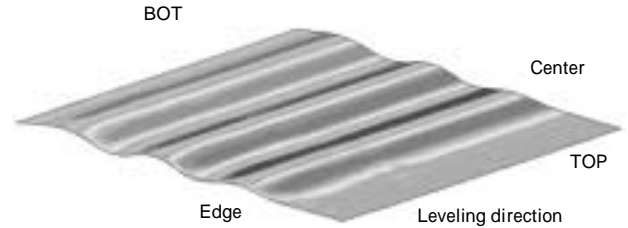


図6 厚板ローラレベラにおける矯正中の長手方向応力分布  
Fig. 6 Longitudinal stress distribution of plate surface in roller-leveling

## 2.3 板成形工程への適用

板成形加工では、金型などの接触判定が複雑なため、非常に単純な成形以外はFEM解析に頼らざるを得ない。また、静的解法では計算時間が莫大となるため、現在では動的陽解法による手法が広く用いられている。また、金型による材料の拘束が少ないため、異方性挙動のような材料自身の持っている変形特性が大きく影響する加工工程である。このため、異方性を正確に考慮することが精度向上のためには重要な課題である。

自動車の軽量化にともない、アルミニウム材の適用が進んでいるが、アルミニウム材の持つ異方性がひとつの問題となる。異方性は、種々の方位を持つ単結晶が多結晶を形成することにより発生し、その集合組織（各結晶粒の方位分布密度）により決定される。このため、集合組織から材料の異方性を求める方法として、結晶塑性モデルを用いた異方性材料モデルを構築した<sup>14)</sup>。材料の

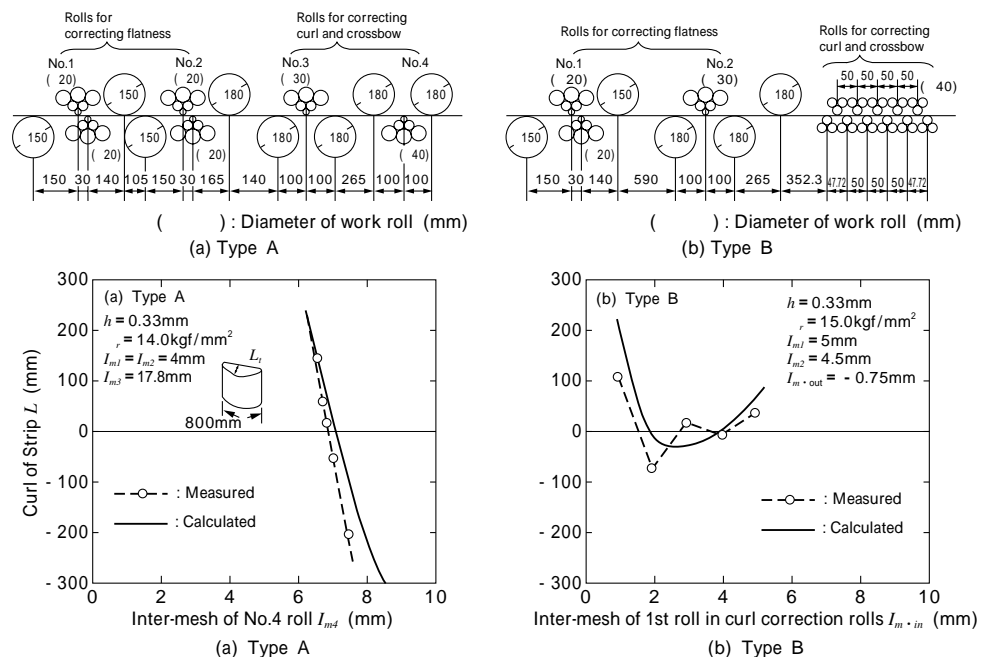


図5 テンションレベラの構造と各レベラ構造における反り制御性  
Fig. 5 Controllability of curl on each tension levelers which have different roll arrangement

異方性を表すものとして降伏曲面の測定値と集合組織から計算した予測値を図7に示す。このようにして求めた降伏曲面から異方性構成方程式を構築した。この構成方程式を元に、FEM解析により変形を予測し、実測結果と比較した例を図8に示す<sup>8)</sup>。図8は、添加元素を変化させて製造した3種類のアルミニウム合金(A, B, C)に対して、材料の持つ異方性により発生する円筒深絞りの耳高の異方性を示す。この図より、材料ごとの耳高さ

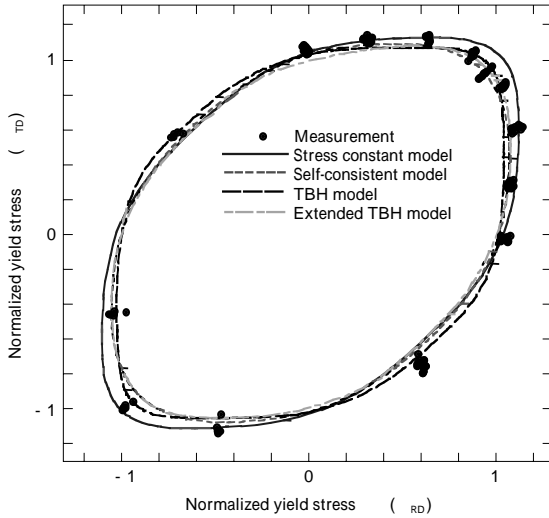


図7 集合組織から種々の結晶塑性モデルで求めた降伏曲面と実測値の比較

Fig. 7 Comparison of yield surface between measured and calculated ones by using several models

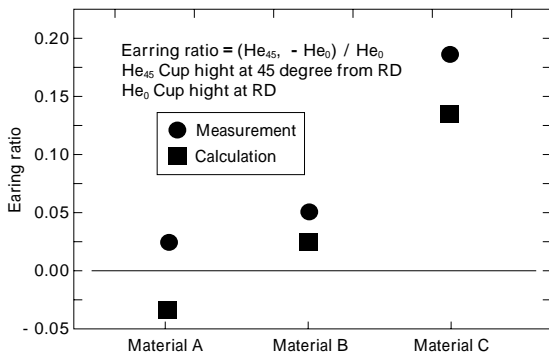


図8 材料異方性を考慮したFEMにより計算された円筒深絞りの成形の耳率と実験値の比較

Fig. 8 Comparison of earing ratio between measured and calculated ones by using FEM

(耳率)の違いが集合組織に基づく異方性によって予測できていることが分かる。このように、材料特性と成形形状の関連を予測することにより、成形加工方法の改善や材料特性の改善にシミュレーション結果が活用できる。

## 2.4 鍛造工程への適用

鍛造工程では、ニヤネットシェイプによる歩留まり改善のために、中間の粗地形状や金型形状の適正化が重要な課題である。これらの適正化の時間短縮のために、数値シミュレーションを活用した変形予測による金型・工程設計が重要である。数値解析としては、変形形状が複雑であるため単純な場合を除いて、FEM解析を適用している。しかしながら、鍛造工程では変形が激しく、通常FEM解析では変形中にメッシュがつぶれ、計算が不可能な状況に陥る。このため、鍛造解析には変形の途中で、メッシュ形状を修正するリメッシュ機能が重要になる<sup>15)</sup>。図9に鍛造工程でのリメッシュ機能を用いた変形解析結果を示す。このような解析により、素材粗地形状による最終金型形状の充満度、プレス力量の制約によるプレス可否判断や金型に掛かる応力による金型の割れなどの予測を行い適切な鍛造の工程設計に反映している。

## 3. 数値シミュレーションにおける今後の取り組み

これまでの数値シミュレーションは、主に材料の形状を作り込むための製造条件や金型形状の最適化などをその活用対象として発達してきた。計算速度の向上とともに、これらの形状予測は、研究の域から日々の生産に活用できるツールにまで成長しつつある。最近では、塑性加工シミュレーションの新しい方向として、小型の実験では再現できないような材質の作り込み技術を数値シミュレーションにより予測しようとする試みを行っている。また、単独の工程のみならず、工場の中の生産工程全部を数値シミュレーションに乗せて、バーチャルファクトリによる製造工程の見直しをコンピュータの内部で行うことも試みている。ここでは、その実例について紹介する。

### 3.1 材料加工における材質の作り込み<sup>16)</sup>

アルミニウム材の成形時に異方性(集合組織)がその成形性に大きく影響することは前述した。このために、アルミニウムの集合組織を製造ラインで制御することが

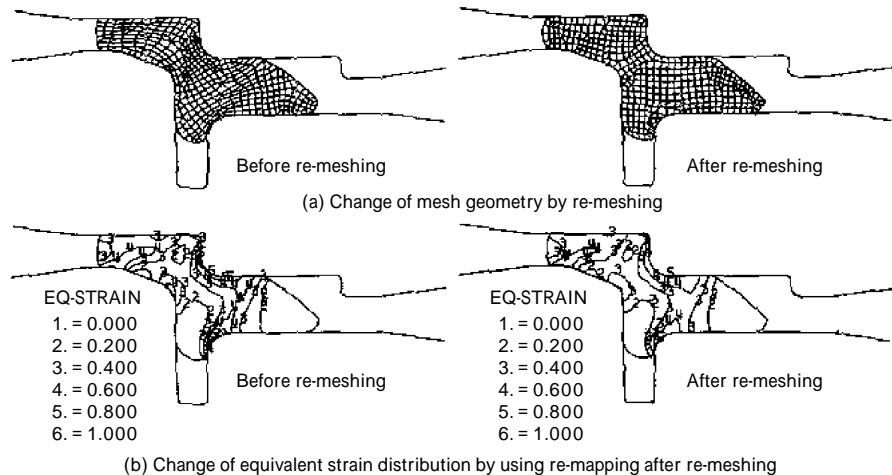


図9 リメッシュ処理前後でのメッシュ形状及び相当歪みの分布

Fig. 9 Changes of mesh geometry and equivalent strain after re-meshing procedure

求められている。集合組織の形成は、鋳造・熱延・熱処理・冷延工程の全ての工程が関与するが、ここではその主要因である冷延集合組織の形成について説明する。集合組織の形成モデルとしては、結晶塑性論をベースとした結晶回転により説明される。図 10 は、結晶塑性モデルに従い計算された圧延板断面の各部位での集合組織（極点図）を示す。図 10 (b) の低摩擦係数の場合には、全断面に渡って圧延集合組織と言われる集合組織が発達している。これに比べて、図 10 (a) の高摩擦係数の場合には、表面層にせん断集合組織と呼ばれる集合組織が形成され、このせん断集合組織は深絞り成形時の成形性向上（高  $r$  値材料）に寄与すると言われている。そこで、ロール径と板厚の比および摩擦係数などの影響を数値シミュレーションにより明らかにし、表面層せん断集合組織の形成を促す方法を検討している。

### 3.2 統合シミュレータによる工程設計システム<sup>17)</sup>

従来の数値シミュレーションは、操業条件の一部を計算するものであったが、コンピュータの発達により、操業条件そのものを数値計算に乗せて一連の工程をシミュレートする試みも行っている。図 11 は、厚板製造工程を対象として、オンラインのパススケジュール計算をベースにして、材料の温度・変形を統一的に解析するために開発した VPR (Virtual Plate Rolling) システムの概念図である。ここでは、差分法を用いた簡易解析（温度・平坦度）から非定常の FEM 解析（平面形状など）までを統一したプラットフォームで管理することにより、実操業に対応した必要な情報を取出すことができる。

むすび = 塑性加工における数値シミュレーションは、1980 年代からのコンピュータの急速な発達と FEM 解析の適用により、現段階では、製品の寸法・形状の改善を目的とした工程設計や操業改善に日常的に利用されるようになってきた。今後は、これらの形状・寸法のみならず材質の作り込みやプロセス全体の最適化までを目的とし、材質モデルの組込みやプロセス全体を計算する Virtual Factory の方向に発展させたいと考えている。このような方向に沿った形で、数値シミュレーションを用いた解析をより充実させ、製品の形状・寸法・材質の安定化とさらなるコストダウンを目指して、開発を進めている。

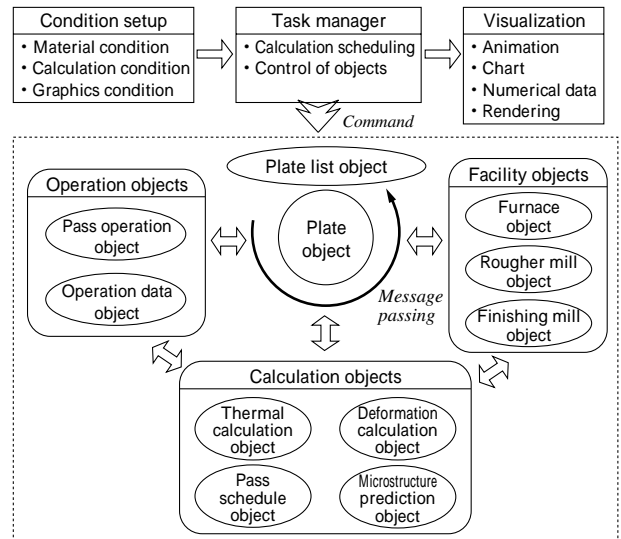


図 11 オブジェクト指向に基づく仮想工場システム  
Fig.11 Object oriented model for virtual manufacturing system

### 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：材料加工の計算力学，(1992) p.1. コロナ社。
- 2) 日本鉄鋼協会編：板圧延の理論と実際，(1984) p.6. 日本鉄鋼協会。
- 3) 前田恭志ほか：塑性と加工，Vol.31, No.363 (1991) p.470.
- 4) 前田恭志ほか：塑性と加工，Vol.31, No.363 (1991) p.476.
- 5) 服部 重夫ほか：塑性と加工，Vol.28, No.312, (1987) p.34.
- 6) 木内 学ほか：圧延理論部会第 100 回記念シンポジウム，(1994) p.237.
- 7) 豊島史郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.48, No.1 (1998) p.31.
- 8) Y. Hayashida, et al：Simulation of Materials Processing, Theory, Methods and Applications, (1995) p.717.
- 9) 林田康宏ほか：材料とプロセス，Vol.12 (1999) p.1088.
- 10) 前田恭志ほか：軽金属学会第90回春期大会講演概要(1996) p.61.
- 11) 石丸誠ほか：第 113 回圧延理論部会 (2000) 113 圧理 9.
- 12) 串田仁ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1 (2000) p.25.
- 13) 谷徳孝ほか：材料とプロセス Vol.12 (1999) p.1092.
- 14) 前田恭志ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.48, No.1 (1998) p.31.
- 15) 金丸信夫ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.48, No.1 (1998) p.64.
- 16) 前田恭志ほか：塑性と加工，Vol.40, No.461 (1999) p.591.
- 17) 渡辺俊彦ほか：材料とプロセス Vol.13 (2000) p.212.

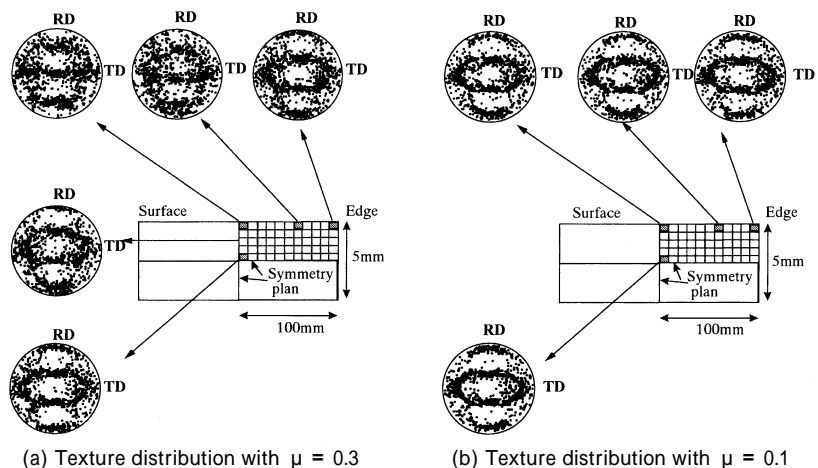


図 10 異なる摩擦係数で圧延されたアルミニウム板の断面内集合組織分布  
Fig.10 Texture distribution on the cold rolled Al sheets with different friction across the rolling direction for (111) pole figures  
(a) Texture distribution with  $\mu = 0.3$   
(b) Texture distribution with  $\mu = 0.1$