

# 成形シミュレーションの 解析精度に影響する因子 ならびにその周辺技術

東京農工大学 桑原利彦\*

成形シミュレーションの究極の目標は、破断、しわ、スプリングバックなどの成形不具合現象を完璧に予測し、試行錯誤なしで最適な金型形状や工程設計を行うことである。「CAEを用いた塑性加工プロセスの設計は、高級なソフトウェアやハードウェアを揃えれば解決できる問題では決してない<sup>1)</sup>」が、解析ソフトウェアの性能と限界をよく理解して使用すれば、かなりのレベルまで加工現象の再現が可能である。

また最近では、サーボプレスの出現により、材料の加工履歴を自在に変化させられるようになってきた。そこで成形シミュレーションを事前に実施して、最適な加工条件を探索・決定できれば、サーボプレスの使いこなし技術も一段階上のレベルに向上し、さらなる部品精度向上と生産効率向上に寄与するであろう。

本稿では、成形シミュレーションの解析精度に影響する因子ならびにその周辺技術について解説する。最近の成形シミュレーション技術の動向については文献<sup>2),3)</sup>に詳しく解説されているので一読をお勧めする。

## 材料モデル<sup>4)</sup>

金属材料の塑性変形を記述する材料モデルは、

\* (くわばら としひこ)：大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授  
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16  
TEL: 042-388-7083 FAX:

降伏条件式、塑性流動則、加工硬化則の3つから構成される。

### 1. 降伏条件式

圧延された板材の圧延方向、圧延直角方向、板厚方向をそれぞれ  $x, y, z$  座標軸と一致させる。6つの独立した応力成分  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$  が材料要素に同時に作用するとき、その材料要素が塑性変形を開始する（降伏する）条件を判定するための式を降伏条件式、もしくは降伏関数と呼ぶ。降伏関数は応力成分を変数として次式のように表記される。

$$F = \bar{\sigma}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) - Y = 0 \quad (1)$$

ここでは材料の単軸引張降伏応力である。  $\bar{\sigma}$  は相当応力と呼ばれ、応力の6成分を単軸引張りの応力に相当する値に変換する関数である。弾性変形中は  $F < 0$  であり、  $F = 0$  となったとき、材料は塑性変形を開始する。

等方性材料の降伏条件式としてはミーゼスやトレスカの降伏条件式<sup>5)</sup>が用いられる。一方、プレス成形用の薄板材料は一般に異方性を有するので、異方性を再現するための降伏条件式が多く提案されている<sup>4),6)</sup>。後述するように、成形シミュレーションの精度を向上させるには、適切な異方性降伏条件式を選択することが肝要である。

簡単のために、二つの垂直応力成分 ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) のみが作用する場合を考える。このとき式 (1) は  $F = \bar{\sigma}(\sigma_x, \sigma_y) - Y = 0$  のように表せ、それは  $\sigma_x - \sigma_y$  座標系において原点を含む閉曲線を表す (図1)。応力 ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) がこの閉曲線に達するとき、

材料は降伏して塑性変形を開始することを意味するので、この閉曲線のことを降伏曲面と呼ぶ。

## 2. 塑性流動則

Drucker<sup>7)</sup>の考察によれば、降伏曲面が滑らかであると仮定すると次の二つの特性が導かれる。

①降伏曲面は凸曲面でなければならない。②応力の座標軸と平行に塑性ひずみ速度（単位時間当たり発生する塑性ひずみ増分） $(\dot{\epsilon}_x^p, \dot{\epsilon}_y^p) = (d\epsilon_x^p/dt, d\epsilon_y^p/dt)$ の座標軸をとるとき、塑性ひずみ速度の発生方向は、その応力点において降伏曲面の外向き法線方向に一致する（たとえば、図1の降伏曲面上の○で示される応力状態において、塑性ひずみ速度は○を始点とする矢印の方向に生じる）。

②のように塑性ひずみ速度が降伏曲面の法線方向に発生すると規定した塑性流動則を関連流動則または法線則と呼ぶ。このように降伏関数は材料の降伏判定のみならず塑性流動則にも関連する。そのため、後述の解析例から明らかなように、成形シミュレーションの高精度化のためには、実際の材料に適した降伏関数の選択が必要である。

## 3. 加工硬化則

塑性変形を与えると材料は加工硬化するので、式(1)における $Y$ の値も増加する（加工硬化後の材料の降伏応力を後続降伏応力と呼ぶ）。そこで塑性ひずみの増加に伴う後続降伏応力の増加を表すためには加工硬化則を定式化する必要がある。最も簡単な定式化では、降伏曲面の中心が原点に固定されたまま、その形状が等方的に（相似形状を維持しつつ）膨張すると考える。これを等方硬化則と呼ぶ。等方硬化を表現するために、 $Y$ を塑性ひずみの関数として変化させる。一方で、金属材料の降伏曲面の形状は一般には変化するので、相当応力のパラメータを塑性ひずみの関数として変化させるモデル（異方硬化モデル）を用いることにより、成形シミュレーションの精度がより向上する<sup>8),9)</sup>。

ただし、塑性変形中の材料の降伏曲面を直接測定することは極めて難しいので、筆者の研究室では「等塑性仕事面」が降伏曲面に一致すると仮定して、材料モデル決定ための基礎データとしている。等塑性仕事面の測定方法は文献<sup>10)</sup>を参照されたい。

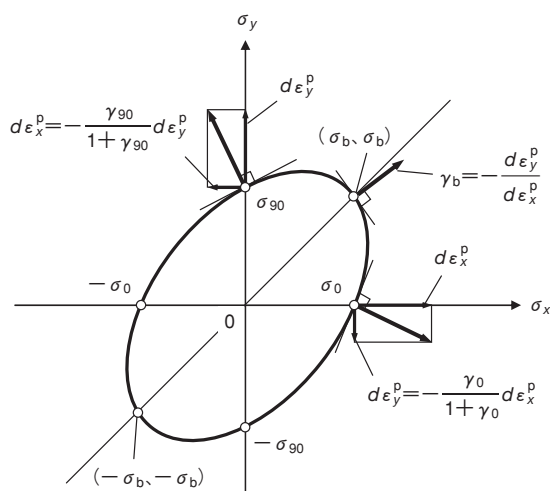


図1 降伏曲面と材料特性値との幾何学的関係。  
 $\sigma_0, \sigma_{90}$ : 圧延方向および板幅方向の降伏応力、  
 $\gamma_0, \gamma_{90}$ : 圧延方向および板幅方向の $\gamma$ 値、  
 $\sigma_b, \gamma_b$ : 等二軸引張における降伏応力および塑性ひずみ速度比

## 成形シミュレーションの精度に及ぼす材料モデルの影響

### 1. 6000系アルミニウム合金板の液圧バルジ成形<sup>11)</sup>

自動車車体の軽量化を実現する材料としてアルミニウム（Al）合金板が注目されている。しかしAl合金板は、破断しやすい、スプリングバックが大きいなど、プレス成形が難しい材料である。Al合金板のプレス成形品への適用をさらに拡大するためには、成形シミュレーションの予測精度を向上させて、成形不具合を高精度に予測し、プレス工程設計の脱試行錯誤化を推進することが必要である。Al合金板に代表される面心立方金属板の成形限界ひずみは集合組織の影響を強く受け、Cube方位を多く含む集合組織において、平面ひずみ引張から等二軸引張領域において、成形限界ひずみが大幅に向上することが多結晶塑性解析により予測されている<sup>12)</sup>。

そこで6000系Al合金板を対象として、Cube方位密度が高い材料（HC材）と低い材料（LC材）に対して二軸引張試験（試験方法の詳細は文献<sup>10)</sup>参照）を行い、それぞれに対して最適な降伏関数を同定し、液圧バルジ成形シミュレーションの解析精度に及ぼす降伏関数の影響を調査した。