

## 単軸および二軸引張試験による材料構成式の取得

- 板成形シミュレーションの予測精度向上に向けて -

機械電子科 是永宗祐\*  
株式会社富士テクニカ宮津 久保田 信

## Acquiring Material Constitutive Equations Using Uniaxial and Biaxial Tensile Tests

- Improving the Accuracy of Sheet Metal Forming Simulations -

KORENAGA Sosuke and KUBOTA Makoto

In recent years, numerical simulations of sheet metal forming have been widely used to shorten lead time and reduce costs. Accurate simulations require a quantitative description of the plastic deformation behavior. In this paper, uniaxial and biaxial tensile tests were carried out to obtain material constitutive equations that express the plastic deformation behavior. First, parameters in the Swift equation, which expresses uniaxial deformation behavior, were determined by numerical optimization based on experimentally obtained data. Second, parameters in the anisotropic yield function (BBC2005), which describes the plastic anisotropy, were also determined. The stress values calculated by these equations were generally consistent with the measured stress data. These results indicate that the plastic deformation behavior can be expressed via the obtained equations. Therefore, these material constitutive equations are expected to improve the accuracy of sheet metal forming simulations.

Keywords : sheet forming, simulation, material constitutive equation, tensile test, anisotropic yield function

板成形においては、成形不具合を起こさない加工条件を、試行錯誤なく、短時間で決定することが求められており、製造現場では有限要素法による板成形シミュレーションの活用が進んでいる。板成形シミュレーションを高精度化するためには、基礎データとして引張試験のデータが必要となる。材料の種類によっては、引張方向によって変形特性が変化する“異方性”を示すことから、単軸引張試験のみから正確なデータを取得することは困難である。一方、二軸引張試験では、材料を直交する二方向に同時に引っ張ることができるため、異方性を詳細に評価できる。そこで本研究では、チタン板に対して単軸引張試験と、リンク式二軸引張試験装置を用いた二軸引張試験を行い、材料が一方向に変形した時の特性を表すSwift式と、材料の異方性を表す異方性降伏関数を求めた。これらの材料構成式から計算した変形応力値は、実測結果と良好に一致した。このことから、得られた構成式は、材料の変形特性や異方性を正確に表していることがわかった。これらの構成式を板成形シミュレーションソフトに入力することにより、形状予測精度の向上が期待される。

キーワード：板成形、シミュレーション、材料構成式、引張試験、異方性降伏関数

## 1 はじめに

板成形においては、成形不具合を起こさない加工条件を、試行錯誤なく、短時間で決定することが求められている。このような背景から、製造現

場では板成形シミュレーションの活用が進んでいる。板成形シミュレーションを高精度化するためには、材料の変形特性を表す材料構成式を求める必要がある。この材料構成式は、引張試験を行い、

\* 退職

材料を変形させるのに必要な応力値を測定し、これらのデータを解析することによって求めることができる。ただし、材料の種類によっては、引張方向によって変形特性が変化する“異方性”を示すことから、単軸引張試験のみから正確な変形特性を取得することは困難である。一方、二軸引張試験では、材料を直交する二方向に同時に引っ張ることができるため、異方性を詳細に評価することができる。

そこで本研究では、金属板（純チタン板）に対して、単軸引張試験のみならず、リンク式二軸引張試験装置を用いた二軸引張試験を実施し、材料の異方性を表すデータを取得することで、板成形シミュレーションの高精度化に必要な材料構成式を求めた。

## 2 方法

引張試験機には、精密万能試験機 AGX-100kNv およびリンク式の二軸引張試験治具（株式会社島津製作所製）を用いた。試験片の原材料には、板厚 1.0mm の純チタン 2 種の板を用いた。単軸引張試験片の形状は JIS Z 2241 の 13B 号とし、引張方向が材料の圧延方向（x 方向）または圧延直角方向（y 方向）となるように 2 種類の試験片を作製した。二軸引張試験片は、図 1 に示すように JIS Z 2257 に準じた十字型の形状とした。二軸引張試験における x および y 方向のチャック変位速度比は 1:1 とした。二軸引張試験の概観を図 2 に示す。試験片を試験治具中央にセットし、試験治具を圧縮していくと、治具の 4 本のアームが外側に開く。それに伴って、試験片の 4 箇所をつかみ部が同時に外側に引っ張られ、二軸引張が実現する構造となっている。引張試験中の試験力とひずみを測定し、真応力-真塑性ひずみ曲線を求めた。この結果を解析し、板成形シミュレーションの高精度化に必要な材料構成式（Swift 式、異方性降伏関数）を求めた。

## 3 結果および考察

### 3.1 単軸引張から得られる材料構成式 (Swift 式)

材料の圧延方向（x 方向）に引っ張る単軸引張試験によって得られた真応力-真塑性ひずみ曲線を図 3 に示す。図 3 の結果は、材料の変形に要する

力と変形量の関係を表したもので、これを板成形シミュレーションに反映させれば、高精度化が期待できる。

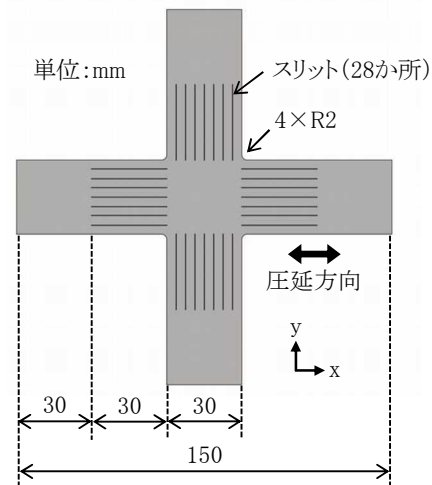


図 1 二軸引張試験片



図 2 二軸引張試験の概観

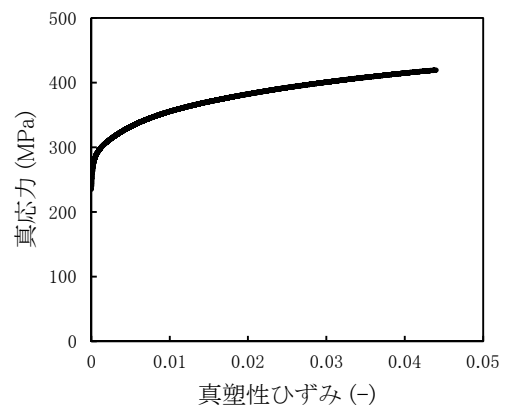


図 3 圧延方向（x 方向）の単軸引張で得られた真応力-真塑性ひずみ曲線

（材料の変形に要する力と変形量の間係を表したもの）

しかし、図3の結果は、膨大な点群データであるため、このままシミュレーションソフトに入力することができず、材料構成式 (Swift 式) で表す必要がある。Swift 式は以下の式で表される 1)。

$$\sigma = c(\alpha + \varepsilon)^n$$

$\sigma$  は真応力、 $\varepsilon$  は真塑性ひずみ、 $C$ 、 $\alpha$ 、 $n$  は材料パラメータである。Swift 式が描く真応力-真塑性ひずみ曲線の形は、式中の材料パラメータ  $C$ 、 $\alpha$ 、 $n$  によって変化する。Swift 式が描く曲線が、実測した真応力-真塑性ひずみ曲線と一致するように、数値最適化によりパラメータを決定した結果、 $C=609.6$ 、 $\alpha=0.001676$ 、 $n=0.1215$  となった。Swift 式が描く真応力-真塑性ひずみ曲線を図4中の実線で、実測データを同図中のプロットで示す。これより、本研究で求めた Swift 式は、実測データと良好に一致していることが確認できた。

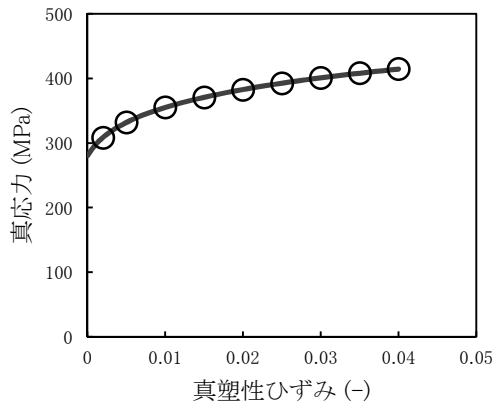


図4 Swift式で表した材料の変形特性

実線：Swift式、○：実測データ  
本研究で求めた Swift 式は、実測データと良好に一致。

### 3.2 二軸引張から得られる材料構成式 (異方性降伏関数)

3.1 節で求めた Swift 式は、ある一方向 (圧延方向) に材料を引っ張ったときの材料構成式である。しかし、材料は引張方向によって変形特性が変化する異方性を有する。このため、『引張方向が変化したときに、変形に要する応力値がどの程度変化するか』を表した材料構成式 (異方性降伏関数) も必要となる。異方性降伏関数を導出するために、3.1 節で示した圧延方向 (x 方向) の単軸引張試験に加え、圧延直角方向 (y 方向) の単軸引張試験と、x および y 方向に同時に引っ張る二軸引張

試験を実施した。それぞれの試験で得られた真応力-真塑性ひずみ曲線を図5および6に示す。

つづいて、図3、5、6の真応力-真塑性ひずみ曲線の結果から、変形方向によって応力がどの程度変化するかを表す等塑性仕事面を求めた。解析方法は JIS Z 2257 附属書 A に従い、x 方向の単軸引張試験における真塑性ひずみが 0.0006 に相当する等塑性仕事面を求めた結果を図7のプロットで示す。これは、材料を塑性変形させるために必要な真応力の x および y 方向成分 ( $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ ) をプロットしたものである。図7中のプロット (□、◇、○) は、それぞれ x 方向の単軸、y 方向の単軸、二軸の引張試験結果から導出されている。

次に、これらのデータを板成形シミュレーションに反映させるためには、データプロットを正確に通る曲線 (降伏関数) を求める必要がある。ま

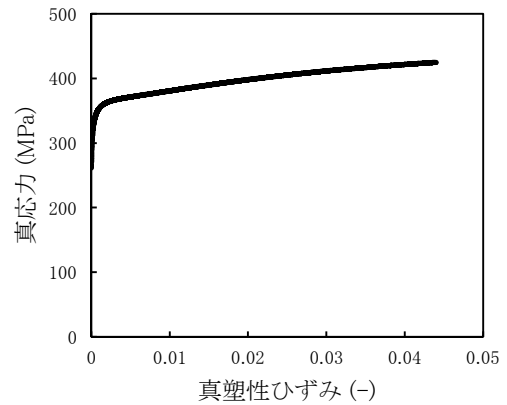


図5 圧延直角方向 (y 方向) の単軸引張で得られた真応力-真塑性ひずみ曲線

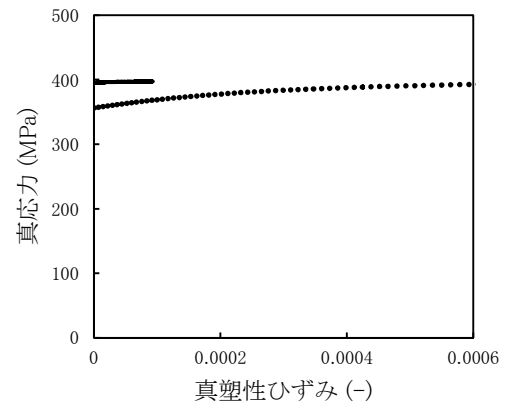


図6 二軸引張で得られた真応力-真塑性ひずみ曲線

実線：x 方向 (圧延方向)  
点線：y 方向 (圧延直角方向)

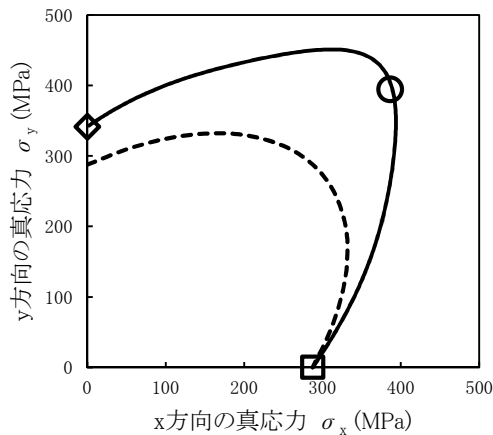


図7 純チタン板の等塑性仕事面と降伏関数

□ : x 方向 (圧延方向) の単軸引張試験の結果  
 ◇ : y 方向 (圧延直角方向) の単軸引張試験の結果  
 ○ : 二軸引張試験の結果  
 点線 : von Mises 降伏関数  
 実線 : BBC2005 降伏関数

BBC2005 降伏関数とデータプロットは良好に一致しているため、BBC2005 降伏関数を用いることによって、材料の塑性変形特性を正確に表現できると示唆。

ず、材料が等方性であると仮定した von Mises 降伏関数 1) を図 7 中の点線で示す。von Mises 降伏関数が描く曲線は、データプロットとほとんど一致しなかった。つぎに、異方性を表すことができる BBC2005 降伏関数 2) を図 7 中の実線で示す。BBC2005 降伏関数とデータプロットは良好に一致した。以上より、BBC2005 降伏関数を用いることによって、異方性を有する純チタン板の塑性変形特性を正確に表現できることがわかった。

板成形シミュレーションを実施する際に、二軸引張試験のデータがない場合は、3.1 節で求めた Swift 式と von Mises 降伏関数が用いられる。しかし、これらの材料構成式では、材料の異方性を表現できないため、板成形シミュレーションの形状予測精度が低くなることが懸念される。一方で、材料の異方性を正確に表現できる BBC2005 降伏関数を用いることにより、板成形シミュレーションの形状予測精度の向上が期待される。

#### 4 まとめ

板成形シミュレーションで必要となる材料構成式を導出するため、金属板の単軸および二軸引張試験を実施した。引張試験の結果から、材料の変形特性を表現するための材料構成式として、Swift

式と異方性降伏関数を導出した。特に、二軸引張試験の結果から導き出される異方性降伏関数を用いることで、異方性を有する材料の変形特性を正確に表現できることがわかった。これらの材料構成式を板成形シミュレーションソフトに組み込むことによって、形状予測精度の向上が期待される。

#### 参考文献

- 1) 山村直人、桑原利彦、吉田健吾：有限弾塑性変形の基礎式，異方性降伏関数，「静的解放 FEM 板成形」，初版 (株) コロナ社，東京)，日本塑性加工学会 編集，pp. 8-76, 172-203 (2004)．
- 2) Banabic D. et al. : Influence of constitutive equations on the accuracy of prediction in sheet metal forming simulation, Numisheet, pp. 37-42 (2008)．