

〈一般研究課題〉 せん断試験によるアルミニウム合金板の
降伏関数の決定と精度検証

助成研究者 大同大学 西脇 武志



せん断試験によるアルミニウム合金板の 降伏関数の決定と精度検証

西脇 武志
(大同大学)

Identification and Validation of Yield Functions of Aluminum Alloy Sheets by Shear Tests

Takeshi NISHIWAKI
(DAIDO University)

Abstract :

In sheet metal forming simulations, the parameters of a highly accurate yield function are identified through the material testing such as uniaxial and biaxial tensile tests. These tests provide various tensile stress states. However, sheet metal forming involves various deformations in compressive and shear stress states. Therefore, shear tests are conducted to validate the yield function parameters identified from tensile stress state using uniaxial and biaxial tensile tests.

This study investigated the A5052-O aluminum alloy sheet. Uniaxial tensile and biaxial tensile tests were performed to obtain the contour of plastic work surfaces and to identify parameters for the Yld2000-2d yield function. Twin-bridge shear tests were also conducted to determine the yield stress in shear, which was then compared to the identified Yld2000-2d yield curve. The shear test results showed good agreement with the Yld2000-2d yield curve in the σ_x - σ_y plane, but not in the σ_{xy} - σ_b plane. Yld2000-2d could not simultaneously satisfy all experimental results. This indicates that Yld2000-2d has insufficient expressive capability. To validate the accuracy of the identified yield function, deep drawing tests of cylinder cups and their numerical analysis were conducted. Three sets of Yld2000-2d parameters at different preferred experimental points were used for the analysis. The cup heights from the analysis were then compared to the experimental results. While the numerical analysis did not align with the experimental results, the error was minimized for the

Yld 2000- 2d parameters identified in preference to the shear test results in the 0 ° and 90 ° directions.

1. はじめに

プレス加工の成形シミュレーションにおいて、高精度な降伏関数は解析精度向上のために重要であり、YLD2000-2d降伏関数[1]を始めとする高次の降伏関数が提案されている。しかしながら、高次の降伏関数はパラメータが多く、その同定には多くの実験データを必要とする。例えばYld2000-2dのパラメータを同定するには、圧延方向0、45、90°方向の単軸引張の流動応力と二軸引張の降伏応力やr値に加え、等二軸引張の降伏応力やひずみ増分比が必要である。そのため十字形引張試験片を用いた二軸引張試験[2-3]やバルジ試験が実施されている。また近年、単軸引張試験機を用いた試験のみで降伏関数のパラメータを同定する試みが検討されており、不均一な応力場で生じた変形をデジタル画像相関法によって計測し、逆解析などの手法によって降伏関数が同定されている[4-5]。これらの降伏関数のパラメータの決定手法は、いずれも引張応力場を与える試験によって同定されている。しかしながら、プレス成形には、深絞り成形時の縮みフランジ変形をはじめとして、圧縮やせん断応力場での変形が多く存在する。そのため、引張応力場で同定された降伏関数が、どれほど成形時の現象を再現するかは未知数であり、引張応力場以外の材料試験によっても確認することが望ましい。本研究では、せん断試験を用いてせん断応力場における降伏応力の情報を取得し、引張応力場の実験データを用いて同定された降伏関数のパラメータの妥当性を検証する。

2. 供試材および引張試験

2.1 単軸引張試験条件および二軸引張試験条件

供試材には板厚1 mmのA5052-O材を用いた。単軸引張試験にはJIS5号引張試験片、二軸引張試験には十字形試験片を用いた。引張速度は単軸引張試験では5.0 mm/min、二軸引張試験では最大主応力方向が2.0 mm/minとなるように試験を行った。単軸引張試験は圧延方向0°、45°、90°の3方向で行い、二軸引張試験は圧延方向の応力 σ_x と圧延直角方向の応力 σ_y の比が2:1、1:1、2:1となる3条件で行った。

2.2 試験結果と等塑性仕事面

単軸引張試験によって求めた機械的特性値とr値を表1に示す。3方向のr値はいずれも1以下であったが、大きな面内異方性はなく近い値となった。二軸引張試験の結果から圧延方向0°の単軸引張試験結果を基準として、相当塑性ひずみで0.06までの等塑性仕事面を作成した。図1に等塑性仕事面およびYld2000-2d降伏曲線を示す。A5052-Oの等塑性仕事面には若干の異方硬化が認められ、塑性ひずみが大きくなるにつれてトレスカ型に近づく事が分かった。また、単軸および二軸引張試験で求めた σ_0 、 σ_{45} 、 σ_{90} 、 σ_b 、 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 、 r_b の実験値から、

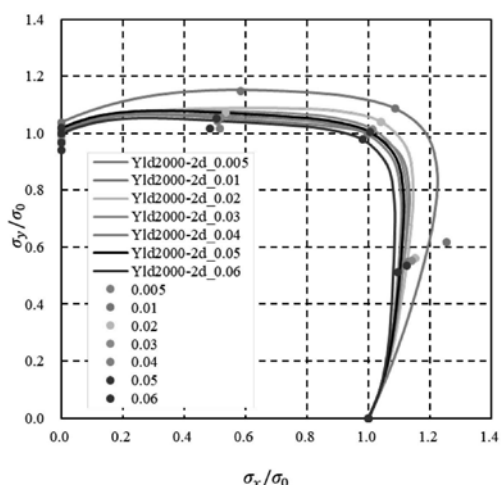


図1 圧延方向の単軸引張の降伏応力で正規化した等塑性仕事面と同定した降伏曲線

Yld2000-2d降伏関数のパラメータを同定した。Yld2000-2dの次数Mを変えて同定を行い、二軸引張試験における1:2, 2:1の応力比での実験点を通るようにMの値を決定した。Mの値は8～10で推移し、塑性ひずみが大きいほうがMは大きくなることが分かった。

表1 機械特性値およびr値(0.1≦ε⁰≦0.2)

降伏点 /MPa	引張強さ /MPa	伸び /%	r ₀	r ₄₅	r ₉₀
100	202	25	0.835	0.746	0.888

表2 せん断試験条件

せん断方向	0°, 45°, 90°
回転角	3.5°
回転速度	1°/min

3. せん断試験

3.1 せん断試験条件

せん断試験としてはツイnbrリッジせん断試験[6]を実施した。図2に示す形状の試験片をワイヤーカットで作製し、圧延方向に対し0, 45, 90°方向でせん断試験を実施した。引張ねじり試験機を使用して試験片中央部を押さえながらねじり、2箇所ブリッジ部にせん断変形を付与した。せん断応力はねじりトルクから、せん断ひずみは試験片に予めランダムパターンを塗布し、CCDカメラにより撮影された変形画像からデジタル画像相関法(GomCorrelate)を用いて測定した。また、ひずみはブリッジ部2箇所の平均値を用いた。図3に試験の外観図を示す。また試験条件を表2に示す。

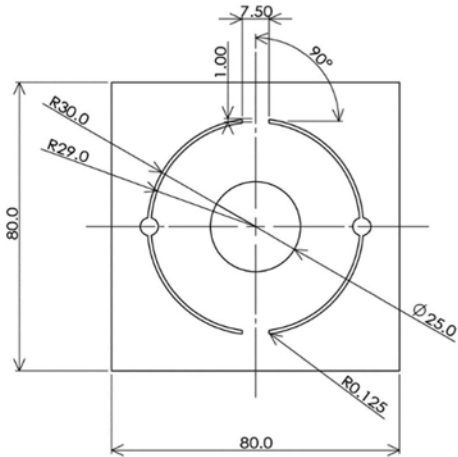


図2 ツインブリッジせん断試験片

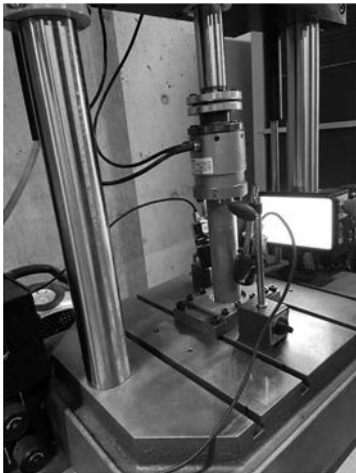


図3 ツインブリッジせん断試験外観図

3.2 せん断試験結果

測定したせん断応力—せん断ひずみ曲線を図4に示す。応力の大きさは、せん断方向への依存性が低く、A5052-Oは面内の異方性が小さいことが示唆される。これは、r値の面内異方性が小さいことと一致している。またこの応力—ひずみ曲線から等塑性仕事点を求めた。図5(a)に相当塑性ひずみ0.06でのせん断の実験点を引張の等塑性仕事点に重ねて示す。このとき、せん断の等塑性仕事点は、せん断方向45°の等塑性仕事点を座標変換して、σ_x-σ_y平面に描画している。また、これらの等塑性仕事点に最もよく一致するYld2000-2d降伏曲線のパラメータを求めたところ、M=11.5で

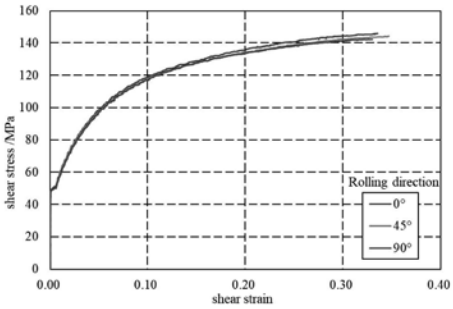


図4 せん断応力—せん断ひずみ線図

同定した降伏曲線が最も一致することが分かった。同定に使用した実験値を表3に、同定したYld2000-2dのパラメータを表4に示す。0, 90°方向のせん断試験結果についても等塑性仕事点を求め σ_{xy} - σ_b 平面に描画した(図5(b))。せん断の実験点は0, 90°方向とも、 σ_x - σ_y 平面の実験結果から同定したYld2000-2d降伏関数の値よりも大きい事が分かった。これは、Yld2000-2d降伏関数は単軸引張、二軸引張、せん断試験の実験結果を同時に満たすことができず、表現能力が不足していることを示している。なお、比較で用いた鋼板(SPFC440)では0, 90°方向のせん断試験結果が σ_{xy} - σ_b 平面において一致しており、せん断試験の結果もYld2000-2d降伏関数で表せることが分かった。アルミニウム合金板の方が鋼板よりも高い表現能力が必要と考えられる。

表3 同定に使用した正規化された流動応力とr値

相当塑性ひずみ	σ_{45}	σ_{90}	σ_b	r_0	r_{45}	r_{90}	r_b
0.06	0.940	1.001	0.980	0.84	0.75	0.89	1.858

表4 相当塑性ひずみ0.06のときのA5052-OのYld2000-2d降伏関数のパラメータ

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	M
0.9758	1.011	1.103	1.025	0.995	0.9473	1.041	1.149	11.5

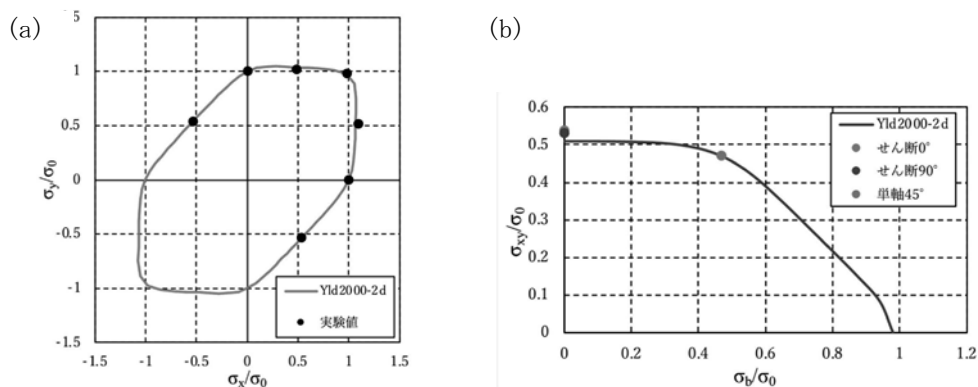


図5 塑性仕事面と同定した降伏関数 (a) σ_x - σ_y 平面 (b) σ_{xy} - σ_b 平面

4. 深絞り成形の成形実験および数値解析

4.1 成形実験条件

A5052-O 材を直径64 mmの円板に打ち抜き、表5に示した金型を用いて、円筒深絞り成形を行った。成形条件を表6に示す。成形変位は35 mmとしたが、おおよそ30 mm付近で絞り抜けた。しわ抑え力には、ばね荷重を用い、成形開始時には1.9 kN、35mm時で4.4 kNの荷重を負荷した。成形後、成形品のカップ縁の高さを圧延方向0, 45, 90°方向で計測した。

表5 円筒深絞り成形金型の寸法

パンチ外径	φ 33 mm
パンチ肩 R	10 mm
ダイ内径	φ 37.1 mm
ダイ肩 R	5 mm
しわ押さえ内径	φ 34 mm

表6 円筒深絞り成形条件

ブランク直径	φ 64 mm
パンチストローク	35 mm
成形速度	6mm/min
しわ抑え荷重	開始 1.9 kN→終了 4.4 kN
潤滑	プレス油(サンプレス S-605)

4.2 深絞り解析条件

実験で同定した降伏関数の精度検証のため、深絞り成形解析を実施した。解析には、JSTAMP/NVを用いた。金型は表5に示した実験と同一の工具寸法でモデル化し、剛体とした。成形解析時のしわ抑え力は実験と同一条件とし、摩擦係数は0.12とした。A5052-O 板のブランクは $\phi 64$ mmでモデル化し、完全積分シェル要素を使用した。また材料モデルは、Swift則($\sigma=k(\epsilon_0+\epsilon_p)^n$)を硬化則として用い、Swiftのパラメータは、表7の値を使用した。降伏関数にはYld2000-2d降伏関数を用いた。異なる実験結果を優先して同定した3種類のYld2000-2dのパラメータを用意し、それぞれの値を用いて解析を行った。その同定方法は、①せん断試験の0, 90°を優先(M=7)、②せん断試験の45°を優先(M=11.5)、③二軸引張試験の平面ひずみ応力の結果を優先(M=10)するようにMの値を変更して同定した。成形解析後、成形品のカップ縁の高さを測定し、実験結果と比較した。

表7 Swiftのパラメータ

$k[\text{MPa}]$	ϵ_0	n
376.4	0.002	0.318

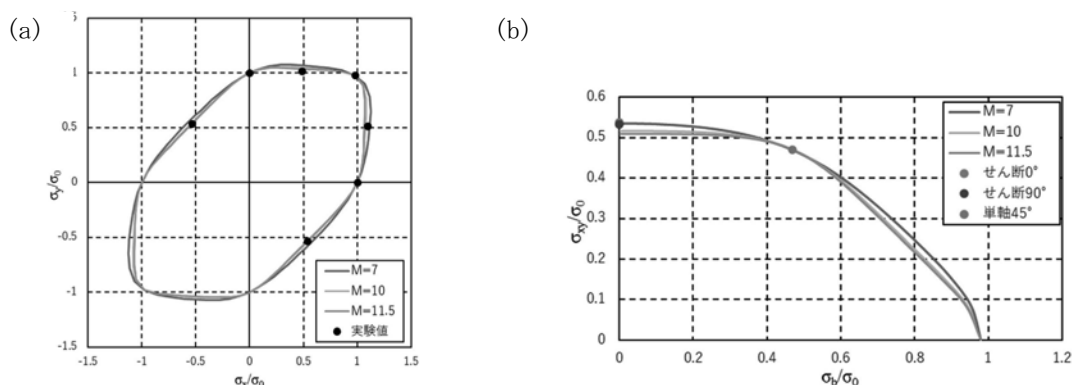


図6 成形解析に用いた降伏関数 (a) σ_x - σ_y 平面 (b) σ_{xy} - σ_b 平面

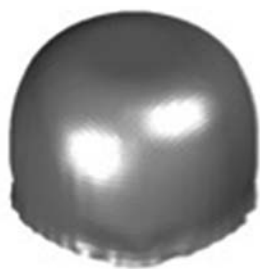


図7 円筒深絞り成形解析の成形品

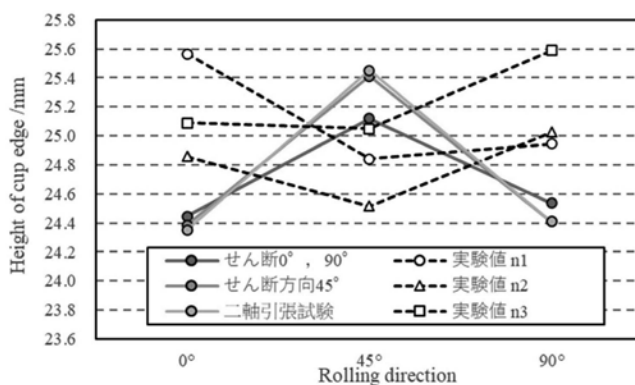


図8 円筒深絞り成形解析と実験のカップ縁高さの比較

4.3 深絞り成形実験結果と数値解析結果

円筒深絞り成形解析による成形品の様子を図7に示す。周辺部に微小なしわが発生したが、いずれのYld2000-2dのパラメータでも問題なく成形解析が実施できた。図8に円筒深絞り成形解析と実験のカップ縁高さを示す。破線で示した実験結果は、ばらつきがあるものの0, 90°方向のカップ縁高さが高く、45°方向では低くなった。一方、解析によるカップ縁高さはいずれも45°方向が最も

高く、実験結果と逆の結果になった。②せん断試験の45°を優先、③二軸引張試験の平面ひずみ応力の結果を優先したパラメータの解析結果は互いに近い結果となったが、これは図6(a)に示したように、せん断試験の45°を優先しても、二軸引張試験の平面ひずみ応力の実験点をほぼ通るためと考えられる。一方、①せん断試験の0, 90°を優先したときは、45°方向のカップ縁高さが②、③と比較して低くなり、実験結果に比較的近い値となった。解析結果のカップ縁の高さはいずれも実験結果と傾向が異なったが、0, 90°方向のせん断試験結果を優先して同定したYld2000-2dのパラメータでの解析の誤差が最小となった。しかし誤差は大きいので、より表現能力の高い降伏関数を用いて検証する必要があると考えられ、今後検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、A5052-O板の単軸引張、二軸引張り試験を実施して等塑性仕事面を求め、ツインブリッジせん断試験によって求めた応力点と比較した。また、円筒深絞り成形試験を行い、同定したYld2000-2d降伏関数を用いて成形解析を行い、以下のことを明らかにした。

- (1) 単軸引張試験、二軸引張試験によって同定したYld2000-2d降伏関数は、せん断試験の45°方向の結果と一致し、 σ_x - σ_y 平面において正確に降伏挙動を表現できている。
- (2) 単軸引張試験、二軸引張試験によって同定したYld2000-2d降伏関数は、せん断試験の0°、90°方向の結果とずれがあることが分かった。Yld2000-2dは、 σ_x - σ_y - σ_{xy} 空間の全ての実験結果を合わせることができず、表現能力が足りない可能性がある。
- (3) 深絞り成形のカップ縁高さを実験と解析で比較したところ、せん断試験の0, 90°を優先して同定したYld2000-2dの解析結果の誤差が一番小さかったが、どの同定方法も圧延方向に対する変化の挙動が一致しなかった。より表現能力の高い降伏関数で検討する必要がある。

参考文献

- [1] Barlat, F., Brem, J.C., Yoon, J.W., Chung, K., Dick, R.E., Lege, D.J., Pourboghrat, F., Choi, S.H., Chu, E.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets. Part 1: theory., Int J Plasticity 2003, 19, 1297-1319.
- [2] Kuwabara, T.: Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations., Int. J. Plast. 2007, 23, 385-419.
- [3] Merklein, M., Biasutti, M.: Development of a biaxial tensile machine for characterization of sheet metals., J. Mater. Process. Technol. 2013, 213, 939-946.
- [4] Pierron, F., Grédiac, M.: Towards Material Testing 2.0. A review of test design for identification of constitutive parameters from full-field measurements., Strain. 2021; 57, e12370.
- [5] Güner, A., Soyarslan, C., Brosius, A., Tekkaya, A.E.: Characterization of anisotropy of sheet metals employing inhomogeneous strain fields for Yld2000-2D yield function., Int. J. Solids Struct. 2012, 49, 3517-3527.
- [6] Brosius, A., Yin, Q., Güner, A., Tekkaya, A.E.: A New Shear Test for Sheet Metal Characterization., Steel Research Int. 2011, 82, 323-328.