

金属薄板の降伏特性とプレス成形性*

(純粹張出し成形の検討)

黒崎 靖^{*1}, 松本正信^{*2}, 小林政教^{*3}

Studies on Anisotropic Yield Characteristics and Press Formability of Metal Sheets

(Investigations into Pure Stretch-forming)

Yasushi KUROSAKI, Masanobu MATSUMOTO, and Masanori KOBAYASHI

Based on Bassani yield criterion, a computer simulation of axi-symmetrical pure stretch-forming is attempted. A method for estimating the coefficient of friction necessary for the calculation is presented by extending Hill's method. The results calculated for four kinds of metal sheets are compared with the experimental data. The strain distribution and the fracture position are found to be sensitive to the shape of the yield locus, that is, anisotropic yielding, and it is concluded that the Bassani criterion is much more useful for the simulation than Hill's old criterion.

Key Words: Forming, Pure Stretch-forming, Computer Simulation, Sheet Metals, Anisotropic Yield Function, Bassani Criterion

1. 緒 論

近年、プレス成形のCAD化への対応として、塑性変形シミュレーションを正確に行うことが求められている。剛体ポンチによる張出し成形の数値解析の研究はかなり以前から数多く行われており、差分法、有限要素法など、解析法自体はほぼ確立された感がある。しかし、入力すべき摩擦係数 μ および採用すべき降伏関数(あるいは構成方程式)に関してなお不明の点が多い。本研究では球頭ポンチによる軸対称純粹張出し成形を対象に、この問題について検討する。

Kaftanogluら⁽¹⁾は、ひずみ分布の計算値が実験値にフィットするように μ を調整する手法を用いたが、採用された μ の値は異常に大きい。ここでも、まずこの点を調べてみる。図1は、グラファイトグリース潤滑のもとで工業用純アルミニウム板(後述)を張出し成形した際に得られる板厚ひずみ ϵ_t の子午線方向分布を示したものである。後述測定法によれば、この場合

の μ は0.018である。図1には、Hillの二次形式の降伏関数(以後、Hillの旧降伏関数と呼ぶ)を用い、膜理論差分法に基づいて算出した理論値が2ステージについて示されている。図1より、理論値を実験値にフィットさせるためにはきわめて大きな μ を要することが看取され、Kaftanogluらの結果と一致している。

また計算によれば、 μ が小さいとき頂点($s=0$ mm)近傍において ϵ_t が最小であり、ここより破断が発生

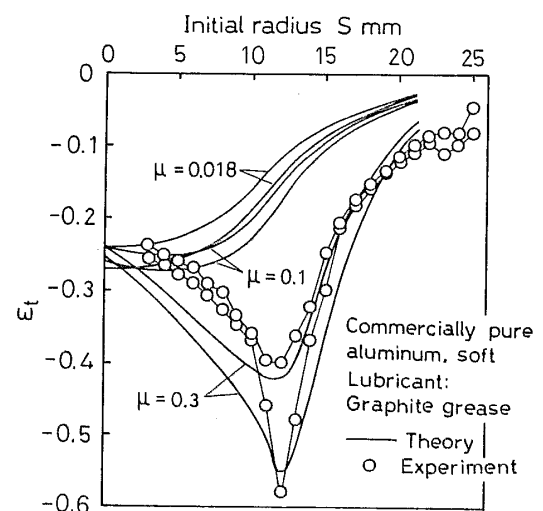


図1 板厚ひずみ分布 ϵ_t の理論値と実験値の比較

* 昭和61年11月22日 第37回塑性加工連合講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月23日。

^{*1} 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

^{*2} 学生員, 三重大学大学院。

^{*3} 正員, 豊田工業高等専門学校 (〒471 豊田市栄生町2-1)。

すると予測される。しかし、実際には図2に見るように、かなり大きな半径位置において破断が生ずる。このような例は低摩擦条件の張出し成形においてしばしば経験されるが、その理由は明らかでない。本報では、これらの問題の原因が採用される降伏関数にあり、適切に異方性を考慮すれば自然な形でシミュレーションが行える可能性を示す。

2. 摩擦係数の測定法

本章では、張出し成形の解析に必要な摩擦係数 μ の見積もり方法を提示する。塑性加工における μ の測定法には数多くの方法が考案されている⁽²⁾。ここでは、できるだけ簡便な方法という観点から、Hillの帯板圧縮試験法⁽³⁾に着目する。Hillの摩擦校正曲線は解析的に求まるものの、等方性材料を対象にするため、面内異方性を有する実際の板に適用した場合、 $\mu < 0$ となる不都合が起こることがある⁽⁴⁾。よって本研究では面内異方性を考慮した校正曲線を採用することにした。この場合、後述の結果から、降伏関数として Bassani 形関数⁽⁵⁾を採用すべきと考えられるが、面内異方性を含む形式はあまりに複雑すぎる。よってここでは、Hillの旧降伏関数より近似度が高いとされる Hosford の関数⁽⁶⁾を採用し、以下のようにして校正曲線を算定した。

2・1 摩擦校正曲線の算定法 対象とした計算モデルを図3に示す。十分狭い帯板を厚さ方向に圧縮した際に得られる公称伸びひずみ $(1-l_0)/l_0$ と公称板厚ひずみ $(t_0-t)/t_0$ (正值表示) の関係曲線を校正曲線と呼ぶことにする。ここに、 l_0 および l は初期ならびに変形後の長さ、 t_0 および t は初期ならびに変形後の厚さである。次のように仮定する。

- (1) 帯板の幅が十分小さく、 $\sigma_x = 0$ とする。また、帯板内部のせん断応力を無視する。
- (2) 圧縮工具・帯板間の摩擦はクーロン則に従う。
- (3) 釣合い方程式において板幅 W の y 方向変化

を無視する。

(4) 板厚 t は均一とする。

(5) 板の異方性主軸は x, y, z 軸と一致する。

仮定(1)~(4)はHillが採用したものと同一である。基礎式としては以下のものを用いた。

y 方向の釣合い方程式：

$$d\sigma_y/dy = 2\mu\sigma_z/t \dots\dots\dots (1)$$

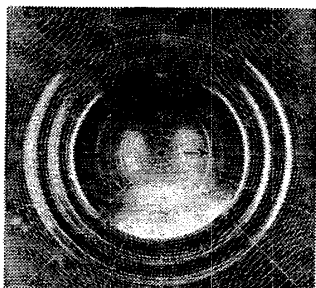
Hosfordの降伏条件式⁽⁶⁾：

$$A_1|\sigma_y|^a + A_2|\sigma_z - \sigma_y|^a + A_3|\sigma_z|^a = \sigma_{eq}^a \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_y, σ_z はそれぞれ y, z 方向の応力、 σ_{eq} は相当応力である。 a, A_1, A_2 および A_3 は材料定数で、 $A_1 = 1/(1+1/r_y), A_2 = 1/(1+r_y), A_3 = 1/r_x(1+1/r_y)$ であり、 r_x, r_y はそれぞれ x, y 方向の r 値である。 $a = 2$ のとき、式(2)はHillの旧降伏関数と一致する。上式以外に、式(2)に基づく応力-ひずみ増分関係式および N 乗硬化形の相当応力-相当ひずみ関係式を用いた。

境界条件は $y=0$ において $\sigma_z < 0$ の単軸圧縮状態とし、差分法を用いて y の正方向へ帯板中心まで順次計算を進めた。帯板の寸法はHillの試験片と相似形とし、初期厚さ t_0 : 初期幅 W_0 : 初期長さ $l_0 = 1 : 2 : 20$ とした ($t_0 = 0.8$ mm)。要素の分割数は200、1ステップあたりの板厚ひずみ増分を -0.005 とした。いろいろの μ に対して、そうして得られた数値解より帯板全体の公称伸びひずみと公称板厚ひずみの関係線図を作成した。

2・2 摩擦試験条件 供試材としては、公称板厚0.8 mmのキルド鋼板(表面あらさ $\mu R_a = 1.75$)、リムド鋼板 ($\mu R_a = 1.83$)、工業用純アルミニウム軟質板 (Al 100, $\mu R_a = 0.35$) および無酸素銅軟質板 ($\mu R_a = 0.47$) の4種類を採用した。これらの単軸引張特性値を表1に示す。使用した潤滑剤は、テフロンシート+グラファイトグリース、グラファイトグリースおよびパラフィン系鉱油3種類(P 01, P 3, St)である。1回の



Commercially pure aluminum, soft. Lubricant: graphite grease. An arrow indicates the fracture position.

図2 球頭ポンチ張出し成形における試験片の外観

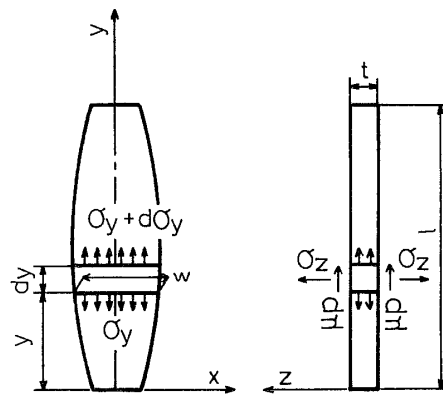


図3 摩擦校正曲線の計算モデル

表 1 供試材の単軸引張試験値および各種材料パラメータ

Materials	Direction	N-value**	r-value*	F MPa**	Tensile strength MPa	Total elongation %	Hosford's index a	Bassani's r	m	parameters n
Killed steel	0°	0.24	1.74	543	305	37.9	8	1.44	1.20	2.90
	45°	0.22	1.33	549	316	34.5				
	90°	0.23	2.10	531	301	37.6				
	Mean	0.23	1.63	543	310	36.1				
Rimmed steel	0°	0.21	1.09	555	294	36.1	8	1.07	1.20	2.90
	45°	0.20	0.76	566	334	34.3				
	90°	0.21	1.65	553	325	38.1				
	Mean	0.21	1.07	560	322	35.7				
Commercially pure aluminum, soft	0°	0.25	0.70	159	88	30.5	8	0.77	1.10	2.80
	45°	0.26	1.00	154	84	37.2				
	90°	0.28	0.82	161	86	39.5				
	Mean	0.26	0.88	157	86	36.1				
OFHC, soft	0°	0.44	0.90	513	221	44.4	6	0.91	1.10	2.80
	45°	0.44	0.98	501	218	47.6				
	90°	0.45	1.00	509	219	48.3				
	Mean	0.44	0.97	506	219	47.0				

* : 15 % elongation, **: $\sigma = F\epsilon^N$

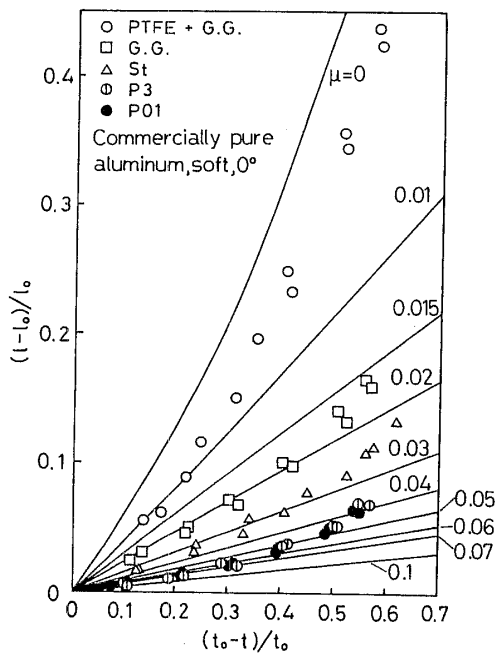


図 4 摩擦試験結果の例

圧縮量を約 80 μm とし、繰返し潤滑をしながら万能試験機(最大容量 491 KN)により約 0.5 mm/min の速度で試験を行った。圧縮板(SKS 3, 焼入れ, $H_{RC}=60$)の表面にはラップ仕上げを施し、 $\mu R_a=0.07$ とした。試験片の寸法は校正曲線の計算に用いたものと同じで、きわめて小さいため、マイクロソーにより圧延方向に対して 0° および 90° の 2 方向より採取した。以後、圧延方向が y 方向に平行の場合 0° 試験片、直交する場合 90° 試験片と呼ぶことにする。

上述材料について校正曲線を算出するためには、定

表 2 グラファイトグリースの摩擦係数

Materials	0°	90°	Mean
Killed steel	0.022	0.017	0.020
Rimmed steel	0.028	0.013	0.021
Commercially pure aluminum, soft	0.022	0.014	0.018
OFHC, soft	0.019	0.017	0.018

数 a を定める必要がある。Hosford は当初 fcc 金属のとき $a=8$, bcc 金属のとき $a=6$ としたが⁽⁶⁾、必ずしも確立したものでないようである。よって、ここでは次のようにして a を定めた。三軸応力表示をした Hosford の降伏関数より、板厚方向の平面ひずみ圧縮降伏応力 σ_p と単純圧縮降伏応力 σ_b との比は次式にて表される。

$$\sigma_p/\sigma_b = (r_x + r_y)^{1/a} \{ r_y(1-A)^a + r_x + r_x r_y A^a \}^{1/a} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $A=1/[1+r_y^{1/(a-1)}]$ である。上式より $a=2, 6, 8$ にたいして σ_p/σ_b を算出し、一方、既報⁽⁷⁾と同様の手法によりその実験値を求め、両者がもっとも近い条件より a を定めた。この結果を表 1 に付記する。相当応力-相当ひずみ関係は y 軸方向の引張試験値を採用した。

2.3 μ の測定結果 摩擦試験結果の一例を図 4 に示す。材料、方向、潤滑剤のいろいろの組合せに対して同様の線図を作り、公称板厚ひずみ 0.3 において μ を定めた。張出し試験に用いるグラファイトグリース

の場合の μ を表 2 に示す。 μ の値に若干方向差が見られるが、材料差は少ないようである。

3. 純粋張出しの解析

3.1 基礎式および解法 純粋張出し成形の従来の解析では、ほとんどの場合、Hill の旧降伏関数に基づく流れ法則もしくはその一般化構成方程式の形で異方性が考慮されている。本研究では、異方性降伏特性に主眼を置いたこと、各種降伏特性を表現できる一般性を持つこと、くびれ開始以前では応力比が急変しないと考えられること、などの理由から、Bassani の降伏関数⁽⁵⁾およびそれに基づく等方硬化形構成方程式を採用することにした。この関数は、2 軸応力下での降伏応力の予測や穴広げ成形の変形シミュレーションに有効であることが報告されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

球頭ポンチによる軸対称純粋張出しの解析モデルを図 5 に示す。以下では、平面応力および面内等方性を仮定し、膜理論差分法に基づいて解析を行う。使用した基礎式を以下に列挙する。

Bassani の降伏関数⁽⁵⁾：

$$S_1^n + \alpha S_2^n = 1 + \alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $S_1 = (\sigma_\theta + \sigma_\phi) / \sigma_{eq}$ 、 $S_2 = (\sigma_\theta - \sigma_\phi) / \sigma_{eq}$ である。

応力-ひずみ増分関係式：

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_\theta}{S_1^{n-1} - (1+2r)S_2^{n-1}} &= \frac{d\varepsilon_\phi}{S_1^{n-1} + (1+2r)S_2^{n-1}} \\ &= \frac{d\varepsilon_t}{-2S_1^{n-1}} = \frac{d\varepsilon_{eq}}{1 + \alpha + \alpha(m/n-1)S_2^n} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

釣合い方程式：

$$d(t\sigma_\phi) / d\phi = t(\sigma_\theta - \sigma_\phi) \cot \phi + \mu t(\sigma_\theta + \sigma_\phi) \dots (6)$$

体積一定則：

$$dr_\varepsilon / dS = t_0 S \cos \phi / (r_\varepsilon t) \dots\dots\dots (7)$$

N 乗硬化式：

$$\sigma_{eq} = F \left(\int d\varepsilon_{eq} \right)^N \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 σ_θ 、 σ_ϕ はそれぞれ円周方向および子午線方向の応力、 σ_{eq} は相当応力、 $\alpha = (n/m)(1+2r)$ 、また、 m 、

n 、 r は材料パラメータである。式(4)において、 m 、 n 、 r の組合せを変更することにより、各種タイプの降伏曲面を表現できる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。 $d\varepsilon_\theta$ 、 $d\varepsilon_\phi$ 、 $d\varepsilon_t$ はそれぞれ円周方向、子午線方向および板厚方向のひずみの増分、 $d\varepsilon_{eq}$ は相当ひずみ増分、 S 、 r_ε は初期および変形後の半径位置、 t_0 、 t は初期および変形後の板厚、 ϕ は材料要素に対する法線が対称軸となす角度である。解法は、ひずみ増分より応力成分を定める手続きを数値的に処理した以外は従来法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に順じた。境界条件は、頂点において等二軸応力状態 ($\sigma_\theta = \sigma_\phi$)、クランプ位置において平面ひずみ状態 ($d\varepsilon_\theta = 0$) とした。頂点における板厚ひずみ増分は -0.01 もしくは -0.02 、要素の分割数は 425 とした。使用した計算機は、名古屋大学大型計算機センタの FACOM M-382 である。

3.2 純粋張出し試験条件 前述 4 種類の金属薄板を対象として、自家製の板材成形試験機により張出し試験を行った。工具には、直径 40 mm の球頭ポンチ、穴径 42.5 mm、肩半径 5 mm のダイスおよび完全クランプ工具⁽¹⁰⁾を用い、クランプ力は 76 kN、ポンチ速度は 0.2 mm/s とし、ポンチ面にはグラファイトグリースを塗布した。素板は一辺 88 mm の正方形板とし、その表面にはエッチングにより 1 mm 間隔の同心円および 22.5 間隔の放射線を刻印した。

3.3 計算結果および考察 計算は前述 4 種類の金属薄板、グラファイトグリース潤滑を対象に行った。 μ は表 2 に示す平均値を、また N 、 F は表 1 の板面内平均値を、それぞれ用いた。 Bassani の材料パラメータ m 、 n 、 r としては、穴広げ試験により定められた値⁽⁶⁾を引用した。これらの値を表 1 に付記する。

アルミニウム板に対して、いろいろな変形段階 J において得られた板厚ひずみ ε_t の分布の理論値を図 6 に示す。また、いろいろなポンチ行程 h において得られたその実験値(板面内平均値)を図 7 に示す。図 6、7 より、本計算は実験におけるひずみ集中のようすをうまくシミュレートしており、図 1 に示した μ による調整を要しないことがわかる。 ε_t および円周方向ひずみ ε_θ の分布の理論値と実験値を比較した例を図 8 (a) および図 8 (b) に示す。図 8 には、Hill の旧降伏関数 ($m=n=2$) による理論値も示されている。ひずみ分布のシミュレーションは完全とはいえないものの、Bassani の関数による理論値のほうが Hill の関数のものに比べて顕著に改善されている(特に ε_t において)。他の材料においても同様の結果が得られた。アルミニウム板の成形のようすを三次元グラフィックスにて図 9 に示す。

変形が十分進行した段階において、 ε_t が最小となる

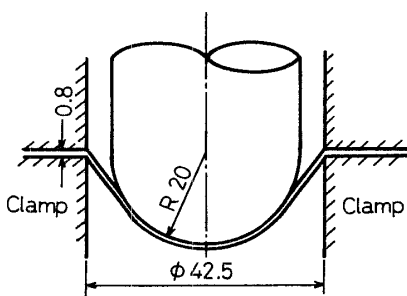


図 5 純粋張出しの計算モデル

表 3 破断半径位置 R_{cr} の理論値と実験値の比較

Unit : mm

Materials	Theory		Experiment
	Hill	Bassani	
Killed steel	2	11	13.0
Rimmed steel	1	10	11.9
Commercially pure aluminum, soft	1	12	11.8
OFHC, soft	1	15	13.8

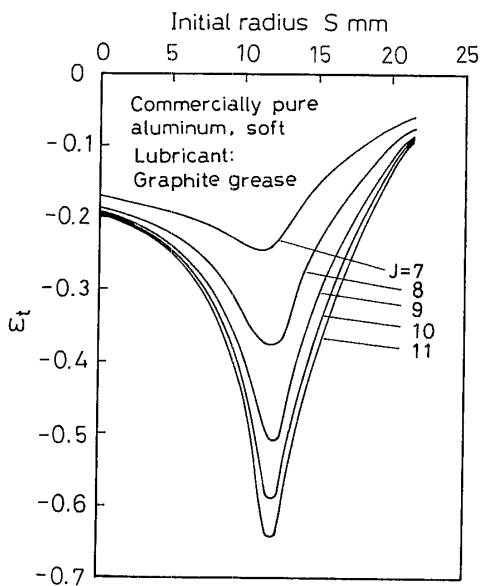


図 6 板厚ひずみ分布 ϵ_t の理論値

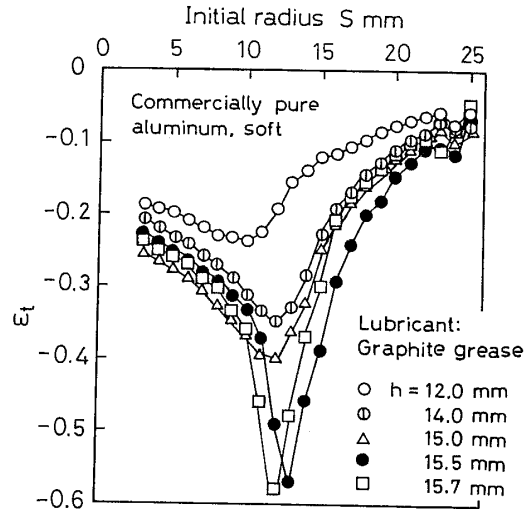
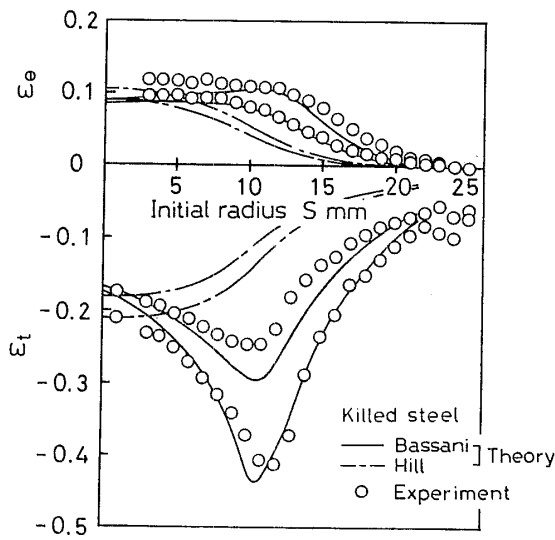
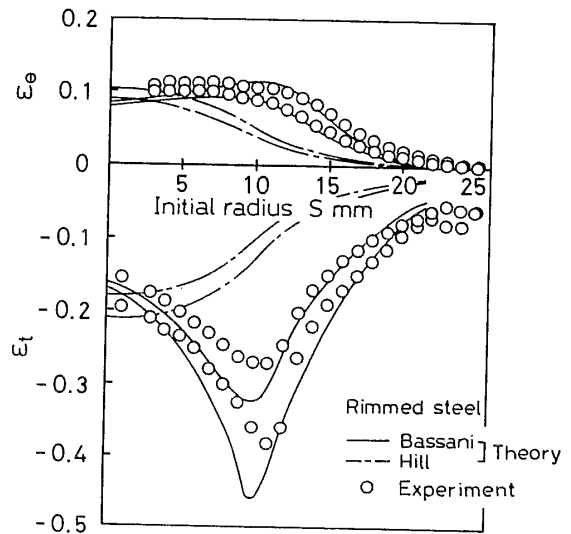


図 7 板厚ひずみ分布 ϵ_t の実験値



(a)



(b)

図 8 ひずみ分布の理論値と実験値の比較

初期半径位置を破断半径 R_{cr} の理論値とみなし、実験値と比較した結果を表 3 に示す。ここでも、Bassani の関数のほうが Hill の関数よりも現実的な値を予測することが知れる。

アルミニウム板について、Bassani と Hill の降伏曲面を σ_θ - σ_ψ 平面の第 1 象限に描いた結果を図 10 に示す。また、Hosford の関数に基づく板面内主応力場に対する降伏曲面を σ_1 - σ_2 関数として図中に付記する(面内異方性を考慮、 σ_1 は圧延方向の応力)。図 10 に記す点 A および B は、Bassani の関数における等二軸引張応力点ならびに平面ひずみ応力点を表す。また、対応する Hill および Hosford の関数の応力点をそれぞれ C, D および E, F にて記す。図 10 より、 $\sigma_{\phi A} > \sigma_{\phi C}$ で Bassani の関数はいわゆる Anomaly⁽¹¹⁾ を表現して

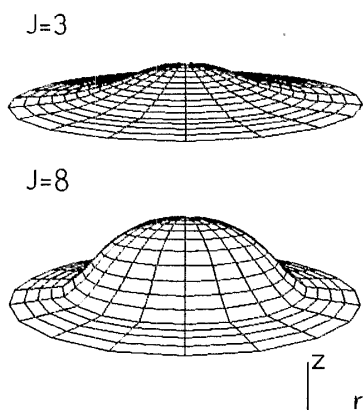


図9 張出し成形の三次元グラフィックス

いること、および $\sigma_{\phi B}/\sigma_{\phi A} < \sigma_{\phi D}/\sigma_{\phi C}$ であり、Bassani の降伏曲面は Tresca 形により近いことが知れる。ここに、添字 A~D はそれぞれの応力点を表す。これらの降伏曲面の特徴は、程度の差はあれ、他の材料においても同様に認められた。 σ_{ϕ} が相対的に小さいことは応力経路の変化による材料強化が少なく、ひずみ集中が生じやすいことを意味する。これが、図6および図8に見たように、Bassani の関数において ϵ_t の集中がより大きく現れる理由と考えられる。一方、Hosford の曲面に関しては、これによっても Anomaly を表現できること、および等二軸引張り応力点(E点)近辺の曲面は Hill よりも Bassani の曲面に近いことがわかる。よって、この結果および二軸引張応力場と板厚方向の圧縮応力場の降伏に対する等価性⁽⁷⁾を考慮すれば、本提案の摩擦試験では単純圧縮に近い条件、すなわち低摩擦条件になるほど Hill の関数よりも Hosford の関数のほうが有用になると推論できる。

以上の結果より、張出し成形におけるひずみ分布は降伏曲面の形状に敏感なこと、実際の板は多少とも Anomaly を有し、かつ平面ひずみ応力が小さい降伏特性を持つこと、およびこれらの異方降伏特性を表現できるゆえ Bassani の関数が張出し成形のシミュレーションに有効なことが結論される。

4. 結 言

Bassani の降伏関数に基づき純粋張出し成形の解析を行い、変形シミュレーション精度を調べた。また、解析に必要な摩擦係数の見積もり方法として、面内異方性を考慮した帯板の圧縮摩擦試験法を提示した。この

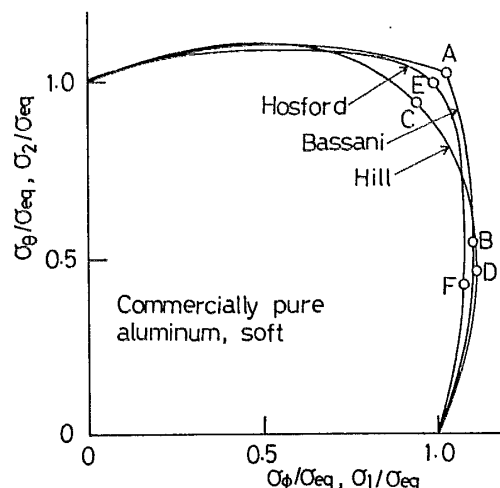


図10 アルミニウム板の降伏曲面

結果、Bassani の関数を用いれば、従来の Hill の旧降伏関数を用いた場合に比べて、ひずみ分布および破断位置の予測精度が顕著に向上し、摩擦係数による無理な調整を要しないことがわかった。この結果は結局、張出し成形におけるひずみ分布は降伏曲面の形状に敏感であり、精度よく変形シミュレーションを行うためには、Anomaly を含む異方性降伏特性を正確に表現できる降伏関数を採用すべきことを示唆するものと言える。Bassani の関数もその一つと思われるが、最適か否かは現段階では確言できない。降伏曲面の形状に関するいっそう詳細な観察と理解が問題解決のかぎになると考える。

文 献

- (1) Kaftanoglu, B. and Alexaneer, J. M., *In. J. Mech. Sci.*, 12-12 (1970), 1065.
- (2) 日本機械学会塑性加工研究会, 塑性と加工, 9-87 (昭43), 252.
- (3) Hill, R., *Philos. Mag.*, 41-319 (1950), 733.
- (4) 黒崎・ほか2名, 昭和59年度塑性加工春講論, (昭59), 469.
- (5) Bassani, J. L., *Int. J. Mech. Sci.*, 19-11 (1977), 651.
- (6) Vial, C. and Hosford, W. F., *Int. J. Mech. Sci.*, 25-12 (1983), 899.
- (7) 黒崎・ほか2名, 機論, 52-473, C(昭61), 380.
- (8) 黒崎・ほか2名, 昭和61年度塑性加工春講論, (昭61), 63.
- (9) Woo, D. M., *J. Mech. Eng. Sci.*, 6-2 (1964), 116.
- (10) 小林・ほか2名, 機論, 45-393, C (昭54), 584.
- (11) Woodthorpe, J. and Pearce, R., *Int. J. Mech. Sci.*, 12-4 (1970), 341.