

金属薄板の2軸引張試験機の開発ならびに 降伏条件式の定式化の研究

東京農工大学 工学部 機械システム工学科

助教授 桑原利彦

(平成8年度研究開発助成 A F - 9 6 0 1 1)

キーワード: 降伏条件式, 2軸引張試験, 十字形試験片, 等塑性仕事面

1. 研究の目的と背景

板材成形シミュレーションの高精度化への要求が高まりつつある。シミュレーションの高精度化のためには、板材の面内2軸応力場での塑性変形特性を高精度に定式化することが必須である¹⁾。従来、2軸応力下での材料試験には円管が多く用いられているが²⁾、圧延薄板材料を対象とした2軸応力試験の研究例は少なく、面内2軸応力場での降伏条件式や塑性流動則の厳密な実験検証と定式化は未開拓の分野である。

薄板材料の2軸応力試験法としては、十字形試験片の2軸引張試験法³⁾や接着積層ブロック材の2軸圧縮試験法⁴⁾が提案されている。後者の長所は、塑性変形挙動が静水圧応力に依存しないことを前提として π 平面全域の降伏曲線が測定できることであるが、その反面、治具と試験片の間の摩擦の影響で、降伏応力の正確な測定は難しいとされている⁵⁾。

本研究では2軸引張試験法を用いる。2軸引張試験法で用いられる十字形試験片は2種類に大別される。一つは、応力測定部の板厚を荷重伝達部(腕部)の板厚よりも薄くした試験片^{6)~13)}であるが、板厚が高々1mmの圧延薄板材料からこのような形状の試験片を作り出すことは現実的ではない。一方、薄板材料から十字形試験片を切り出してそのまま実験に供する方法としては、腕部に補強板を接着した試験片³⁾や台形形状の腕部を有する試験片¹⁴⁾が考案されているが、応力を正確に同定するための有効断面積の評価に困難を伴う。

筆者らはこれまでの研究で、腕部にスリットを有する十字形試験片を用いた2軸引張試験法を考案し、アルミニウム合金板 A5182-O¹⁵⁾や冷間圧延鋼板¹⁶⁾について、2軸引張応力場における等塑性仕事面の測定に成功した。さらに冷間圧延鋼板については、等塑性仕事面が等方的に膨張しない、いわゆる異方硬化¹⁷⁾の徴候を見いだした。

本研究では、2軸引張応力を受ける金属薄板の弾塑性変形挙動を、より高ひずみ域まで精密に測定・定式化することを目的として、十字形試験片の形状を改良し、さらに、製作費が安くかつ精度の良い小型の2軸引張試験システムを新たに開発する。そして線形2軸引張負荷経路における各種金属薄板の等塑性仕事面を測定して、その形状を最も精度よく表現できる降伏関数を明らかにす

ることを目的とする。

本報告書では、深絞り用冷間圧延鋼板の研究結果¹⁸⁾について報告する。他の材料として、高張力鋼板¹⁹⁾純チタン板²⁰⁾、6000系アルミニウム合金板²¹⁾についても同様の研究成果を得ているので、詳しくは当該文献を参照されたい。

2. 実験方法

2.1 2軸引張試験システム

設計製作した2軸引張試験機を図1に示す。対向する油圧シリンダには同一の油圧が作用し、各軸の油圧は、制御用コンピュータの指令値に従って、サーボ弁により独立してフィードバック制御される。対向する油圧シリンダの変位はパンタグラフ型の等変位機構³⁾により強制的に等しくされ、試験片の中心位置は常に定位置に保たれる。ロードセルによる荷重の測定値と交叉2軸ひずみゲージによるひずみの測定値(後述)は、1秒毎に同時にデータロガーにより収集され、測定用コンピュータに保存される。

2.2 十字形試験片

供試材は板厚0.8mmの深絞り用冷間圧延鋼板である。その機械的性質を表1に示す。

本研究で用いた十字形試験片の寸法を図2に示す。試験片中心を座標系の原点とし、圧延方向を x 軸に、圧延直角方向を y 軸にとる。腕部には、レーザー加工にて、長さ60mm×幅0.2mmのスリットを7.5mm間隔に入れ、60mm×60mmの中心領域(応力測定部)の変形拘束を極力小さくしている。本試験片では、スリットの長さ l を応力測定部の一辺 L と同じ長さにすることにより(前報¹⁵⁾、¹⁶⁾では $l/L=0.5$)、より大きなひずみ域までひずみが均一に発達するように改良した。本実験における応力の測定誤差は高々3%である¹⁸⁾。

2.3 2軸引張試験の方法

各軸の荷重は線形に増加させた。荷重比は、 F_x (圧延方向): F_y (圧延直角方向)=4:0, 4:1, 4:2, 4:3, 4:4, 3:4, 2:4, 1:4, 0:4の9通りとした。ただし、荷重比4:0と0:4については、JIS13B号試験片を用いた。ひずみ速度は $1.6 \sim 2.6 \times 10^{-4}$ /sである。

各軸方向の垂直ひずみ成分は、交叉2軸ひずみゲージ(共和電業, KFG-2-120-D-16-11)により測定した。ひずみゲージは、原点から15mm離れた x, y 軸上の4ヶ所に

貼付し、各ひずみ成分毎に、それら4ヶ所における測定値の平均値をもってひずみの測定値とした。

各軸方向の垂直応力成分は、荷重の測定値をその瞬間の断面積（面内塑性ひずみの測定値より算定）で除した真応力として求めた。なお、ひずみを試験片の中心軸上で計測しているので $\sigma_{xy} = 0$ とみなした。

2.4 等塑性仕事面の測定方法

まず JIS13B 号試験片を用いて圧延方向の単軸引張試験を行い、対数塑性ひずみ $\epsilon_0^p = 0.0005, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ に対応する真応力 σ_0 を測定した。さら

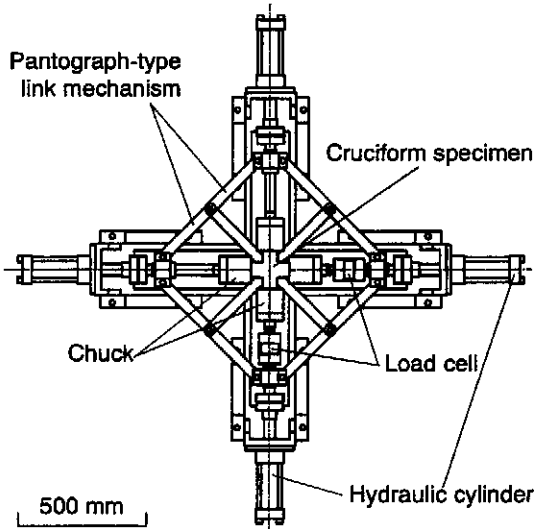


図1 二軸引張試験機

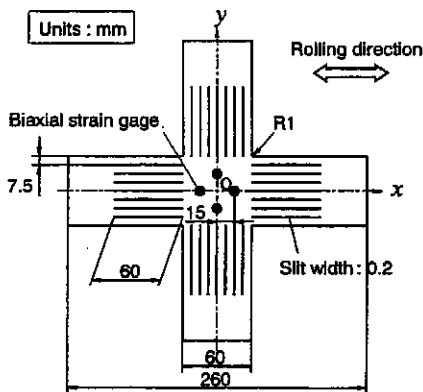


図2 十字形試験片

表1 供試材の機械的性質

Cutting direction	$\sigma_{0.2}$ /MPa	c^* /MPa	n^*	ϵ_0^*	r^{**}
0°	180	522	0.209	0.0041	2.01
22.5°	180	535	0.218	0.0048	1.89
45°	188	525	0.203	0.0044	1.52
67.5°	187	524	0.209	0.0052	2.21
90°	184	491	0.192	0.0040	2.42

* $\epsilon^p = 0.002 \sim 0.05$ の区間において $\sigma = c(\epsilon_0 + \epsilon^p)^n$ で近似

** 塑性ひずみ $\epsilon^p = 0.05$ における測定値

に応力ひずみ曲線より、 ϵ_0^p に達するまでになされた単位体積当たりの塑性仕事 W を算定した。同様にして圧延直角方向の単軸引張試験を行い、各 ϵ_0^p に対応する W と等量の塑性仕事が行なわれた時点での真応力を σ_{90} として定義した。2軸引張試験においては、 W と等量の塑性仕事が行なわれた時点での真応力成分 (σ_x, σ_y) を各荷重比に対して求めた。以下では、等2軸引張における真応力を特に σ_{bi} と記す。

各 ϵ_0^p に対応する塑性仕事 W と各応力値を表2に示す。

表2 $W, \sigma_0, \sigma_{90}, \sigma_{bi}$ の測定値

ϵ_0^p	0.0005	0.002	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040
W /MPa	0.07	0.33	0.89	1.92	4.19	6.68	9.33
σ_0 /MPa	158	180	196	214	239	258	273
σ_{90} /MPa	162	184	199	215	238	256	271
σ_{bi} /MPa	163	184	202	225	260	288	310

3. 実験結果

3.1 等塑性仕事面の測定結果

(σ_x, σ_y) の測定結果を Fig.3 に示す。ひとつのプロット点は、3枚の試験片から得られた測定値の平均値を示すが、測定値のばらつきは最大でもプロット点の大きさ程度であった。また同図(b), (c)において、各プロット点に付随する線分は、その応力点に達した瞬間における塑性ひずみ増分ベクトルの方向の測定値を表す。

各 ϵ_0^p に対応する測定値 (σ_x, σ_y) を当該の σ_0 によって無次元化して整理した結果を図3(a)に示す。加工硬化に伴って等塑性仕事面が等方的に膨張するのであれば、すべての測定値は同一曲面上に載るはずであるが、本供試材は、膨張の度合いが方向によって異なる、いわゆる異方硬化¹⁷⁾を呈している。膨張の度合いは等2軸方向から圧延方向にかけて顕著であるが、圧延直角方向では小さい。そして、 $\epsilon_0^p = 0.03$ において等2軸方向に関してほぼ対称形状となる。

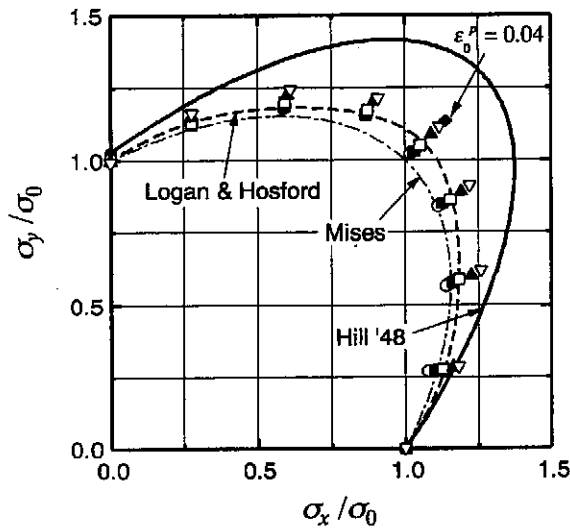
3.2 等塑性仕事面と各種降伏曲面の比較

以下に述べる各種降伏関数の概要とそれらの係数の計算法については文献²²⁾を参照されたい。

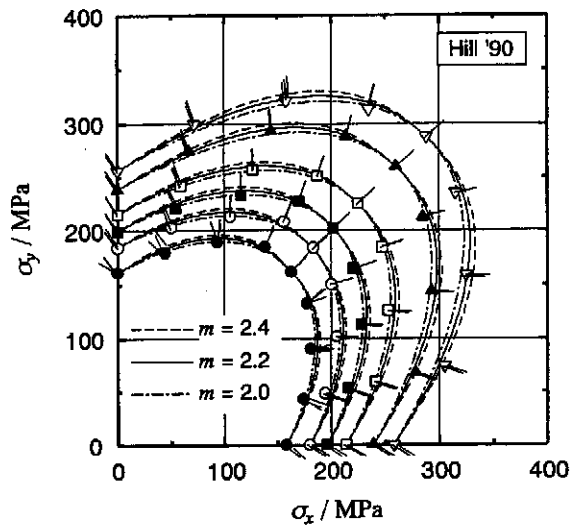
Mises の降伏曲面、Hill の2次降伏曲面²³⁾ならびに Logan・Hosford の降伏曲面²⁴⁾と等塑性仕事面の比較を図3(a)に示す。Hill の2次降伏関数の各係数は、圧延方向より0°, 45°, 90°方向の r 値を用いて決定し、降伏応力として σ_0 を用いた。Logan・Hosford の降伏関数の次数は6 (BCC 金属用の推奨値) とし、平均 r 値を1.97、降伏応力を σ_0 とした。

Hill の2次降伏曲面は全般的に等塑性仕事面の外側に位置しており、特に等2軸引張に近い荷重比ほど測定値との差異が大きい。Logan・Hosford の降伏曲面は、 $\epsilon_0^p = 0.01$ においてのみ、等塑性仕事面とほぼ一致する。

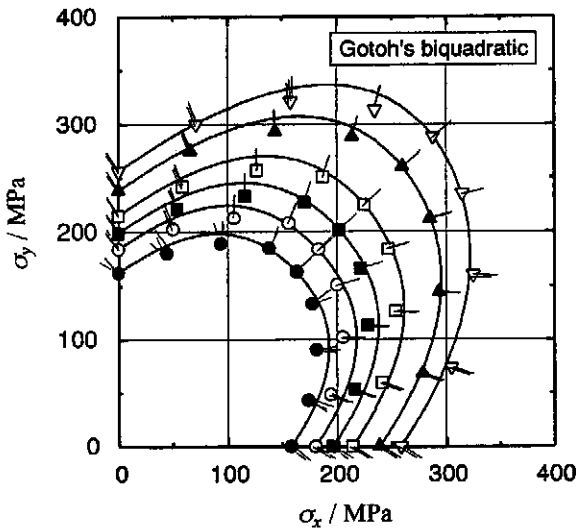
後藤の4次降伏曲面²⁵⁾と等塑性仕事面の比較を図3(b)に示す。後藤の4次降伏曲面は、荷重比2:4の近傍ならびに加工硬化初期 ($\epsilon_0^p \leq 0.01$) の荷重比4:2の近傍にお



(a)



(c)



(b)

ϵ_0^p	● 0.0005	○ 0.002	■ 0.005
	□ 0.010	▲ 0.020	▽ 0.030

図3 等塑性仕事面の測定値と各種降伏曲面との比較：
 (a) Hill の 2 次降伏曲面, Logan・Hosford の降伏曲面, Mises の降伏曲面, (b) 後藤の 4 次降伏曲面,
 (c) Hill の 90 年降伏曲面。

いて、実験値よりも大きくなる傾向があるが、全般的な等塑性仕事面の挙動を良い精度で近似しているといえる。

Hill の 90 年降伏曲面²⁶⁾と等塑性仕事面の比較を図 3(c) に示す。Hill の 90 年降伏関数の各係数は $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_{bl}$ を用いて決定した。降伏関数の次数を $m = 2.0 \sim 2.4$ とすれば、両者の一致の度合いは後藤の 4 次降伏曲面と同程度によい。

3.3 塑性ひずみ増分ベクトルの方向の測定値と各降伏曲面の法線ベクトルの方向の計算値との比較

結果を図 4 に示す。 $\epsilon_0^p = 0.002, 0.020$ どちらの場合も、すべての荷重比において実験値と一致する降伏関数はな

いが、Hill の 2 次降伏関数以外は同程度に実験値に近い。Hill の 2 次降伏関数はそれらに比べて一致の度合いは劣る。

3.4 r 値の面内分布の測定値と計算値の比較

圧延方向からの角度変化に伴う r 値の変化について、各種降伏関数による計算値と測定値の比較を図 5 に示す。後藤の 4 次降伏関数のみが、測定値とよい一致を示す*1。Hill の 90 年降伏関数では r 値の変化はわずかであり、実験値の傾向と大きく異なっている。なお、 r_0, r_{45}, r_{90} を用いて Hill の 90 年降伏関数の各係数を決定すれば、 r 値の分布は測定値とほぼ一致するようになるが、降伏曲面の形状が等塑性仕事面の測定値と合わなくなることを確認している。

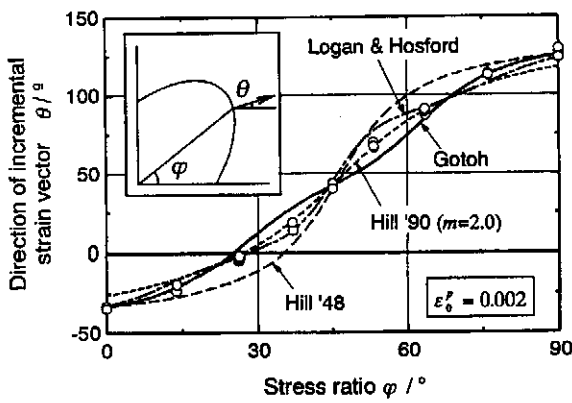
4. 考察

本研究で用いた冷間圧延鋼板の等塑性仕事面は、加工硬化初期においては、Logan・Hosford の降伏曲面と比較的よい一致を示す。Logan・Hosford の降伏曲面は、(111) ペンシルすべりを仮定した結晶塑性解析から導出された降伏曲面である。したがって、上記の結果は、彼らの結晶塑性解析の妥当性を裏付けるものと解釈できる。

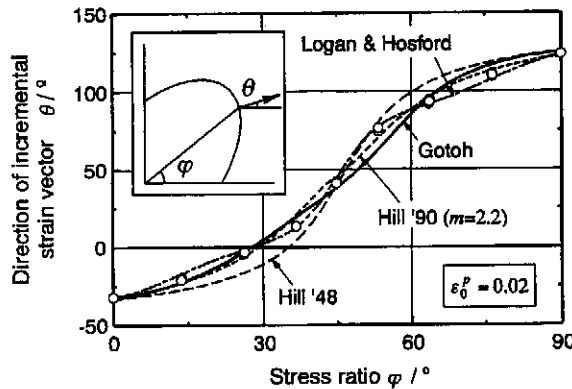
これまでの研究において、穴広げ試験²⁷⁾、バルジ試験²⁸⁾、平面ひずみ引張試験²⁹⁾における鋼板の塑性変形挙動は、Hill の 2 次降伏関数による計算値とよい一致を示すことが報告されている。一方、本報で測定された等塑性仕事面は、Hill の 2 次降伏曲面ほど等 2 軸方向に膨らんだ形状にならず、従来の研究報告とは一見相容れない結果となった。これは、本試験片に付与された塑性ひずみが高々 3% であるのに対し、従来の研究において考察の対象となった塑性ひずみは数%以上と大きく、このような塑性ひずみの大きさの違いが原因と考える。実際、本供試材の

*1 後藤の 4 次降伏関数の係数 $A_6 \sim A_9$ の決定においては、

r_0, r_{45}, r_{90} と $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_{bl}$ に加えて、 $\sigma_{22.5}$ と $r_{22.5}$ を用いた。



(a) $\epsilon_0^p = 0.002$



(b) $\epsilon_0^p = 0.02$

図4 塑性ひずみ増分ベクトルの測定値 (○) と各種降伏曲面の法線ベクトル方向との比較

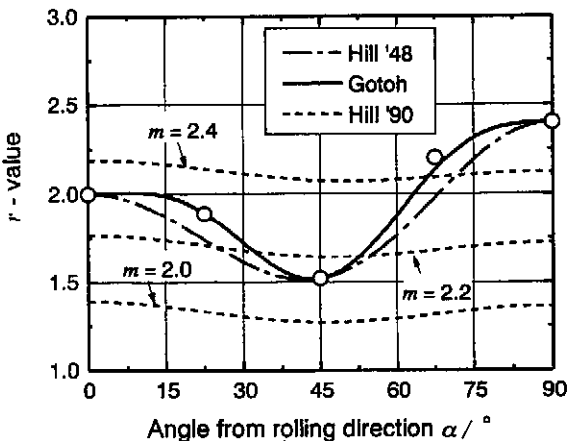


図5 r 値の分布の測定値 (○) と Hill の 2 次降伏関数、後藤の 4 次降伏関数 ($\epsilon_0^p = 0.02$)、Hill の 90 年降伏関数 ($\epsilon_0^p = 0.02$) による計算値との比較。

等塑性仕事面は、加工硬化の進展に伴い等 2 軸方向から圧延方向にかけて膨張する傾向を示しているの、やがては Hill の 2 次降伏曲面に一致する可能性がある。

なお加工硬化初期の等塑性仕事面が Hill の 2 次降伏曲面ほど等 2 軸方向に膨らんだ形状にならないのは、他の

深絞り用冷間圧延鋼板¹⁶⁾や高張力鋼板¹⁷⁾でも確認されている。従って、この現象は本供試材特有のものではなく、冷間圧延鋼板の一般的特性である可能性が高い³⁰⁾。

後藤の 4 次降伏関数および Hill の 90 年降伏関数は、本供試材の異方硬化挙動を比較的よい精度で近似できることがわかった。さらに、測定された塑性ひずみ増分ベクトルの方向は、それら降伏曲面の法線ベクトルの方向ともよい一致を示した。これらのことより、少なくとも線形負荷経路のもとでは、両降伏関数は塑性ポテンシャルとほぼ一致するとみなしてよい。一方、 r 値の面内分布については、後藤の 4 次降伏関数だけが精度よく予測できている。従って、本供試材に適した降伏関数としては、後藤の 4 次降伏関数が推奨される。

5. 結論

新たに設計製作した 2 軸引張試験装置を用いて、線形 2 軸引張負荷経路における深絞り用冷間圧延鋼板の等塑性仕事面を詳細に測定した。さらに各種降伏関数に基づいて定式化を行った。その結果、以下の知見を得た。

1) 等塑性仕事面は等方的には膨張せず、加工硬化とともに膨張の度合いが方向によって異なる、いわゆる異方硬化を呈した。膨張の度合いは、等 2 軸方向から圧延方向にかけて顕著であるが、圧延直角方向ではわずかであった。

2) 等塑性仕事面は、少なくとも線形負荷経路のもとでは、塑性ポテンシャルと一致するとみなせる。

3) 後藤の 4 次降伏関数を用いることにより、上記の異方硬化挙動と r 値の分布の両方を精度よく近似できた。

4) Hill の 2 次降伏曲面は全般的に等塑性仕事面の外側に位置し、特に等 2 軸引張に近い荷重比ほど測定値との差異が大きい。この結果は、「Hill の 2 次降伏関数は鋼板の変形解析に適している」とする従来の研究報告と食い違う。この原因は、本試験片に付与された塑性ひずみが高々 3% であり、従来の研究において考察の対象となった塑性ひずみ (数%以上) に比較して小さいためと考える。この現象は本供試材特有のものではなく、冷間圧延鋼板の一般的特性である可能性が高い。

十字形試験片を御提供下された新日本製鐵株式会社に厚く御礼申し上げます。2 軸引張試験法についてご教示頂いた東京工業大学精密工学研究所池上皓三教授、結晶塑性論の立場から貴重なご議論を賜った足利工業大学黒田充紀助教授に深甚なる謝意を表します。また実験に御協力頂いた黒田健介君に感謝致します。本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の御支援による。記して謝意を表する。

参考文献

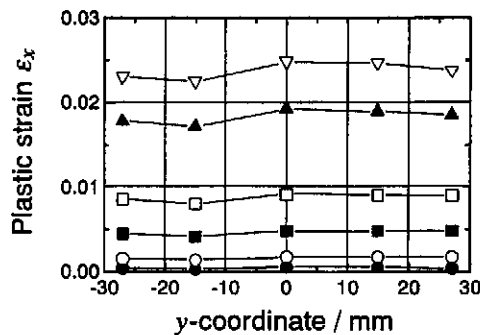
- 1) Ikegami, K.: Proc. Euromech Colloquium 115, Colloques Inter. du CNRS, Paris, (1982), 201.
- 2) Hecker, S.S.: Metal. Trans., 2(1971), 2077.
- 3) 白鳥英亮・池上皓三: 材料, 16-165(1967), 433.
- 4) 戸澤康壽・中村雅勇: 塑性と加工, 13-138(1972), 538.

5)Kocks, U. F., Tomé, C.N. and Wenk H.-R.: Texture and Anisotropy, 1998, 423, Cambridge.
 6)Pascoc, K.J. and de Villiers, J.W.R.: J. Strain Anal., 2-2(1967), 117.
 7)Hayhurst, D.R.: J. Strain Anal., 8-2(1973), 119.
 8)Kelly, D.A.: J. Strain Anal., 11-1(1976), 1.
 9)Makinde, A. Thibodeau, L. and Neale, K.W.: Exp. Mech., 32-2(1992), 138.
 10)Hjelm, H. E.: Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., 116-2 (1994), 148.
 11)Demmerle, S. and Boehler, J.P.: J. Mech. Phys. Solids, 41-1(1993), 143.
 12)Boehler, J.P., Demmerle, S. and Koss, S.: Exp. Mech., 34-1(1994), 1.
 13)Lin, S.B. and Ding, J.L.: Int. J. Plasticity, 11-5(1995), 583.
 14)Kreißig, R. and Schindler, J.: Acta Mechanica, 65-1/4(1986), 169.
 15)桑原利彦・薄一平・池田聡：塑性と加工, 39-444(1998), 56.
 16)桑原利彦・薄一平・黒田健介・池田聡：平 9 春塑加講論, (1997), 33.
 17)Hill, R., Hecker, S.S. and Stout, M.G.: Int. J. Solids Struct., 31-21(1994), 2999.
 18)桑原利彦・池田聡：塑性と加工, 40-457(1999), 145.
 19)桑原利彦・黒田健介・池田聡：平 10 春塑加講論, (1998), 231.

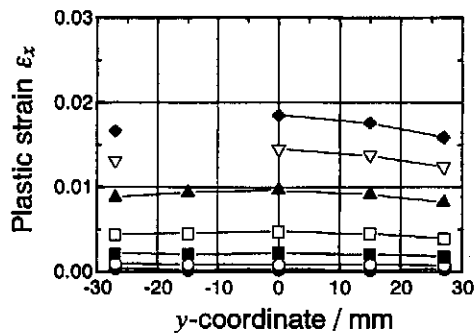
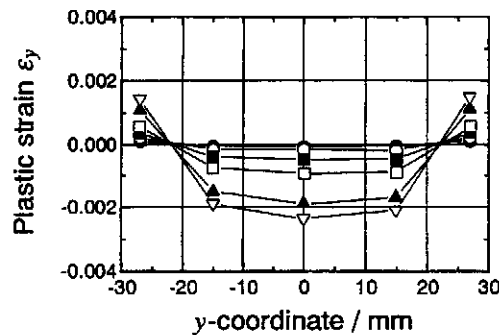
20)桑原利彦・武村厚：平 10 春塑加講論, (1998), 233.
 21)Kuwabara, T. and Van Bael, A.: Proc. NUMISHEET '99, (1999). (To be published)
 22)桑原利彦：軽金属, 48-11(1998), 548.
 23)Hill, R.: Proc. Roy. Soc., A193(1948), 281.
 24)Logan, R.W. and Hosford, W.F.: Int. J. Mech. Sci., 22-7(1980), 419.
 25)後藤學：塑性と加工, 19-208(1978), 377.
 26)Hill, R.: J. Mech. Phys. Solids, 38-3(1990), 405.
 27)Parmar, A. and Mellor, P.B.: Int. J. Mech. Sci., 20-6(1978), 385.
 28)Ranta-Eskola, A.J.: Int. J. Mech. Sci., 21-8(1979), 457.
 29)Wagoner, R.H.: Metall. Trans. A: 12A-5(1981), 877.
 30)桑原利彦：平 11 春塑加講論, (1999), 129.

付 録

応力測定部におけるひずみおよび応力の一様性の検証
 試験片の x 軸もしくは y 軸上に 2 軸ひずみゲージを 5 枚貼付し、応力測定部における主ひずみの発達の様子を測定した。荷重比 $F_x : F_y = 4:2$ および $4:4$ における測定結果を図 A1 に示す。 $-15 \text{ mm} \leq y \leq 15 \text{ mm}$ においてはひずみはほぼ一様に発達している。張力の増加に伴いスリット近傍のひずみ分布はやや均一性を欠くようになるが、 $\epsilon_0^p = 0.03$ においても、平均値 ± 0.002 の範囲に収まっている。



(a) Load ratio 4:2



(b) Load ratio 4:4

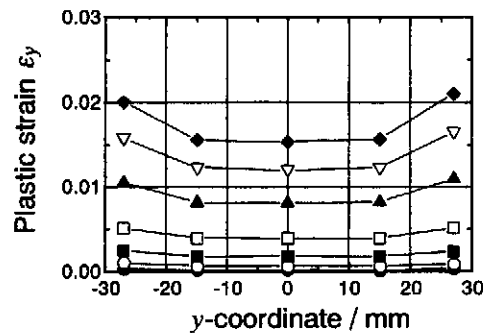


図 A1 y 軸上における垂直ひずみ成分 ϵ_x^p , ϵ_y^p の発達

$\epsilon_0^p = 0.0005$ (●), 0.002 (○), 0.005 (■), 0.01 (□), 0.02 (▲), 0.03 (▽), 0.04 (◆)