



T. Naka

AZ31 合金板の温間非比例負荷 塑性変形挙動に関する研究

中 哲夫*

1. はじめに

マグネシウム合金は実用金属の中でも最も軽く比強度及びリサイクル性など多くの優れた特性を有している¹⁾。今日では携帯電話などの電子機器を中心に需要は着実に増加している。しかしながら、マグネシウム合金は常温では難加工材である。これは結晶構造が稠密六方構造からなるためすべり系が極端に少ないことが原因である²⁾。これまでの研究³⁾により AZ31 板には温間プレス成形が有効である。しかし温間成形に関する研究はその実験の難しさもあり極めて少ない。以上のことより温間プレス成形においては適正な成形温度と速度の条件を決定することが必要である。また、従来行われてきた比例負荷におけるデータを用いた FLD を実プレスで多い非比例負荷経路のシミュレーションに取り入れるのは精度の点で必ずしも実用的とはいえない。

これらのことから著者らは既報⁴⁾⁻¹²⁾にて AZ31 板の比例ひずみ経路および非比例ひずみ経路（等二軸方向、単軸方向および平面ひずみ方向の予ひずみ）の温間張出し試験を種々の成形温度および速度で行い成形限界線図 (FLD) を求めた。この実験から AZ31 板の成形限界ひずみの温度、速度およびひずみ経路依存性が確認された。解析においては既報にて M-K 理論に大矢根の延性破壊条件式を導入した方法で成形限界ひずみの解析的予測を行った。しかし大矢根の延性破壊条件式のパラメータ b において正の値を入力した場合実験結果を良好に表現できないという問題があった。そこで本研究では非比例変形経路での成形限界ひずみの予測を行うために、相当塑性ひずみを用い同条件における比例変形ひずみ経路の実験結果との比較を行った。その結果から種々のひずみ経路ごとの相当塑性ひずみの和が比例変形ひずみ経路のそれと一致したときを破断判定基準とし、実験結果と解析結果を比較し、その妥当性の検討を行った。

2. 材料および実験方法

FLD を求める上で代表的な成形加工の方法として張出し試験がある。張出し成形には平頭パンチ張出し成形(以後 M-K 法)と球頭パンチ張出し成形(以後中島法)がある。M-K 法は摩擦の影響を最小限に抑えることが可能であるという長所を持ち合わせながらも、試験準備が煩雑である。一方で中島法は潤滑剤の影響を受けやすいが、試

験準備は簡便である。

マグネシウム合金の温間張出し試験において試験温度を 150~250℃で行うため M-K 法では青熱脆性のため試験片より先に張出し用鋼板のドライビングシートが割れてしまう。また現在のところ、実際に使用される環境に近い中島法が使われる傾向がある¹³⁾。このような背景から、本研究では中島法を採用し球頭パンチで実験を行った。

2.1 試験材料

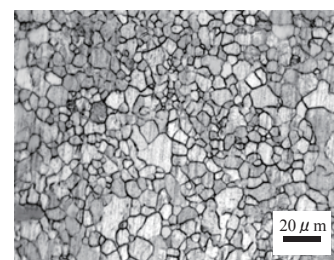
本実験で使用した材料は展伸用 Mg-Al-Zn 系合金で成形性および溶接性に優れ、Al を 3%、Zn を 1%含有する AZ31B-O(ASTM, JIS:MP1)細粒材を試験材料とした。この材料は板厚 1.2×板幅 130 のホットコイルを、圧延温度 350~380℃、平均圧化率 20%/パスの圧延条件で、板厚 0.8mm、平均結晶粒径 7 μ m にしたものであり、一次試験前に 400℃で 30 秒焼鈍した。この材料の化学組成を表 1 に示す。また細粒材のマイクロ組織写真を図 1 に、細粒材の極点図を図 2 に示す¹⁴⁾。この極点図は底面集合組織の集積が分散し、ピークが 2 つに分離したダブルピークと呼ばれる集合組織を示しており、本研究に用いた AZ31 マグネシウム合金板の細粒材は成形しやすい材料であるといえる。

2.2 張出し試験

実際のプレス加工では図 3 に示すように途中で変形経路が変わるケースが多い。本研究ではその中でも、非比例変形ひずみ経路としてまず比例変形における等二軸方向 (120mm×120mm) の成形限界ひずみ量の 1/3、2/3 の 2 種類の一次変形 (予ひずみ) を与えた。その後、ワイヤ

表 1 材料の化学組成 (mass%)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	Pb	Sn	others	Mg
2.9	0.82	0.67	0.0022	0.022	0.0018	0.0008	0.001	0.001	<0.001	0.3	bal

図 1 焼鈍後の材料組織¹⁴⁾

* 弓削商船高等専門学校 商船学科 教授

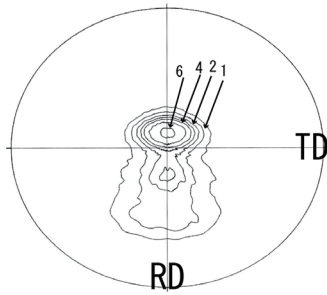


図2 {0001} 板材表面の集合組織¹⁴⁾

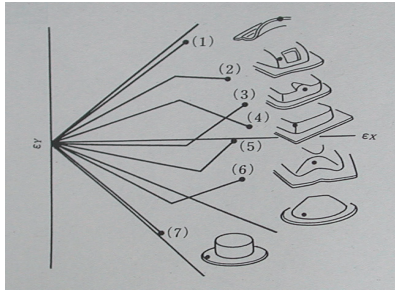
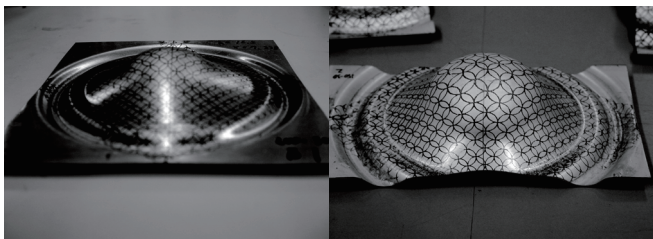
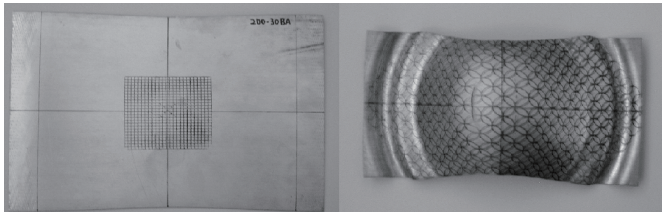


図3 種々の加工経路による限界ひずみ



(a)一次成形後 (b)二次成形後



(a)一次成形後 (b)二次成形後

図4 張出し試験の試験片

一カット放電加工機を用い圧延方向(R. D.)は一定の120mmとし、圧延直角方向(T. D.)を80, 70, 55および30mmに切り出し、破断するまで張出し試験を行った。試験条件として本材料は成形速度依存性が強いため、試験速度はパンチ速度3, 30および300 mm・min⁻¹(ひずみ速度では10⁻³, 10⁻²および10⁻¹s⁻¹)にて、温度は150, 200および250℃の3温度で行った。一次変形と二次変形の温度・ひずみ速度条件は同じである。一次変形後の試験片と二次変形後の試験片を図4(a), (b)にそれぞれ示す。次に一次変形に単軸引張りを行い、その後圧延直角方向の幅を種々に変化させ、破断するまで二次変形(張出し試験)を行った。一次変形の予ひずみの量、一次及び二次のひずみ速度及び試験温度は等二軸と同じである。平面ひずみ方向の試験については解析を行った後に検証のため数点の実験点を選び行った。

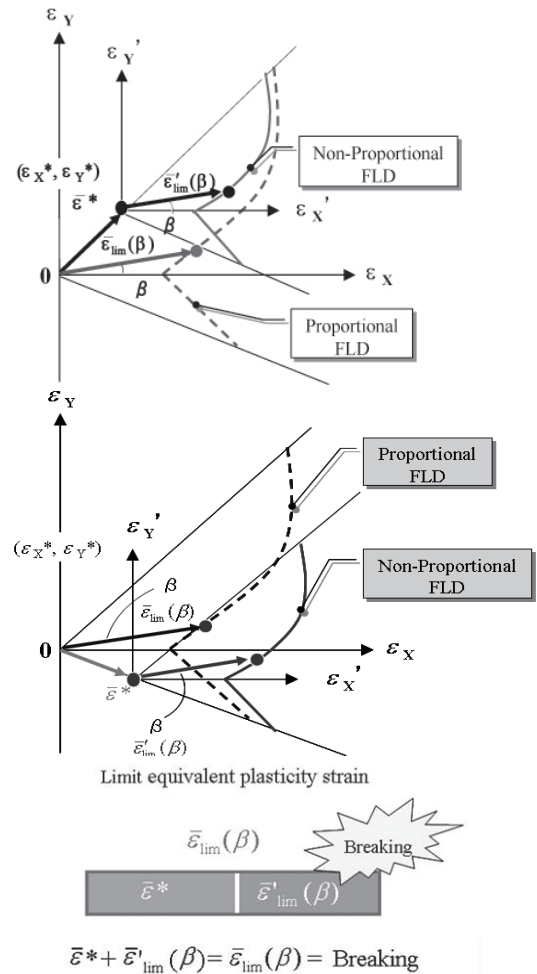


図5 非比例成形限界ひずみの解析に用いた概念図

3. 破断限界の予測

非比例成形限界の予測を行うため実験にて比例ひずみ経路と非比例ひずみ経路における成形限界ひずみを相当塑性ひずみを用いて比較した。そこで破断判定基準として、各ひずみ経路における相当塑性ひずみの和が比例ひずみ経路 FLD における相当塑性ひずみと一致したときを破断とした¹⁵⁾。このとき比較する比例変形ひずみ経路 FLD は、非比例変形の二次変形におけるひずみ比βと同じひずみ比での成形限界ひずみとした。解析の概念図を図5に示す。ここでε̄limは比例変形の成形限界座標より得られた相当塑性ひずみである。ε̄*(一次試験), ε̄'lim(二次試験)は予ひずみ、二次変形のそれぞれの相当塑性ひずみである。つまり破断判定基準は式(1)を満たすときである。

$$\bar{\epsilon}_{lim}(\beta) = \bar{\epsilon}^* + \bar{\epsilon}'_{lim}(\beta) \quad (1)$$

比例ひずみ経路 FLD のひずみ比β=1(等二軸)となる座標から順に比例ひずみ経路 FLD の解析結果より読み込み、β=-0.5(単軸方向)となったとき解析を終了した。

3.1 相当塑性ひずみの算出法

解析において相当塑性ひずみを算出する必要がある。そこでこれまでの二軸引張り試験から降伏条件として式

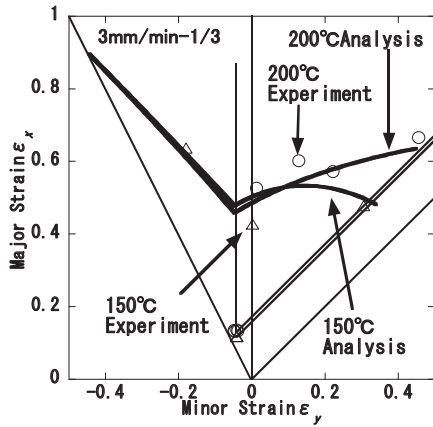


図 6 平面ひずみ方向予ひずみの実験及び解析における限界ひずみ(温度の影響)

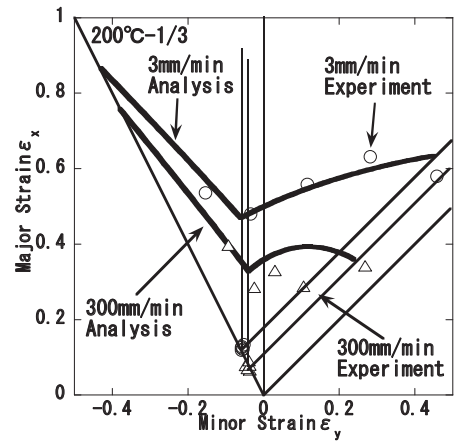


図 9 単軸引張り方向予ひずみの実験及び解析における限界ひずみ(速度の影響)

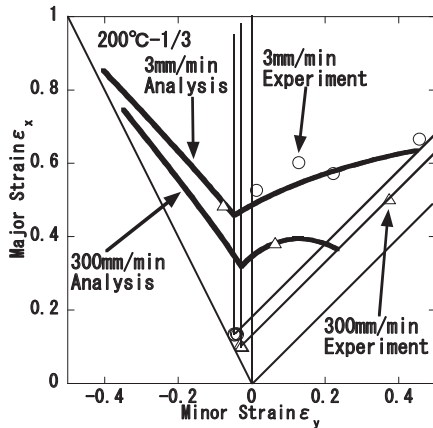


図 7 平面ひずみ方向予ひずみの実験及び解析における限界ひずみ(速度の影響)

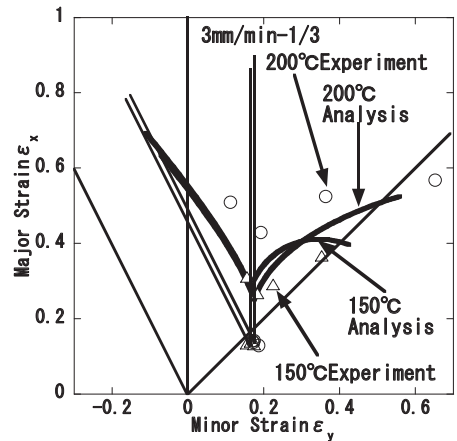


図 10 等二軸方向予ひずみの実験及び解析における限界ひずみ(温度の影響)

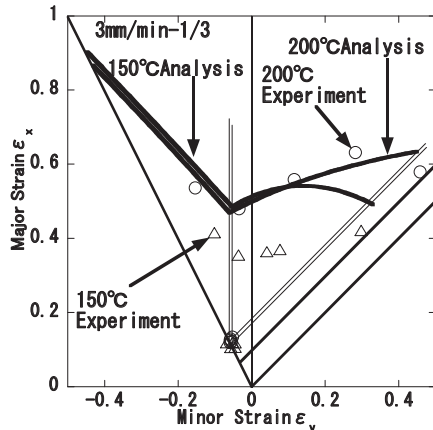


図 8 単軸引張り方向予ひずみの実験及び解析における限界ひずみ(温度の影響)

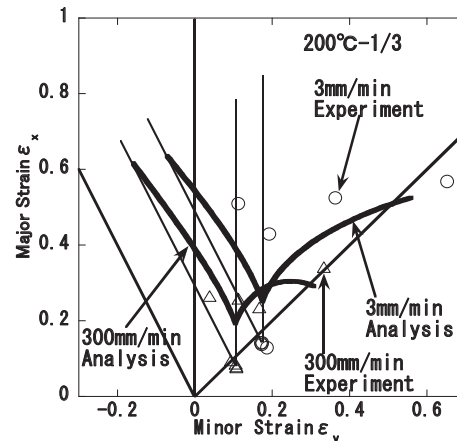


図 11 等二軸方向予ひずみの実験及び解析における限界ひずみ(速度の影響)

(2)の Logan-Hosford の降伏関数($M=10$)¹⁶⁾を用いた。ここで最大主ひずみの応力は σ_x 、最小主ひずみ方向の応力は σ_y 、 r は板厚異方性パラメータである。

$$(1+r)\bar{\sigma}^M = \sigma_x^M + \sigma_y^M + r(\sigma_x - \sigma_y)^M \quad (2)$$

そのため相当塑性ひずみは式(3)より求めた。このとき応力比 $\alpha = \sigma_y / \sigma_x, \psi = \sigma_x / \bar{\sigma}$ である。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y}{\bar{\sigma}} = \psi(\epsilon_x + \alpha \epsilon_y) \quad (3)$$

よって応力非 α, ψ を求める必要があるため、式(2)から関連流動則より

$$d\epsilon_x = \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} d\lambda = M \{ \sigma_x^{M-1} + r(\sigma_x - \sigma_y)^{M-1} \} d\lambda \quad (4)$$

$$d\epsilon_y = \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} d\lambda = M \{ \sigma_y^{M-1} + r(\sigma_x - \sigma_y)^{M-1} \} d\lambda \quad (5)$$

したがって

$$\beta = \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \varepsilon_x} = \frac{\alpha^{M-1} - r(1-\alpha)^{M-1}}{1+r(1+\alpha)^M} \quad (6)$$

$$\psi^M = \frac{1+r}{1+\alpha^M+r(1-\alpha)^M} \quad (7)$$

つまり相当塑性ひずみの算出手順は以下のようになる。

1. 破断座標 $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ からひずみ比 β を求める。
2. β を式(6)に代入し, Newton-Rapson 法を用いて, α を算出する。
3. 次に α を式(7)に代入し, ψ を得る。

以上より得られた α, ψ を式(3)に代入することで相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}$ を算出する。

4. 解析値と実験値の比較

4.1 平面ひずみ方向の予ひずみ

図6と図7に平面ひずみ近傍の方向に予ひずみを与えた場合のFLDを示す。ひずみ量は破断ひずみ量の1/3を与えた。図6は試験速度 $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の条件で, 試験温度ごとの結果を示している。黒い線で示しているのが解析値で, 白抜きの三角の点で示しているのが 150°C の実験値(実験値は予ひずみと破断ひずみ), 白抜きの丸の点で示しているのが 200°C の実験値である。図6を見ると高温では成形限界が上昇しており, 成形限界の温度依存性が確認できた。図7は試験温度 200°C の条件で, 試験速度ごとの結果を示している。黒い線で示しているのが解析の値で, 丸の点は $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の実験値を, 三角の点は $300\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の実験値を示している。図7を見ると低速では成形限界が増加しており, 成形限界の速度依存性が確認できた。解析値と実験値を比較すると, 異なる温度・速度条件でもおおむね一致していた。

4.2 単軸方向の予ひずみ

図8と図9に単軸方向に予ひずみを与えた場合のFLDを示す。図8は試験速度 $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 予ひずみ量1/3で, 温度ごとの結果を示している。黒い線で示しているのが解析値で, 白抜きの丸の点で示しているのが 200°C の実験値, 白抜きの三角の点で示しているのが 150°C の実験値である。図9は試験温度 200°C , 予ひずみ量1/3で, 速度ごとの結果を示している。黒い線で解析値を示している。白抜きの丸の点は $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の実験値, 白抜きの三角の点は $300\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の実験値を示している。実験値と解析値を比較してみると, 図8の 150°C に若干のズレが見られるものの, 全体的に見るとおおむね一致していることが示された。

4.3 等二軸方向の予ひずみ

図10と図11に等二軸方向に予ひずみを与えた場合のFLDを示す。図10は試験速度 $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 予ひずみ量は破断ひずみの1/3で温度ごとの結果を示している。黒い線で示しているのが解析値の値で, 白抜きの丸の点で示しているのが 200°C の実験値, 白抜きの三角の点で示しているのが 150°C の実験値である。図11は試験温度 200°C ,

予ひずみは破断ひずみ量の1/3で, 速度ごとの結果を示している。黒い線で示しているのが解析値の値で, 白抜きの丸の点で示しているのが $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の実験値, 白抜きの三角の点で示しているのが $300\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の実験値である。等二軸予ひずみの場合も解析値と実験値はおおむね一致していた。また成形限界の温度速度依存性が確認できた。

5. 解析結果の考察

図12に比例FLD, 及び様々なひずみ方向に予ひずみを与えた場合の非比例FLDの解析値を示す。予ひずみは等二軸方向から単軸方向までひずみ比を0.5刻みで変えた計四つのひずみ方向に与えた。解析条件は温度 200°C , 試験速度 $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 予ひずみ量は破断ひずみ量の1/2の条件で行った。比例ひずみ経路FLDは黒の曲線で示している。種々のひずみ方向に予ひずみを与えた非比例ひずみ経路FLDは一点鎖線で示している。図12より予ひずみの影響を見ると, 等二軸方向のひずみ付与後の非比例ひずみ経路FLDは比例ひずみ経路FLDと比べ成形限界が低下していた。逆に単軸方向のひずみ付与後の場合は, 比例ひずみ経路FLDと比べ成形限界が増加していた。平面ひずみ近傍では等二軸予ひずみのFLDと単軸予ひずみのFLDの間あたりで, 比例変形ひずみ経路FLD付近であった。

このことから比例変形ひずみ経路FLDと比較した場合, 単軸予ひずみの場合は成形限界が増加し, 等二軸予ひずみでは低下する, 実験値と同じ傾向であることが示された。よって様々なひずみ量及びひずみ方向に予変形させた場合でも解析により成形限界を求められることを示した。

6. 結 言

本研究は数値シミュレーション精度の向上のため, AZ31Mg合金の比例変形ひずみ経路FLDを基に, 温度及び加工速度を考慮した温間非比例ひずみ経路FLDを解析的に予測することを目的とした。計算は様々な温度及び加工速度の条件で, 種々のひずみ方向及びひずみ量を一次変形とした場合の非比例ひずみ経路FLDの予測を相当塑性ひずみの和による解析手法で導き出した。そしてその予測値と実験値を比較・検討した。その結果から以下の知見を得た。

- (1) AZ31 マグネシウム合金板において, 等二軸方向に予ひずみを与えた場合の非比例変形成形限界ひずみは比例変形FLD同様に温度, 速度依存性が確認された。温度が高いほど成形限界ひずみが増大し, 速度が速いほど成形限界ひずみは小さくなることを実験的に示した。
- (2) 解析の等二軸変形で限界ひずみの2/3の予ひずみを与えた後の平面ひずみ引張りでは, 一次変形の時点で既に平面ひずみ方向の限界相当塑性ひずみ量を超えているため, 試験片はすぐに破断してしまう結果となった。

- (3) AZ31 マグネシウム合金板において,単軸方向に予ひずみを与えた場合, 平面ひずみ方向に予ひずみを与えた場合の非比例変形成形限界ひずみは,比例変形及び等二軸経路と同様に温度,速度依存性があることを示した.
- (4) 等二軸側に予ひずみを与えた場合の FLD は比例変形経路の FLD より破断ひずみが小さくなり, 単軸側に予ひずみを与えた場合の FLD は比例変形経路の FLD よりも延性が大きくなることを示した.
- (5) 相当塑性ひずみの和による予測値と実測値を比較した結果, 双方はおおむね一致していた. つまり相当塑性ひずみの和による解析手法で, Mg 合金板の温間非比例成形限界を求めることが可能であることを示した. また異なる成形温度, 速度においても解析によって成形限界を求めることを示した.
- (6) 相当塑性ひずみの和による解析と検証実験によって様々なひずみ方向に予ひずみを付与した後の AZ31Mg 合金板の温間非比例ひずみ経路 FLD が求められ, これの実験値と解析値はおおむね一致していた. このことから比例ひずみ経路 FLD が判明していれば, その相当塑性ひずみ量 $\bar{\epsilon}_{lim}$ を基にして, あらゆるひずみ比及びひずみ量で一次変形を与えた場合でも, その後の非比例ひずみ経路 FLD を解析により求めることが可能であることを示した.

参考文献

- 1) 鎌土重晴ほか：塑性と加工 44-504 (2003),3
- 2) 林央：プレス技術 45-10(2007-8),18
- 3) 中哲夫ほか：平 18 春塑加講論 (2006),53
- 4) 片平卓志ほか：58 回塑加連講論 (2007),239
- 5) 片平卓志ほか：59 回塑加連講論 (2008),121

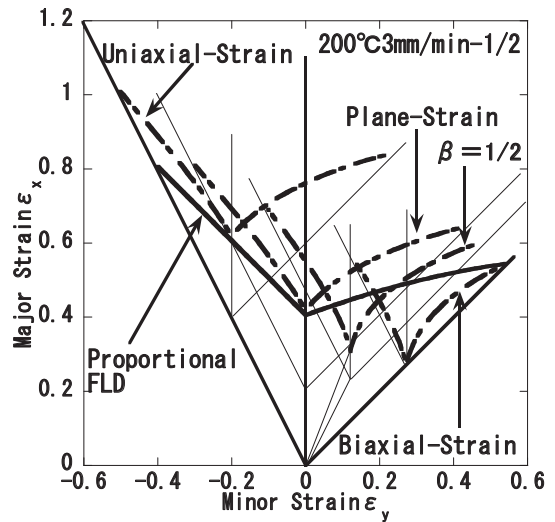


図 12 種々の非比例ひずみ経路 FLD の解析結果と実験による比例ひずみ経路 FLD

- 6) 片平卓志ほか：114 回軽金属春講概 (2008),2056
- 7) 片平卓志ほか：115 回軽金属秋講概 (2008),313
- 8) 植川陽介ほか：第 8 回塑加中国四国支部研究発表会講演論文集(2007)37-38
- 9) 植川陽介ほか：第 59 回塑加連講論(2008)119
- 10) 植川陽介ほか：日本機械学会講論集 095-1(2009)337
- 11) 大出明慶ほか：日本機械学会講論集 105-1(2010)71
- 12) 大出明慶ほか：第 60 回塑加連講論(2009)195
- 13) 橋本浩二：塑性と加工 41-473 (2000-6),527
- 14) 高津正秀：塑性と加工 49-566 (2008-3),221
- 15) 松井良介ほか：第 37 回塑性加工春季講演(2006),43
- 16) R. W. Logan&W. F. Hosford, J. Mech. Sci, 22(1980), 419