

AZ31マグネシウム合金板の 温間非比例成形限界ひずみとその解析的予測

中 哲夫*・片平 卓志**・植川 陽介***

Prediction of Forming Limit of AZ31 Magnesium Alloy Sheets under Non-proportional Deformation at Elevated Temperature

Tetsuo Naka*, Takashi Katahira** and Yohsuke Uekawa***

Abstract

Magnesium alloy usually exhibit low ductility at the room temperature due to its hexagonal close-packed structure, but it will be improved at elevated temperature. Therefore, warm press-forming for magnesium alloy sheets is quite attractive. In order to determine the optimum condition of press-forming for magnesium alloy sheets, in the present work, the effects of temperature, strain-rate and non-proportional deformation on forming limit diagram (FLDs) were experimentally investigated. The pre-strain of 1/3 and 2/3 in the forming limit were added to equi-biaxial direction of the magnesium alloy sheets (AZ31). The non-proportional FLDs of a magnesium alloy (AZ31) sheet was obtained by performing punch stretch-forming tests at various forming speeds (3, 30 and 300mm·min⁻¹) at temperatures of 100, 150 and 250°C. The temperature and strain-rate dependency were confirmed for non-proportional deformation forming limit strain by the given in the direction of equi-biaxial strain of the magnesium alloy sheet. The forming limit strain experimentally showed becoming small by quickening of the speed and increases by rising of the temperature. Because the amount of the limit equivalent plasticity strain in the direction of a plane strain had already been exceeded, the specimen was broken at once in the plane strain forming. Non-proportion FLD is predictable in the condition with low ductility by “Limit equivalent plasticity strain that depends on the direction of the final strain”. On the other hand, the limit strain predict in this Criterion was smaller than the experiment value in a high temperature and a low-speed condition. A viscous deformation influenced in a high temperature and a low-speed condition and the appeared this influenced the increase of ductility strongly.

Keywords : AZ31 alloy sheets, Forming limit, Non-proportional deformation, Prediction

1. 緒 言

近年、地球環境問題、エネルギー消費削減などの要求に対応するために、自動車を中心に各種輸送機分野において軽量化が強く求められている¹⁾。この対応策として注目されているのがマグネシウム合金である。マグネシウム合金は一般的に、密度が1.74g/cm³で、アルミニウムの2/3、チタンの1/3、鉄の1/4と実用金属の中で最も軽く比強度、比剛性、

切削性及びリサイクル性など多くの優れた特性を有している²⁾。現在、マグネシウム合金は携帯電話、ノートパソコンといった携帯用電子機器部品を中心に需要は増加している。しかし、現在用いられているダイカスト法やチクソモール法では生産性が悪い。そのため、生産性のよいプレス成形が必要不可欠である。

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

* 商船学科

** 専攻科生産システム工学専攻

*** 専攻科海上輸送システム工学専攻

るため常温における非底面すべりの臨界せん断応力が高いことが原因である³⁾。そこでマグネシウム合金のプレス成形には温度上昇に伴い、非底面すべりの臨界せん断応力の著しく低下する現象を利用した温間プレス成形が有効である⁴⁾。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⁵⁾。特にプレス成形を議論する上で張出し成形性の指標である成形限界線図 (FLD) を求めることは重要である。現在、マグネシウム合金の比例経路における成形限界線図の温度、速度依存性は実験により確認されている。ところが実際のプレス成形においてはひずみ経路が一定でない場合が多く存在する。そこで数値シミュレーションの精度向上のためには、非比例ひずみ経路を考慮した成形限界を定量的に予測しうる実験とモデルが必要である。

本研究ではAZ31マグネシウム合金板の球頭パンチ張出し試験により、非比例変形成形限界ひずみを実験的に求めた。ひずみ経路の影響を知るため、等二軸方向に予ひずみを与え、ひずみ比を種々に変化させ、非比例成形限界ひずみの温度および速度による影響を調べた。

また、非比例変形成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の実験結果との比較を行った。その結果から各ひずみ経路ごとの相当塑性ひずみの和が比例変形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. 材料及び実験方法

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。

Mg合金の温間張出し試験においてM-K法では中間温度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⁶⁾。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 供試材

マグネシウム合金は加工法によって铸造用と展伸用に分れ、結晶の微細化方法の違いにより、Mg-Al系およびMg-Zn系に大別される。本実験では展伸用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て使用する。この材料は1.2t×130w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、平均粒径7μmにしたものであり、試験前に400℃で30秒焼鈍したものである。この材料の化学組成をTable 1に示す。また細粒材のミクロ組織写真をFig.1に、細粒材の極点図をFig.2に示す⁷⁾。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。

Table 1 Chemical compositions of specimen (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

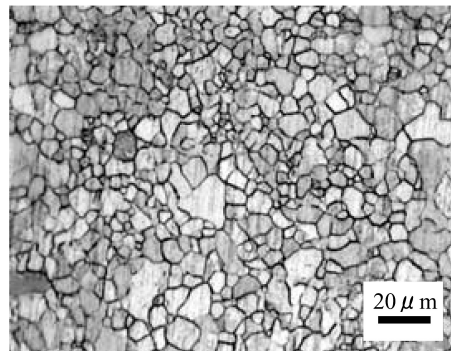


Fig.1 Microstructure of specimen after annealing⁷⁾

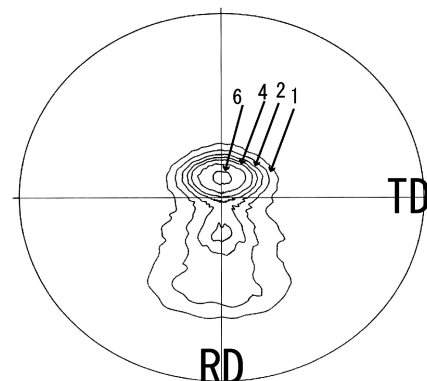


Fig.2 $\{0001\}$ pfigure of sheet surface of specimen⁷⁾

2. 2 非比例変形張出し試験

実際のプレス加工ではFig.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。その後ワイヤーカッターで圧延方向R.D.は一定の120mmとし、圧延直角方向を80, 70, 55および30mmに切り出し、破断するまで試験を行った。試験条件として本材料は成形速度依存性が強いいため、試験速度はパンチ速度3, 30及び300mm・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。

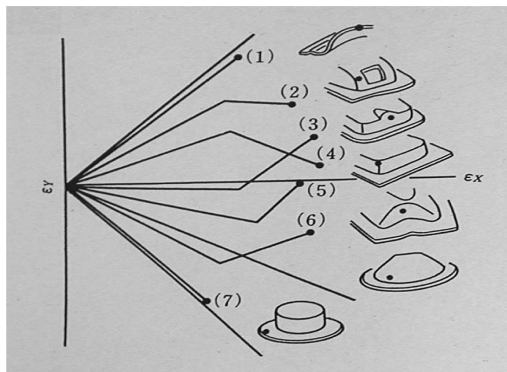
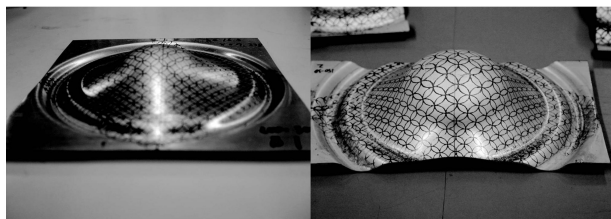


Fig.3 Example of typical forming limit strain in various forming strain

本研究では120×120mmの等二軸張出し試験片表面に直径6.145mmのスクライブドサークルをスタンプし、一次変形 (予ひずみ) は等二軸方向に比例変形にて限界ひずみの1/3および2/3与えた。その後、試験片の圧延直角方向を80, 70, 55および30mmの幅にワイヤーカット放電加工機でカットし、ひずみ比を変化させ破断まで張出し試験を行った。一次変形と二次変形の温度・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Fig.4(a), (b)にそれぞれ示す。



(a) The first loading (b) The second loading

Fig.4 Punch stretch-forming test specimen

3. 解析方法

非比例成形限界の予測を行うため実験にて比例経路の成形限界と非比例経路における成形限界と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⁸⁾。このとき比較する比例変形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とした。解析の概念図をFig.5に示す。ここで $\bar{\epsilon}_{lim}$ 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。 $\bar{\epsilon}^*$, $\bar{\epsilon}'_{lim}$ 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。

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

比例FLDのひずみ比 $\beta = 1$ となる座標から順にデータファイルより読み込み、 $\beta = -0.5$ となったとき解析を終了した。

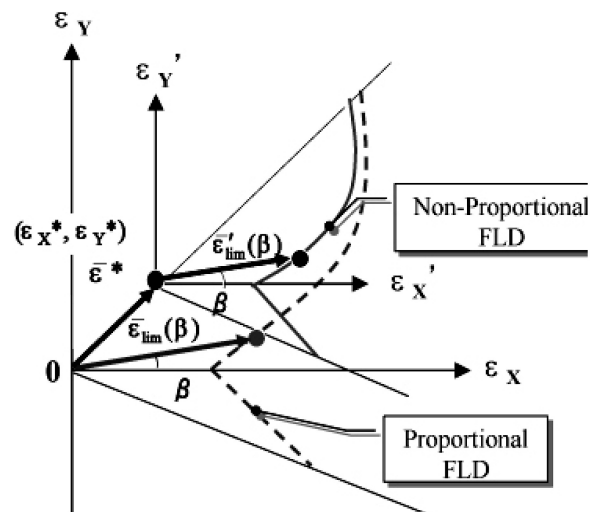


Fig.5 Schematic illustration of proportional and non-proportional FLDs

4. 実験結果と考察

パンチ速度3mm・min⁻¹をFig.6, 30mm・min⁻¹をFig.7, および300mm・min⁻¹をFig.8に限界ひずみの1/3の等二軸予ひずみの場合について黒塗の点が一次変形、白抜きの点が二次変形の破断点を示す。これらの図に見られるように温度上昇に伴い成形限界ひずみは増大している。このことにより比例変形と同様にFLDの温度依存性が確認できた。これは温度上昇とともに非底面すべりの限界せん断応力が低下したためと考えられる。

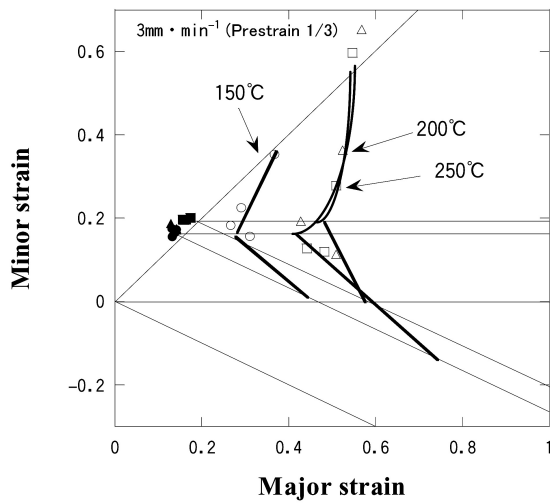


Fig.6 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various temperatures (Punch speed $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, Prestrain 1/3)

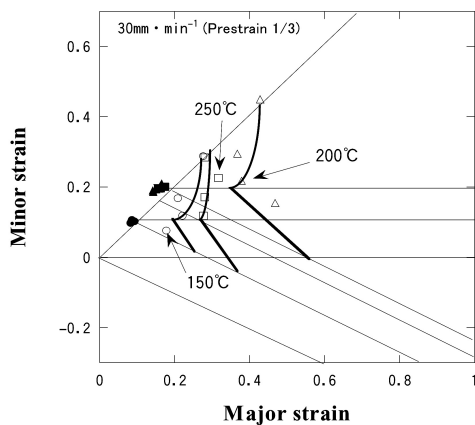


Fig.7 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various temperatures (Punch speed $30\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, Prestrain 1/3)

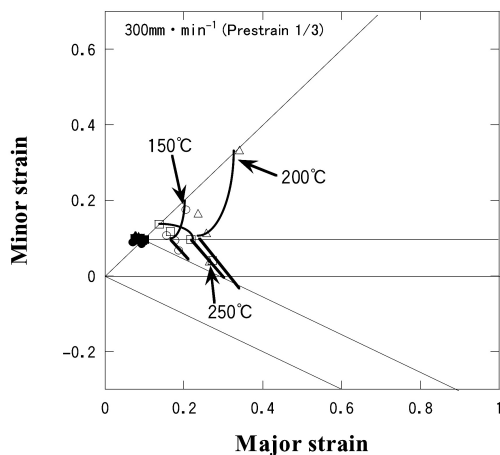


Fig.8 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various temperatures (Punch speed $300\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, Prestrain 1/3)

ただし、全ての図に示されているように温度 200°C よりも 250°C のFLDの方が、延性が低く示されたものがいくつかある。これは温度が高くなると球頭パンチを用いたため接触面積が増大し摩擦力が増大したことによるものと思われる。

温度 150°C をFig.9, 200°C をFig.10, および 250°C をFig.11に限界ひずみの1/3の等二軸予ひずみの場合について黒塗りの点が一次変形、白抜きの点が二次変形の破断点を示す。これらの図からパンチ速度が300, 30および $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ と速度の低下に伴い成形限界ひずみは増大していることが確認できる。

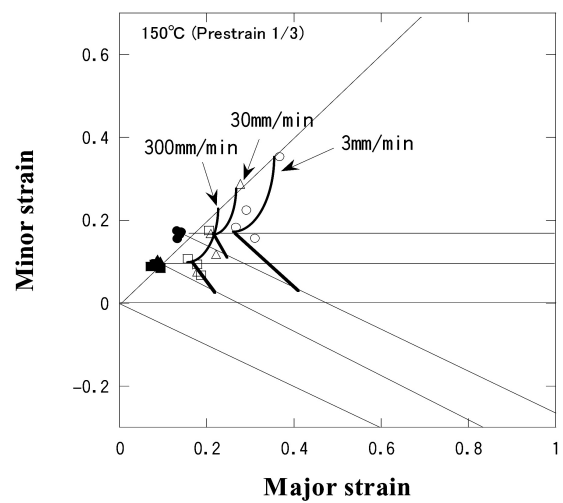


Fig.9 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various punch speeds (Temperature 150°C , Prestrain 1/3)

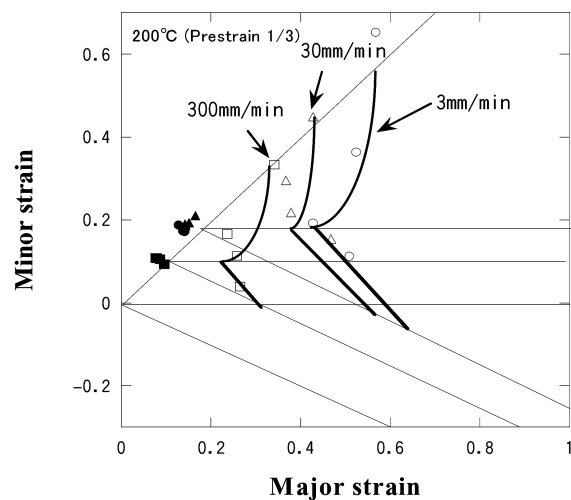


Fig.10 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various punch speeds (Temperature 200°C , Prestrain 1/3)

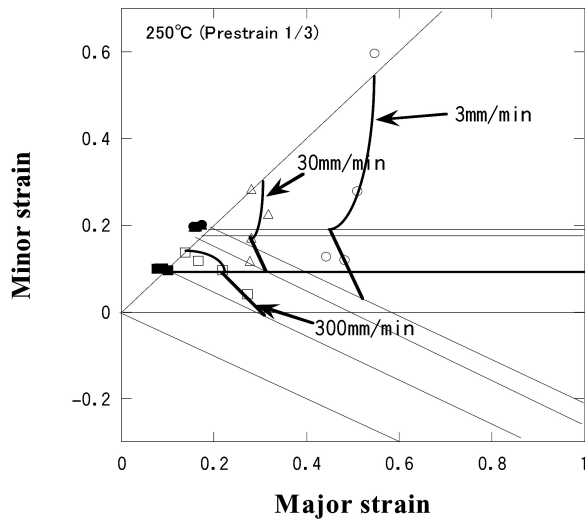


Fig.11 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various punch speeds (Temperature 250°C, Prestrain 1/3)

5. 解析結果と考察

パンチ速度 $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ を Fig.12, $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ を Fig.13, および $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ を Fig.14 に, 限界ひずみ $1/3$ の等二軸予ひずみの場合について黒塗の点の実験の一次変形。白抜き点の実験の二次変形の破断点, 実線, 一点鎖線, 破線が各種温度の解析結果を示す。全ての条件で 150°C の解析結果は実験結果と一致しており, 良好な結果を得ることができている。しかし温度が上昇するに従い, 実験結果のほうが解析結果より限界ひずみが大きくなっていることが確認できる。

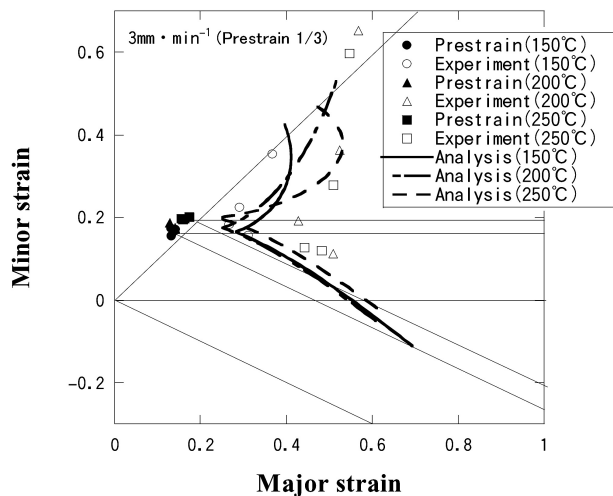


Fig.12 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, at temperature of 150, 200 and 250°C with experimental data

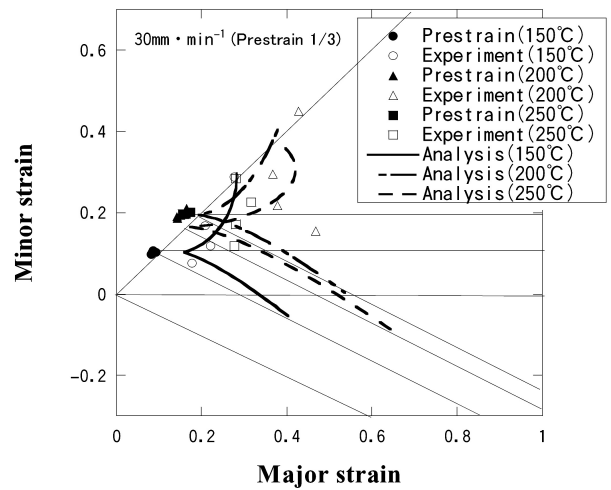


Fig.13 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, at temperature of 150, 200 and 250°C with experimental data

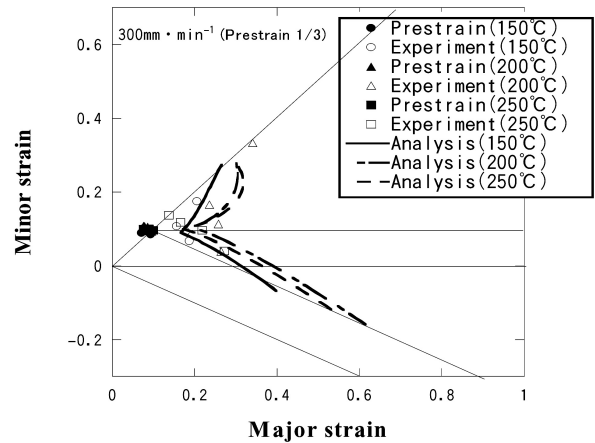


Fig.14 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, at temperature of 150, 200 and 250°C with experimental data

温度 150°C を Fig.15, 200°C を Fig.16, および 250°C を Fig.17 に, 限界ひずみ $1/3$ の等二軸予ひずみ場合について黒塗の点の実験の一次変形。白抜き点の実験の二次変形の破断点, 実線, 一点鎖線, 破線が各種速度の解析結果を示す。図より各条件とも $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ から速度の低下に伴い, 実験結果の方が解析結果よりも大きな成形限界を示している。

これらのことから, 延性が低い条件下 (低温もしくは高速) では本方法により非比例FLDが予測できることがわかった。

6. 結言

本研究では, プレス成形の数値計算シミュレーションにおける成形限界ひずみ予測の精度向上のため, 種々の温度および速度での条件下において

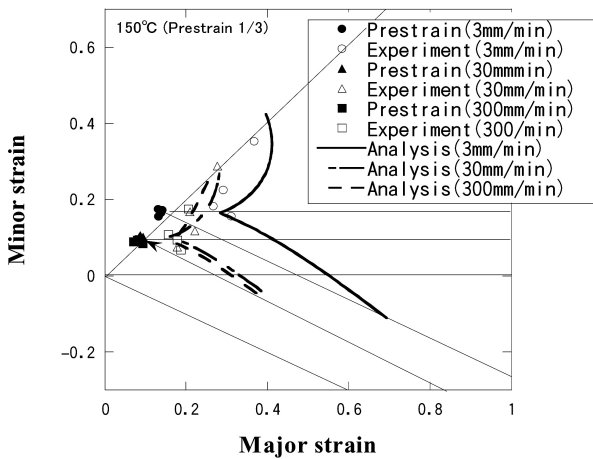


Fig.15 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of 3, 30 and 300mm · min⁻¹, at temperature of 150°C with experimental data

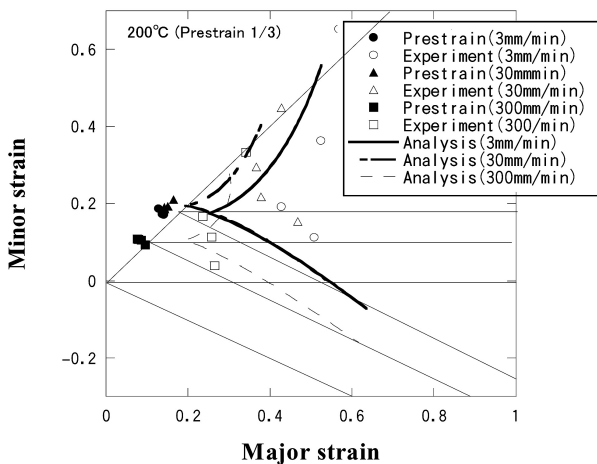


Fig.16 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of 3, 30 and 300mm · min⁻¹, at temperature of 200°C with experimental data

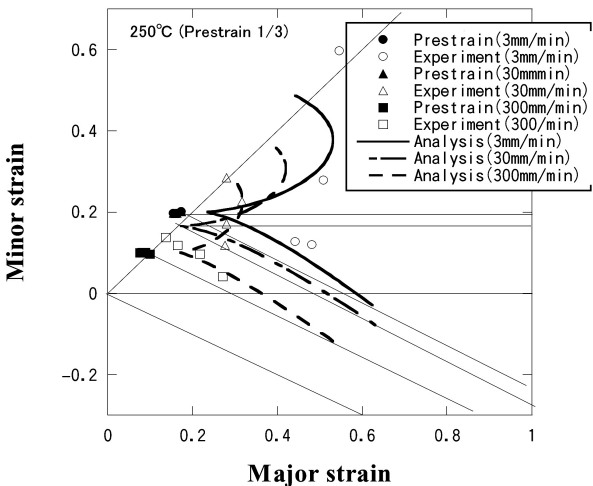


Fig.17 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of 3, 30 and 300mm · min⁻¹, at temperature of 250°C with experimental data

AZ31マグネシウム合金板の非比例変形張出し試験を行った。本実験では非比例変形の中でも、等二軸方向に一次変形を与えた場合とした。そこで得られた結果から成形限界に及ぼす温度、速度、および変形経路の影響について比較、検討した。また非比例変形FLDの定量的な予測のため、「最終ひずみ方向に依存する限界相当塑性ひずみ」クライテリオンを仮定し、その妥当性の検討を行った。そこから得られた結果を以下に示す。

(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) とくに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った。

(3) 延性が低い条件下（低温もしくは高速）では「最終ひずみ方向に依存する限界相当塑性ひずみ」により非比例FLDが予測できることがわかった。一方、高温・低速条件では、このクライテリオンで予測された限界ひずみは実験値より小さかった。これは、高温・低速条件では粘性変形が強く現れ、これが延性の増大に寄与したためである。

謝 辞

本研究は（財）天田金属加工機械技術振興財団の助成を受けて行われたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 行武栄太郎ほか：塑性と加工, 44-506, (2003), 276
- 2) 鎌土重晴ほか：塑性と加工 44-504 (2003), 3
- 3) 林央：プレス技術 45-10 (2007-8), 18
- 4) 古閑伸裕：塑性と加工 44-502 (2003), 250
- 5) 中哲夫ほか：第37回塑性加工春講演会 (2006)
- 6) 橋本浩二：塑性と加工 41-473 (2000-6), 527
- 7) 廣中智久：大阪府大学院修士論文
- 8) 松井良介ほか：第37回塑性加工春季講演会(2006)