

AZ31板の非比例張出し成形に及ぼす温度と速度の影響 (単軸引張り後のFLD)

中 哲夫*・植川 陽介**・片平 卓志***

Effects of Temperature and Strain-Rate on Non-proportion Stretch-Forming of AZ31 Magnesium Alloy Sheets

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

Abstract

Magnesium alloy usually exhibit low ductility at room temperature due to its hexagonal close-packed structure. To overcome the problem, the best choice of forming technologies would be warm press-forming since the ductility becomes considerably higher when heating-up the sheets. 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 deformation by non-proportional strain path on forming limit diagram (FLDs) for fine-grain AZ31 magnesium alloy sheet were investigated. The pre-strain were added of 1/3 and 2/3 in the fracture elongation by uniaxial tension. The FLDs of non-proportional strain path were determined by performing punch stretch-forming tests at various forming speeds (3, 30 and 300 mm•min⁻¹) at temperatures of 150, 200 and 250°C. The forming limit strains increased with temperature rise and with decreasing forming speed, where the effect of forming speed was stronger at higher temperatures. And the forming limit strain increased with non-proportion strain path after uniaxial tension compared with the proportion strain path. To describe such a characteristic of FLD of AZ31, the Marciniak-Kuczynski type forming limit analysis was conducted using the Backofen-type constitutive equation ($\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^n \dot{\bar{\epsilon}}^m$). In this analysis, the damage evolution in the necking zone was taken into account based on Oyane's ductile fracture criterion. The numerical results of the FLD show a good agreement with the corresponding experimental observations.

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

1. 緒 言

マグネシウム合金は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¹⁾。近年、自動車やパソコン・携帯電話・カメラなどの構造材として需要が伸びている材料である。これらはプレス成形ではなく、ダイカストや射出成形機を利用したチクソモールド法で作られている。しかし、これらの方法では生産性が悪いため、需要を増加させるためには、圧延、押し出し等の一次塑性加工と併せて、プレス成形などの二次成形加工技術の開発が重要となる²⁾。しかしながら、マグネシウム合金の結晶構造は稠密六方

構造からなるため、室温付近では延性に乏しく、極めて塑性加工性が悪い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が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。

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最適加工条件および工程設計を行なううえで必要である⁵⁾。板材の張出し成形性の基本的な指標として成形限界線図 (FLD) がある。これまでに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。しかし、実際のプレス成形において

* 商船学科

** 専攻科 海上輸送システム工学専攻

*** 専攻科 生産システム工学専攻

はひずみ経路が一定でない場合が多く存在するため、プレス成形のシミュレーションに取り入れる場合、比例経路におけるデータを用いたのでは精度の点で必ずしも実用的とはいえない。また近年、成形加工で多く用いられるようになった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ひずみを定量的に予測しうる実験とモデルが必要である。

本研究ではマグネシウム合金板 (AZ31) を用い、非比例ひずみ経路 (単軸変形から種々のひずみ比による試験) による成形限界線図を温度と速度の影響を含めて実験的に調査した。そして非比例変形における成形限界ひずみに及ぼす温度、速度および変形経路の影響について検討を行なった。

FLDの解析的予測には多くの手法が用いられているが⁶⁾、本研究においてはM-K理論による解析を主に用いた。著者らは比例変形のFLDの予測においてもM-K理論に大矢根の延性破壊条件式を導入したが、非比例変形経路においても同様の手法で予測した。また実験結果と解析結果を比較し検討を行った。

前報の⁷⁾ 等二軸および本研究における単軸側の非比例張出し試験での実験結果において温度200℃よりも250℃のFLDの方が延性が低く示された特異な問題の究明について単軸引張り試験を250~300℃において種々の温度および速度にて調査し検証を行なった。

2. 材料及び実験方法

FLDを求めるために張出し試験を行なった。この張出し試験方法には、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) が主にあげられる⁸⁾。M-K法は試験片と工具の間に補助板を挟むことにより、潤滑剤の影響を最小限に抑えることが可能であるが、試験準備が煩雑で、かつ平面ひずみ状態を得るのに工夫が必要等の短所がある。一方で中島法は潤滑剤の影響を受けやすいが、試験準備に補助板がいらないことなどから実験は簡便である。

本研究においては、実際に使用される環境に近い中島法を用いて行なった。また、予備試験には平頭パンチによる試験を行なったが、試験温度が鋼の中間温度脆性域にあるため試験片より先に深絞り鋼板で作られたドライビングシートが割れてしまった。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。

また、潤滑剤にはスプレータイプ六方晶窒化ホウ素潤滑・離型剤「L-BN」(昭和電工株式会社) を用いた。この潤滑剤は、優れた熱的安定性、耐荷重性等の特徴を有しており、鍛造や各種金型成形の潤滑

などに用いられ、約900℃まで耐えることができる。

2. 1 供試材

マグネシウム合金は casting と展伸用があり、プレス加工では展伸用を用い主にMg-Al-Zn系とMg-Zn-Zr系がある。本実験に供した材料はMg-Al-Zn系・AZ31B-O (ASTM, JIS : MP1) の細粒材、板厚0.8mm、平均粒径 7 μm のものを供した。これは板厚1.2mm×板幅130mmのホットコイルを、圧延温度350~380℃、平均圧化率20%/パスの条件で圧延したものである。この材料は成形性および溶接性に優れており、Alを3%、Znを1%含有する。試験前に加工履歴を取り除くため、400℃で30秒焼鈍した。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、極点図をFig. 2に示す⁹⁾。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

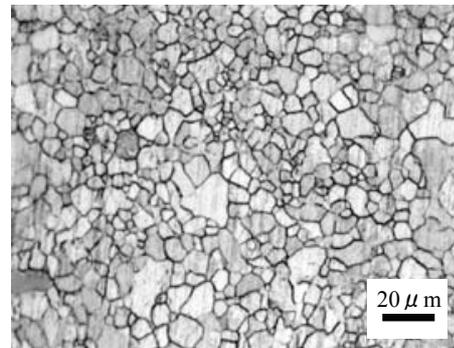


Fig.1 Microstructure of specimen after annealing⁹⁾

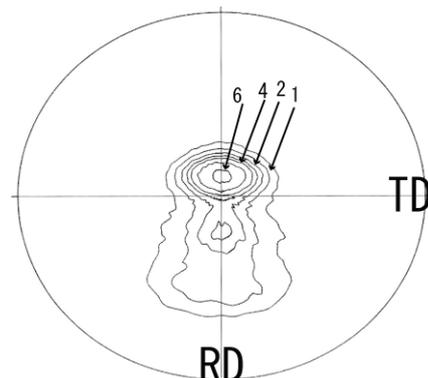


Fig.2 {0001} pdefigure of sheet surface of specimen⁹⁾

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単軸方向に一次変形（単軸引張り）を与えた。その後圧延直角方向（T.D.）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）を行なった。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。

一次変形の単軸引張り試験においては130×157.5mm（幅×平行部）の試験片表面に50×50mm内に2mmの格子をスタンプし、2×2mm, 6×6mm, 10×10mm格子の変形量の計測を行なった。一次変形は圧延方向に比例変形における破断ひずみの1/3および2/3を与えた。その後、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、試験片のひずみ比を種々に変化させるために、圧延直角方向を120,80,70,55および30mmの幅にシャーでカットし、破断まで張出し試験を行なった。なお、一次変形と二次変形の温度及び速度条件は同じである。一次変形の試験片と二次変形の試験片をFig. 4(a)及び(b)にそれぞれ示す。

一次変形の試験速度は比例変形（張出し試験）のひずみ速度と同じにするため、比例変形のひずみ速度のデータから算出しTable 2に示す速度とした。

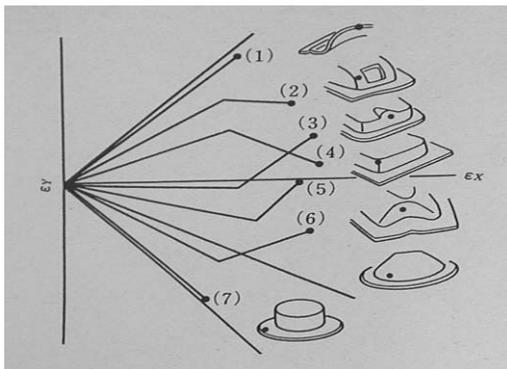
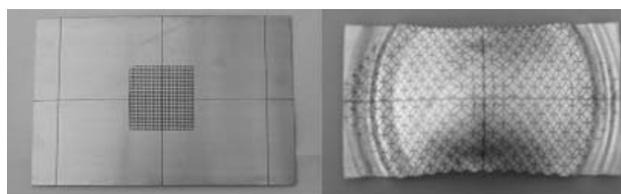


Fig.3 Example of typical forming limit strain in various forming strain



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

Fig.4 Punch stretch-forming test specimen

なおTable 2中の左側は張出し試験のパンチ速度、右側は単軸引張りのクロスヘッドスピードである。

Table 2 Forming speeds

Punch speed (stretch drowing)	Crosshead speed (uniaxial tension test)
3mm・min ⁻¹	4.4mm・min ⁻¹
30mm・min ⁻¹	44mm・min ⁻¹
300mm・min ⁻¹	440mm・min ⁻¹

3. 解析方法

M-K理論は、板材の板厚方向の初期不均一部が変形とともに局所くびれに発展していくことを仮定している。Fig. 5にM-K理論の概念図を示す。h_Aはくびれの外側（領域A）の板厚を示し、h_Bはくびれ部（領域B）の板厚を示し、板厚の不均一さはf=h_B/h_Aで表し、その初期値はf₀とかく。ここでは式(1)で示すBackofen型の速度依存型構成式を用いた。

$$\bar{\sigma} = C \bar{\varepsilon}^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\varepsilon}$ および $\dot{\bar{\varepsilon}}$ は相当応力、相当塑性ひずみおよびその速度である。このとき降伏条件としてLogan-Hasford¹⁰⁾の降伏関数より求めた。

まず、n値、m値およびひずみ増分比を与え、降伏条件や関連流動則を用いることにより均一領域の応力比とひずみ増分を求める。次に不均一領域の相当塑性ひずみ増分d $\bar{\varepsilon}_B$ を与える。そして、d ε_{1A} /d ε_{1B} →0に達したときの(ε_{1A}, ε_{1B})を成形限界ひずみとする。また、負の領域では著者ら¹¹⁾によって提案された手法で解析を行った。

しかしM-K理論では等二軸領域において過大にFLDを評価してしまうことが多い、そこで式(2)に示す大矢根の延性破壊条件式をひずみ比が正の領域において板材の不均一部に導入した。σ_mおよび $\bar{\sigma}$ はそれぞれ静水圧応力、相当応力であり、a、bは材料定数である。この条件を満たすときを破断とした。

$$b = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + a \right) d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

上記の方法の解析より求めた比例変形における試験温度150℃、試験速度3mm・min⁻¹のM-K解析と大矢根の延性破壊条件式を用いた解析の比較をFig.6に

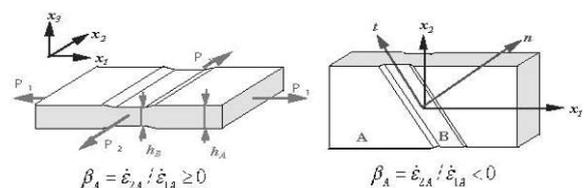


Fig.5 Schematic illustrations of the M-K analysis

示す。この図に見られるように比例変形では空孔の成長を考慮することで良い結果が得られている。

非比例FLDの解析では n 値および f_0 について予ひずみの影響を考慮した値を用いた。この n 値は次の方法で求めた。まず、 $\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n \dot{\bar{\epsilon}}^m$ を用いて $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ 曲線を作成し、Fig.7に示すように一次変形から破断までの n 値から一次変形の仕事を除いた状態の n_A 、 n_B 値を用いた。 f_0 は、予ひずみによる板厚の変化を考慮した値を用いた。また、大矢根の延性破壊条件式の空孔の成長を再現するために、予ひずみの影響を考慮した解析を行った。予ひずみによる空孔率の変化は式(2)のbに空孔の成長を考慮した値を用いるが今回は単軸側へ予ひずみを与えたため、等二軸側よりも静水圧応力成分が大きく(圧縮方向を正とする)密度減少は少ない¹²⁾。そのため、a、bともに比例試験と同じ値を用いた。

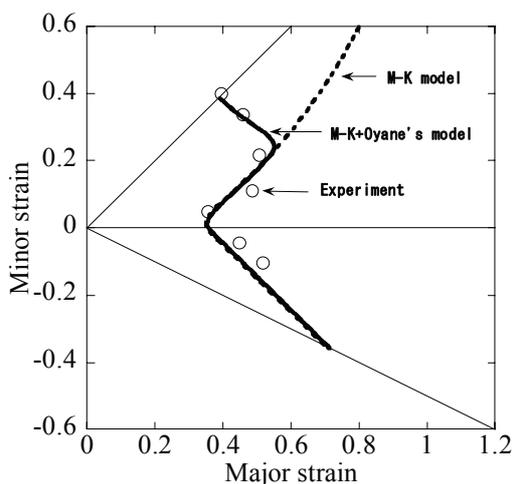


Fig.6 Comparison of FLD between experiment and numerical simulations

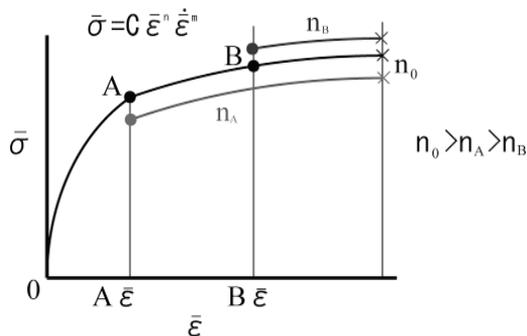


Fig.7 Schematic illustration of n -value by strain history

4. 実験結果と考察

パンチ速度 $3\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ におけるFLDをFig.8, $30\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ の場合の結果をFig.9, および

$300\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ での結果をFig.10に示す。限界ひずみの2/3の単軸予ひずみの場合について黒塗りの点が一次変形、白抜きの方が二次変形の破断点を表している。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。

ただし、Fig.8に示されているように温度 200°C よりも 250°C (パンチ温度 275°C)のFLDの方が、延性が低く示されたものがある。この原因を究明するために単軸引張り試験を行なった。その結果(引張り速度 $4.4\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ をFig.11, $44\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ での結果をFig.12, および $440\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ での結果をFig.13)

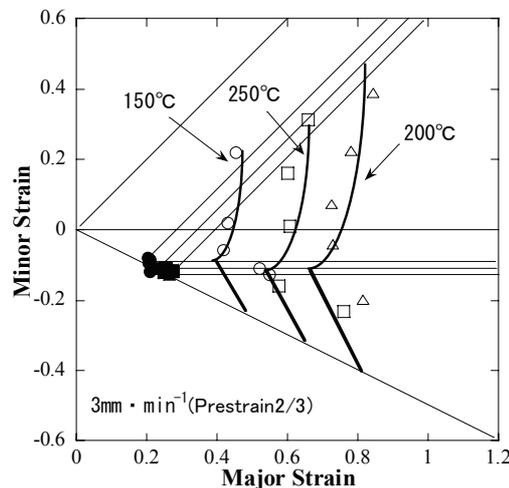


Fig.8 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various temperatures (Punch speed $3\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, Prestrain 2/3)

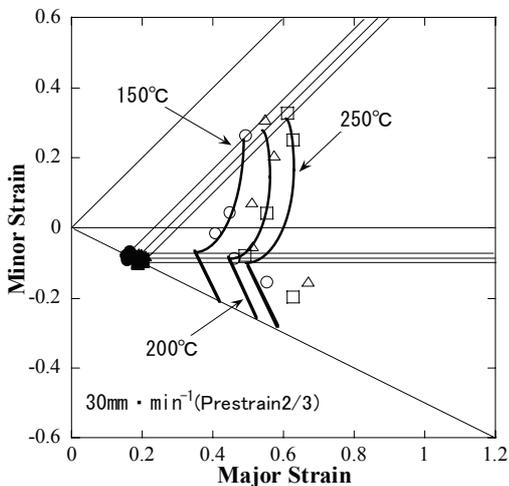


Fig.9 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various temperatures (Punch speed $30\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, Prestrain 2/3)

を示す。これらの図に見られるように260~280℃にて延性が低下することが確認できた。

温度150℃におけるFLDをFig.14, 200℃の場合をFig.15, および250℃での結果をFig.16に示す。限界ひずみの2/3の単軸予ひずみの場合について黒塗りの点が一次変形, 白抜きのが破断点を表している。これらの図からパンチ速度が300, 30および3mm・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。このことにより比例変形と同様にFLDの速度依存性が確認できた。

パンチ速度3mm・min⁻¹におけるFLDをFig.17, 30mm・min⁻¹の場合の結果をFig.18, および300mm・min⁻¹での結果をFig.19に示す。成形温度200℃の単軸予ひずみの場合について黒塗りの点が一次変形, 白抜きのが二次変形の破断点を表している。これらの図に見られるように単軸方向に予ひずみを与えた場合, 比例変形のデータより非比例変形

のデータの成形限界ひずみの方が大きく示された。これは単軸方向に変形を与えるとボイドの増加も抑えられたため成形性が良くなったと考えられる。

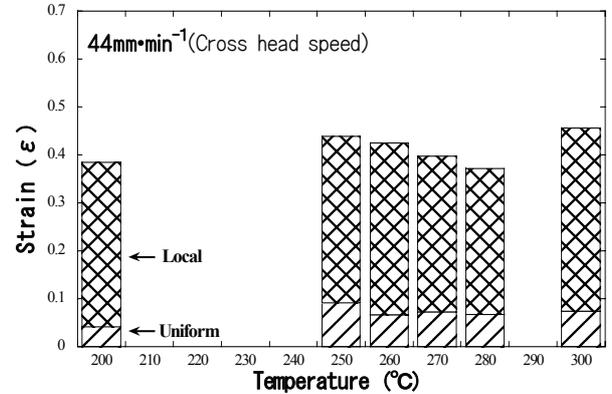


Fig.12 Effect of temperature on fracture elongation (Crosshead speed 44mm・min⁻¹)

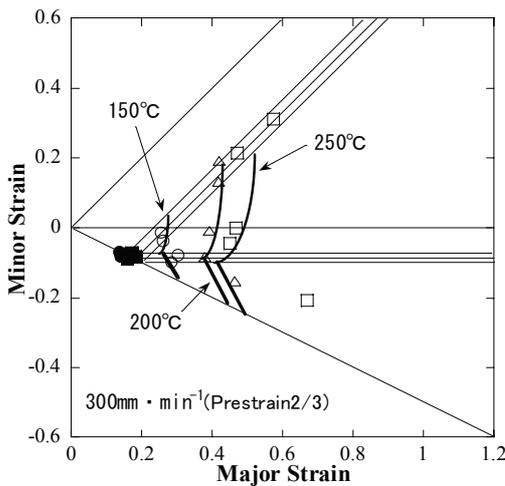


Fig.10 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various temperatures (Punch speed 300 mm・min⁻¹, Prestrain 2/3)

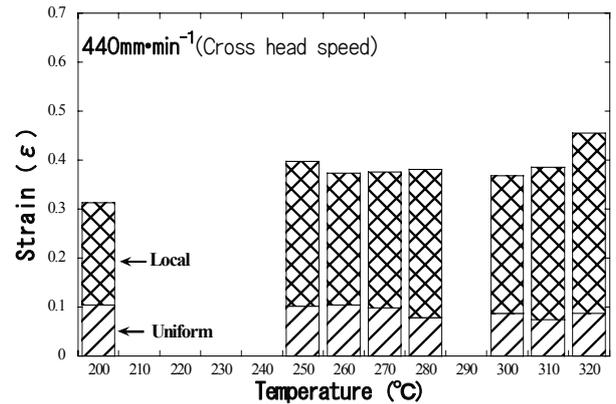


Fig.13 Effect of temperature on fracture elongation (Crosshead speed 440mm・min⁻¹)

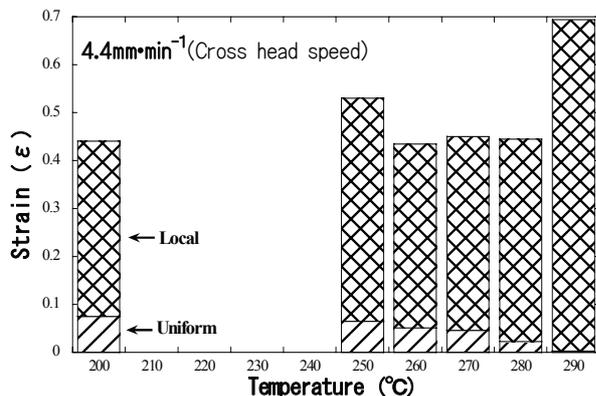


Fig.11 Effect of temperature on fracture elongation (Crosshead speed 4.4mm・min⁻¹)

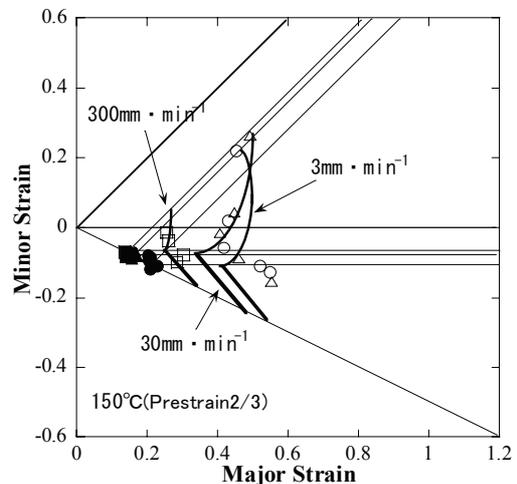


Fig.14 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various punch speeds (Temperature 150°C, Prestrain 2/3)

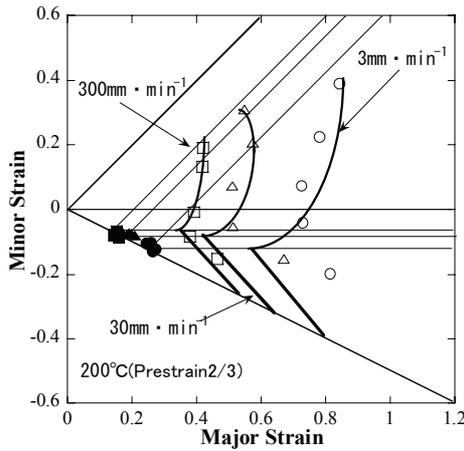


Fig.15 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various punch speeds (Temperature 200°C, Prestrain 2/3)

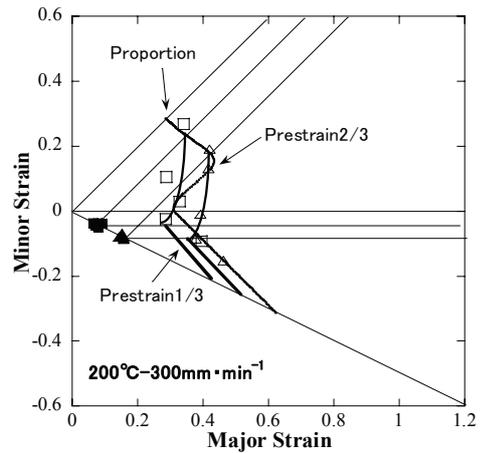


Fig.18 Comparison of FLDs between the proportion loading and non-proportion loading (Temperature 200°C, Punch speed 30 mm·min⁻¹)

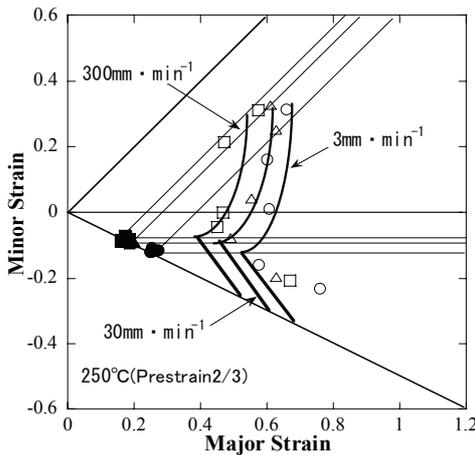


Fig.16 Effect of temperature on non-proportional FLDs at various punch speeds (Temperature 250°C, Prestrain 2/3)

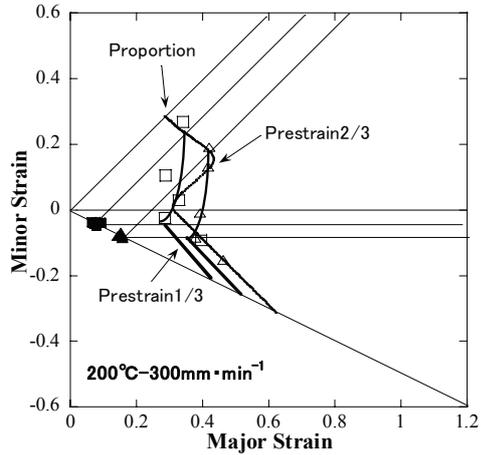


Fig.19 Comparison of FLDs between the proportion loading and non-proportion loading (Temperature 200°C, Punch speed 300 mm·min⁻¹)

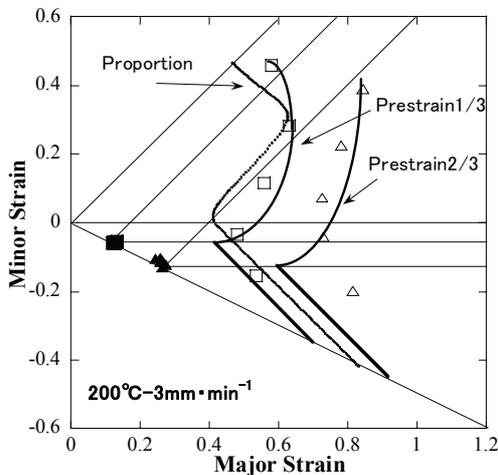


Fig.17 Comparison of FLDs between the proportion loading and non-proportion loading (Temperature 200°C, Punch speed 3 mm·min⁻¹)

5. 解析結果と考察

パンチ速度3mm·min⁻¹におけるFLDをFig.20に示す。限界ひずみ1/3の単軸予ひずみの場合について黒塗りの点の実験の一次変形、白抜きの点の実験の破断点を示す。実線(150°C)、一点鎖線(200°C)、破線(250°C)で各種温度の解析結果を図中に表している。200°Cの解析結果は実験結果とよく一致したが、150°C、250°Cは実験結果のほうが解析結果より若干限界ひずみが大きくなっていることが確認できる。

Fig.21には成形温度200°CにおけるFLDを示す。限界ひずみ1/3の単軸予ひずみ場合について黒塗りの点の実験の一次変形、白抜きの点の実験の破断点、実線、一点鎖線、破線が各種速度の解析結果である。3mm·min⁻¹と300mm·min⁻¹ものは実験結果と一致

したが、 $30\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ のものは実験結果が解析結果よりも若干大きく示された。

これらから、単軸方向に予ひずみを与えた場合においても、等二軸側と同様にM-K解析に大矢根の延性破壊条件式を導入した解析方法により非比例FLDが予測できることがわかった。

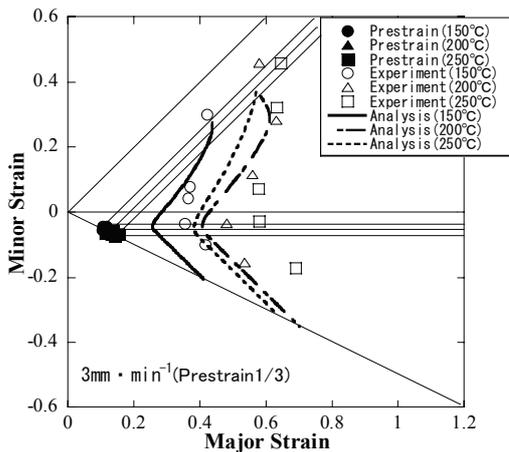


Fig.20 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of $3\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, at temperature of 150, 200 and 250°C with experimental data

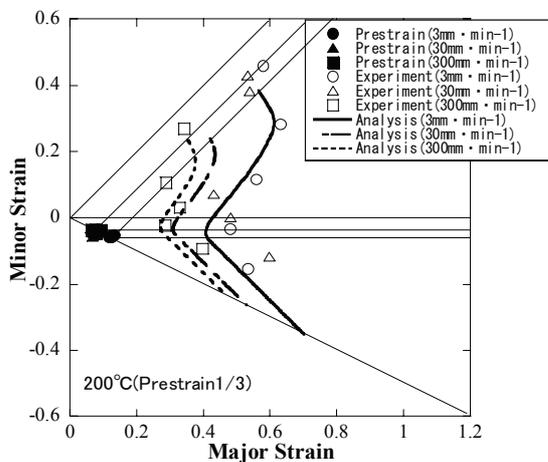


Fig.21 Comparison of predicted FLDs at punch speeds of 3, 30 and $300\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, at temperature of 200°C with experimental data

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、単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、速度及び変形経路の影響について比較、検討した。その結果を以下に示す。

- (1) 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、速度依存性が確認できた。
- (2) 単軸引張り試験から 270°C 付近で延性が低下することが確認できた。そのため温度 200°C と 250°C のFLDが逆転したと考えられる。
- (3) 単軸経路から予ひずみを与えた場合、比例変形のFLDよりも延性が大きく示される。これは単軸方向に変形を与えるとポイドの増加も抑えられたため成形性が良くなったと考えられる。
- (4) 単軸側からの非比例変形においても等二軸方向と同様に、M-K解析に大矢根の延性破壊条件式を導入した方法で非比例FLDが予測できる。

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) 鎌土重晴ほか：塑性と加工 44-504 (2003), 3
- 2) 大上哲郎ほか：塑性と加工 43, (2001), 80
- 3) 宅田裕彦：塑性と加工 43, (2002)
- 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) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎
- 7) 片平卓志：弓削商船高等専門学校紀要 30 (2008), 19
- 8) 橋本浩二：塑性と加工 41-473 (2000-6), 527
- 9) 廣中智久：大阪府大学院修士論文
- 10) R. W. Logan & W. F. Hosford, J. Mech. Sci, 22-7 (1997)
- 11) 中哲夫ほか：塑性と加工 43-492 (2002-1)
- 12) 山崎雄司：第173回塑性加工シンポジウム