

Al-Mg 合金5083板の降伏曲面 に及ぼす温度の影響

伊藤 幸男*・上井 博明**・木床 聡**
中山 恭秀***・中 哲夫****

Effect of Temperature on Yield Locus for 5083 Aluminum Alloy Sheet

Yukio Ito*, Hiroaki Uwai**, Satoshi Kidoko**
Yasuhide Nakayama*** and Tetsuo Naka****

Abstract

Warm press-forming of aluminum alloy sheets is quite attractive, since undesirable stretcher strain marks, which often appear on the surface of the sheets during cold press-forming, will disappear at high temperature, and furthermore, some aluminum alloys exhibit high-temperature superplasticity at a certain forming speed. In order to determine the optimum condition of press-forming for an aluminum alloy sheet, in the present work, the effect of temperature on the yield locus was experimentally investigated. The yield locus of an aluminum alloy (5083-O) sheet was obtained by performing biaxial tensile tests, using cruciform specimens, at temperatures of 25, 100, 200, 250 and 300 °C at strain rate of 10^{-5} s^{-1} . From the tests, the effect of temperature on the yield locus was investigated. The size of yield locus drastically decreased with increasing temperature. Neither von Mises' criterion or Hill's can well predict the shape of the yield locus of this sheet metal. Instead of these quadratic yield functions, the yield criterion of Logan-Hosford a better choice for the accurate description of biaxial stress-strain responses at a high temperature.

Keywords : Aluminum Alloy, Yield Locus, Biaxial tensile Test, Warm Forming, Yield Criterion

1. 緒 言

アルミニウム - マグネシウム合金は高い強度を有し耐食性が優れ、海水や工業汚染雰囲気に耐え溶接性が優れているなどを活かして、自動車や船舶の外板などに使用されつつある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかしこの材料は室温から100 °Cの範囲での成形ではストレッチャーストレインマークを材料表面に誘起し⁽⁴⁾⁽⁵⁾、変形が局所化しやすく、成形性が鋼板より劣っている。このようなアルミニウム合金の成形性の悪さを克服する一つの有力な方法として温間加工がある⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。

著者らは既報⁽¹²⁾⁻⁽¹⁶⁾にて Al-Mg 合金5083板の種々の変形温度と速度における単軸引張り試験、平頭張出し試験、平頭深絞り試験を行い、機械的特性や成形性に及ぼす温

度および成形速度の影響について報告を行った。単軸引張り試験では、変形抵抗の温度・速度依存性挙動を明らかにした。張出し試験では、成形限界線図 (FLD)、深絞り試験においては、限界絞り比 (LDR) に及ぼす加工温度と速度の影響を初等解法により予測する方法を提案した。この解析においても降伏関数は Logan-Hosford の式を用い、温度及び速度が変化しても降伏曲面の形状は変化しないものとして用いてきた。近年、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。温間加工での高精度の解析を行うためには、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要であり、加工温度及び速度における降伏曲面を調査することが重要である。しかし、温間での実験はその困難さもあり面内2軸応力場での降伏条件式や塑性流動則の

* 学生課実験実習第二係
* * 商船学科5年
* * * 電子機械工学科
* * * * 商船学科

厳密な実験検証と定式化ははまだ未開拓の分野である。

室温での薄板材料の2軸応力試験法としては、従来、円管が多く用いられてきたが⁽¹⁷⁾、十字形試験片の2軸引張り試験法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾や接着積層ブロック材の2軸圧縮試験法⁽²⁰⁾が提案され報告されている。

本研究では、A5083薄板の十字形試験片を用い、変位制御にて二軸引張り試験を室温から300 の種々の温度にて行い、温間における降伏挙動、塑性変形挙動におよぼす温度の影響について調査し代表的な降伏関数と比較し、実験結果との妥当性について検討を行った。

2. 材料および実験方法

実験に供した材料はAl-Mg合金A5083P-O、板厚1mm、平均結晶粒径7μmを使用した。この材料の化学組成をTable 1に示す。試験片はFig. 1に示す十字形とし応力測定部を30×30mm、腕部には変形による拘束を緩和するために10mmごとにスリットをワイヤ放電加工機にて作成した。

二軸引張り試験機はFig. 2に示すように水平方向に設置された二対のストローク100mm容量49kNの油圧アクチュエータで構成されている。また、互いに向き合っているアクチュエータの変位は等変位機構(6本のロッドからなるパンタグラフ機構)により等しくなりクロスヘッド変位が常に同軸上で試験中試験片の中心が中央部に安定して静止する構造になっている。制御は油圧サーボシステムにより試験片取り付け時には荷重制御とし、試験開始後は試験片近傍に設置した変位変換器の出力によ

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.04	0.04	Tr	0.04	4.58	0.11	Tr	0.01

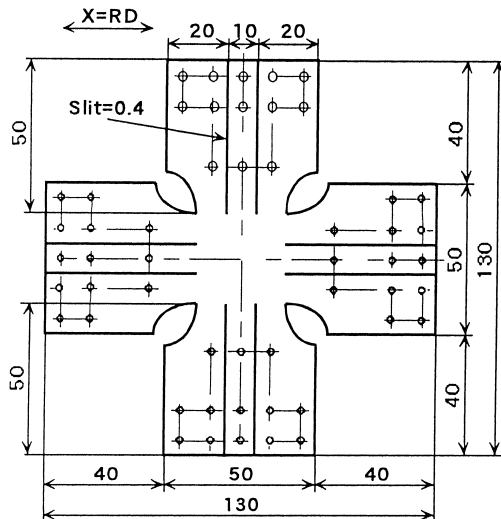


Fig. 1 Cruciform specimen for biaxial tensile test (in mm)

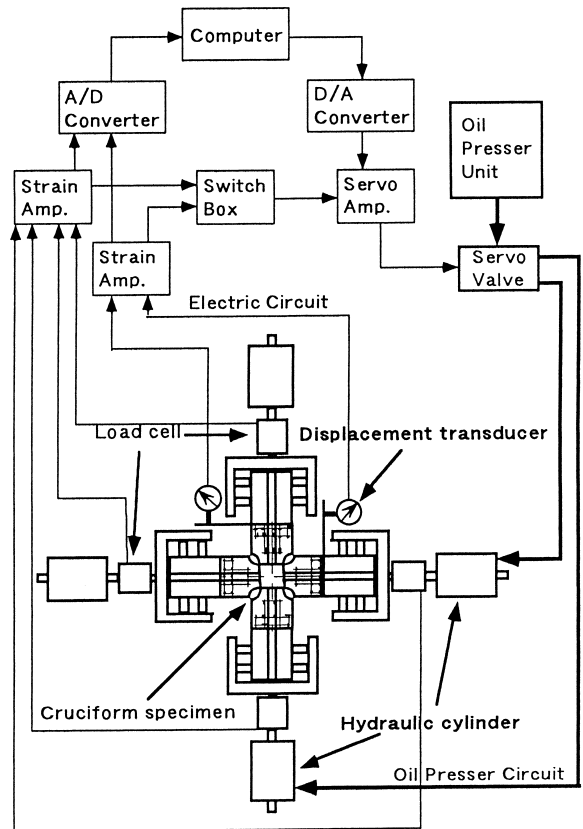


Fig. 2 Schematic illustration of testing apparatus for biaxial tension

り速度制御としている。制御系統図の電気系統と油圧系統をFig. 2に示す。試験片の取り付けはロードセル前に取り付けられた三分割されたチャックに試験片腕部を全てチャッキングしチャック部は試験片の拘束を緩和するようにスライド式ベアリングを装備している。試験片の加熱は温風式恒温槽を使用しドライヤーにて予熱を行い恒温槽入口に設けたヒーターにて試験片表面の温度を制御している。

試験条件は中央部に恒温槽を設け試験片の温度を室温、100、200、250及び300 の5条件に制御した。試験速度は圧延方向(RD:Rolling Direction)をX軸方向とし0から0.003mm・sec⁻¹の間に両軸(X:Y)の速度を種々に制御し降伏時の応力比がX:Y=(0:4),(1:4),(2:4),(3:4),(4:4),(4:3),(4:2),(4:1),(4:0)となるようにした。ひずみの計測は変位変換器から得られたデータを試験片表面にスタンプした2mm格子の試験前と試験後のひずみに換算して用いた。検証のために試験中には試験片上部より格子をCCDカメラにより撮影したが変位変換器とほぼ同じ値が得られた。弾塑性有限要素法により試験片中央部の応力分布およびひずみ分布についても解析を行ったが、試験片中央部はほぼ一樣に変形することも確認した。

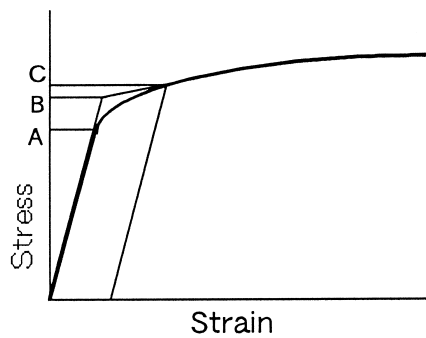


Fig. 3 Definition of yield point

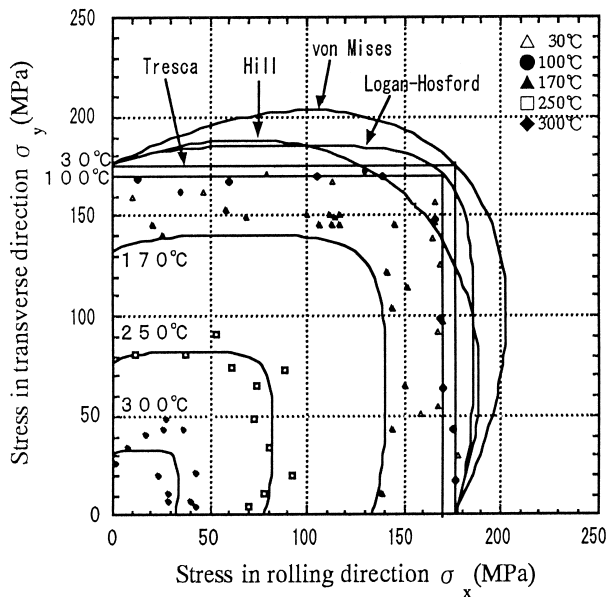


Fig. 5 Comparison of experimental yield loci and predicted results by the von Mises, Hill, Tresca and Logan-Hosford criteria under biaxial stress condition for Al-Mg alloy sheet

3. 実験結果と考察

3.1 降伏点の定義

降伏点は室温及び100 °C では顕著な降伏段を示すが高温になると降伏の判断が困難になる。降伏点の定義には Fig. 3 の応力 - ひずみ曲線に示すような3種の方法がある⁽²¹⁾。

- A : 応力とひずみの比例関係がなくなる点。
- B : 外そう法によって得られる点。
- C : 一定の大きさの永久ひずみが生じる点。

本研究では図の A 点の比例関係がなくなる点を降伏点と定義して用いた。

3.2 ひずみ経路

ひずみ経路は制御信号に対して正確に進展をしていた。ひずみ経路により差異はあるが全ての経路に対しての各温度の最大塑性ひずみ点 (降伏後の塑性ひずみ ϵ^p) は、

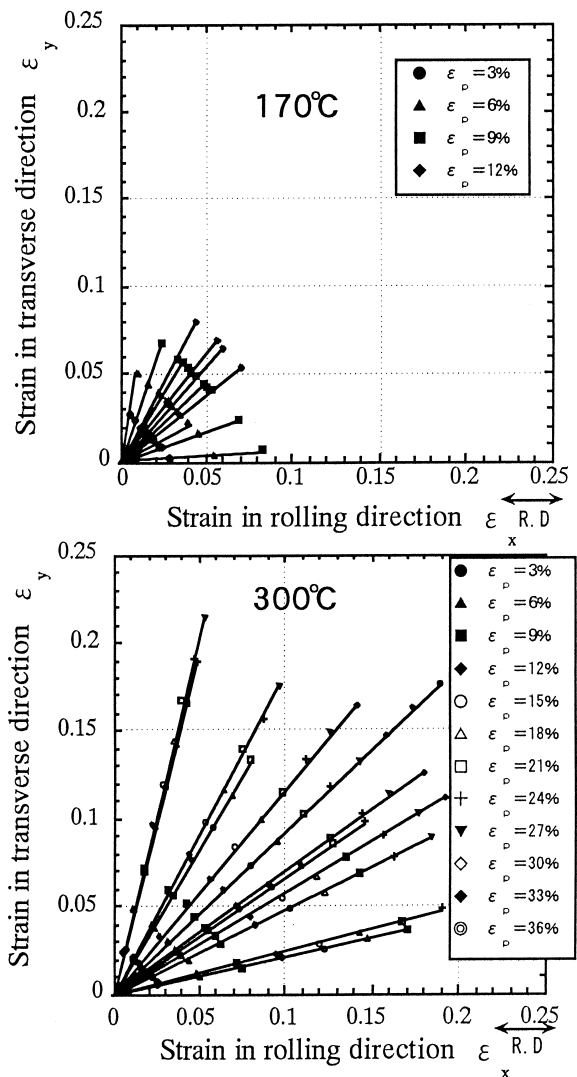


Fig. 4 Measured strain paths at temperatures of 170 and 300

室温及び100 °C においては0.06までであったが温度上昇とともにひずみも増大し170 °C (試験温度は熱電対により制御したが200 °C のものはサーモグラフィによる検証の結果170 °C であった) では0.09, 250 °C では0.15, 300 °C では0.27であった。このようにひずみからもこの材料は温間プレス成形により室温での難加工材の問題点が解消できることが理解できる。Fig. 4 に170 °C と300 °C のひずみ経路を示す。また、これらのひずみ増分よりひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を求めたところ 10^{-5} s^{-1} であった。

3.3 降伏関数と降伏曲面

Fig. 5 に室温, 100, 170, 250 °C 及び300 °C の実験によって得られた降伏曲面を示す。この図に見られるように降伏曲面は温度上昇とともに顕著な温度依存性を示している。

次に von Mises, Tresca, Hill 及び Logan-Hosford⁽²²⁾ の降伏関数との比較を行った。平面応力場における von Mises の降伏関数は、

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

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_x \epsilon_y} \quad (2)$$

Tresca の降伏関数は,

$$\bar{\sigma} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_x \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_{\max} = \epsilon_x \quad (4)$$

Hill の降伏関数は,

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \frac{2R}{1+R} \sigma_x \sigma_y \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{2R+1}} \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \frac{2R}{1+R} \epsilon_x \epsilon_y} \quad (6)$$

最後に fcc 金属の変形挙動を比較的うまく表せると言われる Logan-Hosford の降伏関数は,

$$\bar{\sigma}^M = \frac{1}{1+R} (\sigma_x^M + \sigma_y^M) + \frac{R}{1+R} (\sigma_x + \sigma_y)^M \quad (7)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{(\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y)}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

ここで, M は材料定数で fcc 金属にたいして推奨されている $M = 8$ を用いた。 R は γ 値 (塑性ひずみ比, Lankford 値) で, 試験片に引張り方向の伸びひずみ ϵ_l が与えられると, 板幅方向及び板厚方向にそれぞれ ϵ_b , ϵ_t が生じる, そのときの次の比

$$\gamma = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t} = \frac{\log_e (b_0/b)}{\log_e (t_0/t)} = \frac{\log_e (b_0/b)}{\log_e (bl_0/b_0l_0)} \quad (9)$$

の値となるものをいう。すなわち板厚異方性を示す量のことである。室温では γ 値 (圧延方向 0, 45, 90 の平均値) は $R = 0.56$ であったが, γ 値にも温度依存性があると思われたので, 250 および 300 にて調査した結果, 250 では $R = 0.74$, 300 では $R = 0.80$ であり, 温度上昇に伴い γ 値も大きくなることがわかった。 Fig. 6 に計測結果を示す。計算ではこれらの γ 値を用いた。

Fig. 5 の室温のものについてはこれらの降伏関数を用いた降伏曲面を示す。この図より von Mises および Hill の降伏曲面は本研究で使用している Al-Mg 合金とは合致

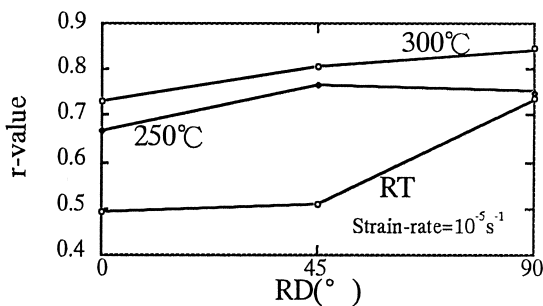


Fig. 6 Measury-values at temperatures of RT 250 and 300

していないことがうかがえる。 Fig. 7 には, 単軸引張り試験の応力 - ひずみ曲線 (図中の実線) と本実験より得られた二軸引張りにおける相当応力 - 相当ひずみ曲線を種々の降伏関数を用いて計算したものを比較して示す。相当応力・相当ひずみとは多軸応力状態における応力 - ひずみ成分を計算式によりそれに相当する単軸応力 - ひずみに換算したもので, 等塑性ひずみ仕事量の応力 - ひ

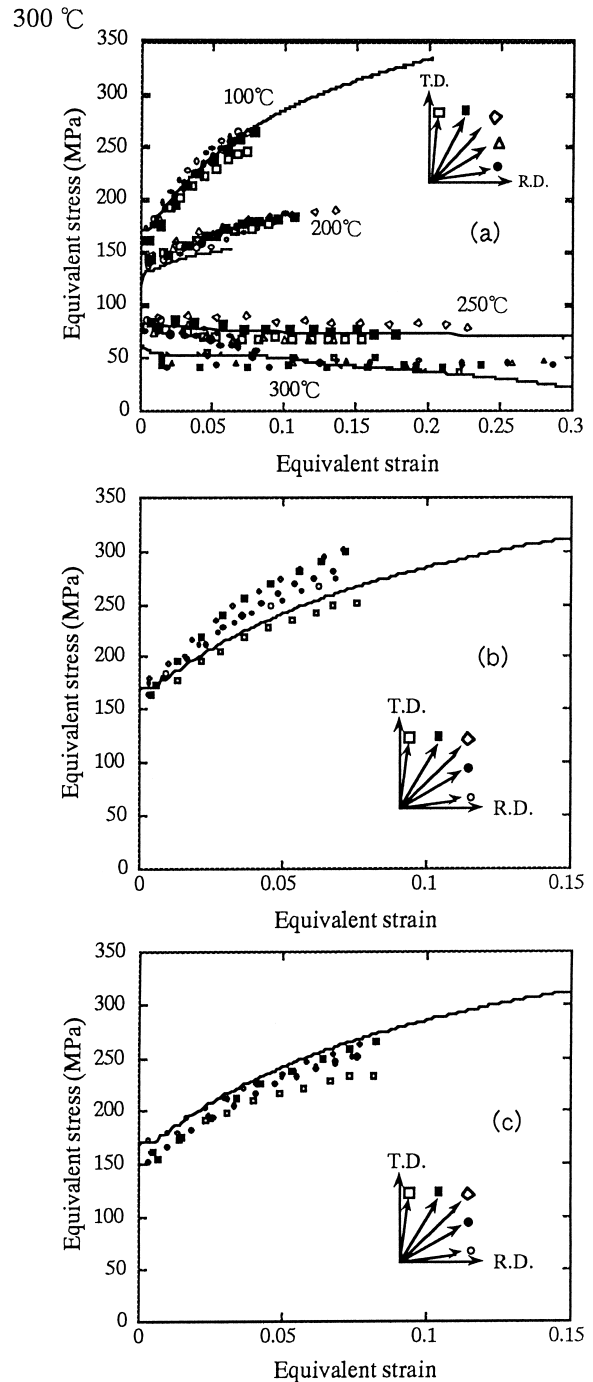


Fig. 7 Comparison of measured stress-strain curves under uniaxial stress condition and predicted results by the Logan-Hosford (a) at various temperature, Hill (b), and von Mises (c) at temperature of 100 criteria under biaxial stress condition

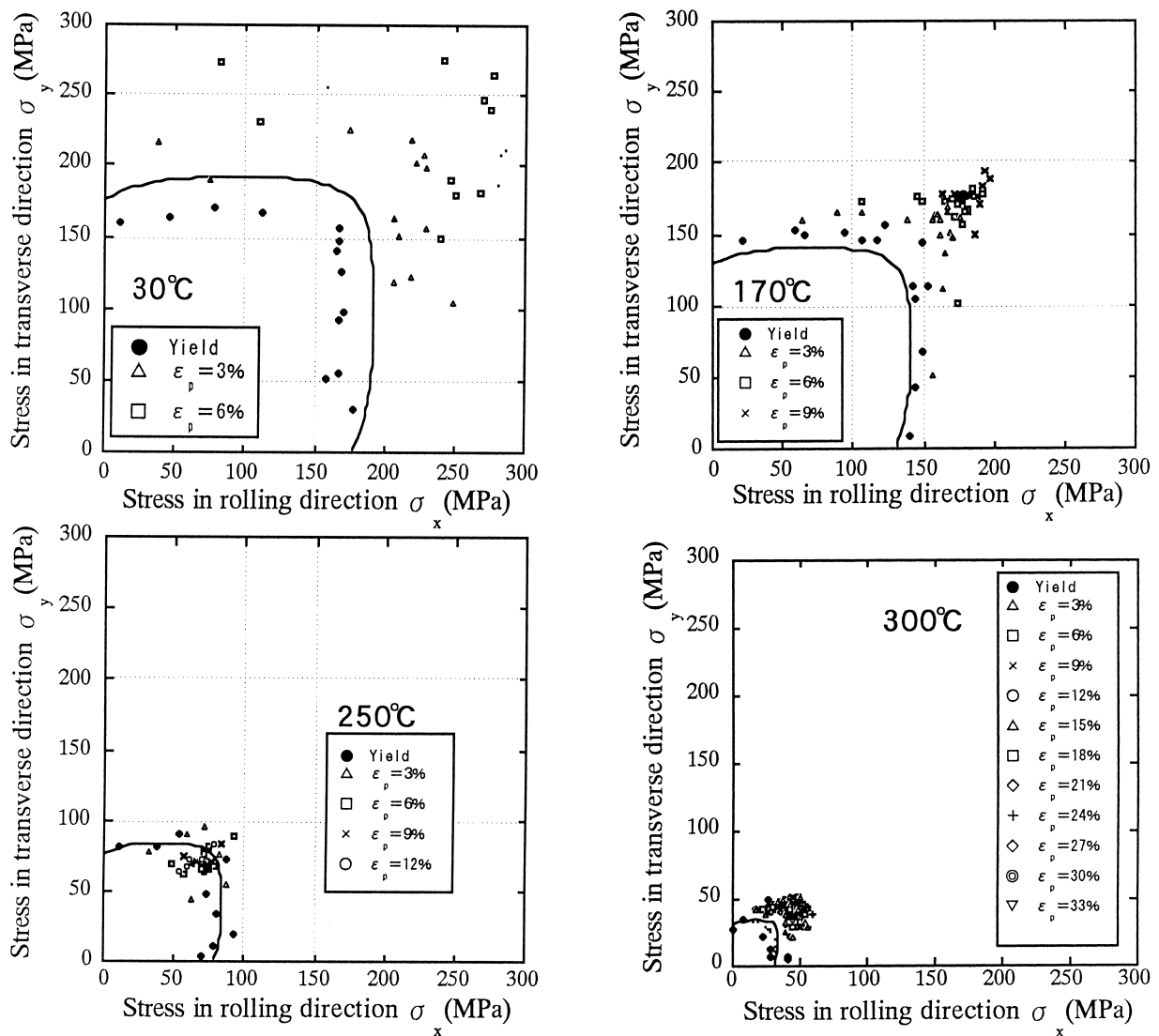


Fig. 8 Effect of temperature on equal plastic works at temperature of 30 to 300

ずみ関係を比較するために用いる。計算では各温度における γ 値を用いた。(a)には Logan-Hosford にて100, 200, 250および300, (b)には Hill, (c)には von Mises にて100 の降伏関数で計算した結果を示す。これらの図からも種々の温度においても Logan-Hosford の降伏関数を用いた場合が本研究で用いた Al-Mg 合金板材においてはよく合致していることがわかる。また, Fig. 5 にはこの計算より得られた Logan-Hosford の降伏曲面を 170, 250および300 についても示している。

3.4 等塑性ひずみ点

等塑性ひずみ点は降伏後の等塑性仕事量の点を示し, 温間加工における重要な多軸応力状態での塑性域における変形挙動を示したものである。Fig. 8 に室温, 170, 250及び300 における降伏後の変形挙動を示したものを示す。この計測においても従来はひずみゲージを用いた研究のみであったため降伏後の変形挙動を破断まで計測したものはない。本研究においては降伏後の等塑性ひず

み点は室温および100 では6%, 170 では9%, 250 では15%, 300 では30%にもおよび大変形についても計測調査を行うことができた。この図に見られるように室温においても6%の加工しか行えず応力も300MPa にもおよび300 では30%の加工に対して室温の1/6の50MPa の応力で行える。このことからこの材料は温間加工により成形性を大きく向上させることができるといえる。

3.5 有限要素解析

汎用有限要素解析コード MARC にて温間における等二軸引張り条件によるシミュレーションを行った。温度は室温, 100, 200および300, 解析要素は試験片の1/4モデルを三角形6接点のメッシュ (Fig. 9) にて要素数5100, 接点数10541にて各温度における γ 値も考慮して行った。終了条件は亀裂もしくは破断が起こる寸前までとし, 解析時間は約1時間であった。しかし, MARC による解析では降伏関数及び構成式に自由性がないため Logan-Hosford の降伏関数及び温度とひずみ速度を考慮

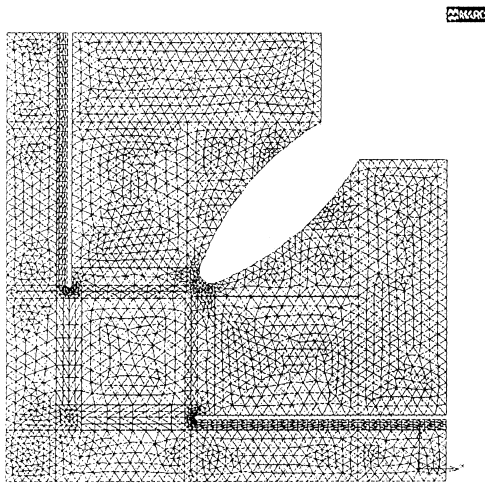


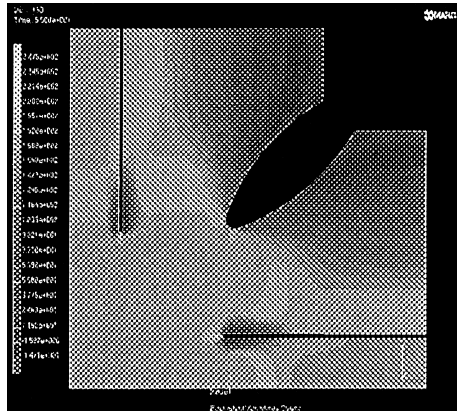
Fig. 9 FEM analysis model for a cruciform specimen

した構成式が用いられないため、結果は室温から200 までは実験結果とほぼ同じ結果が得られたが、超塑性を発生する300 の解析において応力は実験と同じ結果であるがひずみが進展しないという問題が生じた。応力とひずみの100及び200 の解析結果を Fig. 10 に示す。

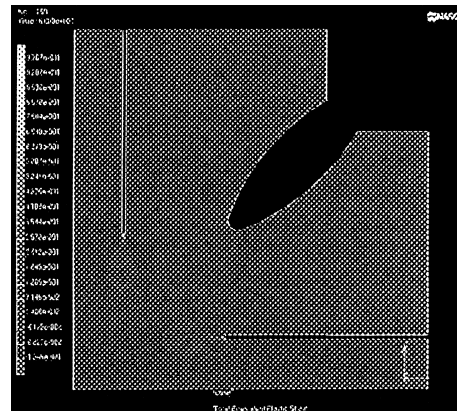
4. 結 言

Al-Mg 合金板の温間プレス成形加工における高精度なシミュレーションを行うための温間における平板十字形試験片を用いた二軸引張り試験を変位制御にて種々の温度で行い温間における降伏曲面および等塑性ひずみ曲面を調査・検討を行った。得られた主な結果は次のとおりである。

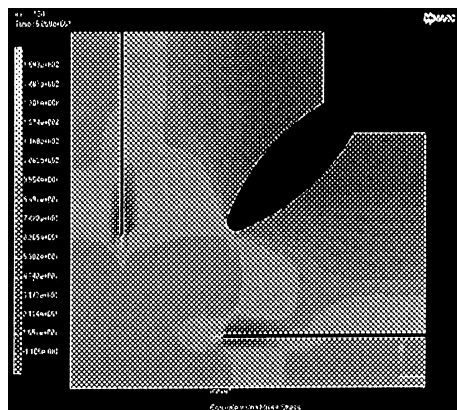
- 1) Al-Mg 合金板の温間における降伏曲面及び等塑性ひずみ曲面を精度よく示すことができた。
- 2) 降伏曲面及び等塑性ひずみ曲面は顕著な温度依存性を示す。
- 3) Al-Mg 合金板は温間においても Logan-Hosford の降伏関数が最もよく合うことがわかった。
- 4) 実験結果より、 γ 値が温度とともに大きくなる傾向があることがわかり、応力 - ひずみ解析ではそのことも考慮する必要がある。
- 5) 単軸引張り試験のデータより温間加工のシミュレーションに用いる降伏関数を算出でき、高精度な解析を行える有力な結果が得られた。



(a) Stress at 100



(b) Strain at 100



(c) Stress at 200



(d) Strain at 200

Fig. 10 Distribution of equivalent stress and strain for a cruciform specimen subjected to balanced biaxial tension

参考文献

- (1) Vöhring, K.-D. : Proc. 6 th ICTP (1999), 3
- (2) 竹内勝治 : 軽金属, 41 - 11 (1991), 787
- (3) 竹添修 : 神鋼技報, 42 (1992), 49
- (4) Thomas, A. T. : Acta Metall., 14 (1966), 1363
- (5) Amaike, T., Abe, Y. & Suzuki, Y. : Proc. Plasticity '95 (1995), 241
- (6) Shehata, F., Painter, M. J. & Pearse, R. : J. Mech. Work. Technol., 21 (1978), 279
- (7) Ayres, R. A. : Metall. Trans., A, 10 (1979), 849
- (8) Ayres, R. A. & Wenner, M. L. : Sheet Met. Ind., 55 (1978), 1208
- (9) Naka, T. & Yoshida, F. : Metals and Materials, 4 (1998), 464
- (10) Naka, T. & Yoshida, F. : J. Mater. Process. Technol., 89 - 90 (1999), 19
- (11) Naka, T., Hino, R. & Yoshida, F. : Key Engineering Materials, 177 - 180 (2000), 485
- (12) 中哲夫ほか : 平 7 年春塑加議論 (1995), 7
- (13) 中哲夫ほか : 第46回塑加連議論 (1995), 229
- (14) 中哲夫ほか : 第50回塑加連議論 (1999), 41
- (15) 中哲夫ほか : 塑性と加工, 43 - 492 (2002), 66
- (16) 中哲夫ほか : 塑性と加工, 43 - 497 (2002), 551
- (17) Ikegami, K. : Proc. Euromech Colloquim 115, Colloques Inter. du CNRS, Paris, (1982), 201
- (18) 白鳥英亮ほか : 材料, 16 - 165 (1967), 433
- (19) 桑原利彦ほか : 塑性と加工, 39 - 444 (1998), 56
- (20) 戸澤康壽ほか : 塑性と加工, 13 - 138 (1972), 538
- (21) Mair, W. M. & H. L. D. Pugh, NEL Report, 90 (1963)
- (22) Logan, R. W. & Hosford, W. F. : J. Mech. Sci., 22 - 7 (1980), 419

