

# アルミニウム合金板の温間成形における伝熱現象を考慮した変形解析

宅田 裕彦\*

## 1. 研究の目的と背景

アルミニウム合金板は、一般に鋼板に比べて成形限界が低く成形が難しいために、軽量材料としての用途が制限されている。しかし、250°C程度の温間に加熱して成形すると、成形限界が大きく向上することが知られている。この要因には、温間での延性や強度などの材料特性、工具との接触による材料内温度不均一による影響などの種々の因子が考えられる。古くから、円筒深絞りを中心に温間成形に関する研究は行われているが<sup>1-3)</sup>、これらの因子の解析は十分に行われておらず、ただ漠然と成形限界が向上するという事実が実験的に判っているに過ぎない。そのため、アルミニウム合金板の温間成形の実用化が遅れているのが現状である。

本研究では、アルミニウム合金板の温間深絞り成形を、伝熱現象も考慮した有限要素シミュレーションによって数値解析し、温間での成形限界予測を可能にするとともに、最適な成形条件について考察した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

本実験で用いた材料は、厚さ 1mm のアルミニウム合金板 A5182-O 材である。種々の温度での引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 1 に示す。100°Cを超えると顕著に応力値は下がり、伸びは大きくなっていく。真応力-対数ひずみ関係を  $\sigma = F\epsilon^n$  で近似したときの、各温度での  $F$  値および  $n$  値を表 1 に示す。 $r$  値は本温度範囲では、0.7 でほぼ一定であった。

### 2.2 円筒深絞り試験

この板材について、平頭ポンチを用いた平面ダイス円筒深絞り試験を、室温および温間で行った。ポンチ径は 33mm、ポンチ肩半径は 4.5mm である。ダイス径は 35.5mm、ダイス肩半径は 3, 5, 7.5 および 10mm の 4 種類を用いた。潤滑材には石鹼水に二硫化モリブデン粉末を分散させたものを用いた。しわ押え力は 5.9kN 一定で、ポンチ速度は 2.5mm s<sup>-1</sup> であった。温間成形では、ブランクをしわ押えとダイスではさんだ状態で、それらを炉内で 250°C に加熱した後、試験機に装着し、直ちに試験を開始した。ポンチは加熱していない。

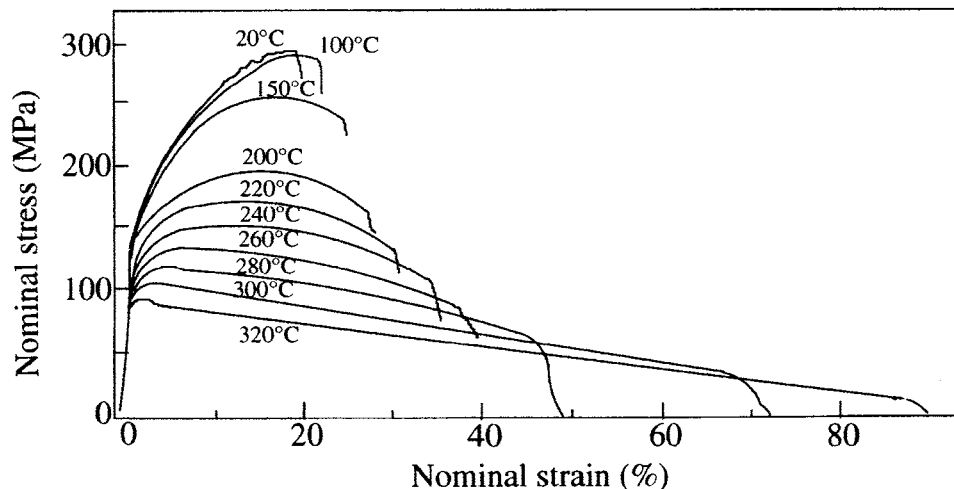


図 1 種々の温度における引張試験から得られた公称応力-ひずみ曲線

表 1 種々の温度における変形抵抗式中の  $F$  値および  $n$  値

Temperature (°C)	20	100	150	200	220	240	260	280	300
$F$ -value (MPa)	700	635	489	296	256	208	165	134	98
Work-hardening exponent, $n$	0.34	0.34	0.27	0.15	0.13	0.10	0.05	0.02	0.00

### 3. 解析方法

#### 3.1 有限要素法

上記の温間深絞り試験を剛塑性および熱伝導有限要素法を用いて解析する<sup>4,5)</sup>。解析では変形および熱伝導のいずれもが軸対称問題として取り扱われる。剛塑性有限要素法の詳細については既報<sup>6)</sup>を参照いただきたい。ここでは、熱伝導のための有限要素法についてのみ記述しておく。

温度場を支配する熱伝導方程式はつぎのように表される。

$$\lambda \left\{ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right\} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ は熱伝導率、 $T$ は温度、 $c$ は比熱、 $\rho$ は密度、 $q$ は発熱率、 $R$ および $Z$ は板に固定された座標、 $t$ は時間である。塑性変形および摩擦による発熱は剛塑性有限要素法から得られる。熱伝達の境界条件は、

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial R} l_R + \frac{\partial T}{\partial Z} l_Z \right) + \alpha (T - T_a) = 0 \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $l_R$ および $l_Z$ は境界面の方向余弦、 $\alpha$ は熱伝達率、 $T_a$ は雰囲気あるいは工具の温度である。工具の温度は一定とし、板材内の温度分布のみを計算する。

有限要素の要素内の温度は形状関数ベクトル  $\{N\}$  を用いて

$$T = \{N\} \{T\} \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\{T\}$ は節点温度ベクトルである。したがって、有限要素法では、式(1)の非定常熱伝導方程式はつぎのように表される。

$$\lambda \left\{ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial \{N\} \{T\}}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \{N\} \{T\}}{\partial Z^2} \right\} - c\rho \frac{\partial \{N\} \{T\}}{\partial t} + \dot{q} = 0 \quad (4)$$

ガラーキン法を適用すると

$$\int_V \{N\}^T \lambda \left( \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial \{N\} \{T\}}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \{N\} \{T\}}{\partial Z^2} \right) dV - \int_V \{N\}^T c\rho \frac{\partial \{N\} \{T\}}{\partial t} dV + \int_V \{N\}^T \dot{q} dV = 0 \quad (5)$$

が得られる。ガウスの発散定理を適用し、式(2)の境界条件を考慮すると、式(5)はつぎようになる。

$$\int_V \lambda \left( \frac{\partial \{N\}^T}{\partial R} \frac{\partial \{N\}}{\partial R} + \frac{\partial \{N\}^T}{\partial Z} \frac{\partial \{N\}}{\partial Z} \right) dV \{T\} + \int_S \alpha \{N\}^T \{N\} dS \{T\} + \int_V c\rho \{N\}^T \{N\} dV \frac{\partial \{T\}}{\partial t} = \int_V \{N\}^T \dot{q} dV + \int_S \alpha \{N\}^T T_a dS \quad (6)$$

時間  $\Delta t$  前の温度、 $T_{t-\Delta t}$ を用いて、最終的につぎのような節点温度の連立一次方程式が得られる。

$$\left[ \int_V \lambda \left( \frac{\partial \{N\}^T}{\partial R} \frac{\partial \{N\}}{\partial R} + \frac{\partial \{N\}^T}{\partial Z} \frac{\partial \{N\}}{\partial Z} \right) dV + \int_S \alpha \{N\}^T \{N\} dS + \int_V c\rho \{N\}^T \{N\} \frac{dV}{\Delta t} \right] \{T\} = \int_V \{N\}^T \dot{q} dV + \int_S \alpha \{N\}^T T_a dS + \int_V c\rho \{N\}^T T_{t-\Delta t} \frac{dV}{\Delta t} \quad (7)$$

#### 3.2 計算で用いられる定数

材料の変形抵抗には表1の数値を用い、測定温度間では線形変化するものとした。比熱  $c$ は  $920 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、密度  $\rho$ は  $2700 \text{ kgm}^{-3}$ 、熱伝導率  $\lambda$ は  $121 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ とした<sup>7)</sup>。

材料と工具との熱伝達率は、別の簡易実験から実測した値  $1400 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ を用いた<sup>8)</sup>。また、材料と空気との熱伝達率は  $40 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ とした。

材料と工具との摩擦係数は0.05とした。

### 4. 結果および考察

室温での深絞り試験における限界絞り比 LDR は、いずれのダイス半径においても2.1以下であった。図2に一例として、ダイス半径7.5mm、絞り比2.4で絞られた試験片を示す。また、この条件での有限要素シミュレーション結果を図3に示す。ポンチ肩部でのくびれの発生および変形の集中が計算されており、破断が予測される。

それに対し、250°Cの温間深絞り試験では、図4の例に示すように、絞り比2.68でもポンチ肩部で破断することなく絞りきれれている。この場合のシミュレーション結果を図5に示す。ブランク断面の変形過程とともに、ブランク内温度分布の推移を示している。ポンチと接した部分が急速に冷却され、ポンチ肩部での変形抵抗の増大がそこでのくびれの発生を抑制している。

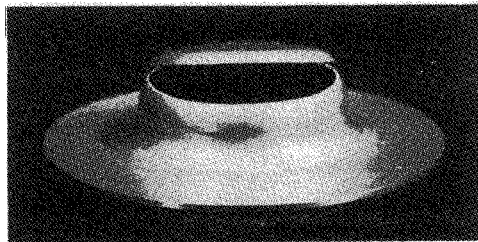


図2 室温での深絞り試験における破断  
( $DR = 2.4, r_d = 7.5\text{mm}$ )

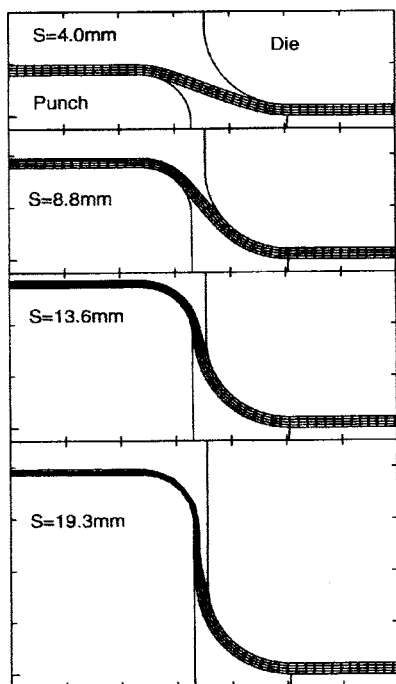


図3 図2の条件に対応する深絞り試験の計算結果

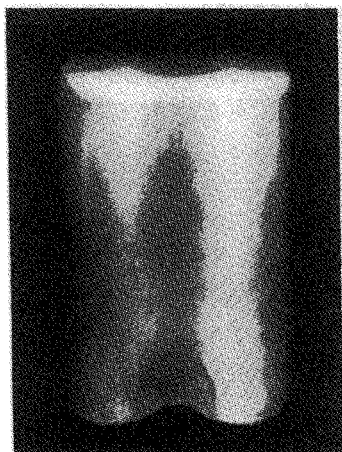


図4 温間深絞り後の試験片  
( $DR = 2.68, r_p = 7.5\text{mm}$ )

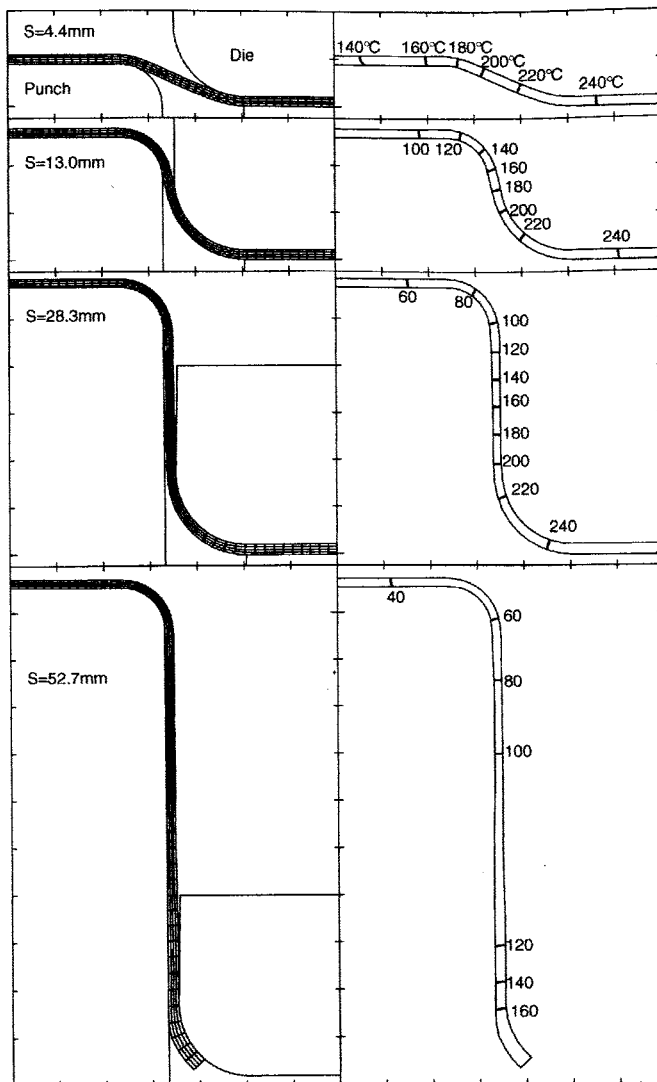


図5 図4の条件に対応する計算結果

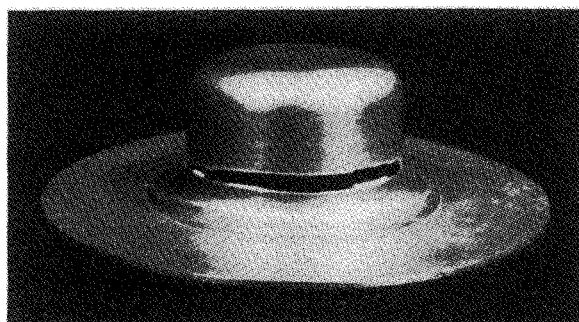


図6 温間深絞り試験における破断  
( $DR = 2.8, r_p = 7.5\text{mm}$ )

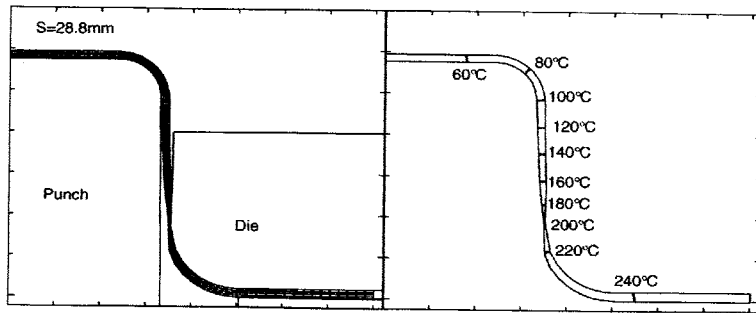


図7 図6の条件に対応する計算結果

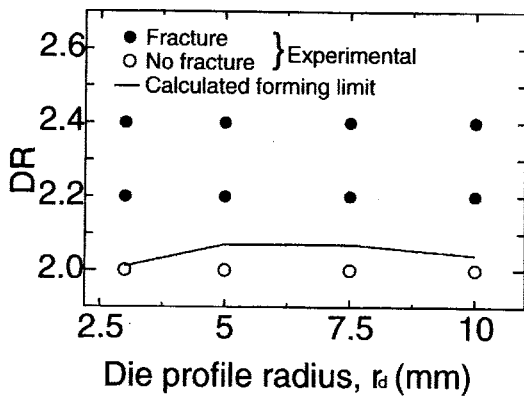


図8 室温での深絞り試験における成形限界

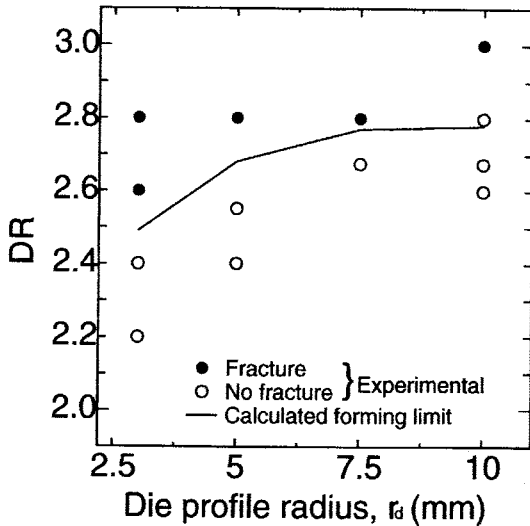


図9 加熱温度 250°C の温間深絞り試験における成形限界

温間深絞りでの破断は、図6のように、ポンチ肩部よりも比較的高温のダイス肩部で生じる。図7のシミュレーション結果はこのことをよく予測している。

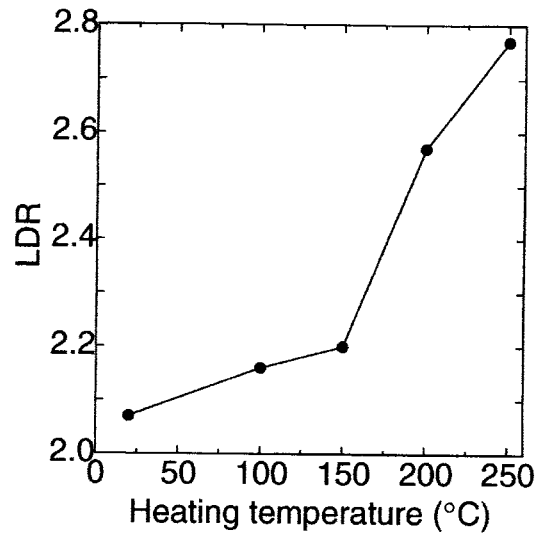


図10 温間深絞り試験における加熱温度と限界絞り比 LDR との関係 ( $r_p = 7.5\text{mm}$ )

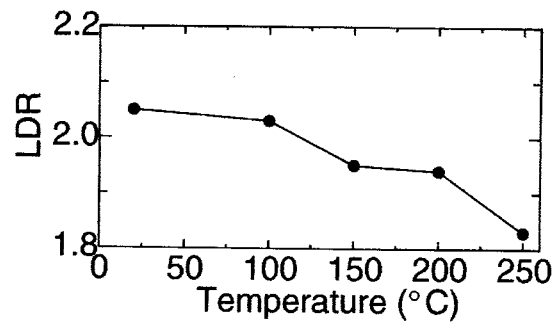


図11 均一温度条件の場合の温度と LDR の関係 ( $r_p = 7.5\text{mm}$ )

図8および図9は、深絞り試験における成形限界に及ぼすダイス肩半径  $r_d$  の影響を、それぞれ室温および 250°C の場合について示している。図中、白丸は破断することなく絞りきれた場合を、黒丸は破断したものを示す。先述のように、室温ではダイス肩半径にほとんど関係なく、限界絞り比は約 2.1 で一定である。一方、250°C の温間深絞り

試験では、限界絞り比はダイス肩半径とともに増加し、半径 10mm で 2.8 に達している。実線で示された有限要素法による予測値は、実験結果と定性的にも定量的にもよく一致している。

以上の結果より、剛塑性有限要素法および熱伝導有限要素法の組み合わせによる本解析法を用いた予測結果の信頼性が証明された。つぎに、本解析法を用いていくつかの数値実験を行ったので、その結果を紹介する。

図 10 は、ポンチ（室温）を除く工具と材料の加熱温度と限界絞り比との関係を示す。温度とともに LDR は上昇するが、150°C までは比較的その効果は小さい。これは図 1 に示されたように 100 ないし 150°C までは変形抵抗の差が比較的小さいことと関連している。成形限界を向上させるためには、200°C 以上に加熱する必要があることがわかる。

図 11 は、ポンチも含めた工具および材料全体を加熱した場合の温度と LDR の関係を示す。これは他の研究者の実験結果<sup>1)</sup>とも一致することであるが、全体が均一温度の場合にはむしろ加熱温度の上昇とともに LDR は減少している。これは温度の上昇とともに、加工硬化指数  $n$  値が低下することと関係するものと考えられる（表 1）。

以上の結果より、高い深絞り性を得るためには、温度差に起因する適当な変形抵抗差が材料内に存在することが不可欠であることがわかる。したがって、ポンチ肩部に接する部分は十分冷却されなければ効果がない。図 12 は、図 5 の場合と同じ条件で、ポンチ速度のみ 4 倍の  $10\text{mm s}^{-1}$  にした場合の計算結果である。ポンチ肩部と接する材料は十分に冷却される時間がないため、くびれが生じており、そのことが確認される。

## 5. 結 言

本研究では、アルミニウム合金板の温間成形が数値解析された。温間での円筒深絞り試験が剛塑性および熱伝導有限要素法の組み合わせによって、シミュレートされた。実験結果との比較により、計算結果は成形限界およびくびれ発生を的確に予測していることがわかった。高い深絞り性は板が部分的にポンチ肩部で冷却される場合の温間成形でのみ得られることが確認された。

## 謝 辞

本研究に助力いただいた豊橋科学技術大学の森謙一郎教授およびスカイアルミ（株）技術研究所に謝意を表す。また、本研究は平成 12 年度（財）天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成（AF-2000006）を受けて行われたものであり、同財団に深謝する。

## 6. その後の応用研究

アルミニウムよりもさらに軽量な金属材料としてマグネシウムが注目されているが、汎用板材である AZ31 を例にとっても、常温ではアルミニウム合金板と比較にならないほど成形性は悪い。しかし、150 から 300°C 程度の範囲で延性が向上することから、この温度域での温間成形の実用化が進められている。また、やはり温度差による変形抵抗の差を利用して、ポンチ部とダイス部に温度差を設けて絞り率を向上させることが行われている<sup>9)</sup>。このようなマグネシウム合金 AZ31 板の温間成形についての解析を上記の手法を用いて行った。

図 13 は AZ31 板の温間での引張試験で得られた応力-ひずみ曲線の一例を示す。マグネシウム合金板の場合は、まだ生産が安定せず、同じ AZ31 の記号を持つ板材であっても、供給元によって品質、すなわち機械的特性値が大きく異なるのが問題であるが、比較的品質の優れたいくつかの板材を試験した結果、変形抵抗式がつぎのような簡易式で近似できることがわかってきた<sup>10)</sup>。

$$\sigma = K \varepsilon^n (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)^m \quad [\text{MPa}]$$

$$K = A / t + B \quad [\text{MPa}]$$

$$n = C \log(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0) + D$$

$$m = E / t + F$$

ここで、 $A$  から  $F$  は定数、 $t$  は無次元化された温度である。上記のアルミニウム合金板の変形解析では、高温でのひずみ速度依存性を考慮していないのが欠点として挙げられるが、マグネシウム合金板ではこのように考慮している。

また、これは軽金属ではないが、オーステナイト系ステンレス鋼板の温間成形についても解析を行った<sup>11)</sup>。図 14 は SUS304 ステンレス鋼板の 0 から 150°C の温度範囲での引張特性値を示す。加工誘起のマartenサイトへの変態が低温側では起こり、顕著に加工硬化するために、このようなわずかな温度範囲で変形抵抗の差が生じる。参考のために図中に黒丸で示した普通鋼板の引張り強さと比較していただきたい。

以上、アルミニウム合金板、マグネシウム合金板およびオーステナイト系ステンレス鋼板の例を記述したが、いずれも変形抵抗の温度依存性が高く、このような大きな依存性があるからこそ、温間成形で材料間に温度差を与えたときの成形性向上の効果が得られる。

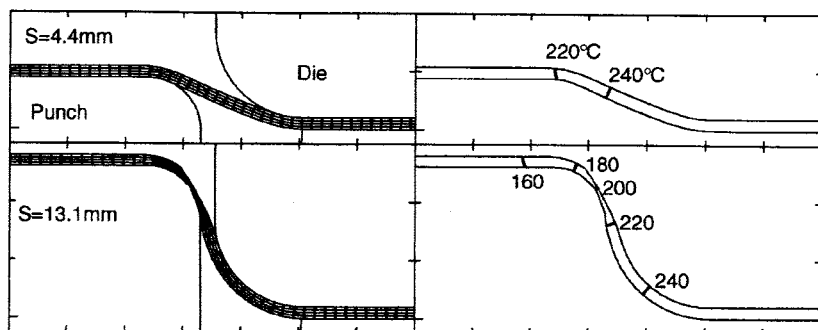


図 12 ポンチ速度が図 5 の条件の 4 倍の温間深絞り試験の計算結果

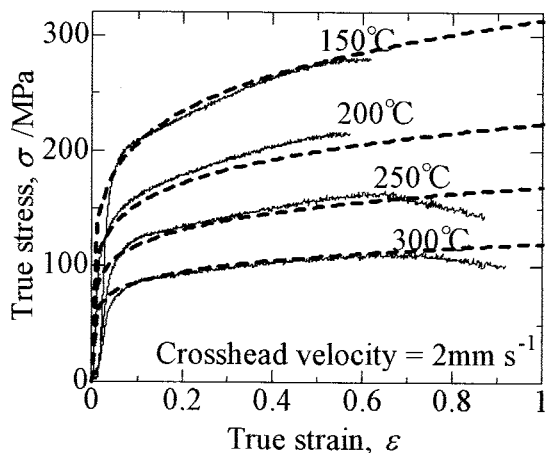


図 13 AZ31 合金板の温間での応力-ひずみ曲線の一例

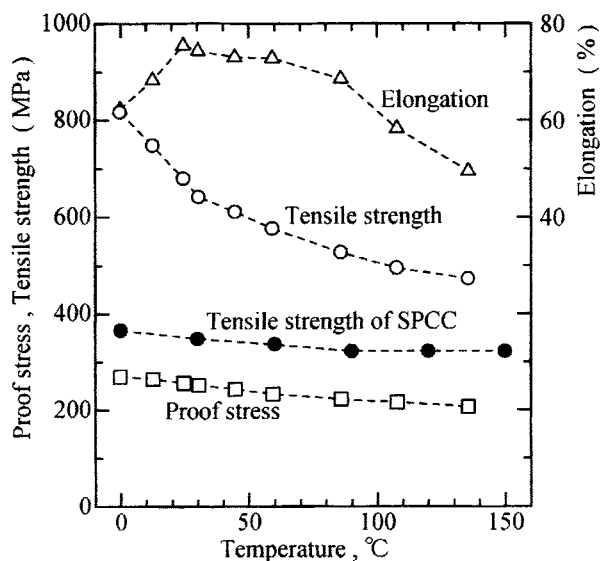


図 14 SUS304 ステンレス鋼板の引張特性

### 参考文献

- 1) 福井伸二：科研報告，24(1948)，209.
- 2) 宮川松男：日本機械学会誌，62(1959)，713.
- 3) 戸澤康寿：塑性と加工，1(1960)，23.
- 4) 森謙一郎：塑性と加工，30(1989)，1481.
- 5) 品川一成・武岡努・森謙一郎・小坂田宏造：塑性と加工，34(1993)，794.
- 6) 宅田裕彦・森謙一郎・広瀬智行・八田夏夫，34(1995)，985.
- 7) 軽金属協会：アルミニウムハンドブック，(1990)，25.
- 8) 阿部祐二：博士論文，金沢工業大学，(1995)，57.
- 9) 例えば 相田収平・田辺寛・須貝裕之・高野格・大貫秀樹・小林勝：軽金属，50(2000)，456.
- 10) 森下貴申・宅田裕彦・木下俊行・白川信彦：第 54 回 塑加連講論，(2003)，53.
- 11) H. Takuda, K. Mori, T. Masachika, E. Yamazaki, Y. Watanabe: J. Mater. Process. Technol., 143-4(2003)，242.