

# 変態誘起塑性を利用した

## 高強度 Dual – Phase 鋼板の温間プレス成形

信州大学 繊維学部 機能機械学科

助教授 杉本公一

(平成3年度研究開発助成 AF – 91004)

### 1. 研究の背景と目的

地球温暖化対策 (CO<sub>2</sub> ガス低減対策) として、自動車業界では車体及び足回り部品の大幅な軽量化による燃費改善を押し進めている。近年開発された残留オーステナイト (γ) の変態誘起塑性 (TRIP) を利用した高延性タイプの 600~1000MPa 級 Dual – Phase 鋼 (TDP 鋼) は、アルミ合金及び繊維強化複合材料 (FRP) とともに車体軽量化の要求を満足させる最良の材料であり、今後使用量の飛躍的な増加が期待されている。しかしながら、現在のところプレス成形性についての研究は少なく、基礎を含めた系統的な研究が急務とされている。

一般に、ひずみ誘起変態はオーステナイトの M<sub>s</sub> 点と M<sub>d</sub> 点の間の温度域で生ずる。TDP 鋼の残留 γ の M<sub>s</sub> 点は -100 ~ 0°C の範囲にあるため、室温以上の温間加工は成形性の向上に対し効果があると予想される。

このような観点から、本研究では、TDP 鋼のプレス成形特性を明らかにすること、及びプレス成形性を一層改善することを目的として、以下の項目を検討する。

- (I) 引張延性及び張り出し・穴抜き成形に対する温間加工の効果
- (II) それらに対する化学組成及び残留 γ 特性 (安定性、体積率) の影響

### 2. 研究成果の概要

#### 2.1 実験方法

残留 γ の体積率及び M<sub>s</sub> 点を広範囲に変化させるため、Si 及び Mn 添加量をそれぞれ 1.0~2.5mass% の範囲で変化させた 7 種類の 0.2% C – Si – Mn 真空溶解冷延鋼板 (板厚 1.2mm) を用いた。供試鋼 (A~G 鋼) の化学組成と残留 γ 特性 (初期残留 γ 体積率 f<sub>γ0</sub>、残留 γ 中の炭素濃度 C<sub>γ</sub> と M<sub>s</sub> 点) を Table 1 に示す。M<sub>s</sub> 点は炭素濃度と Mn 濃度 (添加量の 1.5 倍と仮定した) より計算された推定値である。なお、引張試験と張り出し・穴抜き試験で用いた試験片の残留 γ 特性は少し異なっている。張り出し・穴抜き試験には、比較材として 800MPa 級 (X 鋼: 0.15C-0.25Si-1.70Mn 鋼) 及び 1000MPa 級 (Y 鋼: 0.17C-1.41Si-2.02Mn) の従来タイプの市販 Dual – Phase (DP) 鋼板を用いた。

引張試験片には JIS – 13B 号引張試験片 (平行部長さ 60mm, 幅 12.5mm) を用いた。張り出し及び穴抜き試験に

は、直径 50mm の円盤上試験片を用いた。穴抜き試験片には中央に直径 5mm の切削穴を開けた。いずれの試験もインストロン型引張試験機を使用し、試験温度 -65~350°C、クロスヘッド速度 1mm/min 一定で行った。張り出し・穴抜き成形に用いた金型形状を Fig. 1 に示す。金型形状として、ポンチ肩曲率半径を 3 種類 (8.7R, 3R, 1R) 変化させた。なお、試験片の加熱には一対のストリップ・ヒータ (引張試験)、または環状炉 (張り出し・穴抜き試験) を用いた。

張り出し性は最大張り出し高さ H<sub>max</sub> で評価し、穴抜き性は次式の穴抜き率 λ で評価した。

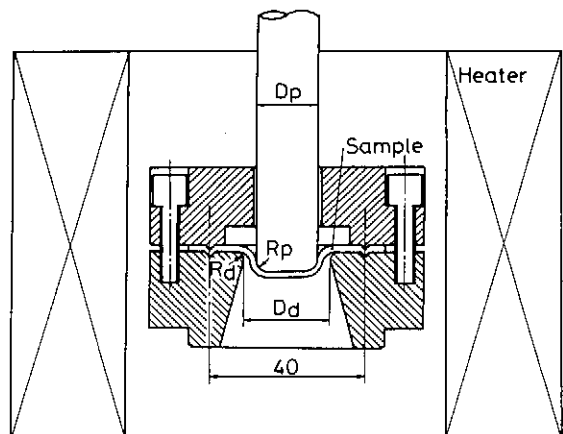
$$\lambda = (d_f - d_0) / d_0 \times 100\% \quad (1)$$

d<sub>0</sub>: 初期穴径、d<sub>f</sub>: 亀裂発生時の穴径

Table 1 供試鋼の化学組成、第 2 相体積率 f、初期残留体積率 f<sub>γ</sub> の炭素濃度 C<sub>γ</sub> と M<sub>s</sub> 点

STEEL	C	Si	Mn	f	f <sub>γ</sub>	c <sub>γ</sub>	M <sub>s</sub>
	mass %			vol %		mass %	
A	0.21	1.51	1.00	17.6	5.8 (7.6)	1.53 (1.51)	-61 (-54)
B	0.20	1.50	1.50	26.1	7.9 (8.6)	1.33 (1.39)	-19 (-37)
C	0.20	1.49	1.99	34.2	13.7 (14.6)	1.23 (1.26)	-13 (-24)
D	0.21	1.50	2.51	36.5	8.0	1.13	-7
E	0.20	1.00	1.50	26.4	7.6 (6.2)	1.36 (1.41)	-30 (-48)
F	0.18	2.00	1.50	27.8	8.5 (7.1)	1.31 (1.29)	-12 (-4)
G	0.19	2.48	1.49	20.4	10.3 (8.5)	1.29 (1.29)	-4 (-4)

( ) 内は張り出し・穴抜き試験片の特性値を示す。



試験片直径: 50 mm      Dp=17.4 mm  
 試験温度: 0°C-400 °C      Rp=1, 3, 8.7mm  
 成形速度: 1 mm/min      Dd=22 mm  
 潤滑剤: Deltaforge 144      Rd=1 mm

Fig. 1 張り出し・穴抜き試験装置

## 2.2 引張延性

Fig. 2に、引張特性の試験温度依存性を示す。また、代表鋼(F鋼)の変形曲線及びひずみ硬化性  $((d\sigma/d\varepsilon)/\sigma = \text{ひずみ硬化率}/\text{変形応力})$  をFig. 3に示す。いずれの鋼においても、全伸びと引張強さに対して温間加工の効果が明瞭に現れる。全伸びは20℃から175℃の温度(以下、ピーク温度 $T_p$ と呼ぶ)で最大となる。その温度依存性は $M_s$ 点の高い鋼ほど大きく現れる。一方、引張強さは、100~

150℃の温度範囲で極小値を示す。Fig. 3から、ピーク温度での大きな全伸びは、高ひずみ域において、ひずみ硬化率が低いながらも維持されることによることがわかる。

Fig. 4にピーク温度 $T_p$ (℃)と残留 $\gamma$ の $M_s$ (℃)点との関係を示す。両者には次式で示される直線関係が認められ、 $M_s$ 点の低い鋼ほど全伸びが最大となる温度が室温に近いことがわかる。

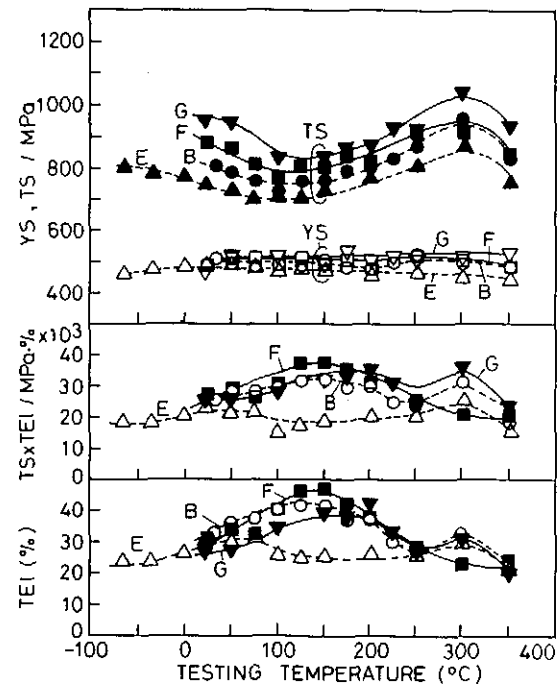
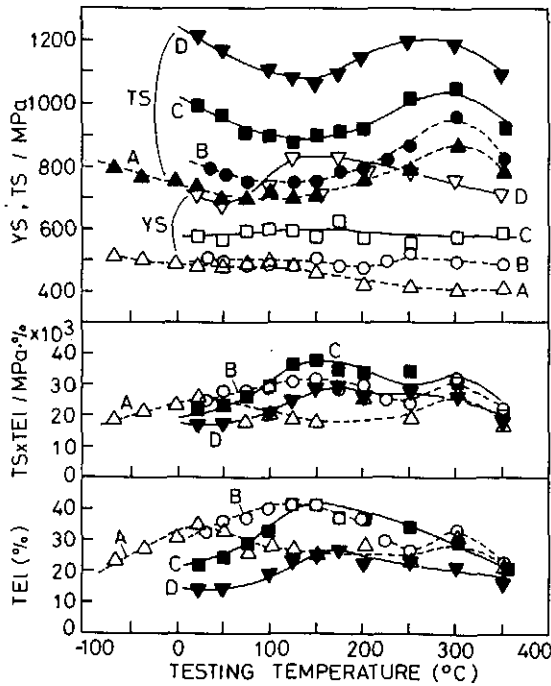


Fig. 2 引張特性の試験温度依存性 (TS: 引張強さ, YS: 0.2%耐力, TE1: 全伸び, TSxTE1: 強度・延性バランス)

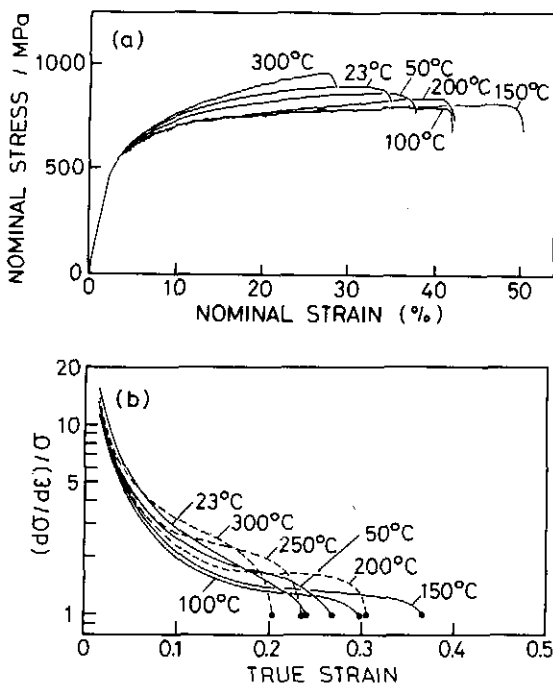


Fig. 3 応力-ひずみ曲線とひずみ硬化性-ひずみ曲線 (F鋼)

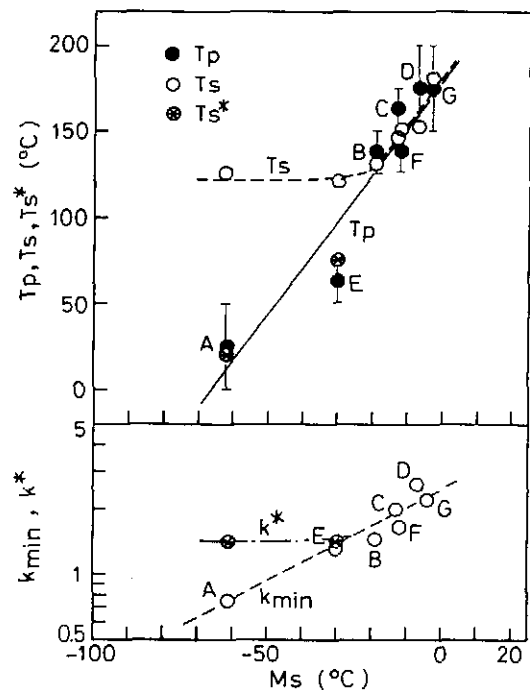


Fig. 4 全伸びのピーク温度 $T_p$ と $M_s$ 点との関係  
 $T_s, T_s^*, k_{min}, k^*$ はFig.6中に定義されている。

$$T_p = 3.04 \cdot M_s + 187 \quad (2)$$

Fig. 5に強度・延性バランス (TSxTE1) と残留 $\gamma$ 量の関係を示す。ピーク温度での強度・延性バランスは残留 $\gamma$ 量が増加するほど増加するが、室温 (23°C) では逆に低下する。23°Cの結果は従来報告されている結果と大きく異なり、残留 $\gamma$ の安定性が強度・延性バランスに対して極めて重要な役割を演ずることを示唆している。

一般に、残留 $\gamma$ 量 $f_\gamma$ はひずみ $\epsilon$  (相当ひずみ) の増加にともない次式で示されるように減少する。

$$\log f_\gamma = \log f_{\gamma 0} - k \cdot \epsilon \quad (3)$$

$k$ はひずみ誘起変態係数であり、ひずみ誘起変態が抑制されるほど低い値を示す。

引張破断材の一樣変形部のひずみと残留 $\gamma$ 量から求めた $k$ 値の温度依存性をFig. 6に示す。この図とFig. 4より、以下のことが認められる。

- (i) いずれの鋼においても、 $k$ 値は100~200°Cの温度域で最小値 $k_{min}$ を生ずる。
- (ii)  $k_{min}$ は、残留 $\gamma$ の $M_s$ 点が低い鋼ほど小さくなる。
- (iii)  $k_{min}$ が現れる温度 $T_s$ は、 $M_s$ 点が低い鋼ほど低くなるが、 $M_s < -20^\circ\text{C}$ では $T_s$ はほぼ一定になる。

以上をまとめると、

- (1) 温間加工による全伸び及び強度・延性バランスの増加

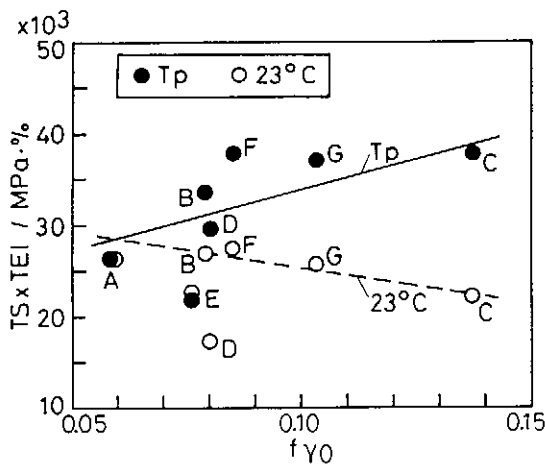


Fig. 5 強度・延性バランスと初期残留 $\gamma$ 体積率との関係

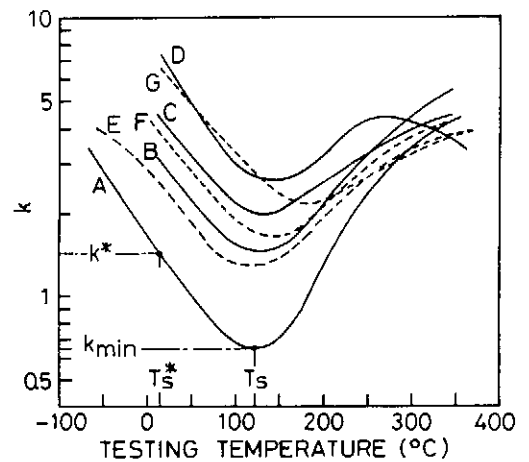


Fig. 6  $k$ 値の試験温度依存性 (引張変形)

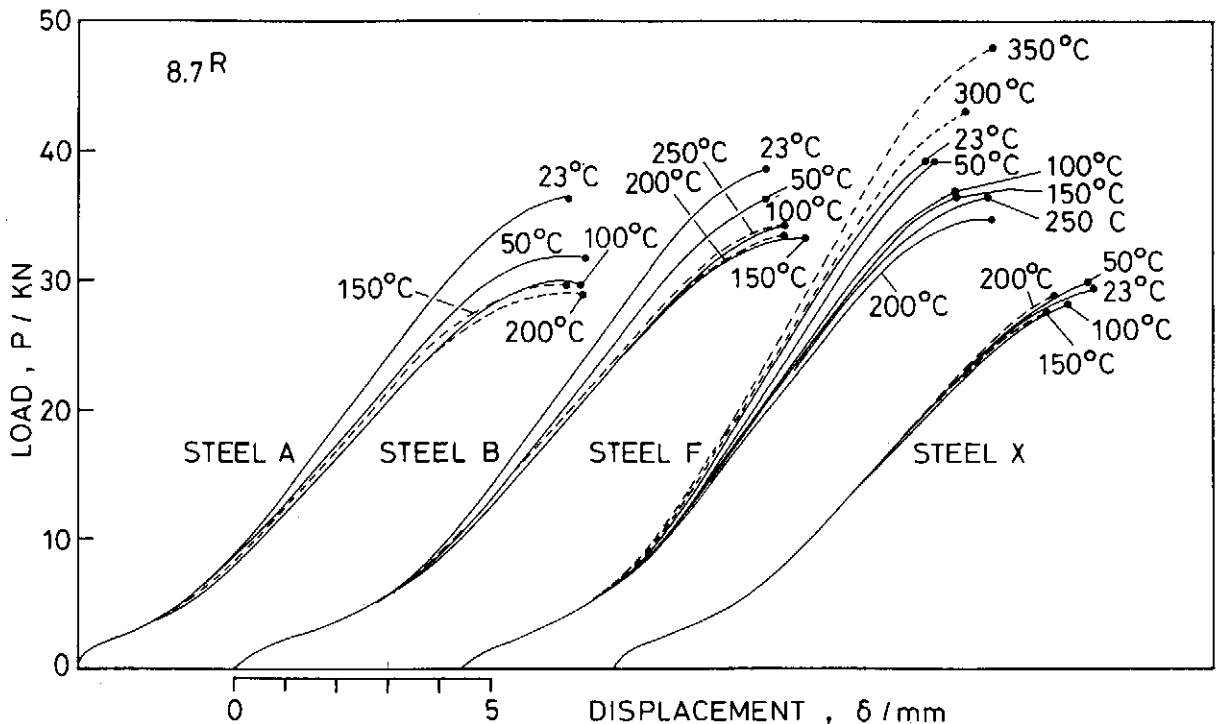


Fig. 7 張り出し試験の荷重-変位曲線の代表例

は、高ひずみ域において残留 $\gamma$ が適度にひずみ誘起変態することから生ずる。

(2) 最適温間加工温度は、残留 $\gamma$ の $M_s$ 点によって決定される。

(3) 室温での全伸びは、残留 $\gamma$ 量を増加させるよりその $M_s$ 点を低くすることが有効である。

### 2. 3張り出し・穴広げ性

Fig. 7に張り出し試験（ポンチ肩曲率半径：8.7R）の荷重-変位曲線を示す。また、Fig. 8, 9に最大張り出し高さ $H_{max}$ 及び穴広げ率 $\lambda$ の試験温度依存性を示す。

張り出し性は全伸びと同様に試験温度によって大きく変化し、 $M_s$ 点の高い鋼ほど顕著に現れる（Fig. 7, 8）。また、ポンチ肩曲率半径が大きいほどその試験温度依存性は大きい。球頭ポンチ（8.7R）の場合についてみると、 $H_{max}$ の最

大値は引張強さの増加に伴わずかに低下する（Fig. 10）が、 $M_s$ 点が高い鋼では室温（23℃）での $H_{max}$ の低下が著しい。 $H_{max}$ のピーク温度は、50~225℃の温度範囲で得られる。

穴広げ率 $\lambda$ も $H_{max}$ と同様な試験温度依存性を示す（Fig. 9）が、 $M_s$ 点が高い鋼において $\lambda$ は全体的にかなり低下することが認められる。この低下は残留 $\gamma$ 特性の他に、高い変形強度にも起因していると考えられる。

Fig. 11に全伸びと $H_{max}$ （8.7R）のピーク温度 $T_p$ の比較を示す。ピーク温度は張り出し成形の場合、引張変形に比較して20~50℃高く現れる。これは、2軸引張によって発生する負の高い静水圧に起因していると考えられる。

Fig. 12に成形限界線図（破断ひずみ）を示す。 $M_s$ 点が高いA, B, E鋼の限界破断ひずみは従来の800MPa級DP鋼

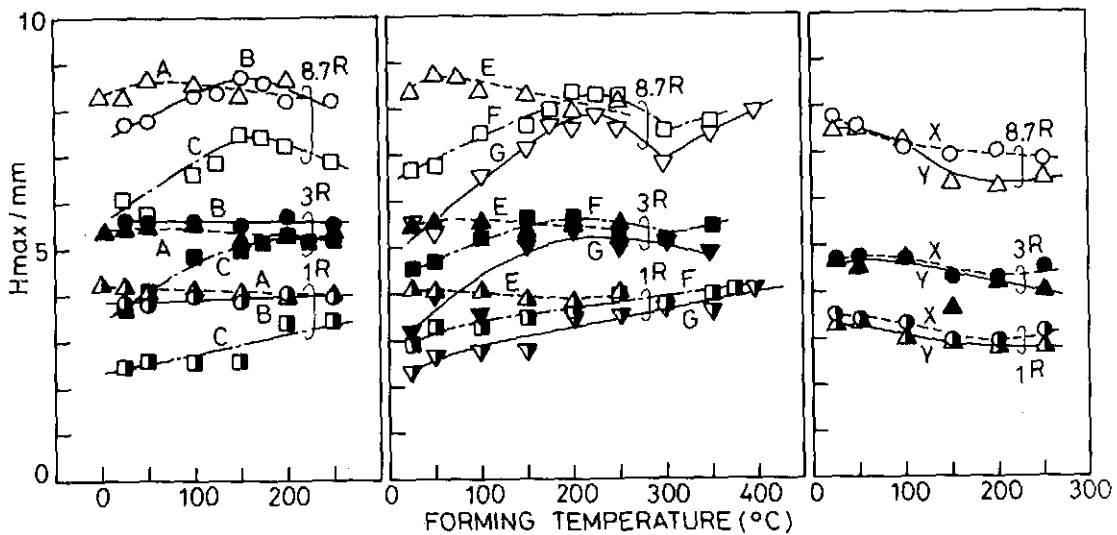


Fig. 8 最大張り出し高さ $H_{max}$ の試験温度依存性（ポンチ肩曲率半径：1, 3, 8.7<sup>R</sup>）

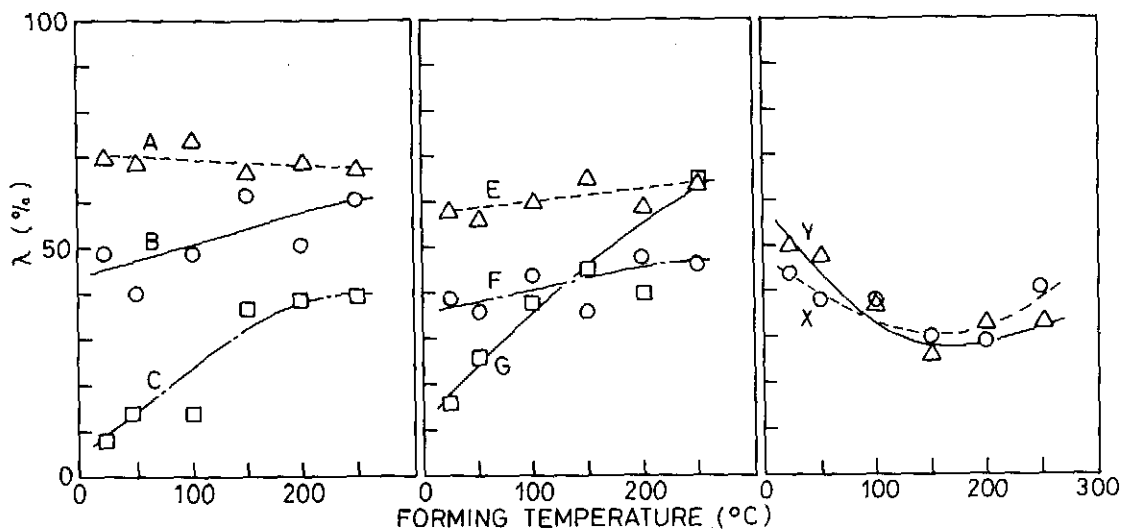


Fig. 9 穴広げ率 $\lambda$ の試験温度依存性（ポンチ肩曲率半径：3<sup>R</sup>）

(X鋼) よりかなり大きい、 $M_s$ 点の高いC, F, G鋼ではピーク温度では良好であるものの、室温(23°C)では2軸引張及び平面ひずみ領域で破断ひずみがかなり低くなっていることが認められる。張り出し試験片(3R)の平坦部において、(3)式にしたがってk値を測定したところ(Table 2)、F, G鋼の張り出し成形の23°Cにおいてk値が極めて高いことが認められた。このことから、F, G鋼の23°C張り出しで破断ひずみが特に小さくなった理由として、F, G鋼の残留 $\gamma$ の $M_s$ 点は高く、かつ負の高い静水圧が作用したため、ひずみ誘起変態が変形初期にはほぼ終了したことが考えられる。

以上をまとめると、

(1) 張り出し性及び穴拡げ性は温間加工によって改善され

るが、それらの成形限界ひずみは全伸びから予想されるほど大きくない。張り出し性の最適加工温度は球頭ポンチの場合、全伸びのそれより20~50°C高い。

(2) 残留 $\gamma$ の $M_s$ 点が高い鋼では、残留 $\gamma$ 量が多く含まれているにもかかわらず、室温での成形性の低下が著しい。これは、プレス成形性に対して残留 $\gamma$ の安定性が極めて重要であることを示唆している。

### 3. おわりに

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団(研究開発助成)の補助を受けてなされたものであることを付記し、ここに深甚なる感謝を表します。

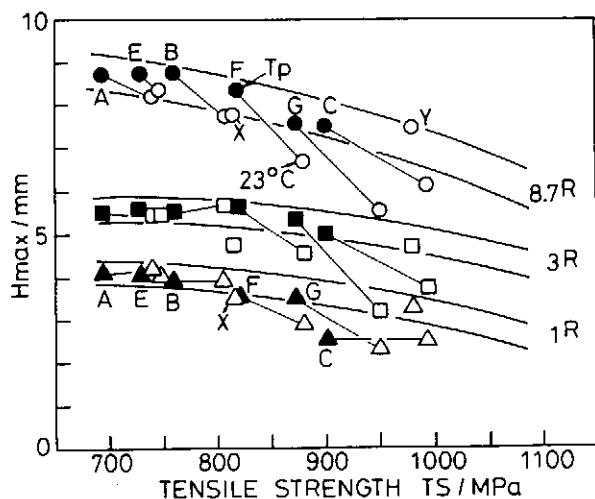


Fig. 10 最大張り出し高さ $H_{max}$ と引張強さの関係

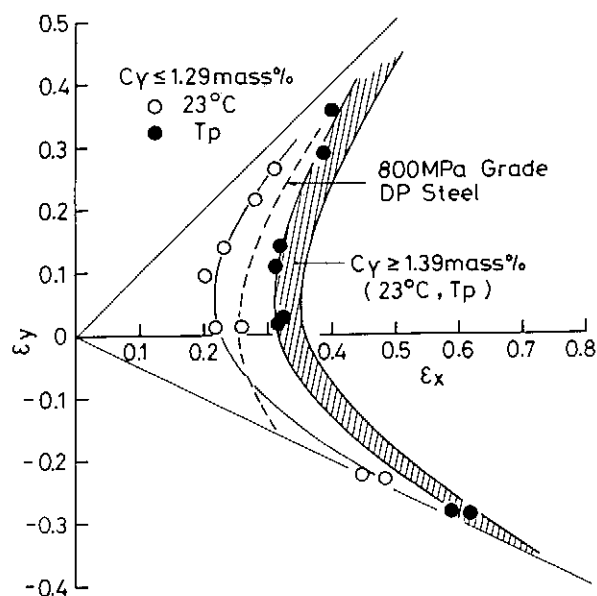


Fig. 12 成形限界線図(破断ひずみ)

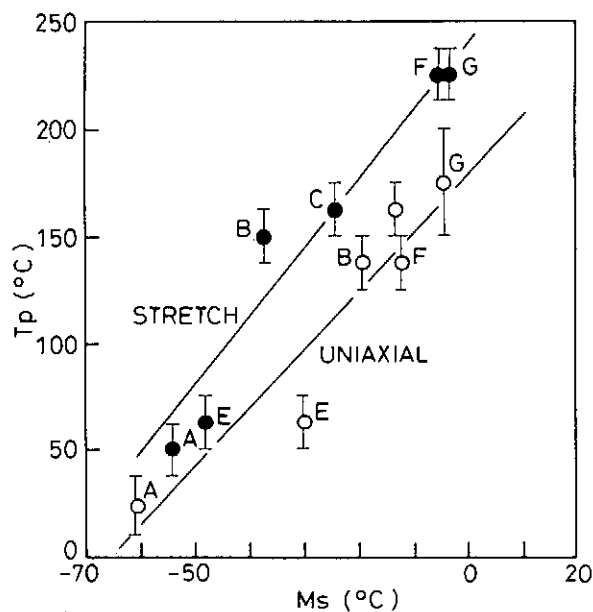


Fig. 11 引張変形と張り出し成形のピーク温度と $M_s$ 点との関係

Table 2 張り出し変形(Stretch)と引張変形(Uniaxial)のk値の比較

Steel	Stretch		Uniaxial	
	23°C	150°C	23°C	150°C
A	7.5	1.7	1.3	0.7
B	5.0	0.7	2.9	1.4
C	-	1.2	4.2	2.0
E	6.3	0.9	2.3	1.3
F	14.1	0.6	3.8	1.7
D	19.3	1.6	6.2	2.2

#### 4. 発表論文

- (1) 杉本公一、臼井 登、小林光征：変態誘起塑性 (TRIP) 型複合組織鋼の延性と残留オーステナイトの安定性、日本機械学会講演論文集、No.910 - 71、Vol.A (1991)、pp.79 - 81.
- (2) 杉本公一、臼井 登、小林光征、橋本俊一：TRIP型複合組織鋼板の延性に対する残留オーステナイトの体積率と安定性の影響、鉄と鋼、第78年、第9号 (1992 - 9)、pp.1480 - 87.
- (3) 杉本公一、小林光征：変態誘起塑性 (TRIP) 型高強度複合組織鋼板の高延性化とそのメカニズム、材料とプロセス (CAMP - ISIJ)、Vol.5 (1992)、pp.1843 - 1846.
- (4) 杉本公一、小林光征、臼井 登：TRIP型複合組織鋼の温間張り出し成形、材料とプロセス (CAMP - ISIJ)、Vol.5 (1992)、p.1895
- (5) K.Sugimoto, N.Usui, M.Kobayashi and S. Hashimoto : Effect of Volume Fraction and Stability of Retained Austenite on Ductility in TRIP - aided Dual - phase Steel Sheets, ISIJ International, Vol.32, No.12 (1992), pp.1311 - 1318