

## TRIP型複合組織鋼板の深絞り性に及ぼす温間加工の影響

-第1報: コニカルカップ試験-

長坂 明彦\*・和田 一秀\*\*

Effects of Warm Forming on Deep Drawability of a TRIP-aided Dual-phase Steel Sheet  
(1st report, Conical Cup test)

Akihiko NAGASAKA\* and Kazuhide WADA\*\*

To improve the deep drawing of a high-strength TRIP-aided dual-phase (TDP) steel sheet, the effects of warm forming on the deep drawability were investigated. Deep drawing tests were performed on an Instron machine to measure Conical Cup Value (CCV) and maximum drawing load ( $P_{max}$ ). The resultant lower CCV and higher  $P_{max}$  are obtained at 100~150°C for the TDP steel because strain-induced transformation (SIT) of retained austenite particles is extremely suppressed in the temperature range. The CCV of the TDP steel depended considerably on the deep drawing temperature, which appeared hardly for a ferrite-bainite dual-phase (BDP) steel without retained austenite. The deep drawing of the TDP steel is improved by warm forming at 100~150°C.

キーワード: 深絞り性, 残留オーステナイト, 変態誘起塑性, 温間加工, 高強度鋼板

## 1. はじめに

近年, 乗用車の車体軽量化と衝突安全性の向上を目的に開発された高強度鋼板の中で, 残留オーステナイト ( $\gamma_R$ ) の変態誘起塑性 (TRIP: Transformation Induced Plasticity) <sup>1)</sup> を有効に利用したTRIP型複合組織鋼<sup>2-14)</sup> (TDP鋼) はとくに優れた伸びおよび張出し性<sup>6-13)</sup> を有する。現在, 軽量化効果の最も期待できるホイールディスクやサスペンションアームなどの足回り部品への適用研究が積極的に行われている。

伸び<sup>5)</sup>および張出し性<sup>8)</sup>と同様に, TDP鋼の深絞り性の改善は温間加工によって改善されると予想される。室温での深絞り性は $\gamma_R$ のTRIP効果により優れていることがすでに報告されている<sup>7,9)</sup>が, 温間加工についての研究はなされていない。そこで深絞り成形のさらなる改善を目的として, 深絞り性に及ぼす

温間加工の影響を詳細に検討した。

## 2. 実験方法

供試鋼には0.19C-1.54Si-1.52Mn-0.098P-0.0012S-0.039Al, mass%の化学組成を有する板厚1.2mmの冷延まま鋼板を用いた。製造条件は文献12)に準じた。これらの鋼板に2台の塩浴炉を用いて, 760°Cで1200sの2相域焼なまし後, 400°Cの塩浴中に急冷, その温度で1000s保持後油冷のオーステンパ処理を施し,  $\alpha_f + \alpha_b + \gamma_R$  3相組織を有するTDP鋼とした。ここで, 2相域焼なまし温度には,  $\gamma_R$ 量がほぼ最大となる温度を採用した<sup>4)</sup>。以下では,  $\alpha_b + \gamma_R$ 相を第2相と呼ぶ。比較として, 0.14C-0.21Si-1.74Mn-0.013P-0.003S-0.037Al, mass%からなる $\gamma_R$ を含まない $\alpha_f + \alpha_b$ 組織を有するフェライト・ベイナイト複合組織鋼 (BDP鋼) を供した。BDP鋼も同様に780°Cで1200sの2相域焼なまし後, 400°Cの塩浴中に急冷, その温度で1000s保持後空冷を施した。

引張試験には, 圧延方向に平行に作製したJIS13B号引張試験片 (幅12.5mm, 標点距離50mm) を用い, インストロン型万能試験機 ((株) 島津製作所, DCS-10T) により行った。試験片の加熱には,

本研究の一部は平成8年度(財)谷川熱技術振興基金および平成9年度長野高専教育研究特別経費の助成を受けて行われた。

\* 機械工学科・助手

\*\* 機械工学科・技官

原稿受付 1997年10月31日

一对のプレートヒーター（70mm×90mm，100V，200W）を用い，試験前の保持時間は30minとした．試験温度は $T=20\sim 250^{\circ}\text{C}$ の範囲，クロスヘッド速度は1mm/minとした．

深絞り試験には，直径60mm，板厚1.2mmの円盤状小型試験片を用いた．円盤状小型試験片は打抜きによる機械加工により製作後，熱処理を施した．試験装置には，JIS Z 2249-1963のコニカルカップ試験に準じ，図1の60°の円錐ダイス（SKD11）を用いた深絞り成形装置とした．試験片両面に冷・温間絞り加工用水溶性乾燥潤滑剤（日本工作油（株），G-2576）を使用した．絞り温度は $T=20\sim 250^{\circ}\text{C}$ の範囲，絞り速度は $V=5\text{mm/min}$ の加工条件とした．試験片の加熱は環状炉によって行い，試験片のバリ部を球頭ポンチ（SKD11，ポンチ直径 $\phi 20.64$ ）側とした．なお，試験温度は試験片表面温度を意味する．

深絞り性はコニカルカップ値（CCV）で評価した．CCVは(1)式から試験片を絞り成形し，ポンチ頭部が破断した時点での外径の値 $D$ で，外径は方向によって異なるので平均した値で示した．ここで， $D_0$ ， $D_{45}$ ， $D_{90}$ はそれぞれ圧延方向に対し，平行，45°および直角である．

$$D = (D_0 + 2D_{45} + D_{90}) / 4 \quad (1)$$

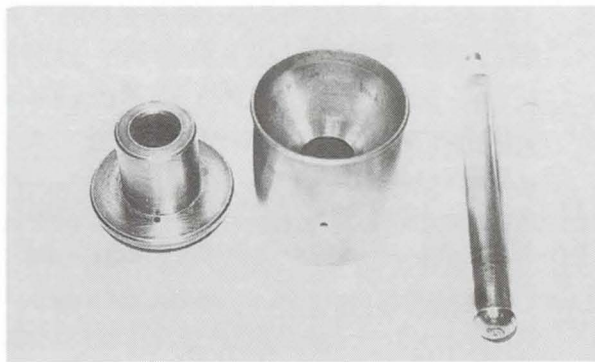
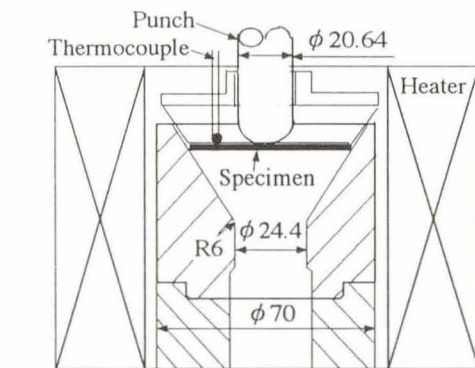


図1 深絞り成形装置

$\gamma_R$ の初期体積率 $f_{\gamma_0}$ はX線回折法（Mo-K $\alpha$ 線）により，(200) $\alpha$ ，(211) $\alpha$ ，(200) $\gamma$ ，(220) $\gamma$ ，(311) $\gamma$ 回折角 $2\theta$ の5ピーク法<sup>15)</sup>を用いた． $\gamma_R$ 中の炭素濃度 $C_{\gamma_0}$  (mass%)は式(2)を利用して，Cr-K $\alpha$ 線の(220) $\gamma$ 回折角 $2\theta$ ピークにて測定された格子定数 $a_{\gamma_0}$  ( $\times 10^{-10}\text{m}$ )から推定した<sup>16)</sup>．

$$a_{\gamma_0} = 3.5467 + 0.0467 \times C_{\gamma_0} \quad (2)$$

また， $\gamma_R$ の $M_s$ 点 ( $^{\circ}\text{C}$ )は式(3)から推定した．ここで， $\gamma_R$ 中のマンガン濃度 $Mn_{\gamma_0}$ はSpeich<sup>17)</sup>，Gilmour<sup>18)</sup>らの報告から添加量の1.5倍に仮定して計算に用いた．

$$M_s = 550 - (360 \times C_{\gamma_0}) - (40 \times Mn_{\gamma_0}) \quad (3)$$

さらに，走査電子顕微鏡（SEM）観察およびビッカース硬さ測定も必要に応じ行った．

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 微細組織と引張特性

図2にTDP鋼の微細組織のSEM写真を示す．本鋼では第2相 ( $\alpha_b + \gamma_R$ )が $\alpha_f$ 粒界に沿って存在する． $\gamma_R$ は $\alpha_b$ と隣接または孤立して粒子状に存在し，図3の $\gamma_R$ 因子 ( $f_{\gamma_0}$ ， $C_{\gamma_0}$ )と2相域温度 ( $T_{\alpha+\gamma}$ )の関係よりその体積率 $f_{\gamma_0}$ は12.4 vol%，炭素濃度 $C_{\gamma_0}$ は1.30 mass%である．この $C_{\gamma_0}$ から $\gamma_R$ の $M_s$ 点は $-9.2^{\circ}\text{C}$ と計算される．図4にTDP鋼の引張特性の変形温度依存性を示す．変形温度 ( $T$ )が $20^{\circ}\text{C}$ において，TDP鋼は904MPaの引張強さ ( $TS$ )と約28%の大きな全

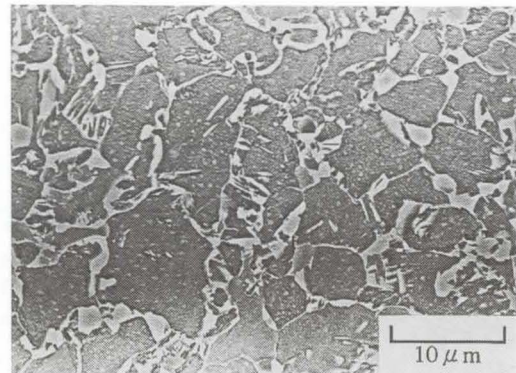


図2 TDP鋼組織のSEM写真

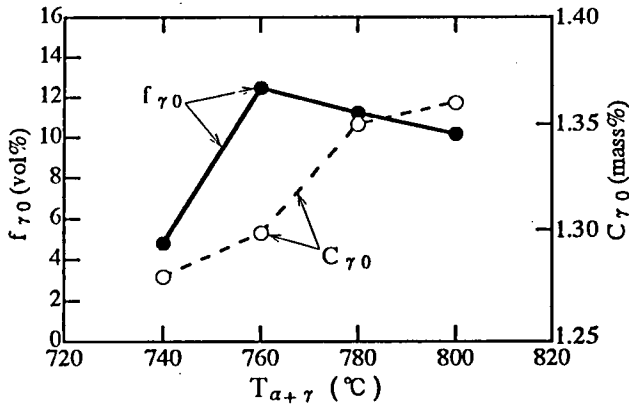
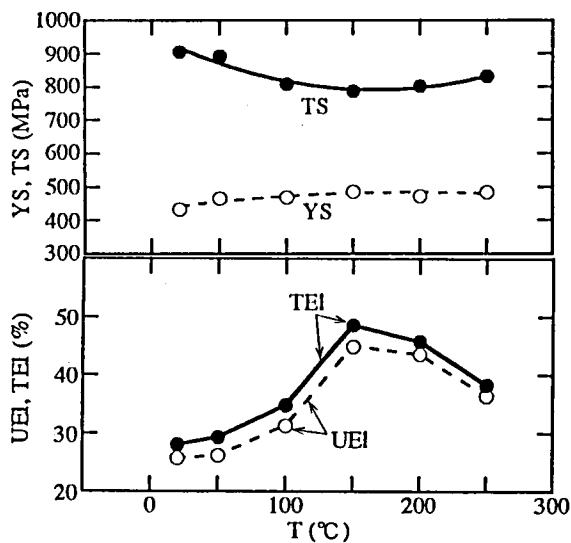
図3 2相域温度と $\gamma_R$ 因子の関係

図3 TDP鋼の引張温度依存性

伸び (TEI) を有する。変形温度が高くなるにつれて全伸びは大きくなり、変形温度が約150°Cで最大となる。引張強さはこれと逆の変形温度依存性を示し、この温度範囲でほぼ最小となる。このような引張特性の変形温度依存性は安定な $\gamma_R$ を含むTDP鋼に特有の現象であり、他の複合組織鋼には現れない<sup>8)</sup>。同様に、BDP鋼のTSは653MPa、TEIは17.0%で変形温度が高くなるにつれてTSおよびTEIは低下し、変形温度依存性を示さなかった。また、TDP鋼の一樣伸び (UEI) が大きく、局部伸び ( $LEI = TEI - UEI$ ) が極めて小さい特異な材料であり、降伏応力 (YS) は434MPaより、降伏比 (YS/TS) が0.48で0.5以下と低降伏比を示し、形状凍結性が高いことがわかる。

一般に、 $M_s$ 点以上の温度範囲では、TDP鋼の $\gamma_R$ 量 $f_\gamma$ は真ひずみ $\epsilon$ とともに(4)式にしたがって減少する<sup>3)</sup>。

$$\log f_\gamma = \log f_{\gamma 0} - k \cdot \epsilon \quad (4)$$

ここで $f_{\gamma 0}$ は初期 $\gamma_R$ 量である。 $k$ はひずみ誘起変態定数で、その値は $\gamma_R$ のひずみ誘起変態が抑制されるほど小さくなる。 $k$ 値は破断材の一樣変形部の $\gamma_R$ 量とそのひずみを用いて求めた。引張変形下において、 $k$ 値の加工温度依存性を調査したところ、図4のように、 $T_s = 150 \sim 200^\circ\text{C}$ で $k$ 値の最小値 $k_{\min}$ が得られ、この温度はTEIが最大となる温度 (図3) とほぼ一致した。したがって、 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ においては、 $\gamma_R$ のひずみ誘起変態がくびれの生ずる高ひずみ域で効果的に起こり、これによるひずみ硬化率の増加および母相/第2相界面でのボイドの発生・成長が抑制されることにより、TEIが著しく改善されたと考えられる<sup>3-5)</sup>。同時に生ずる低いTSは、硬い $\alpha_m$ 相が低ひずみ域でわずかしか生じなかった ( $\alpha_m$ 硬化が小さかった) ためと考えられる。なお、準安定オーステナイト鋼ではひずみ誘起変態は $M_s$ 点と $M_d$ 点の間の温度範囲で起こり、高温ほどひずみ誘起マルテンサイト変態 (SIMT) は抑制される<sup>13)</sup>。TDP鋼では $M_d$ 点以下の $200^\circ\text{C}$ 以上でひずみ誘起ベイナイト変態 (SIBT) を生ずるため<sup>3)</sup>、これと異なる現象が生じたものである。

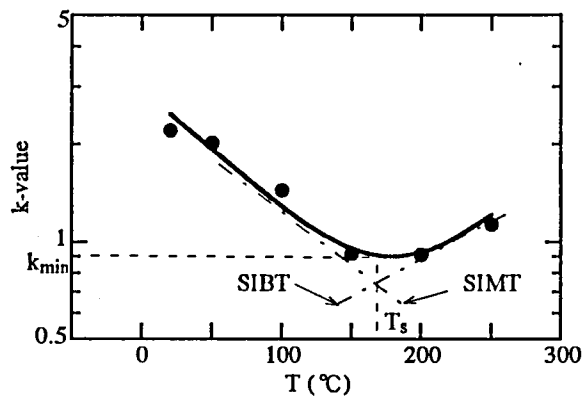


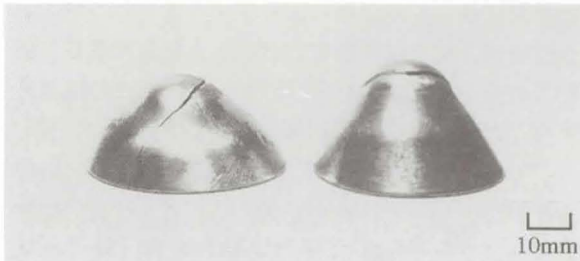
図4 TDP鋼のk値の引張温度依存性

### 3-2 深絞り特性

深絞り特性はコニカルカップ試験から求めた。この試験値は深絞り限界以上の直径の試験片を用いることならびに球頭ポンチを使用することのために、材料の純粋な深絞り性を示すものではなく、材料の深絞り-張出し複合成形性を示すものとなっている。円錐ダイスであるので、しわ押え圧なしで絞りが行われ、しわ押え圧の影響が入らないこと、1個の試験片で一つの試験値が得られ、限界絞り比 (LDR

: Limiting Drawing Ratio) に比べ簡便な点である。しかし、しわ押えが働かないことは、しわの出やすい材料では、しわを防げず試験値が得られない難点がある。CCVでは値の小さいほど絞り性が良いという評価になる。

図5に $T=20$ と $100^\circ\text{C}$ で成形後の外観を示す。明らかに $100^\circ\text{C}$ で絞りこまれ温間加工の効果が観察される。 $20^\circ\text{C}$ では成形試験中のき裂発生時に、一瞬にき裂が進展し、試験片が割れてしまった。また、その際のスロークー荷重曲線を図6に示す。図5と同



⇔ Rolling Direction

$T=20^\circ\text{C}$

$T=100^\circ\text{C}$

図5 TDP鋼のコニカルカップ試験成形後の外観

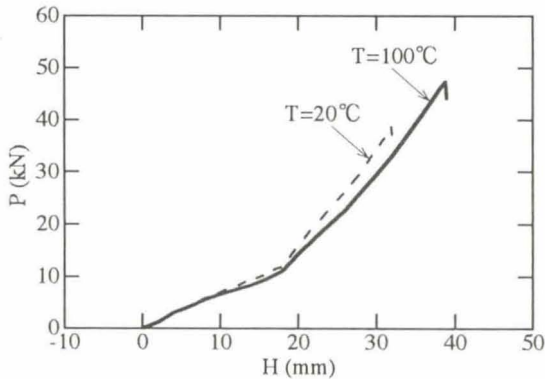


図6 TDP鋼のスロークー荷重曲線

様、温間加工により絞りこまれることから、荷重( $P$ )・変位( $H$ )ともに増加している。以上から、図7に深絞り性の変形温度依存性を示す。深絞り加工温度( $T$ )に及ぼす限界成形高さ( $H_{\max}$ )、限界成形荷重( $P_{\max}$ )、コニカルカップ値(CCV)の関係で、TDP鋼は $100\sim 150^\circ\text{C}$ でCCVが減少し、逆に $H_{\max}$ 、 $P_{\max}$ は上昇した。このような深絞り性の変形温度依存性は $\gamma_R$ を含まないBDP鋼には現れなかった。

TDP鋼は $100\sim 150^\circ\text{C}$ で絞り性が良く、その温度域でひずみ誘起変態が最も抑制され、CCVを小さくしたと思われる。図4で $k$ 値は $150\sim 200^\circ\text{C}$ が最小であるにも関わらず、約 $50^\circ\text{C}$ CCVの最小値が低温側にシフト

した理由として、張出し(等2軸引張り)成分が含まれることで、コニカルカップの平均垂直応力 $\sigma_m$ が単軸引張りのそれより大きい分低温側にシフトしたものと考えられる。

つぎにフランジ部の半径絞り変形過程における板厚変化を調査した。ブランクの外縁から、2および4mmの位置での板厚 $t$ の変化 $\Delta t$ を測定し、その変化率 $\Delta t/t$ を板の圧延方向と直角方向の平均化したものについて示した。(図8)TDP鋼とBDP鋼とも、変化率はブランクの外縁から内側になるほど小さくなった。しかし、TDP鋼の変化率はBDP鋼に $\Delta t/t=0.2$ 程度大きくなる傾向にあった。またTDP鋼の $\Delta t/t$ は $100\sim 150^\circ\text{C}$ で小さくなり、その温度域でブランクがより均一に絞りこまれていると考えられる。これはTDP鋼のCCVが最小となる温度と一致しており、 $\gamma_R$ のSITの抑制効果によるものとほぼ一致する。

そこで、 $T=125^\circ\text{C}$ でコニカルカップ試験後の試料を圧延方向に切断し、ビッカース硬さ(アカシ, AVK-A II, 荷重9.81N)により加工硬化を調査した。外縁から内側に5mm間隔で板厚の中央を測定したところ、外縁から内側に向かって加工硬化程度はHV40程度軟化するが、ポンチ接触部で硬化し、き裂の発生箇所でも最高硬さを程した。(図9)

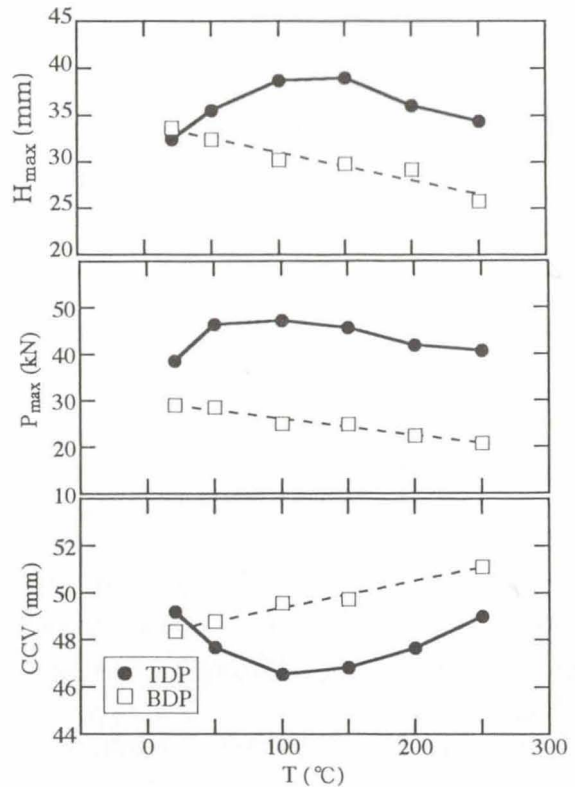


図7 TDP鋼の深絞り変形温度依存性



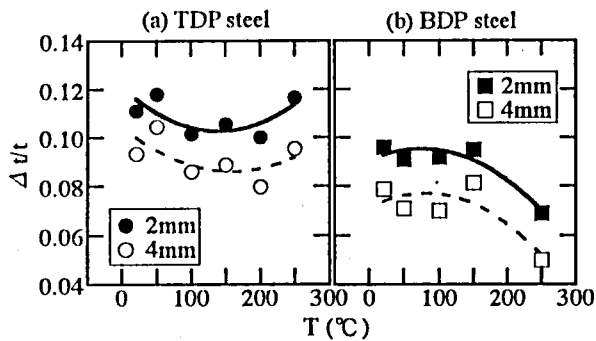


図8 試料の板厚変化

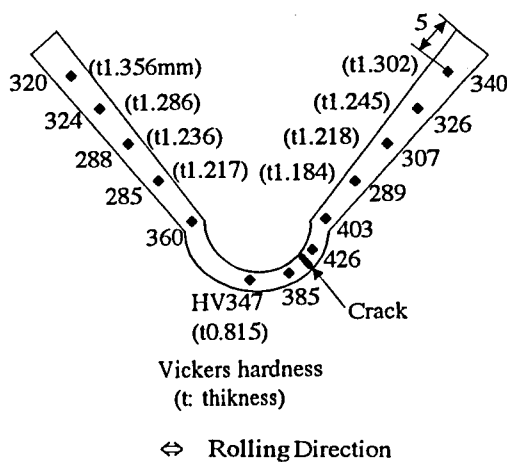


図9 試料の硬さ変化

#### 4. おわりに

TDP鋼の深絞り性に及ぼすの加工温度の影響を詳細に調査した。主な結果は以下の通りである。

- (1) TDP鋼の深絞り性は100~150°Cの温間加工により著しく改善された。
- (2) 温間加工により得られるTDP鋼のコニカルカップ値(CCV)は、BDP鋼を下回った。この事実は、本質的にはTDP鋼は伸びおよび張出し性ととも深絞り性にも優れた高強度鋼板であることが明らかにされた。
- (3) 温間深絞りは $\gamma_R$ のSITを抑制し、加工硬化およびボイドの発生頻度を小さくする。
- (4) 温間深絞りは効果的なTRIPにより高ひずみ域でのひずみ低下を抑制するとともに、ボイドの成長を抑制する。

最後に、本研究を御支援いただきました(財)谷川熱技術振興基金にならびに平成9年度長野高専教育研究特別経費に対し、深く感謝の意を表するとともに

に、供試鋼を提供頂いた(株)神戸製鋼所加古川製鉄所(現:(財)近畿高エネルギー加工技術研究所)の白沢秀則氏、潤滑剤を提供頂いた日本工作油(株)および平成9年度卒業研究生の鈴木健二氏・山岸弘和氏・湯原正行氏に併せてお礼いたします。

#### 参考文献

- 1) V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr and R. Busch: Trans. ASM, 60 (1967), 252.
- 2) O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi: Trans. Iron Steel Inst. Japan, 27 (1987), 570.
- 3) K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. Hashimoto: Metall. Trans., 23A (1992), 3085.
- 4) K. Sugimoto, N. Usui, M. Kobayashi and S. Hashimoto: ISIJ Int., 32 (1992), 1311.
- 5) K. Sugimoto, M. Misu, M. Kobayashi and H. Shirasawa: ISIJ Int., 33 (1993), 775.
- 6) O. Matsumura, Y. Sakuma, Y. Ishii and J. Zhao: ISIJ Int., 32 (1992), 1110.
- 7) 樋渡俊二, 高橋 学, 片山知久, 白田松男: 塑性と加工, 35 (1994), 1109.
- 8) K. Sugimoto, M. Kobayashi, A. Nagasaka and S. Hashimoto: ISIJ Int., 35 (1995), 1407.
- 9) 松村 理, 大上哲朗, 雨池龍男: 鉄と鋼, 79 (1993), 209.
- 10) 三村和弘, 宮原征行, 白沢秀則, 横井利雄, 柴田善一, 井上尚和: 材料とプロセス, 5 (1992), 1859.
- 11) 広瀬洋三, 中居修二, 福山東成, 須藤誠一, 上野行一: 塑性と加工, 35 (1994), 1071.
- 12) 長坂明彦, 杉本公一, 小林光征, 橋本俊一: 鉄と鋼, 83 (1997), 209.
- 13) A. Nagasaka, K. Sugimoto and M. Kobayashi: Proc. of the 2nd Int. Conf. on Quenching and the Control of Distorsion, ed. by G. E. Totten et al., Cleveland, Ohio, (1996), 557.
- 14) 杉本公一, 孫 曉東, 小林光征, 芳賀 武, 白沢秀則: 日本機械学会論文集(A編), 63 (1997), 717.
- 15) 円山 弘: 熱処理, 17 (1977), 198.
- 16) 西山善次: マルテンサイト変態基本編, 丸善, (1979), 13.
- 17) G. R. Speich et al.: Metall. Trans. A, 12A (1981), 1419.
- 18) J. B. Gilmour et al.: Metall. Trans., 3 (1972), 1455.
- 19) 中川威雄, 阿部邦雄, 林 豊: 薄板のプレス加工, 実教出版, (1985), 47.