

# TRIP型複合組織鋼の深絞り性に及ぼす炭素添加量の影響

長坂 明彦\*・杉本 公一\*<sup>2</sup>・小林 光征\*<sup>2</sup>・小林 義一\*・橋本 俊一\*<sup>3</sup>

Effect of Carbon Content on Deep Drawability of TRIP-aided Dual-phase Sheet Steels

Akihiko NAGASAKA, Koh-ichi SUGIMOTO, Mitsuyuki KOBAYASHI, Yoshikazu KOBAYASHI and Shun-ichi HASHIMOTO

**Synopsis :** Effect of retained austenite on the deep drawing in high strength TRIP-aided dual-phase (TDP) sheet steels with different carbon content were investigated. The deep drawability based on the limiting drawing ratio ( $LDR=D_0/d_p$ ), where the  $D_0$  and the  $d_p$  are a maximum blank diameter and a punch diameter respectively, was affected by the volume fraction of the retained austenite and by its stability (carbon concentration). Namely, the higher the volume fraction of the retained austenite and its stability, the larger strength–deep drawability balance, i.e., the product of tensile strength and  $LDR$ . Furthermore, the higher blank folding force, the larger the strength–deep drawability balance of high carbon TDP steel. The excellent deep drawability was due to large local necking resistance at the cup wall just above the punch bottom due to “the transformation hardening” and “the stress relaxation” resulting from the strain-induced martensite transformation, as well as a low drawing resistance of the shrinking flange.

**Key words :** deep drawability; retained austenite; transformation-induced plasticity; strain-induced transformation; dual-phase steel; high-strength steel; blank holding force.

## 1. 緒言

近年、環境問題に対応すべく乗用車の車体軽量化と衝突安全性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)<sup>1)</sup>を有効に利用したTRIP型複合組織鋼<sup>2-14)</sup>(TDP鋼)はとくに優れたプレス成形性を有する。すでに、590MPa級熱延TRIP鋼板がフロントサイドメンバなどの衝撃吸収部品やロアアームなどの足回り部品に一部実用化されている<sup>15)</sup>。今後の展開としては、高強度鋼板の難成形部品への適用拡大やテラードブランク<sup>16)</sup>による材料置換などにより、乗用車の車体軽量化と衝突安全性においても、さらに大きな役割を担っていくものと期待される。

TDP鋼は深絞り性<sup>11-14)</sup>も優れているが、この深絞り性に影響を及ぼすと考えられる $\gamma_R$ の体積率と安定性および第2相形態の影響を調査した研究はほとんど見当たらない。著者らはさきにこれらの $\gamma_R$ を利用して、TDP鋼の張出し性<sup>7)</sup>および伸びフランジ性<sup>8-10)</sup>が改善できることを報告した。深絞り性も同様に、プレス成形性に影響を及ぼすと考えられる $\gamma_R$ 制御( $\gamma_R$ の体積率と安定性)によってさらに改善できると予想される。

そこで本研究では、炭素添加量の異なる数種類のTDP鋼を用いて、深絞り性に及ぼす $\gamma_R$ 特性の影響を詳細に検討した。

## 2. 実験方法

供試鋼にはSiおよびMnをそれぞれ1.5 mass%一定とし、炭素量を0.1~0.4 mass%の範囲で0.1 mass%ずつ変化させた冷延まま鋼板(板厚 $t_0=1.2$  mm)を用いた(Table 1)。製造条件は文献8に準じた。以後、これらの鋼をTDP1~TDP4と呼ぶ。これらの鋼板に2台の塩浴炉を用いて、Fig. 1(a)に示す一律の熱処理、すなわち2相域( $T_{\alpha+\gamma}$ )焼なまし+オーステンパ処理を施し、フェライト( $\alpha_f$ )+ベイナイト( $\alpha_b$ )+ $\gamma_R$ の3相組織とした。ここで、 $T_{\alpha+\gamma}$ には780°Cと $\gamma_R$ の初期体積率がほぼ最大となる温度を採用した<sup>4)</sup>。比較のため、Si添加量の少ない同一の冷延まま鋼板を用い、MDPおよびBDPと呼ぶ。これらの鋼を熱処理により、 $\alpha_f$ +マルテンサイト( $\alpha_m$ )複合組織鋼(MDP鋼)および $\alpha_f$ + $\alpha_b$ 複合組織鋼(BDP鋼)とした。MDP鋼には400°Cの焼戻しを施した(Fig. 1(b), (c))。また、 $\alpha_f$ を母相、 $\alpha_b$ と $\gamma_R$ (ひずみ誘起変態した $\alpha_m$ も含む)およびそれらの混合相を第2相と総称する。

Table 1. Chemical composition of steels used (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al
TDP1	0.10	1.49	1.50	0.015	0.0012	0.038
TDP2	0.20	1.51	1.51	0.015	0.0011	0.040
TDP3	0.29	1.46	1.50	0.014	0.0012	0.043
TDP4	0.40	1.49	1.50	0.015	0.0012	0.045
MDP	0.14	0.21	1.74	0.013	0.0030	0.037
BDP	0.14	0.21	1.74	0.013	0.0030	0.037

平成13年3月5日受付 平成13年6月6日受理 (Received on Mar. 5, 2001; Accepted on June 6, 2001)

\* 長野工業高等専門学校 (Nagano National College of Technology, 716 Tokuma Nagano 381-8550)

\*2 信州大学工学部 (Faculty of Engineering, Shinshu University)

\*3 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

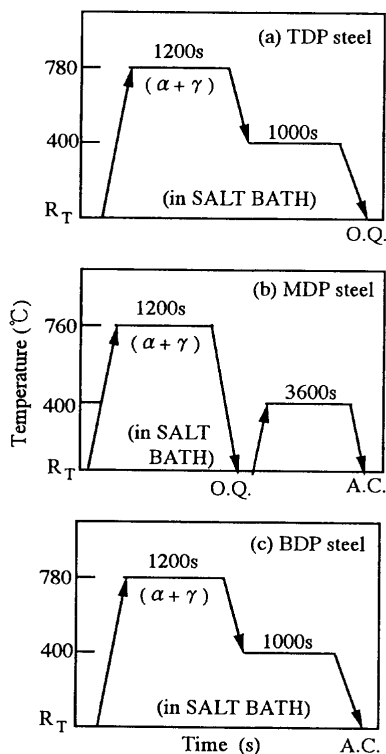


Fig. 1. Heat treatment diagram of TDP, MDP and BDP steels, in which "O.Q." and "A.C." represent quenching in oil and air cooling, respectively.

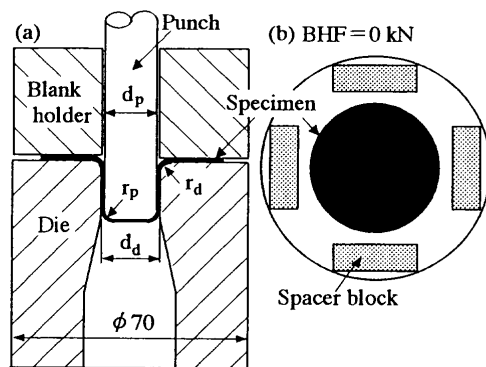
引張試験には圧延方向に平行に製作したJIS13B号引張試験片を用い、インストロン型万能試験機によって、クロスヘッド速度1mm/min (ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-4}/s$ )で試験を行った。

スウィフトカップ試験は、1mm間隔にワイヤ放電加工により作製した直径 $D_0=39\sim 45$ mmの円形blank試験片を用い、万能塑性加工機(インナ荷重784kN, アウタ荷重490kN)により行った。平頭パンチ直径 $d_p$  20.64mm, ダイス内径24.40mmで、肩曲率半径はいずれも4mmの金型を用いて行った(Fig. 2(a))。しわ押え力をBHF=0, 10, 50kNと変化させ、加工速度は約200mm/minとし、試験片両面には乾燥潤滑剤を塗布した。ここで、BHF=0kNは試験片より0.2mm厚い板厚1.4mmのスペーサーを試験片の4隅に置き、BHF=10kNで加圧した(Fig. 2(b))。深絞り性は限界絞り比( $LDR=D_0/d_p$ )で評価した。

$\gamma_R$ の体積率 $f_\gamma$ はX線回折法により、Mo-K $\alpha$ 線の回折面(200) $_{\alpha}$ , (211) $_{\alpha}$ , (200) $_{\alpha}$ , (220) $_{\gamma}$ および(311) $_{\gamma}$ の5ピーク法<sup>17)</sup>を用いて測定した。また、 $\gamma_R$ 中の初期炭素濃度 $C_{\gamma 0}$  (mass%)は、Cr-K $\alpha$ 線の回折面(220) $_{\gamma}$ から求めた格子定数 $a_\gamma$  (nm)を次式<sup>18)</sup>に代入して計算した。なお、第2相体積率 $f$ は線分法により求めた。

$$C_{\gamma 0} = (a_\gamma - 0.35467) / 4.67 \times 10^{-3} \dots \dots \dots (1)$$

さらに、SEM観察およびビッカース硬さ測定(荷重9.81N)も必要に応じ行った。



( $d_p=20.64$  mm,  $r_p=4$  mm,  $d_d=24.40$  mm,  $r_d=4$  mm)

Fig. 2. Experimental apparatus for Swift cup test.

### 3. 実験結果

#### 3.1 組織と引張特性

Fig. 3にTDP鋼のミクロ組織の代表例を示す。(a, c)がレペラー腐食後の光顕写真, (b, d)が3%ナイトール腐食後のSEM写真である。また、Fig. 4にTDP鋼のTEM写真を示す。ナイトール腐食後のSEM写真から、 $\alpha_b$ と $\gamma_R$ からなる第2相が母相の $\alpha_f$ 粒界に沿ってネットワーク状(連結状)に存在する(b, d)。なお、レペラー腐食後の光顕写真から、TDP鋼は $\alpha_f$ (灰色部),  $\alpha_b$ (黒色部),  $\gamma_R$ (白色部)で構成される(a, c)。また、Fig. 4のような $\gamma_R$ 粒子の $\gamma_R$ 初期体積率 $f_{\gamma 0}$ は0.05~0.17,  $\gamma_R$ 中の初期炭素濃度 $C_{\gamma 0}$ は1.31~1.45 mass%で炭素添加量の増加にともないそれぞれ高くなる(Table 2)。

Table 2に供試鋼の引張特性を示す。TDP鋼の引張強さ $TS$ は651~1103MPaと広範囲にあり、いずれも大きな全伸び $TEI$ と高い $n$ 値を有するが、 $r$ 値は他の複合組織鋼と同様1.0以下と低い。

#### 3.2 深絞り性

Fig. 5に各鋼の限界絞り比 $LDR$ と引張強さ $TS$ の関係を示す。しわ押え力BHF=0kNにおいて、各TDP鋼の $LDR$ は2.13一定と良好である。一方、BHF=50kNにおいて、低炭素添加量を有するTDP鋼の $LDR$ は低下する。また、 $\gamma_R$ を含まないMDP鋼およびBDP鋼の $LDR$ も、しわ押え力の増加にともない低下する。

Fig. 6に深絞り性の指標として、各鋼における引張強さ $TS$ と限界絞り比 $LDR$ の積、すなわち強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ の比較を示す。BHF=0と50kNにおいて、炭素添加量の多いTDP鋼ほど従来のMDP鋼およびBDP鋼に比較して優れた $TS \times LDR$ を有する。また、 $TS \times LDR$ に対して鋼種間の差は大きく現れる。TDP2~TDP4鋼の $TS \times LDR$ は、強度-延性バランス $TS \times TEI$ と同様に極めて高いことがわかる(25GPa%以上, Table 2)。なお、深絞り性と $n$ 値,  $r$ 値および絞り $RA$ との相関はとくに認められなかった。

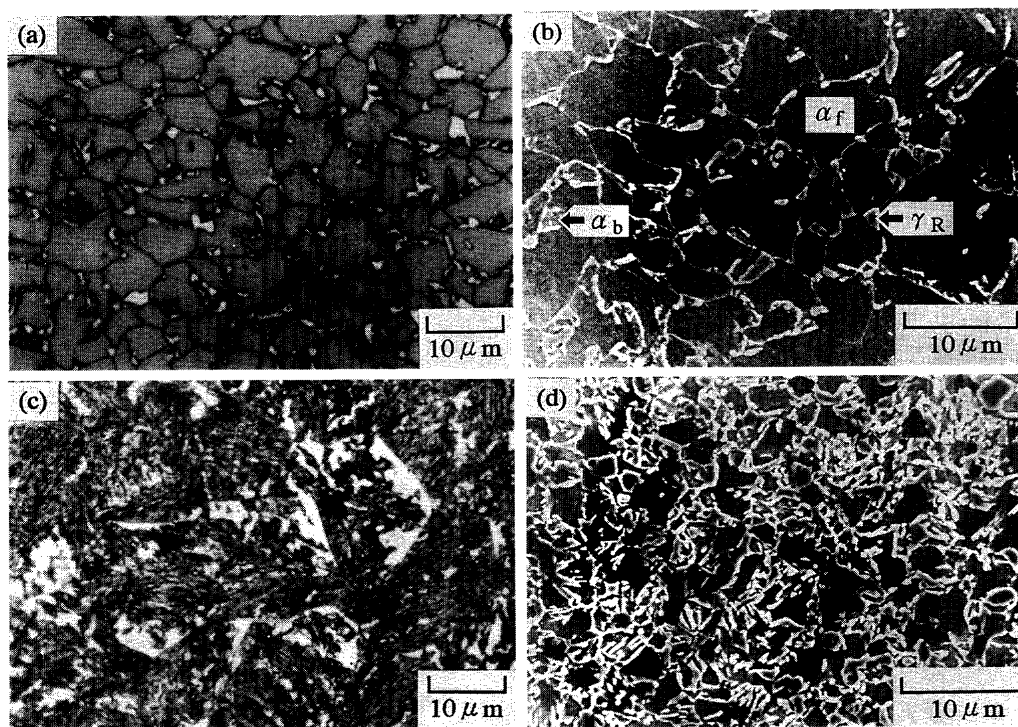


Fig. 3. Optical and scanning electron micrographs of (a and b) TDP1 and (c and d) TDP4 steels, in which white phases represent retained austenite and " $\alpha_f$ ", " $\alpha_b$ " and " $\gamma_R$ " are ferrite matrix, bainite and retained austenite, respectively.

Table 2. Retained austenite characteristics and tensile properties.

Steel	$f$	$f_{\gamma_0}$	$C_{\gamma_0}$ (mass%)	YS (MPa)	TS (MPa)	UEL (%)	TEI (%)	TS × TEI (GPa%)	RA (%)	HV <sub>0</sub>	$n$	$r$
TDP1	0.199	0.049	1.31	429	651	27.8	37.2	24.2	49.2	208	0.25	0.89
TDP2	0.353	0.090	1.38	526	825	31.7	36.0	29.7	44.0	252	0.22	0.72
TDP3	0.441	0.132	1.41	562	895	28.6	32.2	28.8	41.8	275	0.22	0.97
TDP4	0.551	0.170	1.45	728	1103	29.2	32.8	36.2	41.8	299	0.21	0.90
MDP	0.271	—	—	593	783	8.3	13.1	10.3	44.5	270	0.08	0.80
BDP	0.285	—	—	550	693	10.9	17.7	12.3	59.0	222	0.11	0.91

$f$ : volume fraction of second phase,  $f_{\gamma_0}$ : volume fraction of retained austenite,  $C_{\gamma_0}$ : carbon concentration in retained austenite, YS: 0.2% proof stress or yield stress, TS: tensile strength, UEL: uniform elongation, TEI: total elongation, TS × TEI: strength-ductility balance, RA: reduction of area, HV<sub>0</sub>: initial Vickers hardness,  $n$ : work hardening exponent ( $\epsilon = 5-15\%$ ) and  $r$ :  $r$ -value ( $\epsilon = 10\%$ ).

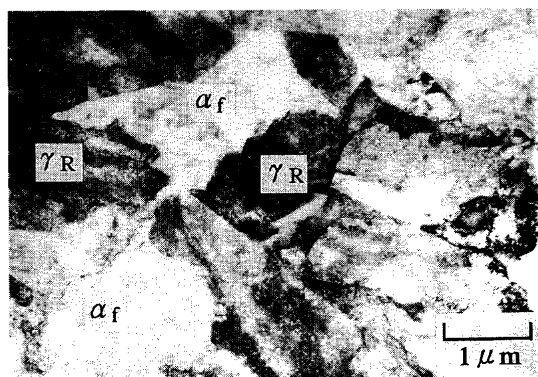


Fig. 4. Transmission electron micrograph of TDP2 steel, in which " $\alpha_f$ " and " $\gamma_R$ " are ferrite and retained austenite, respectively.

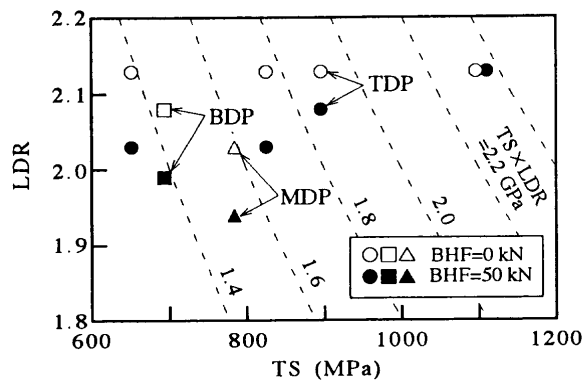


Fig. 5. Comparison of limiting drawing ratio (LDR) of TDP, MDP and BDP steels as a function of tensile strength (TS).

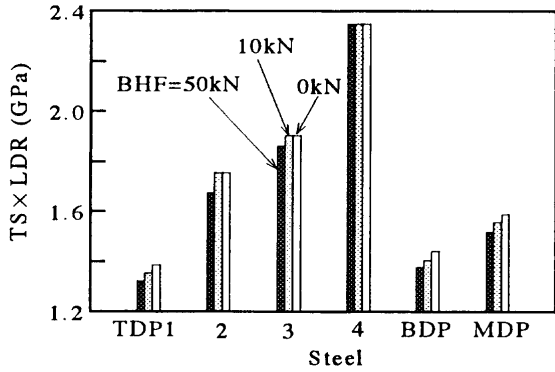


Fig. 6. Comparison of strength-deep drawability balance ( $TS \times LDR$ ) of TDP, MDP and BDP steels.

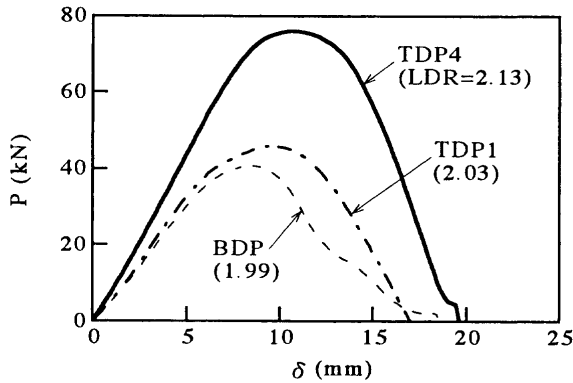


Fig. 7. Punch force ( $P$ ) vs. punch stroke ( $\delta$ ) for deep drawing at BHF of 50 kN.

Fig. 7に深絞り試験の絞り力 $P$ -ストローク $\delta$ 曲線を示す。とくにBHF=50kNにおいて、TDP4は高LDRとなることより、高い最大絞り力 $P_{max}$ と大きなパンチストロークを示す。

### 3.3 スウィフトカップのひずみ分布とひずみ誘起変態挙動

Fig. 8にLDRで絞り抜けたカップの(a)板厚比 $t/t_0$ および(b)硬さ比 $HV/HV_0$ における中心からの分布を示す(BHF=10kN)。図中、横軸の番号は、カップ断面の番号に対応する。ここで、 $t_0$ ,  $t$ はそれぞれ初期板厚、成形後の板厚を、また $HV_0$ ,  $HV$ はそれぞれ初期ビッカース硬さ(Table 2), 成形後の硬さである。スウィフトカップ試験において、絞り成形品の破断位置は各供試鋼ともすべてパンチ肩部で破断した。板厚比はパンチ底で一様薄くなり、パンチ肩部(4番)で最小となる。また、TDP鋼においてパンチ肩部のカップ壁の硬さの増加が顕著に現れる。このパンチ肩部の硬さは板厚比100%超の縮みフランジ変形部(9番)の硬さと同程度まで硬化している。

Fig. 9に最大絞り力 $P_{max}$ およびひずみ誘起マルテンサイト変態量 $f_{\alpha m}$ と $\gamma_R$ の初期体積率 $f_{\gamma 0}$ の関係を示す。ここで、 $f_{\alpha m}$ は一つのひずみ量の指標として、カップ底部から採取し、X線回折による $\gamma_R$ 量 $f_{\gamma}$ から求めた。本来であれば、板材の深絞り変形においては板面内の2軸応力による変形が

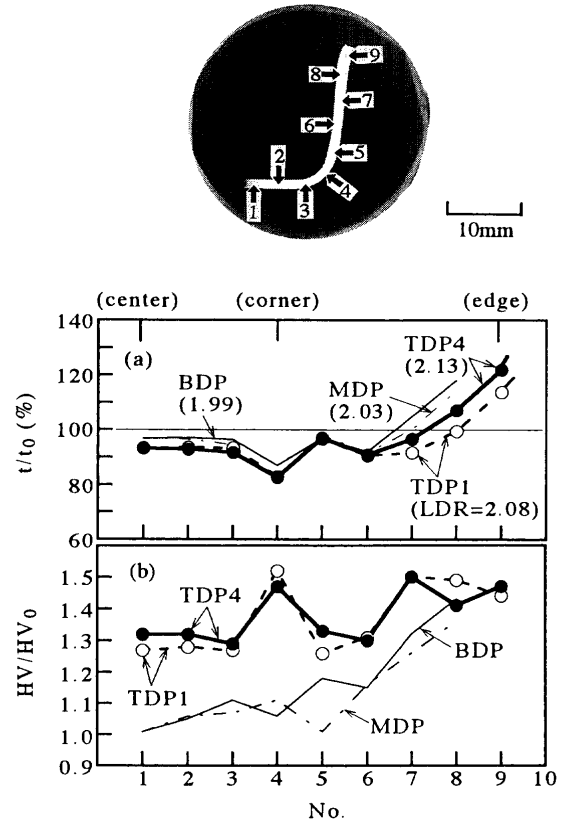


Fig. 8. Variations in (a) thickness ratio ( $t/t_0$ ) and (b) Vickers hardness ratio ( $HV/HV_0$ ) at the cross section of drawn cups (BHF=10 kN).

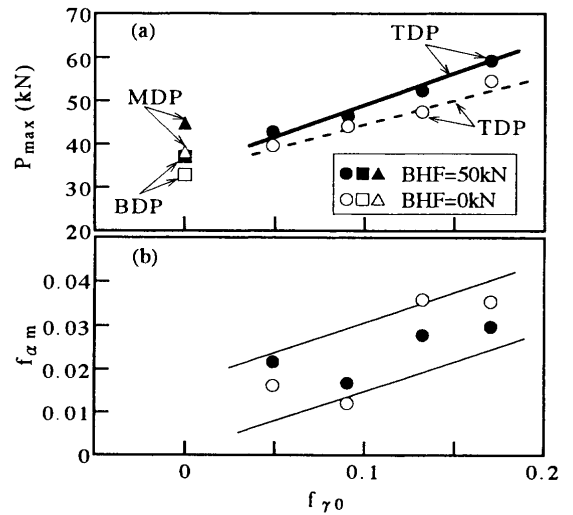


Fig. 9. Variations in (a) maximum punch force ( $P_{max}$ ) and (b) volume fraction of martensite ( $f_{\alpha m}$ ) in flat-bottom of drawn cups with initial volume fraction of retained austenite ( $f_{\gamma 0}$ ).

支配的であると考え、縮みフランジ変形、単軸引張変形、平面ひずみ引張変形、等2軸引張変形の各変形に対する $\gamma_R$ の安定性を調べる<sup>12)</sup>ことが望ましい。絞り比 $DR=1.89$ において、しわ押え力の有無にかかわらず、 $f_{\gamma 0}$ の多いTDP鋼ほど $P_{max}$ を上昇させ、 $f_{\alpha m}$ も多い傾向にあることがわかる。また、しわ押え力の上昇は各供試鋼とも $P_{max}$ を上昇さ

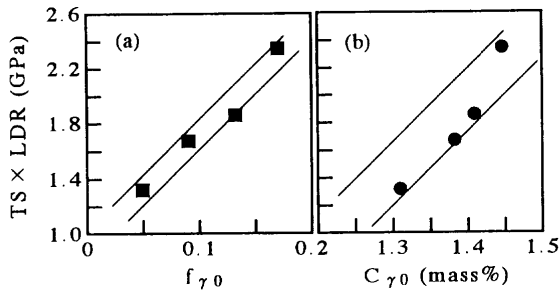


Fig. 10. Variation in strength-deep drawability balance ( $TS \times LDR$ ) as a function of  $f_{\gamma_0}$  and  $C_{\gamma_0}$  in TDP steels.

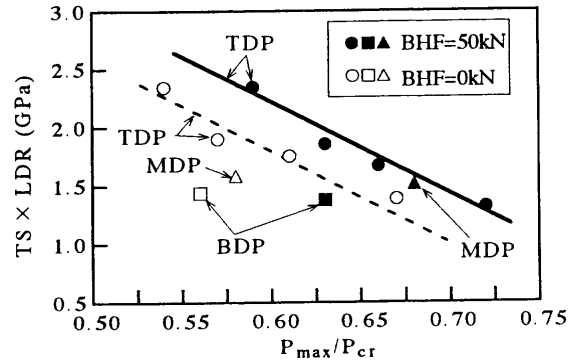


Fig. 11. Relation between strength-deep drawability balance ( $TS \times LDR$ ) and equivalent critical fracture force ( $P_{max}/P_{cr}$ ).

せる。

### 3.4 深絞り性と $\gamma_R$ 特性の関係

Fig.10に強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ と $\gamma_R$ 特性( $f_{\gamma_0}$ ,  $C_{\gamma_0}$ )との関係を示す(BHF=0~50kN)。それぞれ正の相関が現れ、これらの相関にはしわ押え力の影響は現れない。 $\gamma_R$ を含むTDP鋼の深絞り性が優れる理由は、ひずみ誘起変態によるひずみ集中の緩和の他<sup>11)</sup>、深絞り成形で流入抵抗を支えるパンチ肩部でのマルテンサイト変態による強度上昇(Fig. 8)と対応する<sup>14)</sup>。この結果は、より多量でかつより安定な $\gamma_R$ が深絞り性改善の支配的因子であることがわかる。

## 4. 考察

### 4.1 相当破断力

一般に、深絞り成形は縮みフランジ部の変形抵抗に相当する最大絞り力 $P_{max}$ とパンチ肩側壁部での破断力 $P_{cr}$ により決定されるので、両者の比すなわち相当破断力 $P_{max}/P_{cr}$ によって支配され、この値が小さいほど深絞り性は向上する<sup>12)</sup>。 $P_{cr}$ は(2)式で定義され、破断耐力 $\sigma_p$ は(3)式<sup>19)</sup>により推定できる。

$$P_{cr} = \pi d_p t_0 \sigma_p \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_p = (2/\sqrt{3}) \cdot [\sqrt{3}(1+r)/2\sqrt{1+2r}]^{1+n} \cdot TS \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $d_p$ はパンチ直径(20.64mm)、 $t_0$ は初期板厚、 $r$ はランクフォード値、 $n$ は加工硬化指数および $TS$ は引張強さを示す。

Fig.11に強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ と相当破断力 $P_{max}/P_{cr}$ の関係を示す。ここで、 $P_{max}$ は絞り比 $DR=1.89$ 一定およびBHF=0, 50kN (Fig. 9(a))の値で、 $P_{cr}$ はTable 2から計算した。図より負の相関が認められ、相当破断力の低下にともない深絞り性は向上した。すなわち、炭素添加量の増加にともないTDP鋼は優れた深絞り性を示した。また、しわ押え力によりTDP鋼の相当破断力が大きくなり(約0.05)、深絞り性は低下した。

Fig. 8において、各鋼とも破断危険部となるパンチ肩部

(4番)で板厚ひずみが大きかった。この肩半径部の厚さ方向の板厚ひずみ $\epsilon_i = \ln(t_0/t)$ は20%程度の引張ひずみに相当する。また、パンチ平底は $LDR$ が高い鋼ほど、板厚比が小さくなる傾向にある。一方、TDP鋼の硬さ比はパンチ肩部で急激な硬化を示した。本TDP鋼のパンチ肩部での板厚比は他の複合組織鋼と同程度であるので、ひずみ硬化がとくに大きいとはいえない。このため、TDP鋼のパンチ肩部では、ひずみ硬化に比べひずみ誘起変態(SIT)による硬化が支配的であると考えられる。 $f_{\gamma_0}$ が異なるにもかかわらず硬さ比が変わらないのは、 $\gamma_R$ がSITによって変態硬化する割合が同程度であることを示唆している。このことは、Fig. 9(b)のカップ平底でのひずみ誘起マルテンサイト変態量 $f_{am}$ からも同様の傾向を示したことで裏付けられた。以上よりTDP鋼の深絞り性が優れる理由は、深絞り成形で流入抵抗を支えるパンチ肩部でのマルテンサイト変態による強度上昇と対応すると考えてよい。

### 4.2 深絞り性に対する $\gamma_R$ の役割

Fig.10にみるように、強度-深絞り性バランスと $\gamma_R$ 特性( $f_{\gamma_0}$ ,  $C_{\gamma_0}$ )との関係は、それぞれ正の相関が現れた。また、これらの相関にはしわ押え力の影響は現れなかった。

著者ら<sup>14)</sup>はさきに、0.2C-(1.0~2.5)Si-(1.0~2.0)Mn, mass%のTDP鋼において、深絞り性は $f_{\gamma_0}$ ( $\gamma_R$ の量)と正の相関、 $C_{\gamma_0}$ ( $\gamma_R$ の質)と負の相関があることを報告した。これは、炭素添加量が0.2mass%一定であることで、相対的に $f_{\gamma_0}$ が高くなれば、逆に $C_{\gamma_0}$ は低くなることに起因する点で、本研究と $C_{\gamma_0}$ の位置付けは異なる。

そこで、Table 2とFig. 9(b)からFig.12に第2相体積率と炭素添加量の関係を示す。第2相体積率 $f$ と $f_{\gamma_0}$ の差がベイナイト体積率 $f_b$ 、 $f_{\gamma_0}$ と $f_{am}$ の差が未変態 $\gamma_R$ 量 $f_\gamma$ に相当すると仮定すると、 $f_{am}$ の割合は相対的に小さいことがわかる。すなわち、Fig. 1(a)の同一の熱処理条件において、TDP鋼は炭素添加量の増加にともない、第2相体積率も増加することで軟質なフェライト体積率が少なくなり、破断抵抗を増加させる作用も併せ持つと考えられる。なお、パンチ底で高炭素TDP鋼ほど $f_\gamma$ が多く残存するのは、 $\gamma_R$ の安定性

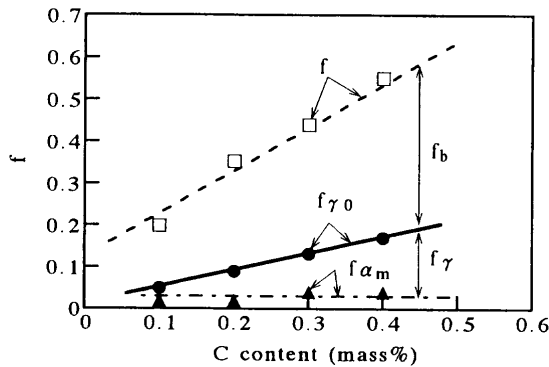


Fig. 12. Variation in volume fraction of second phase ( $f$ ) as a function of carbon content in TDP steels.

が関与していると考えてよいだろう。同様に、Matsumuraら<sup>11)</sup>は熱処理を変化させ、多量でより安定な $\gamma_R$ が深絞り性をよくすることを報告している。また、変態挙動と変形様式の観点から、高炭素TDP鋼ほどパンチ肩部に比べフランジ部の変形抵抗が小さくなり、絞り力が低減された結果、深絞り性が向上する<sup>12)</sup>と考えられる。Fig.10より、より安定な $\gamma_R$ が $\gamma_R$ 量の増加によって深絞り性の指標である強度-深絞り性バランスを改善できた。

一般に、張出し性<sup>7)</sup>、伸びフランジ性<sup>10)</sup>の改善には、 $\gamma_R$ のTRIP効果(SITによる応力集中の緩和とひずみ誘起 $\alpha_m$ の硬化)が重要な役割を果たす。深絞り性は、最も破断しやすいパンチ肩部の破断抵抗を高い値に保持しながら<sup>19)</sup>、フランジ部の変形抵抗を減少させること<sup>12)</sup>により改善できるので、 $\gamma_R$ のTRIP効果の役割は相対的に小さく、 $\alpha_m$ の強化が重要な役割を果たすと考えてよいであろう。以上のことから、より多量でより安定な $\gamma_R$ を有するTDP鋼において、ひずみ誘起 $\alpha_m$ の強化がパンチ肩部の破断抵抗(半径方向引張応力)を高めることと、縮みフランジ変形抵抗(円周方向圧縮応力)の減少との相互作用により改善されることが示唆された。

## 5. 結言

TDP鋼の深絞り性に及ぼす炭素添加量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) 本TDP鋼は強度-延性バランス $TS \times TEI$ が極めて高く、炭素添加量の多いTDP鋼ほど優れた強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ を併せ持つ。

(2) 本TDP鋼の限界絞り比 $LDR$ はしわ押え力の上昇に対して、炭素添加量の増加にともない良好であった。また、その強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ は高炭素TDP鋼ほど向上した。

(3) これは、より多量でかつ安定な $\gamma_R$ を有するTDP鋼において、ひずみ誘起 $\alpha_m$ がパンチ肩部の破断抵抗を高めたことと、縮みフランジ変形抵抗の減少との相互作用により改善された。

最後に、本研究を御支援いただきました(社)日本鉄鋼協会・第8回鉄鋼研究振興助成【b】ならびに(財)天田金属加工機械技術振興財団に対し、深く感謝の意を表するとともに、長野工業高等専門学校卒業研究生の丸山泰宏氏・臼井敏雄氏に併せてお礼いたします。

## 文 献

- 1) V.F.Zackay, E.R.Parker, D.Fahr and R.Busch: *Trans. Am. Soc. Met.*, **60** (1967), 252.
- 2) O.Matsumura, Y.Sakuma and H.Takechi: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **27** (1987), 570.
- 3) K.Sugimoto, M.Kobayashi and S.Hashimoto: *Metall. Trans. A*, **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) K.Sugimoto, M.Kobayashi, A.Nagasaka and S.Hashimoto: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 1407.
- 8) A.Nagasaka, K.Sugimoto, M.Kobayashi and S.Hashimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 335.
- 9) A.Nagasaka, K.Sugimoto, M.Kobayashi and H.Shirasawa: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 218.
- 10) K.Sugimoto, A.Nagasaka, M.Kobayashi and S.Hashimoto: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 56.
- 11) O.Matsumura, T.Ohue and T.Amaike: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 209.
- 12) S.Hiwatashi, M.Takahashi, T.Katayama and M.Usuda: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **35** (1994), 1109.
- 13) A.Nagasaka, K.Sugimoto, M.Kobayashi and S.Hashimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 552.
- 14) A.Nagasaka, K.Sugimoto, M.Kobayashi, Y.Kobayashi and S.Hashimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 885.
- 15) Y.Ojima, Y.Shiroi, Y.Taniguchi and K.Kato: *SAE Tech. Pap. Ser.*, #980954, (1998), 39.
- 16) 中川威雄: プレス成形難易ハンドブック第2版, 日刊工業新聞社, 東京, (1997), 403.
- 17) H.Maruyama: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, **17** (1977), 198.
- 18) 西山善次: マルテンサイト変態 基本編, 丸善, 東京, (1971), 13.
- 19) M.Usuda, Y.Ishii, S.Ujihara and T.Sakamoto: *36th Annual Meeting of J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, (1985), 317.