

## TRIP型複合組織鋼板の深絞り性に及ぼすしわ押え力の影響\*

長坂 明彦\*\*・和田 一秀\*\*\*

## Effects of Blank Holding Force on Deep Drawability of TRIP-aided Dual-phase Sheet Steels

Akihiko NAGASAKA and Kazuhide WADA

Effects 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) was affected by volume fraction of the retained austenite and its stability. Namely, the higher the volume fraction of the retained austenite and its stability, the larger the strength-deep drawability balance, i.e., the product of tensile strength and LDR. Furthermore, the higher the blank holding force (BHF), the larger the strength-deepdrawability balance of high carbon TDP steel. The excellent deep drawability was caused by 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 punch force of the shrinking flange.

キーワード：深絞り性，残留オーステナイト，しわ押え力，変態誘起塑性，高強度鋼板

## 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<sup>15)</sup> 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。今後の適用展開としては，高強度化に伴う難成形部品やテールドブランク<sup>16)</sup> への置換などにより，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，これ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，これに影響を及ぼすと考えられる $\gamma_R$ 特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

供試鋼には炭素量を0.1~0.4mass%の範囲で0.1mass%ずつ変化させた1.5Si-1.5Mn, mass%の冷延まま鋼板(板厚 $t_0=1.2\text{mm}$ )を用いた(表1)。製造条件は文献8に準じた。これらの鋼板に2台の塩浴炉を用いて，図1(a)に示す熱処理，すなわち2相域(

表1 供試鋼の化学成分 (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 |

\* 1998年9月4日(社)日本機械学会 第6回機械材料・材料加工技術講演会にて一部発表。

本研究の一部は，平成11年度高等専門学校教育充実設備費および(社)日本鉄鋼協会の助成を受けて行われた。

\*\* 機械工学科助教授

\*\*\* 技術室第一技術班技術専門職員

原稿受付 2000年10月31日

$T_{\alpha+\gamma}$  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  $\gamma_R$  の初期体積率がほぼ最大となる温度を採用した<sup>4)</sup>。以下では、これらの鋼をTDP1~TDP4と呼ぶ。比較のため、0.14C-0.21Si-1.74Mn, mass%冷延まま鋼板を用い、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℃の焼戻しを施した (図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。

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には、直径 $D_0=39\sim 45$ mmの円形ブランク試験片を1mm間隔にワイヤ放電加工し、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, ダイス径24.40mmで、肩半径はいずれも4mmの金型を用いて行った (図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 (図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 (Mo-K  $\alpha$  線) により、(200) $\alpha$ , (211) $\alpha$ , (200) $\gamma$ , (220) $\gamma$  および(311) $\gamma$  の5ピーク法<sup>17)</sup>を用いた。また、 $\gamma_R$ 中の炭素濃度 $C_\gamma$  (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。

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

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。

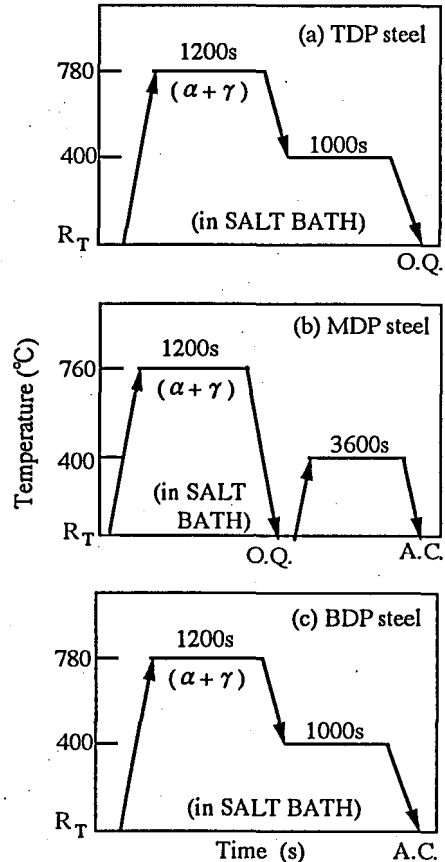
### 3. 実験結果

#### 3-1 組織と引張特性

図3にTDP鋼のマイクロ組織のSEM写真を示す。 $\alpha_b$

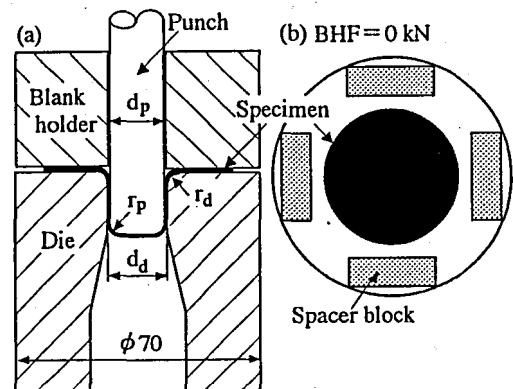
と $\gamma_R$ からなる0.20~0.55の第2相が $\alpha_f$ 粒界に沿ってネットワーク状 (連結状) に存在する。また、TDP鋼の $\gamma_R$ の初期体積率 $f_{\gamma_0}$ は0.05~0.17,  $\gamma_R$ 中の初期炭素濃度 $C_{\gamma_0}$ は1.25~1.44mass%で炭素量の増加に伴いそれぞれ高くなる (表2)。

表2に供試鋼の引張特性を示す。TDP鋼は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。



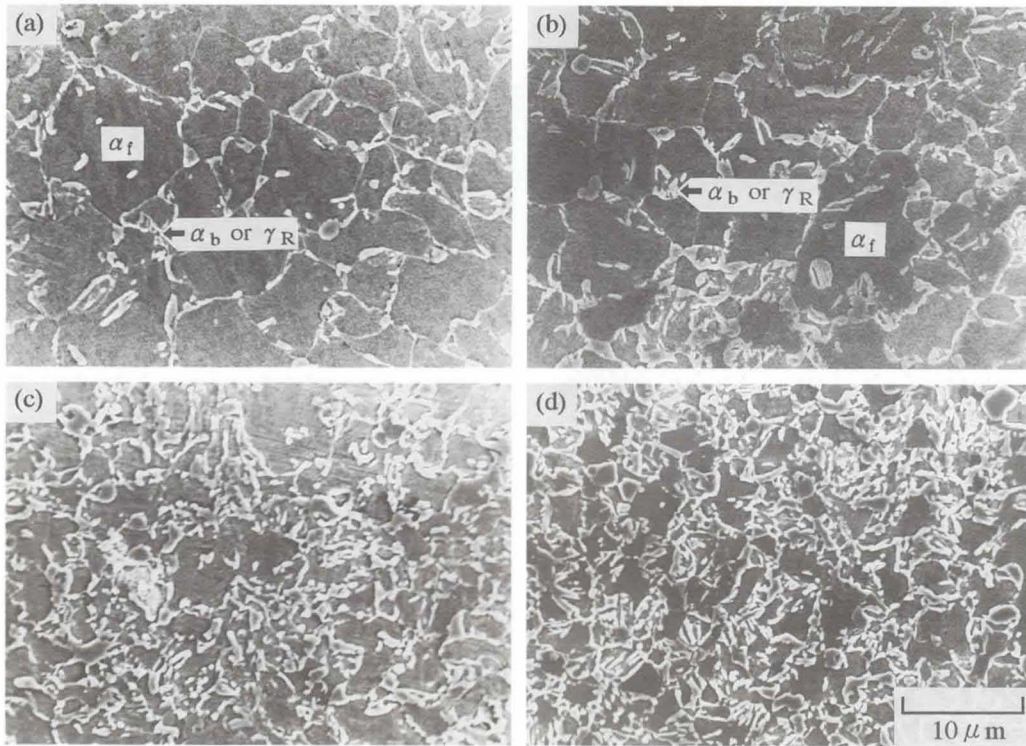
(O.Q.: 油冷, A.C.: 空冷,  $R_T$ : 室温)

図1 熱処理曲線



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

図2 スウィフトカップ試験金型



(a) TDP1, (b) TDP2, (c) TDP3, (d) TDP4

図3 TDP鋼のマイクロ組織のSEM写真

表2 供試鋼の冶金学的因子と引張特性

| Steel | f     | f <sub>γ0</sub> | C <sub>γ0</sub><br>(mass%) | YS<br>(MPa) | TS<br>(MPa) | UEI<br>(%) | TEI<br>(%) | TS×TEI<br>(GPa%) | RA<br>(%) | HV <sub>0</sub> | n    | r    |
|-------|-------|-----------------|----------------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------------|-----------|-----------------|------|------|
| TDP1  | 0.199 | 0.049           | 1.25                       | 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           | 1.38                       | 562         | 895         | 28.6       | 32.2       | 28.8             | 41.8      | 275             | 0.22 | 0.97 |
| TDP4  | 0.551 | 0.170           | 1.44                       | 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<sub>γ0</sub>: volume fraction of retained austenite, C<sub>γ0</sub>: carbon concentration in retained austenite, YS: 0.2% proof stress or yield stress, TS: tensile strength, UEI: 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 (ε = 5–15%) and r: r-value (ε = 10%).

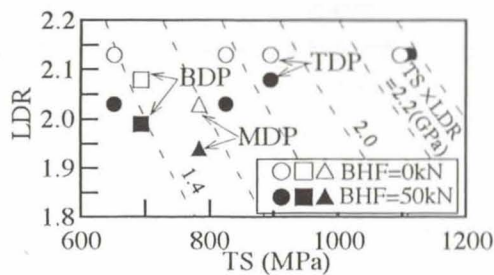


図4 限界絞り比LDRと引張強さTSの関係

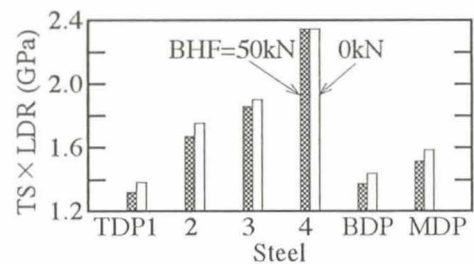


図5 各鋼の強度-深絞り性バランスTS×LDRの比較

### 3-2 深絞り性

図4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と一定と良好である。一方、BHF=50kNにおいて、低炭素添加量を有するTDP鋼のLDRは、他の複合組織鋼と同様低下する。

そこで、強度レベルがかなり異なることより、図5に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、本TDP鋼は24GPa%以上と強度-延性バランス $TS \times TEI$ も極めて高く(表2)、炭素添加量の多いTDP鋼ほど優れた $TS \times LDR$ を併せ持つ。また、 $TS \times LDR$ に対して鋼種間の差は大きく現れる。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。

図6に深絞り試験の絞り力 $P$ -ストローク $\delta$ 曲線を示す。BHF=50kNにおいて、TDP4は高LDRとなることより、高い最大絞り力と大きなパンチストロークを有する。

### 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

図7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(表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全てパンチ肩部で破断した。

板厚比はパンチ底で一様と薄くなり、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。

図8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、 $f_{\alpha m}$ はカップ平底においてX線回折による $f_{\gamma}$ から求めた。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 $P_{max}$ を上昇させる。

### 3-4 深絞り性と $\gamma_R$ 特性の関係

図9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。この結果は、より多量でより安定な $\gamma_R$ が深絞り性改善の支配的因子であることがわかる。

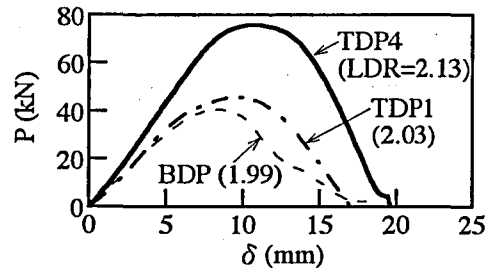


図6 絞り力 $P$ -パンチストローク $\delta$ 曲線

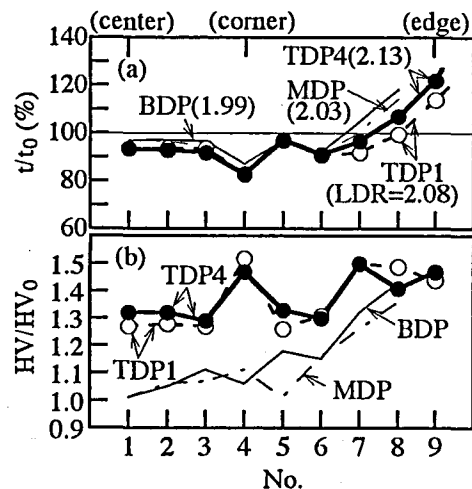
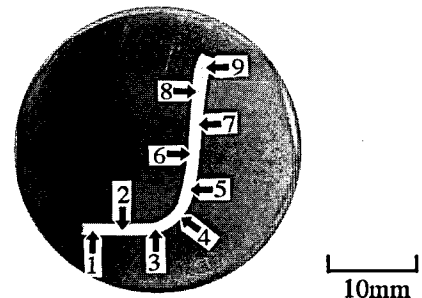


図7 カップの板厚比 $t/t_0$ および硬さ比 $HV/HV_0$ 分布

## 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。

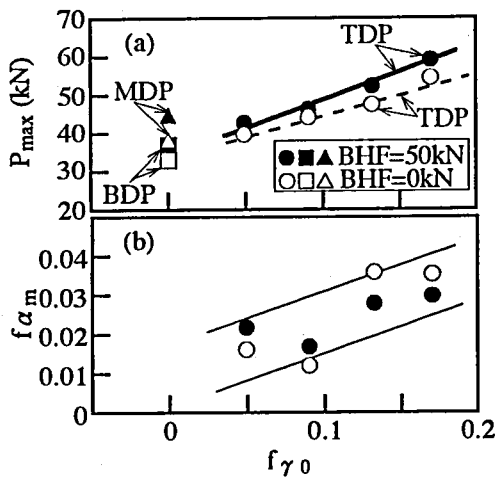


図8 最大絞り力 $P_{max}$ およびカップ平底でのひずみ誘起マルテンサイト変態量 $f_{\alpha m}$ と $\gamma_R$ の初期体積率 $f_{\gamma 0}$ の関係

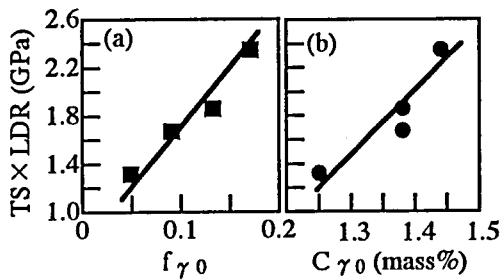


図9 強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ と $\gamma_R$ 特性の関係

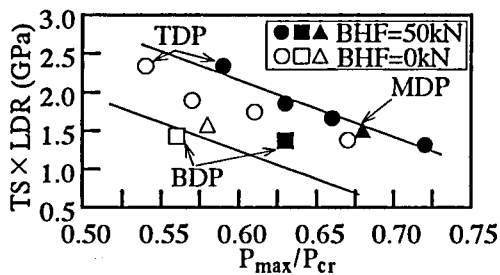


図10 強度-深絞り性バランス $TS \times LDR$ と相当破断力 $P_{max}/P_{cr}$ の関係

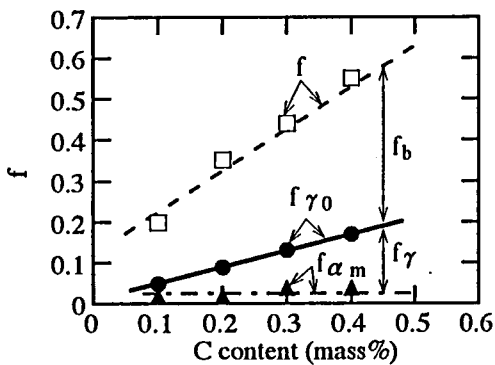


図11 第2相体積率と炭素添加量の関係

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

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

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。

図10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 $BHF=0, 50kN$ (図8(a))の値で、 $P_{cr}$ は表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。とくに $BHF=50kN$ において、高C量のTDP鋼は $\gamma_R$ を含まない他の複合組織鋼より優れた深絞り性を示した。

図7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。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、ひずみ硬化が特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。 $f_{\gamma 0}$ が異なるにも関わらず硬さが変わらないのは、 $\gamma_R$ 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、図8(b)のカップ平底でのひずみ誘起マルテンサイト変態量 $f_{\alpha m}$ からも同様の傾向を示したことで裏付けられた。

#### 4-2 深絞り性に対する $\gamma_R$ の役割

図9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 $f_{\gamma 0}$ と正の相関、 $C_{\gamma 0}$ 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 $C_{\gamma 0}$ の位置付けとは異なる。

そこで、表2と図8(b)から図11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 $f_{\alpha m}$ の差が未変態 $f_{\gamma}$ に相当すると仮定すると、 $f_{\alpha m}$ の割合は相対的に

小さいことがわかる。すなわち、炭素添加量の増加に伴い、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、 $\gamma_R$ の安定性が関与していると考えてよいだろう。同様に、松村ら<sup>6)</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。図5より、最も安定な $\gamma_R$ 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を高めることと、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ることを示唆した。

#### 4. 結 言

(1) 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。

(2) これは、より多量で安定な $\gamma_R$ 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】ならびに平成11年度高等専門学校教育充実設備費に対し、深

く感謝の意を表するとともに、潤滑剤を提供頂いた日本工作油(株)および平成11年度卒業研究生の白井敏雄氏・鎌崎学氏・篠原誠氏・林将也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. 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-Hagane*, **83** (1997), 335.
- 9) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and H. Shirasawa: *Tetsu-to-Hagane*, **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-Hagane*, **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 and M. Kobayashi and S. Hashimoto: *Tetsu-to-Hagane*, **85** (1999), 552.
- 14) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi, Y. Kobayashi and S. Hashimoto: *Tetsu-to-Hagane*, **85** (1999), 885.
- 15) Y. Ojima, Y. Shiroy, 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.