

# YAG レーザ溶接した TRIP/DP テーラードブランクのプレス成形性\*

長坂明彦\*\*・三尾 敦\*\*\*・和田一秀\*\*\*・大藪安澄\*\*\*\*

## Press Formability of YAG Laser Welded TRIP/DP Tailored Blanks

NAGASAKA Akihiko\*\*, MIO Atsushi\*\*\*, WADA Kazuhide\*\*\* and OYABU Azumi\*\*\*\*

In the present work, to improve the press formability of the combination of the TDP steel and ferrite-martensite dual-phase (DP) steel, the mechanical properties and press formability (stretch-formability) of YAG laser welded TRIP/DP tailored blanks were investigated. An as-cold-rolled sheet steel with the chemical composition of (0.1–0.3)C–1.5Si–1.5Mn (mass%) was used in this study. For comparison, 0.14C–0.22Si–1.78Mn (mass%) DP steel was also prepared. The quenched DP steel is called MDP0, and the tempered DP steel is called MDP4. For butt welding, the blank obtained after the heat treatment was cut using a fine cutter, and YAG laser processing equipment was used. The press formability was evaluated from the maximum stretch-height ( $H_{max}$ ). Tensile tests and stretch forming tests have been conducted for laser butt welded joints obtained from the combination of the different steel. The  $H_{max}$  value of the DP0 steel was not controlled at the strength level of the MDP steel, and was not different from the  $H_{max}$  value of the MDP4 steel. It is thought that this was assisted to TRIP of the TDP steel because the tensile strength of the TDP steel is consequentially lower than that of the MDP0 steel. High ductility and the high stretch-formability were able to be secured by the high strength tailored blank.

キーワード：YAG レーザ溶接，残留オーステナイト，TRIP 鋼，テーラードブランク，プレス成形性

### 1. 緒言

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) <sup>1)</sup> を有効に利用した TRIP 型複合組織鋼 (TDP 鋼) はとくに優れたプレス成形性を有する <sup>2–15)</sup> . 前報 <sup>16)</sup> では，C 量の異なる ( $\gamma_R$  特性の異なる) TRIP 鋼板同士でプレス成形性を調査したが， $\gamma_R$  の有無同士でプレス成形性を調査した報告はほとんどない。

そこで本研究では，YAG レーザを用いて突合せ溶接した強度などの異なる異種材継手試験片 (テーラードブランク) を作製し， $\gamma_R$  の有無に関するテーラードブランクの成形性の挙動を明らかにすることを目的として，張出し性および深絞り性を調査した。

### 2. 実験方法

供試鋼には (0.1–0.3) C–1.5Si–1.5Mn, mass% の冷延まま鋼板 (板厚 1.2mm) を用いた (表 1) . この鋼板に 2 相域焼なまし+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 相組織からなる TDP1~3 鋼とした (図 1(a)) . また， $\gamma_R$  を含まない 0.14C–0.22Si–1.78Mn, mass% のフェライト・マルテンサイト複合組織鋼 (MDP0 鋼) ，これを 400°C で焼戻した鋼 (MDP4 鋼) を用いた (図 1(b)) .

突合せ接合は，熱処理後のブランクをファインカッターにより切断し，YAG レーザ加工機により行った。加工条件はパルスエネルギー 6J/P，パルス幅 3.8ms，パルス繰返し数 45Hz，溶接速度を 500mm/min 一定にし， $N_2$  ガスでシールドした。以後，TDP1~3 鋼と組合せた MDP0 鋼のテーラードブランクを TDP1~3-MDP0，TDP1~3 鋼と MDP4 鋼のそれを TDP1~3-MDP4 とそれぞれ呼ぶ。

引張試験には圧延方向に製作した JIS13B 号引張試験片を用い，溶接線を引張方向に対して直交方向とした (図 2) . クロスヘッド速度は 1mm/min (ひずみ速度  $2.8 \times 10^{-4}$ /s) で試験を行った。プレス成形性 (張出し性および深絞り性) は，最大張出し高さ  $H_{max}$  <sup>12)</sup> および限界絞り比  $LDR$  <sup>4)</sup> でそれぞれ評価した (図 3, 4) .

\* 2003 年 3 月 10 日 (社) 日本機械学会 北陸信越支部 第 40 期総会・講演会にて一部発表。

本研究の一部は，(財) 中部電力基礎技術研究所および (財) 天田金属加工機械技術振興財団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

\*\*\*\* 長野工業高等専門学校専攻科・生産環境システム専攻 原稿受付 2003 年 5 月 16 日

$\gamma_R$ 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.

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

表1 供試鋼の化学成分 (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al
TDP1	0.10	1.50	1.55	0.004	0.005	0.013
TDP2	0.21	1.59	1.51	0.004	0.003	0.013
TDP3	0.31	1.50	1.55	0.004	0.001	0.011
MDP0	0.14	0.22	1.78	0.013	0.004	0.054
MDP4	0.14	0.22	1.78	0.013	0.004	0.054

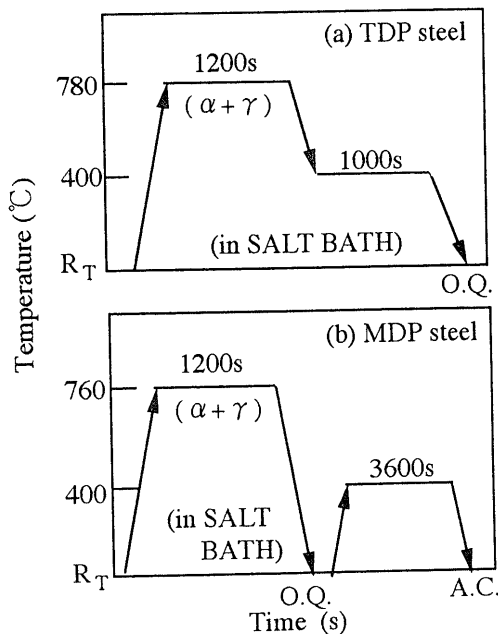
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 組織と引張特性

TDP鋼は $\alpha_b$ と $\gamma_R$ からなる第2相が母相の $\alpha_f$ 粒界に沿って連結状に存在する (図5). 表2に供試鋼の $\gamma_R$ の初期体積率 $f_{\gamma,0}$ , 初期炭素濃度 $C_{\gamma,0}$ および機械的性質を示す. TDP鋼は高い引張強さ $TS$ と大きな全伸び $TEI$ から, 25GPa%以上の優れた強度-延性バランス $TS \times TEI$ および高い $n$ 値を有する<sup>2-3)</sup>.

また, 炭素当量 $C_{eq}$ は次式より求め, 0.4~0.6mass%の範囲である. ここで, [C], [Mn]および[Si]は, 含有量 (mass%) を示す.

$$C_{eq} = [C] + 1/6[Mn] + 1/24[Si] \dots (2)$$



(O.Q.: 油冷, A.C.: 空冷,  $R_T$ : 室温)

図1 熱処理曲線

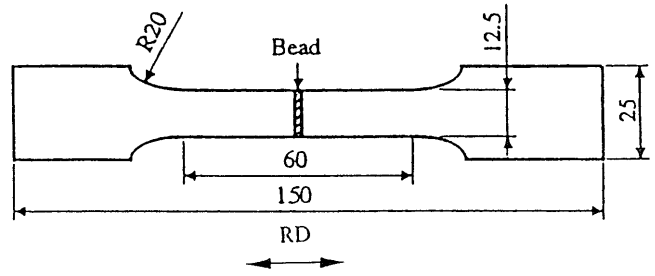
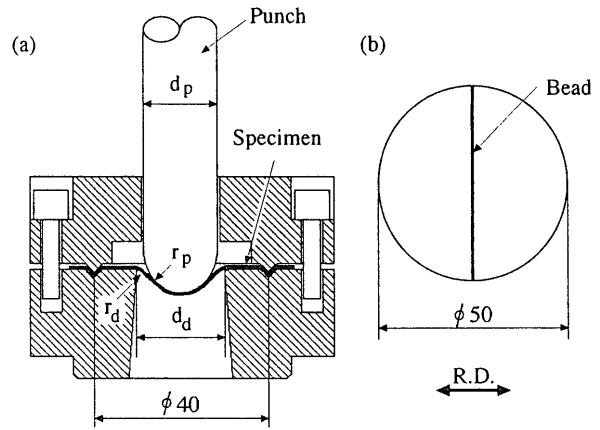
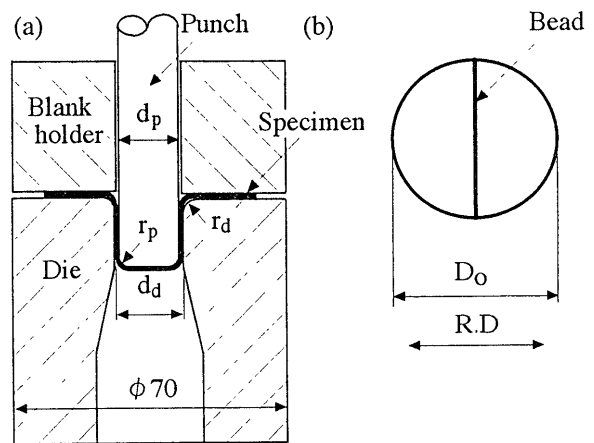


図2 引張試験片



( $d_p=17.4\text{mm}$ ,  $r_p=8.7\text{mm}$ ,  $d_d=22\text{mm}$ ,  $r_d=1\text{mm}$ )

図3 張出し試験金型



( $d_p=20.64\text{mm}$ ,  $r_p=4\text{mm}$ ,  $d_d=24.40\text{mm}$ ,  $r_d=4\text{mm}$ )

図4 スウィフトカップ試験金型

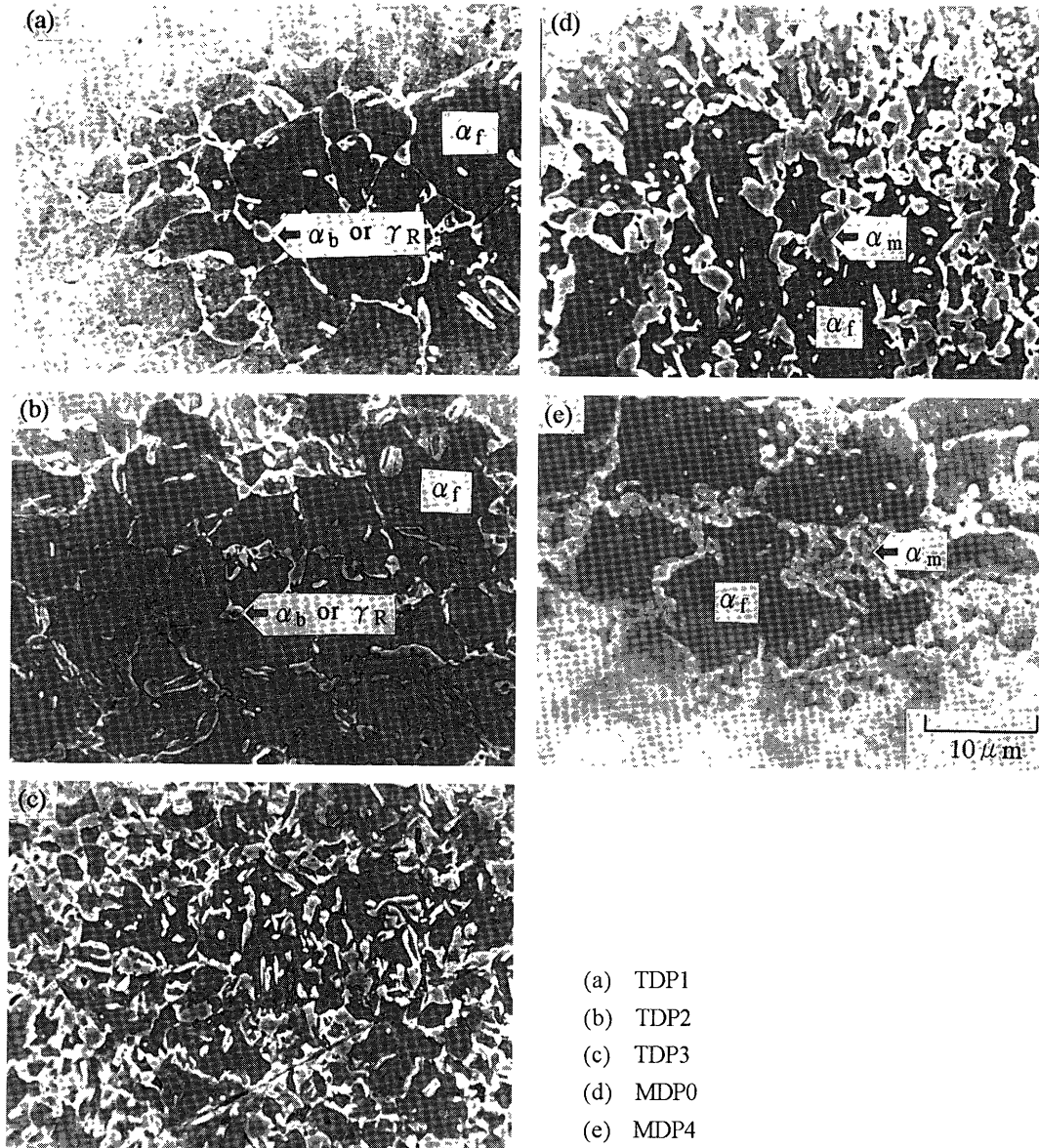
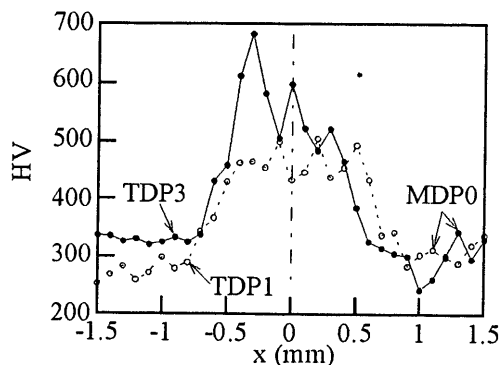


図5 ミクロ組織写真

### 3.2 溶接性

図6に接合部中心からのピッカース硬さ  $HV$  分布 (荷重 0.49N) を示す。TDP3-MDP0 ではマルテンサ

図6 接合部断面のピッカース硬さ ( $HV$ ) 分布

イト化した溶融部が  $HV600$  以上と極めて高い。一方、TDP1-MDP0 では約  $HV400$  と低下する。

### 3.3 溶接後の引張特性

表3に溶接線を引張方向に対して直角方向とした場合の引張特性を、図7に応力-ひずみ曲線を示す。また、図10に全伸び  $TEI$  と引張強さ  $TS$  の関係を示す。ここで、テーラードブランクの  $TS$  は表3の値を用いた。

図7より、TDP1-MDP4の強度レベルは破断側のTDP1と同等で、伸びはTDP1の半分程度である。母材の強度レベルが  $50\text{MPa}$  以上異なる場合、引張強さ  $TS$  が低い方がのみが変形し、破断に至った。一方、同強度レベル ( $50\text{MPa}$  程度以下) の場合 (TDP2-MDP4)、双方が共に同程度変形し、MDP4側で破断した。

表2 残留オーステナイト特性と引張特性

Steel	$f_{\gamma 0}$	$C_{\gamma 0}$ (mass%)	$TS$ (MPa)	$TEI$ (%)	$TS \times TEI$ (GPa%)	$n$	$C_{eq}$ (mass%)
TDP1	0.049	1.31	671	33.8	22.7	0.25	0.41
TDP2	0.090	1.38	825	36.0	29.7	0.22	0.51
TDP3	0.132	1.41	911	30.9	28.1	0.22	0.61
MDP0	-	-	979	4.9	4.8	0.03	0.45
MDP4	-	-	791	11.0	8.7	0.08	0.45

$f_{\gamma 0}$ : volume fraction of retained austenite,  $C_{\gamma 0}$ : carbon concentration in retained austenite,  $TS$ : tensile strength,  $TEI$ : total elongation,  $TS \times TEI$ : strength-ductility balance,  $n$ : work hardening exponent and  $C_{eq}$ : carbon equivalent.

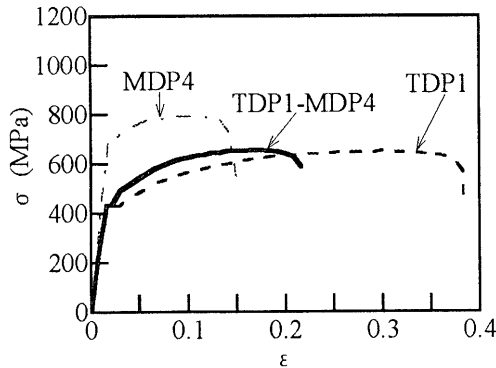


図7 応力-ひずみ曲線

表3 テーラードブランクの引張特性

Steel	$TS$ (MPa)	$TEI$ (%)	Ratio (%)		Fracture		$C_{eq}$ (mass%)
			TDP	MDP	TDP	MDP	
TDP1-MDP0	682	19.6	100	0	F		0.43
TDP2-MDP0	812	19.5	100	0	F		0.48
TDP3-MDP0	912	10.0	100	0	F		0.53
TDP1-MDP4	657	19.7	100	0	F		0.43
TDP2-MDP4	771	19.0	44	56		F	0.48
TDP3-MDP4	759	11.7	0	100		F	0.53

F: Fracture

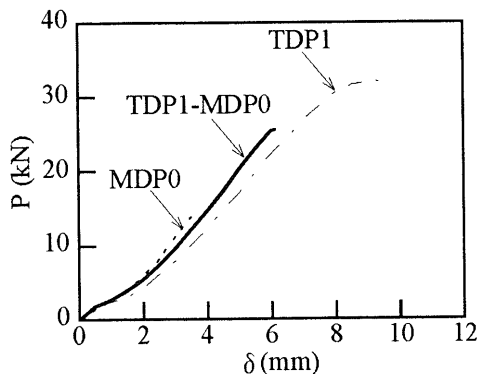


図8 張出し成形のパンチカーストローク曲線

### 3.4 溶接前後の成形性

図8にTDP1鋼, MDP0鋼およびTDP1-MDP0の張出し試験のパンチカーストローク曲線を示す。TDP1-MDP0のテーラードブランクはMDP0鋼の低い張出し高さを上昇させる。

図9にテーラードブランクの(a)最大張出し荷重  $P_{max}$  と(b)最大張出し高さ  $H_{max}$  の比較を示す。また、

図10に全伸び  $TEI$ , 最大張出し高さ  $H_{max}$  および限界絞り比  $LDR$  と引張強さ  $TS$  の関係を示す。ここで、テーラードブランクの  $TS$  は表3の値を用いた。図中、成形性の指標として、強度-延性バランス  $TS \times TEI$ , 強度-張出し性バランス  $TS \times H_{max}$  そして強度-深絞り性バランス  $TS \times LDR$  を等高線(破線)でそれぞれ示した。

図8より、テーラードブランクでは、TDP鋼の強度レベルの高いTDP3-MDP4, TDP3-MDP0で  $P_{max}$ ,  $H_{max}$  が共に低下する。TDP3-MDP4の張出し性は溶接により通常のTDP鋼の  $H_{max}$  に比べ、約60%低下した(図9(b))。この理由として、TDP3鋼の溶接部最高硬さ  $HV_{max}$  がHV600以上と高く(図6)、張出し加工で表面積を拡大する際、溶接部に張出し変形が拘束されることに起因したと考えられる。一方、TDP1-MDP4は通常の  $H_{max}$  の約30%低下した(図9(b))。MDP0鋼の場合、MDP鋼の強度レベルに左右されず、MDP4鋼と  $H_{max}$  値が変わらなかった。これは、結果的にTDP鋼の  $TS$  がMDP0鋼のそれより低く、TDP鋼のTRIPにアシストされることが一因であると考えられる。

つぎに、テーラードブランクの深絞り性は、炭素量の異なるTDP1-MDP4, TDP3-MDP4で炭素当量の増加に伴い(表3)、 $LDR$  で1.89から1.45と0.4程度低下する(図10(c))。これはTDP3-MDP4の溶接部の  $HV_{max}$  がHV600以上とじん性を低下させ、パンチ肩部で肩割れが発生することおよび変形抵抗が拘束されることが一因であると考えられた。

## 4. 結言

YAGレーザ溶接したTRIP/DPテーラードブランクのプレス成形性について得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 高強度テーラードブランク材で高延性かつ高成形性が確保できた。
- (2) 高強度テーラードブランクの張出し性は、MDP0鋼の場合、MDP鋼の強度レベルに左右されず、MDP4鋼と  $H_{max}$  値が変わらなかった。これは、TDP鋼の  $TS$  がMDP0鋼のそれより低く、TDP鋼のTRIPにアシストされることが一因であると考えられる。
- (3) 高強度テーラードブランクの深絞り性は、炭素当量の増加に伴い低下した。これは溶接部がHV600程度と極めて高く、パンチ肩部で肩割れが発生することおよび変形抵抗が拘束されるためである。

最後に、本研究を御支援いただきました(財)中部電力基礎技術研究所ならびに(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と同時に試料を御提供していただいた(株)神戸製鋼所、卒業研

究生の片桐大將氏, 永原大輔氏, 宮下泰行氏および柳沢雅俊氏に併せてお礼申し上げます。

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, T. Ohue and T. Amaike: Tetsu-to-Hagane, **79** (1993), 209.
- 3) S. Hiwatashi, M. Takahashi, T. Katayama and M. Usuda: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **35** (1994), 1109.
- 4) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. Hashimoto: Tetsu-to-Hagane, **85** (1999), 552.
- 5) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi, Y. Kobayashi and S. Hashimoto: Tetsu-to-Hagane, **87** (2001), 607.
- 6) Y. Ojima, Y. Shiroy, Y. Taniguchi and K. Kato: SAE Tech. Pap. Ser., #980954, (1998), 39.
- 7) O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **27** (1987), 570.
- 8) K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. Hashimoto: Metall. Trans. A, **23A** (1992), 3085.
- 9) K. Sugimoto, N. Usui, M. Kobayashi and S. Hashimoto: ISIJ Int., **32** (1992), 1311.
- 10) K. Sugimoto, M. Misu, M. Kobayashi and H. Shirasawa: ISIJ Int., **33** (1993), 775.
- 11) O. Matsumura, Y. Sakuma, Y. Ishii and J. Zhao: ISIJ Int., **32** (1992), 1110.
- 12) K. Sugimoto, M. Kobayashi, A. Nagasaka and S. Hashimoto: ISIJ Int., **35** (1995), 1407.
- 13) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. Hashimoto: Tetsu-to-Hagane, **83** (1997), 335.
- 14) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and H. Shirasawa: Tetsu-to-Hagane, **84** (1998), 218.
- 15) K. Sugimoto, A. Nagasaka, M. Kobayashi and S. Hashimoto: ISIJ Int., **39** (1999), 56.
- 16) A. Nagasaka, A. Mio, K. Sugimoto and S. Hashimoto: CAMP-ISIJ, **15** (2002), 632.
- 17) H. Maruyama: J. Jpn. Soc. Heat Treat., **17** (1977), 198.
- 18) Z. Nishiyama: Martensite Transformation, Maruzen, Tokyo, (1971), 13.

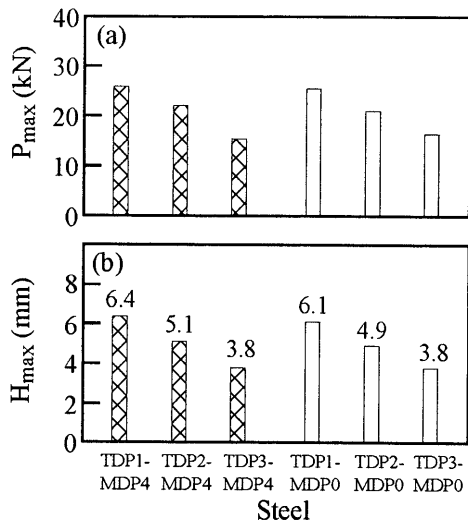


図 9 テーラードブランク材の最大張出し荷重  $P_{max}$  および最大張出し高さ  $H_{max}$  の比較

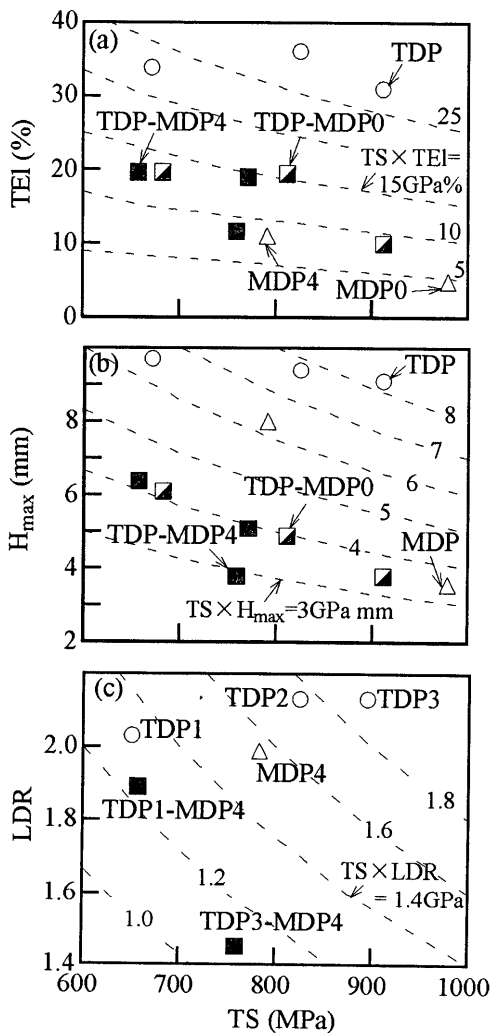


図 10 引張強さ  $TS$  と全伸び  $TEI$ , 最大張出し高さ  $H_{max}$  および限界絞り比  $LDR$  の比較