

TRIP 鋼板の YAG レーザ成形

長野工業高等専門学校・機械工学科

助教授 長坂 明彦

(平成 12 年度研究開発助成 AF-2000017)

キーワード：TRIP 鋼，YAG レーザ，プレス成形性

1. 研究の目的と背景

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 (γ_R) の変態誘起塑性 (TRIP)¹⁾ を有効に利用した TRIP 型複合組織鋼【TRIP 型の Dual-Phase 鋼：TDP 鋼】はとくに優れたプレス成形性を有する²⁻¹⁵⁾。前報¹⁶⁾では，C 量の異なる (γ_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， γ_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， γ_R の有無に関するテーラードブランクのプレス成形性の挙動を明らかにすることを目的として，引張特性，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 (α_f) + ベイナイト (α_b) + γ_R の 3 相組織からなる TDP1~3 鋼とした (図 1(a))。また， γ_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，N₂ 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} ¹²⁾ および限界絞り比 LDR ⁴⁾ でそれぞれ評価した (図 3, 4)。

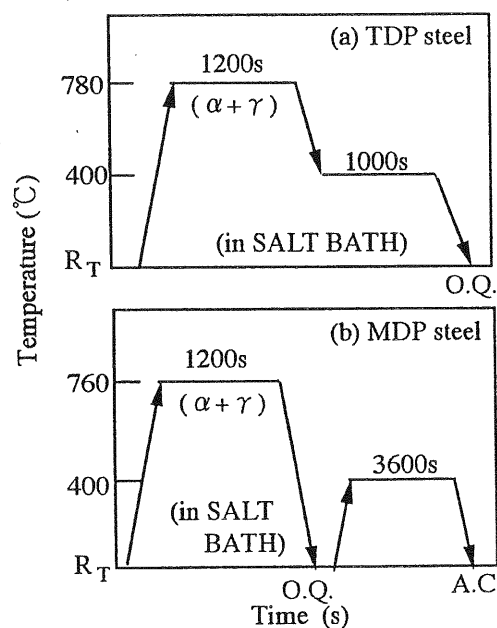
γ_R の体積率 f_γ は X 線回折法 (Mo-K α 線) により (200) α ，(211) α ，(200) γ ，(220) γ および (311) γ の 5 ピーク法¹⁷⁾ を用いた。また， γ_R 中の炭素濃度 $C_{\gamma 0}$ (mass%) は，Cr-K α 線の回折面 (220) γ から求めた格子定数 a_γ (nm)

を次式¹⁸⁾に代入して計算した。

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

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



(O.Q.: 油冷, A.C.: 空冷, R.T.: 室温)

図 1 熱処理曲線

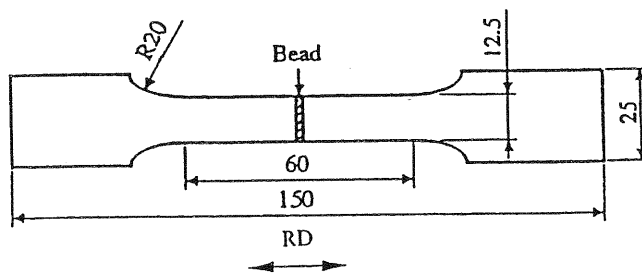


図 2 引張試験片

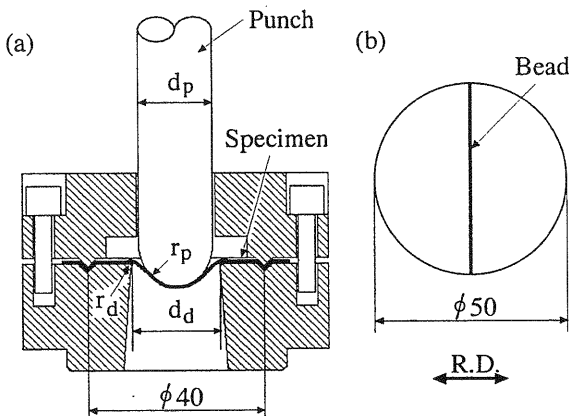
3. 実験結果および考察

3.1 組織と引張特性

図5にTDP1鋼とMDP0鋼の走査電子顕微鏡写真を示す。ミクロ組織は3%ナイトールで腐食した。TDP1鋼の第2相は α_b と γ_R 、MDP0鋼のそれはマルテンサイト(α_m)からそれぞれなる。とくに、TDP鋼は α_b と γ_R からなる第2相が母相の α_f 粒界に沿って連結状に存在する。

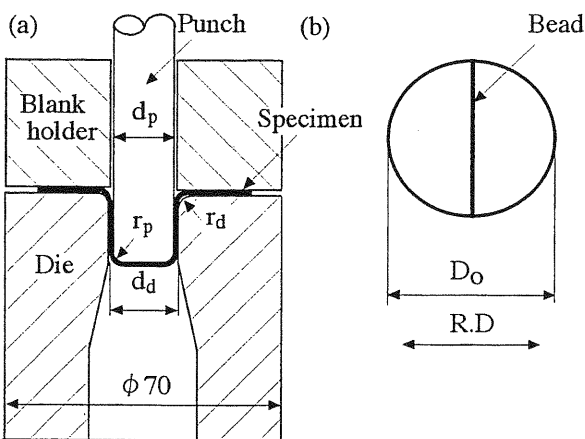
表2に供試鋼の γ_R の初期体積率 $f_{\gamma 0}$ 、初期炭素濃度 $C_{\gamma 0}$ および機械的性質を示す。TDP鋼の $f_{\gamma 0}$ および $C_{\gamma 0}$ はC量の増加に伴い、それぞれ高くなる。TDP鋼は高い引張強さ TS と大きな全伸び TEL から、25GPa%以上の優れた強度-延性バランス $TS \times TEL$ および高い n 値を有する²⁻³⁾。また、炭素当量 C_{eq} は次式より求め、0.4~0.6mass%の範囲である。ここで、 $[C]$ 、 $[Mn]$ および $[Si]$ は、含有量(mass%)を示す。

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



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

図3 張出し試験装置



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

図4 スウィフトカップ試験装置

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

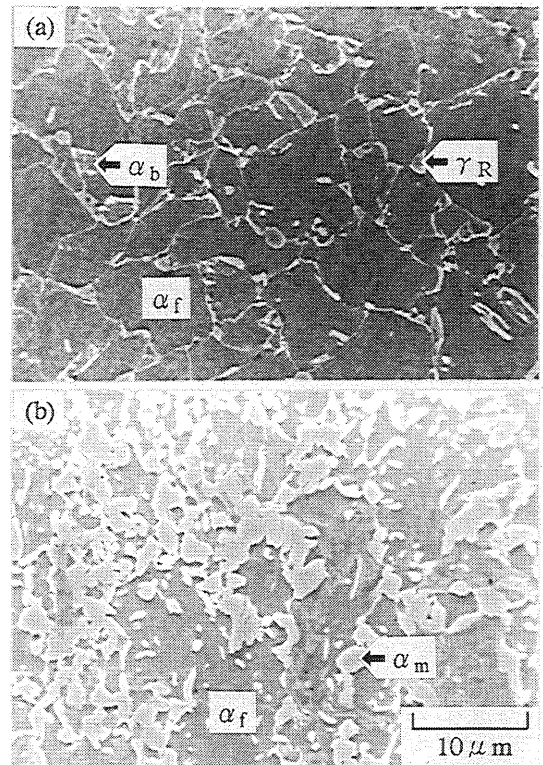


図5 ミクロ組織写真

((a) TDP1鋼, (b) MDP0鋼)

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)	TEL (%)	$TS \times TEL$ (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, TEL : total elongation, $TS \times TEL$: strength-ductility balance, n : work hardening exponent and C_{eq} : carbon equivalent.

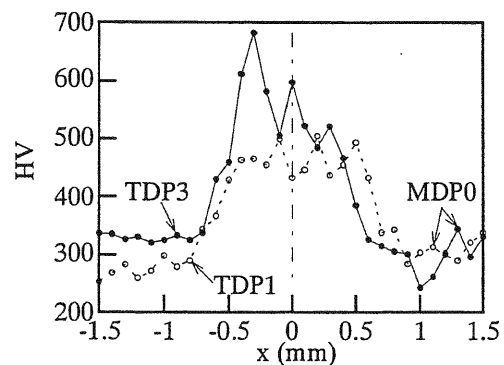


図6 接合部断面のピッカース硬さ分布

重 0.49N) を示す。TDP3-MDP0 ではマルテンサ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交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(a)に全伸び TEI と引張強さ TS の関係を示す。ここで、炭素当量 C_{eq} は両鋼の平均値とし、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 50MPa 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 (50MPa 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 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

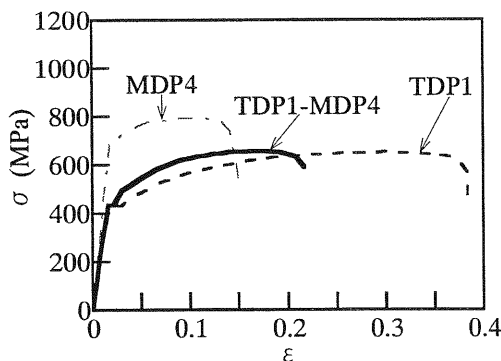


図 7 応力-ひずみ曲線

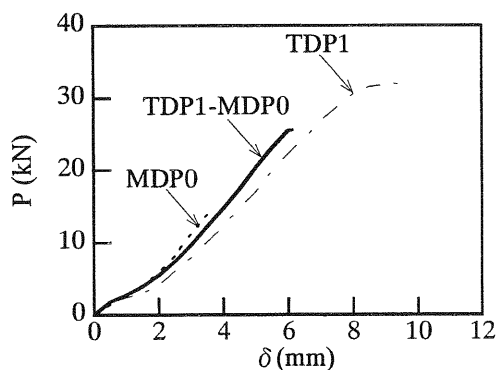


図 8 張出し成形のパンチカーストローク曲線

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 9 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 10(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 HV 600 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 HV 600 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。

謝辞

最後に、本研究を御支援いただきました(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ともに、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. Hiwataishi, 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.

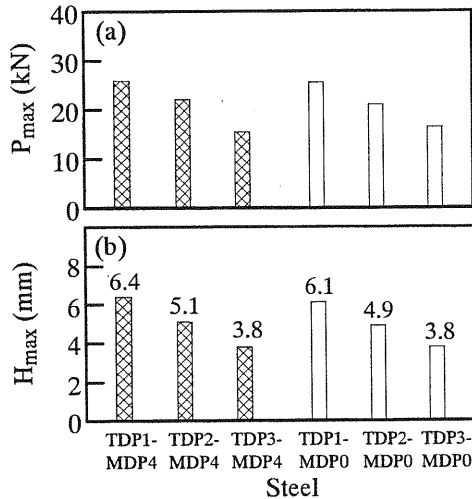


図9 テーラードブランク材の最大張出し荷重 P_{max} および最大張出し高さ H_{max} の比較

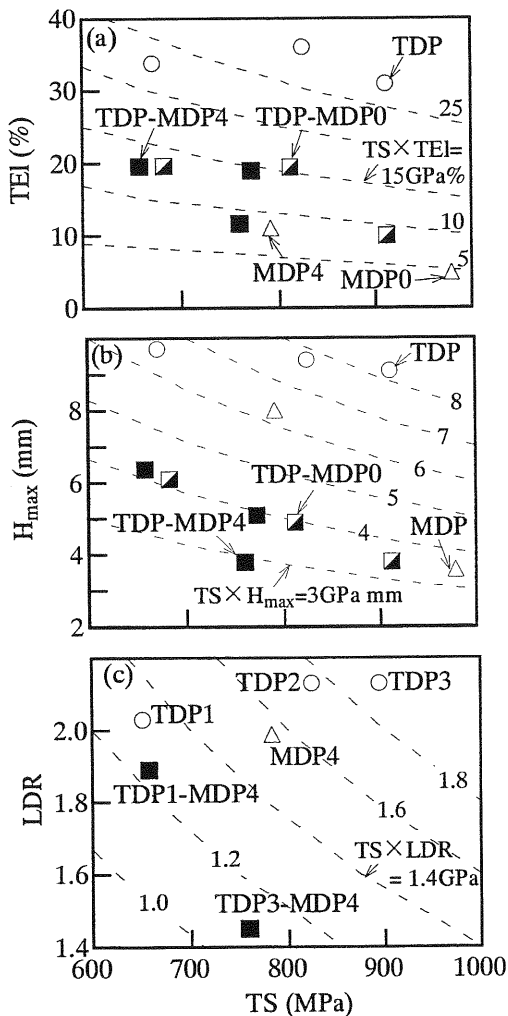


図10 引張強さ TS と全伸び TEI , 最大張出し高さ H_{max} および限界絞り比 LDR の比較