YAG レーザ接合した TRIP 鋼板のプレス成形性

(第2報：テーラードブランク法)

Press Formability of YAG Laser Welded TRIP-aided Dual-phase Steel Sheets (2nd report, Tailored Blank Method)

○正 長坂 明彦 (長野高専)

正 小林 義一

正 杉本 公一 (信州大工)

Akihiko NAGASAKA and Yoshikazu KOBAYASHI, Nagano National College of Technology, 716 Tokuma, Nagano 381-8550
Koh-ichi SUGIMOTO, Shinshu University

Key Words: press formability, retained austenite, YAG laser welded joint, transformation-induced plasticity, high strength steel, tailored blank

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 (γ_R) の変態誘起塑性 (TRIP) 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¹⁾。前報²⁾では、炭素量が 0.2mass% からなる同種材継手試験片で成形性を調査したが、異種材継手試験片での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同種材継手試験片、および強度などの特性の異なる異種材継手試験片 (テーラードブランク) を製作し、TDP 鋼の成形性に対するレーザ加工条件を明らかにすることを目的として、引張特性とプレス成形性 (曲げ性、張出し性および深絞り性) を検討した。

2. 実験方法

供試鋼には 0.3C-1.5Si-1.5Mn, mass% の冷延まま鋼板 (板厚 1.2mm) を用いた (Table 1)。この鋼板に 2 相域焼きなまし + 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 TDP3 鋼とした。また、テーラードブランクとして C 量のみが異なる 0.1C-1.5Si-1.5Mn, mass% の TDP1 鋼を用いた。

Fig. 1. Geometry of tensile specimen.

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

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al
TDP3	0.29	1.46	1.50	0.014	0.001	0.043
TDP1	0.10	1.49	1.50	0.015	0.001	0.038

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 (パルス発振、最大平均出力 350W、最大ピーク出力 4.5kW) により行った。加工条件はパルスエネルギー 6.0J/P とパルス幅 3.8ms を一定にし、溶接速度 (送り速度) を $F=100\sim900\text{mm/min}$ と変化させ、 N_2 ガスでシールドした。

引張試験には圧延方向に製作した JIS13B 号引張試験片と、突合せ接合した溶接方向の異なる 2 種類の試験片を用いた (Fig. 1)。クロスヘッド速度は 1mm/min (ひずみ速度 $2.8\times10^{-4}/s$) で試験を行った。成形性は最小曲げ半径 $R_{\min}$ 、最大張出し高さ $H_{\max}$ および限界絞り比 LDR で評価した (成形条件省略)。

Fig. 2. Vickers hardness (HV) distribution of welds in TDP3 steel.

Fig. 3. Vickers hardness (HV) distribution of welds in TDP3 and TDP1 steels at $F=500\text{ mm/min}$.

Table 2. Retained austenite characteristics and tensile properties.

Steel	f	f_{γ_0}	C_{γ_0} (mass%)	TS (MPa)	TEI (%)	$TS \times TEI$ (GPa%)	RA (%)	n	r
TDP3	0.441	0.132	1.41	893	32.5	29.0	41.8	0.22	0.97
TDP1	0.199	0.049	1.31	666	37.7	25.1	49.2	0.25	0.89

f : volume fraction of second phase, f_{γ_0} : volume fraction of retained austenite, C_{γ_0} : carbon concentration in retained austenite, TS: tensile strength, TEI: total elongation, $TS \times TEI$: strength-ductility balance, RA: reduction of area, n : work hardening exponent ($\epsilon=5\sim15\%$) and r : r -value ($\epsilon=10\%$).

3. 実験結果および考察

3.1 組織と引張特性

Table 2 に供試鋼の γ_R 特性および機械的性質を示す。TDP 鋼は α_b と γ_R からなる第2相が母相の α_f 粒界に沿って連結上に存在する。この γ_R 粒子の γ_R 初期体積率 f_{γ_0} および γ_R 中の初期炭素濃度 C_{γ_0} は、炭素量の増加とともにそれぞれ高くなる。また、強度-延性バランス $TS \times TEI$ も同様に高くなる。

3.2 溶接性

Fig. 2 および Fig. 3 に、接合部中心からのピッカース硬さ (荷重 0.45N) HV 分布を示す。TDP3 鋼ではマルテンサイト化した溶融部 ($HV600$) と母材 ($HV300$) との硬さ比 HV_{max}/HV_0 が 2 程度であり³⁾、低 F 側になるにしたがい溶込み幅が大きくなる。一方、TDP1 鋼では HV_{max}/HV_0 が約 1.7 と 0.3 低下する ($F=500\text{mm/min}$)。曲げ性は裏曲げで $F=300\sim 700\text{mm/min}$ で最小曲げ半径 R_{min} がほぼ最小と溶接性が良好であった。

3.3 溶接後の引張特性

Fig. 4 に引張強さ TS および全伸び TEI と溶接速度 F の関係を示す。試験片には溶接線に対して垂直方向に引張試験した場合の Fig. 1(a) を供した。TDP3 鋼の引張特性は $F=300\sim 500\text{mm/min}$ で最大で、通常の全伸び TEI と同等レベルである。このことは継手部の健全性を示している。高 F 側での低下は、溶込み不良のためである。一方、低 F 側の小さな TEI は、レーザ表面で形状変化を生じ、切欠きとして作用し、これが応力集中を引起こしたためである。また、 C 量の異なる TDP3 鋼と TDP1 鋼をテーラードブランクした TDP1-3 鋼を引張試験したところ、強度レベルの低い TDP1 鋼側で破断した。このことは、溶接部が健全であることで継手部からは破断せず、 γ_R の量が少なくかつ不安定な TDP1 鋼から破壊することが示唆される (Table 2)。

3.4 溶接後のプレス成形性

Fig. 5 に最大張出し高さ H_{max} および限界絞り比 LDR と溶接速度 F の関係を示す。 $F=0\text{mm/min}$ の値が通常の溶接無しの場合の値である。 $F=500\text{mm/min}$ で TDP3 鋼の張出し性は溶接により通常の H_{max} の約 60%、深絞り性は LDR で 0.7 程度低下する。この理由として、マルテンサイト化した溶接部と母材との硬さ比が 2 程度であり、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、および深絞り加工で縮みフランジ部の変形抵抗を増大することに起因したと考えられる³⁾。一方、TDP1 鋼は通常の H_{max} の約 30% 低下するが、 LDR は同一である。なお、TDP3 鋼と TDP1 鋼をテーラードブランクにすることで、 $H_{max}=5.51\text{mm}$ 、 $LDR=1.73$ とそれぞれの同種材継手の平均値に相当する。

そこで、Fig. 6 に全伸び TEI と C 量の関係を示す²⁾ ($F=500\text{mm/min}$)。試験片には溶接線方向に引張試験した場合の Fig. 1(b) を供した。 C 量の増加とともに、 TEI は溶接線の影響を受け、通常の溶接無しと比べ大幅に低下する。このことは、硬さ比の異なる溶接線が変形抵抗を増加させる一因であると考えてよい (Fig. 3)。

4. 結言

- 1) TDP3 鋼の成形性に対する適切なレーザ溶接条件は、パルスエネルギー 6.0J/P の溶接速度 500mm/min 付近に存在した。
- 2) 成形性は C 量の増加とともに低下するが、TDP3 鋼と TDP1 鋼をテーラードブランクにすることで、張出し性および深絞り性が

それぞれの同種材継手の平均値に相当した。

最後に、本研究をご支援いただきました (財) 金型技術振興財団ならびに (財) 天田金属加工機械技術振興財団に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. Nagasaka et al.: *Tetsu-to-Hagane*, 87 (2001), 552.
- 2) A. Nagasaka et al.: *CAMP-ISIJ*, 14 (2001), 621.
- 3) E. Yanagisawa: *J. Jpn. Welding Soc.*, 18 (2000), 642.

Fig. 4. Variations in (a) tensile strength (TS) and (b) total elongation (TEI) as a function of welding speed (F).

Fig. 5. Variations in (a) maximum stretch-height (H_{max}) and (b) limiting drawing ratio (LDR) as a function of welding speed (F).

Fig. 6. Variation in total elongation (TEI) as a function of carbon content.