

超高強度 TRIP 鋼の伸びフランジ性に及ぼす YAG レーザ切断の影響*

長坂明彦^{*1}・小山敦史^{*2}・田口信司^{*2}・掛川洋平^{*2}・三尾 敦^{*3}

Effect of YAG Laser Cutting on Stretch-flangeability of Ultra High Strength TRIP sheet steels

NAGASAKA Akihiko^{*1}, KOYAMA Atsushi^{*2}, TAGUCHI Shinji^{*2},
KAKEGAWA Youhei^{*2} and MIO Atsushi^{*3}

The transformation-induced plasticity (TRIP) of retained austenite is very useful to enhance the press formability of ultra high strength sheet steels. The TRIP steels with different matrix structure and different retained austenite morphology have been developed for weight reduction and shock safety up to now. The conventional TRIP-aided dual-phase steel or "TRIP-aided polygonal ferrite (PF) steel" composing of polygonal ferrite matrix and blocky retained austenite plus bainite second phase possessed an excellent stretch-formability and deep drawability. We have recently developed new type of TRIP steel or "TRIP-aided annealed martensitic (AM) steel" composing of bainitic ferrite matrix by annealed martensite matrix, and "TRIP-aided bainitic ferrite (BF) steel" composing of bainitic ferrite matrix and interlath retained austenite films. It is supposed that carbon addition is effective to rise the tensile strength of TRIP steel. So, in the present study the effect of YAG laser cutting on the stretch-flangeability of 0.1-0.6C-1.5Si-1.5Mn TRIP steels was investigated.

The strength-stretch-flangeability balance ($TS \times \lambda$) of holes obtained by either laser cutting and hole-punching decreased with increasing carbon content in PF, AM and BF steels. When the carbon content of 0.3 mass% or higher, the λ value in the case of laser cutting decreased to a level comparable to that in the case of hole-punching in PF steels. On the other hand, we demonstrated that YAG laser cutting contributes to the improvement of the stretch-flangeability of 1200 MPa class BF steels with 0.4 mass%.

キーワード：伸びフランジ性，残留オーステナイト，変態誘起塑性，TRIP 鋼，YAG レーザ切断

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)¹⁾ を有効に利用した TRIP 鋼板はとくに優れたプレス成形性を有する²⁻¹⁰⁾。これまでに，プレス成形性の改善を目的とし，白沢ら¹¹⁾や林ら¹²⁾によって鋼板の CO₂ レーザ切断の伸びフランジ性について報告されている。

しかしながら，TRIP 鋼と YAG レーザについての報告は少なく，主として母相組織をポリゴナルフェライトとした C-Si-Mn 系 TRIP 鋼 (PF 鋼) に関する

ものであり，より優れた伸びフランジ性が期待される母相組織を焼鈍マルテンサイト (AM 鋼) およびベイニティックフェライト (BF 鋼) についての報告はほとんどない。

そこで本研究では，TRIP 鋼板の母相組織を制御した C-Mn-Si 系 TRIP 鋼板の伸びフランジ性に及ぼす YAG レーザ切断の影響を調査した。

2. 実験方法

供試鋼には表 1 の化学組成を有する 5 種類の冷延まま鋼板 (板厚 1.2mm) を用いた。このとき，Si および Mn 添加量をほぼ一定とし，C 添加量を 0.1~0.6mass% の範囲で変化させた。これらの鋼を表 2 による熱処理を施し，3 種類の鋼板 (PF 鋼，AM 鋼および BF 鋼) を製作した⁷⁾。

引張試験は JIS13B 号試験片を用い，クロスヘッド速度 1mm/min で行った。伸びフランジ試験には，直径 50mm の円板状試験片を用い，初期穴径 5mm をレーザ切断，パンチ打抜き加工後，平頭パンチで成形した (図 1)。なお，レーザ切断は YAG レーザ加工

* 2005 年 3 月 8 日 (社) 日本機械学会 北陸信越支部学生会 第 34 期学生員卒業研究発表講演会・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の助成を受けて行われた。

*1 機械工学科教授

*2 長野工業高等専門学校専攻科
生産環境システム専攻学生

*3 技術室第一技術班

機（最大平均出力 350W，最大ピーク出力 4.5kW）を用いた。レーザ加工条件はパルスエネルギー 4J/P，パルス幅 2ms，パルス繰り返し数 25Hz，加工速度 0.1m/min とし，酸素をアシストガス（0.5MPa）とした。レーザ切断は，圧延方向に対して 45° 方向から切断した。

伸びフランジ性は次式の穴広げ率（λ）で評価した。

$$\lambda = (d_f - d_0) / d_0 \times 100 \% \dots (1)$$

ここで， d_0 ， d_f はそれぞれ初期穴径，き裂発生時の穴径である。

γ_R の体積率 f_γ は X 線回折法（Mo-K α 線）により (200) γ の 5 ピーク法を¹³⁾用いた。また， γ_R 中の炭素

濃度 C_γ (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¹⁴⁾に代入して計算した。

$$C_\gamma = (a_\gamma - 0.35467) / 4.67 \times 10^{-3} \dots (2)$$

3. 実験結果および考察

3.1 組織と引張特性

図 2 に TRIP 鋼組織の SEM 写真を示す。残留オーステナイトは PF 鋼，AM 鋼，BF 鋼，それぞれ粒上，針状，微細かつ針状で存在する。

表 1 供試鋼の化学成分 (mass%)

steel	C	Si	Mn	P	S	Al
0.1C	0.10	1.49	1.50	0.015	0.001	0.038
0.2C	0.20	1.51	1.51	0.015	0.001	0.040
0.3C	0.29	1.46	1.50	0.014	0.001	0.043
0.4C	0.40	1.49	1.50	0.015	0.001	0.045
0.6C	0.61	1.50	1.53	0.015	0.001	0.041

表 2 熱処理条件

steel	$T_{\alpha+\gamma}$ or T_γ (°C)		$t_{\alpha+\gamma}$ or t_γ (s)		T_A (°C)		t_A (s)	
	AM & PF	0.1C	-	780	1200	400	1000	
BF	0.1C				450	100		
	0.2C				425	200		
	0.3C	950	1200	400	300			
	0.4C			375	500			
	0.6C			350	3000			

$T_{\alpha+\gamma}$ or T_γ (°C): 焼鈍温度, $t_{\alpha+\gamma}$ or t_γ (s): 焼鈍時間, T_A : 焼きなまし温度, t_A : 焼きなまし時間。

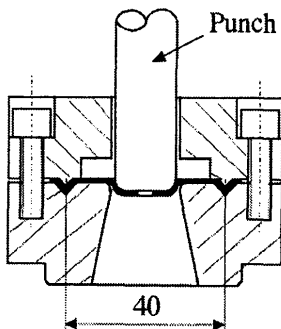
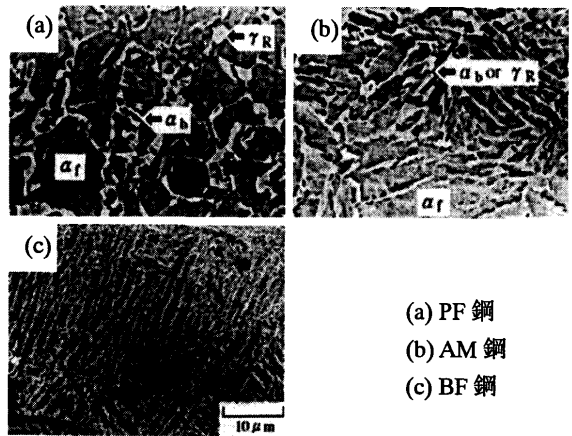


図 1 伸びフランジ性試験金型



(a) PF 鋼
(b) AM 鋼
(c) BF 鋼

図 2 組織写真

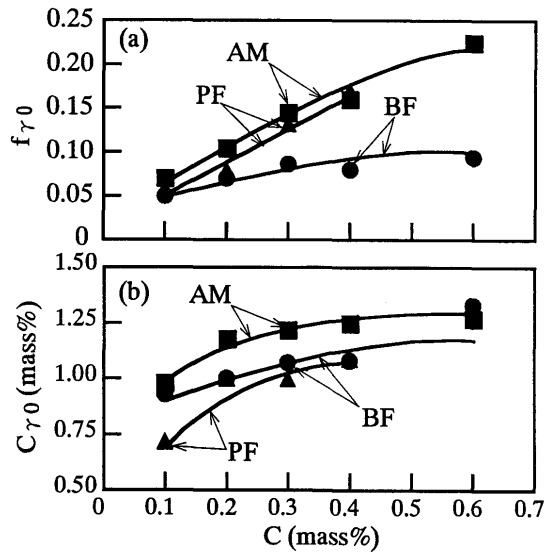


図 3 残留オーステナイト特性と引張強さの関係

図 3 に TRIP 鋼の残留オーステナイト (γ_R) の初期積率 (f_{γ_0}) および γ_R 中の初期炭素濃度 (C_{γ_0}) と炭素量の関係を示す。各鋼種とも C 量の増加に伴い f_{γ_0} および C_{γ_0} は上昇する。

また、図 4 に全伸び (TEI) と引張強さ (TS) の関係を示す。PF および AM 鋼は特に大きな全伸びを有する。

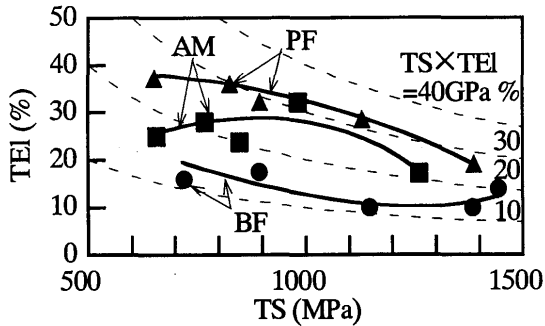


図 4 全伸びと引張強さの関係

3.2 伸びフランジ性

図 5 に TRIP 鋼の穴広げ率 (λ) と引張強さ (TS) の関係を示す。ここで、等高線は強度-伸びフランジ性バランス ($TS \times \lambda$) を意味し、 $\Delta \lambda$ は改善率、すなわちレーザー切断穴の λ (ソリッドマーク) とパンチ打抜き穴の λ (オープンマーク) との差である。

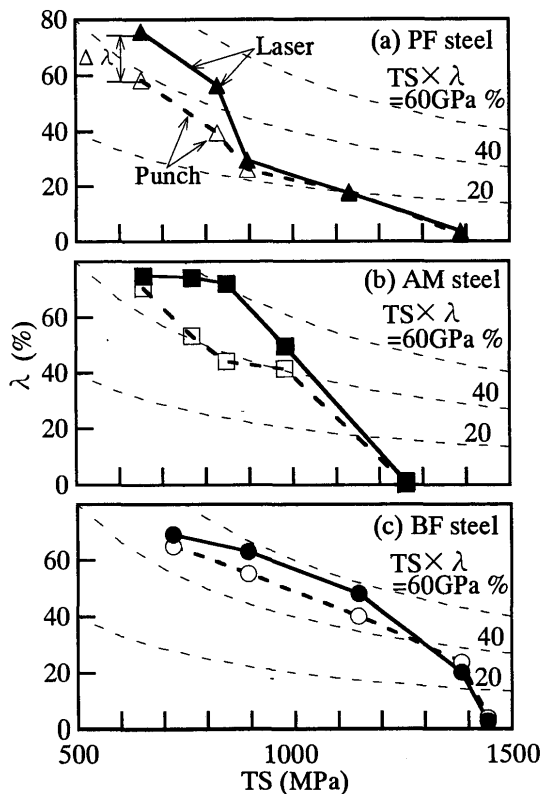


図 5 穴広げ率と引張強さの関係

PF 鋼の C 量が 0.3% (PF0.3C 鋼)、 $TS=900\text{MPa}$ 以上になると、 $\Delta \lambda=15\%$ 以上と良好であったレーザー切断穴の λ 値が、パンチ打抜き穴の場合と同程度にまで低下する (図 5(a))。AM 鋼では C 量が 0.3% (AM0.3C 鋼) で $\Delta \lambda$ が最大となり、AM0.4C 鋼の $TS=1000\text{MPa}$ 程度までレーザー切断による λ 値の改善が見られる (図 5(b))。さらに、BF 鋼におけるレーザー切断による改善率は、AM・PF 鋼ほど高い値は得られなかったが、 $TS=1200\text{MPa}$ 程度の高 TS 側まで改善効果が期待できる (図 5(c))。この理由として、レーザー切断によって改善できる金型形状における $TS \times \lambda$ の限界値が、 $60\text{GPa}\%$ 程度と予想されるためである。

3.3 レーザ加工による伸びフランジ性の改善機構

図 6 に強度-伸びフランジ性バランス ($TS \times \lambda$) と炭素当量 (C_{eq}) の関係を示す。ここで、炭素当量は次式¹⁵⁾により求めた。

$$C_{eq} = [C] + 1/6[Mn] + 1/24[Si] \dots (3)$$

図より負の相関が見られることから、炭素当量が伸びフランジ性低下の一因であることが示唆される。 $TS \times \lambda=50\text{GPa}\%$ 以上が優れた強度-伸びフランジ性バランスであると仮定すると、 980MPa 級 ($C_{eq}=0.6\text{mass}\%$ 以上) で AM0.4C 鋼および BF0.3C 鋼の母相組織を焼鈍マルテンサイトおよびベイニティックフェライトとした TRIP 鋼の伸びフランジ性にレーザー切断が効果的に作用すると考えてよい。

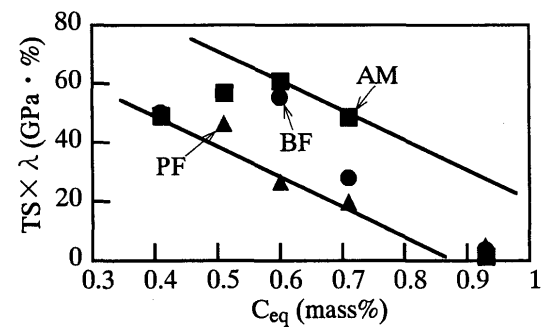


図 6 強度-伸びフランジ性バランスと炭素当量の関係

図 7 にレーザー切断面直下のピッカース硬さ分布を示す。図 7(a)より、PF0.1C 鋼ではレーザーによる硬化層はほとんど存在しないが、図 7(b)より PF0.4C 鋼には $250\mu\text{m}$ 程度の硬化層が存在する。また、図 8 にレーザー切断面直下の SEM 写真を示す。図 8(a)より、PF0.1C 鋼にレーザー切断による影響は見られないが、PF0.4C 鋼には、硬化層の発生に伴うクラックの存在が確認された (図 8(b))。

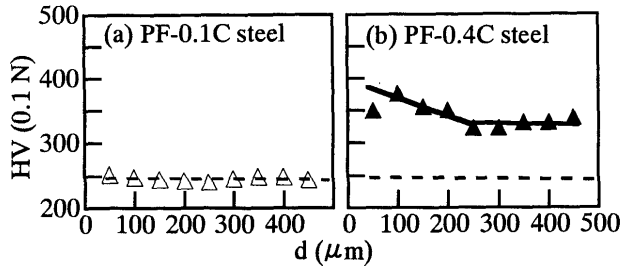


図7 深さ方向における硬さ分布

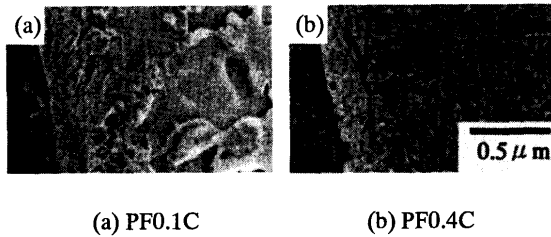


図8 レーザ切断面直下のPF鋼のSEM写真

ここで、PF0.4C 鋼の硬化層に注目してみると、一部の溶融部と HAZ と呼ばれる熱影響部から成り立っている。そこで、溶接部の概念を適用してみると、C 量の増加に伴い、マルテンサイトそのものの硬さも変化するため、熱影響部の硬さも変化し、低温割れ感受性に与える影響は大きくなると考えられる。このことは C_{eq} の上昇 (図 6) が、加工変質層を発生・増加させることになり、早期き裂発生の一因であると考えられる。

4. 結言

YAG レーザ切断した 0.1–0.6 %C TRIP 鋼板の伸びフランジ性について得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) (0.1–0.4) C–1.5Si–1.5Mn を有する TRIP 鋼の伸びフランジ性は、レーザ切断により改善できた。
- (2) 超ハイテンの伸びフランジ性は、母相組織を焼鈍マルテンサイトおよびベイニティックフェライトとした TRIP 鋼でレーザ切断が効果的に作用した。
- (3) 炭素当量の上昇が加工変質層を発生・増加させ、早期き裂発生の一因であると考えられた。

最後に、本研究をご支援いただきました (財) 中部電力基礎技術研究所に対し、深く感謝の意を表すとともに試料をご提供していただいた (株) 神戸製鋼所、ならびに、熱処理等でお世話になった、信州大学の北條智彦氏、および長野工業高等専門学校卒業研究生の伊藤大峰・片桐大將両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) K. Sugimoto, N. Usui, M. Kobayashi and S. Hashimoto: ISIJ Int., **32** (1992), 1311.
- 3) K. Sugimoto, M. Kobayashi, A. Nagasaka and S. Hashimoto: ISIJ Int., **35** (1995), 1407.
- 4) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. Hashimoto: Tetsu-to-Hagane, **83** (1997), 335.
- 5) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and H. Shirasawa: Tetsu-to-Hagane, **84** (1998), 218.
- 6) K. Sugimoto, A. Nagasaka, M. Kobayashi and S. Hashimoto: ISIJ Int., **39** (1999), 56.
- 7) K. Sugimoto, A. Kanda, R. Kikuchi, S. Hashimoto, T. Kashima and S. Ikeda: ISIJ Int., **42** (2002), 910.
- 8) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. Hashimoto: Tetsu-to-Hagane, **85** (1999), 552.
- 9) A. Nagasaka, K. Sugimoto, M. Kobayashi, Y. Kobayashi and S. Hashimoto: Tetsu-to-Hagane, **87** (2001), 607.
- 10) A. Nagasaka, K. Sugimoto, K. Makii, S. Ikeda, T. Hojo and A. Koyama: J. Jpn. Soc. Heat Treat., **44** (2004), 386.
- 11) H. Shirasawa, S. Hashimoto, K. Mimura and K. Korida: Tetsu-to-Hagane, **71** (1985), 1949.
- 12) H. Hayashi, K. Tezen and T. Amamiya: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **27** (1986), 984.
- 13) H. Maruyama: J. Jpn. Soc. Heat Treat., **17** (1977), 198.
- 14) 西山善次: マルテンサイト変態 基本編, 丸善, 東京, (1971), 13.
- 15) 門間改三: 機械材料, 実教出版, 東京, (1993), 71.