

自動車用 TRIP 鋼板の疲労特性に及ぼすバーリング・タッピングの影響*

長坂明彦^{*1}・守屋俊介^{*2}・長谷部賢吾^{*2}・田中良樹^{*3}・長谷部峻^{*4}
安部洋平^{*5}・村上俊夫^{*6}・北條智彦^{*7}

Effect of Burring and Tapping on Fatigue Characteristics in Automotive TRIP Sheet Steels

NAGASAKA Akihiko, MORIYA Shunsuke, HASEBE Kengo, TANAKA Yoshiki,
HASEBE Shun, ABE Yohei, MURAKAMI Toshio and HOJO Tomohiko

For the purpose of further improvement on the burring-tapping, in this investigation, the effect of burring and tapping on fatigue characteristics in TRIP sheet steels (TDP steels) were studied.

The chemical composition of the TDP steels used in this study was (0.1-0.4)C-1.5Si-1.5Mn (mass%) steels of cold-rolled sheet steels (thickness: 1.2 mm). These steels after heat treatment were named TDP1 to TDP4. For comparison with TDP steel, the ferrite martensite dual-phase sheet steel (MDP steel) was also prepared.

Burring test was performed by a machining center (MC) at cutting feedrate of $F=10$ mm/min and rotational speed of $n=3500$ rpm, using plate specimens of 150×50 mm. A bushing was produced by flowdrill of M6 short type (diameter: $D=5.3$ mm). Tapping test was performed by a MC at $F=20$ mm/min and $n=20$ rpm after burring. Burring and tapping tests were measured z-axis loading meter (S) corresponds to thrust and spindle loading meter (T) corresponds to torque, respectively. In addition, we have performed measuring the hardness of the specimen after processing, microstructure observation and fatigue tests.

キーワード：TRIP 鋼板，バーリング，タッピング，疲労特性

1. 緒言

近年、電気自動車およびハイブリッドカー等の各種メンバー類には優れたプレス成形性を有する高強度低合金 TRIP 鋼板の適用が期待されている。これまでに、TRIP 鋼板のバーリングに関する研究^{1)~2)}が報告されてきたが、TRIP 鋼板のバーリングの影響に関する報告は十分ではない。

そこで本研究では、TRIP 鋼板のバーリングの改善

(ナットレス)を目的として、母相組織をポリゴナルフェライトとした炭素(C)添加量の異なる数種類の TRIP (TDP) 鋼板のバーリングに及ぼすバーリング・タッピングの影響を調査した。

2. 実験方法

表 1 に供試鋼の化学組成を示す。供試鋼には Si および Mn をそれぞれ 1.5mass%一定とし、C 量を 0.1~0.4mass%の範囲で 0.1mass%ずつ変化させた冷延鋼板(板厚:1.2mm)を用いた。以後、これらの鋼を TDP1~TDP4 鋼と呼ぶ¹⁾。比較として、フェライト・マルテンサイト複合組織鋼(MDP 鋼)も用いた¹⁾。

表 1 供試鋼の化学組成 (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	0.010	0.0030	0.030

* 2013 年 3 月 9 日 日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会にて一部発表。

*1 機械工学科教授

*2 長野工業高等専門学校専攻科学生
(平成 24 年度機械工学科卒業)

*3 東海旅客鉄道株式会社(平成 24 年度機械工学科卒業)

*4 オリオン機械株式会社(平成 24 年度専攻科修了)

*5 豊橋技術科学大学准教授

*6 株式会社 神戸製鋼所

*7 津山工業高等専門学校講師

原稿受付 2013 年 5 月 20 日

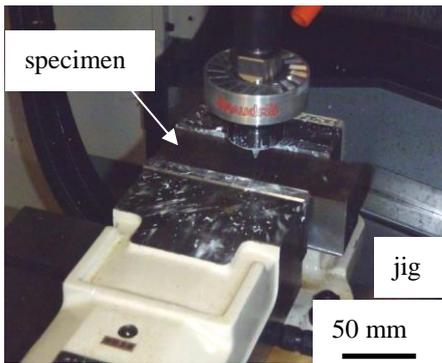


図1 バーリング試験装置

図1にバーリング・タッピング試験装置を示す。試験機にはMCを使用した。バーリングには板状試験片(150×50mm)を用い、M6 ショート(フロードリルの直径 $D=5.3$) のフロードリルを装着し、切削送り速度 $F=10\text{mm/min}$ 、回転数 $n=3500\text{rpm}$ で行った。その後タッピングを行い、必要に応じ疲労試験を行った(応力比 $R=0.1$ (引張り-引張り, 片振り), 周波数 10Hz, 正弦波, 最大応力 $\sigma_{\max}=400\text{MPa}$, 最小応力 $\sigma_{\min}=40\text{MPa}$)。また, Z軸ロードメータ(スラスト相当) S およびスピンドルロードメータ(トルク相当) T の測定を行った。

3. 結果および考察

図2にTDP2鋼のマイクロ組織を示す。また, 表2に供試鋼の残留オーステナイト特性³⁾⁻⁴⁾および機械的特性を示す。母材のポリゴナルフェライト(α_f)に残留オーステナイト(γ_R)とベイナイト(α_b)から成る第2相がネットワーク状に存在する(図2)。

図3にバーリング後の外観を示す(TDP2鋼, $F=10\text{mm/min}$, $n=3500\text{rpm}$, $D=5.3\text{mm}$)。ここで, 熱影響幅 w は試験片表面の圧延方向とその直角方向を測り, その平均値とした。

図4に各供試鋼と熱影響幅 w の関係を示す。TDP1~TDP4鋼およびMDP鋼を比較すると, 熱影響幅 w に大きな差は見られず, w はC添加量に影響を及ぼさないと考えられる。

図5にバーリングのロードメータと時間 t の関係を示す(TDP2鋼, $F=10\text{mm/min}$, $n=3500\text{rpm}$, $D=5.3\text{mm}$)。スラスト S はバーリングの加工時間に伴い低下し, 最大スラスト S_{\max} となり, その後上昇する。一方, トルク T は S より遅れて最大トルク T_{\max} となり, その後低下する。なお, 全ての鋼種で同様の傾向を示した。

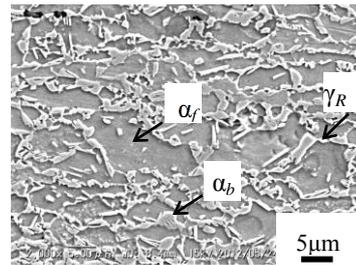


図2 TDP2鋼のマイクロ組織 (α_f : フェライト, γ_R : 残留オーステナイト, α_b : ベイナイト)

表2 供試鋼の残留オーステナイト特性および機械的特性

steel	f_{γ_0}	C_{γ_0} (mass%)	YS (MPa)	TS (MPa)	TEI (%)	TS×TEI (GPa%)
TDP1	0.049	1.31	429	651	37.2	24.2
TDP2	0.090	1.38	526	825	36.0	29.7
TDP3	0.132	1.41	562	895	32.2	28.8
TDP4	0.170	1.45	728	1103	32.8	36.2
MDP	-	-	593	783	13.1	10.3

f_{γ_0} : initial volume fraction of retained austenite, C_{γ_0} : carbon concentration in retained austenite, YS: yield stress, TS: tensile strength, TEI: total elongation and TS×TEI: strength-ductility balance.

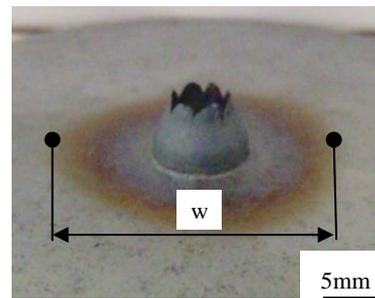


図3 バーリング後の外観 (w : 熱影響幅)

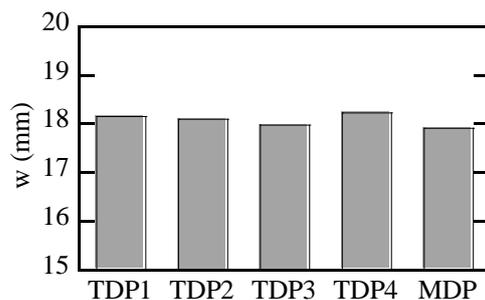


図4 熱影響幅 w

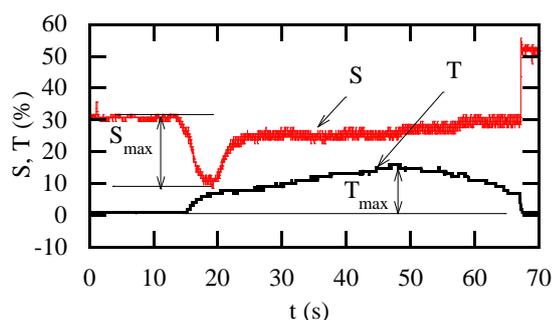


図5 バーリングのスラスト S とトルク T (TDP2)

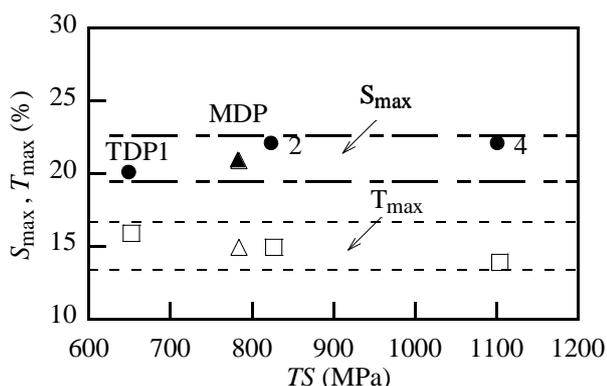


図6 引張強さ TS と最大スラスト S_{max} およびの関係最大トルク T_{max} の関係

図6に引張強さ TS と最大スラスト S_{max} および最大トルク T_{max} の関係を示す。 TS の大小によらず、 S_{max} は約 20%、 T_{max} は約 15% 程度であり、 TS と S_{max} および T_{max} の間に相関は見られない。また、 γ_R を含まない MDP も同様の傾向を示している。これは、フロードリルによる加工発熱が適度に作用したためだと考えられる。

図7にバーリング後の断面 SEM 写真を示す。図7(a)は端面を、図7(b)は端面から 0.3mm 内部である。端面付近には、打抜きに発生するポイドは見られない(図7(a))。0.3mm 内部での塑性流れが大きいことがわかる(図7(b))。

図8にフランジ部模式図を示す。 H はバーリング高さを示す。また、フランジ部肉厚を計測するために、試験片の裏面での肉厚を x_1 、裏面から 1mm 間隔に x_2 、 x_3 とした。

図9に各供試鋼とバーリング高さ H の関係を示す。TDP1~TDP4 鋼を比較すると H に大きな変化は見られず、 H の値に C 添加量の影響はないと考えられる。一方 TDP 鋼と MDP 鋼を比較すると、MDP 鋼が 1mm 程度大きくなった。

図10にフランジ部肉厚 x と各供試鋼の関係を示す。

TDP1~TDP4 鋼を比較すると、フランジ部肉厚 x_1 、 x_2 、 x_3 においてほとんど差は見られない。一方、TDP1~TDP4 鋼と MDP 鋼を比較すると x_1 、 x_2 において MDP 鋼は小さくなっている。これらから TDP 鋼は MDP 鋼と比較し、バーリング高さ H は小さくなるが肉厚 x を稼ぐことができ、フランジ部が割れにくいと考えられる。

図11にフランジ部硬さの模式図を示す。板厚の中心線上でバーリング端面から 0.3mm の場所を基点⑦とし、バーリング下方向と母材方向に 0.3mm 間隔で、合計 12 箇所においてビッカース硬さ試験(荷重: 0.98N, 保持時間: 5s)を行った。

図12にバーリング後のビッカース硬さ HV 分布を示す。TDP2 鋼の HV 分布より、⑥付近から HV が高くなるのがわかる。これはバーリングによる加工硬化およびひずみ誘起変態に因ると考えられる。

図13に TDP 鋼および MDP 鋼の硬さ増分 ΔHV ($\Delta HV = HV_{max} - HV_0$) を示す。図14にビッカース硬さ HV と有効炭素濃度 $f_0 \times C_0$ の関係を示す。ここで母材硬さを HV_0 、⑨~⑫の平均 HV を変形後の最高硬さ HV_{max} とした。TDP1~TDP4 鋼を比較すると、C 添加量の増加に伴い、 ΔHV は増大する(図13)。これは、C 添加量が増加することで、 γ_R の初期体積率 f_0 と初期炭素濃度 C_0 の積である有効炭素濃度 $f_0 \times C_0$ が結果として高くなり、TRIP 効果が大きく作用したことに因ると考えられる。また、TDP 鋼と MDP 鋼を比較すると、TDP 鋼の ΔHV が相対的に大きいことがわかる。これは、MDP 鋼はバーリング時の加工発熱に伴う加工硬化を生じており、TDP 鋼はそれに付随してひずみ誘起変態が影響していると考えられる。

図15にタッピング後の各供試鋼の破断繰返し数 N_f を示す。なお、TDP4 鋼はタッピングが不可能であったため除外した。TDP1~TDP3 鋼および MDP 鋼において、 N_f は 1.5×10^5 回程度であり、 N_f に大差がないといえる。

図16に加工の異なる TDP 鋼の破断繰返し数 N_f を示す。また、図17にき裂長さ $2c$ と疲労繰返し数 N の関係を示す。ドリル切削、バーリングおよびタッピングの順に N_f が向上していることがわかる(図17)。ドリル切削、バーリングおよびタッピングの順にき裂発生が遅れ、各加工においてき裂発生後、加速的にき裂が進展することがわかる(図17)。これはバーリングによって生じる加工変質層が寄与し、さらにタッピングによりバーリング時に生じた加工変質層が適度に除去されたことが一因であると考えられる。

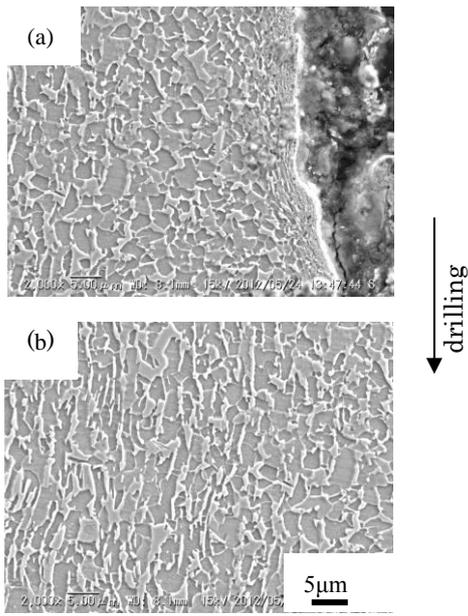


図7 バーリング後の断面 SEM 写真
(a)端面, (b) 内部 0.3mm)

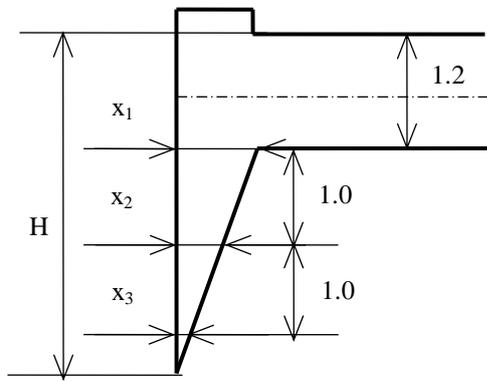


図8 フランジ部肉厚の模式図

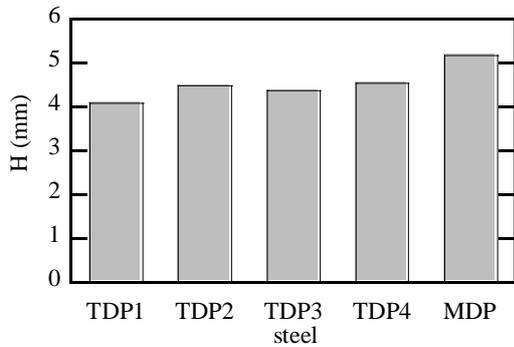


図9 バーリング高さ H

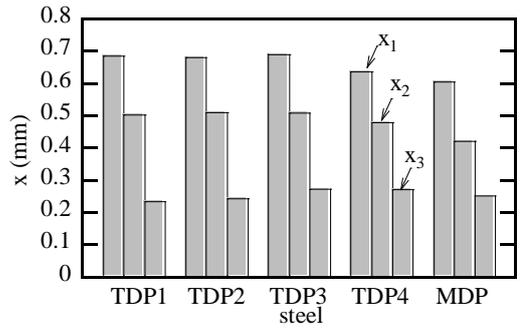


図10 フランジ部肉厚 x

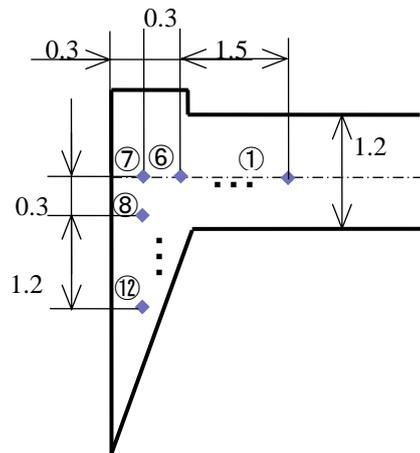


図11 フランジ部硬さの模式図

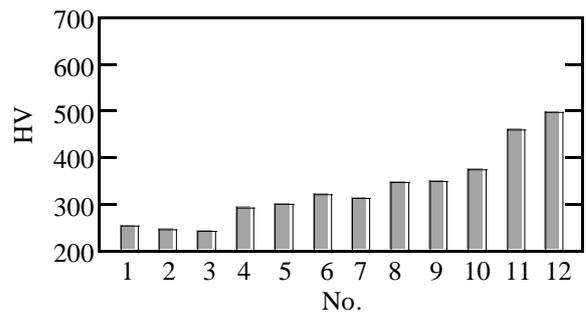


図12 フランジ部の HV 分布 (TDP2)

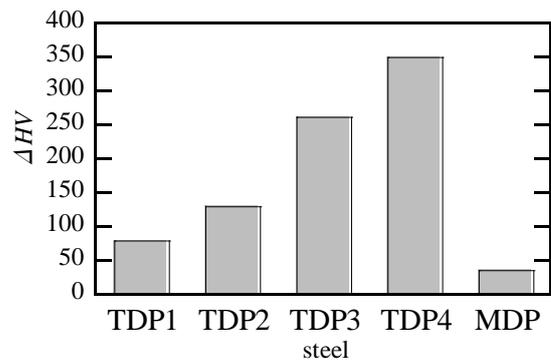


図13 硬さ増分 ΔHV

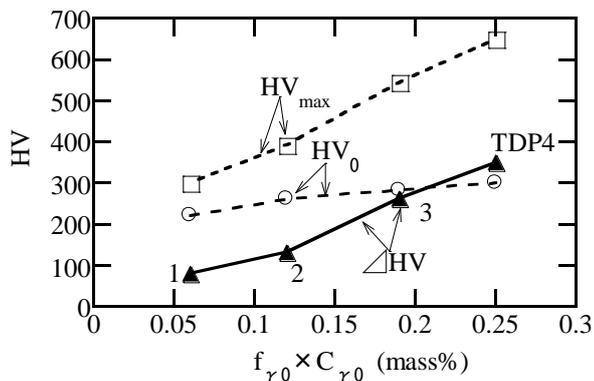


図 14 ビッカース硬さ HV と有効炭素濃度 $f_{\gamma_0} \times C_{\gamma_0}$ の

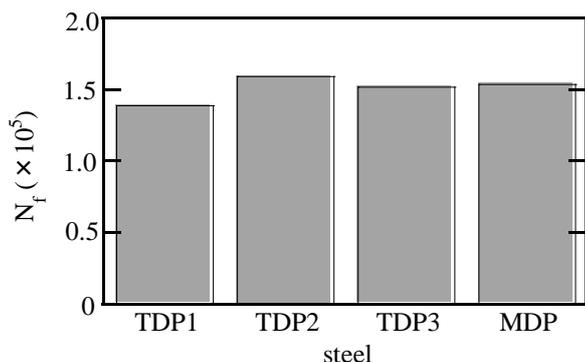


図 15 タッピング後の各供試鋼の破断繰返し数 N_f

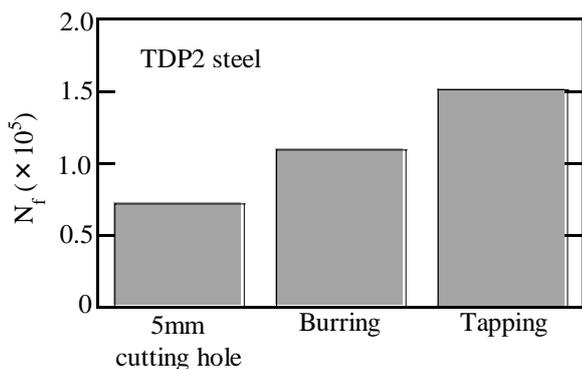


図 16 加工の異なる TDP2 鋼の破断繰返し数 N_f

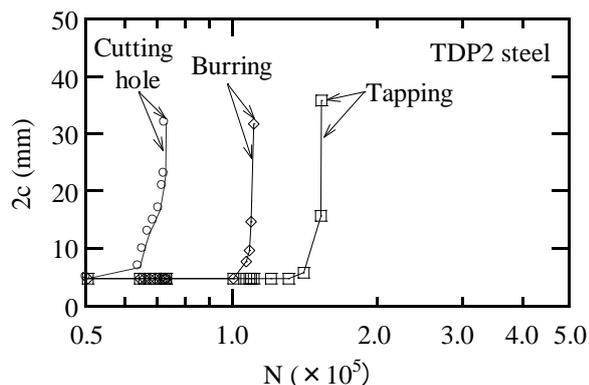


図 17 き裂長さ $2c$ と疲労繰返し数 N の関係

4. 結言

- 1) TDP 鋼は炭素添加量の増加に伴い、バーリング後のフランジ部のビッカース最高硬さ HV_{max} および硬さ増分 ΔHV が増大した。これは、炭素添加量が増加することで、有効炭素濃度 $f_{\gamma_0} \times C_{\gamma_0}$ が結果として高くなり、TRIP 効果が作用したことに因ると考えられる。
- 2) バーリング後のタッピングは TDP1~TDP3 鋼および MDP 鋼では可能であったが、TDP4 鋼ではタップが破損した。これは、TDP4 鋼のフランジ部のビッカース最高硬さである HV_{max} および ΔHV が極めて高いことが一因である。
- 3) TDP 鋼の炭素添加量は、タッピング後の疲労寿命に大きな影響を及ぼさなかった。
- 4) TDP 鋼のバーリングは、疲労き裂の発生を抑制した。これは、穴近傍にバーリングによって生じる加工変質層が寄与したためと考えられる。
- 5) タッピングを施すことで、バーリングのそれより大きい疲労き裂発生抑制効果が見られた。これは、バーリング時に生じた加工変質層が適度に除去されたためと考えられる。

最後に、本研究に際しご支援をいただきました公益財団法人 天田財団ならびに公益財団法人 大澤科学技術振興財団にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) A. Nagasaka, S. Hasebe, A. Nakamura, T. Matsushima, K. Sugimoto and T. Murakami : Proc. of SHSS2010, CD-ROM, (2010).
- 2) A. NAGASAKA, Y. KUBOTA, K. SUGIMOTO, A. MIO, T. HOJO, K. MAKII, M. KAWAJIRI and M. KITAYAMA: ISIJ International, Vol. **50** (2010), 1441.
- 3) H. Maruyama: J. Jpn. Soc. Heat Treat., **17** (1977), 198.
- 4) 西山善次: マルテンサイト変態, 丸善株式会社, (1979), 13.
- 5) Nagasaka et al.: J. of Iron and Steel Research, Int., **18** (2011), 44.