

超高張力 TRIP 鋼板のバーリングに及ぼす炭素添加量の影響*

長坂明彦*¹・長谷部峻*²・松島拓也*³・村上俊夫*⁴・北條智彦*⁵

Effect of Carbon Content on Burring in Ultra High Strength TRIP Sheet Steels

NAGASAKA Akihiko, HASEBE Shun, MATSUSHIMA Takuya,
MURAKAMI Toshio and HOJO Tomohiko

Effect of carbon content on burring of (0.1-0.4)C-1.5Si-1.5Mn (mass%) ultra high strength TRIP-aided sheet steels with polygonal ferrite matrix (TDP steels) was investigated for automotive applications. The combined rotational and downward force of the thermal drilling tool bit created friction heat. The height of the bushing was roughly 3 to 4 times the initial sheet thickness. The bushings are ideal for thread applications, as the strength of threads was significantly increased. We found that the hardness increment and Vickers hardness of the bushings has been increased with the increase of carbon content.

キーワード：TRIP 鋼板，バーリング，炭素添加量，フロードリル

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 C 添加量の影響を調査した。

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⁾。

図 1 にバーリング試験装置を示す。試験機には

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

* 2012 年 3 月 10 日 日本機械学会北陸信越支部第 48 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 22 年度機械工学科卒業)

*3 株式会社 ミマキエンジニアリング
(平成 23 年度専攻科修了)

*4 株式会社 神戸製鋼所

*5 津山工業高等専門学校

原稿受付 2012 年 5 月 19 日

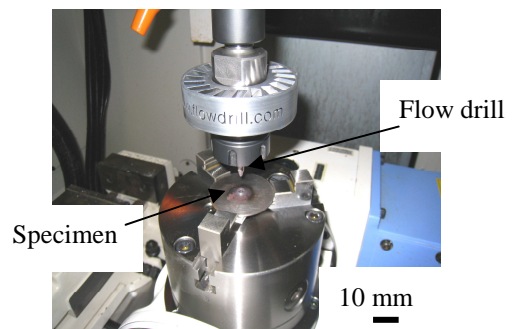


図 1 バーリング試験装置

MC を使用した。バーリングには円板状試験片（直径 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。また、必要に応じ、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 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

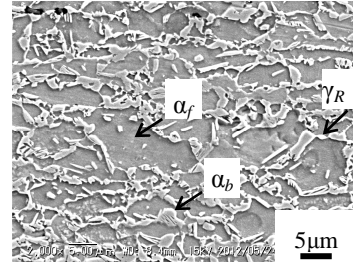


図 2 TDP2 鋼のマイクロ組織 (α_f : フェライト, γ_R : 残留オーステナイト, α_b : ベイナイト)

表 2 残留オーステナイト特性および供試鋼の機械的特性

steel	$f_{\gamma 0}$	$C_{\gamma 0}$ (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

$f_{\gamma 0}$: initial volume fraction of the retained austenite, $C_{\gamma 0}$: carbon concentration in the retained austenite, TS : tensile strength, TEI : total elongation and $TS \times TEI$: strength-ductility balance.

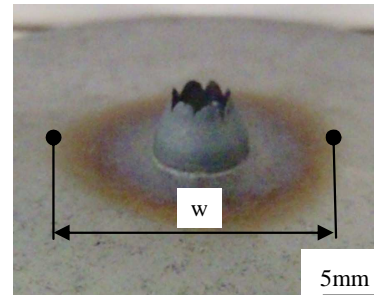


図 3 バーリング後の外観 (w : 熱影響幅)

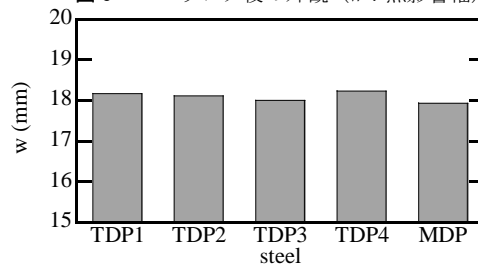


図 4 熱影響幅 w

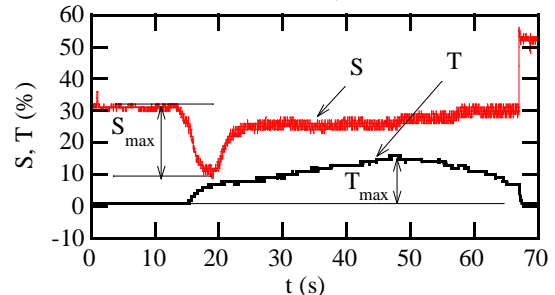


図 5 バーリングのスラスト S およびトルク T と時間 t の関係 (TDP2 鋼)

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 TDP 鋼および MDP 鋼のフランジ部のビッカース硬さ HV 分布を示す。各 HV 分布より、⑥付近から HV が高くなることがわかる。これはバーリングによる加工硬化および TRIP 効果に因ると考えられる。また、TDP1~TDP4 鋼を比較すると、C 添加量の増加に伴い、全ての測定箇所において HV が増大している。このことから、C 添加量は加工硬化および TRIP 効果に大きな影響を及ぼすと考えられる。また、TDP 鋼と MDP 鋼を比較すると TDP の HV が相対的に高いことがわかる。

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。ここで、①~④の平均 HV を母材硬さ HV_0 、⑦~⑫の平均 HV を変形後の硬さ 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 は増大している。これは、C 添加量が増加することで、 γ_R の初期体積率 f_{γ_0} と初期炭素濃度 C_{γ_0} の積である有効炭素濃度 $f_{\gamma_0} \times C_{\gamma_0}$ 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 鋼はバーリングに伴う加工硬化を生じており、TDP 鋼はそれに加え TRIP 効果を生じ、ひずみ誘起変態が大きく影響していると考えられる。

4. 結言

- (1) TDP 鋼の引張強さ TS の違いは、バーリング時の最大スラスト S_{max} および最大トルク T_{max} の値に影響を及ぼさなかった。
- (2) TDP 鋼は C 添加量の増加に伴い、フランジ部の

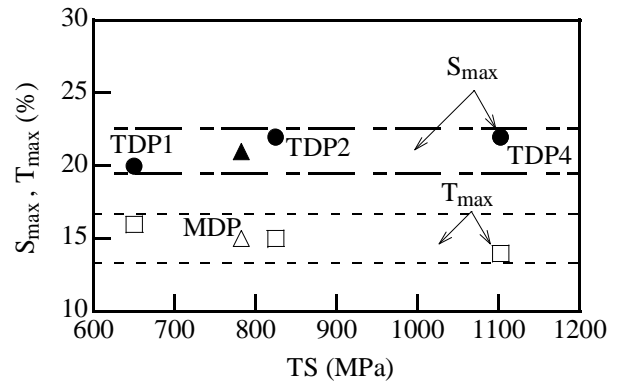


図 6 最大スラスト S_{max} および最大トルク T_{max} と引張強さ TS の関係

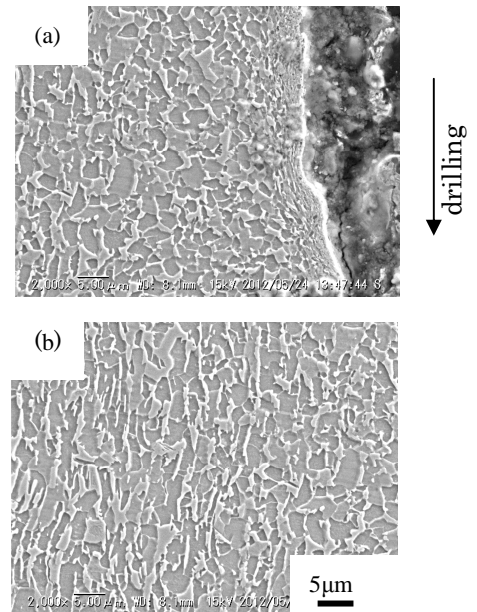


図 7 バーリング後の断面 SEM 写真
(a)端面, (b) 内部 0.3mm, TDP2 鋼)

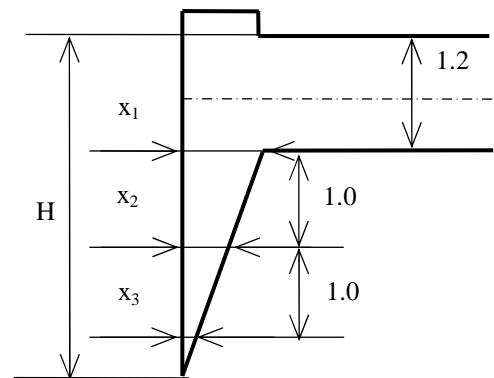


図 8 フランジ部肉厚の模式図

HV および硬さ増分 ΔHV が増大した。

最後に、本研究を支援していただきました（公財）天田財団並びに（公財）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.

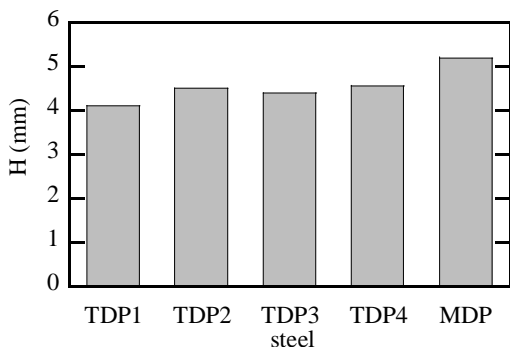


図9 バーリング高さ H

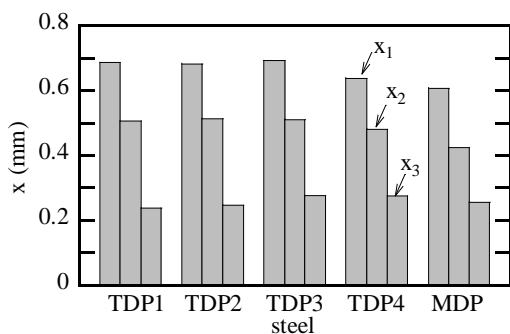


図10 フランジ部肉厚 x

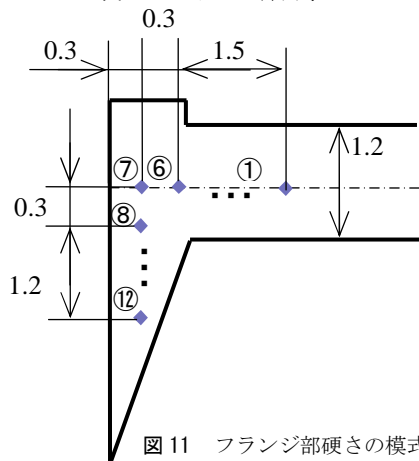


図11 フランジ部硬さの模式図

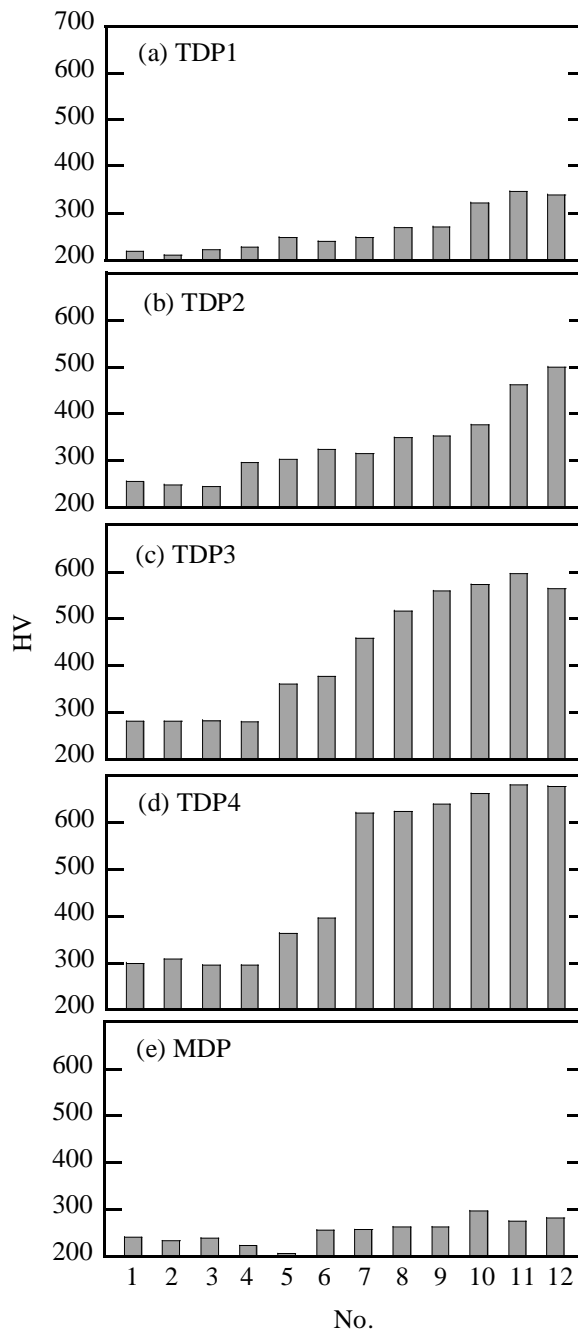


図12 フランジ部のビッカース硬さ HV 分布

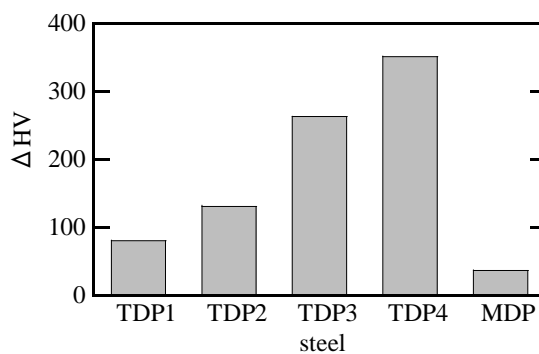


図13 硬さ増分 ΔHV