論文

ルーフシャーパンチによる穴抜きと鋼板の伸びフランジ性の異方性を組み合わせた穴広げ率の向上

松野 崇* 佐藤 浩一* 岡本 力*

水村 正昭* 末廣 正芳**

Improvement of Hole-Expansion Ratio Using Wedged Piercing-Punch Synergized by Anisotropic Material Stretch-Flange Formability

Takashi MATSUNO*, Koichi SATO*, Riki OKAMOTO*,

Masaaki MIZUMURA* and Masayoshi SUEHIRO**

(Received on April 11, 2014)

In this study, the effect of a wedge on a piercing punch on hole-expansion ratio has been investigated. As a result, the holes pierced using a wedged piercing punch showed significantly high hole-expansion ratios under certain conditions. Regarding the wedge vertical angles, the hole-expansion ratio becomes high at 80 degrees and low at 45 degrees. The sheet bending effect caused by the wedge shape contributes to these results. The small amount of bending in the case of 80 degrees induces tensile stress around the punch edge without plastic deformation, which accelerates material fracture. This acceleration decreases plastic strain on the pierced surface and leads to the high hole-expansion ratio. On the other hand, a large amount of bending in the case of 45 degrees causes plastic deformation around the punch edge, which deteriorates the hole-expansion ratio. Regarding the material direction when set on a die face, the hole-expansion ratio becomes high when the material direction at which the stretch-flange formability is the highest is at 90 degrees to the wedge tip line. In this condition, the stretch-flange formability at the weakest position resulting from piercing using the wedged punch becomes the highest in the other material directions.

Key words: piercing, punching, hole expansion, stretch-flange forming, anisotropy, high-strength steel, tool design.

1. 緒 言

軽量化と衝突安全性の両立を目的に自動車用鋼板の高張力化が進んでいる¹⁾。その一方で高張力鋼板は軟鋼板に比べてその成形性が低いことが課題となっており²⁾、特に、高張力鋼板の抜き穴における穴広げ率は軟鋼に比べて大きく低下することが指摘されている^{2)~4)}。

このような背景のもと、穴抜き手法を工夫することで穴広げ率を向上する検討が数多くなされている。その検討例としてはパンチ・ダイ間のクリアランスの調整による穴広げ率の改善が知られており^{2)~4)}、これら以外に削り抜き⁵⁾や焼鈍抜き⁶⁾、刃先面取りダイ⁷⁾、突起付きパンチ⁸⁾を用いる手法が報告されている。

工数やコストを考慮すれば、クリアランス調整のような

簡単な工具条件の設定により穴広げ率が改善されることが望ましい。しかしながら、このような検討としてクリアランス以外の因子に着目した例は少ない。一般にパンチシャー角度は騒音や加工荷重の低減を目的に設けられる場合が多いが、パンチシャー角度の調整により切り口の伸びフランジ性（せん断切り口に割れを生じずにどの高さまでフランジアップできるかの指標）が改善する効果も報告されている⁹⁾。当然、伸びフランジ成形の一種である穴広げにも穴抜きパンチシャー角度が寄与するはずである。

そこで、本報では穴広げ率に対するルーフシャーパンチの効果を検討する。ルーフシャーパンチは対称形状ゆえに穴抜き時の動的な芯ずれが小さい。そのため、丸穴抜きにおけるシャー角付きパンチの一般形として広く普及している。

さらに、穴広げ率に対する影響因子として穴抜き時の被加工材設置方向（圧延方向とルーフシャー先端線が為す角度）を考慮する。これは、ルーフシャーパンチの底面が軸対称形状ではないため、穴広げ率は被加工材の異方性の影

* 新日鐵住金（株）〒293-8511 富津市新富 20-1
Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation,
20-1 Shintomi, Futtsu, 293-8511 Japan.

** 日鐵住金テクノロジー（株）〒293-8511 富津市新富 20-1
NIPPON STEEL & SUMIKIN TECHNOLOGY Co., Ltd.,
20-1 Shintomi, Futtsu, 293-8511 Japan.

響を受けると考えたためである．これらの因子を検討した結果として，本報では適正なシャー角度であればシャー角を設けない場合に比べて穴広げ率が改善すること，および穴広げ率に最も効果のある被加工材の設置方向はその伸びフランジ性の異方性に相關することを明らかにする．さらに，穴広げ試験の結果に対しては切り口の形状と加工硬化の観点から考察を加える．

ここで，変形異方性ではなく伸びフランジ性の異方性を評価した理由は，穴広げ率と引張試験より得られる伸びとの相関が低く¹⁰⁾，さらに供試材の引張特性がほぼ等方的であったためである．本報ではこの伸びフランジ性の異方性をサイドベンド試験¹¹⁾により測定した．以降の議論においては異方性との記載は全て伸びフランジ性の異方性を指すことに注意されたい．

2. 実験条件

2.1 供試材

強度が異なる3種の高張力鋼板を試作し，供試材として用いた．Table 1に圧延方向(RD)と圧延直交方向(TD)における各供試材の機械的特性，および硬さと板厚を示す．A材は3鋼種で最も強度が低く，一様伸びと全伸びが高い．C材は最も強度が高く引張強さは1.0 GPaを超える．一様伸びと全伸びは3鋼種中最も低い．B材はA材とC材の中間の強度と伸びを示している．いずれの鋼種においても圧延方向と圧延直交方向の機械的特性の差は小さく，等方的な引張特性とみなすことができる．

硬さは強度に応じてA材，B材，C材の順に高くなっている．

Table 1 Material properties

Material ID		A	B	C
Tensile strength [MPa]	RD	626	786	1051
	TD	627	795	1049
Yield stress [MPa]	RD	407	477	730
	TD	413	494	740
Uniform elongation [%]	RD	19.7	14.8	8.3
	TD	18.7	14.1	7.8
Total elongation [%]	RD	31.5	23.4	16.5
	TD	31.9	21.2	15.0
Hardness [HV0.05]		198	239	301
Plate thickness [mm]		1.6		

2.2 伸びフランジ性の異方性測定

サイドベンド試験¹¹⁾により被加工材の3方向の伸びフランジ性を調査した．本報におけるサイドベンド試験ではFig.1に示す曲率半径15 mmの半円状の切欠き (Fig.1中の太線部)を有する試験片にFig.2のごとく面内引張曲げを加え，板厚貫通割れが生じた時点における開口率 R_S を伸びフランジ性の指標として評価する．ここで， R_S は初期開口量 d_0 (Fig.2(a)参照)，板厚貫通割れ時の開口量を d_1 (Fig.2(b)参照)とし，以下の式(1)により定義される．なお，半円切欠きはクリアランス10% t のせん断加工により設けた(% t は板厚に対する割合を指す)．

Fig.1 Specimen for side-bending test

Fig.2 Schematic image of side-bending test

Fig.3 Material direction of side-bending specimen

Fig.4 Shape of the wedge punch

$$R_S = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

また，評価する材料方向はFig.3のごとく3方向とした．鋼板の圧延方向と試験片長手方向が為す角度を材料方向 ψ に定義し， $\psi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ となるようにサイドベンド試験片を切り出した．

2.3 穴抜き

Fig.4 に示すルーフシャーパンチを用いて $\phi 10$ mm の穴抜きを行った。この際、潤滑油は用いなかった。ルーフ先端の頂角 θ を 80° と 45° とし、パンチとダイのクリアランスを 5.0% , 10% , 15% に設定した。さらに、Fig.4 に示すようにルーフシャー先端方向と被加工材の圧延方向が為す角度をルーフ方向 ψ' に定義し、 $\psi' = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ となる穴抜きを実施した。また、比較として通常のパンチ ($\theta = 90^\circ$) による穴抜きも行った。

2.4 穴広げ試験

穴広げ試験には対頂角 60° の円錐パンチを用い、しわ押さえ荷重を 9.8 kN とした。穴広げ時のパンチ速度を約 0.2 mm/s とし、かえりが外側となるように試験片を設置した。それぞれの実験条件に対しては 5 回の穴広げ試験を行った。穴広げ率 λ は以下の式(2)により求めた。

$$\lambda = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100 \quad (2)$$

ここで D_0 は穴広げ前の穴径、 D_1 は穴広げで発生した割れが鋼板の板厚を貫通した時点の穴径である。これら以外の条件は ISO16630 (2009) に準拠した。

3. 実験結果

3.1 伸びフランジ性の異方性

Fig.5 にサイドベンド試験結果を示す (図中の破線は各条件における平均を示す)。Fig.5(a) より A 材では材料方向 ψ が異なることによる開口率の差は小さい。その差異は 1 条件の開口率平均にして 2% 程度である。差異は小さいものの $\psi = 0^\circ$ において最も高い平均開口率 (約 30%) を示している。また、Fig.5(b), (c) より B 材と C 材では $\psi = 45^\circ$ において他の材料方向よりも開口率が明らかに高い。さらに、これらの鋼板では $\psi = 90^\circ$ において最も開口率が低くなっている。1 条件の開口率平均としてみれば、 $\psi = 45^\circ$ と $\psi = 90^\circ$ では B 材で 7% 程度、C 材で 4% 程度異なっている。

Fig.5 Notch opening ratio estimated by the side bending test

3.2 穴広げ率

Fig.6 に穴広げ試験結果を示す。図中、一点鎖線と実線はそれぞれ $\theta = 80^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ における平均を示しており、“Conventional”とした太い点線は通常パンチ穴における穴広げ試験 10 回の平均を、灰色の点線は穴広げ試験 10 回の最大と最小を示している。以下では各穴抜き条件の平均値

を比較することで議論を進める。特に記載がない場合の穴広げ率は平均値を示すことに留意されたい。

Fig.6 Hole expansion ratio

まず、A 材の結果 (Fig.6(a-1)~(a-3)) について述べる。 $\theta = 80^\circ$ の結果に着目すれば、全てのクリアランスとルーフ方向 ψ' において通常パンチ穴よりも穴広げ率が改善している。改善量は Fig.6(a-2) のクリアランス 10% において顕著であ

り、その改善量は20~30%となっている。 ψ' に関しては、いずれのクリアランスにおいても $\psi' = 0^\circ$ で最も高い穴広げ率を示している。ここで、 $\psi' = 0^\circ$ はルーフ先端が接触する部位の穴広げ時の変形方向が3.1節に示した開口率の最も高い材料方向 $\psi = 0^\circ$ に一致する条件となる。 ψ' による穴広げ率の差はFig.6(a-2)のクリアランス10% t において最も大きい。その差は約9%である。 $\theta = 45^\circ$ の結果に着目すれば、Fig.6(a-1)のクリアランス5% t において $\psi' = 45^\circ$ 、 90° の条件で通常パンチ穴よりも6~7%程度穴広げ率が改善している。 $\psi' = 0^\circ$ では通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率となっている。クリアランス10% t と15% t ではいずれの ψ' においても通常パンチ穴よりも穴広げ率が低い。特にクリアランス15% t の場合には通常パンチ穴よりも大きく低下しており、その低下量は20%程度である。また、 $\theta = 80^\circ$ の場合と異なり、 $\theta = 45^\circ$ ではクリアランスにより ψ' と穴広げ率の関係が異なっている。

続いてB材の結果 (Fig.6(b-1)~(b-3)) について述べる。 $\theta = 80^\circ$ の結果に着目すれば、クリアランス5% t (Fig.6(b-1)) ではいずれの ψ' においても通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率となっている。クリアランス10% t (Fig.6(b-2)) では $\psi' = 0^\circ$ と $\psi' = 45^\circ$ において穴広げ率が通常パンチ穴よりも高く、特に $\psi' = 45^\circ$ において穴広げ率が高い。通常パンチ穴との差は12%である。A材の場合と同様に、 $\psi' = 45^\circ$ はルーフ先端が接触する部位の穴広げ時の変形方向が3.1節に示した開口率の最も高い材料方向 $\psi = 45^\circ$ に一致する条件となる。一方で $\psi' = 90^\circ$ では通常パンチ穴よりも5%ほど穴広げ率が低い。クリアランス15% t (Fig.6(b-2)) ではいずれの ψ' においても穴広げ率が通常パンチ穴よりも高く、10% t の場合と同様に $\psi' = 45^\circ$ の穴広げ率が最も高い。通常パンチ穴との差は20%である。また、クリアランス10% t に同じく $\psi' = 90^\circ$ において最も穴広げ率が低い。 $\theta = 45^\circ$ に関してはA材と同様に穴広げ率が全般的に低く、クリアランスにより ψ' と穴広げ率の関係が異なっている。各クリアランスで述べれば、クリアランス5% t ではいずれの ψ' においても通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率である。クリアランス10% t では $\psi' = 45^\circ$ において通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率であり、 $\psi' = 0^\circ$ 、 90° では通常パンチ穴よりも低い穴広げ率を示している。クリアランス15% t では $\psi' = 0^\circ$ において穴広げ率は通常パンチ穴にほぼ同等であり、 $\psi' = 45^\circ$ 、 90° において通常パンチ穴よりも低い穴広げ率となっている。

さらにC材の結果 (Fig.6(c-1)~(c-3)) について述べる。 $\theta = 80^\circ$ に関しては、クリアランス5% t (Fig.6(c-1)) とクリアランス15% t (Fig.6(c-3)) において通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率を示している。 ψ' による差はほとんどみられない。クリアランス10% t (Fig.6(c-2)) では $\psi' = 45^\circ$ において6%ほど穴広げ率が改善している。A材とB材の場合と同様に、 $\psi' = 45^\circ$ の結果は3.1節の開口率の結果に対応している。一方で、 $\psi' = 90^\circ$ では9%ほど通常パンチ穴よりも穴広げ率が低い。 $\psi' = 0^\circ$ においては通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率である。 $\theta = 45^\circ$ に着目すれば、クリアランス5% t においては $\theta = 80^\circ$ と同様に ψ' によらず通常パンチ穴とほぼ同等の穴広げ率である。しかしながら、クリアランス10% t と15% t ではいずれの ψ' においても通常パンチ

穴よりも穴広げ率が低い。特にクリアランス15% t の場合に穴広げ率が低く、通常パンチ穴との差は $\psi' = 0^\circ$ において29%ほどである。

なお、いずれの供試材においても、ほとんどの場合で穴広げ時の割れはルーフシャワー先端が接触する部位 (後述する Fig.7 における Point 3) に生じていた。

A材からC材の結果を ψ' に関して総ずるに、通常パンチ穴に比べて穴広げ率の改善がみられる θ とクリアランスに限れば、Fig.5に示した開口率が最も高い材料方向 ψ に対して概ね穴広げ率が最も高いルーフ方向 ψ' が一致している。これは着目すべき傾向である。

4. 考 察

穴広げ率は切り口の加工硬化が大きいほど低下する^{2)~4)}。切り口の粗さや残留応力が及ぼす影響は小さい^{2)~4)}。そこで、3.2節の穴広げ率の結果を考察するべくクリアランス10% $t \cdot \psi' = 90^\circ$ の抜き穴を対象にFig.7に示す3か所の切り口の硬さを測定した。ここで、 ψ' による穴広げ率の違いが顕著であった条件としてクリアランス10% t における切り口を選定した。以降ではこの3箇所をそれぞれPoint 1, 2, 3と呼ぶ。Fig.7に示すように、Point 3はルーフシャワーの先端が接触する位置であり、Point 1は穴周に対してPoint 3に直交する位置となる。Point 2はPoint 1と3の中間の位置となる。測定に際しては穴抜き面の断面を切り出し、0.49 Nの圧痕荷重としてFig.8に示す切り口表層から0.08 mmの位置のビッカース硬さを測定した。かえり側の板表面より0.08 mmの位置を基準とし、だれを除くせん断面上端までを板厚方向に0.08 mmピッチで測定した。これらの測定結果の平均値を各穴抜き条件における切り口硬さとして評価した。

Fig.7 Positions of Point 1, Point 2, and Point 3

Fig.8 Measurement positions for Vickers hardness

硬さ測定の結果を Fig.9 に示す (図中, 同クリアランスにおける通常パンチ穴の平均硬さも破線にて表示している). Fig.9(a)~(c)よりいずれの供試材, 測定場所においても $\theta = 80^\circ$ の切り口は $\theta = 45^\circ$ の切り口より硬さが低い. 通常パンチ穴の切り口と比較すれば, $\theta = 80^\circ$ の切り口は A 材の Point 1 (Fig.9(a)) と B 材の Point 1, 2, 3 (Fig.9(b)), および C 材の Point 1, 2 (Fig.9(c)) において硬さが低くなっている. 3つの供試材ともに Point 1 の硬さが通常パンチ穴の切り口よりも低い. また, B 材を除けば Point 3 の硬さは通常パンチ穴の切り口に同等 (A 材) かそれ以上 (C 材) である. よって, $\theta = 80^\circ$ の穴抜きパンチには Point 3 の加工硬化を通常パンチと同等, もしくはそれ以下としながら, Point 1 における切り口の加工硬化を抑制する効果があるとみなすことができる. 加工硬化量が小さい部位は加工硬化量が大きい部位に比べて変形能が高い. よって, Point 1 は Point 3 よりも破断が起こりにくい. また, 硬化が少ない分だけ変形抵抗も低いことから, 穴広げの際に Point 1 周辺で担われる変形量は Point 3 周辺に比べて大きいものと考えられる. これら 2つの効果により, 3.2 節において $\theta = 80^\circ$ の穴抜きでは穴広げ率が改善する場合が多かったものと考えられる. なお, 今回の実験では上記の考察を裏付けるような穴周のひずみ分布を測定することができなかった. これは今後の課題としたい. さらに, $\theta = 45^\circ$ の切り口に関しては B 材の Point 1 を除いて通常パンチ穴の切り口よりも加工硬化している. これにより, 3.2 節の多くの場合で低い穴広げ率を示したものと思われる.

Fig.9 Measurement of Vickers hardness

$\theta = 80^\circ$ における Point 1 の加工硬化の抑制は, ルーフシャーにより被加工材の穴抜き予定部がたわむことが原因と推測される. 被加工材の穴抜き予定部がたわめば穴周に直交

する方向に張力が発生する. 張力により穴抜き時の破断は促進され, 切り口の加工硬化は抑制される⁸⁾. これを傍証するべく B 材の切り口外観写真を Fig.10 に示す. Fig.10(a-1), (c-1)をみるに $\theta = 80^\circ$ では通常パンチと比較して Point 1 のせん断面率 (光沢面の占める割合) が明らかに低い. ここでだけ, せん断面, 破断面の定義は Fig.8 を参照されたい. Fig.10(a-2), (c-2)より Point 2 も同様である. Point 3 はたわみが生じる以前に刃先が食い込むため, 張力は加わらない. そのため, 通常パンチの切り口 (Fig.10(c-3)) に対して $\theta = 80^\circ$ ではせん断面率がほぼ同等となっている.

$\theta = 45^\circ$ においても同様に Point 1 において破断が促進されている. Fig.10(b-1)から, $\theta = 45^\circ$ の Point 1 においてはほぼ全面が破断面 (光沢の無い面) である. しかしながら, 破断が促進されているにもかかわらず Fig.9(b)より硬さは高い. これは被加工材の穴抜き予定部のたわみが塑性変形に至る程度に過大となった事が原因と推測される. この推測は Fig.11 の Point 1 における切り口断面写真から裏付けられる. Fig.11 では通常パンチ穴の切り口 (Fig.11(a)) と $\theta = 80^\circ$ の切り口 (Fig.11(b)) に比較して, $\theta = 45^\circ$ の切り口 (Fig.11(c)) におけるだれが著しく大きい. このようなだれ形状は, 穴抜き時の被加工材のたわみが塑性変形に至る程度であったことを示唆している. また, 穴抜き時にパンチとダイが接触しないためには, Fig.11(c)の $\theta = 45^\circ$ の切り口において図中の Contact point on the die edge はより左側に存在しなければならない. すなわち, $\theta = 45^\circ$ の切り口は穴抜き直後には時計回りに傾いていたはずである. この点からも $\theta = 45^\circ$ において穴抜き時の被加工材が大きくたわんだ状態であったことが分かる. Fig.10(b-2)の Point 2 においても同様の現象が起きたものと考えられる. また, Fig.10(b-3)から Point 3 のせん断面率は通常パンチによる切り口よりも高い. これはルーフシャー先端が先鋭化することにより穴抜きに伴う被加工材の塑性変形が刃先周囲に局所化したことが原因であると推察される. 塑性変形が刃先周囲に局所化するという事は, 刃先が食い込む分だけ被加工材が圧縮されることになる. これにより刃先周囲における被加工材の静水圧が増して破断が抑制されたものと考えられる. 同様の傾向は扇状切断稜線のせん断加工においても報告されている⁹⁾.

続いてルーフ方向 ψ' と穴広げ率との関係について考察する. 3.2 節にも述べたように穴広げ性が改善するクリアランスと θ に限れば, 開口率が最も高い材料方向 ψ と穴広げ率が最も高いルーフ方向 ψ' は概ね一致する. これは, 3.1 節のサイドバンド試験において最も高い開口率を示した材料の変形方向がルーフ先端方向に直交することを意味する. Fig.7 における“圧延方向”を“最も高い開口率を示す材料方向”として読み換えて参照するに, このような ψ' では Fig.7 の Point 3 における穴広げ時の材料変形方向がサイドバンドにより測定された開口率の最も高い材料の方向に一致している. ここで, 3.2 節に述べたように Point 3 は穴広げ時の主たる割れ発生箇所, すなわちルーフシャー付きパンチに起因する最弱部である. このような最弱部 (Point 3) の存在が材料特性 (伸びフランジ性の優れる材料方向) で補われることで, 特定の ψ' において穴広げ率が高くなるものと考えられる. Point 3 が最弱部となる理由は, Point 3 の

Fig.10 Surface on the pierced hole

Fig.11 Cross section of Point 1 on the pierced hole

切り口表層の加工硬化が大きいためである。Fig.9の硬さ測定は表層より 0.08 mm 離れた位置であるから、必ずしも Point 3 の加工硬化が最大であることを判断できない。しかしながら、上述したように Fig.10 の切り口形状から Point 3 においては穴抜き時に破断が抑制されていた。これにより切り口表層の大きな加工硬化が示唆される。

さらに、クリアランスが狭い場合にルーフシャープ付きパンチの効果が低い点に関しては、ルーフシャープにより生じる被加工材の張力が低いことが原因と思われる。一般にクリアランスが低い程穴抜き予定部のたわみは小さいことから¹²⁾、これにより生じる張力も下がるものと考えられる。

また、現段階では C 材においてルーフシャープ付きパンチの効果が低いのははっきりとした理由は分らない。材料の強度が高いことによる工具の焼き付きがその原因の一つとして推測される。

5. 結 言

本報では $\phi 10$ mm の穴抜きを対象に、穴広げ率に対するルーフシャープ付き穴抜きパンチの効果、および材料とルーフ方向の関係を調査した。その結果、以下の知見を得た。

- i) ルーフシャープを用いない穴抜きと比べて穴広げ率が改善する適正なルーフシャープ角度、クリアランスが存在する。ルーフシャープパンチにより板がたわみ、これにより生じた張力が穴抜き時の破断を促進する（穴抜きに伴う塑性変形を抑制する）ことが穴広げ改善のメカニズムであると考えられる。
- ii) ルーフシャープ角度が大きい場合には穴広げ率は却って悪化してしまう。また、クリアランスが小さい場合にはルーフシャープパンチによる穴広げ率向上の効果が小さい。前者においてはルーフによる被加工材のたわみが塑性変形を生じる程度に過大となってしまうこと、後者においてはクリアランスが小さい場合にルーフシャープによる板たわみが抑制されることが原因と考えられる。
- iii) 穴広げ率が改善するルーフシャープ角度とクリアランスに限れば、伸びフランジ性が優れる材料方向にルーフ先端が直交する条件において最も高い穴広げ率を示す。これは、穴広げ時の最弱部（割れ発生箇所）の変形方向が最も伸びフランジ性が良好な材料方向に一致するためである。

参 考 文 献

- 1) Keeler, S. & Ulintz, P.: Met. Form., **45-5**(2011), 24-28.
- 2) 松野崇・栗山幸久・村上碩哉・米沢翔太・金丸尚信：塑性と加工, **52-606**(2011), 795-800.
- 3) Yoshida, Y., Ishiguro, T., Yukawa, N., Ishikawa, T. & Wang, Z.: Steel Research Int., **81-9** (2010), 670-673.
- 4) Mori, K., Abe, Y. & Suzuki, Y.: J. Mater. Process. Technol., **210** (2010), 653-659.
- 5) 中川威雄・吉田清太：塑性と加工, **10-104**(1969), 665-671.
- 6) 町田輝史・中川威雄：塑性と加工, **16-172**(1975), 365-370.
- 7) 松野崇・水村正昭・瀬戸厚司・末廣正芳：塑性と加工, **54-627**(2013), 353-357.
- 8) 高橋雄三・堀岡聡・河野治・小原昌弘・潮田浩作：塑性と加工, **53-617**(2012), 569-573.
- 9) 松野崇・新田淳・佐藤浩一・水村正昭・末廣正芳：塑性と加工, **54-632**(2013), 819-825.
- 10) 高橋学・河野治・林田輝樹・岡本力・谷口裕一：新日鉄技報, **378**(2003), 7-11.
- 11) 佐藤浩一・吉田亨・水村正昭・末廣正芳・吉田博司：第 61 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2010), 407-408.
- 12) 前田禎三：塑性と加工, **2-10**(1961), 619-632.