

(論文)

寸法精度および衝撃特性に及ぼす形状凍結ビードの影響

The Effect of a Shape Fixing Bead on Dimensional Precision and Impact Deformation



山本貴之*
Takayuki Yamamoto



岩谷二郎*
Jiro Iwaya

In recent years, more and more high-strength steels are being used in automobile frame parts and, as result, increased dimensional precision has become very important. In order to improve the dimensional precision of such parts, Kobe Steel developed a shape fixing bead that is comparatively easy to use for the manufacture of parts requiring high dimensional precision. The shape fixing bead's impact on part properties and measures whereby such properties could be further improved is discussed in this paper.

まえがき = 近年、自動車業界において、地球環境保護の強化および更なる衝突安全性の追求から、特に耐衝撃骨格部材への高強度材適用による車体軽量化と衝撃特性の向上が進んでいる。高強度材を適用する際の最大の課題として、プレス成形時の寸法精度不良がある。

寸法精度不良、中でも絞り曲げ成形(以下、ドロー)における壁反りは大きな課題であり、従来から種々の対策技術の提案が行われている^{1)~4)}が、比較的適用しやすい技術として形状凍結ビード技術が知られている²⁾。しかし、本技術については、壁反り改善のメカニズムや衝撃特性への影響までの系統的な検討は、ほとんどなされていない。

そこで本研究では、ハットチャンネルモデルについて、複数の形状凍結ビード(以下、凍結ビード)を付与することによる壁反りの改善効果や衝撃特性への影響に注目し、FEM 解析および実験にて検証を行った。

1. 解析および実験方法

1.1 FEM 解析方法

図1に凍結ビードの形状を示す。また、図2にハット

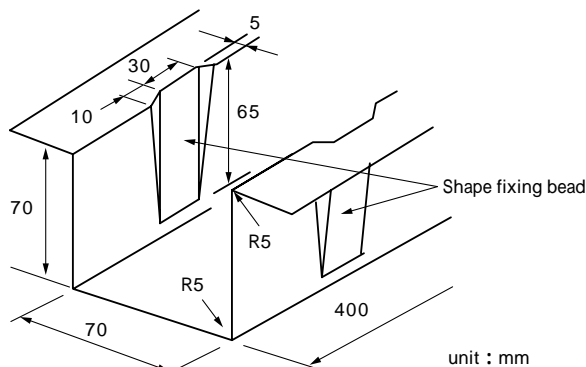


図1 形状凍結ビードの形状
Fig. 1 Form of shape fixing bead

チャンネルモデルの縦壁部への凍結ビードの付与位置を示す(左右の縦壁ともに付与)。上記モデルについて、しわ抑え圧:137.2kN、摩擦係数:0.15、成形速度:5m/secの条件にて、ドロー工法の成形解析およびスプリングバック解析を行った。解析ソルバとしては、汎用のPAM-STAMPを使用した。スプリングバック後の寸法精度については、図3に示す方法にて壁反り、口開きおよびフランジ跳ねを測定し、評価に用いた。

また、衝撃特性の検討として、今回、剛体バリアでの

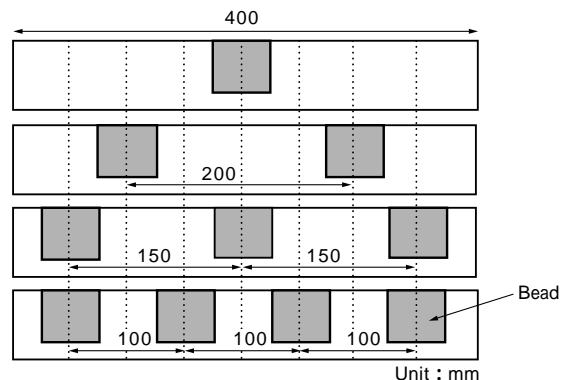


図2 縦壁部での形状凍結ビードの位置
Fig. 2 Bead positions on side wall

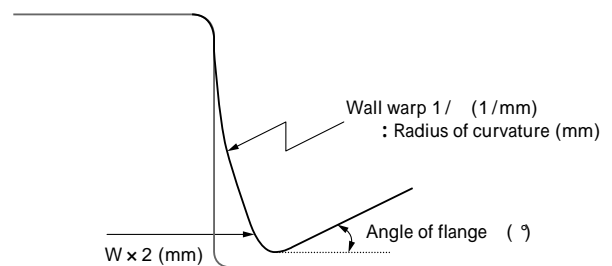


図3 寸法精度の測定方法
Fig. 3 Methods of dimensional precision measuring

*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

表 1 供試材の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of steels

Grade	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
270MPa	169	305	49
590MPa	361	619	31
780MPa	514	819	20
980MPa	694	1014	18

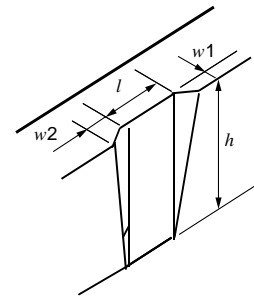


図 4 形状凍結ビードの形状因子
Fig. 4 Form factor of shape fixing bead

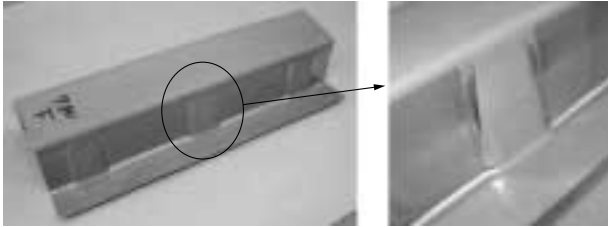


写真 1 形状凍結ビード付き絞り品
Photo 1 Drawing panel with shape fixing bead

軸圧壊解析(圧壊速度 14m/sec)および剛体パンチ(R150mm)での3点曲げ圧壊解析(圧壊速度 14m/sec)を行った。解析ソルバとしては、汎用のPAM-CRASHを使用した。衝撃特性については、軸圧壊、3点曲げ圧壊モードともに、荷重変位曲線から最高荷重および吸収エネルギーを求め評価に用いた。

上記FEM解析に用いた材料データは、(1)式のswift型硬化則で近似される780MPa級材であり、圧壊解析では(2)式で示されるCowper-Symondsの式にて歪速度についての考慮も行った。板厚は1.2mmである。

$$\sigma = 1256.7 (0.00153 + \dot{\epsilon})^{0.13565} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 σ : 真応力
 ϵ : 真歪

$$\sigma_d = \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 σ_d : 動的降伏応力
 σ_s : 静的降伏応力
 $\dot{\epsilon}$: 歪速度

D, P : 材料固有の定数

1.2 実験方法

供試材の材料特性を表1に示す。解析モデルと同形状のハットチャンネル(片壁について、凍結ビード:無し、1個、3個)をドロウ工法にてプレス成形後(写真1)、3次元形状測定機にて所定の寸法精度を測定するとともに、縦壁部の板厚測定を行った。

寸法精度の測定については、図3で示した方法で実施した。

2. FEM 解析結果, 実験結果および考察

2.1 寸法精度に及ぼす凍結ビードの影響

2.1.1 凍結ビード形状の影響

凍結ビードの形状を形状剛性面から適正化するため、寸法精度に及ぼす各形状因子の影響について、FEM解析を用いて検討を行った。ハットチャンネルの片壁に凍結ビードを1個ずつ付与し、図4に示す $w1, w2, l$ および h をプレス成形性などを考慮した実用的な範囲にて変化させ、寸法精度への影響を調査した。寸法精度の測定

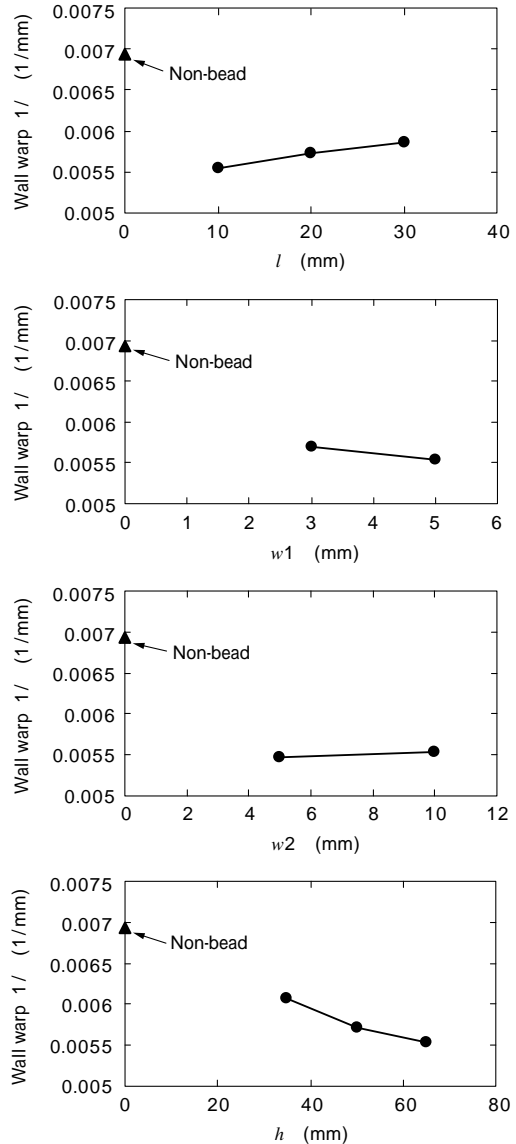


図 5 壁反りと形状凍結ビードの形状因子との関係
Fig. 5 Effect of form factor of shape fixing bead on wall warp

は、ビード中心から100mmの位置にて実施した。

結果を図5に示す。本検討範囲では、 $l, w1$ および h の影響が比較的大きく、 l が小さいほど、また、 $w1, h$ が大きいくほど壁反りは小さくなる傾向にある。これらの結果より求めた寸法精度と各形状因子の相関式を、下記の式(3)~(5)に示す。

$$\text{壁反り } 1/ = l^{0.055} w1^{-0.079} w2^{-0.015} h^{-0.153} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{口開き } W = l^{0.007} w1^{-0.049} w2^{-0.006} h^{-0.079} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{フランジ跳ね} = l^{0.025} w1^{-0.167} w2^{-0.007} h^{-0.288} \dots\dots\dots(5)$$

上式より、壁反りだけでなく、口開き、フランジ跳ねともに、ほぼ同様の相関傾向であり、 w_1 および h の影響が比較的大きいことがわかる。

従って、凍結ビードを付与する場合には、プレス成形性を考慮しながら、 w_1 および h をできる限り大きくすることにより、寸法精度をより向上させることが可能である。

2.1.2 凍結ビード数の影響

図6に、780MPa級材において凍結ビード数を増加させた場合の、FEM解析および実験による壁反りと軸方向位置の関係を示す。また、写真2に、スプリングバック後の断面形状外観を示す。図より、FEM解析と実験では、絶対値には差があるものの、凍結ビードの有無にかかわらず、軸方向の壁反り傾向は定性的にほぼ一致している。また、いずれも凍結ビードが無い場合に比べ、凍結ビードを1個付与した場合、凍結ビード位置の近傍では壁反りを約1/3以下に抑制でき、形状剛性の効果が確認されるが、凍結ビードから離れるにしたがい壁反りは増大する傾向にある。従って、例えば凍結ビードを3個付与した場合の最大壁反り量はビード間中央、すなわちビード中心から75mmの位置となる。凍結ビードを1個付与した場合の実験結果より、上記位置での壁反り量は約0.007(1/mm)であり、これが凍結ビード3個の場合の最大壁反り量と推定できるが、実際には約0.005(1/mm)となっている。これは凍結ビードの複数化による壁反り改善効果が単純に凍結ビードの形状剛性だけによらないことを示唆している。

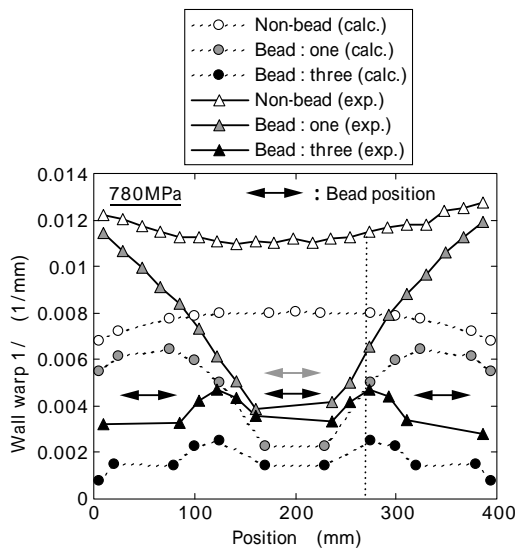


図6 壁反りに及ぼす形状凍結ビードの影響
Fig. 6 Effect of shape fixing beads on wall warp

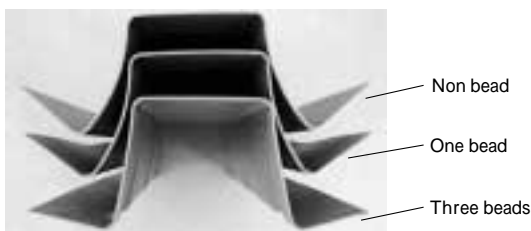


写真2 寸法精度に及ぼす形状凍結ビードの影響 (780MPa)
Photo 2 Effect of shape fixing beads on dimensional precision (780MPa)

そこで、凍結ビード間の壁部の変形に注目し、板厚減少率を測定した結果を図7に示す。凍結ビードが無い場合、あるいは凍結ビードを1個付与した場合に比べ、3個付与した場合には凍結ビード間の板厚減少率が大きくなっている。また、FEM解析により、縦壁部の応力方向を確認したところ、凍結ビードが無い場合はプレス方向が主体であったのに対し、凍結ビードを3個付与した場合、軸方向が主体になっていることがわかった。

以上の結果から、凍結ビードの複数化による壁反りの改善効果として、凍結ビードの形状剛性に加え、凍結ビード間での軸方向の引張力が大きく影響していると考えられる。そこで凍結ビードが無い場合のプレス品について縦壁部を切出し、軸方向に引張力を加え、壁反りの変化を調査した。図8に壁反りと伸び歪の関係を示す。材料強度によらず、伸び歪の増加に伴い壁反りは小さくなる傾向が認められる。これは、壁反りの原因である板厚内でのプレス方向の残留応力差が、軸方向の引張力により軽減されるためと考えられる。

従って、凍結ビードを複数付与する場合には、ビードそのものの形状剛性だけではなく、凍結ビード間で引張力の作用を考慮し、凍結ビード間隔、凍結ビード形状などを制御することが重要であり、これにより寸法精度の改善効果をより一層高めることが可能である。

2.2 寸法精度に及ぼす材料強度の影響

材料強度を変化させたハットチャンネルについて、片

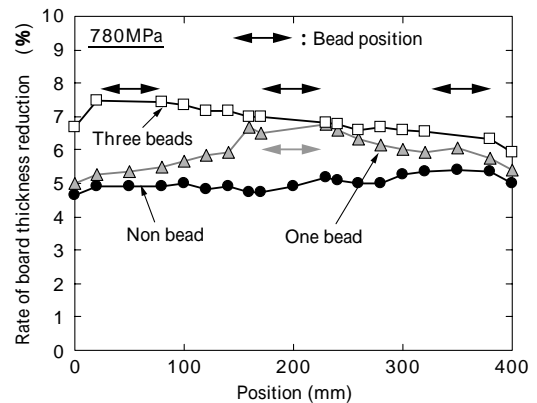


図7 縦壁部の板厚減少率に及ぼす形状凍結ビードの影響
Fig. 7 Effect of shape fixing beads on the rate of board thickness reduction on side walls

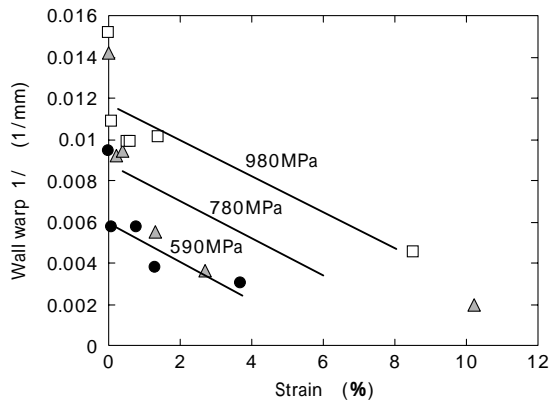


図8 壁反りに及ぼす縦壁部軸方向への伸び歪の影響
Fig. 8 Effect of side wall tensile strain with axial direction on wall warp

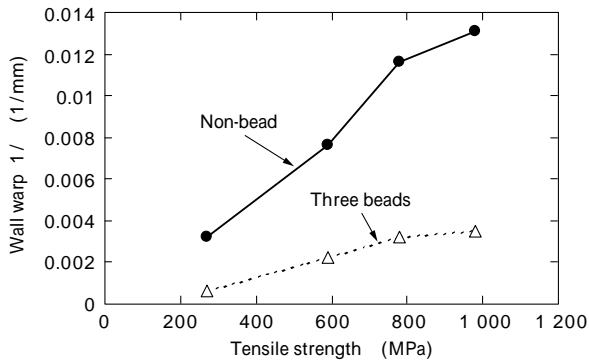


図9 壁反りと材料強度の関係
Fig. 9 Effect of tensile strength of materials on wall warp

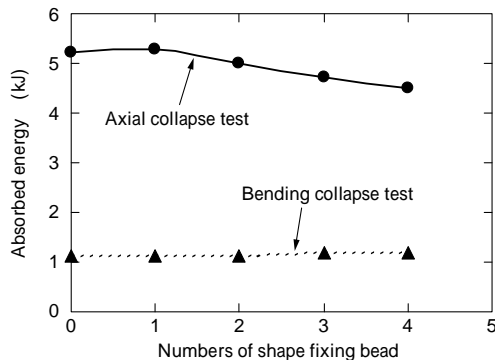


図10 吸収エネルギーと凍結ビード数の関係
Fig.10 Effect of shape fixing bead number on absorbed energy

壁に凍結ビードを3個ずつ付与し、各材料での凍結ビードの効果を実験により検討した。部材端部にて寸法精度を測定した結果を図9に示す。凍結ビードが無い場合、高強度化に伴い壁反りは著しく増大するが、凍結ビードの付与により、材料強度によらず、ほぼ1/3に壁反りを低減できることがわかる。

2.3 衝撃特性に及ぼす凍結ビードの影響

2.3.1 凍結ビード数の影響

次に、凍結ビードを付与した場合の衝撃特性への影響についてFEM解析により検討した結果を述べる。図10に軸圧壊および3点曲げ圧壊を行った際の凍結ビード数と吸収エネルギーの関係を示す。

軸圧壊での吸収エネルギーは、凍結ビード数の増加に伴い減少する傾向にあるが、これは図11に示すように、凍結ビードがある場合、ビード位置にて座屈が発生するためと思われる。軸圧壊の場合、応力が稜線近傍に集中するが、凍結ビード位置ではダイ肩部側の稜線が折曲がるため、圧壊初期段階から折部へ応力が集中し、座屈の起

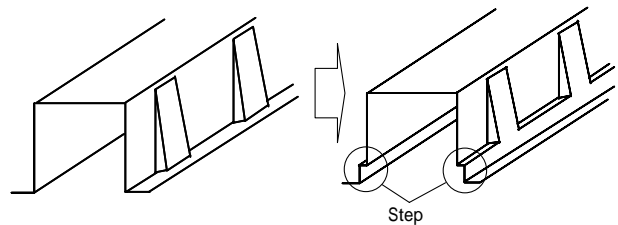


図12 ダイ肩部への段差付き形状概略図
Fig.12 Schematic illustrations of shape with the step on die shoulder

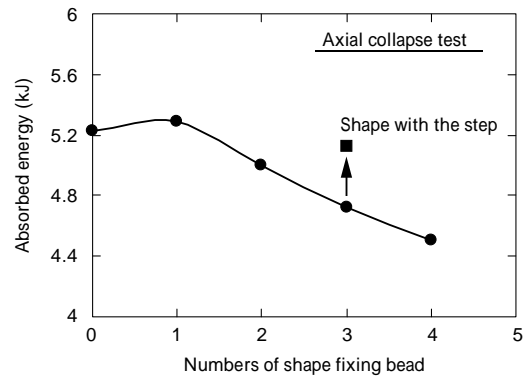


図13 段差付き形状による軸圧壊特性への影響
Fig.13 Effect of shape with the step on impact property

点となると考えられる。

一方、3点曲げ圧壊の場合、凍結ビード数を増加させても吸収エネルギーへの影響は極めて小さいことがわかる。また、これらの傾向は最大荷重についてもほぼ同様であった。

以上の結果から、例えば、自動車のサイドメンバなどのように、比較的軸圧壊に近いモードで変形する部品に凍結ビードを付与する場合には、衝撃特性の考慮が必要であるとともに、特性改善のための何らかの対策が必要である。

2.3.2 軸圧壊特性の改善

凍結ビードを付与した場合の軸圧壊特性の劣化を防止するため、形状面からの対策検討を行った。軸圧壊モードの場合、上述のように、凍結ビードによる稜線の曲がり部が座屈の原因となるため、特性改善のためには、圧壊方向へストレートな稜線を通すことが極めて重要と考えられる。

そこで、図12に示すようにダイ肩部へ段差形状を設け、軸圧壊特性の改善効果をFEM解析により確認した。結果を図13に示す。図より吸収エネルギーが約10%向上

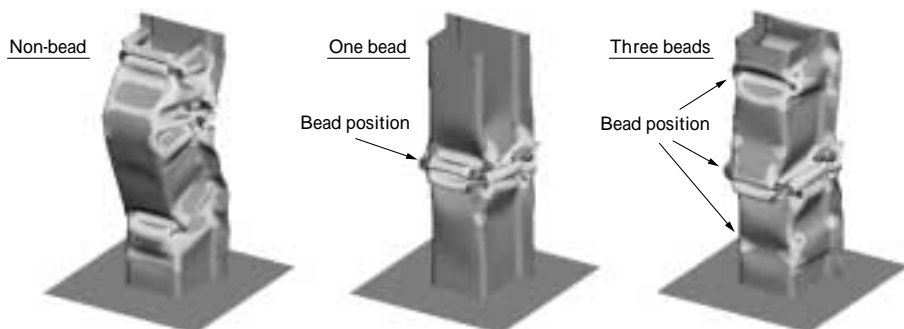


図11 軸圧壊による変形図
Fig.11 Examples of deformed shape (Axial collapse test)

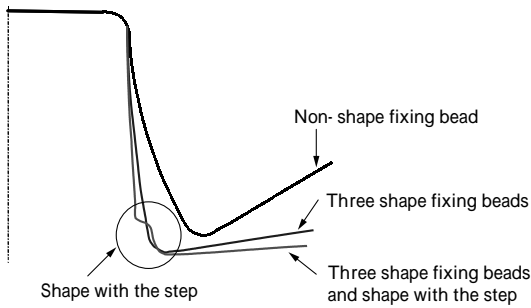


図14 ダイ肩段差形状付与前後の寸法精度比較
Fig.14 Effect of shape with the step on dimensional precision

しており、軸圧壊特性の改善効果が認められた。

また、この段差形状による寸法精度への影響について FEM 解析にて確認を行った結果、図14 に示すように、段差付与前に比べ更に壁反りが改善されることがわかった。

以上の結果から、ダイ肩部へ段差形状により稜線を通すことは、軸圧壊モードでの特性改善の考え方として有効であり、今後、衝撃特性および寸法精度のバランス向上のため、更なる形状の適正化が可能と考えられる。

むすび = FEM 解析および実験にて、寸法精度に及ぼす凍結ビードの影響に関する検討を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 凍結ビードの効果は、凍結ビードの複数化により顕著になり、その原因として、凍結ビードの形状剛性および凍結ビード間の引張力が考えられる。
- 2) 凍結ビードの形状として、ビード深さ w_1 およびビード高さ h をできるだけ大きくすることにより、寸法精度の改善効果が顕著になる。
- 3) 材料強度によらず、凍結ビードによる壁反りの改善効果は大きい。
- 4) 凍結ビード付与による 3 点曲げ特性への影響はほとんど無いが、軸圧壊特性は若干劣化する。
- 5) 凍結ビードを付与した場合における軸圧壊特性の改善策の一つとして、ダイ肩部への段差形成が有効である。

参考文献

- 1) 小林敏郎ほか：塑性と加工，3-21 (1962) p.717.
- 2) 林 豊ほか：鉄と鋼，68-9 (1982) p.1236.
- 3) 岩谷二郎：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52，No.3 (2002) p.23.
- 4) 山野隆行ほか：第 54 回塑性加工連合講演会論文集 (2003) p.15.