

技術資料

鋼管のハイドロフォーミング性に及ぼす機械的性質と加工条件の影響

大塚 雅人* 須釜 淳史** 森 川 茂***

Effect of material properties and forming conditions on formability of tubes in hydroforming

Masato Otsuka, Atsushi Sugama, Shigeru Morikawa

Synopsis :

The formability by the tube-hydroforming has been evaluated by the factor of "formable area" defined by both water hydraulic pressure working on the tube wall and force loaded on the tube along its axial direction. Influences of tube strength, thickness, surface lubricity and die pattern on the formable area have been investigated. Furthermore, "loading path conditions"; i.e., the way to balance water hydraulic pressure and force along axial direction, suitable for forming have been experimentally determined.

Main points of the result are as follows :

- (1) The better the surface lubricity, the thicker tube thickness and the lower tube strength, respectively, formable area tends to broaden.
- (2) Compared with a rectangle die, the formable area obtained by a square die is narrower, because the tube is subjected to a larger stretch deformation until the tube contacts with the inner wall of the die.
- (3) By using the optimum loading path, decrease in the tube thickness by the forming can be controlled to the minimum.

1. 緒言

現在、自動車業界では車体軽量化による燃費の向上や衝突安全性の向上、コストの削減が進められている。これらを解決する手段の一つとして、液圧により鋼管から部品を成形するハイドロフォーミングが欧米で始まり、近年国内でもハイドロフォーミングが採用される事例が増えている。ハイドロフォーミングは一体成形による軽量化、工程省略、溶接長さの削減などのメリットがあり、利用の拡大が期待される加工法である。

一般にハイドロフォーミングを適用したフロントサブフレームやリアサブフレームなどの自動車部品は、四角形の断面形状に成形されるものが多い。

一方ハイドロフォーミングに関する文献は、個別形状の成形事例紹介が多く、ハイドロフォーミングにおける成形性を「成形可能範囲」で評価した事例は少な

い^{1,2)}。また成形性を管の肉厚、潤滑、金型形状でまとめたものや適正負荷経路を報告した事例もほとんどない^{3,4)}。

そこで本報では、四角形断面形状のハイドロフォーミングにおける成形性を「成形可能範囲」により評価し、成形可能範囲に及ぼす各因子（材料強度、肉厚、潤滑、金型形状）の影響および適正負荷経路について検討した結果を報告する。

2. ハイドロフォーミングとは

従来、多くの自動車部品は、鋼板をプレス成形し、**図1**に示すようにプレス品を2枚重ね合わせて「モナカ構造」あるいは「弁当箱構造」に溶接する場合が多い。しかしながら「モナカ構造」は溶接のためのフランジがあるため許容された空間いっぱい中空部材を作れないことや重量増となる問題がある。また「弁当

*加工技術研究部 加工第三研究チーム 主任研究員 **加工技術研究部 加工第三研究チーム
***加工技術研究部 加工第三研究チーム チームリーダー

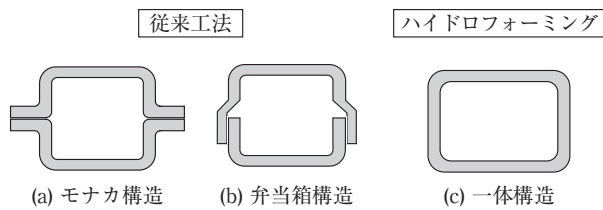


図1 自動車部品の断面構造の例

Fig. 1 Example of cross-section structures of automotive parts.

箱構造」も「モノカ構造」ほどではないが同様の問題がある⁵⁾。

それに対し hidroforming は、鋼管からの一体成形で衝突時の破壊で問題となる溶接部がないため、同一重量でも剛性や強度が高いという特徴がある。さらに、成形後の寸法精度が現行工法より優れているとの報告もある⁵⁾。

3. 供試材および実験方法

3.1 供試材

表1 に hidroforming に用いた供試材の化学成分を示す。表2 に素管の機械的性質を示す。供試材には強度レベルの異なる2種類（440MPa級（STAM440G）、

290MPa級（STAM290GA）の自動車構造用電気抵抗溶接炭素鋼管（JIS G 3472）を用いた。素管は外径63.5mm、肉厚2.0mm、長さ400mmを使用して、材料強度、肉厚、潤滑および金型形状の影響を調査した。また、STAM440Gについて2種類の肉厚（1.6, 3.2mm）を追加して、肉厚の影響を調査した。

3.2 実験方法

図2 に実験装置の概略を示す。本実験では、まず初めに両管端から管内に挿入した軸押しパンチに取り付けたOリングにてシールを行ない、次に素管内に成形液を供給した後、油圧プレス機で素管を型締めし、最後に成形液の昇圧とパンチによる管端の軸押し込みにより hidroforming を行なった。

表3 に hidroforming の加工条件を示す。負荷経路Gとは、内圧の増分（ Δp ）と両管端の軸押し込み量の増分（ Δu ）との比（ $G = \Delta p / \Delta u$ ）であり、負荷経路Gが大きいほど、軸押し量より内圧が優先的に付与される⁶⁾。なお、負荷経路 $G = \infty$ とは内圧のみが上昇するフリーバルジ試験である。

図3 に今回使用した2種類の金型の断面形状を示す。実験には成形品が正方形断面形状となる正方形金型（寸法□75×75mm）と、長方形断面形状となる長方形金型（寸法□63.5×86.5mm）を使用した。

表1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of steel used

公称肉厚 (mm)	規格	C	Si	Mn	P	S	(mass%)
1.6	STAM440G	0.14	0.10	0.48	0.012	0.003	
2.0		0.14	0.10	0.49	0.015	0.005	
3.2		0.13	0.10	0.71	0.020	0.004	
2.0	STAM290GA	0.05	<0.01	0.24	0.011	0.006	

表2 素管の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of specimens

公称肉厚 (mm)	公称外径 (mm)	規格	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	全伸び (%)	ビッカース硬さHV	
						母材部	溶接部
1.6	63.5	STAM440G	372	476	55	162	267
2.0			392	470	54	157	235
3.2			429	488	56	169	285
2.0		STAM290GA	278	337	68	121	176

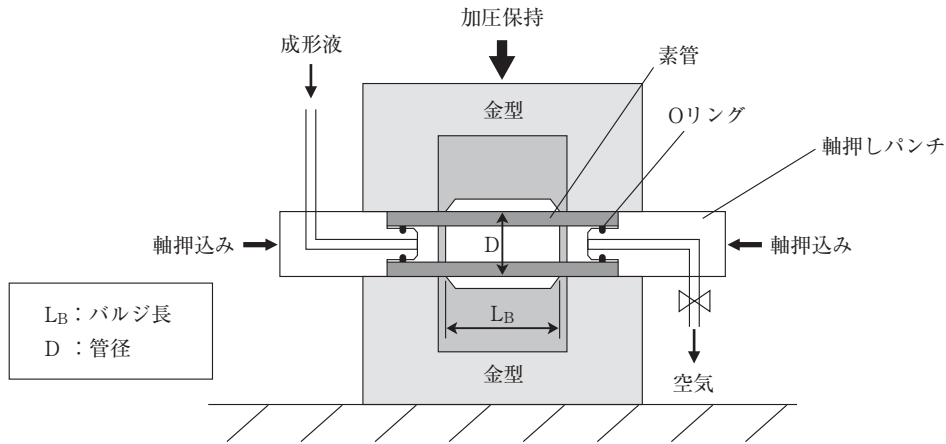


図2 実験装置の概略
Fig. 2 Outline of experimental device.

表3 ハイドロフォーミングの加工条件
Table 3 Conditions of hydroforming

素管寸法	φ63.5×2.0t (1.6t, 3.2t)×400L (mm)
金型断面形状	□75×75mm, □63.5×86.5mm (周長増加率は, 両方とも約50%)
バルジ長 L_B	180mm (=2.8D)
負荷経路G	1, 2, 3, ∞ (∞は軸押し込みなし) (MPa/mm)
型締め力	1,100kN
成形内圧p	0~100MPa
軸押し込み量u	0~100mm (両管端の合計)
n 数	2本

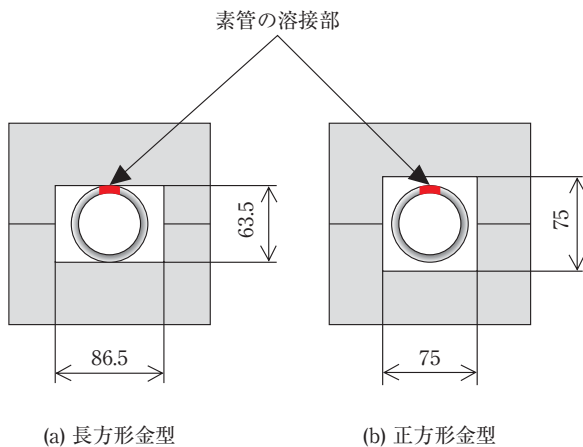


図3 金型の断面形状
Fig. 3 Cross-section of die.

これら2種類の金型は、同一の断面周長 (300mm) とし、周長増加率 \uparrow を50%に設定した。図3に示すように素管を金型にセットした初期状態では、正方形金型の

場合、素管と金型は接しないが、長方形金型の場合、上下2箇所素管と金型が接する。

表4に素管の外表面に施した潤滑剤の明細を示す。潤滑剤には粘度 $60\text{mm}^2/\text{s}$ のプレス工作油と絞り加工用表面保護フィルムの2種類を使用し、潤滑なし、油潤滑、フィルム潤滑の3条件で加工した。一般に保護フィルムは、加工中に鋼材と金型による金属同士の接触がないため潤滑性に優れる傾向にある。

4. 評価方法

4.1 成形品の外観評価

成形品の外観評価基準を以下に示す。図4にはそれぞれの外観を示す。

①割れ：目視観察により、破断の有無を評価した (ネッキングは含まず)。

$$\uparrow \text{周長増加率} (\%) = (\text{金型の周長} - \text{素管の周長}) / \text{素管の周長} \times 100$$

表4 潤滑剤の明細

Table 4 Details of lubricants

	製品の 型番	種類	粘度 ($\text{mm}^2/\text{s}(40^\circ\text{C})$)	メーカー名	潤滑状態	潤滑性
無潤滑	—	—	—	—	素管・金 型を脱脂	劣 ↑ ↓ 優
潤滑剤	No.620	プレス工作油	60	日本工作油	素管・金 型に塗布	
	spv3633	絞り加工用表面 保護フィルム	— (フィルム)	日東電工	素管に貼 付	



図4 成形品の外観評価基準

Fig. 4 Appearance evaluation standard of products.

- ②しわ・座屈：しわと座屈の判別は成形品の外観を目視観察し、成形品の表面うねりが内圧の上昇にて除去可能と判断する場合には「しわ」と評価し、しわの波高さがしわの1/2波長より大きく、内圧の上昇によりしわの除去が不可能と判断する場合には「座屈」と評価した。
- ③コーナーR：Rゲージを用いて成形品の長手方向中央位置の4辺のコーナーRの大きさを測定し、平均値にて評価した。ただし、1辺のコーナーR付近が破断している場合は、その1辺を除いて残りの3辺のコーナーRの大きさを平均して評価した。

4.2 成形可能範囲の評価

鋼板のプレス成形ではしわ抑え力を変化させた際に、割れ、しわが発生しないしわ抑え力の範囲を成形可能範囲として成形余裕度の評価を行なう方法がある⁷⁾。本報告では、ハイドロフォーミングにおける成形余裕度を後

述する方法にて求めた成形可能範囲で評価した。

図5に各成形限界線の作成方法を示す。成形可能範囲は「割れ限界線」、「しわ・座屈限界線」、「目標コーナーR限界線」からなる3つの境界線を重ね合わせて求める。

割れ限界線は各負荷経路にてハイドロフォーミングを行い割れが生じた時の両管端の軸押込み量と内圧を座標上にプロットし、それらを線で結び求める。

しわ・座屈限界線は、各負荷経路での割れに至るまでの途中段階での成形品を目視観察により、しわまたは座屈を評価して座標上にプロットし、それらを線で結び求める。

目標コーナーR限界線は、各負荷経路での割れに至るまでの途中段階での成形品のコーナーRを測定し、目標コーナーRが得られた時点を座標上にプロットし、それらを線で結び求める。今回は目標コーナーRを21mmとした。

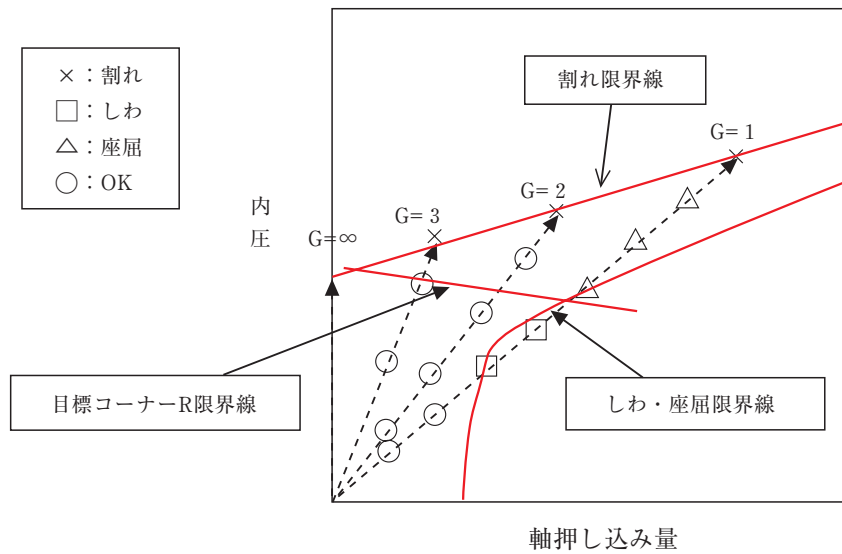


図5 各限界線の作成方法
Fig. 5 Determining method of each forming limit line.

次に図6に示すように割れ限界線より高内圧側の領域を「割れ領域」、しわ・座屈限界線より高軸押し込み量の領域を「しわ・座屈領域」、目標コーナーR限界線に達しない内圧および軸押し込み量の領域を「目標コーナーR未達領域」とし、これら領域に属さない領域（割れ限界線より低圧側、しわ・座屈限界線より高圧側、目標コーナーR限界線より高圧側）を「成形可能範囲」と設定した。

割れ限界線が高内圧側であるほど割れにくく、しわ・座屈限界線が高軸押し込み量側になるほどしわ・座屈が発

生しにくく、目標コーナーR限界線が低内圧側かつ低軸押し込み量側であるほどコーナーRが小さく成形しやすく成形可能範囲は広い。

この成形可能範囲の広さは、ハイドロフォーミングの成形余裕度を示す指標として使用でき、成形可能範囲が広いほどハイドロフォーミング性に優れると判断する。実生産においては成形可能範囲が広いほど量産安定性が高いと考える。

5. 実験結果と考察

5.1 成形可能範囲に及ぼす各影響因子の検討

5.1.1 材料強度の影響

前章の評価方法にて示した成形可能範囲を用いて、材料強度の影響を検討した。評価条件は、供試材の肉厚を2.0mmとし、プレス工作油と長方形金型を用いた。

図7に材料強度440MPa級（STAM440G）と290MPa級（STAM290GA）の成形可能範囲を示す。割れ限界線は、440MPa級の方が290MPa級よりも高内圧側であり、割れは生じにくかった。しわ・座屈限界線は、440MPa級の方が高内圧側にあり、高内圧を付与してもしわが生じやすい傾向にあった。目標コーナーR限界線は、440MPa級の方が高内圧側にあり、目標コーナーRを得にくい傾向にあった。

よって成形可能範囲は強度の低い材料の方が広い傾向にあった。

440MPa級は290MPa級よりも割れが生じにくかった

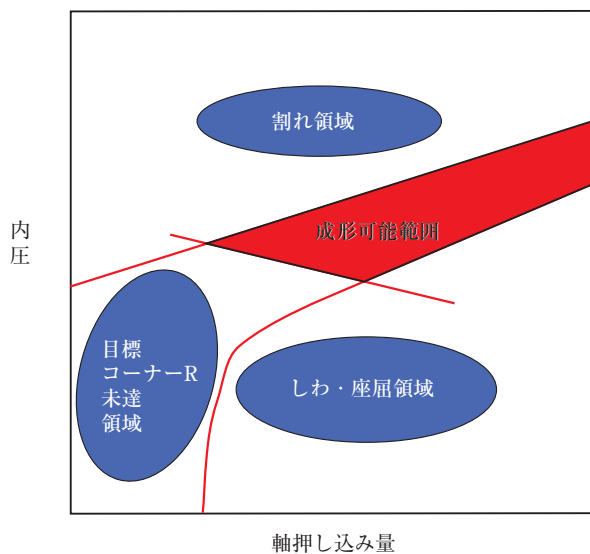


図6 成形可能範囲の求め方
Fig. 6 Determining method of formable range.

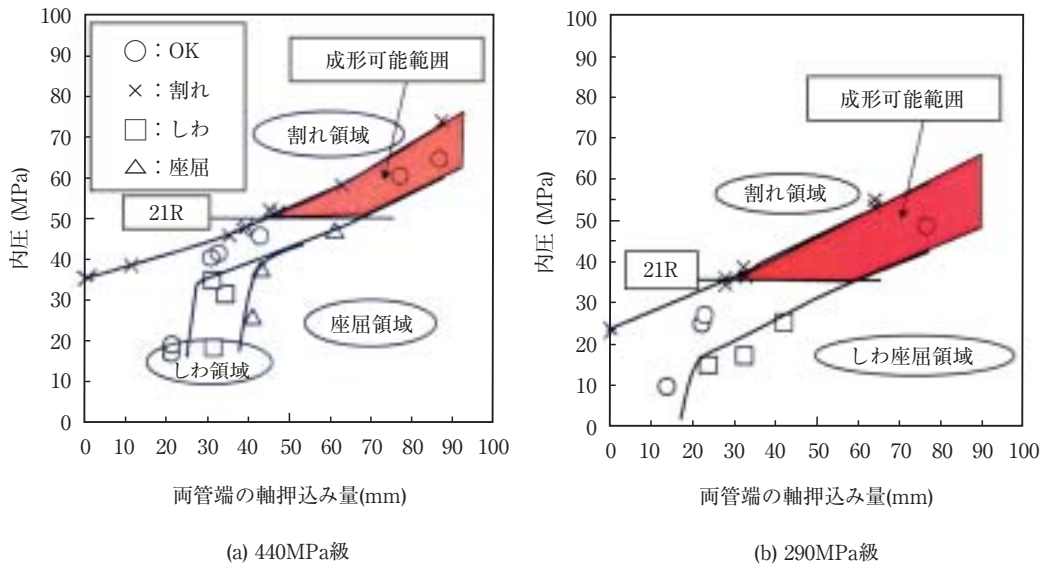


図7 各材料強度における成形可能範囲
Fig. 7 Formable range in each materials strength.

ことから、ハイドロフォーミングの割れ限界は引張強さと相関があると判断する。

290MPa級の方が440MPa級よりもしわ・座屈が発生しにくかったのは、降伏比（降伏点/引張強さ）が0.71と強度の高い材料（降伏比：0.83）より小さいためと考える。また、強度の低い材料の方が降伏点は低く、高内圧になればいったん発生したしわの平滑化が容易であったことも影響すると考える。

強度の低い材料の方が低内圧で目標コーナーRを得ているのは、降伏点の低い方が塑性変形しやすいことに起因すると考える。

5.1.2 肉厚の影響

前項と同様の方法で成形可能範囲に対する素材肉厚の影響を調査した。評価条件は、供試材の強度を440MPa級とし、プレス工作油と長方形金型を用いた。

図8に440MPa級における各肉厚の成形可能範囲を示

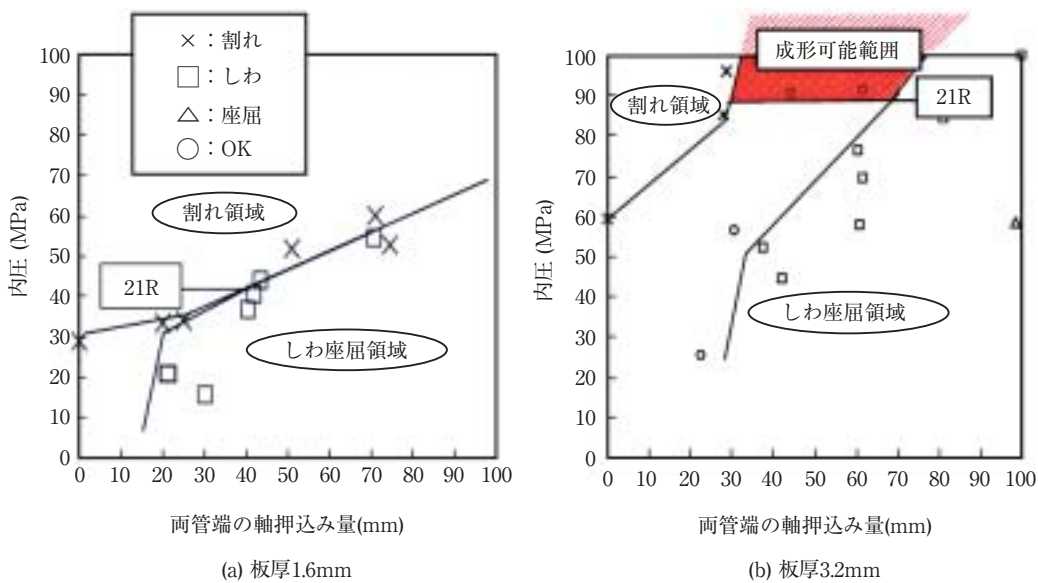


図8 各肉厚における成形可能範囲 (供試材:STAM440G)
Fig. 8 Formable range in each thickness.

す。基準条件である肉厚2.0mm (図7 (a)) から肉厚1.6mm (図8 (a)) に薄くした場合、割れ限界線は低内圧側となり割れが生じやすく、さらにしわ・座屈限界線は低軸押込み量側となりしわが生じやすい傾向にあった。その一方で、目標コーナーR限界線は低内圧側となり目標コーナーRが得やすい傾向にあった。しかしながら、肉厚1.6mmではしわを回避できないため成形可能範囲は存在しなかった。

次に肉厚2.0mmから肉厚3.2mm (図8 (b)) に厚くした場合、割れ限界線は高内圧側となり割れが生じにくく、しわ・座屈限界線は高軸押込み量側となりしわも生じにくい、目標コーナーR限界線は高内圧側となり目標コーナーRは得にくい傾向にあった。

今回は装置の都合上、内圧100MPaまでの昇圧としたが、内圧100MPa以上で成形を行なえば、図8 (b) の網掛け部のように成形可能範囲は高内圧側に広がっていると予測する。

以上のように肉厚が厚いほど割れにくいのは、厚肉化により管の円周方向の断面積が大きくなり、円周方向の破断荷重が高くなったためと考える。同様に厚肉化により管長手方向の断面積も大きくなり、管長手方向の降伏荷重が高くなったため塑性変形を生じにくかったことが原因と考える。また、目標コーナーRが得にくいのは円周方向の降伏荷重が高くなり、高い内圧を必要とするためと考える。

よって成形可能範囲は図8に示すように肉厚が厚い方

が広い傾向にあった。

5.1.3 潤滑性の影響

潤滑性を变化させた成形試験を行ない、成形可能範囲の比較検討を行なった。評価条件は、供試材の強度を440MPa級、肉厚を2.0mmとし、長方形金型を用いた。

図9に無潤滑および保護フィルムを使用した場合の成形可能範囲を示す。粘度60mm²/sのプレス工作油の潤滑剤 (図7 (a)) と比較した結果を以下に述べる。

無潤滑は、プレス工作油に比べ割れ限界線に明確な差がないが、しわ・座屈限界線において若干高軸押込み量側となり、座屈が生じにくい傾向にある。目標コーナーR限界線は若干高内圧側となり、図7 (a) に示すプレス工作油に比べ成形可能範囲は狭い傾向にあった。

高潤滑である保護フィルムは、プレス工作油に比べ、割れ限界線が高内圧側となり割れが生じにくかった。しわ・座屈限界は低軸押込み量側となりしわが生じやすいが、目標コーナーR限界線は若干低内圧側かつ低軸押込み量側となり目標コーナーRが得やすかった。結果として高潤滑である保護フィルムは、プレス工作油に比べ成形可能範囲が広がった。以上のことから成形可能範囲は、高潤滑なほど広がる傾向にある。

高潤滑なほど割れが発生しにくいのは、一般に高潤滑なほど管と金型間の摩擦抵抗が小さくなるため金型による材料の拘束力が弱まり、割れ危険部位である管と上下金型との接触部分境界で生じる局所的な歪みが

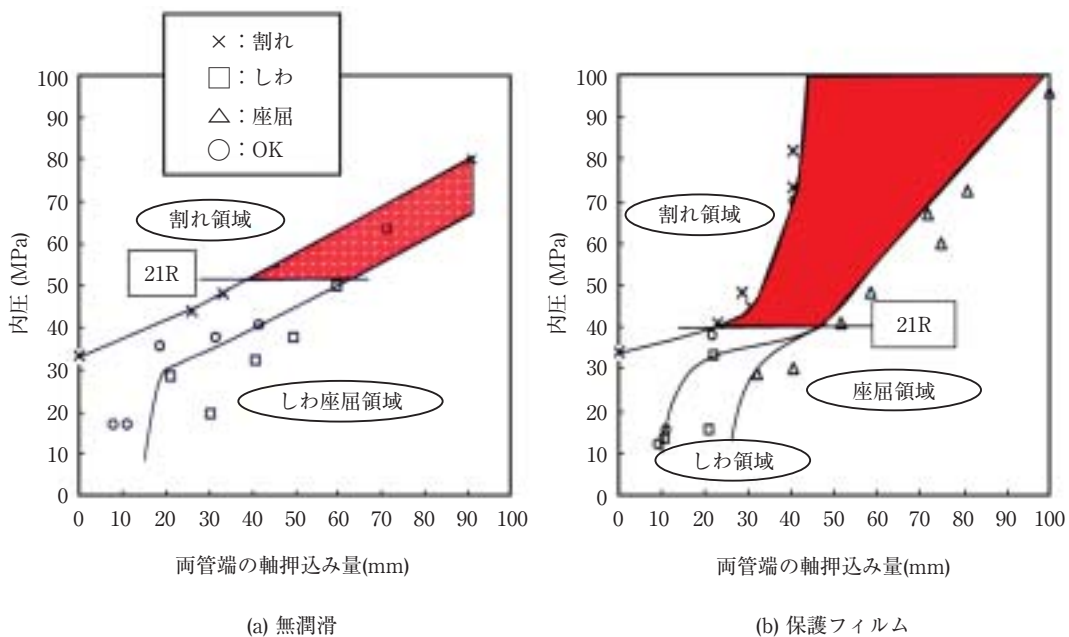


図9 各潤滑状態における成形可能範囲 (供試材: STAM440G)
Fig. 9 Formable range in each lubricant conditions.

緩和されることや、軸押込みによる円周方向への材料供給が有効に作用し肉厚減少を抑制したことに起因すると考える。

一方、潤滑性による割れ限界内圧の違いが軸押込み量30mm以下かつ内圧50MPa以下の範囲では明確でない。これは、図10の左下に示すように軸押込み量30mm以下かつ内圧50MPa以下では、成形途中の管は金型の上下面で接触するが金型の左右面と接触しないあるいは、わずかに接触した程度であるため内圧が低く管と金型間の潤滑性の影響が現れにくかったと考える。

軸押込み量と内圧が前述の範囲を超えると、図10の左上に示すように成形途中の管と金型間の接触が上下左右の4面となり接触面積が増え、さらに内圧の上昇に伴い接触面圧も上昇し、金型に材料が拘束されやすい状態となることから、潤滑性の影響が顕著に現れたと考える。

また、高潤滑になるとしわ・座屈が発生しやすい傾向にある。これは高潤滑になると低潤滑の場合よりも管長手方向への材料の滑り性が良くなり、材料供給が過剰となりやすいため、肉余りや局所的な肉厚の増加が生じ座屈しやすくなったと推察する。

高潤滑になると目標コーナーRが成形されやすい傾向にある。これは高潤滑になると管と金型の摩擦抵抗が小さくなることで金型による拘束力が弱まり、材料流動が

円滑になるためと考える。

5.1.4 金型形状の影響

四角形断面の金型形状の影響はこれまでも様々なアスペクト比の金型を使用した検討結果も報告されている⁴⁾。しかしながら、これらの金型は断面周長（管の周長増加率）が一定ではなく、純粋に金型形状の影響を検討するには相応しくなかった。

本報告では金型の断面周長を同一にした長方形金型と正方形金型を使用し、成形可能範囲に及ぼす金型形状の影響を検討した。評価条件は、供試材の強度を440MPa級、肉厚を2.0mmとし、プレス工作油を用いた。

図11に長方形金型と正方形金型における成形可能範囲を示す。正方形金型は長方形金型に比べ割れ限界線は高内圧側となり割れにくい傾向にあった。しかしながら、しわ・座屈限界線は低軸押込み量側となりしわが生じやすく、目標コーナーR限界線も高内圧側で目標コーナーRが得にくく、結果として正方形金型の成形可能範囲は長方形金型と比べ狭くなった。

割れに関しては、長方形金型の場合（図12(a)）、成形開始直後から素管と金型上下面の接触面積が増大し、円周方向において不均一な変形となるため、正方形金型の場合と比べてコーナーR付近で局所的な歪みを生じ、割れやすくなったと思われる。

一方、正方形金型の場合（図12(b)）、成形初期にお

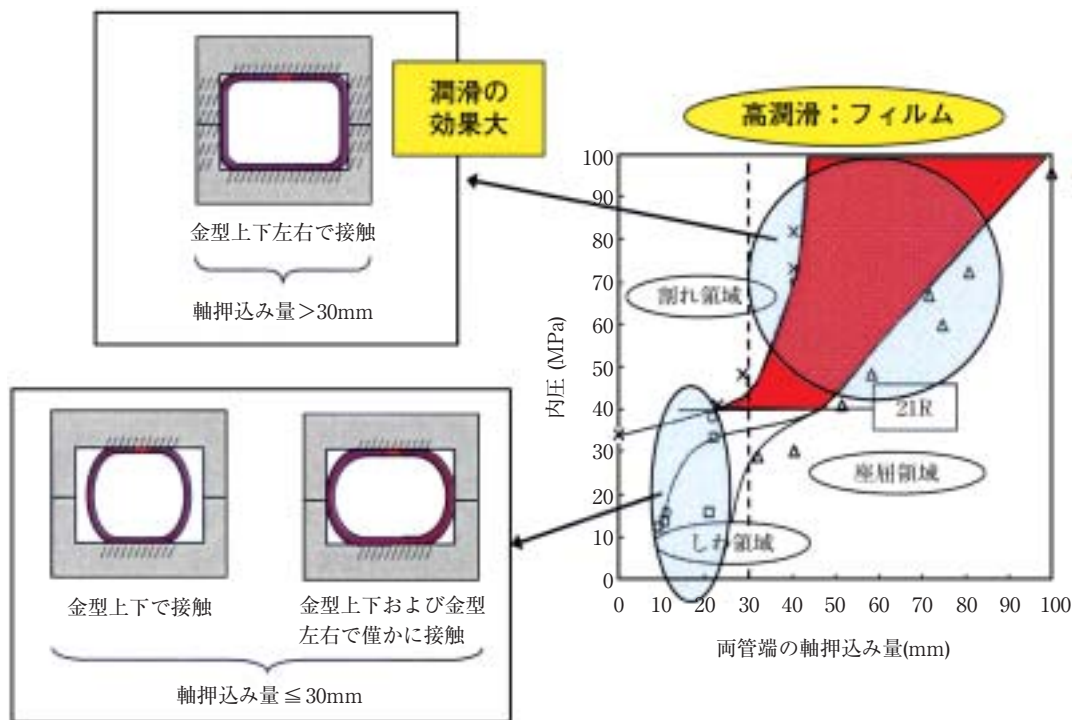


図10 両管端の軸押込み量30 前後における接触状態

Fig.10 Contact Condition before or after 30mm in axial feeding length from both pipe edges.

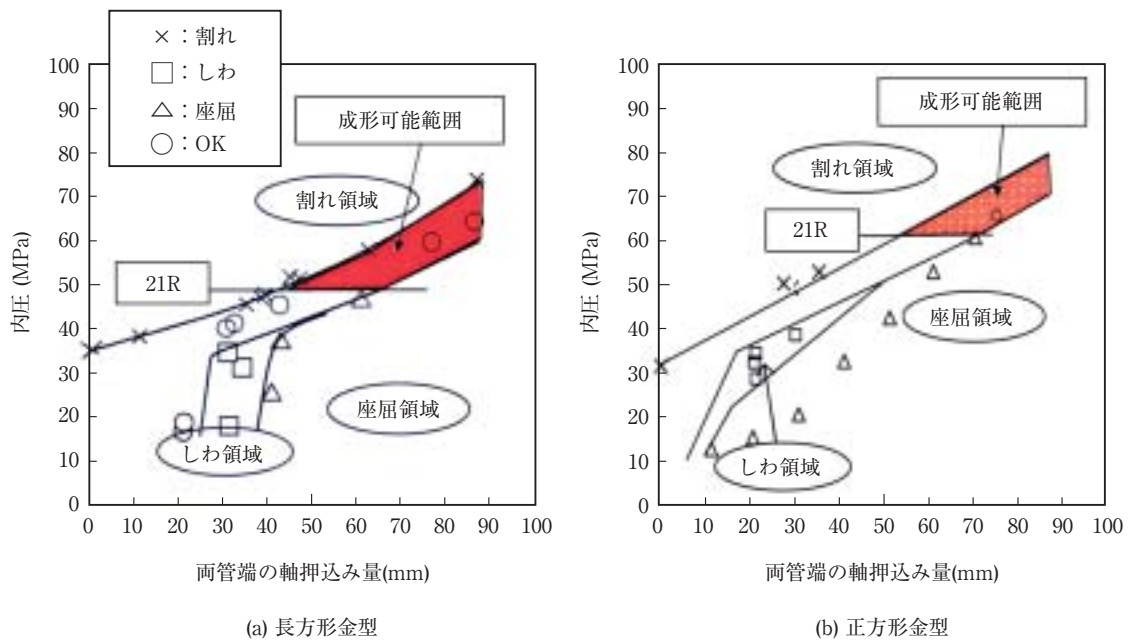


図11 各金型形状における成形可能範囲 (供試材: STAM440G)
Fig.11 Formable range in each die shape.

いては素管と金型が接触していない。そのため管が金型に接触するまでの間、管は円周方向に対しほぼ均一に歪みが生じるため、コーナーR部での局所的な肉厚減少が小さくなり、割れが発生しにくかったと考える。

しわ・座屈に関しては、長方形金型よりも正方形金型の方が発生しやすい。これは長方形金型と管は成形開始直後から金型上下面で接触しているのに対し、正方形金型と管は、成形開始から初期の間、接触していないため管長手方向への軸押込みに対して材料を拘束できないため、しわ・座屈が発生し易くなったと考える。

また、コーナーRに関しては正方形金型の方が長方形金型に比べ目標コーナーRが成形されにくい傾向にある。これは正方形金型と管が接触するまでの間、管が同心円状に拡管され、それに伴い管の外径が63.5mmから75mmに増大するため、管の半径は約31Rから約37Rに大きくなるのが原因の一つと挙げられる。

この時の正方形金型での管が金型に接するまでの負荷経路と同じ負荷経路にて、長方形金型を用いて管をハイドロフォーミングした結果、図12に示すような肉厚分布イメージとなった。最小肉厚は正方形金型が1.76mm、長方形金型が1.80mmであり、その差は0.04mmと非常に小さく、その後加工で肉厚の影響が明確になるようなレベルとは考えられなかった。

次に管の周長増加率を測定した結果、正方形金型は

理論どおりの18%に対し、長方形金型は21%となっており、しわや座屈を生じにくい長方形金型の方が軸押しによる材料流入が円滑な周長増加につながったと考える。

その後正方形金型では、加工の進行に伴い金型と管の接触面積が増大し、コーナーRが成形され始めしだいにコーナーRが小さくなるが、前述した管の半径がいったん約37Rまで大きくなることと周長増加が円滑に行かないことがコーナーRを小さく成形しにくい原因と考える。

よって成形可能範囲を広くするには、できるだけ成形の早い段階で管が金型に接触する条件が望ましいと推察する。

5.2 適正負荷経路の検討

実生産を考慮した場合、割れやしわ・座屈や目標コーナーR未達といった不具合の無い成形条件の把握が必要である。本項では成形不具合が発生しない適正負荷経路の検討を行なった。今回の評価条件は、供試材の強度を440MPa級、肉厚を2.0mmとし、プレス工作油と長方形金型を用いた。

図13に各負荷経路を示す。適正負荷経路を検討するため3種類の負荷経路を用いて成形試験を行った。3種類とも成形開始直後は内圧を優先させた負荷経路G=2で成形し、途中から軸押込みを優先させた負荷経路

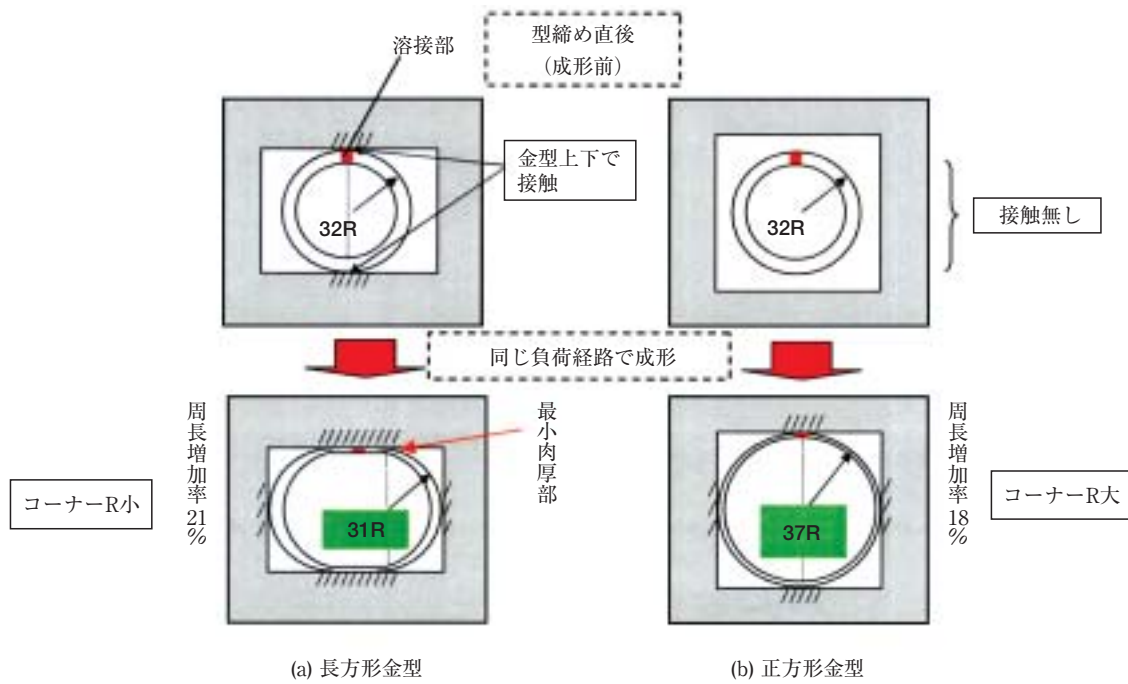


図12 各金型形状におけるコーナーRの状態
Fig.12 Condition of corner radius in each die shape.

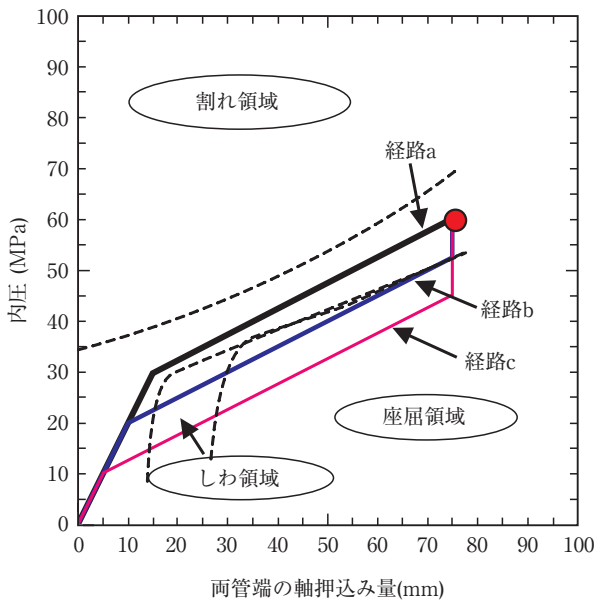


図13 各負荷経路
Fig.13 Each loading path.

G=0.5へ変化させて成形を行った。

経路aはしわ・座屈領域と割れ領域を通らない経路であり、軸押込み量15mm、内圧30MPaで負荷経路G=0.5に変化させた。経路b, cはしわ・座屈領域を通る経路であり、経路bは軸押込み量10mm、内圧20MPaで、経路cでは軸押込み量5mm、内圧10MPaで負荷経路G=0.5

に変化させた。いずれの負荷経路も成形可能範囲内にある軸押込み量75mm、内圧60MPaを終点とした。経路bは成形可能範囲に近いしわ・座屈領域を通過し、経路cは成形可能範囲から離れたしわ・座屈領域を通過させた。

図14に各負荷経路における成形品の形状を示す。し

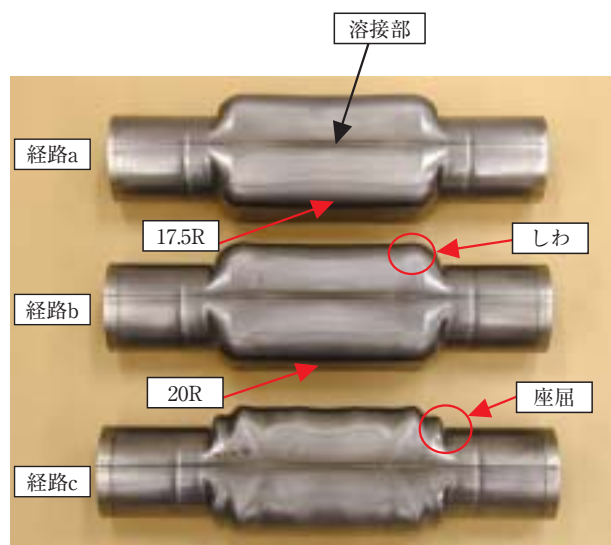


図14 各負荷経路における成形品の形状
Fig.14 Product shape formed in each loading path.

わ・座屈領域を通らない経路aは、しわや座屈もなくコーナーRが17.5Rと最も小さい値であった。一方、しわ座屈領域を通る負荷経路では、経路bでしわ、経路cで座屈を生じ、いずれも経路aに比べてコーナーRは小さくなりにくかった。なお、経路cは座屈を生じていたためコーナーRを測定できなかった。

経路bのようにしわ領域を通過する経路で成形を行なうと軸押込み量に対して内圧が低い状態で成形が進行する。そのためしわが生じ、最終的に内圧を60MPaまで昇圧しても、成形途中で生じたしわは除去できず周長も増加しにくいことからコーナーRは小さくならなかったと推測する。なおこのしわは、さらに昇圧すれば除去可能であったが、割れ領域に入る内圧が必要であり他の部位で割れが生じている。

図15に肉厚の測定位置を、図16に成形品の肉厚分布を示す。肉厚は、超音波板厚計を用いて非破壊で測定した。なお、経路cは座屈が発生したため肉厚測定ができないことから評価を省いた。

測定の結果、経路aは経路bに比べて割れ危険部である成形品中央のコーナーR部での肉厚減少が大きい。これは経路bが経路aよりも早期の段階で軸押込みを優先させた負荷経路G=0.5へ変化させたことにより、軸押込みによるコーナーR部への材料供給が大きくなり、コーナーR部の肉厚減少が抑制できたためと考える。

以上より成形可能範囲内かつ、しわ・座屈限界線に近い負荷経路を設定することで、コーナーRの成形性が比較的良好で肉厚減少の小さい成形が行なえると考える。

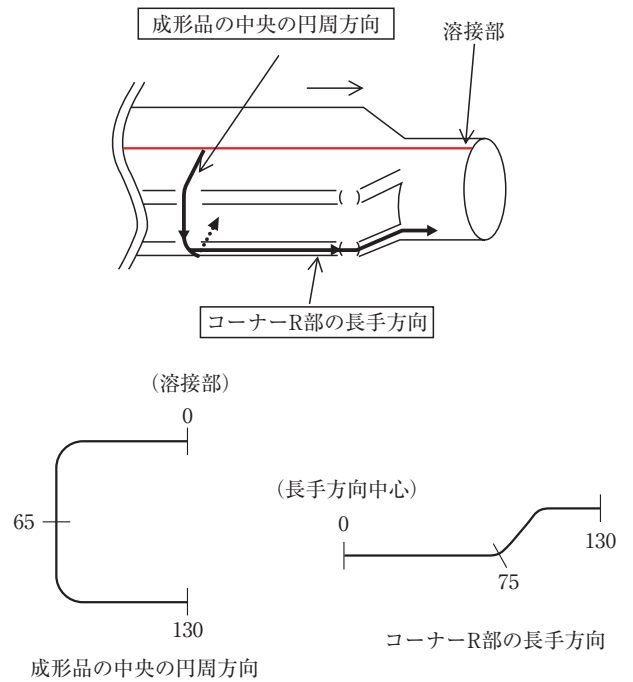


図15 肉厚の測定位置
Fig.15 Measurement position of thickness.

6. 結言

本報ではハイドロフォーミングの成形性を「成形可能範囲」により評価し、成形可能範囲に及ぼす各因子（材

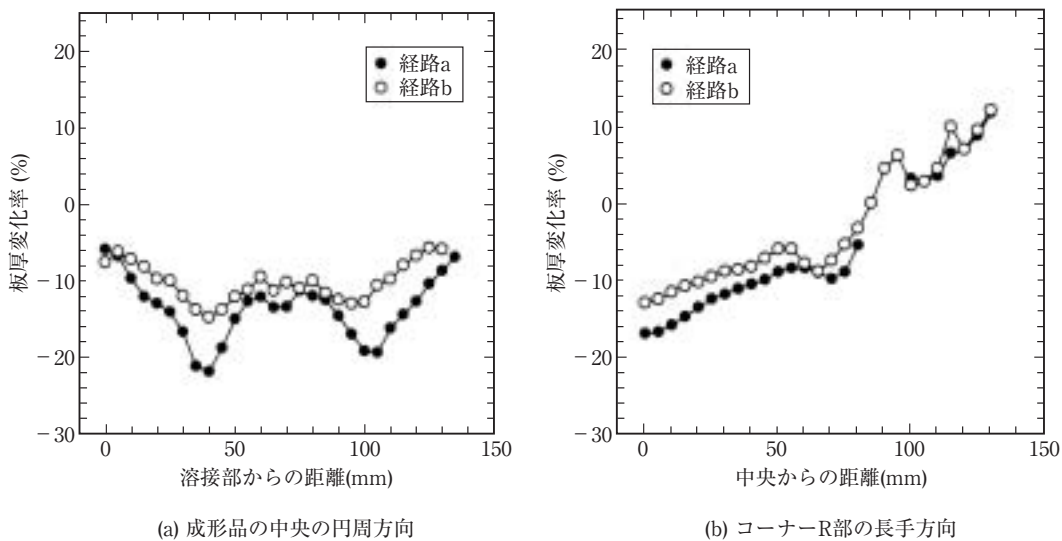


図16 成形品の肉厚分布
Fig.16 Thickness distribution of products.

料強度，肉厚，潤滑，金型形状) および適正負荷経路の影響について検討した。結果の概要は以下のとおりである。

(1) 材料強度の影響

材料強度が高いほど割れが発生しにくいですが，しわ・座屈が発生しやすく，コーナーRは成形しにくいいため，成形可能範囲は狭い傾向にある。

(2) 肉厚の影響

肉厚が薄いほど割れが発生しやすく，しわ・座屈も発生しやすいため，コーナーRは成形しやすくて，成形可能範囲は狭い傾向にある。

(3) 潤滑性の影響

潤滑性が良好なほど割れが発生しにくい。一方，潤滑性が良好なほどしわ・座屈が発生しやすいが，コーナーRは成形しやすいため，成形可能範囲は広い傾向にある。

(4) 金型形状の影響

成形初期に管と金型が接触していない正方形金型は，成形初期に管と金型が接触している長方形金型よりも割れが発生しにくいですが，しわ・座屈が発生しやすく，コーナーRも成形しにくいいため，金型の断面周長を一定とした今回の検討では，正方形金型は長方形金型よりも成形可能範囲は狭い傾向にある。

(5) 最適負荷経路の検討

成形可能範囲内かつ，しわ・座屈限界線に近い負荷経路を採用することで，コーナーRの成形性が比較的良好で肉厚減少を抑制した成形が可能と考える。

参考文献

- 1) 水村正昭, 栗山幸久: 塑性と加工, 44-508 (2003), 524.
- 2) 木村剛, 日高敏郎, 安友隆廣, 八島常明, 川崎卓巳, 川野征士郎, 荒木俊光: 第51回塑性加工連合講演会講演論文集, (2000), 617.
- 3) 水村正昭, 栗山幸久: 第52回塑性加工連合講演会講演論文集, (2001), 108.
- 4) 福村勝, 鈴木孝司, 上井清史, 豊田俊介, 丁強, 白鳥正樹: 第52回塑性加工連合講演会講演論文集, (2001), 109.
- 5) 浜田基彦: 日経メカニカル, 8 (1999), 32.
- 6) 白寄篤, 淵澤定克, 奈良崎道治, 上野誠三: 平成9年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1997), 310.
- 7) 薄鋼板成形技術研究会, 塑性と加工, 13-132 (1972), 53.