

# ポートホールダイスのメタルフロー制御による 中空押し出し材の接合強度の向上に関する研究

富山大学 地域共同研究センター

助教授 高辻則夫

(平成4年度研究開発助成 AF-92027)

## 1. 研究の背景

近年、自動車の燃費向上に問題に対して、最も直接的な効果がある車体軽量化が図られ、それに伴って、アルミニウム合金シリンダー製品等の需要は拡大傾向にあるが、その用途から中空部の寸法精度や強度などに対して大変厳しい数値が要求されている。アルミニウム合金シリンダー製品を製造する塑性加工法の一つであるポートホールダイ方式の熱間押し出し加工では、雄型のポート部で一旦分割された被加工材が、雌型のチャンバー内で再び圧着接合されるため、接合強度や寸法精度が製品の品質上大きな問題となる。ところが、このような問題に対しては、経験則に基づいて、ポートの孔数や配置などを考慮してフローの制御を行っているのが現状である。

本報告では、これまでに得られた結果<sup>1) 2)</sup>を踏まえて実際のシリンダーに近い肉厚差の大きい矩形中空押し出し材の接合強度と寸法精度に及ぼす雄型ポートの形状の影響について、ウェルディングチャンバー（以下、チャンバーと記す）内のメタルフロー挙動から検討を行った。また、そのメタルフロー制御の一助とすべくシミュレーションの有効性と適用についても検討した。

## 2. 実験及び解析方法

### 2.1 実験方法

本実験では、連続鋳造後に585℃×1.5時間の均質化処理を施した工業用6063合金をφ100×100mmに旋削仕上げした円柱ビレットを用いた。

図1は、本実験に使用したポートホールダイの雄型および雌型をポート孔Bで分割した断面形状

を示す。雄型は4孔のポートホールを有している。押し出し材の中空部を成形するマンドレル外径はφ16mmである。雄型と組み合わせて中空形材の外形状を成形する雌型は、チャンバー高さが20mmであり、ダイス半角は90°、ダイ出口の形状（製品外形）は20mm×40mmの矩形、ベアリング長さは2mmである。従って本実験の押し出し製品は、外形状20mm×40mm、内径φ16mmで、薄肉部は2mmで厚肉部は12mmの断面形状の矩形中空押し出し材材である。

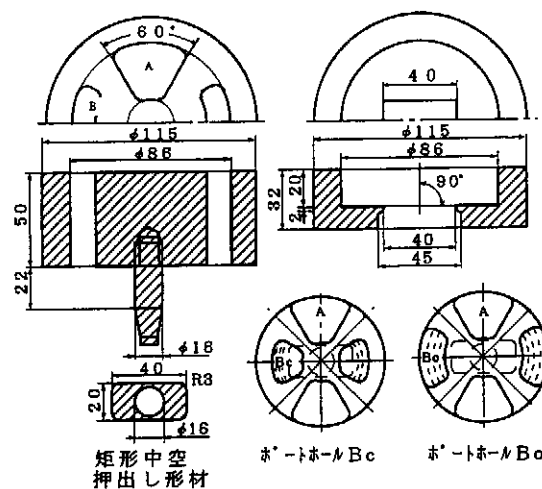


図1 ポートホールダイ形状

図2は、雄型のポート形状を示す。雄型はφ86mmの円に内接するように相対する2個の扇形状のポート孔Aと扇形状の一部の形状を変えたポート孔Bを有している。ポート孔Bにおいて、φ25mmの円に外接する中心側より開けたものをポート孔Bc、φ86mmの円に内接するように外周側より開けたものをポート孔Boと呼ぶ。また、ポートBc、Boにおいて、ポートAとの面積比でそれぞれのBc、Boポート形状を定義した。

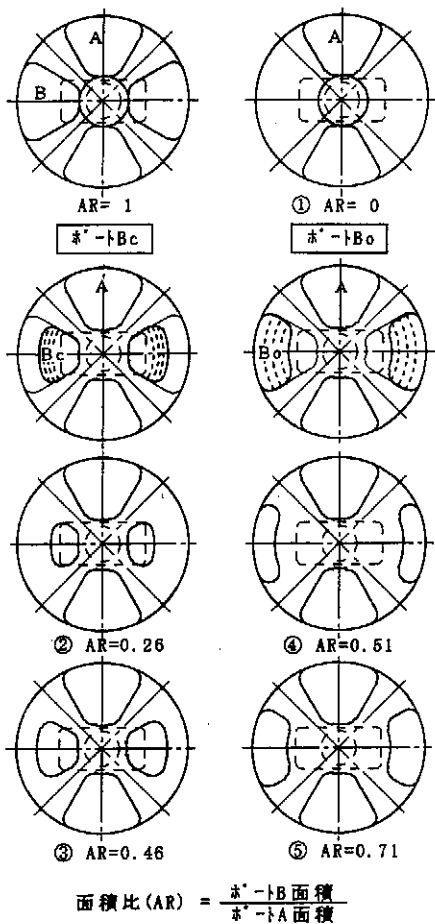


図2 ポートホールBc及びBo形状

矩形中空押し形材の接合性は、頂角60度の円錐工具を荷重30kNまで押し込み、拡張率 $\phi=1.2$ を目安に亀裂が生じるか否かで評価した。また、寸法精度は、真円度測定機で内径真円度を測定し、三次元測定機にて外周寸法を測定した。

なお、押しは400t縦形油圧プレスにて、押し温度480℃、ラム速度 $1.0\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、無潤滑状態で行った。

## 2.2 解析方法

解析モデルは、断熱境界を考慮し粘性を除く全ての物性値が一定の非ニュートン流体による定常流れとして計算し、解析領域の入口では温度753K、流速 $1.0\times 10^{-3}\text{m/s}$ 一定のメタルが常にコンテナ内へ供給され、十分に安定した状態を想定して解析する。

計算手法は有限要素法 (FEM) を採用しており複雑な形状を有する解析領域に適用しやすく、

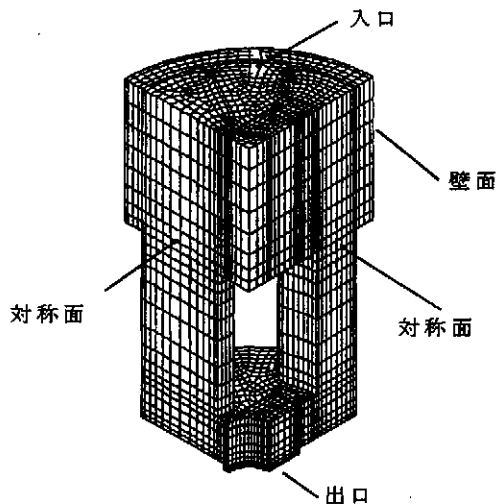
コンテナやダイスなども検討可能であるが、今回計算時間短縮のため流体領域 (ピレット) のみを計算対象とし、さらに形状対称性を考慮し1/4モデルとした。

図3にメッシュ図と解析条件を示す。メタルの物性データについては、粘性係数を除く質量・比熱・熱伝導率を一定値として設定しており、粘性係数については降伏応力や変形抵抗で置き換えた非ニュートン流体として定義している。

構成式は次式のとおりである。

$$\mu = 1/3 \cdot \sigma / \dot{\epsilon} \quad (1)$$

(1)式の変形抵抗 $\sigma$ は(2)式で定義し、



解析条件	入口	流速指定境界: $1.0\times 10^{-3}\text{m/s}$ 温度指定境界: 753K
	壁面	壁面滑り境界 熱伝達境界
	出口	自由流出
	流体	非ニュートン流体 $\mu = 1/3 \times \sigma / \dot{\epsilon}$ $\mu$ : 粘性係数 $\sigma$ : 変形抵抗 $\dot{\epsilon}$ : ひずみ速度
物性値	質量	$2.7\times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$
	比熱	$0.5\times 10^3 (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$
	熱伝導率	30 ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$

図3 FEM解析モデル

$$\sigma = \sigma_0 (\varepsilon / \varepsilon_0)^n \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \sigma_0 = \alpha_1 \ln(Z/Z_0) + \alpha_2$$

$$Z = \varepsilon \exp(\alpha_3/T)$$

$$n = \alpha_4 (1/T - 1/T_0) + \alpha_5$$

構成式中の係数 $\alpha_1 \sim \alpha_5$ は材料によって一意的に決定される。Tは温度である。

壁面におけるメタルとの滑りは接線流速関数として定義し、熱移動はコンテナ・雄型および雌型と空気の熱伝達を見積もった熱伝達係数として設定した。図4にフローチャートを示す。

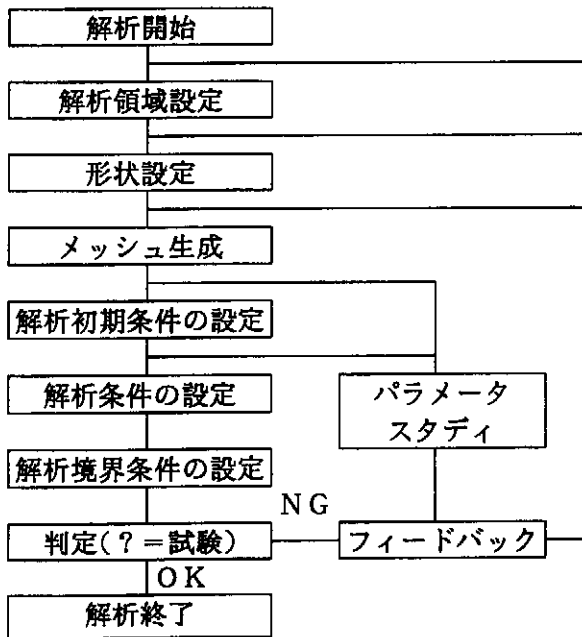


図4 FEM解析のフローチャート

### 3. 研究結果及び考察

#### 3.1 寸法精度に及ぼすポート形状の影響

本実験で得られた矩形中空押し形材を荷重30 kNで拡張試験を行った結果、いずれの中空押し形材においてもJISで規定されている拡張率 $\phi = 1.2$ 程度に押し広げても押し形材には亀裂が生じず良好な圧着接合性を示し、ポート形状の相違によって接合強度には差が認められなかった。

図5は、矩形中空押し形材において、ポート孔Bの面積を外周部より設定したポートBoと中心より設定したポートBcの、面積比に対する真円度の関係を示す。ポートBoにおける真円度は、ポートの面積比が0.5までは50 $\mu$ m程度とほぼ一定

であるが、0.5を越えると急激に悪くなり、面積比が0.7では350 $\mu$ m程度まで悪化する。また、ポートBcではポートBoに比べて、真円度の悪化傾向が面積比の小さな段階で生じ、面積比が0.25までは50 $\mu$ m程度とほぼ一定であるが、0.25を越えると急激に悪化する傾向にあり、面積比が0.4では300 $\mu$ m程度まで悪化する。

図6は、ポートBoの面積比に対する内径寸法E1,E2の関係を示す。面積比が0.5を越えると真円度が悪化する傾向は、内径寸法を見てみると、E1寸法が小さくなりE2寸法が広がり中空部が楕円形となることが原因である。

図7は、ポートBoの面積比に対する外形形状の関係について示す。外形の高さ寸法において、厚肉部であるD2寸法は面積比に関わらずほぼ一

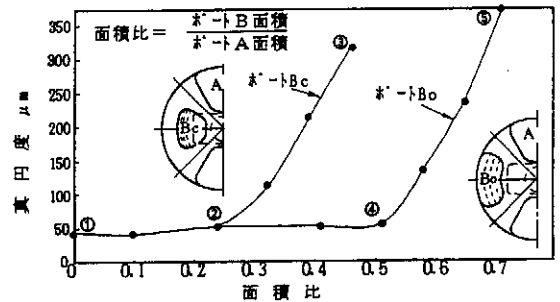


図5 真円度に及ぼすポート形状及び面積比の影響

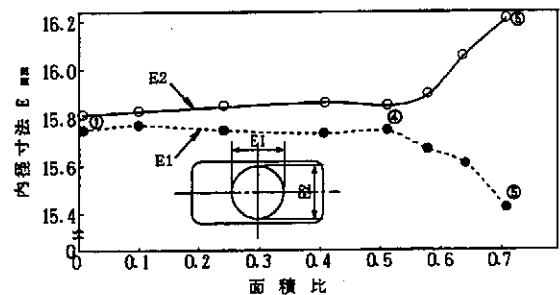


図6 内径寸法に及ぼす面積比の影響 (ポートBo)

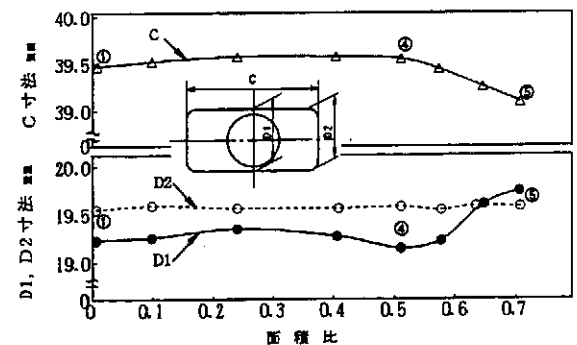


図7 外形寸法に及ぼす面積比の影響 (ポートBo)

定である。しかし、中空部をもつ D1 寸法においては、D2 に比べ 0.2mm 程度寸法が小さいが、面積比 0.5 を越えると中空部の内径寸法 E2 の影響を受け、D1 寸法は大きくなっていく。また幅寸法 C においても、中空部の内径寸法 E1 の影響を受け、面積比が 0.5 を越えると幅寸法が小さくなっていくことがわかる。この傾向は、ポート Bc においても同様である。

また、図 8 はポート孔 Bo において、ポート孔の面積を S、ダイ中心からポート孔の重心までの距離を L とし、真円度に対する S/L をプロットしたものである。図 9 はポート孔 Bc において、同じように真円度に対する S/L をプロットしたものである。これよりポート孔 Bo と Bc は、ほぼ同じ曲線となり近似されることがわかる。

### 3.2 型内におけるメタルフロー

ポートホルダダイスの型内でのメタルフローの挙動をシミュレーションした結果を図 10 に示す。

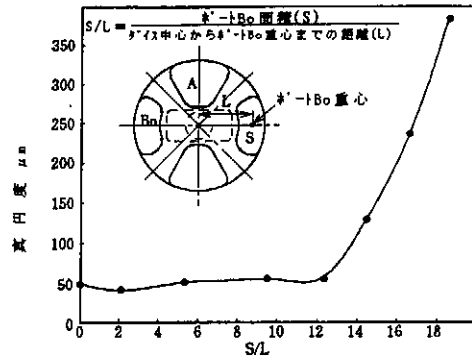


図 8 ポート Bo における真円度と S/L の関係

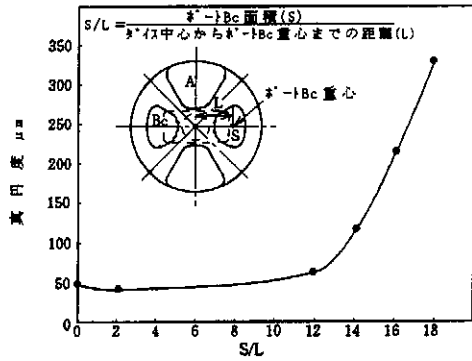


図 9 ポート Bc における真円度と S/L の関係

	Porthole shape	1st step	2nd step	3rd step
AR0.00				
AR0.51				
AR0.65				

図 10 FEM 解析によるメタルフロー

これは解析領域入口から供給されたメタルが、時間経過と共に型内部の何処の位置に到達しているかを、曲面で表したものである。これによりポートホール形状の違いによって、メタル進行状況に差が生じていることや、ポートホールA及びBから供給されたメタルがチャンバー内で接合しウェルドラインを形成する過程がわかる。また、各モデル毎に第3ステップ（最終充填付近）で比較してみると、ポートホールBからチャンバーへ供給されるメタル量によってウェルドライン位置に差が生じていることが確認できる。

次に、図10で示したメタルフローについてさらに詳しく評価するため、チャンバー部を横断面で切断しマクロエッチングした押し出し実験の結果と比較する。図11は面積比0.00のポート（2孔）においてチャンバー底面から1mm, 4mm, 7mm, 10mmの横断面でのメタルフローを、図12は面積比0.51及び0.65のポート（4孔）におけるチャンバー底面から4mmの横断面のメタルフローを比較したものである。解析結果において、ウェルドラインは流体の到達時間を等高線で表した時間コンタ図で評価しており、ポートホールAとBから広がるループが合流する地点をウェルドライン位置と予測することができる。また、メタルフローについては流速ベクトル図で表しており、流速ベクトル値で塑性流動およびデッドメタル領域を推測することができる。これよりウェルドライン位置の違いや塑性流動領域やデッドメタル領域のバランスの違いについて押し出し実験結果と類似していることが確認できる。

さらに、図13に示す押し出し型材断面でのウェルドラインについても、解析は流体の到達時間を等高線で表した時間コンタ図で評価しており、ポートホールAとBから広がるループが合流する地点をウェルドライン位置と予測することにより、解析において、押し出し実験結果と類似した結果となる確認できた。

図14は、面積比0.00のA及びBの縦断面におけるメタルフローを比較したものである。解析結果

は流速ベクトル図で評価しており、各ポートホールからチャンバー内へメタルが流れ込む様子や壁面付近および隅部にデッドメタル領域が生じる傾向は実験結果と良く類似している。また、最大流速ベクトルについては、面積比0.00では図14で示

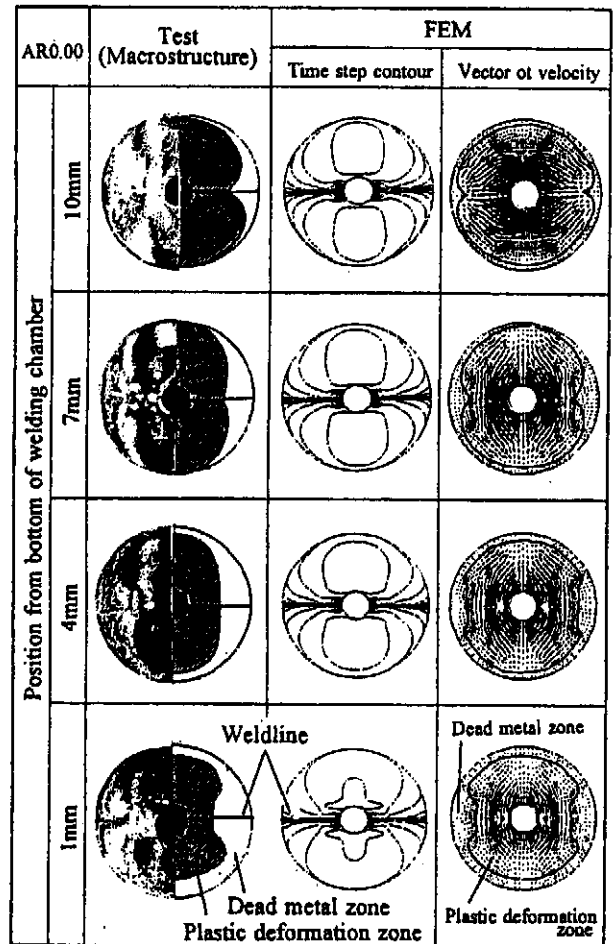


図11 押し出し横断面でのメタルフロー(面積比0.00)

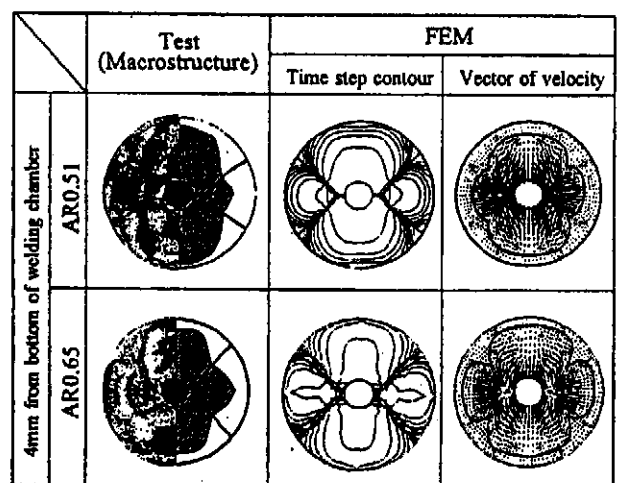


図12 押し出し横断面でのメタルフロー(面積比0.51及び0.65)

すように $21.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ となっており、すべて出口厚肉部中央付近に位置している。また、解析結果における出口平均流速は $12.9 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ で、2次押し出し比（コンテナ内径面積に対する押し出し形材断面面積の比率）が13.1、ラム速度 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ の押し出し実験から換算した実験での押し出し速度とほぼ一致した押し出し速度といえる。

#### 4. 結 言

ポートホールダイで成形した実用的にシリンダーに近い形状である矩形中空押し出し形材の寸法精度と真円度に及ぼす雄型ポート形状の影響について、メタルフローとの対応を図りながら、シミュレーションの有効性の検討を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 矩形中空押し出し形材での接合強度は、雄型ポート形状をポート孔 Bo 及びポート孔 Bc にて調査を行った結果、良好な接合強度を示した。

(2) ポートホールダイによる矩形中空押し出し形材の真円度は雄型ポート形状の影響が大きく、特にポート B が中央部に位置しているポート Bc の場合の影響が大きく、オープニング厚肉部に配置されたポート A に対する面積比が、0.25 より小さくなると真円度が改善される。

(3) 寸法精度とメタルフローの対応において、ポート B からのメタルフローが多くなり、チャンバ底部の塑性変形領域がオープニング厚肉部に形成されると、厚肉部へのメタル供給が多くなり、厚肉部を押しつぶすような流れとなり、真円度・寸法精度は著しく悪くなる。

(4) 今回無限に続くアルミ押し出しを想定して流体解析コードによる定常計算の適用を検討したところ、矩形中空形状において型内のメタルフローについては、押し出し実験とほぼ同様の傾向となり、塑性変形領域とデッドメタル領域の予測ができるようになった。また、流体のチャンバ内への到達時間を等高線で表した時間コンタ図により、ウェルドライン位置の予測ができるようになった。

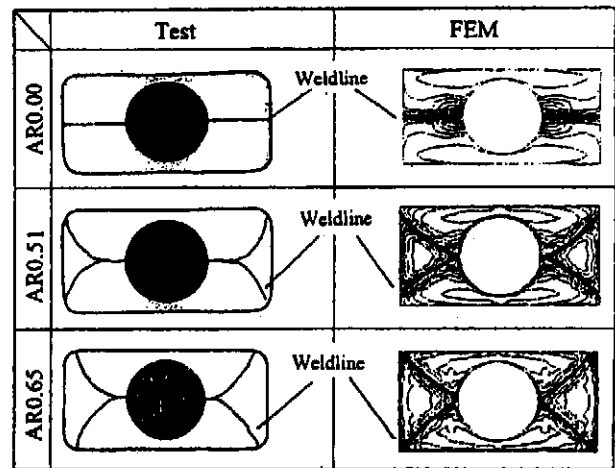


図13 押し出し断面内のウェルドライン

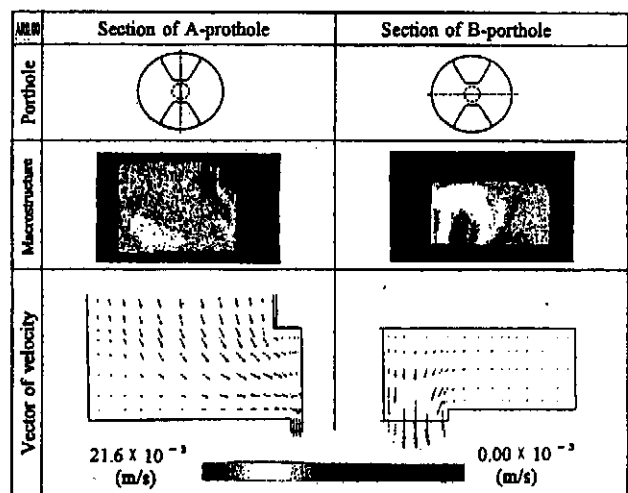


図14 押し出し縦断面でのメタルフロー(面積比0.00)

#### 5. 発表論文

- 1) 高辻則夫・時澤 貢・村上 哲・室谷和雄・松木賢司・湯浅和宏：塑性と加工，36-414 (1995)，731.
- 2) 村上 哲・高辻則夫・時澤 貢・室谷和雄・松木賢司・橋本清春：塑性と加工，37-423 (1996)，403.
- 3) 村上 哲・高辻則夫・時澤 貢・松木賢司・磯貝光之・永尾誠一：塑性と加工，37-428 (1996)，939.
- 2) 村上 哲・磯貝光之・稲垣稔之・高辻則夫・時澤 貢・室谷和雄：塑性と加工，38-436 (1997)，掲載予定.