



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	塑性成形中の金属素材流動シミュレーション（円柱すえ込み加工時の塑性流動解析）
Author(s)	但野, 茂; Tadano, Shigeru; 石川, 博將 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 137, 57-64
Issue Date	1987-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42052">https://hdl.handle.net/2115/42052</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	137_57-64.pdf



## 塑性成形中の金属素材流動シミュレーション (円柱すえ込み加工時の塑性流動解析)

但野 茂 石川 博將

(昭和62年6月30日受理)

### Numerical Simulation for Upset Forging of Cylinders

Shigeru TADANO and Hiromasa ISHIKAWA

(Received June 30, 1987)

#### Abstract

The authors have investigated a simple method of numerical simulation by a personal computer in order to analyse how materials show their deformation behavior during plastic working; extruding, rolling, forging, etc. . . A simplified rigid-plastic finite element method employing the penalty method was reported previously.

In this paper, numerical simulation using this method for the upset forging of pure aluminium cylinders between perfectly rough and rigid parallel platens is presented. The model for calculation is concerned with the Levy-Mises material considering strain-hardening, and has the initial height-to-diameter ratio of 0.5 to 1.5. In the finite element method, it is difficult to deal with deformation near a singular point, where the velocity boundary condition changes sharply. However, this deformation could be represented well by a new element with 4 nodal points.

As a result, the numerical analysis agrees well with the experimental results of bulging and folding behavior up to 50 % reductions in height.

#### 1. 緒 言

著者らは、押し出し、引き抜き、圧延、鍛造等の塑性加工時に、被加工材がどのような塑性流動するかを解析するために、パーソナルコンピュータによる簡易数値シミュレーション手法を検討している。前報<sup>2)</sup>では、秦ら<sup>1)</sup>が提示したペナルティ法による剛塑性有限要素法を改良し、パーソナルコンピュータでも十分対応できるような簡略化した剛塑性有限要素法を示した。本論文では、円柱すえ込み加工時における被加工材の塑性流動を、同法を用いて数値シミュレーションを行った。円柱のすえ込み加工の解析は、単なる圧縮加工の解析としてだけではなく、自由表面の変形を含んだ鍛造加工に対する数値解析手法の有用性を判断するための基本的な例として、重要な意味を持つ<sup>3)</sup>。これまで多くの解析例が報告されているが、主に上界法<sup>8-10)</sup>、大変形弾塑性有限要素法<sup>11)</sup>あるいは剛塑性有限要素法<sup>4-7)</sup>によっている。しかしながら、いずれの手法でも端面完全拘束圧縮変形時のフォールディングやバルジング挙動を的確にシミュレーションした例は、多くはない。さらに、上界法による解析では、初期速度場や境界条件を設定するのに特別のテクニックが必要だし、大変形弾塑性有限要素法を用いると、計算容量が大きくなりすぎパーソナルコン

機械工学第二学科，塑性加工学講座

コンピュータではとても処理しきれず、本研究で目指している簡易数値シミュレーションには適さない。なお文献4)～7)は、剛塑性有限要素法によるものであるが、それぞれラグランジェ未定乗数法<sup>4)</sup>、圧縮特性法<sup>6)</sup>ペナルティ反復法<sup>5)</sup>といった本論文とは違った解析手法である。

本論文では、被加工材として純アルミニウムを選択し、ペナルティ法による剛塑性有限要素法を用いて、アルミニウム円柱すえ込み加工時におけるバルジングならびにフォールディングの変形数値シミュレーションを行った。すえ込み加工のような圧縮変形の解析には、ダイスと接触する円柱の角部で、圧縮変形中に素材の流れ方向が急変する特異点の処理が問題となる。すなわち、実際の圧縮変形では側面の倒れ込み（フォールディング）が徐々に進行するのに対し、有限要素法では角部要素の側面が90°回転したときに初めてフォールディングが生じることになる。また、そこに三角形要素を用いると、角部の要素は、体積一定を保ちながら変形するため、フォールディングが再現できないこともある。そこで、著者らは角部の三角形要素の自由表面上にフォールディングに寄与する節点を置き、その要素だけを四節点要素とすることで、フォールディングの処理をした。さらに、高さ比（高さ/直径）を変えたアルミニウム円柱の圧縮試験を行い、数値シミュレーションの結果と比較検討した。なお、本論文の実験および数値解析における端面の条件は完全拘束とした。これにより、端面の変形が摩擦に影響されず、より厳しい変形条件となるため、解析結果と実験結果の比較が明確になった。

## 2. 端面拘束圧縮実験

本実験で使用した被加工材は工業用純アルミニウム A1050 (A1 99.5%以上) である。試験片形状は直径(D)を 50 mm とし、それを基準にして、高さ比（高さ/直径）が1.5, 1.25, 1.0, 0.75, 0.5, 0.3の計6種類になるように高さ(H)を変えた。端面拘束圧縮試験は、森ら<sup>6)</sup>による圧縮治具を参考に、図1に示す同心円状にみぞの付いたダイスを用いた。このダイスにより、圧縮負荷中試験片端面とダイス間の相対すべりはほとんど生じておらず、試験片端面の径の増加量がフォー

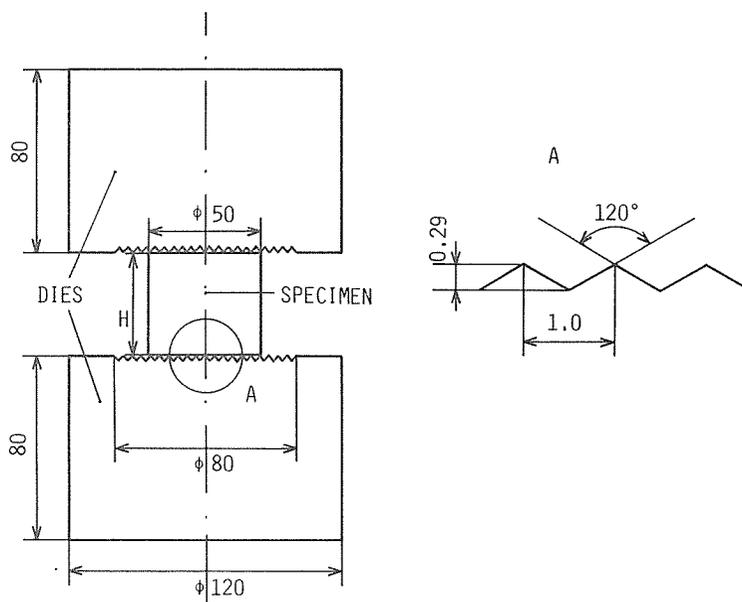


図1 端面拘束圧縮試験用治具

ルディング量として検出できた。

図2は、実験によって得たフォールディング量の各高さ比 (H/D) と圧縮率の関係を示す。初期高さの40%まで圧縮試験を行い、5%ごとにフォールディング量を測定した。その結果、同じ比率まで圧縮しても、高さ比が小さい試験片ほど、フォールディング量は大きくなった。また、圧縮率が5%程度の変形初期段階でもフォールディングがすでに生じた。

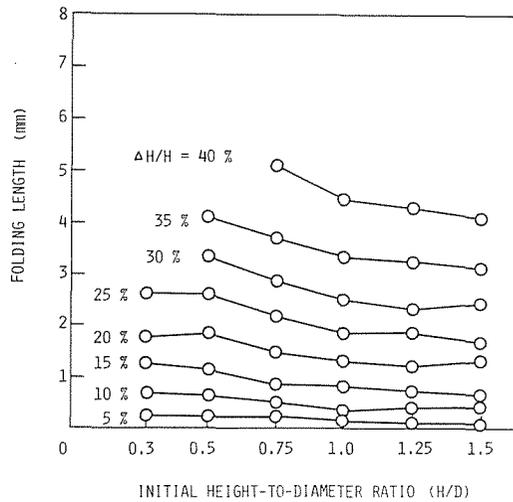


図2 純A1の高さ比とフォールディング量の関係 (実験)

### 3. 数値シミュレーション手法

#### 3.1 ペナルティ法による剛塑性有限要素法

アルミニウム円柱の圧縮挙動の数値シミュレーションに、ペナルティ法による剛塑性有限要素法<sup>1),2)</sup>を用いる。この場合、被加工材は剛塑性体と仮定する。本解析では端面の境界条件は完全拘束としたので、全体のエネルギー消散率は、塑性変形エネルギー消散率のみとなる。

すなわち、次式(1)の塑性変形エネルギー消散率評価関数  $\Phi$  を最小化すれば、非圧縮性の条件を満足しつつ、加工荷重の上界値が求まる<sup>1)</sup>。

$$\Phi = \sum_i^N \bar{\sigma} (\dot{\epsilon} + \lambda \dot{\epsilon}_v^2) V_i \dots\dots\dots (1)$$

N; 全要素数  $V_i$ ; 要素番号 i の体積  $\bar{\sigma}$ ; 相当応力  
 $\dot{\epsilon}$ ; 相当塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_v$ ; 体積ひずみ速度  $\lambda$ ; ペナルティ係数

式(1)には1ステップ変形間の加工硬化が考慮されていない。しかし、1ステップの変形量を大きく採れる剛塑性有限要素法に加工硬化を組み込むことにより、より正解に近いエネルギー消散率が求まる期待ができる。そこで、相当塑性ひずみが  $\bar{\epsilon}^*$  から1ステップ変形時間 t 後に  $\bar{\epsilon}^* + \Delta t \dot{\epsilon}$  となったときの相当応力  $\bar{\sigma}$  は、加工硬化係数  $H = (\partial \bar{\sigma}^* / \partial \bar{\epsilon}^*)$  を用いて表示すれば、式(2)となる<sup>2)</sup>。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^* + m H \Delta t \dot{\epsilon} \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $\bar{\sigma}^*$  は前段階の  $\bar{\sigma}$ 、m は加工硬化補正係数であり、 $0 \leq m \leq 1$  の値をとる<sup>2)</sup>。式(1)、(2)から、結局塑性変形エネルギー消散率評価関数  $\Phi$  は、式(3)で表せる<sup>2)</sup>。

$$\Phi = \sum_i^N (\bar{\sigma}^* + \frac{1}{2} m H \Delta t \dot{\epsilon}) (\dot{\epsilon} + \lambda \dot{\epsilon}_v^2) V_i \dots\dots\dots (3)$$

本解析では、式(3)を最小化して、最適な動的可容速度場を求めた。なお、m の値は前報<sup>2)</sup>と同様  $\frac{1}{2}$  とした。

ペナルティ係数  $\lambda$  の値は、従来のペナルティ法では大きな正の値とされていたが<sup>1)</sup>、加工荷重、体積変化、および式(4)で定義されるエネルギー消散率誤差項  $\Phi_{er}$  に大きな影響を及ぼす<sup>2)</sup>。

$$\Phi_{er} = \sum_i^N (\bar{\sigma}^* + \frac{1}{2} m H \Delta t \dot{\epsilon}) \lambda \dot{\epsilon}_v^2 V_i \dots\dots\dots (4)$$

そこで、あらかじめ  $\lambda$  の最適値を決定するために、アルミニウム丸棒 (径 20 mm) の軸対称  $\frac{1}{4}$  断面を、216個の三節点三角形要素に分割して、引張り変形の解析を行った。図3に、 $\lambda$  の値を1か

ら $10^4$ までとったときの10%引張り変形時の加工荷重 $P$ (KN),体積変化 $\Delta V/V_0$ (%), $\Phi_{er}/\Phi$ (%)の値をそれぞれ図中の記号で示す。このとき解析に用いた応力-ひずみ関係は,圧縮試験で用いた材料と同一純アルミニウムの引張試験により得た,式(5)である。

$$\bar{\sigma} = 121(\bar{\epsilon} + 0.002)^{0.0452} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(5)$$

図3により, $\lambda$ が $10^3$ 以上のときは,非圧縮性の条件をほぼ満足するが, $\lambda$ の増加につれて, $\Phi_{er}/\Phi$ も増大するため,誤差を含んだ塑性変形エネルギー消散率は,図中実線の応力-ひずみ関係式から直接求めた正解の加工荷重 $P$ (=31.0 KN)より高くなる。 $\Phi_{er}/\Phi$ は $\lambda$ が200~500の範囲で極小値約1%となり,そのときの $P$ は,実線の加工荷重にほぼ等しい。その範囲から,体積変化がなるべく小さくなるように $\lambda$ を選ぶと, $\lambda=500$ となった。 $\lambda=500$ の場合,10%変形時に,約0.2%の体積変化を認めることになるが,この程度の値だと非圧縮性の条件を満足していると思わせる。なお,この $\lambda$ の値は,前報<sup>2)</sup>の結果と比較すると,解析に用いた応力-ひずみ関係および要素数が異なるにも関わらず同一となったことは興味深い。さらに,各ステップで収束するまでに要する繰り返し計算回数もまた $\lambda=500$ 近傍で極小となり,計算効率も良いことを確かめた。

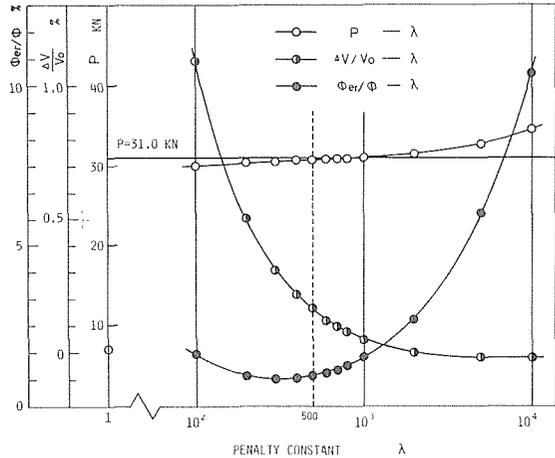


図3 ペナルティ係数 $\lambda$ の各特性値に及ぼす効果

3.2 フォールディングの処理

本解析は,剛塑性有限要素法をパーソナルコンピュータで行うため,数値処理をより簡略化す

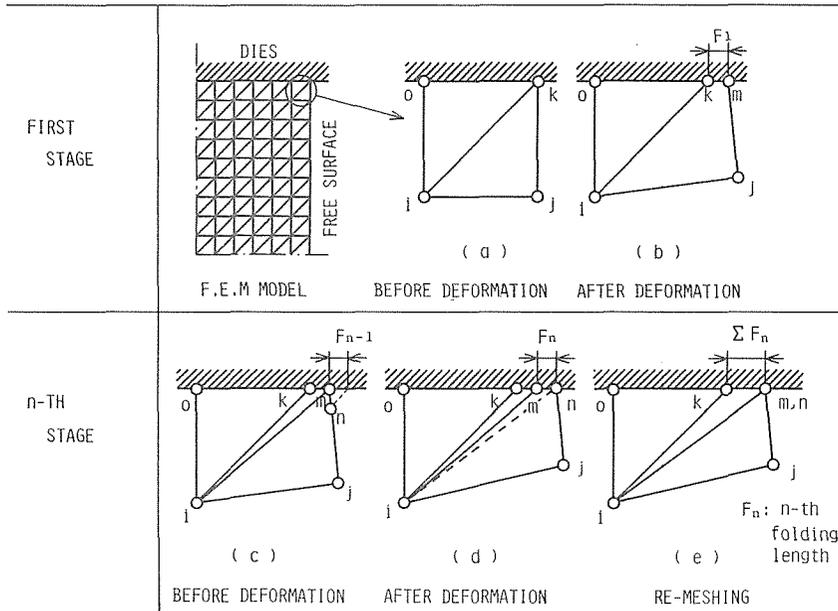


図4 特異点のある要素の処理

必要がある。そのため要素形状は最も単純な三節点三角形を用いた。ところが、端面拘束した圧縮変形の解析に三節点三角形要素を用いたならば、角部のすぐ下の自由表面上の節点がダイスと接するまで、フォールディングは生じないことになる。図2の実験結果からも明らかのように、実際には変形の初期段階から、すでにフォールディングが生じており、これを表すことは困難である。そのため本解析においては、変形の各段階でフォールディングが順次起こるように、角部三角形要素の自由表面上にフォールディングに寄与する節点を置く独自の手法をとった。

図4によりフォールディングの処理の方法を説明する。自由表面上端部要素の1ステップ目における変形を計算する際には、まず、図4(a)のような通常の三角形要素ijkとしてエネルギー消散率を最小化させる。この節点kはダイスと固着した点である。次に、一度エネルギー消散率が最小化した三角形要素ijkにもう一つの節点mを組み入れ、四角形要素として、エネルギー消散率を再度計算する。そのとき、節点mは、節点k上に位置し、ダイス面上を動けるが、初期速度は持たない点である。もしこの四角形要素のエネルギー消散率が最小となっても、節点mが節点k上から移動しなければ、フォールディングは生じないことになる。しかし実際の計算では、図4(b)のように、節点mは1ステップ目から節点kの外側に移動したとき、初めの三角形要素のエネルギー消散率ijkよりも四角形要素ijmkのエネルギー消散率の方が小さくなった。この節点mと節点kの距離 $F_1$ がフォールディング量となる。

2ステップ目以後の計算では、より実際のフォールディング現象に近づけるため、角部三角形要素の自由表面節線上に、節点をおくことにする。つまり、この要素の初期形状は三角形であるが、四節点を持つ。そのため、1ステップ目で四角形となった要素を、図4(c)で示すように、二つの三角形要素imkとijmに分割する必要がある。そして要素ijmの自由表面上に節点nをおく。節点nの位置は、節線jm上にあり、その半径方向、軸方向の座標( $R_n, Z_n$ )は、前ステップのフォールディング増分量 $F_{i-1}$ から、次式(6)で得られるとする。

$$R_n = \frac{R_j(i-1) - R_i(i-1)}{Z_m(i-1) - Z_i(i-1)} F_{i-1} + R_m(i-1) \dots\dots\dots(6)$$

$$Z_n = Z_m(i-1) - F_{i-1}$$

$R_f(i), Z_f(i)$  ; iステップ目の節点f(f=i, j, m)の半径方向, 軸方向座標

節点nの初期速度は、現ステップで、節点nがダイス端面に丁度接触する量とした。そして、エネルギー消散率を計算するが、最小化後、角部三角形要素ijmは、図4(d)のijnmの四角形要素となる。2ステップ目以後の計算終了後、次のステップではまた角部の要素は、三角形形状の四節点要素で計算を始めなければならない。そのため、1ステップ目の場合と同様に、四角形要素ijnmを、二つの三角形要素に分割する。そのうち、要素imnは、前段階までに生成した三角形要素ikmに組み入れる(図4(e))。その後のステップでは、図4(c)~(e)の手順を繰り返すが、要素ijmの節点jがダイスに接してしまうと、次の角部に来る三角形要素について同様な処理を行う。

### 4. 解析結果

試験片形状のうち、例として高さ比が1.5, 1.0, 0.5について数値シミュレーションを行った。それぞれの高さ比の試験片に対して、円柱の軸対称1/4断面を108個の三角形リング要素に分割した。また、解析の1ステップは、単位時間当たり1%の圧縮量とした。本解析に用いた応力-ひずみ関係は、圧縮の実験で使用したものと同一の材料による丸棒の単軸引張試験によって得た式(5)である。

図5に、計算によると塑性変形エネルギーから算出した加工荷重と実験によって測定した加工荷

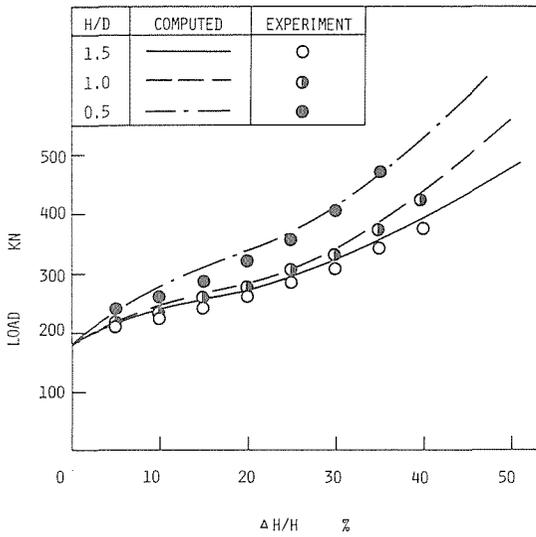


図5 加工荷重と圧縮率の関係

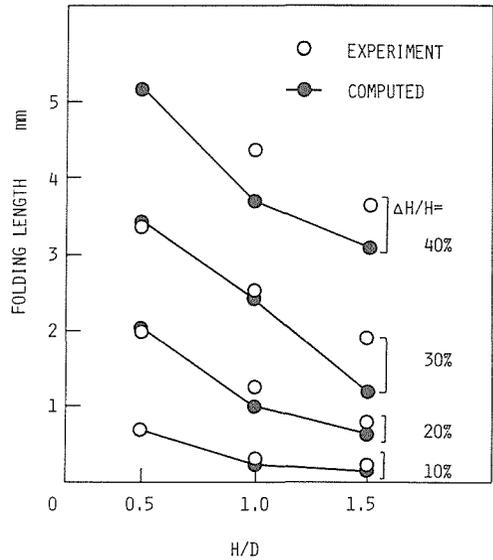


図6 高さ比とフォールディング量の関係

重とを示す。図中の○, ◐, ●印は高さ比1.5, 1.0, 0.5のときの加工荷重の実験値である。それぞれの実験値は、計算による加工荷重を示す実験、破線および一点鎖線とよく一致している。したがって、計算された塑性変形エネルギーは適切であることがわかる。

フォールディング量と高さ比の関係のシミュレーション結果が、図6である。各高さ比に対する実験と計算によって得たフォールディング量を10%圧縮ごと図示した。同じ圧縮率でも高さ比が小さい試験片程フォールディング量が大きくなる実験結果を、計算でもよく再現している。

図7は圧縮が進むにつれてフォールディング量が増加する様子を数値シミュレーションしたものである。図中の○, ◐, ●印は、それぞれ高さ比が、1.5, 1.0, 0.5のときの実験から得たフォールディング量である。計算はほぼ実験結果と一致しており、高さ比が小さいほどよく一致している。

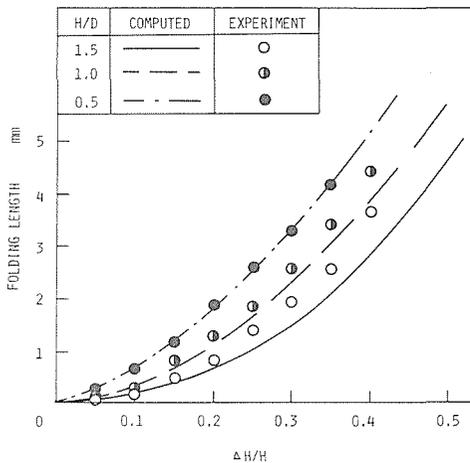


図7 フォールディング量と圧縮率の関係

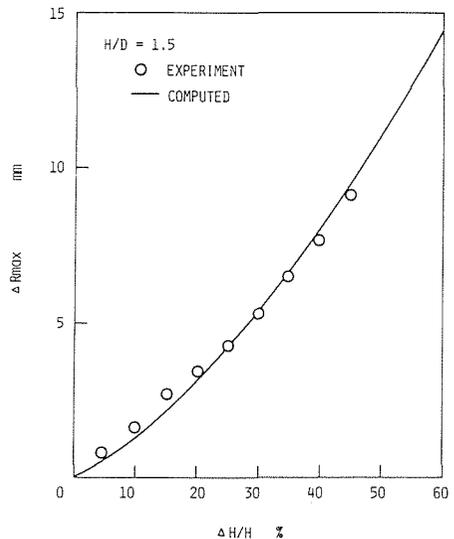


図8 中央部半径と圧縮率の関係

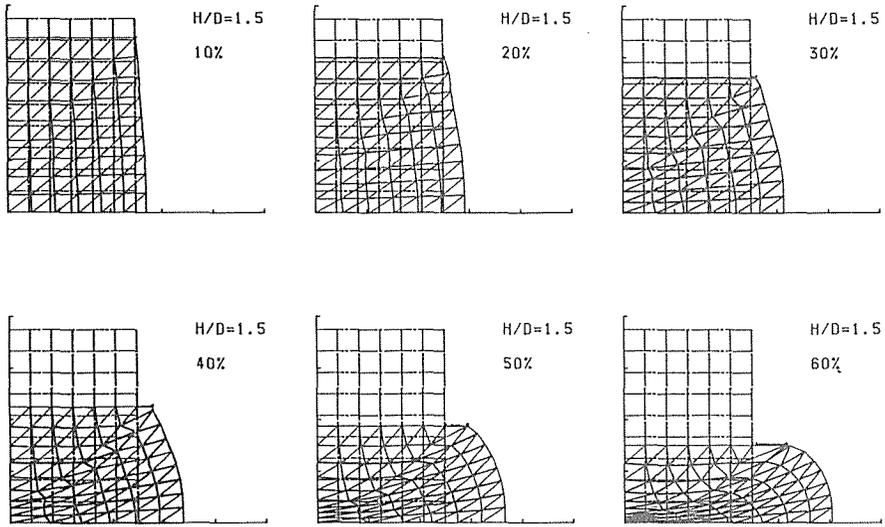


図9 内部要素の変形過程

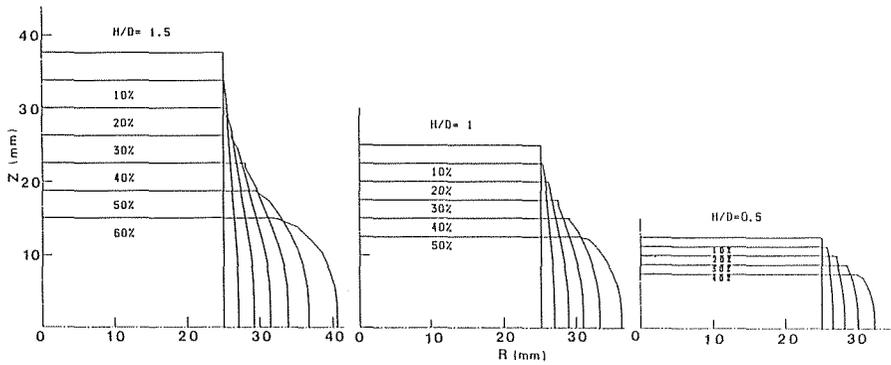


図10 フォールディングおよびバルジ変形挙動

図8にバルジ変形挙動の一例として、高さ比1.5の場合における試験片中央部の最大半径増加量  $\Delta R_{max}$  と圧縮率の関係を示す。図中実線は計算結果を、○印は実験結果を示す。同図から明らかなように、バルジ変形についても計算結果は実験結果を良くシミュレーションしていることがわかる。

図9から高さ比1.5の場合の円柱内部要素の塑性流動の様子がわかる。試験片とダイスの接触面で完全拘束の状態にあると、圧縮が進むにつれて接触面に近い部分の材料は横方向への移動を妨げられ、円柱の自由表面は太鼓状にふくらんでいる。また、端面が拘束されていることによって変形を阻止されている部分 (Dead Metal Zone)、大きなひずみを受ける主変形領域、およびひずみはあまり大きくないがほぼ一様に変形している部分と三つの領域が認められる。

図10に各高さ比における円柱自由表面の挙動、すなわちフォールディングおよびバルジ変形挙動を示す。図より、圧縮変形が進むにつれて、フォールディング量が増え、バルジ変形が大きくなる様子が良くわかる。また、高さ比が大きいくほど、同一圧縮率に対しても、自由表面が樽型に

変形する割合が大きくなっている。これらから、本手法により、アルミニウム円柱のすえ込み加工時の変形挙動が、よくシミュレーションできていることがわかる。なお、森ら<sup>7)</sup>も円柱の端部特異点の処理に本解析とは違った方法で、四角形要素を用いた報告があるが、彼らの結果と比べても、本手法は自由表面の変形形状がなめらかであり、計算されたフォールディング量の増加の様子もスムーズであった。

最後に、圧縮試験治具と試験片の製作に御協力いただいた本学部技官平賀正秋氏および実験と解析に御協力いただいた本学大学院生菊地正武君（現在（株）東芝勤務）に深謝する。

## 5. 結 言

本報告ではペナルティ法による剛塑性有限要素法を用い、端面が拘束されたアルミニウム円柱ブロックのすえ込み加工時における塑性流動を数値シミュレーションした。その結果、試験片端面の角部にある特異点を独自の四節点要素で処理することによりフォールディング現象を的確にシミュレーションできた。また本手法によると、比較的少ない要素分割でも変形状態を十分に再現することができたので、より複雑な鍛造加工時の塑性流動に関しても、パーソナルコンピュータによる解析が十分可能であると思われる。

なお、解析に使用したパーソナルコンピュータは PC98-XA (NEC) であり、それに数値プロセッサを搭載し、BASIC コンパイラを用いて、計算処理した。また、本研究は昭和61年度文部省科学研究費、奨励研究(A) (課題番号61750094) によった。

## 参 考 文 献

- 1) 秦謹一, 石川博将, 山本一英: 塑性と加工, 15(1974), 167, p. 1003
- 2) 但野茂, 石川博将: 北大工学部研究報告, (1986), 133, p. 15
- 3) Kudo, H., Matsubara, S.: IUTAM Symposium on Metal on Metal Forming Plasticity Tutzing, (1978), p. 378
- 4) 小林史郎, Lee, C. H., Shah, S. N.: 塑性と加工, 14(1973), 153, p. 770
- 5) 相澤龍彦, 木原諒二: 第37回塑性加工連合講論文集, (1986), p. 367
- 6) 森謙一郎, 島進, 小坂田宏造: 機械学会論文集(A編), 45(1978), 396, p. 965
- 7) 森謙一郎, 島進, 小坂田宏造: 塑性と加工, 21(1980), 234, p. 593
- 8) Kohser, R. A., Avitzur, B.: Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, 100 (1978), 11, p. 429
- 9) Padras, P., Burte, P. R.: Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, 108 (1986), 11, p. 288
- 10) 村田良美, 木内学, 矢吹豊: 塑性と加工, 26(1985), 290, p. 260
- 11) Belkhir, L., Charlier, R., Detraux, J. M.: Proc. of the NUMETA'85, (1985), p. 367