



Z. Xia

外形形状制御による軸肥大加工法における基礎的研究

朱 霞*

1. 緒 言

一般産業用機械において主要部品のひとつである回転軸は部分的に直径の大きい段付軸である場合が多い。従来、このような軸材の製造には、切削や溶着あるいは鍛造などの加工方法が用いられてきた。しかし、これらの製造方法にはいくつかの問題点がある。例えば、切削加工では素材の無駄や廃油処理の問題があり、溶着加工では接合部での強度劣化の問題がある。また、鍛造加工では高価で大型の加工装置が必要であり、かつ騒音公害などの問題がある。

そこで、共同研究者らはメカニカル・ラチェット現象に着目し、鋼材軸に対して軸圧縮力を負荷すると同時に、回転曲げによって引張と圧縮の交番応力を繰返し作用させることにより、逐次、軸の一部を肥大させるという新しい塑性加工法を開発してきた。この成形加工法は軸肥大加工法と呼ばれている。この軸肥大加工法は井浦によって考案され、岡部によってメカニカル・ラチェット現象の概念に基づき体系化されて軸肥大加工過程での変形挙動も定式化されてきた^{1)~6)}。この定式化により、本技術の応用展開が加速化され、高周波熱錬炉において実製品加工への実用化が進んでいる。この軸肥大加工法は、鋼材軸の一部分を、室温において僅かなエネルギーの注入により、20~30秒間で、かつ塑性加工熱による温度上昇もなく拡張できるという特長を有している。本加工法を軸部品の製造に適用すれば、省資源・省エネルギー・省コストといった効果が期待できる。

ところで、軸部品の多くは六角や歯車あるいは多段軸などのように特徴的な外形の部位を有している。従来、そのような最終形状を得るために、軸肥大加工後に切削加工を必要としていた。そこで、軸肥大加工法を更なるコストパフォーマンス加工技術へと発展させるために、本研究では、肥大加工部位の外形を制御できる新しい軸肥大加工法を開発した。最終外形に対応する形状を内径に有する金型の中で、鋼材軸の一部分を塑性変形させることによって、様々な外形形状を持つ肥大部を成形することを試みた。加工条件による被加工部の成形変形挙動を実験的に明らかにし、加工を伴い、被加工部の疲労損傷を調査した。さら、加工過程における軸肥大変形シミュレーション解析手法を開発した。

2. 加工実験

2.1 加工機および加工試験片

図1に加工実験に用いた軸肥大加工機を示す。写真中の奥側のユニットAは曲げと回転の付加機能を有する装置である。このユニットAの前面には金型が取り付けられる。一方、写真中の手前側のユニットBは軸力の付加と回転駆動の機能を有する装置である。両装置は、それぞれスリーブ保持治具を有し、同一軸線上に対向している。この軸線上において、ユニットAは固定されており、ユニットBは前後方向に動くことができる。金型の六角孔寸法は図2に示し、対角線長さ27mm、平行面間距離23.4mmであり、金型の厚さは13.5mmである。加工試験片にはJISのSS400Dを用いた。表1に試験片の寸法と機械的特性を示す。

2.2 加工実験方法

図3は外形拘束制御による軸肥大加工方法を表した模式図である。本実験手順は以下のとおりである。まず、試験片をスリーブの孔に挿入し、両スリーブ間の初期つかみ間隔を L_0 に設定する。 L_0 は目標形状(直径、幅)まで軸肥大加工する場合の加工前後での材料の体積が等し

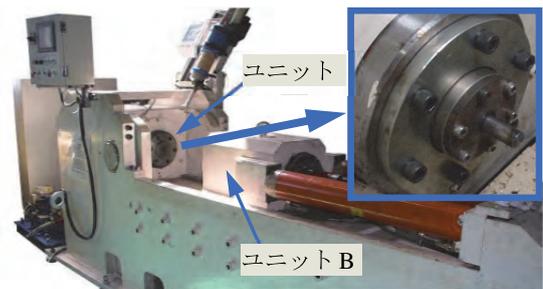


図1 加工機



図2 六角孔を有する金型

* 愛媛大学大学院理工学研究科 講師

表 1 試験片の寸法と供試材の機械的特性

試験片の寸法	
直径 D0 (mm)	19
長さ L (mm)	61

供試材の機械的特性	
降伏応力 σ_y (MPa)	553
引張強さ σ_B (MPa)	598
伸び率 (%)	8.6

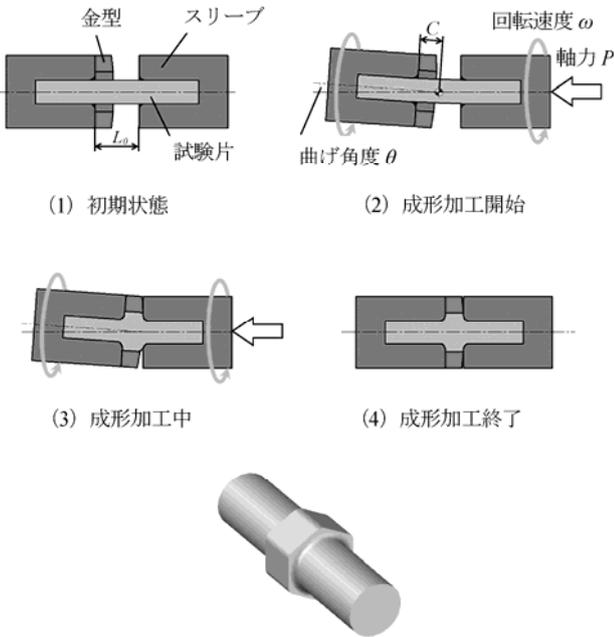


図 3 加工過程の模式図

くなるように決定する。次いで、試験片には軸圧縮力 P が負荷されると同時に回転が与えられる。さらに角度 θ の曲げが付加される。ここで、曲げ回転中心は最初の軸線上に位置しており、曲げ回転半径は C である。以上の操作により両スリーブ間の材料が軸方向に圧縮され、それに伴う半径方向への拡張変形が起こる。両スリーブ間距離 L が目標距離 L_N に到達したら、曲げ角度 θ を 0° に戻して軸芯出しを行う。最後に軸圧縮力 P を除荷し、回転を停止させて加工終了となる。本実験では、最終形状の造形までの加工工程を二つの段階に分けて考える。一つ目は L が金型の厚さ t に到達しユニット B がそれ以上前進できなくなるまでの荒加工工程であり、二つ目は L が金型の厚さ t に到達後も軸圧縮と回転曲げを継続する仕上げ加工工程である。

2.3 加工実験条件

両スリーブ間の試験片の初期設定長さ L_0 は金型の厚さ 13.5mm も含めて 27mm とした。本実験での加工条件は、まず、軸肥大変形に及ぼす軸圧縮力の影響を明らかにするために、曲げ角度と回転速度を $\theta=3^\circ$, $\omega=60\text{rpm}$ と固定し、軸圧縮荷重 P を 160kN, 200kN, 250kN と変化させた。次に、軸肥大変形に及ぼす回転速度の影響を明らかにするために、曲げ角度と軸圧縮荷重を $\theta=3^\circ$,

$P=200\text{kN}$ と固定し、回転速度 ω を 20rpm, 40rpm, 60rpm と変化させた。曲げ角度 θ の曲げ回転半径 C は 5mm とした。

3. 加工実験結果

3.1 軸肥大変形に及ぼす軸圧縮力の影響

図 4 に荒加工工程のみの加工を行った場合の試験片写真を示す。図 5 は金型への試験片の充填率 η と基準化軸圧縮応力 σ_c/σ_y との関係で、軸肥大変形に及ぼす軸圧縮力の影響を調べた線図である。ここで、充填率 η は金型六角孔の対角線長さ H_{\max} に対する軸肥大部の最小直径 D_{\min} の比であり、次式のように定義した。

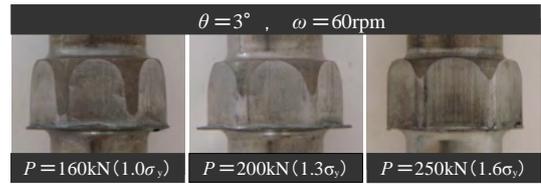


図 4 荒加工過程における異なる軸力により成形された試験片の外形写真

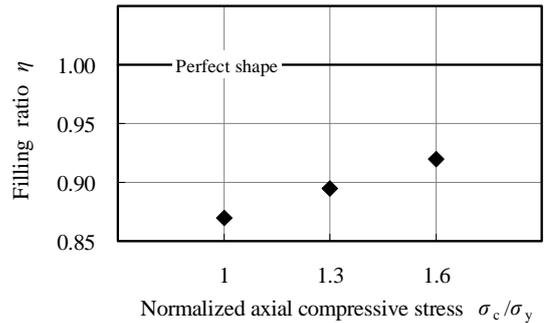


図 5 荒加工過程における充填率と基準化軸圧縮応力との関係

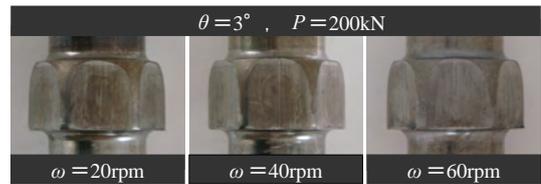


図 6 荒加工過程における異なる回転速度により成形された試験片の外形写真

$$\eta = \frac{D_{\min}}{H_{\max}} \quad (1)$$

これらの結果から、軸圧縮荷重が大きくなるにつれて充填率が向上していくことがわかる。しかし、250kN ($\sigma_c=1.6\sigma_y$) の場合でも荒加工工程だけでは十分な充填率を得ることができなかった。

3.2 軸肥大変形に及ぼす回転速度の影響

図 6 に荒加工工程のみの加工を行った場合の試験片写

真を示す。図7は金型への試験片の充填率 η と回転速度 ω との関係である。これらの結果から、荒加工工程において回転速度は軸肥大変形に対してそれほど影響を与えないということがわかる。

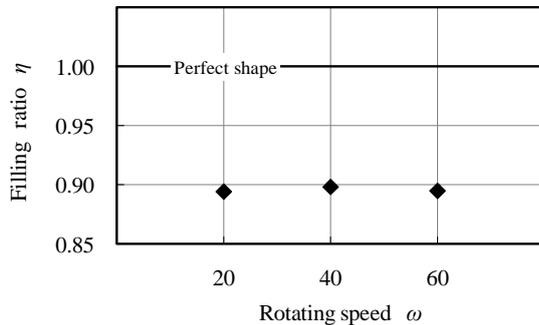


図7 荒加工過程における充填率と回転速度との関係

3.3 軸肥大変形に及ぼす仕上げ加工工程の効果

図8に回転速度の影響を調査する実験において、荒加工工程に引き続き仕上げ加工工程を行ったときの試験片写真を示す。図9は金型への試験片の充填率 η と回転速度との関係であり、図7に仕上げ加工工程を行った場合の結果を追加したものである。これらの結果から、充填率の向上に対する仕上げ加工工程の効果は回転速度の増大に伴って明瞭に出現することがわかる。

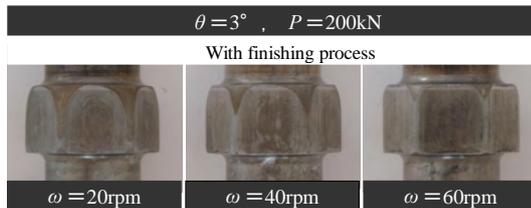


図8 仕上げ加工過程における異なる軸回転速度による試験片の外形写真

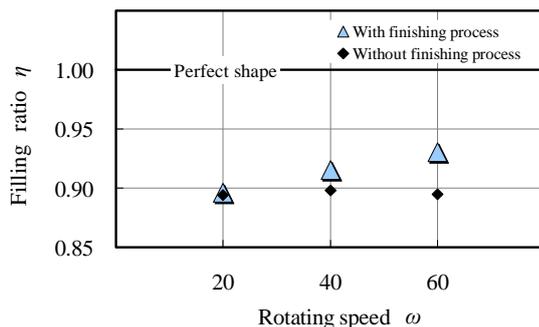


図9 仕上げ加工過程における充填率と軸回転速度との関係

4. 加工実験結果についての考察

4.1 降伏遅れ現象による仕上げ加工工程の効果

図6と図8から、加工後の試験片の外形状は荒加工工程後に仕上げ加工工程が行われるか否かにより明瞭に変化することが認められ、仕上げ加工工程の追加が明らかに効果的であることを示唆している。仕上げ加工工程の効果は回転速度が速いほど増大し、しかも、回転回数

の増大とともに外形形状は理想的な六角形に近づくことがわかる。このような充填率の増大は降伏遅れ現象に依存していて、その出現量は回転速度が速ければ速いほど大きくなる。

また、加工中に注入される降伏遅れの弾性ひずみエネルギーも大きくなるので、降伏遅れに起因する塑性変形量もそのエネルギーの増大とともに増大すると想定できる。

4.2 変形挙動の推定

従来の軸肥大変形挙動は岡部らの一連の研究により次式のように明らかにされた^{1),5),6)}。式中の文字の意味は文献^{1), 5)}等を参照されたい。

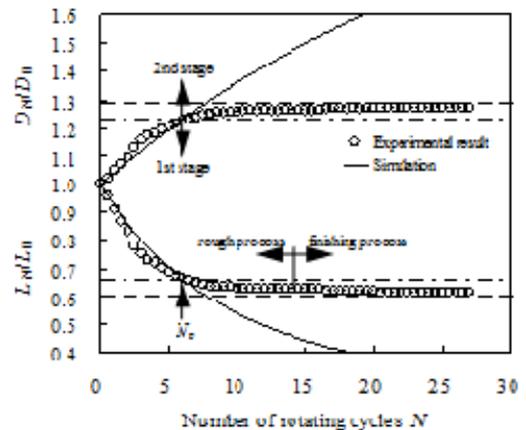


図10 加工過程における被加工の変形挙動

$$\frac{L_N}{L_0} = \exp \left[\varepsilon_0 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{N}{N_0} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

$$\frac{D_N}{D_0} = \sqrt{\exp \left[\varepsilon_0 \left\{ \exp \left(-\frac{N}{N_0} \right) - 1 \right\} \right]} \quad (3)$$

$$N_0 = N_0^* \theta^{\alpha_1} (\sigma_c / \sigma_y)^{\alpha_2} \quad (4)$$

図10に本実験で得られた試験片の変形挙動を示す。外形拘束制御軸肥大加工における変形挙動は、試験片の軸肥大部における外形表面が金型孔の内面に接触する前後を第1段階と第2段階に分けて考えることができる。第1段階での軸肥大変形挙動は従来と同様に式(2)~(4)により推定できることがわかる。第2段階での軸肥大変形挙動に関しては、回転回数 N が N_p より増大するとともに、実測量は式(2)~(4)により推定される軸肥大変形挙動曲線から離れていく傾向にある。ここで、 N_p は試験片の外形表面が金型孔の内面に接触するときの回転回数であり、図10中の一点鎖線と軸肥大変形曲線との交点から計算できる。回転回数 N が N_p を超えると金型の内面壁からの反力のために、軸力 P の軸肥大変形への寄与が減少し変形は進みにくくなる。それゆえ、軸力 P が小さいほど N_p 以降の変形はより一層進みにくくなる。つまり、

十分な充填率に達するまでの回転回数 N は軸力 P に依存することが予想される。そこで、第 2 段階での変形挙動を推定可能とするため外形拘束制御軸肥大加工における変形挙動の数式モデル化を以下に図ることとする。軸肥大変形挙動の数式モデル式 (2), (3) におけるパラメータ N_0, ε_0 は外形拘束制御軸肥大加工の場合では回転回数 N が N_p を超えるか否かによって明らかに異なる。

それゆえ、 N_p 以前の第 1 段階における N_0 を N_{01} 、 N_p 以後の第 2 段階における N_0 を N_{02} とすると、軸肥大変形挙動は次式のように表すことができる。

(i) for $N < N_p$

$$\frac{L_N}{L_0} = \exp \left[\varepsilon_{01} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{N}{N_{01}} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

(ii) for $N > N_p$

$$\frac{L_N}{L_0} = -\exp(\varepsilon_{02}) \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{N - N_p}{N_{02}} \right) \right\} + \frac{L_{N_p}}{L_0} \quad (6)$$

$$\frac{D_N}{D_0} = \left(\frac{L_N}{L_0} \right)^{-1/2} \quad (7)$$

図 11 に本実験から得られた N_{01}, N_{02} および N_p と軸力 P との関係を示す。これらの関係は次式のように表すことができるので、任意の軸力 P から推定することができる。

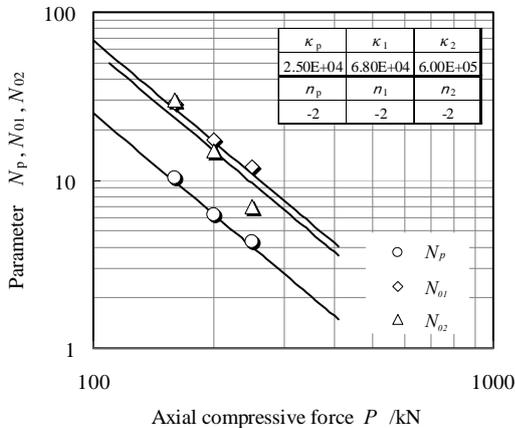


図 11 係数 N_p, N_{01}, N_{02} と軸力 P との関係

$$N_{01} = \kappa_1 P^{n_1} \quad (8)$$

$$N_{02} = \kappa_2 P^{n_2} \quad (9)$$

$$N_p = \kappa_p P^{n_p} \quad (10)$$

次に、 ε_{01} および ε_{02} について述べる。 ε_{01} は冷間加工における最大肥大率 D_N/D_0 を 2 倍とした場合の軸圧縮真ひずみであり、次式のように表すことができる。

$$\varepsilon_{01} = \ln \left(\frac{L_N}{L_0} \right) = \ln \left(\frac{D_0}{D_N} \right)^2 = -1.386 \quad (11)$$

一方、 ε_{02} は試験片が金型の六角孔に完全に充填率されたときの等価肥大直径 $D_{eq\max}$ ($\eta=1$) から推定でき、次式のように表される。

$$\varepsilon_{02} = \ln \left\{ \left(\frac{D_{N_p}}{D_0} \right)^{-2} - \left(\frac{D_{eq\max}}{D_0} \right)^{-2} \right\} = -2.805 \quad (12)$$

ここで、 $D_{eq\max}$ は対角長さ H_{\max} の六角形と等しい面積を持つ円の直径として次式のように計算できる。

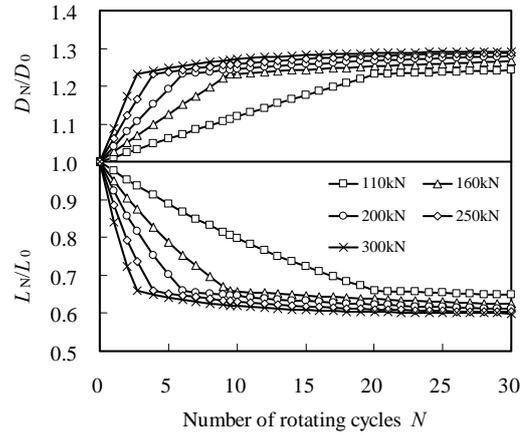


図 12 式 (5) ~ (7) から推測された被加工部の変形挙動

$$D_{eq\max} = \sqrt{\frac{3}{\pi} H_{\max}^2 \sin \left(\frac{\pi}{3} \right)} \quad (13)$$

図 12 は式 (5) ~ (7) にて推定した軸圧縮力と軸肥大変形挙動の関係である。式 (5) ~ (7) は適当な軸圧縮力条件下で十分な充填率になるまでの回転回数 N を推定するのに便利である。

4.3 軸肥大変形に伴う充填率挙動の推定

軸肥大変形に伴い充填率がどのように変化していくかを推定するために、軸肥大率と充填率との関連付けを試みる。軸肥大変形部は圧縮変形の進行に伴って軸材の直径が拡大していくが、その時の形状は樽形を呈す。まず、変形挙動の第 1 段階においては N 回転目の軸直径 D_N を樽形部の最大直径 D_{\max} と仮定する。金型六角孔への試験片の充填率 η は式 (1) のように定義している。今、 D_{\min} と D_{\max} の関係を式 (14) のようにおくと軸肥大率の挙動に対応した充填率の挙動が得られる。

$$D_{\min} = \left(\frac{D_0 + D_{\max}}{2} \right)^{1 + \frac{N}{N_p}} \quad (14)$$

次に、試験片の外形表面が金型孔の内面に接触した後の第 2 段階では、六角形の角部に材料が充填されていき、その時の軸方向に直角な面の断面形状は不完全六角形状を呈す。今、図 13 の模式図に示すように六角角部に注目して、以下の式に表されるような関係で軸肥大変形が進行すると仮定する。

$$D_{\max} = \frac{D_{\min} + H_{\max}}{2} = \frac{1+\eta}{2} H_{\max} \quad (15)$$

$$D_{\text{mean}} = \frac{D_{\min} + D_{\max}}{2} = \frac{1+3\eta}{4} H_{\max} \quad (16)$$

ここで、 D_{\min} は軸肥大変形が最も遅れる傾向にある金型奥側での試験片の直径である。 D_{\max} は軸肥大変形が先行する金型入り口側での試験片の直径である。また、 D_{mean} は D_{\min} と D_{\max} の平均であり、不完全六角形状の対角長さでもある。対角長さ D_{mean} の不完全六角形の面積は次式で表される。

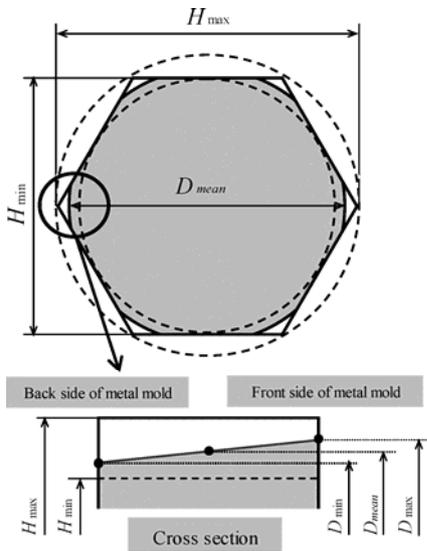


図 13 仕上げ加工過程における被加工部の変形挙動

$$S = \frac{\pi}{4} \left\{ \zeta (D_{\text{mean}}^2 - H_{\min}^2) + H_{\min}^2 \right\} \quad (17)$$

ここで、 ζ は空隙率であり、六角孔全体に対する六角孔とその内接円との間の空間の比として次式のように定義している。

$$\zeta = \frac{\frac{3}{\pi} H_{\max}^2 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) - H_{\min}^2}{H_{\max}^2 - H_{\min}^2} \quad (18)$$

ここで、断面積 S と等しい面積を持つ円の直径 D_{eq} を考えたとき、 D_{mean} は D_{eq} を用いて次式のように表される。

$$D_{\text{mean}} = \sqrt{\frac{D_{\text{eq}}^2 - H_{\min}^2}{\zeta} + H_{\min}^2} \quad (19)$$

変形挙動の第 2 段階における D_N をこの等価円直径 D_{eq} と考えることにすると式(7)から求まる軸肥大率の挙動

に対応した D_{mean} の挙動が得られる。その結果、式(16)より充填率の挙動が得られる。図 14 に加工回転回数 N の増加に伴う充填率 η の挙動を示す。

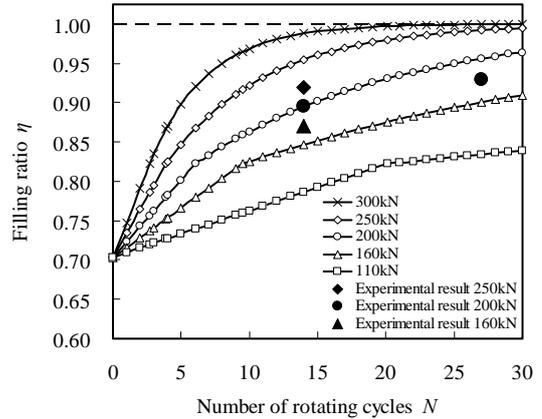


図 14 回転数の増加に伴う充填率の変化挙動

5. 有限要素法を用いたシミュレーション解析

5.1 解析モデル及び解析条件

解析では汎用有限要素法 (FEM) 解析ソフトである MSC.Marc2007 を使用した。解析モデルを図 15 に示す。図に示すように両側ダイス・金型を剛体壁、被加工剤は変形体と定義した。変形体を構成する要素は、曲げ変形により生じるロッキングを防ぎ精度のよい解析結果を得るために、6 節点低減積分要素を用いた。その要素数総数は 11136 個、接点総数は 12994 個である。

境界条件は図 15 に示すように、曲げ側では軸方向への固定、周方向への回転、および曲げ中心に対する曲げ角度を負荷する。加圧側では軸方向への荷重を加える。これにより軸肥大加工法の軸加圧力および回転曲げの負荷を再現する。加工実験と同様な負荷条件で解析を行った。

なお、試験片は変形体とし、ダイスと金型は剛体とした。フォン・ミーゼスの降伏条件、等方硬化則およびプラントル・ロイス流れ則を採用した。

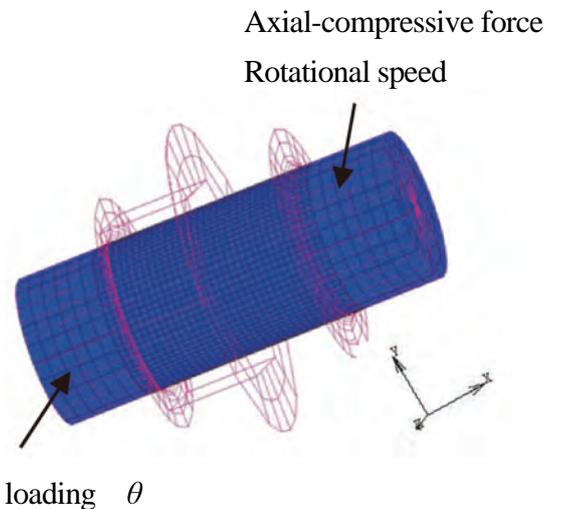


図 15 FEM 解析モデルおよび境界条件

5.2 解析に用いた構成式

軸肥大加工は塑性変形を伴うため、応力とひずみの関係は非線形となる。さらにメカニカル・ラチェット現象の影響を考慮する必要があるため、構成式はさらに複雑なものになると推察できる。本解析に用いる構成式を以下のように定める。

$$\sigma = E\varepsilon_e + K\varepsilon_p^n \quad (20)$$

ここで、 σ は相当応力、 E はヤング率、 ε_e は相当弾性ひずみ、 ε_p は相当塑性ひずみ、 K 、 n は曲げ角度 θ および軸圧縮力応力比 σ/σ_0 の関数とすることでメカニカル・ラチェットによる影響を考慮する。この K 、 n は、解析結果と同じ加工条件（曲げ角度 θ 、軸圧縮力応力比 σ/σ_0 ）で加工した実験結果と比較することで、各加工条件における値を求める。そして、それらの結果を比較することにより材料定数を同定する。

5.3 解析結果

軸断面におけるフォンミーゼス相当応力分布および相当塑性ひずみ分布の例を図16と図17に示す。また、各加工条件において、被加工部の形状変化については実験結果と解析結果との比較を行った。その結果を図18に示し、両者がよく一致している。

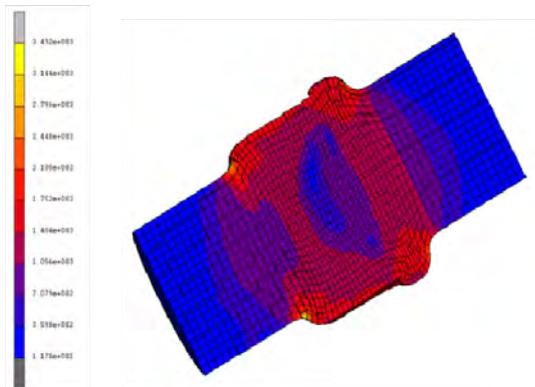


図16 中央断面におけるフォンミーゼス相当応力分布

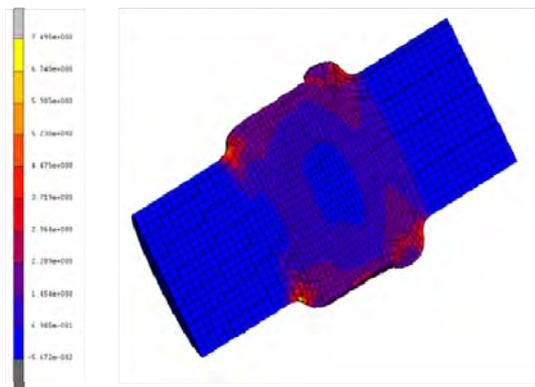


図17 中央断面における相当塑性ひずみ分布

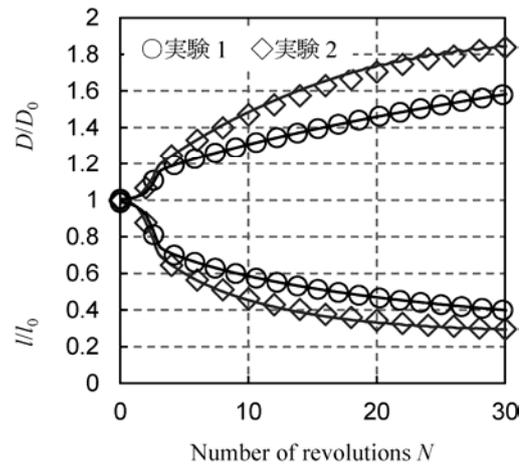


図18 被加工部の形状変化

5. 結論

金型を用いて被加工材の外形状を拘束制御する新しい軸肥大加工法が開発された。本文では肥大部を六角形状に造形する場合について加工実験及び FEM 解析を実施し、得られた結果は下記のように要約する。

- 1) 本加工法においては、充填率 η は軸圧縮力 P および回転速度 ω に依存し、それらの増大とともに向上する。
- 2) 加工過程では、荒造形加工工程と仕上げ造形加工工程が必要であり、重要なポイントとなる。よって、被加工部の変形挙動に対して2段階の工程を1つの式で表せる数式モデル化を図り、十分な充填率を得るまでに必要な回転回数を推定可能にした。
- 3) FEM 解析により、被加工の変形挙動が推測できる。

謝辞

本研究をご支援頂きました、公益財団法人天田財団に深く感謝の意を表します。また、本研究の遂行にご協力頂いた愛媛大学工学部機械工学科材料力学研究室の皆さんにお礼いたします。

参考文献

- (1) 井浦忠・岡部永年・朱霞: 塑性と加工, **44**- 514 (2003), 1115-1119.
- (2) 井浦忠・岡部永年・朱霞: 同上, **45**- 516 (2004), 35-39
- (3) 井浦忠・岡部永年・朱霞: 同上, **45**- 520 (2004), 321-325
- (4) 井浦忠・岡部永年・朱霞: 同上, **46**- 531 (2005), 327-331
- (5) 岡部永年・朱霞・森一樹・井浦忠: 同上, **46**- 533 (2005), 520-524.
- (6) 岡部永年・朱霞・森一樹・井浦忠: 同上, **47**- 540 (2006), 49-53.