

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560126

研究課題名（和文） 外形制御による革新的なニアネットシェイプ軸肥大加工法の開発

研究課題名（英文） New near-net-shape working method for shaft's cross sections partially enlarged and controlled by cyclic bending and axial compressive loading through metal molds

研究代表者

朱 霞 (XIA ZHU)

愛媛大学・大学院理工学研究科・講師

研究者番号：90325358

研究成果の概要（和文）：

独自で開発した軸肥大加工法を応用して新コンセプトのニアネットシェイプ加工法を提案した。従来の軸肥大加工法により肥大させながらその肥大部外周を金型で外形制御し、肥大部の外形を円柱形状、多角形状や段付き形状など、さらに歯形に成形させる。外形寸法精度の向上、肥大加工後の切削工程の省略や歩留り向上などを確実に実現し、革新的なニアネットシェイプ加工技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

A new near-net-shape working method, applied to the diameter-enlargement processing method developed originally, has been proposed. A shaft's cross sections is partially enlarged and controlled by cyclic bending and axial compressive loading through a metal mold. The method achieves the outside dimension near an ideal shape during the only one process without a subsequent cutting work.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：成形加工，生産工学，加工学，ニア・ネット・シェイプ，材料力学

1. 研究開始当初の背景

自動車や一般産業用機械などの軸部品は、ほとんど、ギャ位置決めやベアリング止めのような軸径より太い段付き部位を有する。

(以下は、太い段付き部を軸肥大部と称する。)そこで、代表研究者らは切削加工による素材の無駄(切削屑)や過剰な手間(加工時間)などの直接製品コスト、あるいは切削

廃油の処理、大型製造設備や作業環境(温度、騒音、振動)改善などの間接製品コストの両面から総合的な製品コストの大幅な削減が期待できる画期的な冷間塑性加工法を提案・開発した。軸材に一定な軸圧縮応力と回転曲げによる引張・圧縮の繰返し応力との組み合わせ負荷により、室温にて極めて短時間で温度上昇のほとんどない局所的な軸肥大部を成形させる冷間加工技術を確立した。

従来塑性加工法での代表的な鍛造法に比べ、初期設備投資が大幅減、少量多品種生産にも対応可；切削法に比べ切削屑を無くし材料費減；部品形状設計の幅が広がると更にコスト削減が可能。本加工法は、冷間での大変形が可能；加工後試験片の温度上昇に伴わない高エネルギー効率（省エネ）；潤滑油が不要（作業環境良）；コンパクトな設備（省スペース）などの特徴を有する。しかも、国内・国外に類似を見ない環境に優しく省エネ・省資源に優れた加工技術として国内外での学会発表を通じて広く評価されている。軸部品の製造に対して新たな選択肢を投げかけている。

しかしながら、これまでの軸肥大加工法では、ダイス間で肥大部が自由変形するため、成形された肥大部の変形方向断面は円形形状で、肥大部の軸方向断面は樽型形状である。また、両側ダイス間での初期つかみ体積のばらつきは素材直径・切断長さに依存するため、成形された肥大部の直径・肥大幅はばらつきを生じる。肥大部には二面幅や複雑な形状が必要で、高い寸法精度が必要な場合には、実用上、軸肥大加工後に機械加工を行い、目標形状を整えるしか対応できない。よって、材料の無駄などの原因でコストアップになる。

そこで、軸外形制御の軸肥大加工法を用いた新コンセプトのニアネットシェイプ加工法を提案した。従来の軸肥大加工法により肥大させながらその肥大部外周を金型で外形制御し、肥大部の外形を円柱形状、多角形状や段付き形状など、さらに歯形に成形させる。外形寸法精度の向上、肥大加工後の切削工程の省略や歩留り向上などを確実に実現し、革新的なニアネットシェイプ加工技術を確立する。高品質でコスト低減に役立つニアネットシェイプ品を目指す。

2. 研究の目的

該当研究では、代表研究者らが提案した軸肥大加工技術による成形された肥大加工部の外周を、多角形状やギヤ歯形などの外周形状に変形制御できる革新的なニアネットシェイプ加工技術を確立し、先進工業技術として発展させることを目的とする。

3. 研究の方法

下記の研究方法で該当研究を推進した。

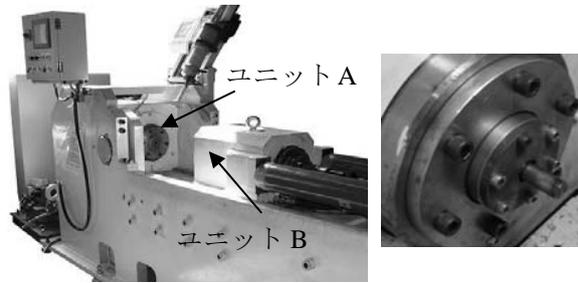
(1) 加工機の開発および加工実験の実施

(1.1) 成形加工機および加工試験片 図 1 に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 に示すように、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。試験片には JIS の SS400D を用いた。試験片の直径は 19mm あり、長さは 61mm である。

(1.2) 実験方法

図 3 は外形拘束制御による軸肥大加工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



(a) 全体図 (b) ユニット A の拡大図

図 1 成形加工機

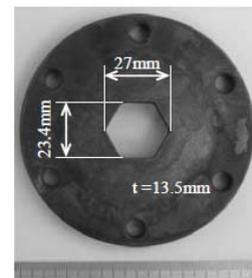


図 2 六角形孔を有する金型

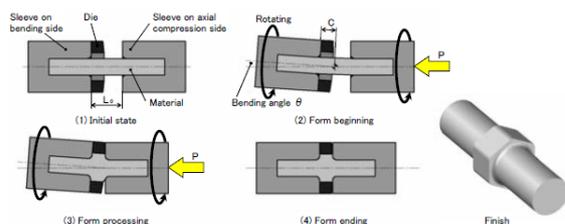


図 3 本加工法の模式図

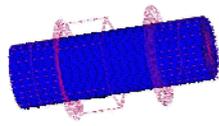


図4 3D解析モデル

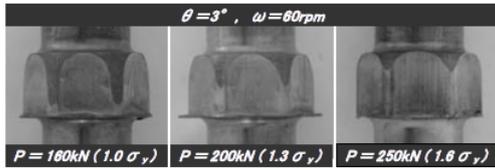


図5 荒加工工程のみの加工における異なる軸圧縮力下での試験片写真

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 LN 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。

(1.3) 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 の曲げ中心位置 C は 5mm とした。

(1.4) 有限要素法を用いた解析

シミュレーション解析は汎用有限要素法解析ソフトウェア MSC Marc2010 を用いた。8 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用い、図4に示すような3次元モデルを作成した。なお、試験片は変形体とし、ダイスは剛体とした。フォン・ミーゼスの降伏条件、メカニカル・ラチェット変形を考慮した移動硬化則およびプラントル・ロイス流れ則を採用した。

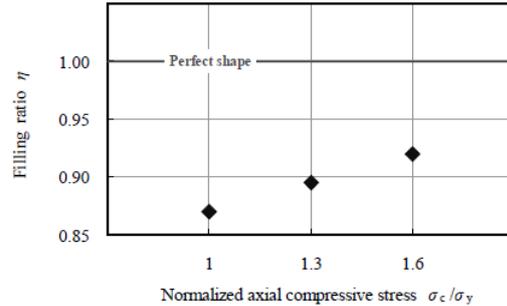


図6 荒加工工程のみの加工における充填率 η と基準化軸圧縮応力 σ_c / σ_y との関係

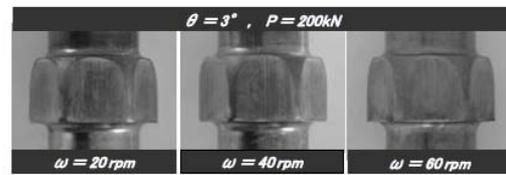


図7 荒加工工程のみの加工における異なる回転速度下での試験片写真

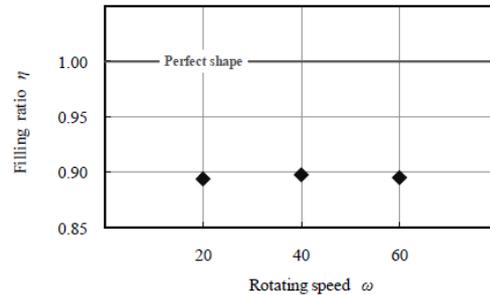


図8 荒加工工程のみの加工における充填率 η と回転速度 ω との関係

(2) 実験および解析結果

(2.1) 軸肥大変形に及ぼす軸圧縮力の影響

図5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6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} の比を定義した。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満足な充填率を得ることができなかった。

(2.2) 軸肥大変形に及ぼす回転速度の影響

図7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8は金型への試

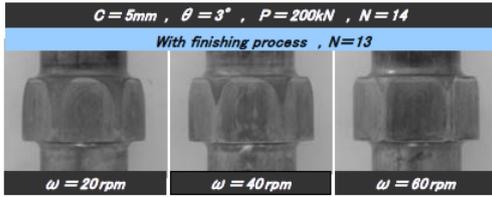


図 9 荒加工工程に引き続き仕上げ加工工程を行ったときの試験片写真

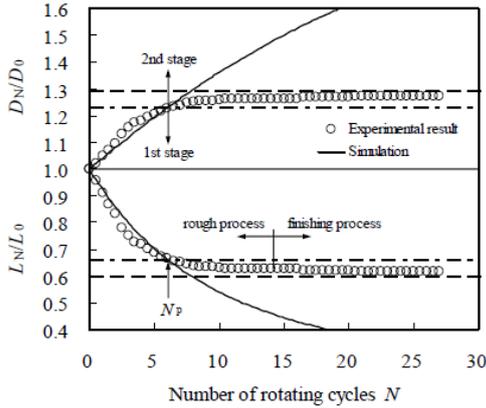


図 10 肥大加工部の変形挙動の実測値

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。

(2.3) 軸肥大変形に及ぼす仕上げ加工工程の効果 図 9 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。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。

(2.4) 変形挙動数式化モデルとシミュレーション解析結果

外形拘束を行わない場合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、軸力 P (軸加圧応力 σ_c) と曲げ角度 θ から推定できる。

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

$$\frac{D_N}{D_0} = \sqrt{\exp \left[\varepsilon_0 \left\{ \exp \left(-\frac{N}{N_0} \right) - 1 \right\} \right]} \quad (2)$$

$$N_0 = N_0^* \theta^{\alpha_1} (\sigma_c / \sigma_y)^{\alpha_2} \quad (3)$$

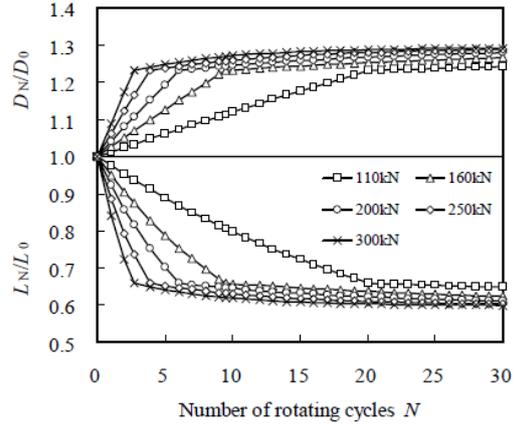


図 11 肥大加工部の変形挙動の実測値と解析結果との比較

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 (1) ~ (3) 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、実測値は従来の式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変形抵抗反力のために、軸力 P の軸肥大変形への寄与が次第に減少していく。それゆえ、軸肥大変形は軸力 P が小さいほど、緩やかに飽和していく。したがって、十分な充填率に達するまでの回転回数 N は軸力 P が小さいほど大きくなる。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。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わすことができる。

(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 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。また、有限要素法により計算された軸肥大変形挙動も図 12 に示し、実験結果とよく一致している。

4. 研究成果

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を開発した。研究成果は下記のように要約できる。

(1) 成形加工機を開発した。チャック部に異なる数種類の金型を装着でき、肥大部の外周や軸方向幅などの変形制御を可能に設計した。また、型材の選択から熱処理方法、金型構造・強度設計や加工法までの

(2) 成形加工実験を行い、被加工部の変形挙動および金型への充填率を測定した。強度検証実験結果に照らして健全な加工条件を把握した。

(3) FEM 法を用いたシミュレーション解析手法を開発した。金型の設計を含み、肥大加工部の成形精度に対する適切な加工条件の設定に適用した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 桑原義孝, 岡部永年, 朱霞, 黄木景二, 生田文昭, 塑性と加工, 日本塑性加工学会, 査読有, Vol.51, No.592, 2010.
- ② 桑原義孝, 岡部永年, 生田文昭, 朱霞, 黄木景二, 塑性と加工, 日本塑性加工学会, 査読有, Vol.51, No.592, 2010. }
- ③ 桑原義孝, 岡部永年, 朱霞, 黄木景二, 生田文昭, 塑性と加工, 日本塑性加工学会, 査読有, Vol.51, No.591, 2010.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 坂田大貴, 高橋学, 黄木景二, 朱霞, 古川貴大, 加藤大典, 日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会, 2012. 3.
- ② 井上善登, 岩崎宏文, 黄木景二, 朱霞, 岡部永年, 日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会, 2012. 3.
- ③ Xia Zhu, Manabu Takahashi, Nagatoshi Okabe, Keiji Ogi, Fumiaki Ikuta and Yoshitaka Kuwahara, the 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on

Computational Mechanics, 2010.7, Sydney, Australia.

- ④ 古川貴大, 黄木景二, 高橋学, 朱霞, 岡部永年, 八原将時, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会, 2011.3.
- ⑤ 岡部恭平, 黄木景二, 朱霞, 岡部永年, 岩崎宏文, 井上善登, 日本機械学会中国四国学生会第 41 回学生員卒業研究発表講演会, 2011.3
- ⑥ 八原将時, 黄木景二, 高橋学, 朱霞, 岡部永年, 古川貴大, 日本機械学会中国四国学生会第 41 回学生員卒業研究発表講演会, 2011.3
- ⑦ 村上弥央, 黄木景二, 朱霞, 岡部永年, 生田文昭, 桑原義孝, 日本機械学会徳島講演会, 2010.10.
- ⑧ 井上善登, 黄木景二, 朱霞, 岩崎宏文, 岡部永年, 日本材料学会中国四国支部 第 8 回学術講演会, 2010.6.
- ⑨ 村上弥央, 朱霞, 黄木景二, 岡部永年, 生田文昭, 桑原義孝, 日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2010.3.
- ⑩ 井上善登, 岩崎宏文, 朱霞, 黄木景二, 岡部永年, 日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2010.3.
- ⑪ 大野恭平, 朱霞, 黄木景二, 岡部永年, 桑原義孝, 森一樹, 日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2010.3.
- ⑫ 古川貴大, 朱霞, 高橋学, 黄木景二, 岡部永年, 生田文昭, 日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2010.3.
- ⑬ X. Zhu, Y. Kuwahara, N. Okabe, K. Ogi and F. Ikuta, Proceedings of 4th International Conference on Experimental Mechanics 2009.11, Singapore.
- ⑭ 佐伯亮輔, 桑原義孝, 朱霞, 岡部永年, 黄木景二, 生田文昭, 日本塑性加工学会主催 第 60 回塑性加工連合講演会, 2009.11.
- ⑮ 山口功祐, 桑原義孝, 朱霞, 岡部永年, 黄木景二, 生田文昭, 日本塑性加工学会主催 第 60 回塑性加工連合講演会, 2009.11.
- ⑯ 匹野大輔, 朱霞, 岡部永年, 黄木景二, 桑原義孝, 生田文昭, 日本材料学会 第 14 回破壊力学シンポジウム, 2009.10.
- ⑰ 西崎泰典, 桑原義孝, 朱霞, 岡部永年, 黄木景二, 生田文昭, 日本材料学会 第 14 回破壊力学シンポジウム, 2009.10.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
朱霞 (ZHU XIA)

愛媛大学・大学院理工学研究科・講師
研究者番号：90325358

(2) 研究分担者

岡部 永年 (OKABE NAGATOSHI)
愛媛大学・大学院理工学研究科・特命教授
研究者番号：20281181

(3) 研究分担者

堤 三佳 (TSUTSUMI MITSUYOSHI)
愛媛大学・大学院理工学研究科・講師
研究者番号：70293925

(4) 研究協力者

桑原 義孝 (KUWAHARA YOSHITAKA)