

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560135

研究課題名(和文)革新的なニア・ネット・シェイプ多段軸加工技術の開発

研究課題名(英文) Innovative near-net-shape multistep shaft processing technique development

研究代表者

朱 霞 (ZHU, XIA)

愛媛大学・理工学研究科・講師

研究者番号：90325358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、共同研究者らより提案した軸肥大加工原理を用い、軸端部に軸径より細い部位をダイスで絞り加工したうえ、中央部に金型で外形制御の軸拡径加工を施す多段軸加工法を提案した。工作機械の開発、加工精度を高める適切な加工条件を定める実験・解析を着実に進めており、外形寸法精度の確保、加工後の切削工程の省略や歩留りの向上が確実に実現し、経済性に優れたニア・ネット・シェイプ加工技術に展開している。

研究成果の概要(英文)：The present study proposes a new near-net-shape multi-stage shaft working method to partially and simultaneously control multi-cross-section through metal molds, based on the diameter-enlargement working method developed by coauthors. The study designs a finishing machine and decides optimum processing conditions for improving the machining accuracy of processed part. Furthermore, the study surely achieves the omission of after processing like cutting and improvement of yield rate and it is expanding into an excellent near-net-shape processing technique in viability.

研究分野：材料加工学、材料力学

キーワード：生産工学 加工学 ニア・ネット・シェイプ 材料力学 成形加工

1. 研究開始当初の背景

自動車や一般産業用機械などの回転軸部品は、ほとんど、ギヤ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。加工法の概念図および素材・加工品を図1、2に示す。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、

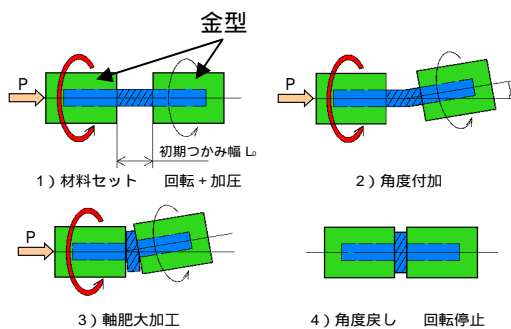


図1 軸肥大加工方法

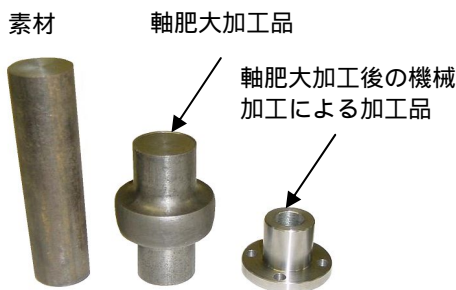


図2 素材と加工品

または外形制御の軸肥大加工法では、拡張率の高い肥大部加工を行う場合、両側ダイス間長を長くするしかない。その結果、座屈変形が発生し、加工部の軸径・拡張部軸方向の幅にはばらつきを生じる。また、拡張部に複雑な形状や多段軸径が必要かつ高い寸法精度を要する場合には、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ため、材料の無駄を生じる。

2. 研究の目的

本研究では、軸端部に絞り加工を付加した外形制御の軸肥大加工法を提案する。軸圧縮力と回転曲げ荷重との組合せ負荷により、軸端部に軸径より細い部位をダイスで絞り加工したうえ、中央部に金型で外形制御の軸拡張加工を行う本加工法では、一層の外形寸法精度の向上、加工後の切削工程の省略や歩留り向上などが確実に実現でき、経済性に優れたニア・ネット・シェイプ加工技術に展開できる。

3. 研究の方法

下記のような研究方法を用いて本研究を行う。

(1) 成形加工機の開発: 材料、製品形状・寸法と製品量から加工機能力(軸圧力、軸回転速度、曲げ付加角度)を設計する。

(2) 加工用工具の設計: 製品品質は、拡張部の外形制御用金型と細い軸端部の押出し用金型を中心とした加工工具の設計を行う。

(3) 成形加工実験の実施: 加工精度に及ぼす加工条件(軸圧力、軸回転速度、曲げ付加角度)などの影響、加工品の品質および工具の損傷状況などを実験的に明らかにし、理想的な塑性流動の加工条件を確立する。

(4) 加工品の強度検証・信頼性評価: 引張試験や疲労試験などの材料試験により、加工中の機械的損傷の有無や長期信頼性観点から製品として供用寿命を明らかにする。

(5) シミュレーション解析手法の開発: 有限要素法を用い、加工時に被加工材内部のひずみ分布、応力分布あるいは工具面圧分布などを明らかにすると共に、工具の設計や、肥大加工部の成形精度に対する最適な加工条件の設定に適用する。

4. 研究成果

(1) 成形加工機の開発について: 研究者らが独自で開発した軸肥大加工機に対して、圧力を負荷する圧縮側のチャック部に異なる数種類の金型を装着し、肥大部の外周・軸方向幅の変形制御を可能に設計した。反対側の回転駆動部と曲げ角度負荷部に、回転速度・曲げ角度の稼働範囲の拡大や微調整などができるように加工機を改良した。ニア・ネット・シェイプ加工の形状精度を向上させるため、特にチャック部の設計に工夫した。図3は図面の一部を示す。

(2) 金型の設計について: 型材の選択、熱処理方法、金型構造・強度設計や加工法などを実験のみならずシミュレーション解析により検討し、用途に応じた高精度・高剛性

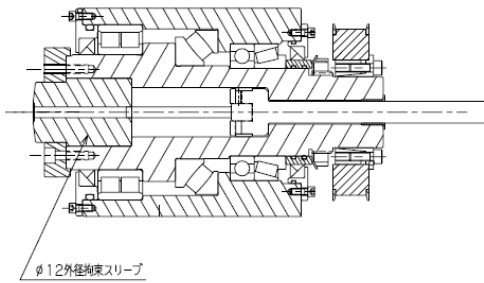


図3 加圧側の部品組立図



図4 金型（左：絞り側、右：加圧側）

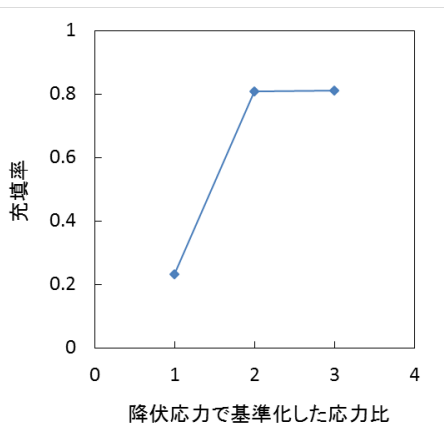


図5 軸加圧力と充填率との関係

・高耐摩耗性を有する金型設計を行った。成形加工プロセスへの考慮も含め最も経済的かつ合理的な金型設計を図った。設計した金型の一例を図4に示し、試験片の端部は絞り加工を施し、中央部は肥大加工を行う。

(3) 成形加工実験の実施について：加工精度は、加工品の形状と金型の内寸法を比較し金型へ充填率で表し、理想値は1である。肥大加工部の成形精度や健全な加工限界などに及ぼす加工条件や材料の機械的特性などの影響を実験的に明らかにし、その結果例を図5、6に示す。軸圧力と曲げ角度は大きいほど充填率が高いが、回転速度の影響は少ない。き裂の発生しない健全な加工限度があることを求める。また、金型の摩耗は極少なく、破損は全くない。

(4) 加工品の強度検証・信頼性評価について：軸加圧力や曲げ角度、回転回数の増加に伴い、加工部の加圧側のフィレット部にき裂が発生しやすくなることを認める。そのき裂

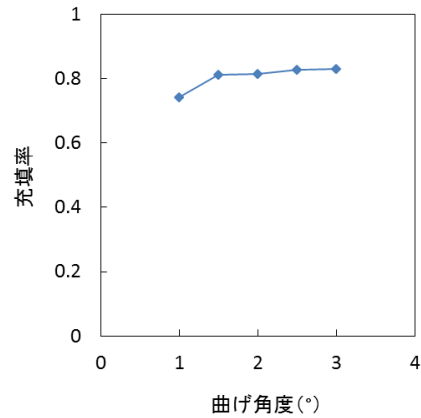


図6 曲げ角度と充填率との関係

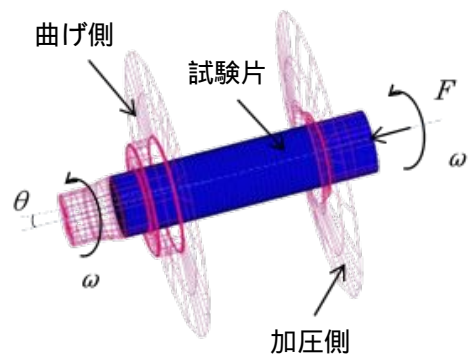


図7 解析モデル

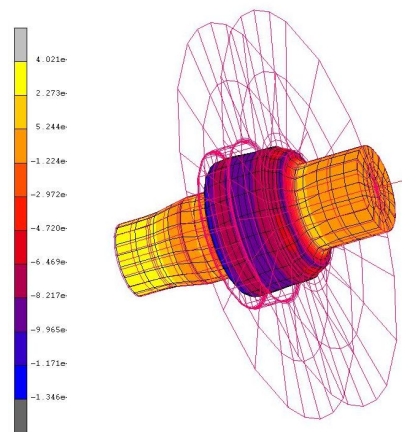


図8 軸方向のひずみ分布コンター図

の発生メカニズムを、加工実験や材料試験、および有限要素法シミュレーション解析結果などにより明らかにし、加工部の疲労強度低下をCoffin-Manson則で評価した。

(5) シミュレーション解析手法の開発について：有限要素法を用いたシミュレーション解析手法を開発し、各加工条件における被加工部の応力・ひずみ分布やその挙動を明らかにした。解析モデルの一例を図7に示し、軸方向のひずみ・応力分布の一例を図8、9に

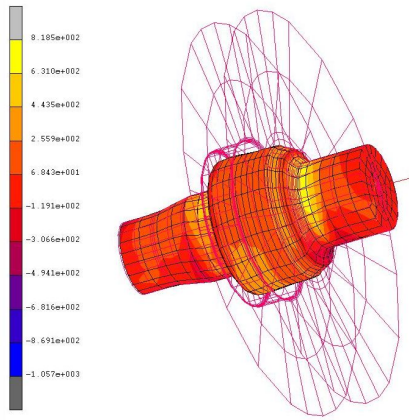


図9 軸方向の応力分布コンター図

示す。応力・ひずみ分の挙動から算出した疲労強度係数に基づき、推測した疲労曲線と実験結果とよく一致している。実験のみならず解析手法により最適な金型設計・加工条件を提案した。また、塑性変形の原因である転位の運動や加工硬化の原因である転位蓄積の情報を導入し、有限要素法とコンビしたマルチ数値解析手法の開発を試みた。

#### 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4件)

Xia Zhu, Hironori Takahashi, Keiji Ogi, Manabu Takahashi and Nagatoshi Okabe, Investigation of Crack Generation in a Notch during Diameter-Enlargement Working Method Processing, Key Engineering Materials, peer review, in press

Xia Zhu, Keiji Ogi, Manabu Takahashi, Kazuki Mori and Nagatoshi Okabe, Deformation Behaviors of Partial Diameter-enlargement Part Worked under Combination Loading of Torsion and Pressure, Applied Mechanics and Materials, peer review, Vol. 473, 2014, pp. 30-34

Xia Zhu, Keiji Ogi, Manabu Takahashi, Nagatoshi Okabe and Kazuki Mori, Basic Research on New Near-Net-Shape Working Method for Processing Multistage Shaft, Applied Mechanics and Materials, peer review, Vol. 473, 2014, pp. 35-38

Xia Zhu, Nagatoshi Okabe, Keiji Ogi and Manabu Takahashi, Fatigue Strength of Shaft with Diameter Enlarged Partially by Cyclic Bending and Axial Compressive Loading, Applied Mechanics and Materials, peer review, Vols.217-219, 2012, pp. 2346-2350

[学会発表](計5件)

川口 拓海、朱 霞、黄木 景二、岡部

永年、ニア・ネット・シェイプ多段軸加工に関する加工条件の調査、日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会、近畿大学工学部、広島県東広島市高屋うめの辺1番、2015.3.5

川口 元志、朱 霞、黄木 景二、岡部永年、高速回転軸肥大加工における肥大部の変形挙動の調査、日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会、近畿大学工学部、広島県東広島市高屋うめの辺1番、2015.3.5

Xia Zhu, Kenichiro Hosokawa, Keiji Ogi, Manabu Takahashi, Nagatoshi Okabe, Fatigue damage in diameter-enlargement part formed by cyclic bending and axial compressive Load, The 20th European Conference on Fracture, Natural Sciences Building at the university campus, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, NO-7491 Trondheim, Norway, 2014.6.30

高橋 宏典、朱 霞、黄木 景二、岡部永年、桑原 義孝、軸肥大加工法による肥大加工部のき裂発生条件の調査、日本機械学会中国四国学生会第44回学生員卒業研究発表講演会、鳥取大学工学部、鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101番地、2014.3.6

X. Zhu, N. Okabe, K. Ogi, M. Takahashi, Y. Kuwahara, K. Mori and F. Ikuta, Investigation of Deformation Behavior of Shaft's Cross Section Partially Enlarged and Controlled by Cyclic Bending and Axial Compressive Loading through Metal Mold, The 4th International Conference on Computational Methods, Crowne Plaza Surfers Paradise, Gold Coast, QLD, Australia, 2012.11.28

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

#### 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