

平成 21 年 4 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560107

研究課題名（和文）

メカニカル・ラチェット現象の利用による中空軸材へのボス・ベローズ成形加工法の開発

研究課題名（英文）Processing Method Development for Forming Boss or Bellows on Hollow Shafts by Using of Mechanical Ratchet Phenomenon

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

研究成果の概要：（200字程度）

本研究では中空軸材の中間部にボスまたはベロー部（いわゆる、肥大加工部）を成形できるユニークな冷間塑性加工法を考案した。本加工法を用いて、非鉄金属材料から鉄鋼材料までの幅広い工業用材料において、材料強度を損なうことなく効果的に肥大加工部を成形させることを初めに可能にした。加工過程における肥大加工部の成形挙動および加工限界を解明するとともに最適な加工条件を提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	0	1,700,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	390,000	3,390,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

現在、軽量化およびコストダウンを図るために、自動車部品のような産業用機器の機械部品には、同断面積を有する中実軸に比べて軽量性と高剛性に優れる中空軸の適用が今後大いに期待される。

そこで、該当研究では中空軸材の中間部にボスまたはベロー部を成形できるユニークな冷間塑性加工法を考案した。

本加工法は、軸圧縮応力と繰返しねじりの組合せによるメカニカル・ラチェットを利用して中空軸材の中間部にボスあるいはベローズを成形させる新しい冷間塑性加工法で

ある。

本加工法の特徴が下記のように挙げられる。

（1）圧縮応力下での繰返しねじり応力によるメカニカル・ラチェット現象を利用した当該加工法では、常温にて降伏応力以下の軸圧縮荷重によりかなり大きな塑性変形がわずかな加工時間で容易に得られる。しかも、加工中における被加工部の温度上昇は極めて低く、加工エネルギーの消費は極めて少ない。省エネルギー

（2）軸心部より素材が被加工部に塑性流動するので、ボス部の幅・高さあるいはベロー

ズ成形部の肉厚減少が抑制でき、しかも、加工による強度低下を受けない。機械的強度損傷を伴わない

(3) 成形型および圧力媒体が不要なので、加工機の構成はよりシンプルである。簡便な加工機

(4) 騒音、振動、高熱という製造現場の環境を悪化させる要因の発生がほとんどない。環境に優しい

(5) 軸肥大加工法と比べ、被加工部の円周方向に適当なねじりせん断ひずみを可逆に繰返し与えるため、中空軸材へのボスやペローズ成形加工の効率を一層向上できる。効率的な加工法

## 2. 研究の目的

本加工法を先進工業技術として発展させることを目的とし、成形時の変形挙動および成形限界を解明するとともに成形プロセスの最適な制御方法を提案する基礎研究および当該加工機の応用展開のための実用研究を行った。

## 3. 研究の方法

本研究目的を達するために、下記の研究項目を実施した。

- (1) 中空軸材の成形加工機の改造・開発
- (2) 中空軸材の成形性試験の実施（管材の強度や変形特性などの調査）
- (3) 加工実験の実施および加工成形性の検討（二次加工加工性の調査）
- (4) 加工成形部の疲労特性の調査
- (5) 有限要素法による成形加工過程のシミュレーション解析手法の開発
- (6) 成形プロセスにおける最適な制御方法の提案

## 4. 研究成果

得られた研究成果を下記のようにまとめる。

- (1) 成形加工機を開発した。

加工機の正面写真を図1に示す。モータに取り付けられた偏心シャフトの回転がアー

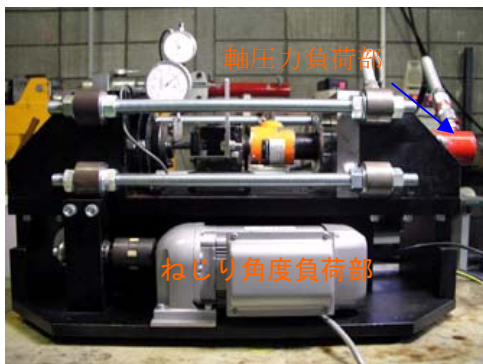


図1 成形加工機

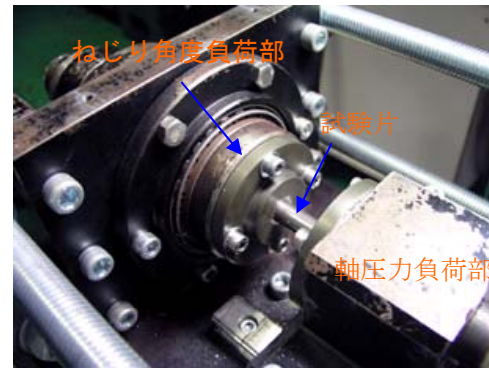


図2 試験片装着した様子

ねじりモーメント

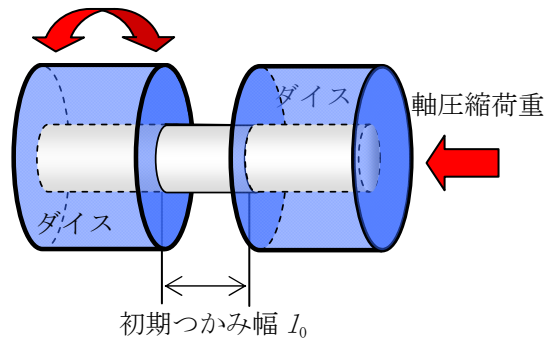


図3 加工方法の概念図

ムを介してダイスの繰返し微小角度 ( $1^\circ \sim 7^\circ$ ) 回転運動を起し、ダイスに固定された軸材にねじり荷重を負荷する。その角度は偏心シャフトの偏心量により変化させる。一方、加圧側のダイスは円周方向に固定される。軸加圧力は、ダイス後部に設置した油圧ポンプにより負荷する。なお、試験片を装着時の様子を図2に示す。

加工方法の概念図を図3に示す。試験片を両ダイス間に固定し、一定の軸圧縮力を負荷させる。その後、繰返しねじり荷重を加える。目標の肥大率に達したら、除荷して加工終了する。なお、肥大率は加工後の肥大部直径  $D$  を初期直径  $D_0$  で基準化した値(半径方向変化率)、収縮率は加工中の肥大部幅  $l$  を初期つかみ幅  $l_0$  で基準化した値(軸方向変化率)である。

(2) 中空軸材の成形性試験を実施し、成形加工に関わる材料強度および変形特性を明らかにした。

機械損傷を伴わない加工限界における肥大率向上の理論・解析的検討を目的として、繰返し荷重条件下での材料強度および変形特性を把握するため、多数試験片法や振幅変動法などの方法により繰返し応力-ひずみ関係を求めた。二次加工成形性に関わる材料強度および変形特性値、いわゆる、引張強さ  $\sigma_B$ 、降伏点  $\sigma_s$ 、降伏比  $\sigma_s/\sigma_B$ 、強度係数  $C$

表 1 供試材の機械特性

Materials	Yield strength $\sigma_y$ [MPa]	Tensile strength $\sigma_B$ [MPa]
SGD400	553	598
A1070	70	1.09
C1100	300	344
S35C	678	748

値 (材料構成式  $\sigma = C \varepsilon^n$  中の  $C$ )、一様伸び ( $\varepsilon_u$ )、破断伸び ( $\delta$ )、局部伸び ( $\varepsilon_l$ )、加工硬化指数  $n$  (材料構成式  $\sigma = C \varepsilon^n$  中の  $n$ )、 $r$  値 (管材の  $r$  値は、軸方向切出し試験片から求まる  $r_\phi$  また円周方向切出し試験片から求まる  $r_\theta$  値となる。)などを求めた。

(3) 成形加工実験を行い、肥大部の成形挙動および加工限界を明らかにした。

成形加工実験を行い、各供試材における各負荷条件下での成形挙動を測定し、機械損傷を伴わない加工限界を調査した。

供試材は SGD400, A1070, C1100, S35C を用いた。各供試材の機械特性を引張試験により測定し、表 1 に示す。

試験片は外径  $D_0=12\text{mm}$ 、肉厚  $t=3\text{mm}$  の受入れまま材を用いた。実験条件として、初期つかみ幅  $l_0=16.8\text{mm}$  に設定した。ねじり速度  $\omega=60\text{rpm}$  にて、次の I) ~ II) のねじり軸肥大加工実験を行った。

I) 各種供試材について軸加圧力を変化させた場合の変形挙動

ねじり角度  $\theta=3^\circ$  に設定し、軸加圧力  $\sigma_c/\sigma_{y0}=0.8, 1.0, 1.2, 1.4$  を負荷した。終了条件として、ねじり回数  $N=800$  cycles となるまでねじり軸肥大加工を行った。

II) 各種供試材についてねじり角度を変化させた場合の変形挙動

軸加圧力  $\sigma_c/\sigma_{y0}=1.0$  に設定し、ねじり角度  $\theta=2^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 6^\circ$  と変化させた。終了条件として、ねじり回数  $N=800$  cycles となるまでねじり軸肥大加工を行った。

成形加工実験により以下のことを明らかにした。

(a) 加工後肥大部の形状



SGD400 A1070 C1100 S35C  
 $\sigma_c/\sigma_{y0}=1.2, \theta=3^\circ, N=800$

図 4 加工試験片の外形

加工後試験片の概観の一例を図 4 に示す。いずれの材料に対しても肥大部がほぼ平坦な円柱形状になる傾向にあることが明らかになった。

(b) 肥大部の変形挙動に及ぼす加工条件の影響

肥大部の変形挙動の一部を図 5, 6 に示す。縦軸に軸肥大率  $D/D_0$ 、収縮率  $l/l_0$  と横軸にねじり回数  $N$  としている。軸加圧力変化において材料ごとに検証すると、各供試材の変形挙動は、初期の変形速度に大きな差異は見られない。しかし、降伏強度の高いものほど加工途中から変形速度の低下が著しく、加工終了後の肥大率は小さくなっている。軸加圧力を大きくするにつれて、同一ねじり回数における肥大率が増加しており、軸加圧力の増加は初期加工速度の増大と同時に最大肥大率を上昇させる方法として効果的であることが明らかである。同一ねじり回数下において軸肥大率  $D/D_0$  が高いほど変形抵抗が低いと言えるため、A1100, C1100, SGD400, S35C の順で変形抵抗が低いことが言える。

ねじり角度変化においては、いずれの供試材ともに角度を上げるごとに初期変形速度

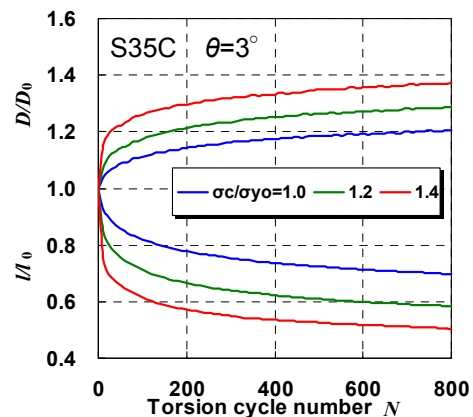


図 5 肥大部の変形挙動

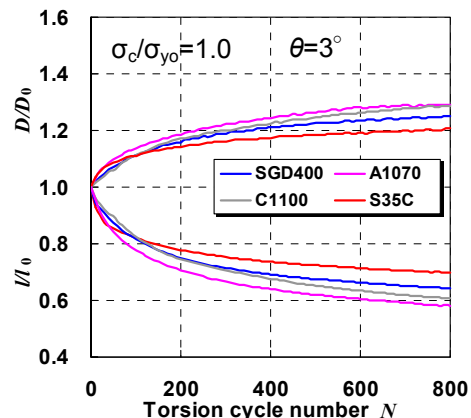


図 6 材料による肥大部の変形挙動の相違

が増加するが、その直後、急激に変形速度が低下し、肥大が進行しなくなることが明らかになった。このため、ねじり角度は初期変形速度に大きく影響を与えることがわかった。また、材料で比較すると、ねじり角度を大きくした場合、各供試材ともにほぼ同一挙動を示し、ねじり角度においては、材料の違いによる変形挙動への影響が少ないことが明らかになった。ねじり角度の増加は、大幅に初期変形速度を向上させることができたが、形状の点を考慮すると、加工速度上昇の好ましい条件とは言えない。

(c) 成形加工過程における表面き裂破損および加工限界

本加工法による成形された肥大部は、外部および内部形状を図 7(a), (b) に示す。内部形状においては、中央に部分的な張出しが多少見られたが、軸材としての機能に支障がないと考えられる。そこで、本加工法による加工限界は、図 8 に示すような肥大部表面にき裂が発生したときと定義した。その直前の軸径肥大率  $D_{max}/D_0$  を限界肥大率と記す。加工限



(a) 正面図 (b) 断面図

図 7 健全な試験片



(a) 正面図 (b) 横断面図

図 8 破損した試験片

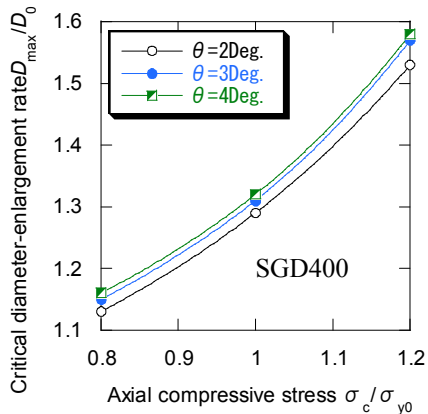


図 9 限界肥大率と軸力との関係

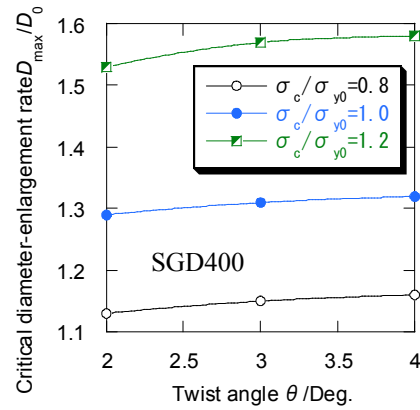


図 10 限界肥大率とねじり角度との関係

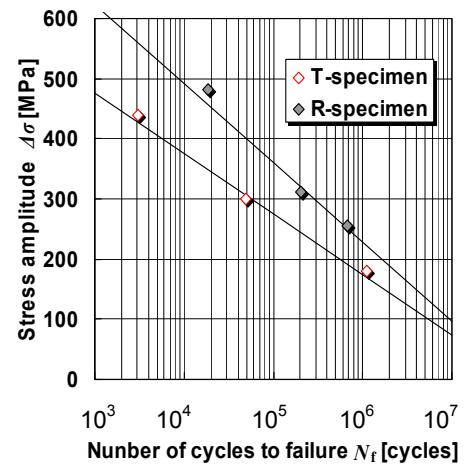


図 11 肥大加工試験片 (T) と平滑試験片との疲労特性比較

界と加工条件の関係を一例として図 9, 10 に示す。いずれの供試材においても、軸圧縮荷重の増大につれて限界肥大率が顕著に増加していくが、ねじり角度の増大に伴う限界肥大率の増加率は小さい。

(4) 加工成形部の疲労特性を明らかにした。

SGD400 材  $D/D_0=1.3$  の加工後試験片と素材平滑試験片に対して回転曲げ試験を行い、得られた結果を図 11 に示す。両疲労特性の強度レベル差を比較すると、肥大加工試験片は平滑な素材試験片に比べて低い時間強度を示す。肥大部付け根 (フィレット部) における応力集中に起因したものと本研究よりも確認された。

(5) 有限要素法による成形加工過程のシミュレーション解析手法を開発した。

図 12 に示すような 3 次元解析モデルを作成した。試験片は弾塑性体とし、ダイスは剛体とした。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。

境界条件としては、加圧側では、軸圧縮力

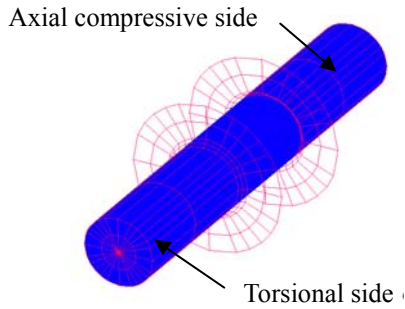


図 12 解析モデル

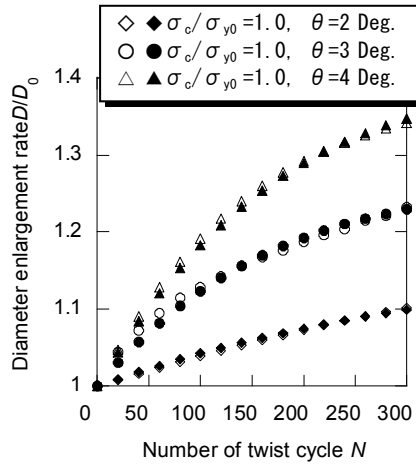


図 13 解析結果と実験結果との比較

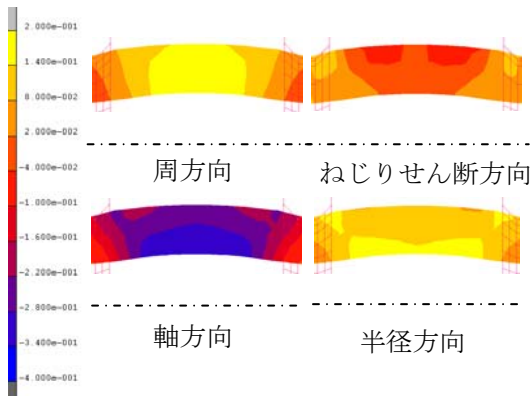


図 14 ひずみ分布コンター図  
( $\sigma_c/\sigma_{y0}=1.0, \theta=3\text{Deg. and } N=200$ )

を付加し、円周方向への変位を拘束する。一方、ねじり側では軸方向の変位固定を行い、円周方向への強制変位を与える。有限要素法 (FEM) 汎用解析ソフト MSC Marc Mentat 2005r1 を用いて成形加工実験と同様な加工条件でシミュレーション解析を行った。解析結果の一部を下記のようにまとめる。なお、供試材はSGD400を用いた。

(a) 成形加工実験による構成式材料定数の同定 成形加工実験による同定した構成式材料定数を用いてシミュレーション解析

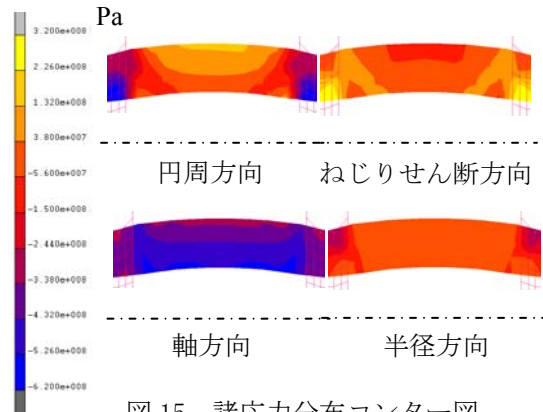


図 15 諸応力分布コンター図  
( $\sigma_c/\sigma_{y0}=1.0, \theta=3\text{Deg. and } N=200$ )

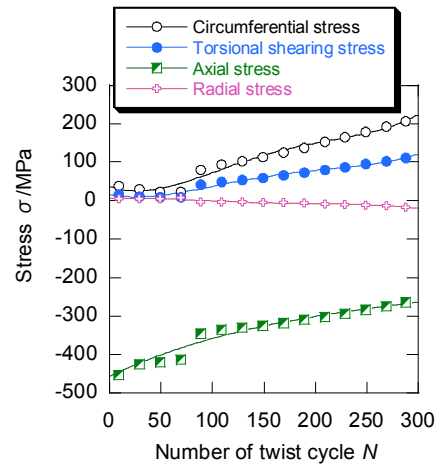


図 16 ねじり繰返し数  $N$  の増加に伴う応力挙動 ( $\sigma_c/\sigma_{y0}=1.0, \theta=3\text{Deg.}$ )

結果は図 13 に示すように実験結果とよく一致している。なお、中空マークは解析結果を示し、中実マークは実験結果を示す。

(b) 成形加工過程における軸肥大変形メカニズムの解明および破損原因の究明 肥大加工部における円周方向ひずみ、ねじりせん断ひずみ、軸方向ひずみおよび半径方向ひずみの分布コンター図を図 14 に示す。以上のようなひずみ分布により、本加工法の肥大変形メカニズム、すなわち、軸圧縮力と繰返しねじりとの組合せにより軸圧縮方向のひずみが進行し、その結果として軸肥大部が生じることが明らかになった。

また、図 15 は応力分布を示し、図 16 はねじり繰返し数  $N$  の増加に伴う応力挙動を示す。肥大部表面の中央部に示している最も大きな円周方向応力およびねじりせん断応力との重畳応力により、Fig. 8 に示すようなき裂が中央部の表面から発生すると考えられる。さらに、ねじり繰返し数  $N$  の増加に伴い、軸圧縮応力が低下していくが、円周方向応力およびねじりせん断応力は増大していく。それ

らの傾向は、肥大変形が進むにつれ Fig. 8 に示すような縦き裂が発生することを示唆している。

(6) 適切な加工条件を提案した。

健全な肥大部を成形させるための適切な加工条件を以下のようにまとめる。

(a) 健全な肥大部形状を得る加工条件は、ねじり角度  $\theta$  を小さくして軸加圧力  $\sigma_c / \sigma_{y0}$  を高めにし、少ないねじり回数で加工することが望ましい。

(b) 成形挙動については、軸加圧力を大きくするにつれて、同一ねじり回数における肥大率が増加しており、軸加圧力の増加は初期加工速度の増大と同時に最大肥大率を上昇させる方法として効果的である。

(c) いずれの供試材においても、健全な加工限界がある。肥大部の表面破損を回避するため、加工条件を適切に選択する必要がある。

## 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 1 件)

1. Kengo FUJIKI, Xia ZHU, Kazuki MORI and Nagatoshi OKABE, Diameter Expansion Deformation Behavior of Midair Shaft Under Various Processing Conditions, Key Engineering Materials, Vols. 345-346, pp. 1093-1096, 2007, 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

2. 朱 霞, 岡部永年, 他 3 名, ねじり軸肥大加工法による中空軸材の被加工部の成形挙動, 第 59 回塑性加工連合講演会, 2008.11.8, 広島大学
3. 朱 霞, 岡部永年, 他 4 名, 中空軸材における軸肥大加工法の最適加工条件について, 日本機械学会中国四国支部 講演会, 2008. 3. 7, 広島大学
4. Xia Zhu, Kazuki Mori, Nagatoshi Okabe, Keiji Ogi, Local Diameter Enlargement Deformation Behaviors of Shaft under Load Conditions of Combining torsional stress and Compressive Stress, Dec. 5, 2007, Kyoto, Japan
5. 朱 霞, 岡部永年, 他 4 名, ねじり軸肥大加工法の基礎的研究, 第 15 回機械材料・材料加工技術講演会, 2007. 11. 18, 長岡
6. 朱 霞, 岡部永年, 他 4 名, ねじり軸肥大加工法の基礎研究, 日本塑性加工学会中国四国支部 第 7 回学生研究発表会, 2006.12.8, 愛媛大学
7. 朱 霞, 岡部永年, 他 4 名, 中空軸材における軸肥大加工法の適用, 日本塑性加工学会 中国四国支部 第 7 回学生研究発表会, 2006.12.8, 愛媛大学
8. Xia Zhu, Nagatoshi Okabe, Kazuki Mori,

Manabu Takahashi, Tadashi Iura, Development of New Diameter Expansion Processing Method for Hollow Shaft Under Load Conditions Combined Twist and Compression, Proceedings of Asian Symposium on Materials and Processing, Nev.9, 2006, Bangkok, Thailand

9. X. Zhu, N. Okabe, M. Kuramoto, K. Mori and T. Iura, ANALYSIS OF PLASTIC DEFORMATION BEHAVIORS DURING NOVEL ENLARGING PARTIAL DIAMETER PROCESS OF A SHAFT, Proceedings of 7th World Congress on Computational Mechanics, Jul. 19, 2006, Los Angeles, California, USA
10. 朱 霞, 岡部永年, 他 3 名, 厚肉中空軸材への軸肥大加工の応用, 日本材料学会四国支部 第 5 回学術講演会, 2006.4.21, 愛媛大学

[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]

## 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・教授

研究者番号: 20281181

高橋 学 (TAKAHASHI MANABU)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 20274334

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

H18 年度-H20 年度 科学研究費補助金より本研究が推進できて、ここで感謝の意を表します。