

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420069

研究課題名(和文) グリーンマシン対応水静圧スピンドル開発とナノ多結晶ダイヤモンドによる高硬度材切削

研究課題名(英文) Development of water hydrostatic spindle for green-machine and cutting of high hardness materials using nano-polycrystalline diamond tool

研究代表者

中尾 陽一 (Nakao, Yohichi)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：00260993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： 先端的な技術分野での需要が高まっている様々な先端材料を高精度に加工するためには、超精密工作機械が必要である。超精密工作機械の加工精度を決定する中核的な構成要素が高精度回転装置であるスピンドルである。本研究は、スピンドルに供給した水圧によって回転軸を非接触で支持可能な水静圧スピンドルを開発し、上記の分野への加工性能の向上を目指して実施したものである。

特に、スピンドルには高い軸受剛性が要求されるため、本研究では高い軸受剛性を備えたスピンドルの開発を行った。さらに、高性能化を図るため水静圧軸受にナノオーダの変位制御機能を組み込むことに成功した上、各種材料に対する切削実験を実施した。

研究成果の概要(英文)： In the high-tech industries, there are the increasing demands to machine various materials precisely including high hardness material. Ultra-precision machine tools are used in order to machine the materials. A core component of the ultra-precision machine tools that determines the machining accuracies is the spindle. In this study, a spindle with water hydrostatic bearings was designed and fabricated so that the spindle can be applied to the machining applications for the high-tech industries.

In particular, the higher bearing stiffness is an important index for the spindle. Accordingly, the design of the water hydrostatic bearings with higher bearing stiffness was carried out. Furthermore, a feedback control system of the thrust bearings with nano-meter resolutions was developed. Cutting experiments for various materials were then carried out using single crystal diamond tool and nano-polycrystalline diamond tool.

研究分野：超精密工作機械，静圧軸受，スピンドル

キーワード：スピンドル 静圧軸受 超精密工作機械 水圧システム

### 1. 研究開始当初の背景

バインダレスのナノ多結晶ダイヤモンド工具が開発されるようになり、従来は困難であった高硬度材に対する高効率高精度な微細形状超精密切削の実用化が期待できるようになった。

一方、その実現には超精密工作機械用の工具スピンドルの高速化と軸受の高剛性化の両立が必要不可欠であった。しかしながら、2つの要求を同時に満足させることは容易ではなく、これらを満たすスピンドルは内外に存在しなかった。

本研究は、高機能ガラスレンズやLEDレンズ用金型等の加工に適した高速高剛性水静圧スピンドルを開発し、ナノ多結晶ダイヤモンド切削工具を用いて、高硬度材の高効率高精度切削を目指して実施したものである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は次の通りである。

#### (1) 高速高剛性水静圧スピンドルの開発

高硬度材の高効率高精度加工の実現には、高速高剛性スピンドルと高性能切削工具が必要である。そこで、本研究では要求性能を満足する高剛性水静圧スピンドルを開発する。

開発するスピンドルは、ナノ多結晶ダイヤモンド切削工具を用いた超精密切削加工に適用することを目指しており、次のような特徴を有する。

#### (2) スピンドルへの軸変位制御機能の具備

開発するスピンドルは、水静圧軸受を組み込む。研究代表者の軸受設計技術によって、軸受単体で高剛性化が図れる。

一方、本研究では、スピンドルに組み込む水静圧軸受に変位制御機能を具備させることによって、軸受剛性の無限大化やナノメートルオーダの変位制御を行うことができる。本研究では、水静圧軸受の微小変位制御系の開発も行い、これによって開発するスピンドルの高機能化を図る。

#### (3) 完全オイルレス・水潤滑超精密加工システムの開発

開発する水静圧スピンドルは、これまでの研究において、研究代表者が開発したウォータードライブステージと共に、完全オイルレス小型超精密加工システムを構築する。これは、生産加工分野で指向されている Green Machine の概念に適合するものとなる。

#### (4) 加工実験への適用

開発したスピンドルを使用し、従前からダイヤモンド工具による超精密加工の対象とされてきた、アルミニウム合金や無酸素銅以外の各種材料に対する鏡面加工の模索を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高速高剛性水静圧スピンドルの開発

スピンドル開発に先立ち、研究代表者が導出した数学モデルに基づいて、スピンドルの

基本設計、すなわちスピンドルの主要構造と主要寸法を決定する。

さらに、スピンドル諸性能に関するシミュレーションを実施し、設計の妥当性を検討する。その上でスピンドルを製作し、実験によってスピンドル性能の評価を行う。

#### (2) スピンドルへの軸変位制御機能の具備

スピンドルに組み込まれた水静圧軸受には、最適設計された軸受絞りが組み込まれている。

一方、これに流量制御弁を併用して、水静圧軸受に供給する流量を軸受変位のフィードバック信号に基づいて制御することによって、スピンドルに微小制御機能を具備させる。

制御系の設計のために、研究代表者が導出した数学モデルを用いるとともに、実験に先立ってシミュレーションにより制御性能の検討を行う。

さらに、これを開発するスピンドルに組み込んで、実験による制御性能を評価検討する。

#### (3) 完全オイルレス・水潤滑超精密加工システムの開発

本研究によって開発した高剛性水静圧スピンドルと以前の研究において開発されたウォータードライブステージを組み合わせた完全オイルレス・水潤滑超精密加工システムを構築する。

#### (4) 加工実験への適用

従来、ダイヤモンドバイトによる鏡面加工は、アルミニウム合金や無酸素銅に対して行われるのが普通であった。

本研究では、金属ガラス、超硬合金などを加工対象にして、ナノ多結晶ダイヤモンドバイトなどによる鏡面加工実験を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) 高速高剛性水静圧スピンドルの開発

スピンドル開発においては、理論的検討によって、高い軸受剛性とスピンドルの高い熱的安定性の両立を図った。

まず、軸受剛性の仕様として、スラスト軸受とラジアル軸受に対して、それぞれ、500 N/μm、150 N/μmとした。開発したスピンドルを図1に示す。

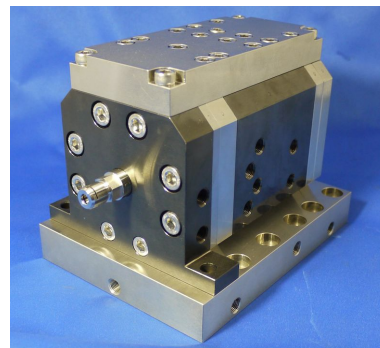


図1 開発したスピンドル

なお、本スピンドル開発においては、水静圧軸受を使用するため、潤滑効果が期待できない。これに伴うスピンドルの損傷を回避するために、主要部分は DLC による表面処理を施すことにより対処した。

#### (2) スピンドルへの軸変位制御機能の具備

スピンドルの水静圧スラスト軸受に対して、軸受への流体供給回路に流量制御弁を追加し、さらに軸受変位をコントローラにフィードバックさせた。

実験結果の一例を以下に示す。まず、図2は水静圧スラスト軸受の変位制御の結果である。この実験では、軸受変位目標値をステップ状に変化させており、スピンドル変位を10 nmの分解能で制御可能であることが確かめられた。

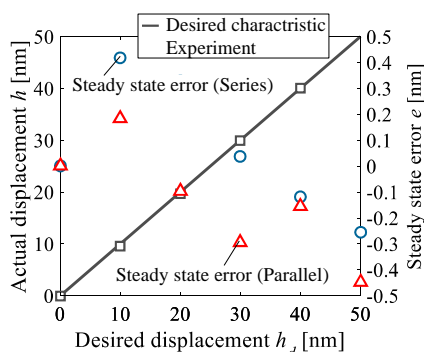


図2 水静圧スピンドルの微小変位制御

次に、スピンドルに作用する外部負荷をステップ状に変化させた実験を行った。これによれば、図3に示すように、開発した制御システムは、外部負荷の影響を効果的に補償可能なことを明らかにした。

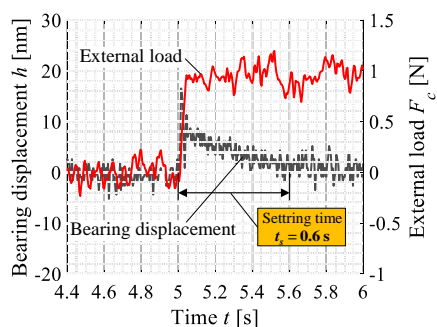


図3 水静圧スピンドルの外部負荷に対する応答

#### (3) 完全オイルレス・水潤滑超精密加工システムの開発

開発したスピンドルと研究代表者が開発したウォータードライブステージを組み合わせて、完全オイルレス・水潤滑超精密加工システムを構築した。

その上で、加工精度向上を目的にウォータードライブステージに対しては、ピッチングと送り方向に直交する上下方向の微小変位制御系を開発した。開発した制御系の妥当性を実験によって評価した。それによれば、図4

に示す通り、テーブルの運動精度の著しい向上が図れることを明らかにした。

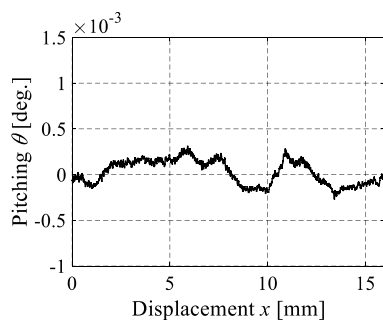


図4 ウォータドライブステージのピッチング制御性能

#### (4) 加工実験への適用

単結晶ダイヤモンド工具やナノ多結晶ダイヤモンド工具を使用して、異なる工作物材料に対して鏡面加工実験を行った。例えば、Zr 基金属ガラスに対する実験では、図5および図6に加工面を示す通り、比較的良好な鏡面創成ができることを示した。

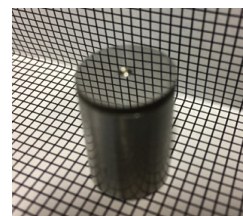


図5 金属ガラスの加工面

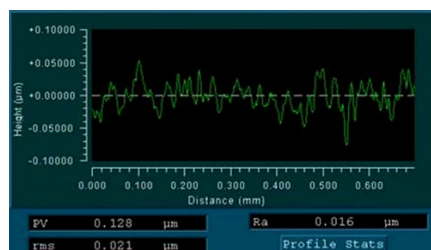


図6 金属ガラスの加工面評価結果

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

- (1) S. Shibata, A. Hayashi and Y. Nakao, Trial study on pitching and vertical displacement control of water driven stage, Proc. 16 th Intl. Conf. on Precision Engineering, (Shizuoka, 2016-11). (査読有)
- (2) A. Hayashi and Y. Nakao, Measurement and evaluation of temperature change of water driven spindle, Proc. of ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, (Phenix, 2016-11). (査読有)
- (3) S. Sakata, A. Hayashi, T. Terajima and Y. Nakao, Influence of Cutting Condition on Surface Roughness in Single Point Diamond Turning of Zr-Based Bulk Metallic Glass, Proc.

of ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, (Phenix, 2016-11). (査読有)

(3) Y. Yamada, A. Hayashi, Y. Nakao, Design of positioning control system of opposed pad water hydrostatic thrust bearings, Proc. of 31th ASPE Annual Meeting (Portland, 2016-10). (査読無)

(4) S. Shibata, A. Hayashi, Y. Nakao, Measurement of vertical displacement of water driven stage for pitching control during feed motion, Proc. of 31th ASPE Annual Meeting (Portland, 2016-10). (査読無)

(5) Y. Nakao, S. Shibata and A. Hayashi, Pitching and displacement control of water driven stage, Proceedings of 16th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 1, pp. 343-346, (Nottingham, 2016-5). (査読有)

(6) A. Hayashi, Y. Nakao, Evaluation of rotational speed control system for water driven spindle with disturbance observer, Proc. of ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, (Houston, 2015-11). (査読有)

(7) K. Nagasaka, A. Hayashi, Y. Nakao, Design of spindle supported by water hydrostatic bearings, Proc. of 30th ASPE Annual Meeting (Austin, 2015-11). (査読無)

(8) S. Shibata, Y. Torii, A. Hayashi, K. Suzuki, Y. Nakao, Trial study on attitude control of water driven stage, Proc. of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (Kyoto, 2015-10) (査読有)

(9) Y. Nakao, M. Komori, N. Makino, A. Hayashi and K. Suzuki, Displacement control of water hydrostatic thrust bearing by hybrid use of constant resistance restrictors and flow control valve, Proc. of 15th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 1, pp. 343-346, (Leuven, 2015-6). (査読有)

(10) Y. Torii, Y. Nakao and K. Suzuki, Design of speed control system of water driven stage (Influence of external load on table speed), Proc. 15th Intl. Conf. on Precision Engineering, pp.792-795, P63.pdf, (Kanazawa, 2014-7). (査読有)

(11) K. Yamada, K. Nagasaka, K. Suzuki and Y. Nakao, Design study of spindle supported by high stiffness water hydrostatic thrust bearing, Proc. 15th Intl. Conf. on Precision Engineering, pp.747-748, P47.pdf, (Kanazawa, 2014-7). (査読有)

(12) T. Higuchi, K. Suzuki and Y. Nakao, Rotational motion accuracy of water driven spindle (1st. report: Axial motion accuracy, Proc. 15th Intl. Conf. on Precision Engineering, pp.745-746, P46.pdf, (Kanazawa, 2014-7). (査読有)

(13) 中尾, 鈴木, 佐野, 長島, 鳥居, ウォー

タドライブステージの開発と速度制御, 機論, 2014-8. Vol. 80, No. 815 (2014-7). (査読有)

(14) Y. Nakao, K. Suzuki, K. Yamada, and K. Nagasaka, Feasibility Study on Design of Spindle Supported by High-Stiffness Water Hydrostatic Thrust Bearing, International Journal of Automation Technology, Vol.8, No.4 pp. 530-538, (2014-7). (査読有)

(15) Y. Nakao, K. Yamada, K. Nagasaka, K. Suzuki, Characteristics of bearing stiffness of a spindle with high stiffness water hydrostatic thrust bearing for ultra-precision machine tool, Proc. of 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 1, pp. 343-346, (Dubrovnik, 2014-6). (査読有)

[学会発表](計 31 件)

(1) 柴田, 林, 中尾, ウォータドライブステージの姿勢制御の試み - 第二報 送り動作時におけるピッチングと上下方向の変位制御 -, 日本機械学会北陸信越支部 第 54 期総会・講演会, (金沢大学(石川, 金沢), 2017-3.9)

(2) 清水, 矢口, 林, 中尾, 高い熱的安定性を有する水静圧スピンドルの開発, 日本機械学会 関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会, (東京理科大学(東京, 葛飾), 2017-3.16)

(3) 鎌田, 渥美, 山田, 林, 中尾, 複合サーボ系による静圧スラスト軸受の変位制御, (東京理科大学(東京, 葛飾), 2017-3.16)

(4) 林, 中尾, ウォータドライブスピンドルの温度測定と評価, 日本機械学会第 11 回 生産加工・工作機械部門講演会(名古屋大学(愛知, 名古屋市), 2016-10.22)

(5) 桐ヶ谷, 林, 中尾, 水静圧スピンドルの温度変化の測定, 日本機械学会第 11 回 生産加工・工作機械部門講演会(名古屋大学(愛知, 名古屋市), 2016-10.22)

(6) 矢口, 林, 中尾, 水静圧スピンドルの熱的安定性に関する基礎検討, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, S1320103.pdf, (九州大学(福岡, 福岡市), 2016-9.12)

(7) 坂田, 林, 中尾, Zr 基金属ガラスのダイヤモンド旋削加工における切りくず生成挙動の可視化, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, S1310105.pdf, (九州大学(福岡, 福岡市), 2016-9.12)

(8) 山田, 林, 中尾, 対向式水静圧スラスト軸受の変位制御系の設計, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, S1320104.pdf, (九州大学(福岡, 福岡市), 2016-9.12)

(9) 桐ヶ谷, 長坂, 林, 中尾, 水静圧スピンドルの回転中の軸受剛性の測定, 砥粒加工学会 先進テクノフェア(ATF2016)卒業研究発表会, (大田区産業プラザ(東京, 大田区), 2016-3.4)

(10) 桐ヶ谷, 林, 中尾, 超精密工作機械用に開発された水静圧スピンドルの性能評価, 日本機械学会 関東学生会第 55 回学生員卒業

研究発表講演会, 711.pdf, (東京工業大学(東京, 目黒区), 2016-3.10)

(11) 矢口, 柴田, 林, 中尾, 高速高剛性水静圧スピンドル開発を目的にした熱的安定化設計, 日本機械学会 関東学生会第 55 回学生員卒業研究発表講演会, 716.pdf, (東京工業大学(東京, 目黒区), 2016-3.10)

(12) 山田, 山田, 栗原, 林, 鈴木, 中尾, 対向式水静圧スラスト軸受の変位制御系の検討, 日本機械学会 2015 年度年次大会, (北海道大学(北海道, 札幌), 2015-9.16)

(13) 柴田, 鳥居, 林, 鈴木, 中尾, ウォータドライブステージの姿勢制御の試み-第一報 ピッチングの制御-, 日本機械学会 2015 年度年次大会, (北海道大学(北海道, 札幌), 2015-9.16)

(14) 長坂, 林, 中尾, 高硬度材の超精密加工用水静圧スピンドルの設計, 日本機械学会 関東支部第 2 1 期講演会, (横浜国立大学(神奈川, 横浜), 2015-3.20)

(15) 山田, 長坂, 山田, 栗原, 林, 鈴木, 中尾, 水静圧スピンドルのスラスト軸受剛性に及ぼす水圧による変形(軸受変位時の軸受変形の影響), 日本機械学会 関東支部第 2 1 期講演会, (横浜国立大学(神奈川, 横浜), 2015-3.20)

(16) 山田, 栗原, 山田, 林, 鈴木, 中尾, 高剛性水静圧スピンドルの性能評価と軸受剛性の無限大化制御, 日本機械学会 関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会, (横浜国立大学(神奈川, 横浜), 2015-3.20)

(17) 坂田, 熊田, 林, 中尾, ハイスピードカメラによるダイヤモンド旋削加工の可視化, 日本機械学会 関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会, (横浜国立大学(神奈川, 横浜), 2015-3.20)

(18) 柴田, 鳥居, 中尾, 林, 鈴木, ウォータドライブステージの速度および姿勢制御, 日本機械学会 関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会, (横浜国立大学(神奈川, 横浜), 2015-3.20)

(19) 長坂, 山田, 山田, 林, 中尾, 水静圧スピンドルのスラスト軸受剛性に及ぼす水圧による変形, 日本機械学会 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, (徳島大学(徳島, 徳島), 2014-11.22)

(20) 林, 樋口, 中尾, 切削負荷による外乱を考慮したウォータドライブスピンドルの回転数制御モデルの検討, 日本機械学会 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, (徳島大学(徳島, 徳島), 2014-11.22)

(21) 長坂, 山田, 林, 鈴木, 中尾, 水静圧スピンドルのスラスト軸受剛性に及ぼす水圧によるスピンドル変形の影響, 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集, S1310103.pdf, (東京電機大学(東京, 足立), 2014-9.8).

(22) 小森, 牧野, 鈴木, 中尾, 比例弁による片側式水静圧軸受の変位制御, 日本機械学会 北陸信越支部第 51 期総会・講演会講演論文集, OS050503.pdf (富山県立大学(富山, 射

水), 2014-3.8).

(23) 山田, 長坂, 鈴木, 中尾, 水静圧スピンドルのスラスト軸受剛性の測定, 日本機械学会 関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集, 20405.pdf (東京農工大学(東京, 小金井), 2014-3.14).

(24) 樋口, 鈴木, 中尾, ウォータドライブスピンドルの軸方向の回転精度測定, 日本機械学会 関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集, 21103.pdf (東京農工大学(東京, 小金井), 2014-3.14).

(25) 熊田, 広瀬, 鈴木, 中尾, 流体駆動スピンドルの軸方向の回転精度測定, 日本機械学会 関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集, 21104.pdf (東京農工大学(東京, 小金井), 2014-3.14).

(26) 王子, 鈴木, 中尾, 高速スピンドルのための水静圧スラスト軸受設計に関する基礎的検討, 日本機械学会 関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集, 21105.pdf (東京農工大学(東京, 小金井), 2014-3.14).

(27) 鳥居, 鈴木, 中尾, ウォータドライブステージの応答性向上のための速度制御系設計, 日本機械学会 関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集, 20921.pdf (東京農工大学(東京, 小金井), 2014-3.14).

(28) 牧野, 小森, 中尾, 鈴木, 水静圧スラスト軸受の高剛性化のための軸受絞りの設計法, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, (岡山大学(岡山, 岡山), 2013-9.11).

(29) 山田, 中尾, 鈴木, 高剛性水静圧スピンドルの設計, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, (岡山大学(岡山, 岡山), 2013-9.9).

(30) 鳥居, 佐野, 中尾, 鈴木, ウォータドライブステージの速度制御系設計 第四報: 速度制御に及ぼす負荷の影響, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集 (岡山大学(岡山, 岡山), 2013-9.9).

(31) 樋口, 原田, 中尾, 鈴木, ウォータドライブ加工システムの開発と性能評価 第一報: 水の圧力脈動の影響, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, (岡山大学(岡山, 岡山), 2013-9.9).

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.mech.kanagawa-u.ac.jp/lab/nakao\\_lab/index.html](http://www.mech.kanagawa-u.ac.jp/lab/nakao_lab/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中尾 陽一 (NAKAO YOHICHI)  
神奈川大学・工学部・教授  
研究者番号: 00260993

### (2) 研究分担者

林 晃生 (HAYASHI AKIO)  
神奈川大学・工学部・特別助教  
研究者番号: 50734430