

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560147

研究課題名(和文)切込み機構内蔵水静圧砥石スピンドルの開発

研究課題名(英文)Development of wheel spindle equipped with wheel infeed system

研究代表者

由井 明紀(YUI, AKINORI)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・教授)

研究者番号：70532000

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文):切込み機構内蔵水静圧砥石スピンドルを試作した。切込み方向の位置は、静電容量式センサでモニタし、磁気アクチュエータにフィードバックする。静圧軸受の作動媒体には水を用いることにより、環境対応型システムとした。試作スピンドルの回転精度は $0.23\mu\text{m}$ 、スラスト方向の静剛性 $1060\text{N}/\mu\text{m}$ を実現した。試作したスピンドルを立軸ロータリー研削盤に搭載し、#3000のダイヤモンド砥石で450mmシリコンウエハ研削を行い、 2nmRa の面粗さを実現した。

研究成果の概要(英文): A wheel spindle equipped with both rotary motion and axial infeed motion is developed. Since axial spindle position is monitored by using a capacitance type gap sensor and fed back to the linear actuator, axial spindle position can be precisely controlled even when variety of axial force is loaded during grinding. Due to the radial bearing employed water for working fluid, this system is environmental free. Rotational accuracy of the spindle is 0.23 micrometer , and static stiffness of axial direction was 1060 N/micrometer . As the results, surface roughness of ground silicon wafer, using the grain size of 3000 diamond wheel, was 2nmRa .

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：静圧軸受 リニアアクチュエータ 大口径シリコンウエハ 研削盤 静電容量式センサ

1. 研究開始当初の背景

国際半導体技術ロードマップ (ITRS2012) によると、2014年には 450mm 大口径ウエハの実用化が想定されている。大口径ウエハを高精度に研削加工するために、高精度な砥石切込み装置を搭載した、従来技術では達成できない高剛性な研削盤を開発する必要がある。図 1 (a) に示すように、従来の研削盤では、砥石軸は砥石軸頭とともに案内面に沿って送りが与えられる。この構造では、砥石軸はハウジング内部のラジアル及びスラスト軸受、砥石軸頭とコラムの案内面など、多くの軸受を必要とし、研削盤の原価高やループ剛性の低下を招いている。

一方、地球環境を保護するため、鉱油を使用しない工作機械の開発が望まれ、半導体業界以外でも被削材の汚染防止を目的としたオイルフリーの加工環境が求められている。一般に、高精度な工作機械には静圧軸受が使用されているが、圧縮性のある空気を作動媒体とする静圧軸受では剛性が不十分であり、油静圧軸受では環境問題が残る。一方、水静圧軸受では、上記要求を満たすことができ、その研究・開発は一部で行われているが、多くの研究課題を残している。

2. 研究の目的

そこで、本研究では 450mm ウエハ研削盤に搭載できる「切込み機構内蔵水静圧砥石スピンドル」を開発し、その性能を評価することを目的とする。

開発するシステムは、回転機構と切込み機構を一体化して案内面の数を削減することにより、システム構造の単純化と高剛性化を実現する。また、水を静圧軸受の作動媒体に用いることにより、環境対応型システムを実現する。

3. 研究の方法

3-1 切込み機構内蔵砥石スピンドルの設計

スピンドルの高剛性化のために本研究では、図 1 (b) に示すような切込み機構を内蔵する砥

石スピンドルを提案する。この構造では、軸受の数を減らすことができるのでコストダウンを実現し、研削盤の剛性低下を抑制することが期待できる。以下に、切込み機構内蔵砥石スピンドルのスラスト軸受に使用する磁気アクチュエータの構造及び砥石スピンドルの仕様・構造について述べる。

3-2. 磁気アクチュエータの構造

一般的な磁気アクチュエータ (リニアモータ) はローレンツ力を利用しており、比較的広範囲なストローク制御が可能であるが、力密度が低い場合負荷容量も低くなる。一方、研究協力者の Lu らは、図 2 に示す高い磁気密度、高加減速度を發揮できるソレノイドタイプの磁気アクチュエータを開発した。このアクチュエータは 12 個のパーツからなる円形のネオジウム磁石、2 個のコイル、ステータ及び電機子で構成される。ネオジウム磁石は、電機子に流れ込むステータからのバイアス磁束 (破線) を導く役割を果たす。2 個のコイルは励振磁束 (実線) がステータと電機子のみを通過するように導いている。この励振磁束は、電機子上下表面に生じる磁束を変化させ、以下に示す駆動力 F を生じさせる。

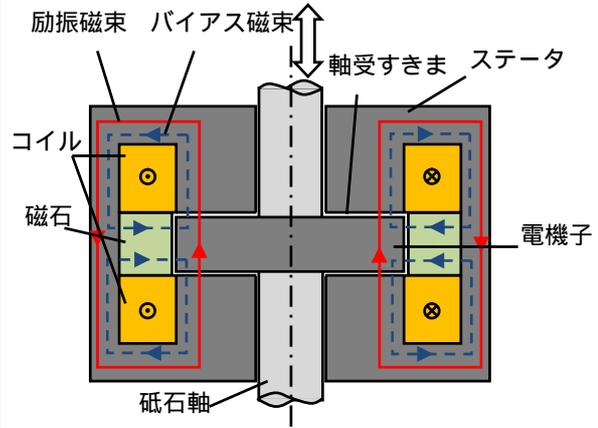
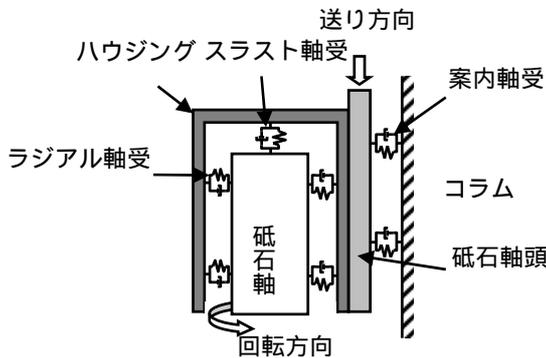
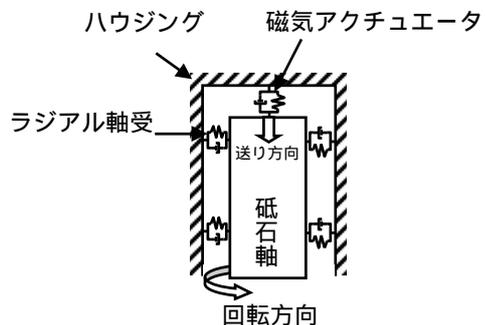


図 2 磁気アクチュエータの構造



(a) 案内面を介する砥石スピンドル



(b) 切込み機構内蔵砥石スピンドル

図 1 砥石軸送り機構

$$F = \frac{\overline{AB}N}{z_0}i + \frac{2\overline{AB}^2}{\mu_0 z_0}z \quad (1)$$

ここで、 A は磁極面積、 \overline{B} はネオジウム磁石からのバイアス磁束密度、 N はコイルの総巻数、 μ_0 は空気の透磁性、 z_0 は電機子が中心に位置するときの軸受すきま、そして z は電機子の変位量を示す。すなわち、磁気アクチュエータの駆動力 F は電流値 i に対して線形の特徴を持っており、砥石軸を高精度に軸方向に移動できる。実機に使用した磁気アクチュエータの仕様を表 1 に示す。

4. 研究成果

4-1. 切込機構内蔵砥石スピンドルの仕様

前項で述べた磁気アクチュエータを搭載して新たに開発した砥石スピンドルの構造を図 3 に、その仕様を表 2 に示す。砥石スピンドルは機能別に磁気アクチュエータ(切込機構)部、ビルトインモータ部、水静圧ラジアル軸受部の 3 部分に分けられる。これらの機能により、砥石スピンドル単体で砥石軸の回転と送りを可能としている。ビルトインモータ及び定圧水静圧軸受部分のハウジング外周はウォータジャケットに覆われており、冷却用水用チャラーによって温度を調整された水が循環し砥石スピンドルの温度変化を抑制する。

ラジアル軸受には水静圧軸受を採用し、スラスト軸受に磁気アクチュエータを採用したことで、砥石軸のみがスラスト方向に最大 1.4mm ストロークで運動し、ウエハに対し切込みを与え、かつ内蔵したビルトインモータにより 700~2500rpm で回転する。

スラスト方向の位置決めは、砥石軸上端に取り付けられたボールターゲットを基準とし、静電容量型変位計(ADE 製, MicroSense6810)によりその相対位置を測定するフルクローズドループ制御により行い、最小送りの分解能は 10nm である。なお、磁気アクチュエータの設計軸受すきまは 1.5mm、最小軸受すきまが 50 μ m なので、砥石軸のストロークは操作盤上で軸位置 50~1450 μ m までの間となる。ここで、この砥石スピンドルを研削に使用する際の回転数を求める。使用する砥石径 $D=500$ mm、砥石周速度 $V=2000$ m/min であるから、

$$\frac{V}{\pi \times D} = \frac{2000}{\pi \times 0.5} = 1273 \approx 1300 \quad (2)$$

となり、使用する砥石回転数は 1300rpm 程度となる。

4-2 砥石スピンドルの静剛性

砥石スピンドルの静剛性測定方法を図 4 に

示す。測定は環状バネ型力計(東京衡機製造所製, AT-4103)を使用し、砥石軸に負荷 W_3 を順次負荷(0~1985N)した時の砥石軸先端の変位を電気マイクロメータにより測定し、 W_3 の値と変位から砥石スピンドルの静剛性 K_s を求める。図 5 に示す実験結果に対し、最小二乗法により近似線を求め、その傾きを静剛性 K_s としたところ、 $K_s=1.06$ kN/ μ m となった。この値は、砥石切込機構の静剛性も含まれており、砥石スピンドルのスラスト方向の静剛性 K_s は、設計仕様を満たしている。

表 1 磁気アクチュエータ各部の仕様

ネオジウム磁石の磁束密度 [T]	1.3
磁石 内径×外径×厚さ [mm]	129×205×20
コイル巻き数 [巻]	78
コイル数 [個]	32
コイル 内径×外径×厚さ [mm]	125×203×2
ステータ内側磁極面積 [mm ²]	7464
ステータ外側磁極面積 [mm ²]	12240
最大軸受すきま [mm]	1.5
電機子 外径×厚さ [mm]	126×25

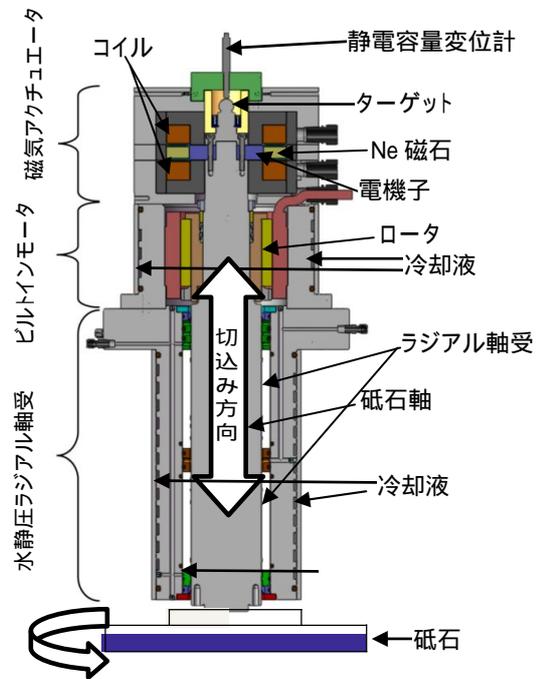


図 3 切込機構内蔵砥石スピンドルの構造

表 2 切込機構内蔵砥石スピンドルの仕様

回転数	700~2500rpm	
定格モータ出力	11kW	
定格回転トルク	70N・m	
ストローク	1.4mm	
送り速度	0.010~0.999mm/min	
最小送り	10nm	
軸受形式	スラスト	磁気
	ラジアル	定圧方式水静圧

4-3 軸方向位置決め精度の測定

砥石スピンドルに内蔵された切込機構の性能を確認するため、砥石軸をストロークさせたときの指令値に対する送りの位置偏差および微小送り追従性能を測定する。測定・記録は最小分解能 1nm のレーザ測長器（RENISHAW 製，XL-80）を使用する。砥石軸先端に反射鏡を固定し，ワークテーブル外部の台上に干渉計を設置する。レーザ発振器は機外に設置し，測定を行う。測定時の室温は 22℃，湿度は 46% である。

測定時，砥石スピンドルは砥石を外した状態とし，砥石軸は回転させない。なお，以下の測定は JIS B 6190-2（工作機械試験方法通則 - 第 2 部：数値制御による位置決め精度試験）に基づいて実施する。ここでは，試作機の性能評価を容易にするために送りの指令値と位置偏差について測定した結果を述べる。

軸方向送り時の位置偏差を測定するために，砥石軸を送る指令値に対して砥石軸が実際に停止した位置との偏差を求める。すなわち，砥石軸を原点方向へ 150 μm ずつ送り，1.05mm のストロークを 5 往復させた時の砥石軸先端の移動量を測定する。この時，送り速度は 0.999mm/min とする。なお，ストロークの上下限においてバックラッシュ測定分 150 μm の送りを与えるが，本システムにはバックラッシュが存在しないためその影響はない。

軸方向送り時の位置偏差の測定結果を図 6 に示す。指令値に対する位置偏差の平均値は最大 10.6 μm ，位置決め精度の再現性は $\pm 0.5\mu\text{m}$ である。一般に，砥石軸の位置偏差による加工精度への影響を小さくするためには，この測定データを用いて補正処理を行う必要がある。しかし，本ウエハ研削盤の場合，ウエハ厚さを常にモニタして，チャック上面の

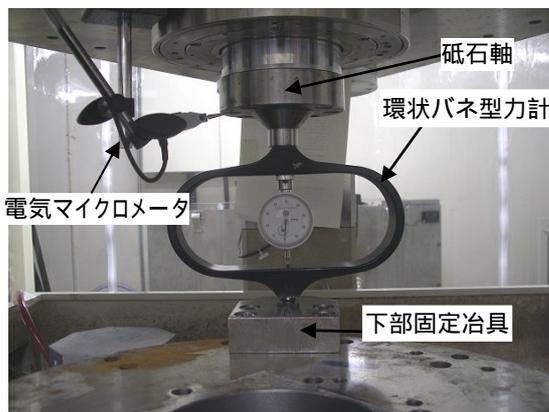


図 4 砥石スピンドルの静剛性測定方法

基準位置との比較測定により仕上り寸法を管理するため，全ストロークにおける位置決め精度誤差は実用上問題にはならない。

4-4 砥石スピンドルのスラスト方向変位

砥石スピンドルの回転が研削加工に与える影響を調べるために，砥石スピンドル回転時のスラスト方向の変位を測定した。測定の様子を図 7 に示す。砥石スピンドルの回転軸に

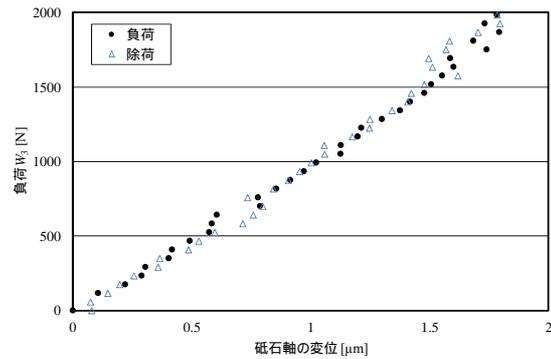


図 5 スピンドル静剛性の測定値

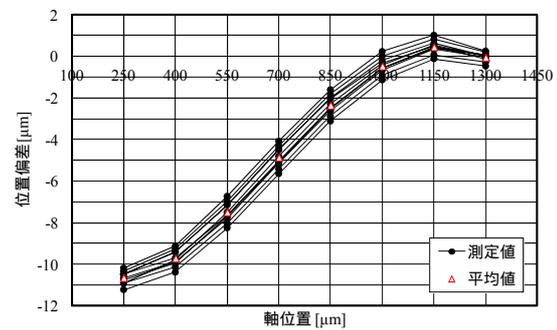


図 6 軸方向送り時の軸位置と位置偏差測定例
(送り速度 0.999mm/min，送り量 150 μm ，
ストローク 1.05mm，5 往復)

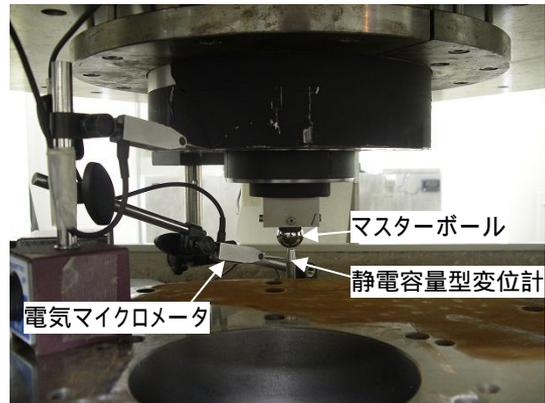


図 7 スピンドル回転時のスラスト方向変位測定

表 3 各部の温度上昇量（チラー設定温度軸受用：15℃，冷却用：10℃）

測定場所	軸受供給水	軸受排出水	ハウジング表面	砥石軸表面
停止間の平均温度 [℃]	23.7	21.2	16.6	19.8
回転間の平均温度 [℃]	25.3	28.0	21.3	29.6
温度上昇量 [℃]	1.6	6.8	4.7	9.8

マスターボールを設置し、その頭頂部に静電容量型変位計を配置することで砥石スピンドル回転時のスラスト方向変位を測定する。このとき、軸受用チラー及び冷却水用チラーの設定温度は共に 20 に設定する。

回転により生じる熱が砥石スピンドル回転時のスラスト方向変位に与える影響を調べるため、砥石スピンドル各部の温度変化も測定する。砥石スピンドルの表面はサーモグラフィ測定における反射を防ぐため、表面に反射防止テープを貼り、回転開始から 10 分毎に赤外線カメラ (FLIR 製, E50) で表面温度を測定する。この際、ハウジング表面を測温スポット 1、砥石軸表面を測温スポット 2 とする。また、水静圧軸受への水の供給口と排出口の水温を熱電対 (nimblox 製, K-316 及び T-316) で測定する。

水温測定は、配水管内に熱電対を挿入して行う。軸位置は 390 μm 、砥石スピンドル回転数は回転時の発熱量が大きいと考えられる 2000rpm とする。

砥石軸先端の変位及び各温度の測定結果を

図 8、各部の温度上昇量を表 3 に、赤外線カメラで撮影した砥石スピンドル表面温度の変化を図 9 に示す。砥石軸先端の変位が一定化するまで 240 分間砥石軸を回転させた。変位が一定化したため回転を停止したところ、変位は減少に転じている。同様に、回転開始とともに軸受から排出される水温と砥石スピンドルの表面温度が上昇しており、回転停止とともに降下しているのが確認できる。このことから、砥石軸のスラスト方向変位は回転時に生じる熱による熱膨張が大きな原因の一つと推定される。なお、軸受排水の方が軸受供給水より温度が低いのは、構造上ハウジング冷却水の影響を受けるためである。

4-5. ラジアル方向回転精度の測定

砥石スピンドルのラジアル方向回転精度を真球度 0.05 μm のマスターボールを使用して測定する。測定の様子を図 10 に示す。瞬間接着剤によりボール固定器具に接着したマスターボールを砥石軸先端に取り付け、回転軸中心に配置するように微調整する。砥石軸回転数は 700, 1300, 2000rpm とし、軸位置下部 150, 中部 750, 上部 1350 μm について測定する。図 11 に砥石スピンドル回転数 1300rpm、軸位置 750 μm における回転精度の一例を示す。この時のスピンドル回転精度は 0.23 μm であった。ただし、砥石スピンドルの回転精度は、ラジアル方向の砥石軸の振れであり、ウエハ

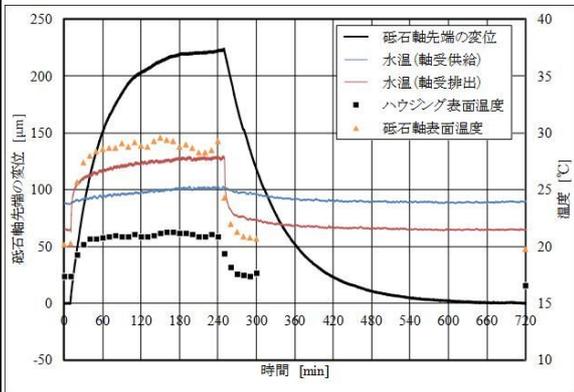
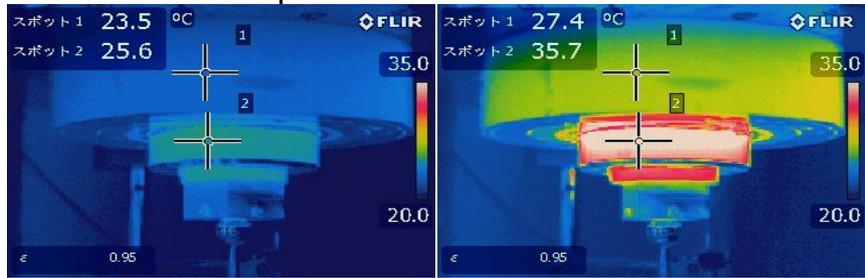


図 8 砥石軸先端の変位及び各温度の測定結果 (回転数 2000rpm, 室温 20, チラー水温設定温度: 軸受用 15, 冷却用 10)



(a) 砥石軸回転前 (b) 砥石軸停止直後

図 9 砥石スピンドル表面温度の時間変化 (回転数 2000rpm, 回転時間 150min)

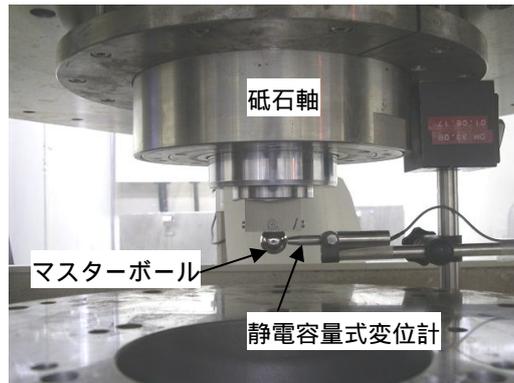


図 10 砥石スピンドルの回転精度測定

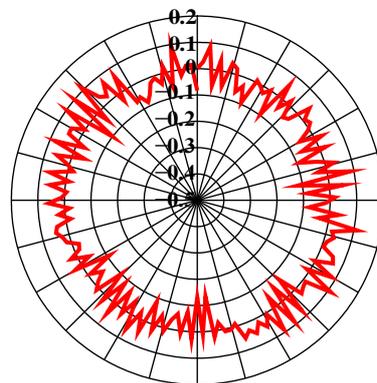


図 11 砥石スピンドルの回転精度測定結果 (マスターボール真球度誤差を含む) 回転数: 1300rpm, 軸位置 750 μm , 1 周分

の加工精度に直接影響を与えることはない。

4-6. 結論

φ450mm 大口径シリコンウエハ加工用ロータリ平面研削盤に搭載する切込機構内蔵砥石スピンドルの設計・試作をし、試作した砥石スピンドルの基本性能を測定した。試作した砥石スピンドルは以下の性能を有する。

- 1) 静剛性 K_s 1.06kN/ μ m
- 2) 固有振動数 353Hz
- 3) ストローク時の指令値に対する位置偏差：最大 10.6 μ m
- 4) 微少送り追従性能 0.2 μ m
- 5) ラジアル方向の回転精度 0.23 μ m(1300rpm, 軸位置 750 μ m)

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)

[学会発表](計 4件)

1. 小祝智之, 本多歩, 岡畑豪, 北嶋孝之, 由井明紀, 奥山繁樹, 小林久志, A.H.Slocum, 450mm 大口径ウエハ研削盤の開発, 日本機械学会, 第9回生産加工・工作機械部門講演会(秋田県立大学, 2012.10)
2. A.Yui, A.Honda, S.Okuyama, T.Kitajima, G.Okahata, H.Saito, A.H.Slocum, Development of Vertical-spindle Rotary Surface Grinding Machine for Large Scale Silicon-wafers -Machine specifications and performance of rotary-worktable, 13th International Conference of the European Society for Precision Engineering, (Berlin, 2013.5).
3. 本多歩, 北嶋孝之, 由井明紀, 軸送り機能を有するスピンドル装置の開発, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (関西大学, 2013.9).
4. A.Yui, A.Honda, T.Kitajima, H.Saito, X.Lu, A.H.Slocum, Development of Vertical-spindle Rotary Surface Grinding Machine for Large Scale Silicon-wafers -Static stiffness of grinding spindle and worktable, 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering, (Dubrovnik, 2014.6).

6. 研究組織

(1)研究代表者

由井明紀 (YUI AKINORI)

防衛大学校・システム工学群・教授

研究者番号：70532000

(2)研究分担者

北嶋孝之 (KITAJIMA TAKAYUKI)
防衛大学校・システム工学群・講師
研究者番号：50546174

(3)研究分担者

岡畑 豪 (OKAHATA GO)

防衛大学校・システム工学群・助教

研究者番号：80546169