

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06107

研究課題名（和文）定流量水静圧軸受用の低流量ポンプシステムの開発

研究課題名（英文）Development of low-flow pump for constant flow water hydro-static bearing

研究代表者

由井 明紀 (Yui, Akinori)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：70532000

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：ウエハ加工用ロータリ研削盤の静圧軸受に搭載するための、定流量で、脈動が少なく、低流量で駆動できる単純構造な作動流体供給システムを新たに開発し、その性能を評価した。本実験の範囲内では、歯車ポンプより、シリンダポンプの方が定流量性能は高いことを明らかにした。本実験装置では、質量56.2kgを搭載した際のテーブル静剛性は28.456N/ μm であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高精度加工が要求される半導体製造分野では、ウエハの汚染を嫌う。一方、半導体加工機の案内面には静圧軸受の採用が必要となり、近年の大口径化、ウエハの難削化に伴い高剛性な静圧軸受が求められている。本研究では、シリンダポンプを用いた定流量水静圧システムを試作・評価し、今後の実用化の道を開いた。

研究成果の概要（英文）：We developed a simple structure working fluid supply system that can be driven at low flow rates with a constant flow rate and low flow rate for mounting on static pressure bearings of rotary grinders for wafer processing, and evaluated its performance. Within the scope of this experiment, it was clarified that the cylinder pump had a higher constant flow rate performance than the gear pump. In this experimental device, the table static rigidity when equipped with a mass of 56.2 kg was 28.456N/ μm .

研究分野：工学

キーワード：静圧軸受 水道水 定流量軸受 シリンダポンプ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

高精度加工が要求される半導体製造分野では、ウエハの汚染を嫌うため、鉱油の使用は忌避されている。一方、半導体加工機の案内面には静圧軸受の採用が必要となるが、作動媒体に鉱油を使用した油静圧軸受は使用できない。大口径ウエハの研削盤では、高剛性な静圧軸受を必要とし、圧縮性のある空気静圧軸受では対応が困難である。

そこで、作動流体に水を媒体とした水静圧テーブルを搭載した半導体加工機の開発が求められている。作動流体として水を使用した場合、①粘度の温度依存性が低く、②資源は豊富で、③作業環境の汚染を避けるなどの長所がある。

近年、半導体加工機に搭載するための水静圧軸受に関する期待が高まり、国内では、吉本ら（東京理科大）、および中尾ら（神奈川大）のグループから活発な研究成果が報告されている。しかし、これらの研究はオリフィスや毛細管を必要とする定圧力軸受方式を採用している。すなわち、鉱油を作動媒体とした場合には十分な性能を発揮できるが、水を作動媒体とする場合にはバクテリアやゴミが配管中の狭窄部に詰まるなどの故障要因があり、水静圧軸受との相性が悪いと考えられる。

筆者らは、**図1**に示す小型歯車ポンプを用いた定流量水静圧軸受を搭載した450mmウエハ用ロータリ研削盤を開発した（基礎研究(C)23560147）。さらに、水静圧砥石軸をスラスト方向に揺動させることにより、総加工時間の短縮を試みた（基礎研究(C)26420069）。

これらの実験の結果、定流量水静圧軸受は、バクテリアが詰まる恐れがない上に、静剛性や減衰性に優れることを明らかにした。

一方、定流量水静圧軸受では、軸受リセス数と同数のポンプおよび駆動用モータを必要とするため、システムは複雑かつコスト高になる短所がある。また、市販の小型歯車ポンプは頻繁に故障する。さらに、歯車ポンプに起因する微小な脈動がテーブル上面まで伝わるのがわかった。



図1 開発した 450mm ウエハ用ロータリ研削盤

2. 研究の目的

本研究では、ウエハ加工用ロータリ研削盤の静圧軸受に搭載するための、定流量で、脈動が少なく、高揚程かつ低流量で駆動できる単純構造の低流量な定流量ポンプシステムを新たに開発し、その性能を評価する。

- (1) 大口径ウエハ研削盤に搭載するのを前提として、シリンダポンプの設計&試作を行う。作動流体として水を使用するため、錆の発生がない材料を選定する。
- (2) 既存の歯車ポンプと同等の仕様を満足することを想定し、試作ポンプの性能を評価する
- (3) 複数のポンプを水静圧研削盤テーブルに搭載し、定流量静圧テーブルシステムとしての性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) シリンダポンプの設計・試作

本研究で試作する水静圧軸受用定流量ポンプには SUS304 ステンレス製のシリンダポンプを採用する。シリンダ内径は 30 mm、ポンプストロークは 180mm で、静圧軸受への作動流体の供給量はサーボモータ(KEYENCE, SV2-M010AS)によるボールねじ送り速度を制御してピストンの送り速度を制御することにより、定流量で作動流体を供給する。

図2にポンプの断面図を示す。**表1**に試作した水静圧軸受用定流量ポンプの仕様を示す。ウエハ研削の加工サイクルタイムは 5 分を超えることはないため、実用上は1 工程が 5 分以上になるシリンダ容積を確保すれば仕様を満足するこ

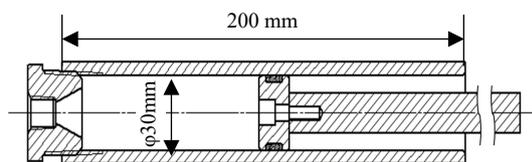


図2 ポンプの断面図

表1 試作ポンプシステムの仕様

仕様	単位	値
シリンダ径	[mm]	30
ストローク	[mm]	180
シリンジ体積	[mL]	127
ボールねじリード	[mm]	1
サーボモータ回転数	[min ⁻¹]	0~6000
モータ1回転当りの流量	[mL/rev]	0.7
作動流体		水

とができる。そこで、作動流体を最大 2mL/s で 5 分間連続供給することを想定して、シリンダの有効体積は 600mL とする。

図 3 に試作した水静圧軸受用シリンダポンプの構成を示す。水静圧軸受用定流量ポンプのシリンダ本体は、それぞれ直動ガイド (THK 製 SKR S/N) に固定し、DC サーボモータとボールねじにより駆動させる。サーボモータは、それぞれの AC サーボアンプ (KEYENCE 製 SV2-010L2) と CPU ユニット (KEYENCE 製 KV7500) によって制御される。

試作したシリンダポンプはピストンを前進させることにより水を吐出したあと、ピストンを後退させてシリンダ内に水を補充する。簡易的にこの動作を行うため、図 4 に示すようにポンプの先に T 字路を設け、レバーの切り替えによって水の流れを変える。すなわち、給水と排水を別々のチューブで行うことによって給水側には水槽、排水側にはテーブルに接続し、軸受に断続的に機能させることができる。

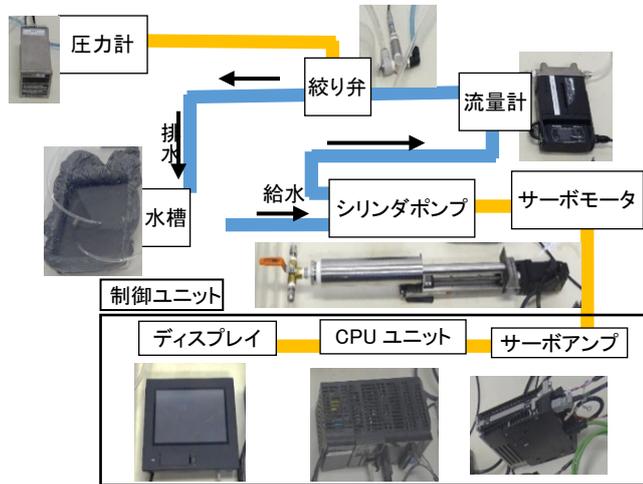


図 3 水静圧軸受用シリンダポンプの構成



図 4 水流切り替え装置

(2) 水静圧定流量テーブルシステムの設計・試作

図 5 に試作ポンプシステムを搭載したテーブルシステムの概観を示す。システムは、1.5L の水タンク、4 式のシリンダポンプ、4 式の流量計 (KEYENCE 製 コリオリ式デジタル流量センサ FD-SS02A)、そしてアクリル製テーブルから構成され、それぞれは硬質配管チューブで繋がれている。

図 6 にアクリル制定流量水静圧テーブル部の概観を示す。テーブル寸法は、縦幅 500mm × 横幅 500mm × 厚さ 50mm である。テーブルの浮き上がり量は、静電容量型非接触変位センサ ECL100 (LION PRECISION 製) を用いて計測し、メモリーハイコーダ (HIOKI 製 8860) で記録した後、Excel でデータ処理する。上側のアクリル製テーブルには、図 7 に示すように深さ 1mm 直径 100mm のリセスを配置し、均等に負荷がかかる構造に設計している。

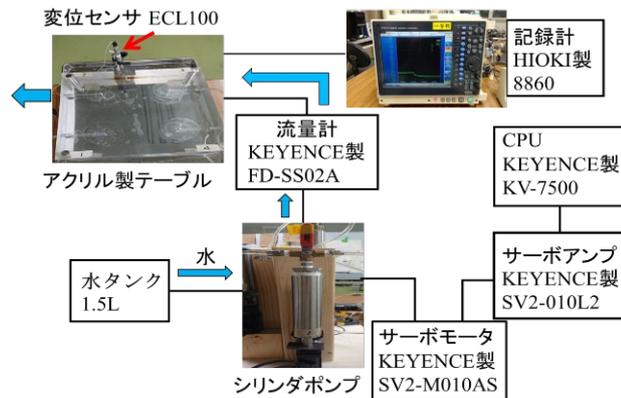


図 5 試作テーブルシステムの概観

4. 研究成果

最初に、単体のシリンダポンプ性能を評価する。次に、4 個のシリンダポンプを搭載し、テーブルシステムとしての基本性能を評価する。

(1) シリンダポンプの性能評価

表 2 に示す実験条件の下で、試作シリンダポンプの定流量性能を評価する。まず、ポンプの出口に絞り弁を取り付け、絞り弁により背圧 P を変化させた際の流量 Q と背圧 P の関係を測定する。

背圧は圧力測定装置 (KYOWA 製, WGA-670B) で測定し、流量はコリオリ式デジタル流量計 (KEYENCE 製, FD-SS02A) で測定する。背圧は 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa いずれも 3 回測定

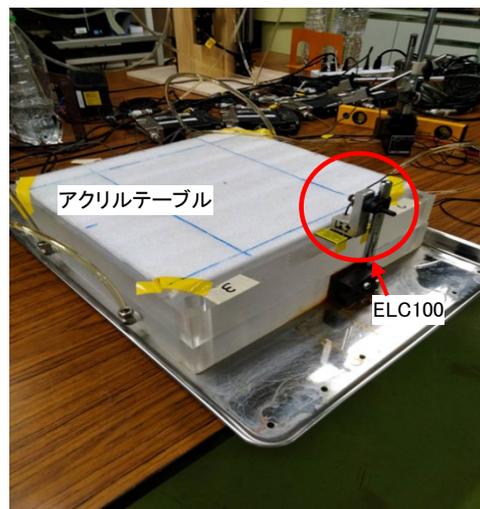


図 6 定流量水静圧テーブル

し、それぞれの背圧 P 、流量 Q の関係を記録する。3 回測るとに絞り弁を緩めて背圧を 0 kPa に戻し、各部の圧力を均一化させる。また、流量は背圧 0 kPa 時の流量を基準とし、各背圧時の流量を測定する。

図 8 にシリンダポンプシステムにおける各背圧 P に対する吐出流量 Q の変化を示す。背圧 0~200kPa までの範囲内では、いずれの条件においても背圧 P を変化させても流量 Q は変化することなくほぼ一定であった。すなわち、流量 Q は全く低下せず、その減少率は流量 $Q=0.8$ mL/s の場合、ポンプ使用域 (80~160 kPa) での 0% であった。

比較のために、前述の水静圧ロータリ研削盤に採用した歯車ポンプの各背圧における吐出流量の変化の測定結果を図 9 に示す。背圧 P の上昇に伴い流量 Q は低下する傾向があり、減少率は流量 $Q=0.8$ mL/s の場合、ポンプ使用域 (80~160 kPa) での 4% 程度であった。

すなわち、図 8 と図 9 を比較すると、歯車ポンプでは背圧 P の上昇に伴い流量 Q が低下するが、シリンダポンプではそれが見られなかった。今回試作したポンプシステムでは、ボールねじの回転数を制御して流量制御しているため送り系の剛性が高くなり、背圧がかかっても流量は低下せず、定流量軸受用ポンプとして適している。また、歯車のような狭窄部がないため、水中に発生したバクテリアやゴミが詰まる恐れもなく、水静圧軸受に有効であると考えられる。

(2) 定流量水静圧テーブルの静剛性

図 10 に示すように、アクリル製テーブルの上に、2 枚の重りを順次に搭載・除去した際のテーブルの浮き上がり量を計測することにより、水静圧テーブルシステムの静剛性を計算する。

本実験では、何も搭載せずテーブルの質量のみが負荷となる状態を (ア) 9.4 kg、おもりを 1 個乗せた状態を (イ) 23.6 kg、おもりを 2 個乗せた状態を (ウ) 23.2 kg としてテーブル浮き上がり量および静剛性を測定する。

実験中シリンダポンプから送る作動流体の供給流量、サーボモータ回転数、ポンプ送り速度の関係を表 3 に示す。各流量で、状態 (ア)、(イ)、(ウ) における浮き上がり量の計測を行う。この場合、ランド部に水が残っていると正確な浮き上がり量が測れないので、実験ごとに水が抜け切った状態で上下のテーブルが密着した状態を基準点として計測する。計測は、そ

表 3 作動流体供給量

ポンプの流量 [mL/min]	67	135	202	270
サーボモータ 回転数[rpm]	95.7	192	286	382
ポンプ送り速度 [mm/s]	1.59	3.18	4.62	6.04

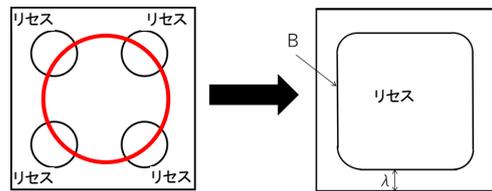


図 7 テーブルのリセス配置

表 2 実験条件

背圧 P [kPa]	50~200
流量 Q [mL/s]	0.2~2.5

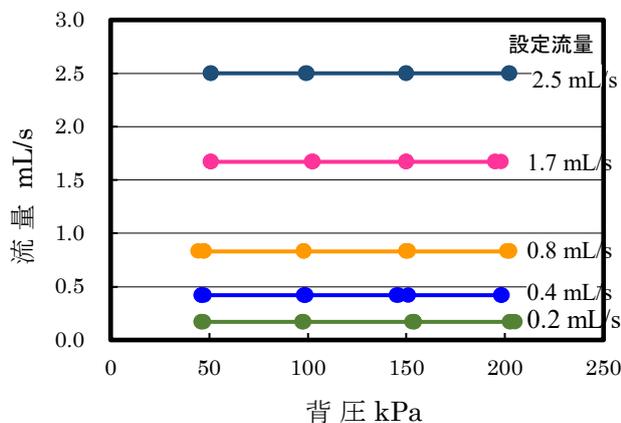


図8シリンダポンプの背圧 P と流量 Q の関係

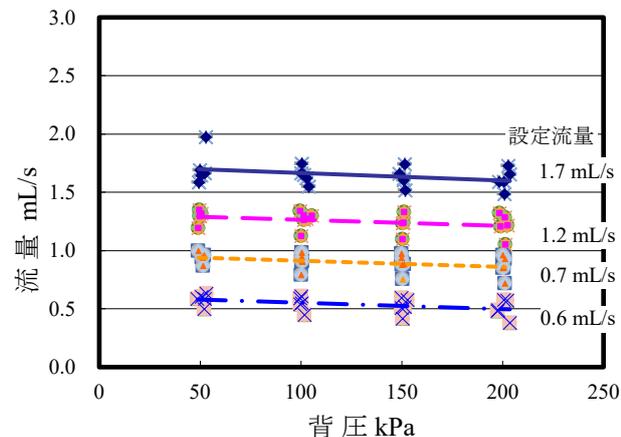


図 9 歯車ポンプの背圧 P と流量 Q の関係

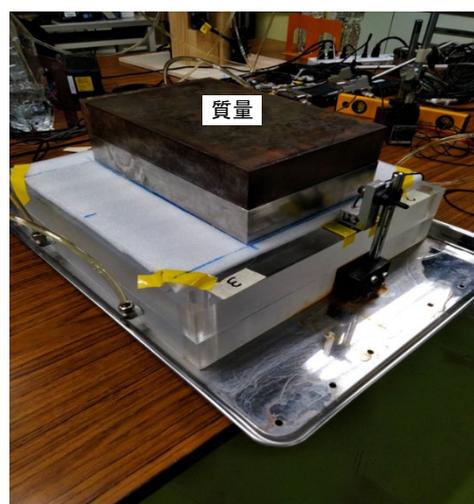


図 10 テーブル静剛性の測定

れぞれ3回ずつ行う。

図11に状態(ア)～(ウ)における作動流体の供給量とテーブル浮き上がり量の関係を示す。これより、いずれの場合も流量を増やすほど浮き上がり量は大きくなった。また、負荷重量を増加させると、浮き上がり量は低下した。

図12に、図10の結果を基に、各実験条件における静剛性を計算した結果を示す。いずれの場合も流量を増やすほど静剛性は低くなった。また、負荷重量を増加させると、静剛性は高くなり56.2kgの質量を搭載した際に、67mL/minの供給流量では、テーブルの静剛性は28.456N/μmであった。

一般に、片側リセスタイプの静圧軸受の浮き上がり量は(1)式で与えられる。

$$h = \sqrt[3]{\frac{12\mu\lambda Q}{BP}} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 h は軸受すき間、 μ は作動流体の粘度、 λ はランド幅、 Q は作動流体の流量、 B はランド長さ、 P はリセス圧力を示す。

図13に作動流体供給流量とテーブル浮き上がり量の関係の理論値と実験値を示す。理論値と比べて実験値の浮き上がり量が小さい最大理由は、アクリル板の平面度誤差が大きいいため、作動流体がランドから均一に流出せず、特定個所から流出したことが目視からも確認できた。

(3) 結論

定流量水静圧軸受用の低流量シリンダポンプシステムを開発し、その性能評価を行い、以下の結論を得た。

- ①歯車ポンプより、シリンダポンプの方が定流量性能は高い。
- ②負荷重量を増加させることで、浮き上がり量の増加が抑制され静剛性は高くなる。本実験装置では、質量56.2kgを搭載した際のテーブル静剛性は28.456N/μmであった。

今後は、透明なアクリル板製のテーブルを活用して、軸受内の作動流体の流れを可視化したいと考える。

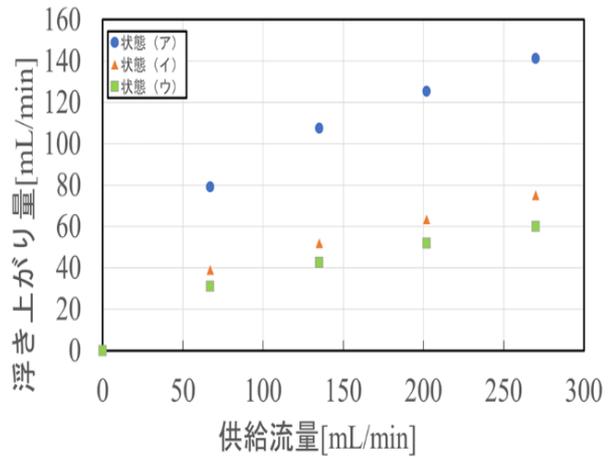


図11 供給流量とテーブル浮き上がり量の関係

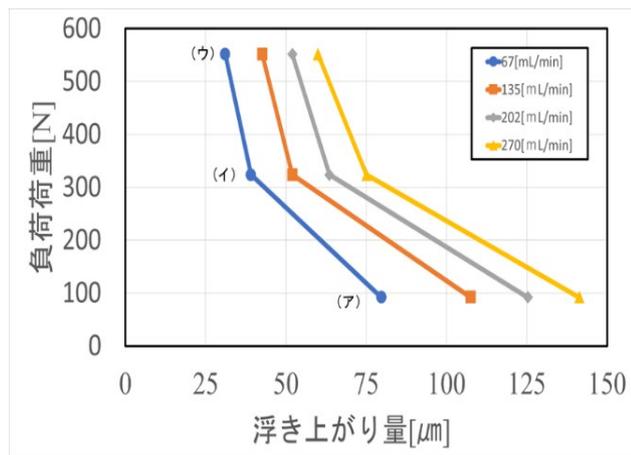


図12 各質量と流量における静剛性の計算値

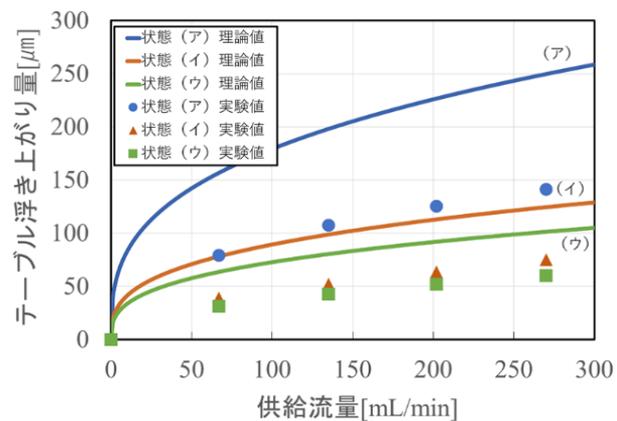


図13 供給流量と浮き上がり量の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	北嶋 孝之 (KITAJIMA TAKAYUKI) (50546174)	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学群)・システム工学群・准教授 (82723)	2017年度～2019年度まで分担