

機関番号： 3 2 6 1 9

研究種目： 基盤研究 (C)

研究期間： 2008 ~ 2010

課題番号： 2 0 5 6 0 4 0 2

研究課題名 (和文) 極限環境に適用可能な音響プローブの開拓

研究課題名 (英文) Development of Acoustic Probe for Extreme Severe Environment

研究代表者

小池 義和 (Koike Yoshikazu)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号： 3 0 2 5 1 6 7 2

研究成果の概要 (和文) : 本研究では、「数百℃の高温下」、「超純水中のキャビテーション環境」の2つの極限環境で使用可能な音響プローブの開拓を目的とした。プローブの構成として、「石英管の振動をレーザ・ドップラ振動速度計 (LDV) による検出」、「LDV プローブ光を測定範囲に透過させ光路差を検出」、「光ファイバハイドロホンの反射光強度の検出」の3つの方法を試みている。導波路管型超音波洗浄機の音圧出力を3つの方法で測定を試みた。全ての方法でキャビテーションが発生伴う環境で、第3高調波まで検出可能なことを確認できている。しかし、絶対音圧への変換は、十分な精度が得られていない。また、高温環境での適用はまだであるが、材質が石英より適用可能と考えている。

研究成果の概要 (英文) : In this research, we develop acoustic probes for extreme severe environment in order to detect and to measure acoustic signal. The probe is applied to two extreme severe environments. One is high temperature circumferential and the other is immersion to ultra high pure water with acoustic cavitation. Three different acoustic probes are applied. First configuration of acoustic probe is a fused quartz tube with laser Doppler vibrometer(LDV). In the glass tube, the vibration displacement is measured by LDV. The second probe is a LDV in which acoustic pressure is measured by the optical path difference. The third configuration is a optical fiber in which reflection intensity at the fiber end is measured. Acoustic pressure of a spot shower type ultrasonic cleaning machine or a waveguide type is measured, which provides the ultra high pure water with acoustic cavitation. Third harmonic component can be detected. However, the calibration to the absolute value has not been achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 超音波

科研費の分科・細目： 電気電子工学・計測工学

キーワード： 超音波, 洗浄機, 超純水, 音響出力

## 1. 研究開始当初の背景

原子炉に代表されるような高温炉や放射

性物質が含まれるような容器におけるクラックなどを、発生時に放射されるインパル

ス音響信号によりモニタする必要がある。また、次世代の配線ルールに基づいた半導体基板洗浄は、超純水環境で行われ、低温プロセス化により、一般的なRCA洗浄に加えて、ギガソニックと呼ばれる数MHz超音波を併用した洗浄が行われる。この時、基板に形成された素子及び配線にダメージを与えないためにも音響出力を正確にモニタする必要がある。

従来、音響出力の測定にはPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）を用いた音響プローブが用いられている。しかし、PZTを用いた音響プローブは、キュリー温度（圧電効果が失われる温度）が100度と低い、「汚染の原因となる」と言われる問題点がある。このような、高温、放射性環境内や汚染が許されない超純水中など極限環境で適用可能な音響プローブの開発が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の極限環境で使用可能な音響プローブの開拓を目的としている。この研究で対象としている極限環境は、「数百℃の高温下」、「超純水中」の二つの環境を主に対象とする。いずれの環境も、従来のPZTを用いたプローブでは対応することが出来ない。プローブの具体的な実現は、空気中及び水中から伝搬する微小な音波によって、プローブの一部として用いる石英ガラスの振動を工学的手法により検出する。そのため、「高温で使用可」、「汚染の可能性無し」の特徴を有する。また、対象とする超音波の波長が数MHz程度となり、波長は100 $\mu\text{m}$ オーダーとなることから、プローブの取り付け精度が問題となってくる。そのため、プローブを構成する石英ガラスの形状及び光学系の配置の検討を行っていき、極限環境でもモニタが可能なプローブの実現を目指していく。

## 3. 研究の方法

本研究で対象とする極限環境は、数百℃の高温下、「超純水中」の二つの環境を主に対象とし、以下の計画に従って、進めていく予定であった。

### (1) 平成20年度

#### ①光学的検出によるプローブの構成

円筒状にくりぬいた石英ロッドを作成し、レーザ・ドップラ振動速度計(LDV)で音圧検出面と円筒状にくりぬかれている反対側の平面部に励振される振動振幅を検出することにより、音圧が測定可能になる。この測定で、音圧出力と振動振幅との関係を求め、音圧感度について検討する。

超純水環境での測定を検討するため、超音波洗浄機内の音響出力測定に適用する。使用する洗浄機は、1MHz付近で駆動される200Wタイプを用いる。また、キャビテーションの

発生が洗浄能力に大きく係わることから、測定される振動波形の高調波成分を検出し、超音波洗浄中に発生するキャビテーション強度の測定も同時に行う。また、音圧検出部近傍の測定により、側面からの受波成分の影響が低減されていることも同時に確認する。

#### ②音圧プローブの断面形状の決定

有限要素法(FEM)及び差分法を用いてシミュレーションを行い、石英ロッドで作成される音響プローブの形状、特にプローブ端面の形状を解析し、取り付け精度の低減及び側面の影響を排除可能な端面形状について検討を行う。音響及び弾性、連成解析を行う。FEMでは、開放領域の設定が困難なため、過渡解析シミュレーションを行う。シミュレーションは、ワークステーション上で解析を行っていく。解析では、超音波出力面と音響出力の距離及び角度を変え、石英ロッドに励振される振動を求め、超音波出力面との位置関係が変化しても、振動振幅が変化しない端面形状について検討を行っていく。また、高周波化を考えると場合、波長の1/10以下に要素を作成する必要があるため、有限要素法を用いると解析マトリックスが大規模化し、計算コストが大幅に増加することが予想される。そのため、解析マトリックスが比較的小規模で並列化の可能性がある差分法を用いたシミュレーションを行い、5MHz以上の超音波周波数を用いた場合に適した断面形状について検討を行っていく。

### (2) 平成21年度

#### ①ヘテロダイン干渉計の構成と音圧プローブへの適用

光ヘテロダイン干渉計を構成し、内部が円筒状にくり抜かれた石英ロッドの平坦部に励振される振動の検出を試みる。干渉計は、定盤に構成されるが、それから、光ファイバを用いてプローブまで、検出光を導く。測定された振動振幅信号はFM変調された出力となるため、デジタル信号処理を行い、振動振幅に変換を行う。

#### ②シミュレーションにより検討された石英ロッド端面の形状を用いたプローブの検討

FEM及びFDMで検討された端面形状を持つ内部が円筒状にくり抜かれた石英ロッドを試作し、取り付け精度を低減し、側面からの受渡音波の影響を低減した音圧プローブが実現可能性について検討する。実際に試作したプローブと構成されたヘテロダイン干渉計を用いて音圧の検出を行う。

### (3) 平成22年度

#### ①光ファイバ・バンドルを用いた光学的検出法の検討

レーザ・ドップラ振動計で計測を行う場合、光学系が複雑で、非常に高価になるため、安

価で簡便な構造として、光ファイバ・バンドルを用いた方法について検討を行う。光ファイバ・バンドルを用いた構成は、ファイバ・バンドルの半分にLED等により、光を挿入し、他方にPD等により光検出を行う。もう一方のファイバ・バンドル端面と中空形状の石英ロッド端面との距離が音圧により励振された反射面の振動成分により変化することから、半分のファイバから放出される光が平面で反射し、反射光として戻り成分が変化することから、端部の振動成分が検出可能となるものである。ただ、石英ロッド端面と光ファイバ・バンドルの距離が数 $10\mu\text{m}$ となることから、その取り付け方法について検討を重ねる必要がある。実際に；取り付けを行い、光ファイバ・バンドルをもちいた構成の音圧検出感度を測定し、音圧プローブへの適用の可能性を検討する。

石英ロッド端面と光ファイバ・バンドルの距離が数 $10\mu\text{m}$ となることから、その取り付け方法について検討を重ねる必要がある。実際に取り付けを行い、光ファイバ・バンドルを使用した構成の音圧検出感度を測定し、音圧プローブへの適用の可能性を検討する。

②シミュレーションにより検討された形状を用いたプローブによる測定（前年度からの引き継ぎ）

前年度に引き続き、FEM及びFDMで検討された端面形状を持つ内部が円筒状にくり抜かれた石英ロッドを試作し、取り付け精度を低減し、側面からの受渡音波の影響を低減した音圧プローブが実現可能性について検討する。実際に試作したプローブ、前年度のレーザ・ドップラ振動計を用いた検出法及び光ファイバ・バンドルを用いた検出法を用いて音圧の測定を行う。そして、超音波洗浄機の洗浄層の形状が変化しても、相対的な音圧検出が可能かどうかを検討する。

③音圧プローブの絶対音圧の校正についての検討

試作した音圧プローブは、相対的な出力の測定が可能になるように検討を重ねるが、最終的には、絶対音圧出力の測定が可能となる校正が求められる。そのため、ニードルマイクロホンを用いた絶対音圧の校正法について検討を行う。また、低い周波数では、比較的測定が容易なマイクロホンが用意されているため、低周波での測定結果及びシミュレーションでの結果と併せて高周波の絶対音圧の推定が可能かどうかを検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) LDV 音圧プローブによる評価

これまでに数MHzの音響出力を測定する方法としては、PVDFを用いたニードルマイクロ

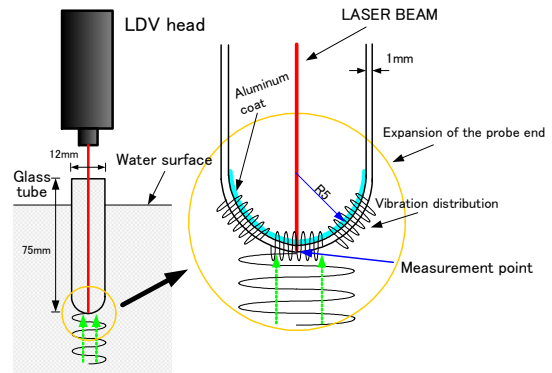


図1 石英ロッド管を用いたプローブの構成

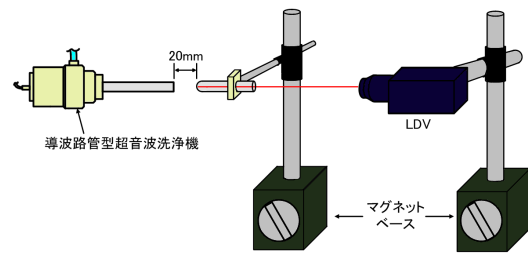


図2 実験構成

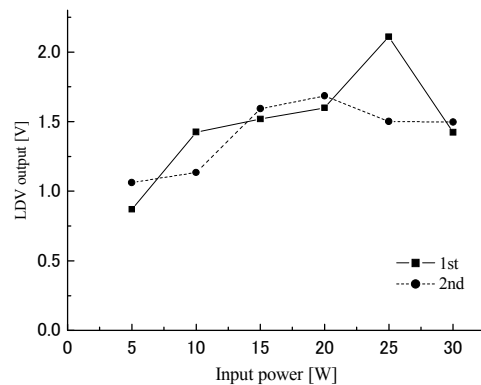


図3 入力電力に対するLDV出力

フォン、光学干渉計、光ファイバ等を利用する方式が報告されており、医療等の分野で利用されている。しかし、キャビテーション発生環境での適用が困難、容器が透明、洗浄液の汚染等の問題があり、半導体洗浄への適用が困難である。そのため、現在の超音波洗浄機では、主に音響出力を電気入力により管理している。従って、取り付け精度を低減し、洗浄機の絶対音圧が測定可能なプローブの実現が求められている。同様に導波路管内及び端部から出力される超音波を直接ニードルマイクロホンで音圧を測定に用いた場合、マイクロホンがキャビテーションの衝撃及び接着部分が高温となり、電極が損傷を受ける。そのため、適用が困難である。

そこで、数 mm オーダーの取り付け精度で再現性ある測定が可能な高周波超音波用音圧プローブの実現を目的として、図 1 に示す音圧プローブを提案する。取り付け精度を数 mm オーダーに低減し、側面からの影響を排除するために端部が曲面となっているガラス管を使用し、端面内壁の振動を LDV を用いて測定する。この構成は、石英管端部の音圧を直接測定することにより石英管の長さによる音響出力が依存することを排除するためである。また、洗浄機の放射面との角度依存性を排除し、波長程度の範囲で音圧出力が平均化されると考えている。実際には石英管先端部でレーザを反射させるために内壁にアルミニウムを蒸着している。導波路管端部の音圧レベルは、図 2 に示すように LDV を用いた音圧プローブの石英間の軸が導波路管に対して、同一直線上、もしくは導波路管の軸に対して、垂直になるように配置する。

同一直線上において、洗浄機に入力する電力を変化させたときの LDV の出力電圧を測定した結果を図 3 に示す。プローブとなる石英管は洗浄機の端部から 20mm に離れた位置に設置している。また、再現性を確認するために 2 回測定を行っている。結果として、一部再現性が認められないところもあるが、ほぼ、15W までは入力電圧に比例した出力値が得られている。しかし、それ以上の入力では、出力レベルの上昇を確認できていない。これは他のプローブを用いたときにも同様な結果となっており、提案したプローブが測定可能であることを確認している。

## (2) LDV による振動周波数測定

ハイドロホンによる音場計測では、キャビテーションによる素子の損傷や、ハイドロホン自体が音場を乱すなどの問題がある。そのため、LDV を用いた光学的手法による音場計測が行われており、相対的な音圧分布の計測が可能な計測方法が実現されている。液膜中の音場計測のため、図 4 に示した装置構成において、導波路管から超音波照射中のウェーハの振動周波数を LDV により測定した。出力電圧をスペクトルアナライザ (Anritsu, MS2602) により周波数分析した結果を図 5 に示す。900 kHz の基本波成分 ( $1f$ ) の他、高調波成分 ( $2f$ ,  $3f$ ) や分調波成分 ( $1/2f$ ) が観測された。高調波成分や分調波成分は気泡の非線形振動によるものであり、キャビテーション気泡の存在を示す。FEM 解析および音圧測定結果より、導波路管側面からの音圧は 35 kPa 以下と推定された。しかし、キャビテーション気泡を生成するために必要な音圧は 100 kPa 程度であることから、少なくとも 100 kPa の音圧があると考えられる。

## (3) 光ファイバを用いた音圧プローブ

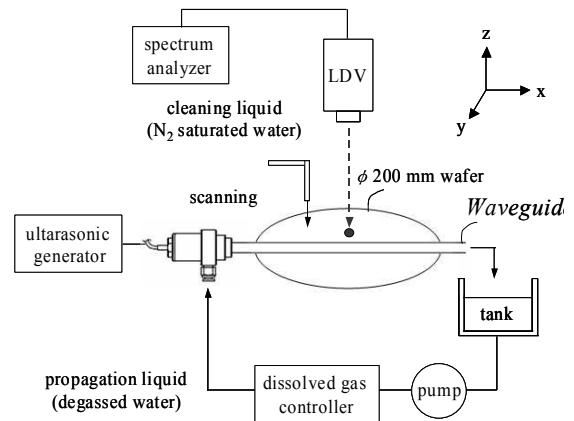


図 4 LDV によるウェーハ上の振動周波数測定

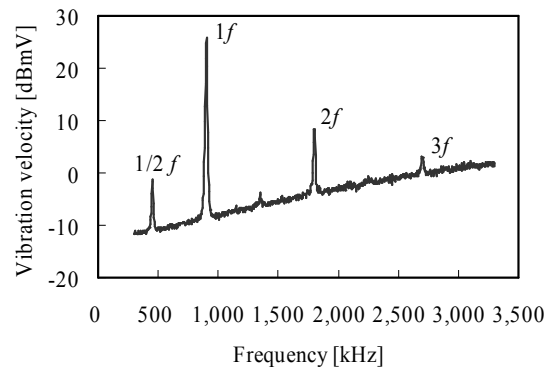


図 5 ウェーハ上の振動周波数スペクトル

導波路管型超音波洗浄機での音圧測定の実験構成を図 6 に示す。空気中の音圧を、入力電圧を変化させて測定した。その時の出力電圧の変化を図 7 に示す。入力電圧の増加に対して、出力電圧 (音圧) の増加は確認でき、原点を通過して比例していることが確認できる。原理式から 200Pa の音圧で 0.6mV 変化するとされている。このことから音圧値に換算すると原理式の値と近いことが推測できる。導波路管型超音波洗浄機の先端を光ファイバプローブによって測定し、そのスペクトル波形を図 8 に示す。このとき供給電力は 5W で 10W 以上からはキャビテーションの影響を受け出力スペクトルは検出できなかった。

## 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 3 件)

- ① 鈴木一成, 潘毅, 岡野勝一, 副島潤一郎, 小池義和, "導波路モードを用いた超音波用振動子による次世代半導体ウェーハ洗浄", 日本音響学会誌, 査読有り, Vol. 66, No. 9, pp. 440-448 (2010)

- ② K. Suzuki, K. Han, S. Okano, J. Soejima and Y. Koike, "Novel Ultrasonic Cleaning Equipment Using Waveguide Mode", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, Vol. 48, No. 7, pp. 07GM05-1-5 (2009)
- ③ K. Suzuki, K. Han, S. Okano, J. Soejima and Y. Koike, "Application of Novel Ultrasonic Cleaning Equipment Using Waveguide mode for Post-Chemical-Mechanical-Planarization Cleaning", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, Vol. 48, No. 7, pp. 07GM04-1-4 (2009)

[学会発表] (計 8 件)

- ① K. Suzuki, Y. Imazeki, K. Han, S. Okano, J. Soejima, and Y. Koike: "Application of Novel Ultrasonic Cleaning Equipment Using Waveguide Mode for Single-Wafer Cleaning Process", Proc. of Admeta 2010 (2010. 10, 東京)
- ② 巽敏之, 小池義和, 鈴木一成, "LDV を用いた導波路管型高周波超音波洗浄機の音圧測定", 日本音響学会 2010 年秋季研究発表講演論文集, pp. 1247-1248 (2010. 9)
- ③ 小池義和, 鈴木一成, "次世代半導体洗浄用超音波洗浄機", 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (招待講演), 1806 (2009. 11, 名古屋)
- ④ 鈴木一成, 潘毅, 岡野勝一, 副島潤一郎, 小池義和, "導波路管型超音波洗浄機を用いたキャビテーション制御", 応用物理学会講演論文集, 20p-C-4 (2010. 3, 神奈川)
- ⑤ 鈴木一成, 潘毅, 岡野勝一, 副島潤一郎, 小池義和, "任意位置に照射可能なチューブタイプ高周波超音波洗浄機による CMP 後洗浄", 応用物理学会講演論文集, 1p-S-11 (2009. 3, 筑波)
- ⑥ 鈴木一成, 潘毅, 岡野勝一, 副島潤一郎, 小池義和, "導波路管型超音波洗浄機用振動子の開発", 平成 21 年 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 1207-1208 (2009. 3, 東京)
- ⑦ K. Suzuki, K. Han, S. Okano, J. Soejima and Y. Koike, "A novel cleaning equipment using ultrasonic waveguide mode", Proc. of The 29th Ultrasonic Electronics Symp., pp. 303-304 (2008. 11, 仙台)
- ⑧ 鈴木一成, 潘毅, 岡野勝一, 副島潤一郎, 小池義和, "導波路管型超音波洗浄機用振動子の CMP 後洗浄への適用-スポット型振動子の評価-", 第 29 回超音波エレクトロニクスシンポジウム講演論文集, pp. 361-362 (2008. 11, 仙台)

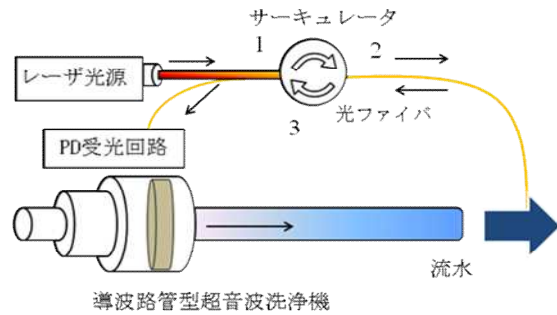


図 6 導波路管超音波洗浄機の音圧測定構成

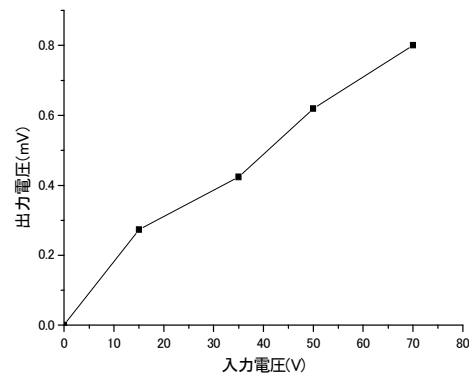


図 7 空気中で入力電圧変化させたときの出力電圧

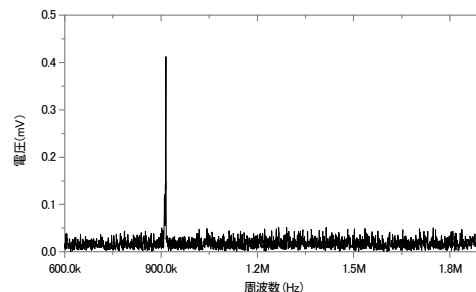


図 8 光ファイバで測定した出力スペクトル

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小池 義和 (Koike Yoshikazu)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：30251672