

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02054

研究課題名(和文) 極低温環境に対応したマイクロ圧電振動子による非接触駆動アクチュエータの試作研究

研究課題名(英文) Micro cryogenic piezoelectric transducers for non contact drive actuator

研究代表者

神田 岳文 (Kanda, Takefumi)

岡山大学・自然科学学域・教授

研究者番号：30346449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,170,000円

研究成果の概要(和文)：低温環境に対応した圧電アクチュエータによる小型の非磁性・非接触駆動機構を実現するために、極低温環境用アクチュエータの小型化を実現する新たな予圧機構を用いた圧電振動子構造、極低温環境下でヘリウム中での音響放射圧を利用した浮上機構、さらにヘリウム中での音響粘性力を利用した小型の駆動機構の検討の3点について研究を行った。原理検証と設計を目的とする解析結果に基づき振動子、機構の製作を行い、窓付きクライオスタットを利用して極低温を含む温度環境での評価を行った。一般には極低温環境での利用が難しい圧電素子を用いてマイクロアクチュエータや小型の駆動機構の構成が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー関係などの産業応用分野や先端的な科学計測の分野では、20 Kから4.5 K程度の低温領域で用いることのできる小型アクチュエータが必要とされ、圧電素子などの小型の固体アクチュエータを駆動源とすることによる機器の大幅な小型化や高度な制御性の実現は、極めて重要な課題である。低温、特に極低温下では、圧電アクチュエータの性能は大きく低下する。本研究では、極低温環境での使用に適しマイクロ化が可能な予圧印加構造を持つ圧電振動子の有効性を示し、さらに非接触式の駆動を可能とする機構を実現するうえで重要な知見を得た。これらの成果は、低温環境用の小型の非磁性・非接触駆動機構の実現に寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, a micro piezoelectric transducer using a novel preload mechanism which can be used under ultra-low temperature condition, a levitation mechanism using an acoustic radiation pressure in helium under cryogenic condition, and a small non-contact driving mechanism using acoustic viscous force in the condition have been studied. Based on analyses for a principle verification and design, fabricated piezoelectric transducers and mechanisms have been evaluated in an experimental setup using a cryostat with optical and mechanical measuring system. Those analytical and experimental results show the effectiveness of the proposed structure of piezoelectric transducer and small driving systems using piezoelectric actuators although the use of piezoelectric material in the cryogenic condition has difficulty in general.

研究分野：精密機能要素

キーワード：圧電アクチュエータ 圧電振動子 極低温 マイクロアクチュエータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液体ヘリウム温度付近(4.5 K 程度)もしくはこれより低い温度の極低温領域は、ノイズレベルが低下すること、量子力学的な効果が期待できることなどから、物理的・化学的測定環境として注目されている。さらに近年では低温環境を用いるクライオ電子顕微鏡に見られるように、生物学分野でも極低温環境が測定環境として重要性が増している。すでに、固体核磁気共鳴分光装置(固体 NMR)や走査型プローブ顕微鏡(SPM)などにより極低温環境下で測定が行われており、これに伴い極低温環境下での試料操作の重要性が高まっている。現在、極低温領域でのこのような操作は装置の大型化・複雑化を伴っている。一方、液体窒素温度付近(77 K 程度)の環境は従来から食品製造や真空機器をはじめとする産業分野で広く用いられているが、近年は水素エネルギー利用への注目が高まるに伴い液体水素温度付近(20 K 程度)も産業応用上重要な環境となっている。水素は低温で液体となった状態で貯蔵・運搬が行われることが多く、流体制御用のバルブ等の小型化は機器の小型化のうえで重要である。以上の通り先端科学および産業応用分野では、20 K から 4.5 K 程度の低温領域で用いることのできる小型のアクチュエータの需要は大きい。こうした環境で用いられるアクチュエータは、機器の大型化、比較的大きな電流が必要となることなどの問題があり、小型の固体アクチュエータを駆動源とすることによる機器の大幅な小型化や高度な制御性の実現は、極めて重要な課題である。

2. 研究の目的

低温、特に極低温下では、圧電アクチュエータの性能は大きく低下する。これは低温環境において圧電材料の性能が低下すること、また圧電材料や構造材料の材料定数が温度に依存する非線形性を示すアクチュエータの設計が難しいことによる。本研究は、極低温環境において小型の駆動システムを実現するために圧電アクチュエータを用い、極低温環境での使用に適したマイクロ化が可能な予圧印加構造を持つ圧電振動子を駆動源として用いること、さらに安定的な駆動を得るために非接触式の駆動方式を利用すること、非磁性の駆動原理であり磁場を利用する機器内で利用可能であることに特徴がある。圧電材料の温度特性から、圧電アクチュエータが極低温環境で用いられた例は少なく、特に振動子の予圧印加機構について検討された事例や、非接触駆動を実現した例はみられない。本研究では極低温環境用圧電アクチュエータによる非磁性・非接触駆動機構の実現を目的とする。

3. 研究の方法

極低温環境に対応した圧電アクチュエータによる小型の非磁性・非接触駆動機構を実現するために、極低温環境用アクチュエータの小型化を実現する予圧機構を用いた圧電振動子、極低温環境下でヘリウム中での音響放射圧を利用した浮上機構、極低温環境下でヘリウム中での音響粘性力を利用した回転駆動の3点について研究を行った。

(1) 極低温環境用アクチュエータの小型化を実現する予圧機構を用いた圧電振動子

ボルト締め構造にかえて、構造材料と圧電材料の材料定数(主として膨張係数)の温度依存性の差を利用して、使用する温度環境に適した予圧印加となる振動子構造を実現する。一般に構造材料である金属材料とセラミックスの圧電材料では膨張係数の差が大きく、室温から極低温への変化により大きな圧力変化が生じる。この特性を利用してアクチュエータのマイクロ化に適した構造の低温環境用圧電振動子を実現する。

(2) 極低温環境下でヘリウム中での音響放射圧を利用した浮上機構

極低温環境下のヘリウム中で超音波振動子により発生させた音響放射圧で、振動子先端に対向して配置した対象物を浮上させる。ヘリウムを冷媒とする極低温環境で超音波振動子を駆動した際、液体ヘリウム中であっても振動子からの放熱により振動子の近傍ではヘリウムが気化する。この状態で、ヘリウムを媒質として物体に作用する音響放射圧により物体の浮上を実現する。

(3) 極低温環境下でヘリウム中の音響粘性流を利用した回転機構

音響放射力による浮上機構をもとに、振動子の電極を分割し、位相をずらした交流電圧を印加することにより振動子先端に進行波を発生させる。これにより、振動子先端・浮上体間には一方方向の音響粘性流が発生し、浮上体を回転させることができると考えられる。これにより非接触での回転駆動を実現する。

以上の研究を行うために、冷凍機を利用して低温環境の温度制御を行う窓付きクライオスタットを導入し、レーザドップラ振動計やレーザ変位計などを利用した光学的、機械的測定系を構

成し、室温環境から液体ヘリウム温度環境までの評価を行った。

4. 研究成果

(1) 極低温環境用アクチュエータの小型化を実現する予圧機構を用いた圧電振動子

構造材料と圧電材料の材料定数の温度依存性の差を利用して予圧を印加する構造の圧電振動子の概要と試作事例を Fig.1 に示す。長手方向に振動する縦振動子を構成しており、振動の節に相当する中央部に、振動子に直交する形で固定部を設けた。この構造について温度変化時に生じる圧電素子への予圧を評価するために、有限要素法を用いた熱応力の解析を行った。この結果、超音波振動子として使用する際の圧電素子への予圧として適した値が得られることが分かった。次に、設計した縦振動子について試作を行い実験による評価を行った。測定は Fig.2 に示す冷凍機を用いた窓付きクライオスタットを利用して構成した測定システムにより行い、冷却し温度(室温から極低温まで)を設定したチャンバー内のヘリウム気体中で行った。低温環境では圧電性が低下するにもかかわらず、より大きな振動速度が得られ、予圧印加の効果が得られていることが分かった。さらに、予圧印加に関するモデル式を導出し、材料定数の温度依存性(非線形)を考慮して振動子構造の改善を図った。解析結果に基づく試作評価により、モデル式が有効であることを示した。さらにこの式を用いた設計に基づいた試作・評価を行うことにより、振動子性能の向上に成功した。

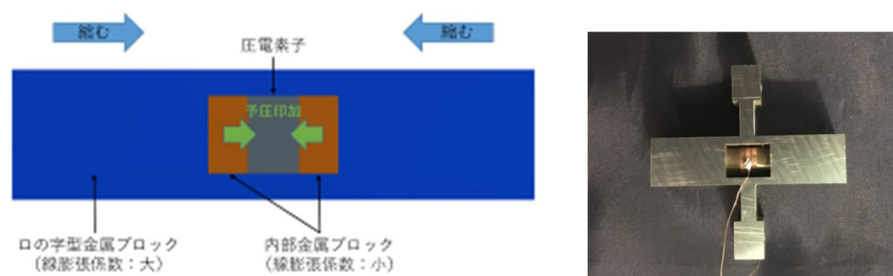


Fig. 1 材料特性の温度依存性を利用した予圧機構を持つ振動子構造の概要(左)と試作した評価用圧電振動子の例(右)

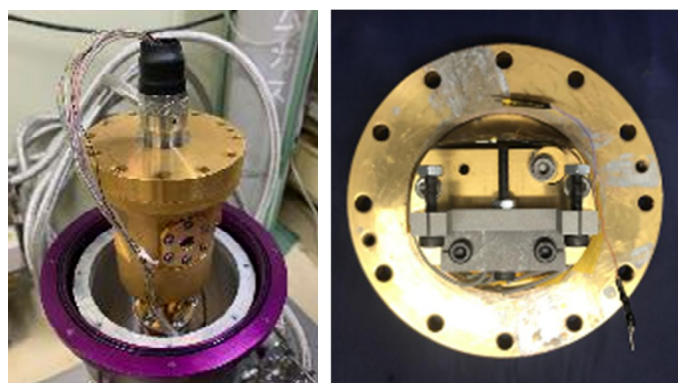


Fig.2 評価に用いた窓付きクライオスタットを利用した実験装置の様子

(2) 極低温環境下でヘリウム中での音響放射圧を利用した浮上機構

低温環境での非接触駆動を実現するために、基礎的検討として評価装置内で超音波振動子による物体の浮上機構に関する検討を行った。ヘリウムの密度は小さく、室温でも空気の7分の1程度であり、物体に作用する音響放射圧は、超音波振動子から媒質への音響放射効率は低下することが予想される。ヘリウムを媒質とした際に十分な音響放射圧が得られる振動子構成についてシミュレーションも交えて検討し、小型対象物(金属円板)の浮上が可能であることについてボルト締め型の圧電振動子により原理的な検証実験を行った。冷凍機を利用した測定環境内に設置した振動子に縦振動を励振し、光学窓よりレーザ変位計を用いて浮上距離の測定を行った。室温と同様に振動振幅に対して比例的に浮上距離が増加し、極低温ヘリウムガス中でも音響放射力による物体の浮上が可能であることがわかった。温度環境として液体窒素温度、液体水素温度付近でも安定的な浮上が得られた。さらに、(1)の項目の結果に基づいて製作した予圧機構を持つ圧電振動子を使用し、低温装置内のヘリウム気体環境下で小型対象物の浮上実験を行い、低温環境で対象物を非接触で駆動できることを示した。

(3) 極低温環境下でヘリウム中の音響粘性流を利用した回転機構

低温装置内のヘリウム気体環境下での非接触回転駆動を目的として、振動子に対向する位置に配置した円板状の小型の物体の回転駆動を行う実験を行った。はじめに音響粘性流生成条件を検討した。小型ボルト締め振動子の振動子としての性能から、生成される音響粘性流により得られる回転方向の推進力に関するシミュレーションを行った。Fig.3に示すとおり温度環境を考慮した条件でのシミュレーション結果として回転方向の駆動力が得られた。これに基づき、Fig.4に示す振動子を用いて円板の回転駆動に関する評価を行った。実験の結果、非接触状態での粘性力の作用については確認できたものの、測定の上では分解能の課題が残った。

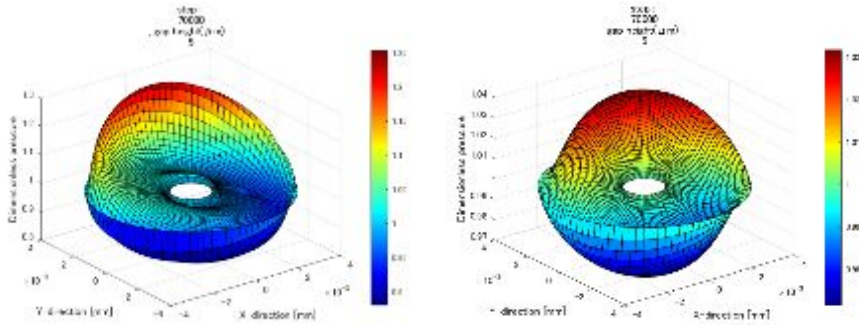


Fig.3 音響粘性流生成条件を考慮した室温空气中（左）および極低温ヘリウムガス中（右）での圧力分布のシミュレーション結果

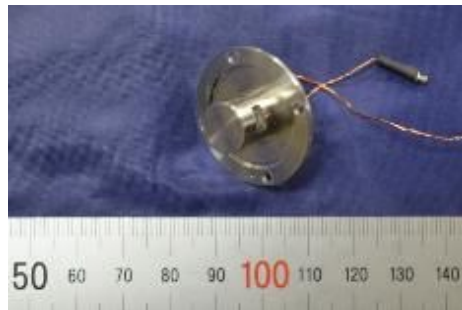


Fig.4 非接触駆動評価用振動子

以上の通り、極低温環境用圧電アクチュエータによる非磁性・非接触駆動機構の実現を目的とする研究を行った結果、あらたに提案した極低温環境用アクチュエータの小型化を実現する予圧機構を用いた圧電振動子を実現し、さらにヘリウム気体中での音響放射圧を利用した浮上や回転を行う機構を実現した。本研究は、一般には極低温環境での利用が難しい圧電アクチュエータの使用を同環境で実現し、極低温環境で稼働する小型の駆動システムに寄与するものである。今後は極低温環境用の試料回転機構や位置決め機構、流体駆動デバイスへの応用を前提に、さらにアクチュエータとしての性能を向上することが必要である。このためには極低温環境におけるデバイスの構成とともに、アクチュエータ設計に必要な材料定数の評価が必要であり、また本研究でも問題となった評価・測定方法の検討が課題として残っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kanda Takefumi, Yagi Kairi, Nishida Takumi, Yamaguchi Daisuke, Wakimoto Shuichi	4. 巻 2021
2. 論文標題 A Transducer for Micro Cryogenic Actuator using Novel Preload Mechanism without Bolt-clamping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IUS52206.2021.9593366	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 八木海史, 西田匠, 神田岳文, 山口大介, 脇元修一
2. 発表標題 極低温環境用超音波振動子での熱応力を利用した予圧印加の検討
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八木海史, 西田匠, 神田岳文, 山口大介, 脇元修一
2. 発表標題 極低温環境用超音波振動子での予圧印加の評価に関する検討
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takefumi Kanda
2. 発表標題 Evaluation of a Transducer for Micro Actuator Using Novel Preload Mechanism Under Cryogenic Condition
3. 学会等名 2021 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田匠, 神田岳文, 脇元修一, 上西宏典
2. 発表標題 極低温環境における超音波振動子を用いた物体の浮上の測定
3. 学会等名 第32回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD32)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神田岳文, 八木海吏, 西田匠, 山口大介, 脇元修一
2. 発表標題 極低温環境用圧電振動子の予圧印加機構に関する検討
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Kanno, Marie Obayashi, Takahiro Yano, Takefumi Kanda, Shuichi Wakimoto, Kiyonori Takegoshi
2. 発表標題 Study on ultrasonic transducer material for a sample spinning in NMR spectroscopy
3. 学会等名 2019 International Symposium on Micro-NanoMechatoronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔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	山口 大介 (Yamaguchi Daisuke) (00735657)	岡山大学・自然科学学域・助教 (15301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	西田 匠 (Nishida Takumi)		
研究協力者	八木 海吏 (Yagi Kairi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関