

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420091

研究課題名(和文) 極低温環境用マイクロ電歪・圧電アクチュエータの試作研究

研究課題名(英文) Study on a micro electrostrictive or piezoelectric actuator for cryogenic environment

研究代表者

神田 岳文 (Kanda, Takefumi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：30346449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、極低温・強磁場環境下で使用する事の出来るマイクロアクチュエータを、圧電・電歪材料を駆動源として実現することを目標として、アクチュエータ材料、構造、モデル化の3点について研究を進めた。温度環境の違いによる調整の必要がないアクチュエータを実現することを目的として、ボルト締めランジュバン型振動子の構造の検討と試作を行った。非線形的な特性を考慮した振動解析によりアクチュエータ構造を決定し、室温から極低温まで予圧調整の必要がない振動子を実現した。さらに、試作した振動子を用いたアクチュエータの駆動実験により、従来困難であった室温から極低温領域まで調整なしに連続的に回転駆動を行うことに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize a micro actuator which can be driven under a cryogenic and high intensity magnetic field. In this study, the target is the material, structure and modeling for the actuator. For the realization of the actuator which has not a temperature dependency for the driving, a bolt-clamped Langevin type transducer has been designed and evaluated. Using a finite element method, the temperature dependency has been evaluated about the transducer. Non-linear parameters about material properties were used for the simulation. As a result, the transducer which has not a temperature dependency for pre-load setting has been obtained by the simulation. The fabricated transducer under the design has been evaluated and used for the driving of the actuator. The transducer has successfully driven the actuator without the temperature dependency for the setting.

研究分野：センサ・アクチュエータ・マイクロシステム

キーワード：圧電アクチュエータ 電歪材料 極低温 超音波モータ 超音波振動子 マイクロアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

極低温環境(ここでは 77K 以下 4.5K 程度までの温度環境とする)は、従来から先端科学や医療分野における計測のうえで重要な環境とされている。また近年ではエネルギー問題を背景に、産業的にも注目されている。このような環境では従来にない効果が得られる一方、一般的な室温環境で用いられるアクチュエータが使用しにくいという問題がある。

極低温環境の利用が最先端の科学計測で必要とされている例として、極低温固体核磁気共鳴装置(NMR)がある。低温環境では原子レベルの運動が小さくなり、ジョンソンノイズに代表されるノイズレベルが低下し、精度の高い測定が可能となる。また化学反応の速度が低下することから、反応中間体の観察が容易となり、固体 NMR 装置において化学現象のより高度な分析が可能となると考えられ、4.5K (液体ヘリウムの沸点付近)での測定が試みられている。固体 NMR による測定では試料の高速回転が必要とされ、従来室温環境では電磁場に影響を与えない空気圧タービン式の回転機構が用いられてきた。この方法では、小型の回転機構部を用いて 50 万 rpm 程度の高速回転が実現されているものの、液体ヘリウム温度以下では極低温冷媒を使用する必要があるなど、装置全体の大型化、複雑化につながっている。測定環境を維持するため、できるだけ小さい機構を持つアクチュエータを用いることが装置の小型化、単純化のために必要とされている。

一方、産業的に極低温領域が注目されている分野として、水素エネルギーに関連する装置がある。燃料電池に代表される水素燃料利用は次世代エネルギーとして注目されているが、貯蔵・運搬時には高圧もしくは極低温(水素の沸点である 20K 以下)の環境におくことが必要となる。ポンプ・バルブなどもこの環境に対応する必要がある。超電導現象を利用したモータなどが極低温環境下での駆動源として提案されているが、現時点ではシステムとして比較的大きく、複雑なものになっている。

本研究では比較的単純な構造でアクチュエータを構成することが可能で小型化が容易である電歪・圧電材料を極低温環境下での駆動源として用いる。超音波モータをはじめとする圧電アクチュエータは、携帯型電子機器の機構駆動などに用いられており、一般に小型化が容易である。さらに、磁場のアクチュエータ駆動への影響や、駆動時の発生磁場が小さいことから、医療用 MRI などの強磁場環境下で各種器具の操作などに用いられている。これらを極低温環境のアクチュエータとして利用する試みは、低温物理の実験装置においてスティックスリップ現象を用いて試料の微小量動かした例や、準静的な回転動作に用いられた例などがある。しかし、固体 NMR の試料回転に必要とされるような高

速連続回転を実現するものではなく、またバルブなどの機構部品を動かすほどのトルクを得られるものもない。

このように極低温領域で高出力の電歪・圧電アクチュエータが実現されていなかったのは、低温領域で電歪・圧電材料の機械的出力特性(圧電定数など)が室温の数十分の一程度に低下することによる。77K (液体窒素の沸点付近)程度までは出力の低下が小さく、また実験も比較的容易であることから、材料的特性の評価、市販のアクチュエータの利用も含めて比較的多くの研究がなされている。一方、数十 K もしくは数 K といった液体水素、液体ヘリウムの沸点付近の温度では、系統的な電歪・圧電アクチュエータに関する研究はほとんどなく、また電歪・圧電材料のアクチュエータ材料としての評価に関する研究も少ないといえる。

2. 研究の目的

本研究は、複合極限環境、具体的には極低温、強磁場環境下で使用することの出来るマイクロアクチュエータを、圧電・電歪材料を駆動源として実現することを目指している。研究代表者は、本研究開始時点において、超音波振動子構造を圧電材料の特性に着目して極低温環境に対応させることにより、4.8K 以下の極低温環境で駆動可能な超音波モータを実現することに成功していた。本研究では、極低温環境下でのアクチュエータ材料として、圧電材料に加え、低温環境においても安定した特性を示す電歪材料の特性に着目し、材料特性、アクチュエータ構造、制御方法の検討によって、極低温環境下で高速回転可能な温度依存性の低いマイクロアクチュエータを実現することを目指した。

3. 研究の方法

本研究の対象とするアクチュエータはボルト締めランジュバン型振動子と呼ばれる超音波振動子により駆動される回転型のものである。ボルト締めランジュバン型振動子の構造の概要を図 1 に、また、評価に使用した、試作したボルト締めランジュバン型振動子を図 2 に示す。この振動子は圧電材料を金属材料で挟み込み、ボルトで締め付ける構造となっている。

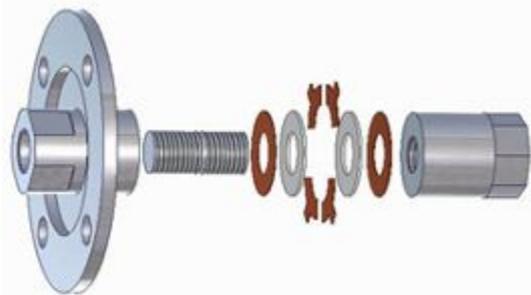


図 1 モータ駆動用ボルト締めランジュバン型振動子の概要



図2 評価に使用したボルト締めランジュバン型振動子

振動子は振動子胴体、ボルト、ナット、厚さ 0.1mm の銅板 3 枚、厚さ 0.2mm の圧電・電歪材料 2 枚から構成されている。中央の銅電極は 4 分割されており、位相差を与えた電圧を印加することにより、2 方向にそれぞれ 1 次のたわみ振動を励振させることが可能となる。この振動子先端にロータに予圧を与えて押し付け、回転駆動を得る。ボルト締めランジュバン型振動子を駆動源とするアクチュエータ(超音波モータ)の外観を図3に示す。

振動子およびアクチュエータの低温環境での評価には、液体ヘリウム容器内に評価機構を組み込んだ評価装置を使用した。評価装置の概要を図4に示す。回転数の測定には、光ファイバーとスリットディスクで構成されるエンコーダを用いている。



図3 低温環境用アクチュエータ



図4 低温環境での評価装置の概要

4. 研究成果

(1) 材料特性の比較

圧電材料を比較し、振動子設計を行うため、電気的、機械的特性に関わる各パラメータを算出することを目的として、共振・反共振法を利用した測定を行った。図5は、測定対象とする評価用圧電振動子である。厚さ 0.2 mm の PZT セラミックス, PMN-PT 単結晶をレーザーにより長さ 12 mm, 幅 3 mm に切断し、両面に金電極を蒸着したものである。中心支持の状態で長手方向一次の縦振動について測定した。

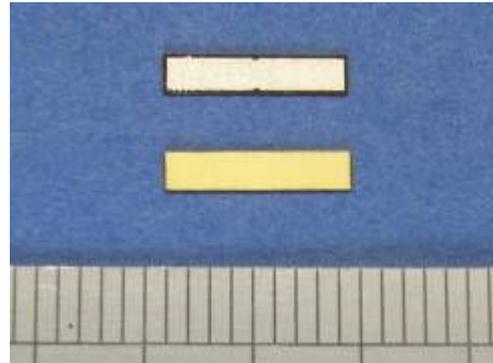


図5 材料定数評価用振動子

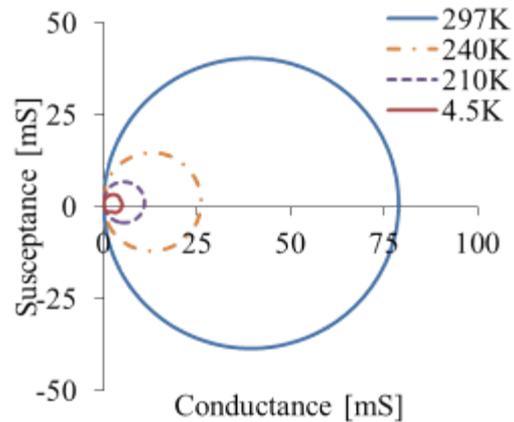


図6 圧電振動子 (PZT) のアドミッタンスループ

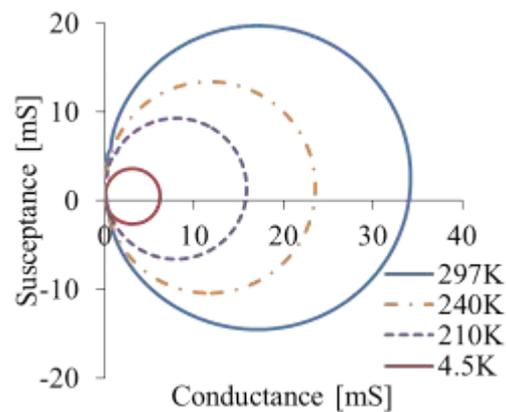


図7 圧電振動子 (PMN-PT) のアドミッタンスループ

図6および図7に評価の一例として、PZT、PMN-PT についてそれぞれアドミッタンスループを測定した結果を示している。297 Kが常温であり、ヘリウムタンク内での液体ヘリウムの液面からの高さヒータによる加熱状態を調節することにより温度を設定している。両者を比較すると、PMN-PT に比べてPZTでは温度低下に対してループの縮小が顕著であることが分かる。

(2) 振動子特性の温度依存性に関する検討
ボルト締めランジュバン型振動子では、組み立て時の締め付けトルクにより予圧の値を調整することによって、引張りよりも圧縮に強い圧電素子の特性を利用することを可能となる。最適予圧の値は振動子を構成する材料の特性に依存するが、極低温環境でこの振動子を用いる際に問題となるのは、温度変化による熱膨張(収縮)が発生し、熱応力によって最適予圧の値に影響することである。さらに、弾性定数や熱膨張係数は温度依存性を持つ。また、金属材料、セラミックスである圧電材料は異なる温度特性を持つため、極低温領域で振動子の性能を向上するためにはこれらの組み合わせを考慮する必要がある。

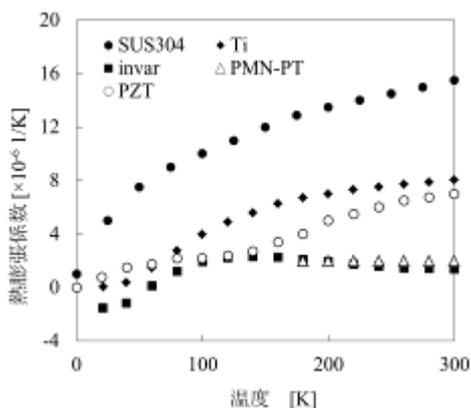


図8 振動子を構成する材料の熱膨張係数の温度依存性

図8に各種材料の熱膨張係数の温度依存性を示す。材料定数に温度依存性があるため、極低温環境で最適予圧の状態を得るためには、振動子組み立て時の締め付けトルクを振動子の使用環境温度によって設定することが必要となる。しかしながら使用する圧電セラミックスと金属材料の熱膨張係数が近い場合には、予圧の調整が必要とされない構造を得ることができると考えられる。

予圧設定の温度依存性について検討するために、材料定数の温度依存性を考慮した有限要素法による解析により、構造と各部に用いる材料の組み合わせについて比較を行った。有限要素法解析によって得られた、熱応力分布図の一例を図9に示す。図10は3通りの組み合わせ例について熱応力の温度依存性を比較したものである。この中ではBの

組み合わせで熱応力の温度依存性が最も小さくなっていることがわかる。

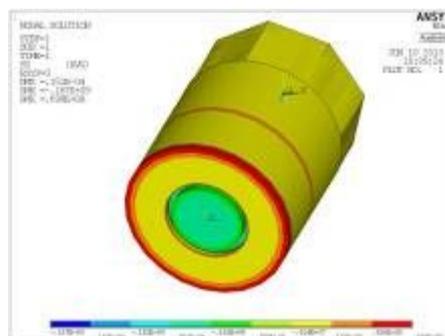


図9 有限要素法による応力の計算結果

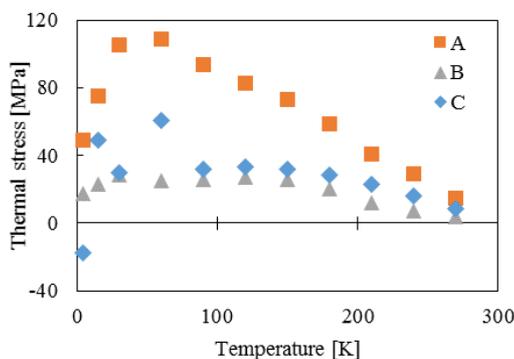


図10 熱応力の温度依存性の比較

(3) 振動子の試作とアクチュエータの駆動
有限要素法による検討から得られた構造について試作を行い、振動子の低温環境における特性の評価を行った。締め付けトルクとアドミッタンスの関係を図11に示す。4.5Kから293Kまででは、最適締め付けトルクは1.0Nmで変化がなかった。振動子の温度に対する最適締め付けトルクの変化を図12に示す。SUS304で構成した振動子は熱応力の影響を大きく受けるため最適締め付けトルクの変化が最大で0.3Nm変化している。しかし、今回試作した振動子は、最適締め付けトルクがどの温度においても一定である。これより、熱応力の影響が小さい振動子であるといえる。

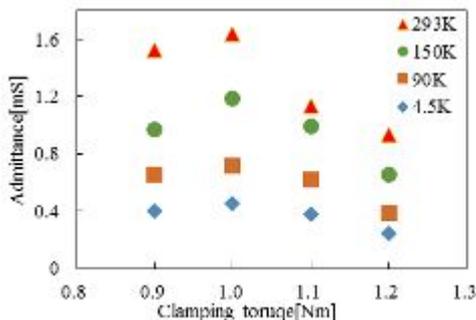


図11 締め付けトルクとアドミッタンスの関係

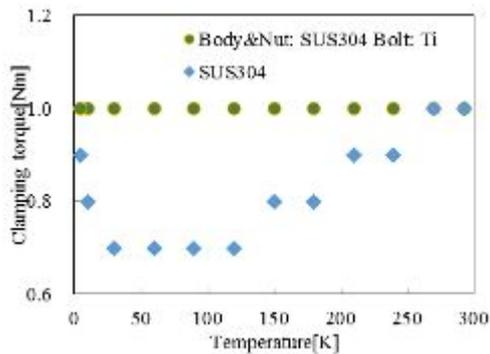


図 1.2 最適締め付けトルクの温度依存性

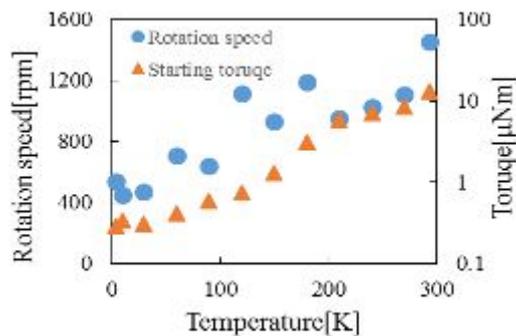


図 1.3 アクチュエータの駆動結果

試作した振動子を用いてアクチュエータとしての駆動を行った結果を示す。50 V_{p-p}の電圧を印加した際の回転数と起動トルクの温度依存性を示している。従来、低温環境で同構造のアクチュエータを駆動するためには、使用する環境温度において最適な予圧となるように振動子の組み立て時に締め付けトルクを設定する必要があった。これに対して、本実験で試作した振動子では使用する環境温度により組み立て時の締め付けトルクの値を変える必要がなく、室温から極低温環境まで連続的に駆動することが可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

M. Nakazono, T. Kanda, D. Yamaguchi, K. Suzumori, Y. Noguchi, A study on temperature dependence of an ultrasonic motor for cryogenic environment, Japanese Journal of Applied Physics, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 54, No.7S1, pp.07HE15-1 - 07HE15-5, 2015.6.22, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.54.07HE15

〔学会発表〕(計 11 件)

M. Nakazono, T. Kanda, “Design and evaluation of a pre-stress control device for cryogenic ultrasonic motors”, The 6th International Conference on Advanced

Mechatronics (ICAM2015), 2015 年 12 月 6 日, Waseda University (Shinjuku-ku, Tokyo)
T. Kanda et al. “Actuators for high temperature environment using pyroelectric effect”, The 12th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA2015), 2015 年 6 月 30 日, Vilnius (Lithuania)

中藺正浩, 神田岳文他 “極低温用超音波モータの駆動特性の温度依存性”, 第 35 回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2014 年 12 月 5 日, 明治大学 (東京都千代田区)

山口大介, 野口祐也, 神田岳文他 “極低温用超音波モータの等価回路を用いた特性評価”, 2014 年度精密工学会秋季大会 学術講演会, 2014 年 9 月 16 日 鳥取大学 鳥取キャンパス (鳥取県鳥取市)

Y. Noguchi, D. Yamaguchi, T. Kanda et al. “Evaluation of thermal stress of transducers for cryogenic ultrasonic motors”, 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014 年 9 月 6 日, Chicago (USA)

中藺正浩, 神田岳文他 “極低温用ランジュバン型振動子の熱応力に関する検討”, 第 14 回機素潤滑設計部門講演会, 2014 年 4 月 22 日, 信州松代ロイヤルホテル (長野県長野市)

野口祐也, 神田岳文他 “極低温環境用超音波モータの振動子の試作・評価”, 2013 年度精密工学会秋季大会, 2013 年 9 月 12 日, 関西大学 千里山キャンパス (大阪府吹田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 岳文 (KANADA, Takefumi)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 30346449

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者 該当なし

(4) 研究協力者

山口 大介 (YAMAGUCHI, Daisuke)

黒田 雅貴 (KURODA, Masataka)

武田 大 (TAKEDA, Dai)

野口 祐也 (NOGUCHI, Yuya)

中藺 正浩 (NAKAZONO, Masahiro)

山田 大貴 (YAMADA, Taiki)