

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月10日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760114

研究課題名（和文） 強磁場・極低温環境下用回転型マイクロ圧電アクチュエータに関する研究

研究課題名（英文） Research of rotary micro piezoelectric actuators for a high intense magnetic field and a cryogenic environment

研究代表者

神田 岳文（KANDA TAKEFUMI）

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：30346449

研究成果の概要（和文）：本研究は、分析装置などで必要とされる、極低温、強磁場の環境下で高速回転するマイクロ圧電アクチュエータを実現することを目的とする。ボルト締めランジュバン型振動子に着目し、温度変化による予圧の変化を分析することにより、低温環境でも圧電振動子によるロータ駆動を可能とした。温度と強磁場に対する特性を考慮することによって、10 K 以下の低温環境、7 T の強磁場環境において使用可能な回転型のマイクロ圧電アクチュエータを試作し、駆動に成功した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to realize the micro piezoelectric actuator for a high intense magnetic field and a cryogenic environment. There is a demand for high speed rotary type actuator for analysis equipments. By using bolt clamped Langevin type transducer and a simulation about the pre-load, we have realized the drive of rotor by the piezoelectric vibrator under the cryogenic condition. We have also succeeded in driving the rotary micro piezoelectric actuator under the condition of 10 K and 7 T.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：精密工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：アクチュエータ・圧電体・超音波モータ・マイクロモータ・強磁場・極低温・振動子

1. 研究開始当初の背景

現在、強磁場環境は、磁気共鳴画像装置（MRI）などの医療用機器、核磁気共鳴分光装置（NMR）など物理・化学分析用装置、超電導機器など、さまざまな機器で用いられている。このような環境の下で内部の構造物を駆動す

る方法として、空気圧、静電アクチュエータ、圧電アクチュエータなどの原理のものが報告され、また、実用化されている。一方、これらの強磁場を用いる機器の一部では、極低温状態の強磁場環境が利用されている。こうした極低温、強磁場の環境下で構造物を駆動す

るアクチュエータは、強磁場環境下でのものに比べてさらに実現が難しい。

極低温、強磁場の環境下で使用される回転型アクチュエータが求められている例の一つとして、固体核磁気共鳴（固体NMR）装置における高速回転マイクロアクチュエータがある。核磁気共鳴（NMR）は医療用MRIも含め、広く用いられているが、中でも固体NMRは、固体材料の分子構造を調べるものであり、近年試料の分析感度向上を目的として、試料の高速回転が求められている。さらに、測定対象試料を極低温下におくことができれば、従来見ることのできなかつた、分子の構造を測定することが可能になるといわれている。このような測定には、数Tの強磁場、さらに液体ヘリウム温度に近いである4.3 K以下の極低温において数千 rpm以上の高速回転を実現するアクチュエータが必要となる。加えて、このような環境を維持するため、できるだけ小さい機構を持つマイクロアクチュエータを実現することが望ましい、

従来、強磁場下で高速回転を実現する方法として、空気圧を用いたタービン式の回転機構が用いられている。この方法では、回転部の小型化が可能であり、また高速回転が実現されているものの、極低温環境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、複雑化が必須となる。この他、静電アクチュエータや、超音波モータをはじめとする圧電アクチュエータは、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。このうち静電アクチュエータは、回転機構に用いられた例は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、固体アクチュエータであり、アクチュエータ全体の小型化に有利な圧電材料の、強磁場、低温環境下での特性に着目す

る。代表的な圧電アクチュエータである超音波モータの構造を基本とし、材料、構造、制御方法の選択によって、強磁場、極低温環境下で高速回転可能なマイクロアクチュエータの実現を目的とする。

圧電アクチュエータは、強磁場・極低温下でスティックスリップ現象を用いて試料の位置制御などに使われた例や、きわめて低速の回転動作に用いられた例はあるものの、連続的な高速回転動作については十分検討されているとはいえない。過去の低温対応超音波モータも多くは液体窒素温度レベルへの対応にとどまっており、上記の分析装置で必要となる環境への対応は実現されていない。圧電体は固体の駆動素子であることからマイクロアクチュエータの駆動源として有利であるが、低温環境においては圧電定数に代表される駆動特性が低下する問題がある。

このために、アクチュエータを構成する材料、構造の検討を行い、すでに実績のある強磁場下で駆動可能なアクチュエータを基本として、極低温下で使用可能なマイクロアクチュエータの試作および評価を行う。特に液体窒素温度以下においては、従来の室温下で用いられている圧電材料とは異なる材料を用いて極低温対応アクチュエータを試作する。以上により強磁場、極低温下で高速回転を実現するマイクロアクチュエータの設計、製作、制御技術の基礎を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

圧電素子を駆動源として共振状態で用いられるボルト締めランジュバン型振動子は、超音波モータなどの圧電アクチュエータの振動源として広く利用されている。接着剤などの耐低温性の低い材料を使用せずに構成されるため、極低温環境内で使用する振動子に適しているものと考えられる。本研究ではこのボルト締めランジュバン型振動子に着目し、極

低温環境でも共振状態を利用することによって、回転型アクチュエータのロータの駆動を行うことにした。

本研究のボルト締めランジュバン型振動子の構造を図1に示す。試作した振動子は、金属製の振動子胴体、締結ボルト・ナット、厚さ0.1 mmの銅電極3枚、および表面に金電極を成膜した厚さ0.2 mmの圧電体のリング2枚から構成されている。圧電体は厚み方向に分極されている。表面の金電極を4分割することにより、中央部の4分割された電極を通じて、それぞれ位相が90度異なる交流電圧を印加する。これにより、互いに直交した2方向へたわみ振動を励振し、振動子先端に進行波を発生させる。この先端にロータが押し付けられると回転動作が生じ、電極間の電圧の位相差を変更することによって回転方向を逆転することもできる。この振動子では、形状・寸法や材料定数によって共振状態が変化するため、有限要素法を用いた検討を行っている。

試作したアクチュエータの一例を図2に示す。下端にランジュバン型振動子が配置されており、その上部に固定部、および測定部が配置された構造である。全体として最大幅が30 mm、全長が38.7 mmである。アクチュエータは振動子、ロータ、軸受け、コイルバネ、およびケースより構成される。コイルバネにより、ロータを振動子先端に押し付ける押付予圧を発生させ、摩擦駆動によって回転を行う。また、極低温における回転数の測定を行う測定部を持ち、スリットディスク、および光ファイバーより構成されている。

図2の液体ヘリウムを用いた評価装置内で、アクチュエータの極低温環境における特性の評価を行った。液体ヘリウムの液面からの距離とヒータによる加熱によって温度を調整し、主として振動子のアドミタンスとロータの回転数を測定した。

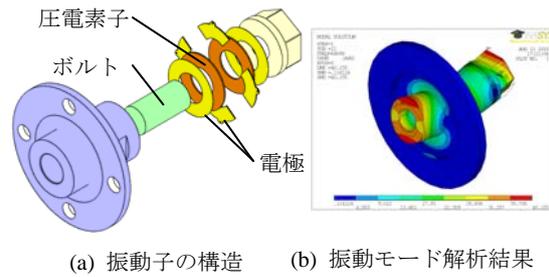


図1 振動子の構造と有限要素法によるランジュバン型振動子の解析

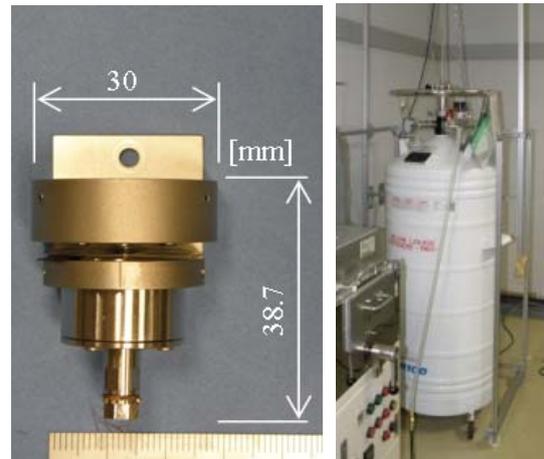


図2 試作したアクチュエータの一例と液体ヘリウムを用いる極低温環境評価装置

4. 研究成果

アクチュエータの試作・評価を行うことにより、以下の成果を得た。

(1) 圧電体は低温環境において圧電定数に代表される特性が低下するため、接着のみによる固定ではアクチュエータの駆動源として十分大きな出力が得られない。一方、ランジュバン型振動子のボルト締めによる固定では、接着等の問題は解決されるものの、熱膨張係数の影響により、圧電体に加えられる予圧の値が変化し、低温環境では十分大きな出力が得られない可能性がある。このため有限要素法による解析を行い、温度変化を考慮した設計を行った。

振動子を構成する材料の熱膨張係数、ヤング率の非線形特性を考慮して有限要素法を用

いた解析を行った。この結果を用いて、試作したボルト締めランジュバン型振動子の組み立て時の予圧の値を使用環境（低温環境）にあわせて設定することにより、十分大きな振動速度を発生する共振状態を得られた。

(2) (1)の結果に基づき、ステンレスを振動子胴体等に用い、圧電体としてPZTを用いた振動子を駆動源とする回転型アクチュエータの試作を行った。このアクチュエータについて回転数を測定し、さらにその立ち上がり特性から起動トルクの値を算出した。結果を図3に示す。振動子の予圧を低温環境に合わせて設定することによって、液体窒素温度(77 K)以下で150 rpm以上の回転数を得ることができた。

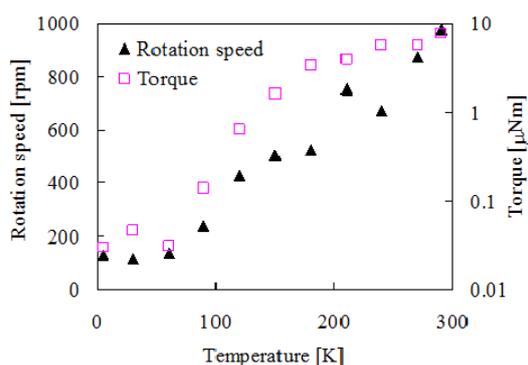


図3 PZTとステンレスを用いたアクチュエータの回転速度およびトルクの温度特性

(3) PZTは圧電体として広く利用されているものであるが、低温環境での特性は必ずしもアクチュエータの駆動源として十分なものではない。入手可能な他の圧電材料について極低温環境で有効なものがないか検討を行った。低温環境において試験片のアドミタンス測定により比較を行った。この結果、極低温環境においても安定した特性が得られたPMN-PT単結晶を用いて(1)と同様の振動子解析、および(2)と同様のアクチュエータ試作を行った。

図4に同形状・寸法のアクチュエータにおいて駆動源としてPZT焼結体を用いた場合とPMN-PT単結晶を用いた場合の出力の温度特性の比較を示す。PMN-PTを用いた場合、特に150 K以下において駆動特性が改善されることが確認された。5 K以下の領域で、PZTを用いたものに対して効率30倍となった。

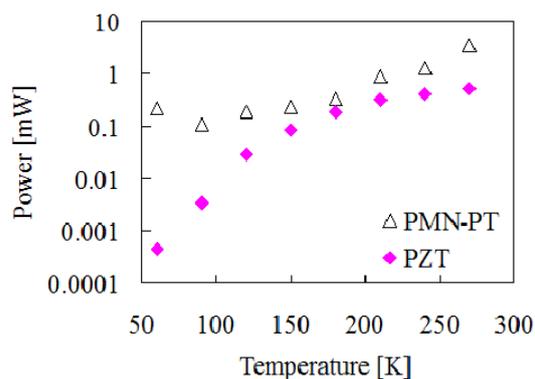


図4 圧電体としてPZTおよびPMN-PTを用いた際のアクチュエータの出力の温度特性の比較

(4) (2)の成果に基づき、PZTを駆動源として軸方向により対称性の高い振動状態を維持したまま固定が可能となる形状の振動子を設計・試作した。この形状は、高次モードを同時に励振することによって、発熱量の小さい駆動を実現する印加電圧波形を得ることも目的とした。同寸法、同材料の振動子を用いたアクチュエータと比較して、回転数は3倍に、またトルクは4倍に向上した。

(5) 強磁場・極低温の複合環境での使用を目的として、磁場の影響を受けにくい材料を選定して振動子を製作し、アクチュエータの駆動実験を行った。(2)で試作した主としてステンレスを金属材料として用いた振動子とほぼ同形状・寸法のチタン製の振動子を製作し、評価を行った。

超伝導マグネット内において、0から7 Tの

範囲で磁場を変化させて、振動子としての特性、およびアクチュエータの回転状態を測定した。これらの評価において、チタン製のものとはステンレス製の振動子に比べて磁場の影響を受けにくいこと、磁場の強さに依存しない回転駆動が可能であることを確かめた。このアクチュエータについて低温環境での駆動実験を行い、図5に示すように50 K以下でも300 rpm以上の回転数を得た。

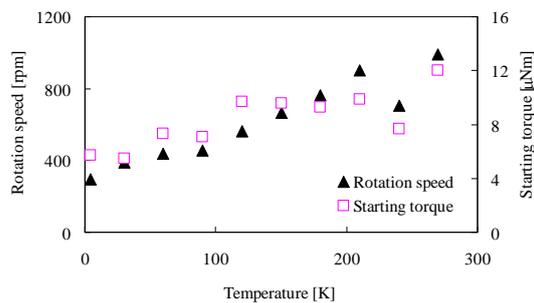


図5 チタン製振動子を用いたアクチュエータの回転数、トルクの温度特性

以上のように、圧電体を駆動源とするボルト締めランジュバン型振動子の極低温環境における特性を解析してアクチュエータの設計を行い、さらに駆動条件の検討を行うことにより、当初に目標としていた、77 K以下の低温領域で300 rpm以上で回転する回転型圧電アクチュエータを実現することができた。また、強磁場環境においても使用することのできる低温環境対応回転型アクチュエータを実現した。

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2件)

① Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda, Koichi Suzumori, Masataka Kuroda, Dai Takeda; An Ultrasonic Motor for Use at Ultralow Temperature Using Lead Magnesium

Niobate-Lead Titanate Single Crystal, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, No.7, 2012. (掲載決定) (査読あり)

② Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda, Koichi Suzumori; Bolt-Clamped Langevin-type Transducer for Ultrasonic Motor used at Ultralow Temperature, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 6, No.1, pp. 104-112, 2012. (査読あり)
DOI: 10.1299/jamdsm.6.104

[学会発表] (計15件)

① Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda, Koichi Suzumori, Dai Takeda, Masataka Kuroda, Driving Performance of the Ultrasonic Motor Using PMN-PT Single Crystal at Ultralow Temperature, the 9th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPA2012), 2012.4.23, Hirosaki Culture Center (Hirosaki, Aomori)

② 武田大、山口大介、藤澤和也、神田岳文、鈴木康一、極低温・強磁場の複合極限環境下での使用を目的とした超音波モータの試作・評価”, 第12回機素潤滑設計部門講演会、2012.4.23、愛媛県県民文化会館(愛媛県松山市)

③ Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda, Koichi Suzumori, Masataka Kuroda, Dai Takeda, A Design and Evaluation of Ultrasonic Motor Using PMN-PT single crystal for ultralow temperature, Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2011), 2011.11.9, Kyoto University (Kyoto)

④ Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda, Koichi Suzumori, Design and Evaluation of Ultrasonic Motor Located in Cryogenic Temperature Environments, IEEE International Ultrasonics Symposium 2011, 2011.10.20, Caribe

Royale All-Suite Hotel & Convention Center
(Orland, Florida, USA)

⑤ 神田岳文、山口大介、鈴森康一、黒田雅貴、低温環境用圧電アクチュエータの検討、日本ロボット学会学術講演会、2011.9.9、芝浦工業大学（東京都江東区）

⑥ Takefumi Kanda, Hiraku Maeda, Koichi Suzumori, Kazuya Fujisawa, A Low-Profile Micro Ultrasonic Motor for NMR Sample Spinning in High Magnetic Field, 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011), 2011.7.6, Merucure Budapest Buda (Budapest, Hungary)

⑦ 藤澤和也、前田拓、神田岳文、鈴森康一、竹腰清乃理、水野敬、扇形振動子を用いた強磁場環境用薄型超音波モータ、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011、2011.5.27、岡山コンベンションセンター（岡山県岡山市）

⑧ Daisuke Yamaguchi, Takefumi Kanda, Koichi Suzumori, A Design of Bolt-Clamped Langevin-Type Transducer for Cryo Ultrasonic Motor, The 4th International Conference on

Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2011), 2011.4.25, Hotel Takeshima (Gamagori, Aichi)

⑨ 山口大介、神田岳文、鈴森康一、ボルト締めランジュバン型振動子を用いた極低温用超音波モータ、精密工学会春季大会、2011.3.14、東洋大学（東京都文京区）

⑩ 神田岳文、山口大介、鈴森康一、低温環境用圧電アクチュエータの試作設計、日本ロボット学会学術講演会、2010.9.22、名古屋工業大学（愛知県名古屋市）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/research/superextream2011/gokuteion.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 岳文 (KANDA 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) 研究協力者

山口 大介 (YAMAGUCHI DAISUKE)
岡山大学・大学院自然科学研究科・博士後期課程