

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654108

研究課題名(和文)超流動ヘリウム回転流をつくる超伝導モーターの開発

研究課題名(英文)Development of superconducting motor producing circular flow of superfluid helium

研究代表者

矢野 英雄 (Yano, Hideo)

大阪市立大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70231652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超流動ヘリウムで回転するモーター開発に向けて、以下の成果を得た。

我々は回転子分離型のブラシレスモーターを採用した。このモーターは回転子の位置検出器を必要とする。複数の回転位置検出器を検討し、駆動コイルの誘導電圧による検出法が適していることを示した。我々は-203 (絶対温度70 K)までの低温でモーターの回転駆動に成功したが、これ以下の温度でモーターは作動しなかった。低温で回転損失が発生し、その原因はコイル磁芯材料の磁気ヒステリシスにあることが分かった。超流動ヘリウムにおいて動く物体が受ける抗力を調べ、100 mm/s以上の速度で超流動に渦が発生することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We report the results obtained in the present study as follows, for the purpose of developing a motor with a rotor working in superfluid helium.

(1) We employ a brushless motor with a rotor separated from driving coils. A brushless motor requires a sensor of rotor position. We measured the features of some position sensors, finding that a sensor using induced voltages between ends of driving coils is appropriate for low temperature usage. (2) We have succeeded in developing a brushless motor working at low temperatures above -203 C (70 K), though the motor could not work below the temperature. (3) We find that a rotation loss increases with decreasing temperature. This is because magnetic hysteresis of the core material of the coils increases. (4) By measuring the drag force of an obstacle moving in superfluid helium, we find that the obstacle produces quantized vortices at a velocity above 100 mm/s.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：流体力学 低温物性 超流体 量子渦

1. 研究開始当初の背景

ヘリウム4が液化されて1世紀がたち、これまでの膨大な研究から超流動ヘリウムの静的な物性はほぼ明らかになっている。ヘリウム4原子は陽子2個、中性子2個、電子2個の偶数個のFermi粒子から構成されるspin0のBose粒子である。液体ヘリウム4は飽和蒸気圧下において絶対温度2.17 K (-271°C)でBose-Einstein凝縮を起こし、超流動と呼ばれる状態に相転移する。超流動ヘリウム4の密度 ρ は、粘性を示す常流動の成分 ρ_n と、粘性がない超流動の成分 ρ_s の独立した二成分で表すことができ、 $\rho = \rho_s + \rho_n$ となる2流体モデルで記述することができる。

超流動成分の流れ場は、秩序変数 $\Psi(r) = \sqrt{n_0(r)}e^{i\varphi(r)}$ で特徴づけられており、超流動速度場はこの波動関数の位相勾配に比例する量として $v_s = (\hbar/m)\nabla\varphi$ で与えられる。ここで \hbar はプランク定数、 m はヘリウムの質量、 φ は波動関数の位相である。したがって、ある閉曲線Cを巡る循環 κ は、 $\kappa = \oint_C v_s dl$ と書ける。ここで超流体の位相に欠陥があると式は有限の値をとりうる。

$$\kappa = \oint_C v_s dl = \frac{\hbar}{m} \oint_C \nabla\varphi dl = \frac{\hbar}{m} n \quad (n = 1, 2, \dots)$$

これは、超流動の速度の循環が (\hbar/m) (= $0.998 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$)を単位として量子化されていることを示しており、この渦を「量子渦」と呼び、渦の中心の不連続領域を渦芯と呼ぶ。また、渦のつらなりを渦糸と呼び、一本の曲線状に渦度 $\omega = \nabla \times v_s$ が集中して存在している。古典流体では粘性のため、任意の小さい循環の渦の生成消滅を繰り返すのに対し、量子渦はそれ自身で閉じるか、壁に付着するなどして準安定的に存在することができる。また渦度 ω によって作る速度場はBiot-Savartの法則により与えられる。

このように超流動の理論的な背景はかなりよく分かっているが、量子渦や量子乱流の実験的研究は流れ場が必要で、超流動流をつくる方法に限られるため、あまり進んでいない。これまでの超流動流は、噴水効果や熱カウンター流など超流体成分 ρ_s と常流体成分 ρ_n の2流体の性質を利用する方法や、低温装置ごと回転させる大がかりな回転クライオスタット(速いものでも2回転/秒)があるが、いずれも流速を速くできない。

我々は、物体を超流動ヘリウム中で回転することによって、流れをつくることを目標としている。超流動は粘性がないので、回転子によって超流動流を作ることは困難に思える。しかし最近の我々の研究[1-3]から、物体に量子渦を付着させて動かせば、超流動流を駆動できることが分かってきた。量子渦が物体に付着する性質は奇妙に見えるが、超流動の完全流体の性質として、特異点となる渦の端が超流体中に存在することができないことと、超流動ヘリウム4の渦芯直径が0.1 nmと小

さいため、物体表面のわずかな突起にも付着できるためである。

この発見から、量子渦を付着させた物体を回転させることで、量子渦を成長させ、超流動流を駆動する着想にいたった。回転する方法として、低温装置ごと回転させる回転クライオスタットがすでに確立しているが、最大回転数が2回転/秒程度までに限られる。超流動ヘリウム中で回転子を直接回転させれば、高回転を得られ、低温装置の大型化を避けることも可能となる。

References (*: corresponding author)

1. 'Control of turbulence in boundary layers of superfluid ^4He by filtering out remanent vortices', N. Hashimoto, *H. Yano, et al, Phys. Rev. B, 76, 020504(R)(1-4) (2007).
2. 'Turbulence in boundary flow of superfluid ^4He triggered by free vortex rings', R. Goto, *H. Yano, et al, Phys. Rev. Lett., 100, 045301(1-4) (2008).
3. '物体の運動で発現する量子乱流', *矢野英雄, 坪田誠, 日本物理学会誌 第68巻第11号, 734-738 (2013).

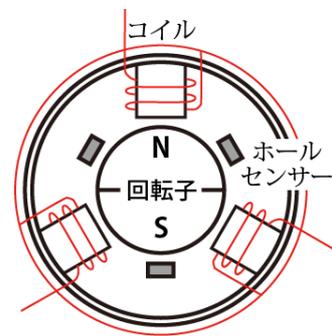
2. 研究の目的

我々は、超流動ヘリウムの回転流を駆動するために、液体ヘリウム中で動作するモーターを開発することを目標としている。室温では普通に使用されているモーターでも、ヘリウムが液体になる絶対温度4.2 K以下の温度では、モーターを動作させるのは困難になる。本研究では、低温で起こる問題点を整理・解決し、モーターを動作させることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では駆動コイルと回転子を分離できるモーターを採用する。回転子を永久磁石で製作し、回転子のまわりに配置したコイルで磁場を発生し、回転子を回転させる。通常のもーターはコイルが回転するため、電流を伝える整流子(ブラシ)を有するのに対し、採用する方法はブラシのないブラシレスモーターとして知られ、モーターの小型化がより容易となる。この方法によって、0回転から100回転/秒以上までの回転速度の制御をめざす。

まずブラシレスモーターの回転制御法を確立する。モーターの回転によるエネルギー損失を抑えるために、回転に同期した磁力を発生させる必要がある。これは、モーターの



ブラシレスモーター

エネルギー損失が発熱に換わり、液体ヘリウムを蒸発させるためである。同期をとるための回転を検出する方法として、ホール素子による回転位置検出法と、回転子の回転によって駆動コイルに誘導される誘導起電圧を利用する回転検出法がある。これらの性能を調べ、低温におけるモーターの回転性能を明らかにする。

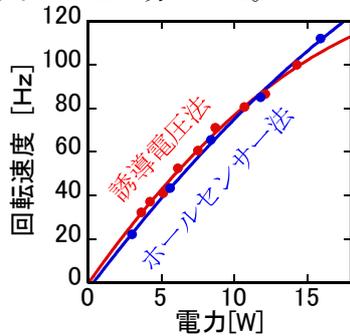
4. 研究成果

(1) 回転検出器の性能と回転制御

ブラシレスモーターの回転子位置検出器として、ホールセンサーがよく使用されている。ホールセンサーは、回転子(永久磁石)が作る磁場をホール素子で検出し、回転位置をON/OFFの信号で出力する。しかしホール素子やセンサーの電子回路は温度の影響を受けやすい。 -196°C (77 K)でのホールセンサーの出力電圧は、室温の1/10となり、位置検出器として使用できないことが分かった。

我々は、ホールセンサーに代わる方法として、回転速度に比例してコイルに誘導される誘導起電圧に着目した。誘導起電圧は、磁場の時間変化のみが関係し、

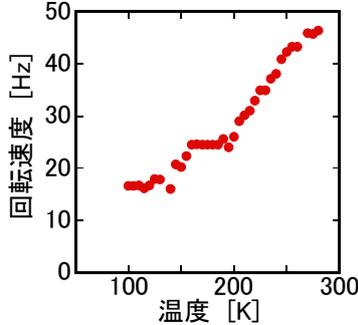
温度に依存しない。誘導起電圧を回転の参照信号としてモーターを制御する「3相全波ブラシレスDCモーターPWMセンサレスコントローラTB6575FNG」(TOSHIBA製)を使用し、室温で100回転/秒までの回転制御に成功した。



モーターの回転制御

(2) 回転性能の温度変化

モーターにかける電力を2.5~3 Wとほぼ一定に保ったまま温度を下げると、図のように回転速度が減少した。さらに冷却を試みたところ、70 K程度までは回転するものの(回転速度は未記録)、それ以下の温度では回転が止まった。



モーター回転数の温度変化

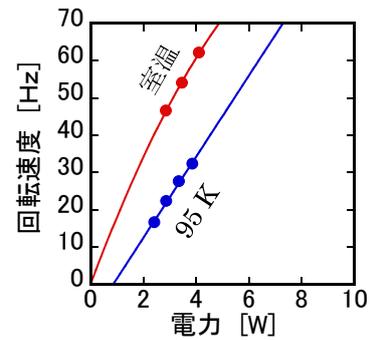
回転が止まる原因を探るために、室温と低温(95 K)での回転性能を比較した。同じ電力で回転速度は2分の1から3分の1程度減少している。電力に対する回転速度の変化(グ

ラフの傾き)

は、温度が変化してもあまり変わらない。このことは、速度に比例して表れる損失、たとえば軸と軸受間の摩擦による損失が、温度によってあまり

変化しないことを示している。

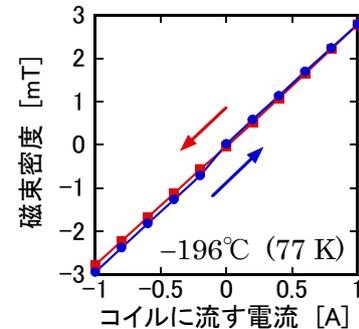
しかし、グラフから明らかなように、低温における損失は、室温と比べ増加している。これは摩擦による損失とは別に原因があることを示唆している。



モーターの回転性能

(3) 低温での磁芯材料の磁気ヒステリシス

低温で起こる損失の原因として、コイルの磁芯材料(フェライト)が考えられる。我々は、フェライトの磁気ヒステリシスを室温と低温において測定し



フェライトの磁気ヒステリシス

たところ、室温ではヒステリシスは観測されなかったが、低温(77 K)では、ヒステリシスが現れた。磁気ヒステリシスはコイルの磁場変化に対する磁束密度の遅れとして現れ、損失を引き起こす。つまり低温で現れるモーターの損失は、磁芯材料のヒステリシスが原因であることを示唆している。これらのことから、低温でモーターを駆動するためには、低温でも磁気ヒステリシスが現れない磁芯材料が必要であることがわかった。

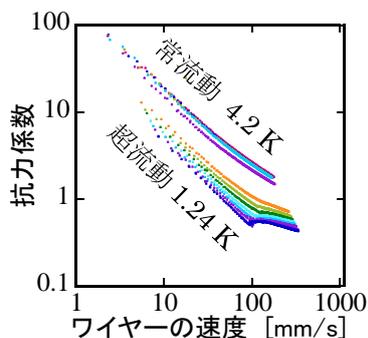
(4) 超流動ヘリウム4中における物体の動きが生成する量子渦と物体が受ける抗力

超流動ヘリウム4中におけるモーターの動作を推測するために、超流動中でワイヤーを動かし、量子渦の発生や超流体成分からワイヤーが受ける抗力を研究した。

超流動ヘリウム4中である速度以上で物体を動かすと量子渦が発生し、量子乱流へと発展する。生成された量子渦は、物体から離れ、超流動中を伝播する。外部へ放出された渦環を検出することによって、量子渦の発生を調べた。これにより物体が100 mm/s程度以上の速さで動くとき、量子渦が発生することが分かった。

また量子渦の発生により、ワイヤーは超流動ヘリウムから抗力を受ける。常流動ヘリウ

ムと超流動ヘリウム中で、振動するワイヤーが受ける抗力を、図に示す。超流動ヘリウムにあっても常流動成分が存在し、低速度で現れる抗力はこの常



液体ヘリウム中の抗力

流動成分による抗力であるが、100 mm/s 以上で新たな抗力が発生していることがわかる。これは、超流動成分からもワイヤーが抗力を受けていることを、示している。つまり 100 mm/s 以上の速さで超流動成分に量子渦が発生し、抗力を受けることを示している。

これらのことから、回転子の直径が 10 mm のとき、3 回転/秒以上の回転速度があれば、量子渦が発生し抗力を受けることになり、開発したブラシレスモーターはこの性能を十分満たしていることがわかる。

これらの成果を国内の学会や国際会議で発表した。

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 0 件)

〔学会発表〕 (計 4 件)

①若狭洋平*, 矢野英雄、“液体 ^4He 常流動と超流動における Vibrating wire の抗力”; 東京大学物性研究所短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」、東京大学物性研究所、2014 年 4 月 17 日～19 日

②織田慎平*, 若狭洋平, 小原頭, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹、“渦環放出から見る超流動 ^4He 中振動ワイヤーによる量子乱流の生成機構”; 日本物理学会第 69 回、東海大学、2014 年 3 月 27 日～30 日

③S. Oda*, Y. Wakasa, H. Kubo, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, “Observation of vortex emissions from superfluid ^4He turbulence at high temperatures”; International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), Kunibiki Messe, Matue, Japan, 2013 年 8 月 1 日～6 日

④織田慎平*, 久保博史, 永合祐輔, 西嶋陽, 小原頭, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹、“超流動 ^4He 中の常流体による量子渦環の飛行への影響”; 日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012 年 9 月 18 日～21 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 英雄 (YANO, Hideo)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70231652

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし