

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610105

研究課題名(和文) 超流動ヘリウムの定常流を駆動するポンプの開発

研究課題名(英文) Development of cryogenic pump for generating superfluid helium flow

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超流動ヘリウム定常流を駆動するポンプを開発し、以下の成果を得た。我々は、絶対温度4.2K以下でモーターを回転させることに成功した。低温で動作させるためにブラシレスモーターを採用し、すべり軸受け、低温で磁気ヒステリシスのないフェライトコア、低温用ホール素子を使用した。消費電力が0.25W以下で、2～40回転/秒の回転を実現した。超流動ヘリウム中で低温モーターを回転させたところ、超流動ヘリウムの回転流が駆動されることを発見した。その回転流速はモーターの回転速度とほぼ一致することを見出した。超流動回転流を利用する渦巻きポンプを作成し、超流動ヘリウム流を駆動することに成功した。

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 cryogenic pump to generate a superfluid helium flow. (1) We have successfully developed a cryogenic motor, rotating even at low temperatures below 4.2 K. To operate a motor at very low temperature, we adopted a brushless motor with a cryogenic Hall device, ferrite core with no magnetic hysteresis at low temperatures, and a sliding bearing with no grease. The motor has achieved a rotation range from 2 to 40 revolutions/second with a power below 0.25 W at a temperature of 2 K. (2) We have observed a rotating flow of superfluid helium generated by the motor. The flow rotation is almost equal to the rotation speed of the motor. (3) We developed a centrifugal pump using a helium rotation state, generating a superfluid helium flow.

研究分野：超低温物理学

キーワード：低温物性 超流体 量子渦 超流動流

1. 研究開始当初の背景

液体ヘリウムの超流動性が指摘されてから1世紀近くがたち、これまでの研究によって超流動ヘリウムの静的な性質は詳細に調べられている。ヘリウム (<sup>4</sup>He) 原子は陽子2個、中性子2個、電子2個の偶数個のフェルミ粒子から構成されるスピン0のボース粒子である。液体ヘリウム4 (<sup>4</sup>He) は飽和蒸気圧下において絶対温度 2.17 K (-271°C) でボース・アインシュタイン凝縮を起こし、超流動と呼ばれる状態に相転移する。超流動ヘリウム4は、粘性を示す常流動の成分  $\rho_n$  と、粘性がない超流動の成分  $\rho_s$  の独立した二成分で構成され、2流体モデル (全体の密度  $\rho = \rho_s + \rho_n$ ) 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、 $\varphi$  は波動関数の位相である。したがって、 $\nabla \times v_s = 0$  であるために、超流動の速度場は渦なしのポテンシャル流である。しかし、ある閉曲線 C 内に  $\Psi(r) = 0$  の欠陥があると、C に沿った循環は多重連結が可能となり、循環  $\kappa = \oint_C v_s dl$  は有限の値をとりうる。

$$\kappa = \oint_C v_s dl = \frac{\hbar}{m} \oint_C \nabla\varphi dl = \frac{\hbar}{m} n \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

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ることを示している。

超流動ヘリウムでは、直径 0.2 nm 程の超流動成分がゼロの状態を芯とする、糸状の渦が存在する。この渦を「量子渦」と呼び、 $n = 1$  の循環が渦芯のまわりを流れ、渦芯には渦度  $\omega = \nabla \times v_s$  が集中して存在している。量子渦は、液体ヘリウムが超流動状態に相転移する過程で核生成され、あるいは相転移温度付近で熱励起されるなどして生成される。古典流体では粘性のため、任意の小さな循環の渦の生成消滅を繰り返すのに対し、超流動の渦の端は超流動中で途切れることができないため、それ自身で閉じるか、超流動の境界(壁)に付着するなどして、準安定的に存在する。また渦度  $\omega$  によって作られる速度場はビオ・サバル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。しかし、量子渦や量子乱流の実験研究は流れ場が必要で、超流動流をつくる方法が限られているため、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  $\rho_s$  と常流体成分  $\rho_n$  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 0.2 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することで、相対的に誘起される超流動流によって量子渦を成長させ、その量子渦によって超流動の回転流を駆動する着想にいたった。回転流は回転による遠心力のために、中心と周囲との間に圧力差が生じる。この圧力差を利用すれば、超流動ヘリウムの定常流を駆動できると考えられる。本研究では、これらのアイデアをもとに、新たな超流動流の駆動方法を提案する。

<引用文献> (\*: corresponding author)

① ‘Control of turbulence in boundary layers of superfluid <sup>4</sup>He 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 <sup>4</sup>He 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

本研究は、量子渦を付着させた物体を回転することで、超流動ヘリウムに回転流を誘起し、定常流を駆動するポンプの開発を目的としている。我々は、すでに絶対温度 95 K (-178 °C) の低温で動作するモーターの開発に成功しており、この低温モーターによって回転流を駆動する。本研究では、まず低温モーターの動作について、低温で起こる問題点を整理・解決し、超流動ヘリウムの回転流を駆動する。次に超流動ヘリウム回転流から流れを取り出し、超流動ヘリウム定常流を駆動する。

3. 研究の方法

本研究では駆動コイルとローターを分離できるモーターを採用する (図1)。ローターを永久磁石で製作し、ローターの内側に配置し

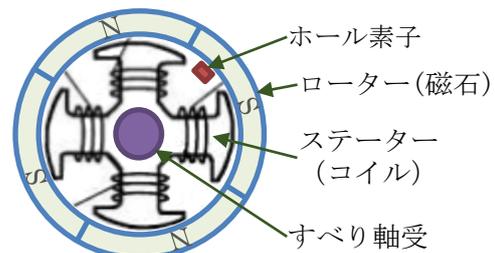


図1. ブラシレスモーター

たコイル（ステーター）で磁場を発生し、ローターを回転させる。通常のモ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で、モーターの発熱を抑え小型化や回転の制御が容易である。これにより、低温で0回転から100回転/秒までの回転性能を目指す。

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。

ブラシレスモーターのローターに、超流動ヘリウム回転流を駆動するブレードを取り付ける（図2）。これによってシリンダー容器内に回転流を駆動し、回転中心と周囲との間に圧力差を生じる。この圧力差を利用して、超流動定常流を駆動するポンプ（渦巻きポンプ）を開発する。



図2. 超流動ヘリウムの回転流駆動装置

#### 4. 研究成果

##### (1) 低温（4.2 K 以下）のモーター性能

モーターを低温で回転させるためには、ローターを支持する軸受（ベアリング）、コイルを巻くステーターコアのフェライト、およびホール素子の選定が重要となる。

ボールベアリングを代表とするころがり軸受けは、回転軸をボールが支持し、潤滑油によってスムーズに回転する。しかし低温では潤滑油が固化するため、回転を妨げる。このため、我々は、潤滑油を使用しないすべり軸受を採用した。ステーターコアにはコイルの巻きやすい形状のフェライトが必要となる。市販のモーターに使われるステーターコアの磁気ヒステリシスを77 K（-196 °C）で測定し、ヒステリシスのないコアを選別した。市販のモーターではローター位置を検出する磁気センサーとしてホール IC を使用しているが、これは低温では動作しない。我々は低温でも動作する GaAs 素材の SHARP 製ホール素子 LT135A を使用した。

またコイルの素材として銅線と超伝導線（銅被覆の NbTi 線）を用いた。銅線は室温でも抵抗が小さいためにモーターの回転性能をチェックできるが、超伝導線は室温での電気抵抗が大きいため、回転をチェックするこ

とができない。しかし使用した超伝導線は、液体ヘリウム中で超伝導になり、電気抵抗による電流損失の低減が期待できる。

これらの工夫により、液体ヘリウム中で低温モーター

を回転させることに成功した。回転速度は、コイルが銅線の場合で、2~40 回転/秒の回転を実現した。高速度では回転は安定するが、2 回転/秒では回転はスムーズではない。これはすべり軸受の摩擦による影響だと考えられる。絶対温度 2 K のヘリウムガス 0.03 気圧（3 kPa）中で測定したモーターの消費電力を図3に示す。ここで rps は revolutions per second の略で、1 秒あたりの回転数である。ヘリウムガスの圧力は真空に近くその攪拌損失は無視できるので、観測される消費電力はモーター固有の摩擦損失や銅線抵抗による損失に起因する。消費電力はすべて熱になると考えられるが、低温モーターの発熱は 40 回転/秒でも 0.25 W 以下と少なく、ヘリウムを超流動状態に維持することが可能である。

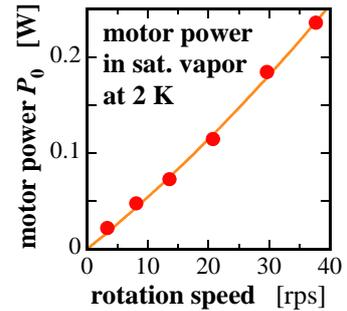


図3. モーターの消費電力

##### (2) 超流動ヘリウム回転流の駆動

低温モーターをシリンダー容器に収め、容器に液体ヘリウムを入れる。その状態で低温モーターを動作させたところ、モーターは回転し、モーターの回転とともに常流動状態の液体ヘリウムも回転した。モーター回転による発熱は小さく、液体ヘリウムの蒸発はさほど多くは無い。さらに液体ヘリウムを超流動状態まで冷却しモーターを回転したところ、超流動ヘリウムも回転することを発見した（図4）。これはモーターに付着し残留する量子渦がモーターの回転によ



図4. 超流動ヘリウムの回転流

って成長し、この量子渦の回転が超流動ヘリウムを回転させることを示している。

図4は、超流動ヘリウムの液面が、回転によって変形していることを示している。一般に、剛体回転する非圧縮性液体の液面は変形し、その液面高さ  $h$  は回転軸からの距離  $R$  に対し、

$$h = \frac{R^2 \omega^2}{2g}$$

で与えられる。ここで  $\omega$  は回転流の角速度、 $g$  は重力加速度である。

液面の高さは $R^2$ に比例して変形しているの  
で、流れが剛体回転していることがわかる。  
この式を用いて、回転流の液面形状から求めた超流動へ

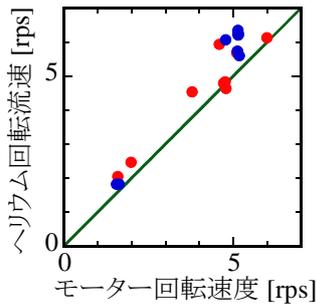


図5. 超流動ヘリウムの回転流速

リウムの回転流速を図5に示す。青丸(●)は超流動の割合が50%以上、赤丸(●)は50%以下を示す。図5から分かるように、超流動の割合にかかわらず、ヘリウムの回転流速はモーターの回転速度に比例(緑の実線)することが分かる。以上のことから、粘性のない超流動状態であっても、物体の回転によって離れた場所の超流動を回転させることができることを明らかにした。

超流動ヘリウム中でモーターを回転させると、液体の攪拌による損失が現れる。図6に液体ヘリウム中のモーターの消費電力を示す。ここで青丸(●)は超流動ヘリウム、赤丸(●)は常流動ヘリウムでの消費電力を示す。前節で示したモーター固有の消費電力より、増加していることがわかる。この増加は液体の攪拌動力に対応する。20回転/秒以下では、液体ヘリウムの状態にかかわらず、攪拌動力がほぼ同じになる結果は興味深い。この結果は、攪拌動力が液体の粘性によらないことを示唆している。なお20回転/秒を超えると、回転液面がモーター本体まで届くため、攪拌動力が減少する。このため高速回転の攪拌動力を比較することはできない。

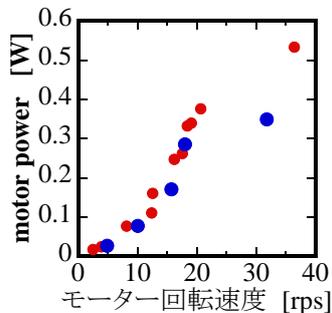


図6. 液体ヘリウム中のモーターの消費電力

### (3) 回転流を利用する超流動ポンプ

非圧縮性流体が角速度 $\omega$ で剛体回転するとき、回転中心から距離 $R$ での中心との圧力の増加 $\Delta p$ は、

$$\Delta p = \frac{\rho}{8} \omega^2 R^2$$

で与えられる。ここで $\rho$ は流体の密度である。この圧力差 $\Delta p$ を利用すれば、回転流から定常流を取り出す、渦巻ポンプを作成できる。作成した渦巻ポンプの概略図を図7に示す。シリンダー上部には中央に孔を開け、またシリンダー側面下部にスリットを開ける。シリン

ダー内で低温モーターを回転させることで、シリンダー内に超流動回転流を駆動する。回転流の外周は中心と比べて圧力が高いので、シリンダー側面のスリットから超流動ヘリウムが吐き出され、シリンダー上部中心の孔から超流動ヘリウムが吸い込まれる。これにより図7の矢印の向きに流れる定常流の駆動に成功した。

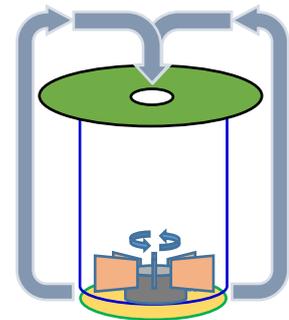


図7. 超流動ヘリウムの渦巻ポンプ

超流動定常流の確認は、固体水素微粒子による粒子追跡流速測定 (PTV: particle tracking velocimetry) を行った。水素とヘリウムの混合ガスを液体ヘリウムに吹き込むと、直径 $10 \mu\text{m}$ 程度の固体水素微粒子が生成される。この微粒子の運動を高速カメラで撮影し、定常流の流れを調べた。現状では微粒子にフォーカスした追跡測定技術を確立しておらず、定常流の詳細は分からない。しかしシリンダー上部へ微粒子が吸い込まれる様子を観測しており、定常流が駆動されていることを確認した。

以上で述べた研究成果は、国際会議や国内の学会等で多数発表しており、国際会議で口頭発表に選ばれるなど、本研究の成果は高く評価されている。

### 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 11 件)

① 大山勝義\*, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, “低温回転モーターを用いた量子渦研究”; 第15回低温工学・超伝導若手合同講演会、大阪府立大学 I-site なんば (大阪府大阪市)、2016年11月25日

② 大山勝義\*, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, “超流動 $^4\text{He}$ 回転流による渦の生成”; 日本物理学会2016年秋季大会、金沢大学 (石川県金沢市)、2016年9月13日~16日

③ K. Ohyama\*, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa, “Observation of spiral flow and vortex produced by cryogenic motor in superfluid  $^4\text{He}$  (Poster)”; Osaka City University and National Taiwan Normal University Mini-Workshop, Taipei City (Taiwan), 2016年9月23日

④ H. Yano\*, “Formation of quantum turbulence generated by vibrating wire & Observation of axial flow and vortex produced by cryogenic motor in superfluid

$^4\text{He}$  (Talk)”; Afternoon Session on Quantum Turbulence in International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016), Prague (Czech Republic), 2016年8月16日

⑤ H. Yano\*, K. Ohyama, K. Obara, and O. Ishikawa, “Observation of axial flow and vortex produced by cryogenic motor in superfluid  $^4\text{He}$  (Poster)”; International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016), Prague (Czech Republic), 2016年8月10日~16日

⑥ 大山勝義\*, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, “モーター駆動による超流動  $^4\text{He}$  回転流の観測Ⅱ”; 日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学(宮城県仙台市), 2016年3月19日~22日

⑦ 大山勝義\*, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, “モーター駆動による超流動  $^4\text{He}$  回転流の観測(ポスター)”; 物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」、東京大学物性研究所(千葉県柏市), 2016年1月5日~7日

⑧ 大山勝義, 小川耕平, 小原顕, 矢野英雄\*, 石川修六, 畑徹, “液体ヘリウム中で動作する低温モーターの開発”; 日本物理学会2015年秋季大会、関西大学(大阪府吹田市), 2015年9月16日~19日

⑨ 若狭洋平\*, 千葉祐弥, 吉田翔太, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “液体  $^4\text{He}$  常流動と超流動における Vibrating wire の抗力”; 日本物理学会2014年秋季大会、中部大学(愛知県春日井市), 2014年9月7日~10日

⑩ Y. Wakasa\*, S. Oda, Y. Chiba, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, and T. Hata, “Power dependence of vortex emissions generated by vibrating wire in superfluid  $^4\text{He}$  at finite temperature (Poster)”; Frontiers of Low Temperature Physics (ULT2014), San Carlos de Bariloche (Argentina), 2014年8月15日~19日

⑪ 若狭洋平\*, 矢野英雄, “液体  $^4\text{He}$  常流動と超流動における Vibrating wire の抗力(ポスター)”; 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(千葉県柏市), 2014年4月17日~19日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 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

### (4) 研究協力者

若狭 洋平 (WAKASA, Yohei)

大山 勝義 (OHYAMA, Katuyoshi)