

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06267

研究課題名（和文）次世代エネルギー社会のための低温液体中で動作する小型推進マシン

研究課題名（英文）Small Propulsion Machine in Cryogenic Fluid in Next-Generation Energy Society

研究代表者

二村 宗男（Futamura, Muneo）

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：80404854

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：超電導応用機器の冷却媒体や新エネルギー媒体として、液体窒素や液体水素などの低温流体の利用増加に対応するために、低温液体中で動作する小型マシンを開発した。77Kの液体窒素中で効率的に動作するために、樹脂製マシン内部のニクロム線に通電加熱して液体窒素を気化し、その噴射によって推進する機構を考案した。高速度カメラの測定によって、噴射口径と噴射速度との関係を明らかにした。また、永久磁石とコイルによる駆動を組み合わせることによってマシンボディの開閉機構を考案し、複数回の継続的な噴射ができる機構の可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で用いた液体窒素を含む低温流体は、低密度・低粘度・低温のために使用部材に限られるなど、これまでに研究されている常温の流体中を推進する機構とは異なる。そのような、従来研究されていない環境における効率的な小型マシンを開発したものである。本研究は、流体力学的には、通常のレイノルズ領域とは異なり、未だ詳細に研究されていない範囲を実験的に調べたものであり、流体力学的に新しい知見を得るものである。

また、今後の社会における液体水素や液体窒素の普及に対応するために、低温液体中を駆動する小型マシンの開発に資す知見を得るものであり、本研究の社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We develop a small swimming machine in cryogenic fluid for maintenance of superconducting applications. The small swimming machine comprises an acrylonitrile butadiene styrene resin body encapsulating a nichrome wire. The vaporized nitrogen gas jet from an exit of the body was observed using a high-speed camera. The dependence of the injection velocity on the injection diameter was clarified. By constructing the machine body with two parts, the repetition of the injection action was enabled.

研究分野：機械工学

キーワード：小型推進マシン ジェット型推進 低温流体 液体窒素

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超電導応用機器の冷却媒体や新エネルギー媒体として、液体窒素や液体水素などの低温流体の利用増加が予想される。これら低温流体応用機器の保守点検のために低温流体中で動作可能な小型アクチュエータおよび小型推進マシンが必要となるが、これまでの研究において低温流体中を対象とした小型アクチュエータや推進機構の研究はほとんどなされていなかった。従来は常温の水や、オイルなどの高粘度流体中の動作を対象としたものが主であり、液体窒素や液体水素などの低粘度・低密度で低温の流体は従来の機構とは異なる知見が求められた。

2. 研究の目的

新エネルギー媒体としての液体水素や、超電導応用機器の冷却媒体として液体窒素など、エネルギー需要の増大に対応するために今後の社会において低温流体の利用増加が見込まれる。これら低温流体の応用機器や貯蔵装置の保守点検のために低温液体中で動作可能な小型遊泳マシンの必要性が高まっている。常温の水やシリコンオイル中の推進マシンの研究はこれまでに多く行われてきたが、低温液体は通常流体と比べて環境条件が全く異なり、密度と粘度が大幅に小さい。比較的大きな液体窒素においても粘度は水の0.18倍、密度は0.8倍である。また、通常の小型遊泳マシンに用いられるヒスなどの弾性変形は、低温中では利用できない。このため、従来の推進方式をそのまま用いることができない。

本研究では、このような特殊環境である低温流体中で遊泳推進可能な小型マシンの開発を目指して機構を検討し、モデルを製作して基礎特性を調べた。

3. 研究の方法

液体窒素中で推進可能な小型マシンの機構を複数考案し、その基礎特性を測定した。

初めに、永久磁石とコイルから構成される電磁振動子を用いた機構を考案した。電磁場の解析から駆動力を計算し、力学的に最適な構造を求めた。その後、試作機を製作して高速度カメラで動きを撮影して速度を調べた。

次に、液体窒素が沸点温度であることを活かして、液体窒素を気化して噴射する機構を考案した。カプセル状のマシン内でニクロム線によって液体窒素を気化し、そのガスをマシン後方の噴射口から噴射する反力によって推進する。噴射の速度を高速度カメラ等で測定し、噴射口径やマシン形状を変えて測定した。

さらに、継続的に噴射を行うために、マシンボディが分割する機構を考案した。マシンはエナメル線を巻いたコイルに交流矩形電流を流すことによって磁石がコイルからの磁場の力を受け、磁石を取り付けた可動部分が液体窒素中で開閉動作を行い、液体窒素を吸気口からマシン内部に取り入れる機構である。

製作したマシンのCAD図を図1に示す。FDM-3Dプリンタで製作した実機を図2に示す。マシンは前方固定部にエナメル線コイル(φ26mm, 85回巻き)、後方可動部品の先端にネオジウム磁石(φ14, 厚さ1.5mm)とニクロム線(線径0.26mm, 長さ100mm)を取り付けた。固定部の左右から後方に2本のアームを伸ばし、ピンによって可動部がとび出すことを防いだ。可動部が閉まった際に接触する固定部に溝を設け、可動部が固定部の溝にはまることで、閉める動作の際に内部のガスが噴射口以外から漏れることを防いだ。コイルに交流矩形電流を流し、固定部と可動部が密着したのを確認後、可動部内のニクロム線に電流を流すことで、可動部後方の噴射口から加熱され気化した窒素ガスが噴射される。窒素ガス噴射後にコイル電流の向きが逆転すると、固定部のコイルからの磁気力によって可動部の磁石が力を受けて固定部から離れ、流入口より液体窒素が可動部に充填された後、再度電流の逆転によって可動部が固定部に密着する。この繰り返しによって窒素ガスの持続的な噴射が可能になる。

測定は、予めマシンを液体窒素に浸して十分に冷却しておく。マシンの土台は、液体窒素容器底面の凹凸と噛み合わさっており、グリスで接着することで動かないよう固定される。駆動電流は、ファンクションジェネレータ(エフエヌ回路設計ブロック, WF1974)で発生した信号電圧をパイボラ電源(エフエヌ回路設計ブロック, BP4610)によって増幅してマシンのニクロム線に通電した。パイボラ電源の電圧モニタ信号をデータロガー(グラフテック社, GL900)を通してPCに取り込むことで通電電圧を測定し、通電電流を求めた。マシンの様子を、上方に固定したハイスピードカメラ(ディテクト社, HAS-U2)で撮影し、PCに取り込む。撮影画像と通電電流は、同期測定システム(ディテクト社, DIPP-ADII)によって同期してPCに記録される。通電電流は矩形波(周期4秒, 振幅20A)を印加し、撮影は100fpsで撮影後に4フレームごと(0.004秒ごと)に可動部の変位をピクセル単位で記録した。

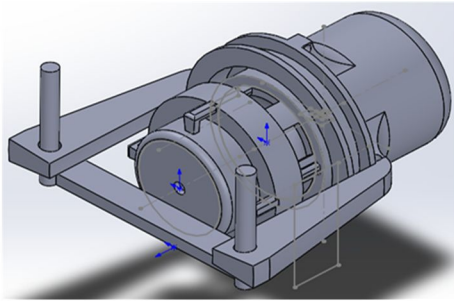


図 1．開閉機構を付けた噴射推進マシン図

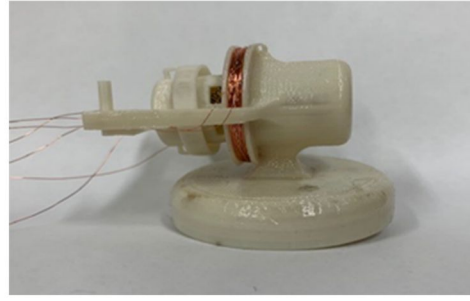


図 2．製作した噴射推進マシン

4．研究成果

コイルからの可動部磁石の変位と電流値を図 3 に示す．電流値は測定値の電圧とマシンのコイルの抵抗値から求めた．図 3 から液体窒素の中でマシンの連続開閉機構が動作することがわかる．最大値と最小値付近にノイズが発生している．このノイズは液体窒素中に発生する泡による水面の揺らぎや、液面付近の窒素の霧が、高速度カメラで液体窒素中のマシンの動作を撮影した際に画像に映り込み、画像解析に影響を及ぼしたことが原因と考えられる．図 3 から電流の周期に追従して開閉運動が動作していることが確認できる．このことから機構の動作を電流によって制御が可能であることがわかった．電流の正負が切り替わることで 0.04 秒以内に可動部に動きが観測された．また電流が負から正に切り替わり、およそ 0.4 秒で閉まった状態から開いた状態になった．電流が正から負に切り替わり、およそ 0.3 秒で開いた状態から閉じた状態となった．これは閉じている状態から開くよりも、開いている状態の方が、コイルと磁石の距離が近いことから、動作始めに大きい力を受けたことが原因と考えられる．電流の波形とマシンの変位が対応していることから、液体窒素中で連続ジェット噴射機構は用途に応じて電流の周期により動作の制御が可能であることがわかった．

微分することで求めた速度と、可動部の変位を図 4 に示す．図 4 では液体窒素中のマシンを撮影したことによるノイズの影響が大きくあらわれた．開く動作では動作開始から 0.2 秒付近で速度の値が最大になり、閉まる動作では動作開始から 0.1 秒付近で速度の値が最大となった．

コイルの中心軸上の磁場 H は式(1)で表せる．

$$H = \frac{NIa^2}{2(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

a はコイルの半径、 N はコイルの巻き数、 I はコイルに流れる電流、 x はコイルの中心からの距離である．

式(1)より、コイル中心からの距離が遠ざかるにつれて磁場が減少し、磁気力が低下することがわかる．磁石がコイルから受ける力 F は式(2)で表せる．ただし、 M は磁石の磁化、 V は磁石の体積である．

$$F = \frac{dH}{dx} MV \quad (2)$$

式(2)で求めたマシン可動部の磁石が受ける磁気力を図 5 に示す．図 3 と図 5 より電流に対応して駆動力が作用していることが確認できる．図 5 のグラフにおいて時刻 2 s からの 0.3 秒間と、時刻 4 s からの 0.4 秒間は、磁気力の向きが不連続に反転した後に緩やかな曲線で定常状態に落ち着いている．これは電流が反転した直後から、可動部が移動することでコイルと磁石間の距離が変化しているためである．磁気力の最低値（負方向の最大値）は -3.3 N で磁石の距離が 6 mm の全開状態のときである．磁気力の最高値は 3.3 N で、時刻 2 s で電流が反転した直後である．このとき磁石変位は 6 mm だが、磁気力が作用した直後から移動して磁石がコイルから遠ざかるため、すぐに磁気力は低下し、1.5 N の定常状態になる．動き出す瞬間に最大駆動力が作用するため、短い時間で移動する．このことから、コイルと磁石の配置および電流波形によってマシンの開閉動作の駆動力を制御可能なことを確認した．

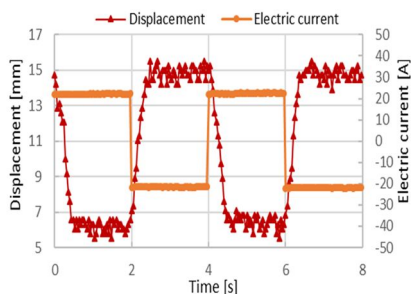


図 3．変位と電流の時間変化

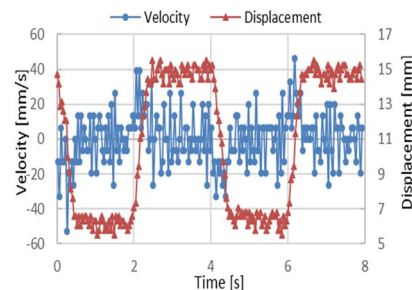


図 4．速度と変位の時間変化

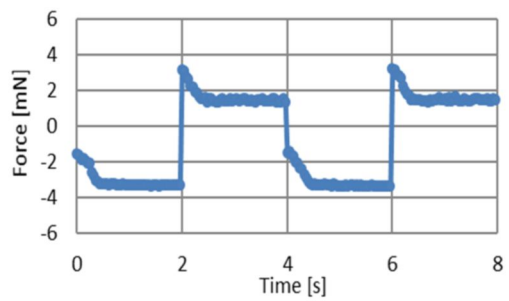


図5. 磁石がコイルから受ける磁気力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 佐藤 明, 二村 宗男	4. 巻 84
2. 論文標題 電界共役流体のジェット発生メカニズム解明に関する格子ボルツマン・シミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00558	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Futamura Muneo, Shindo Ryo	4. 巻 1054
2. 論文標題 Levitation stability of superconducting stators with addition of a ring-shaped magnet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012088 ~ 012088
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1054/1/012088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 二村 宗男	4. 巻 5
2. 論文標題 液体窒素中を推進する電磁振動子を用いた小型マシン	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 秋田県立大学ウェブジャーナルB (研究成果部門)	6. 最初と最後の頁 6-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 二村宗男, 佐藤明
2. 発表標題 液体窒素中で動作する小型遊泳マシン
3. 学会等名 日本機械学会東北支部 第53期講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 二村 宗男, 進藤 諒
2. 発表標題 リング永久磁石を付加した超伝導磁気浮上の安定性
3. 学会等名 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Muneo Futamura, Ryo Shindo
2. 発表標題 Effects of Additional Ring-Shaped Magnet on Superconducting Levitation Stability
3. 学会等名 the 2018 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二村 宗男
2. 発表標題 補助リング磁石を追加した超伝導ステータの浮上特性
3. 学会等名 2018 年度秋季 (第97回) 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二村 宗男, 佐藤 明
2. 発表標題 液体窒素中を推進する小型遊泳マシンの検討
3. 学会等名 日本機械学会 第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二村 宗男, 本間 駿介
2. 発表標題 内径の異なるリング永久磁石が超伝導磁気浮上に与える影響
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Muneo Futamura, Shunsuke Homma
2. 発表標題 Effects of an added ring-shaped magnet on superconducting magnetic levitation
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (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	佐藤 明 (Sato Akira) (50211941)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授 (21401)	