

液体窒素中を推進する電磁振動子を用いた小型マシン

二村宗男¹¹ 秋田県立大学 システム科学技術学部 機械工学科

化石燃料に代わる新エネルギー媒体としての液体水素や、高効率な超伝導応用機器の冷却媒体としての液体窒素など、低温流体利用機器や貯蔵タンクにおける点検保守用マシンとして低温流体中を推進可能な小型マシンが必要である。低温中では通常の材料や駆動方式では動作しないため、本研究ではコイルと永久磁石間の磁気力によって駆動する電磁振動子を用いた振動型推進マシンについて検討した。永久磁石2つから構成される振動子に作用する磁気力をコイル電流による磁場から計算し、駆動力を求めることで振動子の動きをシミュレートした。振動子の往復速度がマシンの移動に必要な非対称形状となるためには、コイル電流が鋸歯状波よりも矩形波のほうが適していることを確認した。製作した振動型推進マシンに、オフセット矩形電流を印加することによって、液体窒素中を 1.2 mm/s の速度で推進することに成功した。

キーワード：小型推進マシン，電磁振動子，磁気力，液体窒素

私たちの生活を持続可能なものにするために、自然エネルギーの利用とともに高効率な省エネルギー技術が欠かせない。その中には、液体水素や液体窒素などの低温流体を用いるものが多くある。燃料電池などに用いる新エネルギー媒体としての液体水素や、高効率な電力関連機器である超伝導応用機器の冷媒としての液体窒素である。超伝導応用機器として、バルク超伝導体のエネルギー貯蔵フライホイールや、超伝導線材を用いた電磁石、また、超伝導送電線の実証なども行われており、実用化が近づいている。これらの低温流体利用機器や貯蔵タンクにおいて、その内部を点検や保守するためには、低温流体中で動作可能な小型アクチュエータや小型推進マシンが必要である。従来のアクチュエータや推進マシンに関する研究では、常温の水やオイル中における検討は多くなされてきた(須藤ら, 2013, 福田ら, 1994, 仙道ら, 1999)。しかしながら低温液体中の動作に関する研究は十分になされていない。低温流体の粘性係数は通常流体に比べて非常に小さく、液体窒素では水の0.18倍、液体水素では0.015倍である。

また密度は、液体窒素では0.81、液体水素では0.07と水に比べて大幅に小さい。さらに、小型遊泳推進マシンによく用いられるヒレは、低温流体中では素材が弾性を失うために使用することができない。このように常温の流体と比べて環境が大きく異なる低温流体中において動作するためには、既存のものとは異なるアプローチが必要である。

そこで本著者らは、未だ十分な研究がなされていない低温流体中における小型マシンの開発を目指して、これまでに液体窒素の気化ガス噴射を用いた小型推進マシンを検討してきた(二村ら, 2016)。しかしながらその方式では、一度限りの推進しか行うことができず、再動作のためにはマシンを取り出して胴体内に再度液体窒素を充填する必要がある。そこで本研究では連続推進を行うマシンを目指して、永久磁石とコイルからなる電磁振動子を用いた推進について、液体窒素中の動作について調べたので報告する。

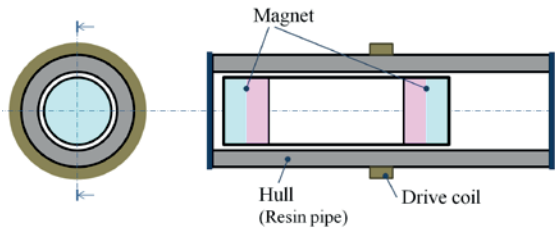


図1 電磁振動子型推進マシンの概要図

推進モデルの製作

永久磁石の振動子を用いた推進方式について図1に概略図を示す。両端を塞いだ外パイプ（ポリカーボネイト、外径 10 mm、内径 7 mm、長さ 30 mm）の内部に振動子（外径 6.2 mm、長さ 20 mm、質量 1.65 g）が封入されている。

振動子は、永久磁石（Nd-Fe-B 磁石、直径 5.5 mm、長さ 4 mm）2 個を磁極が対向する向きに、12 mm の間隔を空けて PP（polypropylene）樹脂で接続して構成されている。振動子は外パイプ内を移動するが、どの位置にあっても外パイプの中央をまたいで2つの磁石が存在する。外パイプの中央部外側に巻いたコイルに電流を流すことによって、振動子を構成する2つの磁石にそれぞれ反発と吸引の磁気力が同時にはたらき、振動子をコイル磁場の方向へと駆動する。したがって、コイルに交流電流を印加することでパイプ内部で振動子が往復運動する。推進マシン全体の質量は 3.55 g である。

駆動力の計算

振動子にはたらき磁気駆動力を計算する。本来は永久磁石の全磁極表面で磁場を解析するべきであるが、ここでは対象としている軸方向長さに比べて半径方向長さが十分小さいと考えて、中心軸上の磁場のみを考慮して近似的に考える。磁化 M 、体積 V の永久磁石にはたらき磁気力 F は下式で表される。

$$F = MV \frac{dH}{dx} \quad (1)$$

ここで、 H はコイルがつくる磁場であり、コイルの軸上の位置 x につくる磁場は Biot-Savart の法則より以下の式で求まる。

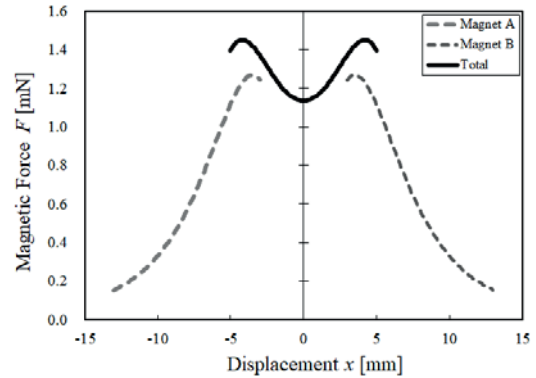


図2 振動子にはたらき駆動磁気力

$$H(x) = \frac{ni}{2} \frac{R^2}{(x^2 + R^2)^{1.5}} \quad (2)$$

i は印加電流、 n はコイルの巻き数である。

本報では、式 (1)、(2) を基にして更に正確にするためにコイル磁場はコイルの巻幅と巻厚を考慮して式 (2) を積分し、磁場勾配は永久磁石の N 極と S 極との差から求めた。計算した磁気力を図2に示す。印加電流を 1 A の定電流とし、その他は前述の実機の値を用いた。樹脂パイプ中央を $x=0$ として、振動子の変位 x_{osc} の可動範囲は $-5 \leq x_{osc} \leq 5$ である。また、振動子を構成する2つの永久磁石の各中心は振動子中心から ± 8 mm の位置にあるため、各磁石の可動範囲は $-13 \leq x_{mag_A} \leq 3$ 、 $3 \leq x_{mag_B} \leq 13$ である。それぞれの磁石に作用する力を、図2の破線で示す。

1つの磁石にはたらき磁気力は、 ± 3.5 mm 付近で最大となり、その位置から離れると急激に低下する。この2つの磁石にはたらき磁気力の和が、振動子の駆動力となる。振動子に作用する力を図2の実線で示す。2つの磁石を ± 8 mm の位置（12 mm の間隔）で組み合わせることによって、可動範囲内のどこに振動子があっても、常にどちらかの磁石は磁気力の大きい領域に存在する。このため、振動子としては、最大で $F = 1.45$ mN (at $x = 4.2$)、最低でも $F = 1.13$ mN (at $x = 0$) の力がはたらき、特に動き初めにおいて重要となる両端付近において比較的大きな力を得ることができ、確実に駆動することが可能である。

電流波形による振動子変位

コイル電流が正弦波のような+−が対象な波形では、マシンはその場で振動するのみであり、移動す

ることはできない。マシンが1方向に移動推進するためには、振動子の動きが片側には強く移動し、反対側への移動はゆっくりとした鋸歯状の非対称波形でなければならず、そのような駆動をするためのコイル電流を印加する必要がある。そこで、コイルに印加する駆動電流の波形による振動子の変位をシミュレートした。ある時刻のコイル電流の値から、図2のようにその時の振動子（の永久磁石）の位置におけるコイル磁場を求めて駆動力を計算し、Euler法によって振動子の動きを計算した。外パイプと振動子間の摩擦は駆動力に比べて小さいため無視し、液体窒素等の粘性として粘性減衰係数を0.1とした。

シミュレーションの結果、鋸歯状波を印加した場合においても、単純にプラス側とマイナス側の電流値が同じでは、移動に適した変位波形は得られなかった。そこで、鋸歯状波にオフセットをかけて、プラス側に大きな電流値、マイナス側には小さな電流値となるように印加して振動子の変位を検討した。

図3にオフセットした鋸歯状波を印加した場合の変位を示す。駆動電流（図3破線）は周波数1 Hz（上り0.1下り0.9の鋸歯状）、全振幅1 A_{p-p}、オフセット0.2 Aとした。電流値が鋸歯状であっても、振動子の変位波形は、ほぼ矩形である。これは、電流値

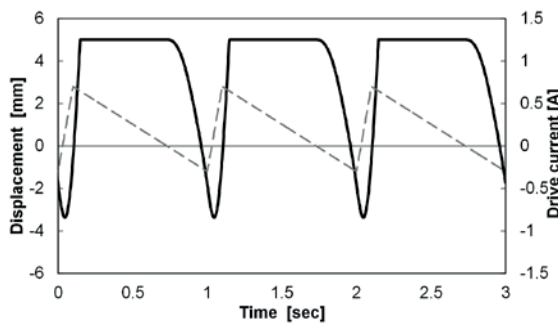


図3 鋸歯状波駆動による振動子の変位

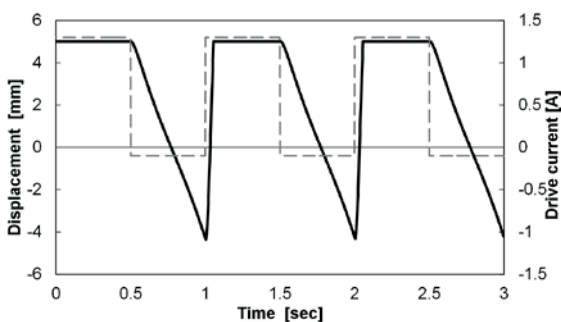


図4 矩形波駆動による振動子の変位

が負の時間範囲において振動子はマイナス側に加速する力を受け、電流値が正の時間範囲にはプラス側に加速し続けるためである。

次に、オフセット矩形波のシミュレーション結果を図4に示す。周波数1 Hz、振幅は+1.3 A、-0.1 Aである。駆動電流が大きな正の値で印加されるため、振動子はマイナスの位置から素早くプラス側に移動する。駆動電流が負の値で-0.1と小さいため、振動子は弱い力でマイナス側にゆっくりと移動している。また、矩形波であるため、振動子の移動中も電流値は一定であり、粘性抵抗などの釣り合いによってほぼ一定速度でゆっくりと移動している。このように、振動子の移動速度を非対称にするためには、駆動電流は鋸歯状波よりも矩形波が適しており、その電流値をプラス側とマイナス側で適切に設定することが重要であることがわかった。

液体窒素中の推進実験

液体窒素中において、製作したモデルの駆動実験を行った。図5に示すように、ファンクションジェ

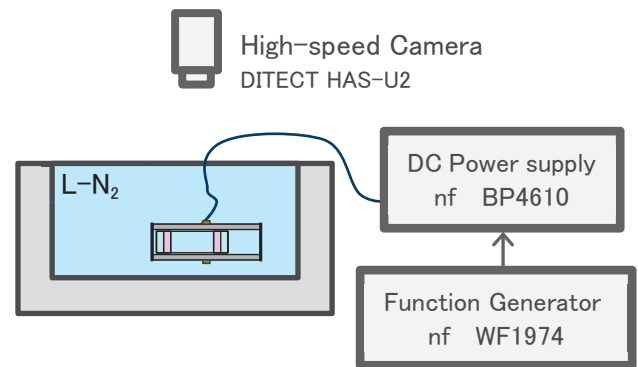


図5 実験装置の概略図

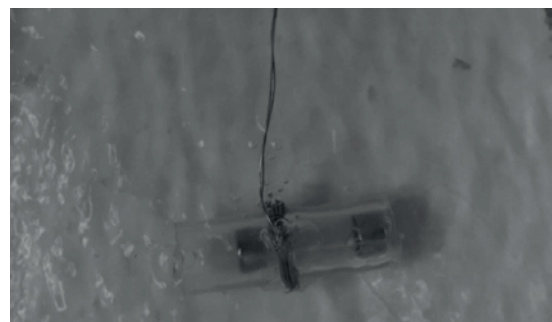


図6 液体窒素中を推進するマシン

ネレータ (nf 製 WF1974) で設定した任意の信号波形を, 交流電源 (nf 製 BP4610) によって電流値として増幅してコイルに印加した.

〔平成 30 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 30 年 7 月 10 日受理〕

オフセットをかけた鋸歯状波電流を印加することによって, 液体窒素中での推進を確認した. 推進の様子を図 6 に示す. この振動によって液体窒素中を 25 秒で 30 mm を移動することを確認した. 1 周期当りおよそ 1.2 mm の推進であり, 速度は大きくは無いが一方へ確実に推進することに成功した.

結言

液体窒素中で推進する小型マシンとして, 電磁振動子を用いた振動型推進機構について検討した. コイルに印加する駆動電流波形について, コイル磁場による駆動力から振動子の動きをシミュレートすることによって, 鋸歯状波よりも矩形波のほうが適していることを示した. オフセットによる振幅値を適切に設定することで振動子の移動速度を制御し, 振動子の往復の非対称速度を実現可能なことを示した. 製作した推進マシンにオフセット矩形波電流を印加することで, およそ 1.2 mm/s の速度で液体窒素中を推進することに成功した.

文献

- SUDO S., SEGAWA S. and HONDA T. (2013).
Magnetic Swimming Mechanism in a Viscous Liquid. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURE*, 17, 729-736.
- 福田敏男, 川本敦史, 新井史人, 松浦英雄 (1994).
「流体内マイクロ移動ロボットに関する研究」
『日本機械学会論文誌』 60 (569), 204-210.
- 仙道雅彦, 島崎克彦, 石山和志, 井上光輝, 荒井賢一 (1999). 「スパイラル形状を基本とした泳動型磁気マイクロマシンの泳動特性」『日本磁気学会誌』 23, 1657-1660.
- 二村宗男, 武井俊樹, 進藤諒 (2016). 「液体窒素中を推進するマイクロマシンの開発」『秋田県立大学ウェブジャーナル B』 3, 29-33.

Small machine using oscillating propulsion by magnetic force in liquid nitrogen

Muneo Futamura¹

¹ *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

The author of this study describes a small machine that uses magnetic oscillating propulsion in cryogenic fluid for the maintenance of superconducting applications. A magnetic oscillator in the machine is composed of two permanent magnets connected through a space. The magnetic oscillator moves using the magnetic force of the magnetic field induced by the current of the drive coil. The magnetic oscillations created by the oscillator are calculated via an analysis of the magnetic field of the drive coil. By the off-set square wave drive current, the oscillator makes the undulation suitable for the movement of the machine. The machine driven by the off-set square wave current moves at the speed of 1.2 mm/s.

Keywords: small machine, magnetic oscillator, magnetic force, liquid nitrogen