

液体窒素中を推進するマイクロマシンの開発

二村宗男¹, 武井俊樹¹, 進藤諒¹¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

超電導応用機器の冷却媒体である液体窒素や新エネルギー媒体としての液体水素など、低温流体応用の増加が近い将来に見込まれる。本研究ではこれら低温流体の応用機器や貯蔵装置のメンテナンスを目的として低温液体中で動作可能な小型推進マシンの開発を目指した。液体窒素（77 K）中を、液体窒素のガスを噴出する反力によって推進する小型マシンを製作し、高速度ビデオカメラで観察した。気化する液体窒素を内包するマシンボディ内容積と、噴射口の面積などを変え、そのジェットの噴射速度とボディの推進速度を調べた。ジェットの噴射速度は噴射口面積に依存し、噴射口面積が小さいほど速度が大きい。ボディの推進速度は、ボディ質量、ジェットの質量、ジェット速度に依存することがわかった。製作したマシンにおいて、0.28 m/s の推進速度が観察され、液体窒素中の推進機構の可能性が示された。

キーワード：マイクロ遊泳マシン、ジェット推進、噴射速度、液体窒素

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が今後増加することが予想される。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マイクロ推進マシンが必要となる。従来の研究では、水やシリコンオイル中の推進マシンの研究は多く行われてきた。しかしながら低温液体中では粘性が通常流体よりも大幅に小さく、低温流体の中で比較的粘性の大きな液体窒素の粘性でさえ水の6分の1である。また、通常のマイクロマシンの遊泳推進に用いられるような弾性を利用したヒレは、低温においては素材が弾性を失うために利用ができない。本研究では沸点温度にあることを利用して、気化ガスの噴射によって液体窒素中を推進するマイクロマシンのモデルを製作し、その特性を調べた。

実験装置および方法

製作したマイクロマシンの構造を図1に示す。マ

シンのボディは熱溶解積層法の3Dプリンタを用いてABS樹脂で製作した。寸法パラメータを変えて6種類のボディを製作した。その寸法を表1に示す。 L は全長、 D は直径、 d は噴射口直径、 m は質量、 V は内容積である。ボディの内部にはニクロム線が固定されている。推進の前にあらかじめ、ボディ内に液体窒素を満たしておき、ニクロム線に通電することで液体窒素を気化する。気化した窒素ガスによって内部圧力が高まり、窒素ガスと液体窒素がジェットとなり後方の穴から噴出し、その反力によりマイクロマシンは推進する。ボディの推進力を求めるた

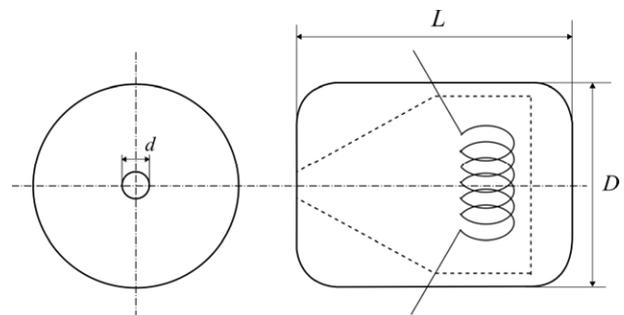


図1 製作したマイクロジェット推進マシン

表1 マイクロマシンの寸法

L [mm]	D [mm]	d [mm]	m [g]	V [mm ³]
20	15	1.0	2.06	448.3π
		1.5	2.05	454.7π
		2.0	1.98	461.6π
		2.5	1.96	468.9π
		3.0	1.93	476.6π
10	2.0	0.92	182.0π	

め、まず推進の元となるジェット速度を測定した。マイクロマシンを液体窒素中に噴射口を上向きに固定し、鉛直上向きに噴射するジェットの様子をハイスピードカメラで撮影し解析した。次にマイクロマシンの泳動の様子を測定した。測定に用いた実験装置の概略図を図2に示す。直流電源から電圧を印加してニクロム線を発熱させ、マシン後方より噴射されるジェットおよびマイクロマシンの泳動の様子をハイスピードカメラを用いて撮影、解析を行った。

結果および考察

鉛直上向きに噴出されるジェットについて、噴射口の大きさによる速度の違いを図3に示す。印加電圧は全て5Vである。ジェットの平均速度は、噴射穴径 $d = 1.0$ mm で 5.1 m/s, $d = 3.0$ mm で 1.7 m/s であり、穴径が小さいものほど噴出するジェットの速度は大きくなった。単位時間当たりの流出量は $d = 3.0$ mm のものが最も大きく 1.2×10^{-5} m³/s, $d = 1.0$ mm で 4.0×10^{-6} m³/s となった。どの径においても噴射時間は極めて短く、0.04 s から 0.06 s ほどであった。噴

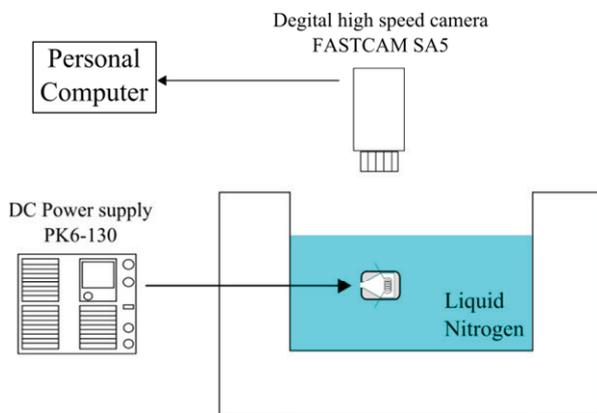


図2 推進の実験装置概要

射穴径を変えず内容積を小さくしたもの、印加電圧を6Vにしたものについてはどちらも噴出するジェットの速度は増加した。またジェットの速度からマシンの推進力を計算し実測値と比較した。面積 S の穴を dt 秒間に通過する流体の運動量は(1)式のようにになり推進力 T は(2)式で表せる。

$$mv = \rho S v^2 dt \tag{1}$$

$$T = \frac{mv}{dt} = \rho S v^2 \tag{2}$$

v は噴出するジェット速度、 m は噴射質量、 ρ は液体窒素の密度である。(1)式から推進速度を計算すると $d = 1.5$ mm で 0.89 m/s, $d = 2.0$ mm で 0.55 m/s, $d = 2.5$ mm で 0.38 m/s となり、 $d = 1.5$ mm のものは $d = 2.5$ mm のものより2倍以上大きくなった。推進速度の測定では印加電圧を5Vとし実験を行った。 $d = 2.0$ mm のマイクロマシンの推進の様子を図4に示す。マイクロマシン後方から噴出されるジェットには気泡とジェットの噴射が断続的に見られた。噴射口のサイズを変えた3種類のマイクロマシンの推進について実測をした。変位を図5に速度を図6に示す。実測値は $d = 1.5$ mm のものは最大速度 0.23 m/s, 2.0 mm と 2.5 mm のものの最大速度はおよそ 0.18 m/s となった。どの径のものも計算値で求めた速度よりも大幅に低い値となった。その原因として、液体窒素の粘度は 0.158 mPa/s で水の 1/6 程度と低いながらも粘性の影響などが考えられる。速度は計算値より低くなったが計算結果と同様に噴射口のサイズが 1.5 mm のものが推進速度は最も速くなった。さらに

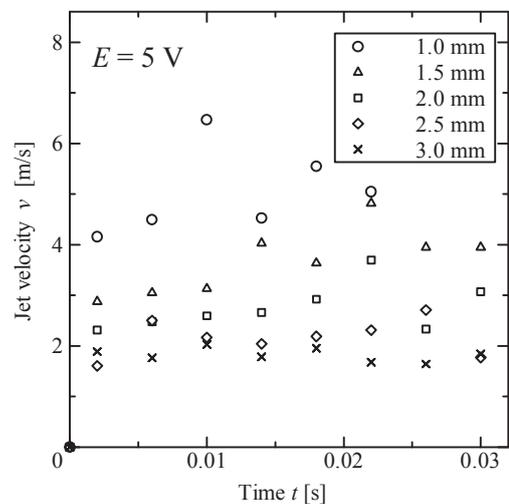


図3 噴射穴径によるジェット速度の違い

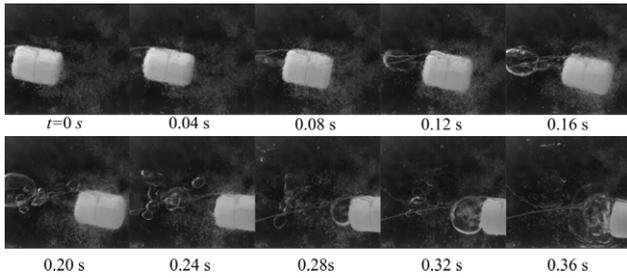


図4 マイクロマシンの推進(d=2.0 mm)

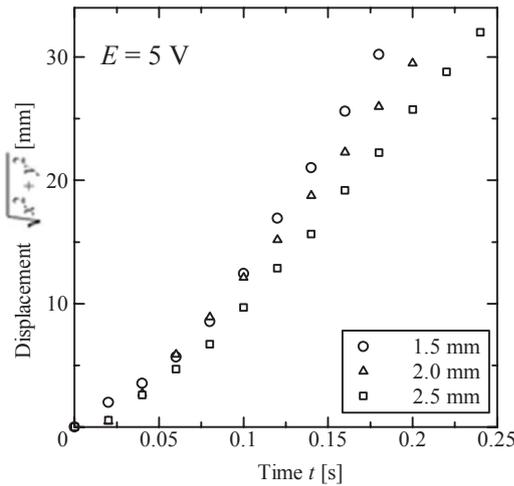


図5 マイクロマシンの推進距離

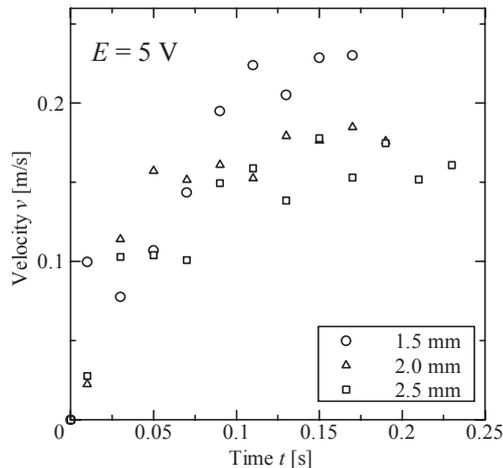


図6 マイクロマシンの推進速度

推進力を(2)式より計算するとこちらも $d = 1.5$ mm のもので最大値 0.028 N となった。 $d = 2.0$ mm のものと $d = 2.5$ mm のものの推進力はほぼ変わらない 0.02 N となった。実測値でも速度の大きい 1.5 mm のもので 0.1 s までの加速度が 3 つの中で最も大きい 2.0 m/s^2 を得た。式(2)に示すように、推進力は速度の 2 乗に比例するため噴射口のサイズが小さくても速度の大きい $d = 1.5$ mm で推進力は最大になっ

たとえられる。また噴射口の直径を 2.0 mm, マシンの外径を 10 mm とし、サイズを小さくしたマイクロマシンについてはサイズを小さくしたことにより内容積はおよそ 40% になり、質量は $1/2$ 程度の 0.92 g となった。このマイクロマシンから鉛直上向きに噴出したジェットは速度は 3.4 m/s ほどであり $D = 15$ mm の同じ穴径のものより速くなった。しかし流出量はサイズが大きいものより若干減少した。ジェットの運動量から計算したマイクロマシンの速度は最も速く 1.05 m/s となった。実際に液体窒素中で推進速度を測定すると最高速度は 0.28 m/s 程度となり、今回製作したマイクロマシンの中では最も速いものとなった。

結言

液体窒素中をジェット推進するマイクロマシンを試作し、ボディと噴射穴径に関する寸法を変えて推進に与える影響を調べた結果、以下の知見を得た。

- ・噴出するジェットのスピードは穴の径に依存し、穴の径が小さくなるほど噴射するジェットの速度は増加する。
- ・推進速度は噴出されるジェットの質量、速度、マシンの質量によって決まる。
- ・同一サイズのマシンの比較では噴射口が 1.5 mm のもので最大速度を得られ、噴射口の大きさが同じであればマシンの外径が小さいもので速度が大きくなった。
- ・液体窒素中で熱膨張の圧力利用によるマシン移動の可能性を示した。

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.

〔 平成 28 年 7 月 20 日受付
平成 28 年 7 月 31 日受理 〕

Development of a microswimming machine in liquid nitrogen

Muneo Futamura¹, Toshiki Takei¹, Ryo Shindo¹

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

In this study, we describe a small swimming machine in cryogenic fluid for maintenance of superconducting applications. Jet propulsion properties of the machine in liquid nitrogen (77 K) were experimentally examined. The microswimming 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 maximum jet speed was 6.5 m/s from an exit with a diameter of 1.0 mm. The calculated impulsive force was estimated to be 0.028 N. The machine with a 1.5-mm-diameter exit can move forward with a maximum speed of 0.28 m/s via the reaction force of a vaporized nitrogen gas jet. The swimming velocity was observed to depend on the internal vaporization volume and a mass of the machine body.

Keywords: microswimming machine, jet propulsion, jet velocity, liquid nitrogen