

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32619

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630073

研究課題名(和文) 気液界面の温度差・濃度差によるマランゴニ対流を駆動源とする医療用微細泳動エンジン

研究課題名(英文) Microscale engine driven by Marangoni convection for medical applications

研究代表者

丹下 学 (TANGE, Manabu)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70549584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マランゴニ対流を動力源とした水中を遊泳するマイクロエンジンを開発し、PIV解析を用いてエンジンの推力を評価した。エンジン内の気液界面に酢酸を当て界面上に濃度勾配を生むことで、エンジンの穴を貫通するジェットを発生させることに成功した。PIV解析より最大流速がジェットの中心付近に存在したことを示した。約5秒間継続したジェットにより生まれたエンジンの最大推力は270nNであった。また、濃度差マランゴニ対流を利用して、マイクロ遊泳エンジン自身を水中で駆動できる推力が得られることも確認した。

研究成果の概要(英文)：Some medical and biological applications have been expecting small scale robots migrating under water to move to their targets. This study proposes a novel microscale swimming device powered by Marangoni flow. The engine is composed of 3 thin disks of 3 mm in diameter with a hole bonded together. The middle disk has a larger hole than the outer disks' hole and a thin gap between the outer disks holds air bubbles to cover the hole edge with gas-liquid interface. Nonuniform surface tension on the interface due to temperature or contaminant difference pulls the liquid through the hole. The device is driven in the opposite direction by the reaction force of the liquid flow. In the experiment, the device hanged with a thin wire was immersed in a pure water pool with PIV particles. Surface tension gradient was realized with contaminant difference by injecting acetic acid solution toward one side of the hole. The device successfully produced jet through the hole to propel the device.

研究分野：伝熱工学

キーワード：マランゴニ対流 微細加工 医療用ロボット

1. 研究開始当初の背景

近年の微細加工技術の発展に伴い、医工学の分野でも小さな機械の活躍が期待されており、自走式カプセル内視鏡・Drug Delivery System・医療用ロボットの駆動を背景として、微細な推進機構が提案されている。しかし、多くの推進機構は平板のバタ足運動を駆動原理としており慣性力によって推進するため、低レイノルズ数流れの時間対称性より、粘性流中・微小流体中では大きな駆動力を持ってない。また、可動部を持つロボットは体内での破損や生体への傷害という問題を内包している。

そこで本研究では、新たな駆動原理としてマランゴニ対流を採用した。マランゴニ対流とは、表面張力の大きさが温度や濃度に依存することにより、気液界面上において表面張力の弱い領域から強い領域に流れが誘起される現象である。マランゴニ対流に関する研究はこれまで数多く行われているが、これを液中を泳動する駆動力とした研究は皆無であった。表面張力の不均一性によって動く物体として、水面で動くショウノウ舟を取り上げることができるが、水中で泳動するものは存在しない。またマランゴニ対流を用いた場合には、スケール効果によって、微細な領域の表面張力現象は慣性力・重力に比べて大きな影響を持ち、大きな駆動力を得ることができるものと予想された。

2. 研究の目的

本研究課題では、本研究では水中でもマランゴニ対流を起こし対流の反動で泳動することができる微小デバイス(マランゴニエンジン)を開発し、生体内での泳動原理としてのマランゴニ対流の有効性を実証することを目的とした。マランゴニエンジンは気液界面(気泡)をエンジン内部に搭載し、エンジン周りの濃度勾配に応じて推力を得ることができる。具体的には、微細加工技術を用いて気泡を内包できる微細な構造を実現し、駆動実験(駆動力の計測・流れ場の計測)を行った。

3. 研究の方法

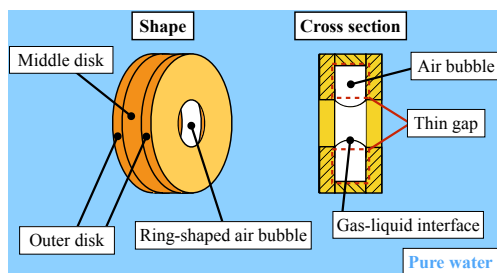


図1 マランゴニエンジンの構造

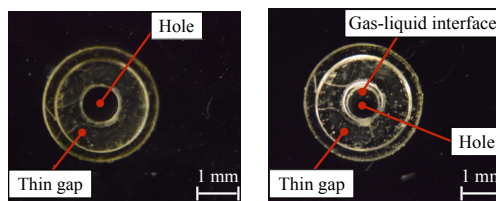


図2 マランゴニエンジンの様子；
(a)空中, (b)水中

開発したマランゴニエンジンの構造と推進原理を図1に示す。このエンジンは、フォトリソグラフィ技術を用いて製作した3 mm直径の円盤(紫外線硬化樹脂SU-8 3050製)を3枚貼り合わせることで構成されている。各円盤の中央には穴が開いており、外側2枚の円盤と真ん中の円盤の穴径はそれぞれ1.0 mm, 2.5 mmである。外側の円盤と真ん中の円盤の穴径が異なるため、エンジン内部には薄い隙間が存在している。撥水コート剤を用いてエンジン全体に撥水加工処理を施すことでエンジン内部の隙間にリング状の気泡を抱え込むことができる。

空中および水中のエンジンを上から撮影した写真を図2に示す。図2の(a)と(b)を比較すると、(b)の水中におけるエンジンの穴の内側には高さ45-90 μmの気液界面が確認でき、エンジン内部に気泡を保持している様子が確認できる。

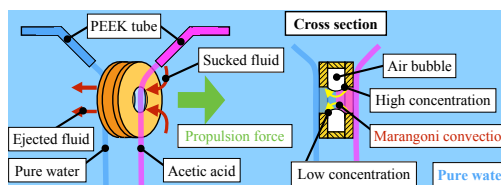


図3 駆動原理の概念図

マランゴニエンジンの推力は、酢酸と純水の表面張力差に起因する。図3に示されるように、酢酸(表面張力27.7 mN/m)と純水(表面張力72.8 mN/m)をエンジン両面に当てると気液界面上の濃度勾配によりマランゴニ対流が生じ、エンジン前方の流体が吸い込まれ、穴を貫通して後方へ噴き出された際の反動によりエンジンが駆動される。

実験装置の概要を図4に示す。実験装置はアクリル水槽・シリンジポンプ・PEEKチューブ(内径0.2 mm)・撮影用のCMOSカメラで構成されている。本研究では、マランゴニ対流を可視化するためにPIV計測システムを構築した。アクリル水槽のプール(10 mm x

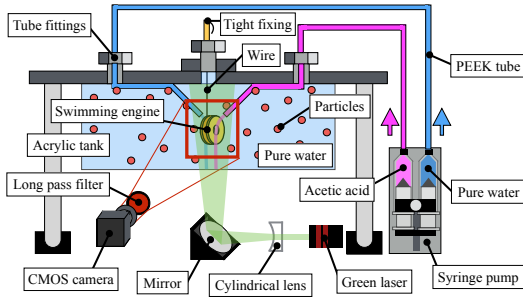


図4 実験装置の概要

10 mm x 70 mm)内は純水と蛍光粒子(粒径 $15 \mu\text{m}$, 密度 1.1 g/cm^3 , 蛍光色素ローダミン B)で満たされており, ステンレス線(線径 0.3 mm)で吊るされたエンジンが沈んでいる. 光源として出力 200 mW の DPSS レーザ(波長 532 nm)を用いて, 光線上にレーザーシートへ変換するためのシリンドリカルレンズと反射鏡を配置して, 水槽下部から蛍光粒子を照らした. 実験中はエンジン内の気液界面に濃度勾配を与えるため, 酢酸と純水をシリンジポンプと PEEK チューブを通してエンジンの両側から気液界面へ向けて供給した. このとき蛍光粒子により可視化されたエンジン周りの流れの様子をロングパスフィルタ(透過限界波長 560 nm)を装着した CMOS カメラ(解像度 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 撮影速度 250 fps)で撮影した.

4. 研究成果

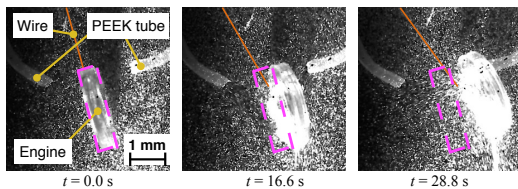


図5 マランゴニエンジン駆動

図5にマランゴニエンジンが駆動している様子を示す. この実験ではステンレス線を水槽に固定せずマランゴニエンジンを自由に吊った. 表面張力の不均一によってエンジンの穴を通してマランゴニ対流が発生していることが確認され, マランゴニ対流の反動によってピンク枠で示す元の位置から移動していることが確認された. マランゴニエンジンの駆動力は少なくとも, 自身を動かせる程度のものであることが示された.

次にステンレス線を水槽に固定することでマランゴニエンジンを動かさないようにし, マランゴニエンジンが生む流れを計測する実

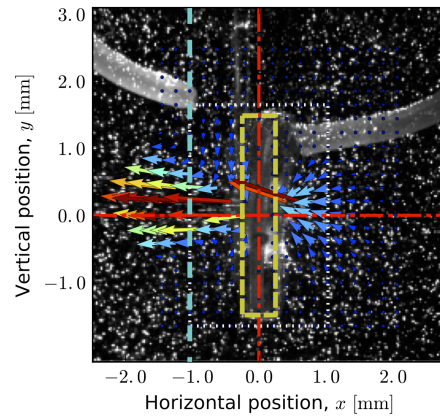


図6 マランゴニエンジン周りの流れ

験を行った. 図6はPIV解析によって求めた流れの様子である. 画像の右上方のチューブから $70 \text{ wt}\%$ の酢酸, 左上方のチューブから純水をそれぞれ流量 $100 \mu\text{L}/\text{min}$ で5秒間供給した. 画像は酢酸と純水の供給を停止した後に観測されたマランゴニ対流の発生時点から 2.4 s 後の画像であり, 赤い点線はエンジンの中心を示している. 気液界面上の濃度勾配によりマランゴニ対流が生じ, マランゴニエンジンの穴を通り抜けるようなジェット状の流れが生まれていることが分かる. ジェット中心部の流速は最大値 22.2 mm/s であった. また, ジェット上の流れは気泡界面の形状や濃度分布に影響され, 上向きや下向きに出る瞬間もあった.

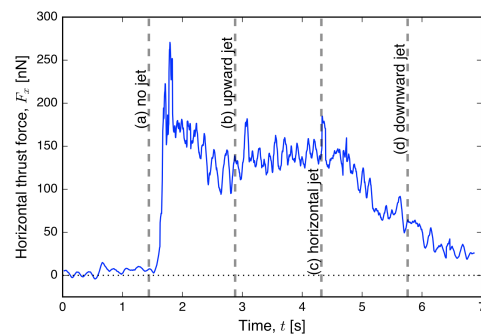


図7 推力の変化

つぎに, 画像から計測した流れを液体の運動方程式すなわち運動量保存則を用いて推力に換算し, 微小で直接計測することのできないマランゴニエンジンの推力を算定した. 図7は計算された推力の時間変化を示す. マランゴニ発生から新たな酢酸の供給なしに 5 s 程度の駆動時間を維持できることが分かっ

た。ジェットの方が水平でない場合には推力の算出が妥当性を欠くため全ての時間における正確な推力は評価できないが、マランゴニ発生直後には 270 nN 程度の推力を得ることができた。

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 1 件)

1. Tange, M., Takizawa, S., Nagira, Y., Yoshida, T., Microscale engine swimming underwater powered by Marangoni convection, Journal of Thermal Science and Technology; Vol. 11; No. 3; Paper No.16-00389, 2016. (査読有)
DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0046

[学会発表] (計 2 件)

1. Yoshida, T., Sasaki, R., Nagira, Y., Tange, M., Microscale swimming engine powered by Marangoni convection, The first Pacific Rim Thermal Engineering Conference; PRTEC-14911; 2016.

2. Takizawa, S., Tange, M., Experimental investigation of necessary conditions of Marangoni convection in a microscale swimming engine, the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, TFEC9-1105, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丹下 学 (TANGE, Manabu)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号 : 70549584