

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656181

研究課題名（和文） 滑走バクテリアを用いたフラワー型バイオマイクロモーターの開発

研究課題名（英文） Development of flower-shaped bio-micromotors driven by bacteria

研究代表者

丸尾 昭二 (MARUO SHOJI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00314047

研究成果の概要（和文）：

本研究では、マイコプラズマモービレ（以下、モービレ）と呼ばれる滑走バクテリアのランダム運動による衝突エネルギーを利用して、一定方向に回転するバイオマイクロモーターの開発に取り組んだ。モービレの特異な運動特性を活用したモーターの回転シミュレーションおよび実証実験を行った。解析では、ブレード枚数やモービレ数による回転効率の比較を行った。実験では、種々のマイクロモーターを作製し、複数のモービレの衝突による回転を実証した。

研究成果の概要（英文）：

Bacteria-driven micromotors have been developed. In the simulation of the bacteria-driven micromotors, the dependence of rotational frequency of the micromotor on the number of both blades and bacteria was evaluated. In experiments, several types of micromotors with different number of blades were fabricated. It was demonstrated that the micromotors have been rotated by the random collision of bacteria.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：知能機械学・機械システム

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロマシン、マイクロ光造形、バクテリア

1. 研究開始当初の背景

近年、心筋細胞やモータータンパク質などを駆動源とするバイオマイクロマシンの研究が活発に行われている。例えば、シート状に培養した心筋細胞の伸縮運動を利用したアクチュエータ (Science 317,1366 (2007)) や、アクチン・ミオシンなどのモータータンパク質の運動を利用して微小物体を搬送するマイクロマシン (Science 290,1550 (2000)) などが研究されている。

本研究では、滑走バクテリアの一種であるマイコプラズマモービレを利用したバイオマイクロモーターの開発をめざす。モービレは、体長 $1\mu\text{m}$ 程度で $2\sim 4\mu\text{m/s}$ の滑走速度と約 30pN の駆動力をもつ極めて運動性能の高いバクテリアであり、壁に沿って滑走する性質を持つ。我々は、これまでの基礎実験から、 $10\sim 350$ 度の様々な角度のコーナーを持つ壁を作製し、モービレの滑走運動の特性を調査した。その結果、角度が 20 度以下の凹コー

ナーにおいてモービルが常に直進しようとする性質があることを発見した。本研究では、この特異な性質を利用して、モービルがローターに衝突した際に、常に一定方向に回転するフラワー型ローターを提案・開発する。

2. 研究の目的

本研究では、モービルのランダム運動から回転エネルギーを高効率に取り出すことが可能なフラワー型バイオマイクロローター（図1）の開発をめざす。特に、モービルの特異な運動特性を考慮して、ローター形状を最適化することで、安定かつ高効率に連続回転するバイオモーターの構築をめざす。このローターは、自由に滑走するモービルの衝突運動を利用して回転するため、栄養分さえあれば半永久的に自律的に回転可能である。したがって、本研究で開発するバイオマイクロモーターは、外部からの電源供給が不要な駆動源として、様々なナノシステムや体内埋め込みデバイスの駆動源としての活用が期待できる。

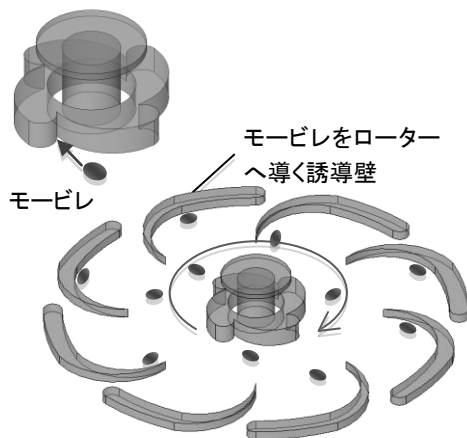


図1 モービルの衝突によって回転するフラワー型バイオマイクロモーター

3. 研究の方法

以下の研究項目にしたがって、バイオマイクロモーターの実現をめざす。

(1) バイオマイクロモーターの回転シミュレーションソフトウェアの開発

我々が提案するバイオマイクロモーターの実現に向けて、複数のモービルの衝突によって回転するローターの回転シミュレーションソフトウェアを構築する。開発したソフトウェアを用いて、ローターの羽根形状や羽根枚数、さらには滑走するモービルの数を変更し、それぞれのパラメータによる回転数の違いを調査し、最適なローター形状を決定する。

(2) マイクロ光造形法によるマイクロローターの作製と駆動検証実験

シミュレーションに用いた種々のマイク

ロローターを実際に作製し、モービルの衝突による回転駆動を検証する。作製方法には、我々が独自に開発しているマイクロ光造形法を用いる。この方法では、フェムト秒パルスレーザー光を用いて光硬化性樹脂を硬化させることで、100nmの加工線幅で複雑形状のローターを高精度に作製可能である。

(3) 無電解メッキによる金属化マイクロローターの作製と駆動実証

マイクロローターを培養液中で回転させた場合、ブラウン運動の影響によってローターが浮遊してしまい、モービルとローターとの衝突を阻害してしまう問題が生じた。そこで、ローターを金属化して、ブラウン運動を抑制し、安定に回転する金属化マイクロローターの開発を行う。

4. 研究成果

本研究では、モービルの特異な運動特性を活用して、モービルのランダムな衝突によって一方向に安定かつ連続に回転するマイクロモーターの開発をめざして、以下の研究項目を実施した。それぞれの研究成果について簡潔にまとめる。

(1) バイオマイクロモーターの回転シミュレーションソフトウェアの開発と最適なモーター形状の探索

まず、モービルの運動特性を反映させたマイクロモーターの回転シミュレーションソフトウェアを開発した（図2）。シミュレーションソフトウェアでは、これまでの基礎実験の結果に基づいて、モービルがローターに設けられた鋭角なコーナーに侵入した場合の挙動に関して、そのコーナーの角度に応じた運動挙動の場合分けを行った。具体的には、モービルがコーナーに向かって直進し続ける場合、数秒間直進した後に反転する場合、さらには、緩やかなコーナーに沿って直進する場合などを仮定した。

また、解析では、ローターだけでなく、ローターへモービルを導くための誘導壁も設定できるようにした。そして、ローターの羽根形状や羽根枚数を変更させながら、異なる数のモービルを滑走させて、モービルの衝突によるローターの回転数を比較した。

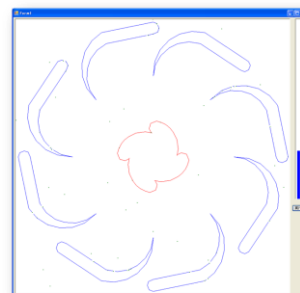


図2 開発したシミュレーションソフトウェアの解析画面

その結果、当初、図3(a)に示したフラワー型ローター（羽根枚数4枚）を考案していたが、図3(b)に示した改良型フラワーローター（羽根枚数10枚）の方が、高い回転数が得られることがわかった。図4に、改良型ローターを用いた解析結果として、羽根枚数およびモービル数によるローター回転数の変化をまとめた。これらの結果から、羽根枚数10枚の改良型フラワーローターが最も高い回転数を達成しており、モービル数が増えるに従って回転数が増加することもわかった。

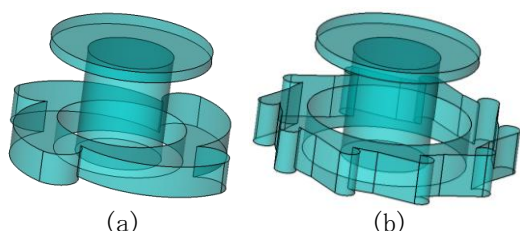


図3 解析に用いたローターモデル
(a)フラワー型ローター（羽根枚数4枚）
(b)改良型フラワーローター（羽根枚数10枚）

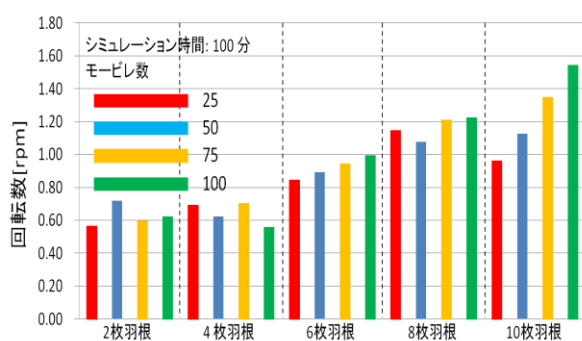


図4 羽根枚数およびモービル数によるローター回転数の変化

(2) マイクロ光造形法によるバイオマイクロモーターの試作と回転実証実験

我々の研究室で独自に開発している「2光子マイクロ光造形法」を用いて、各種ローターを試作し、モービルの衝突による回転検証実験を行った。図5に試作したローターの電子顕微鏡写真を示す。シャフトに拘束されたマイクロローターが精度よく形成されていることがわかる。

実際に、このローターの周囲にモービレを分散させて、滑走させた。図6に、培養液中で回転しているローターの写真を示す。この実験では、ところ1.6rpmで73秒間の連続回転に成功した。連続回転時間が短い理由は、ローターのブラウン運動によって、モービレがローターに衝突しなくなることが多かったためである。そこで、ブラウン運動による浮遊を低減するために、金属化ローターの作製を試みた。

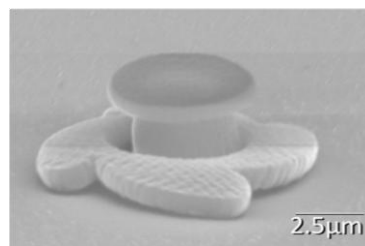


図5 マイクロ光造形によって作製したフラワー型ローターの電子顕微鏡写真

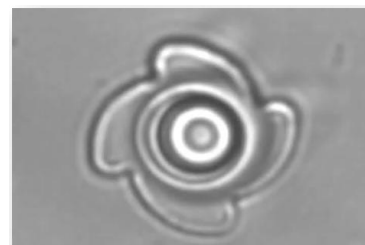


図6 培養液中でモービルの衝突によって回転するローターの光学顕微鏡写真

(3) 無電解メッキによる金属化ローターの作製

バイオマイクロモーターの連続回転時間が短い原因の1つは、マイクロモーターが微小であるために培養溶液中でブラウン運動によって浮遊してしまうため、基板上を滑走しているモービレとの衝突が妨げられることであった。そこで、2光子マイクロ光造形法で作製した樹脂製ローターに無電解メッキを施し、金属化することで自重を大きくし、ブラウン運動を抑制することを検討した。

実験では、メリーランド大学のFourkas教授らの協力を得て、無電解メッキに適した光硬化性樹脂を作製し、無電解銅メッキを行うプロセスを確立した。特に、比較的大型のローターを作製する場合には、回転部を複数のアンカーで支持しておき、メッキ後にアンカーをレーザーアブレーションによって除去することで、回転可能なローターを作製する手法を考案・実証した。図7に、実際に作製した金属化マイクロローターの例を示す。これらの実証実験から、我々が確立した方法を用いて様々な形状の金属化マイクロローターを作製できることを実証した。

次に、金属化したマイクロローターの液中での回転検証実験を行った。その結果、有機溶媒中および微量の界面活性剤を添加した水中では、光ピンセットによる微弱な力でも回転が可能であることがわかった。しかしながら、モービレを滑走させるための培養液中では、金属化ローターがガラス基板上に吸着してしまい、回転させることができなかった。今後、ローターの表面処理や形状改良によって、基板との吸着や摩擦を低減し、ブラウン運動を抑制した状態で連続回転が可能な金属化ローターを作製する必要がある。

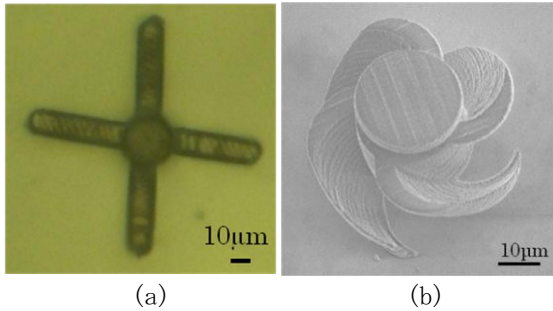


図7 無電解銅メッキによって作製した金属化マイクロローター (a) 十字型ローターの光学顕微鏡写真 (b) マイクロタービンの電子顕微鏡写真

現在、世界的にもバクテリアによって駆動するモーターの研究が盛んになっている。そのなかでも、本研究では、バクテリアの中で特に運動能力が高いモビレの特異な滑走運動を利用して、高効率に回転するバイオマイクロモーターを提案・開発している点が特徴である。今後、ブラウン運動の影響を受けにくいローター形状、ローター材質を検討し、長時間安定に連続回転が可能なバイオマイクロモーターの開発をめざす予定である。

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2件)

- (1) T. Ikegami, R. Ozawa, M. P. Stocker, K. Monaco, J. T. Fourkas, and S. Maruo, “Development of optically-driven metallic microrotors using two-photon microfabrication,” *Journal of Laser Micro / Nanoengineering*, 査読有, **8**, no. 1, 6-10 (2013).
- (2) T. Ikegami, M. P. Stocker, K. Monaco, J. T. Fourkas, and S. Maruo, “Fabrication of three-dimensional metalized movable microstructures by the combination of two-photon microfabrication and electroless plating,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, **51**, no. 6, 06FL17 (2012).

[学会発表] (計8件)

- (1) Takashi Ikegami, “Metalized movable micromachines produced by the combination of two-photon microfabrication and electroless plating” *International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012)*, 2012年9月25日, Yokohama.
- (2) Takashi Ikegami, “Development of optically-driven metallic microrotors using

two-photon microfabrication” *International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2012)*, 2012年06月12日～2012年06月15日, Washington DC (USA).

- (3) 池上崇, “2光子造形と無電解メッキによる金属化マイクロ可動部品の作製” *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012*, 2012年5月28日, 浜松.
- (4) T. Sawada, “Simulation and experimental verification of bacteria-driven micromotors” *International Symposium on Micro-nanomechanics and Human Science (MHS 2011)*, 2011年11月7日, Nagoya.
- (5) T. Sawada, “Flower-shaped micro-motors driven by gliding bacteria”, *15th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences*, 2011年10月5日, Seattle (USA).
- (6) T. Sawada, “A bacteria-driven micromotor produced by two-photon microstereolithography”, *12th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2011)*, 2011年6月7日, Kagawa.
- (7) 澤田知幸, “フラワー型マイクロローターを用いたバクテリア駆動マイクロモーターの開発,” *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011*, 2011年5月27日, 岡山.
- (8) 澤田知幸, “バクテリア駆動マイクロモーターの最適設計と駆動実証,” *第3回マイクロ・ナノ工学シンポジウム*, 2011年9月26日, 船堀.

[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]

受賞

T. Sawada, Y. Hiratsuka, S. Maruo, *IEEE International Symposium on Micro-nanomechanics and Human Science (MHS) 2011 Best paper award* (2011年11月9日).

ホームページ

横浜国立大学丸尾研究室

<http://www.mnt.ynu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸尾 昭二 (MARUO SHOJI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00314047