

平成 29 年 5 月 4 日現在

機関番号：55501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25630444

研究課題名(和文) 超エコで実用高トルクを有する光合成バイオ・メカニカル複合モーターの先駆的研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of Bio-Mechanical Complex Motor Using Photosynthetic Micromotility

研究代表者

藤田 和孝 (Fujita, Kazutaka)

宇部工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：10156862

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)：本研究は、光合成により自らエネルギーを生み出し究極の持続的エコ動力源となりえる運動微生物と、損失の少ない機械装置を組合わせて、高効率で実用トルクを有し、使用しやすい微小モーターの研究開発を目指したものである。その結果、光合成運動微生物はボルボックスを用い、直径約60mm深さ約15mmの円筒容器水中内で微生物群体をLED光により制御することで、エポキシ樹脂製4枚フィン回転子を連続的に回転させることに成功した。最高回転数は約2[rph]、トルクは約70[pNm]であった。この原動機を有効に使用するための遊星歯車装置を設計し、3Dプリンタを用いて試作した。この起動トルク測定で時間切れとなった。

研究成果の概要(英文)：Lately, clean and economical energy generation is desired. Then, the motor using photosynthetic microvibron combined with the mechanical gear system was planned. This motor will be ultimate economic efficiency and cleanness. As the result, we succeeded in continuous rotation of the rotor consisted of four epoxy fins with a diameter of about 60 mm in the water vessel filled by volvox, which is a photosynthetic vibron, through LED light control. Maximum rotating speed was 2 [rph] and torque was about 70 [pNm]. Planetary gear train was designed to use effectively this power generator by volvox and the preproduction was made by 3D printer. Dead line came when activation torque of the preproduction was measured.

研究分野：材料強度学

キーワード：光合成運動微生物 群体 歯車装置 モーター

1. 研究開始当初の背景

この分野の初期の研究は、回転する細菌ペん毛先端にシリコンまたはゴム製のビーズを張付け回転することを示した研究 (N. Darnton et al.; Biophys J 86(2004)1863 - 1870) や運動する細菌で回るマイクロモーターを示した研究 (平塚ら: New York times, Aug. 29, (2006)) がある。また、運動が光や磁気に影響を受ける微生物 (Weibel DB, et al.; Proc Natl Acad Sci USA 102(2005)11963 - 11967, 福森ら: 化学と生物, Vol. 45(2007)154 - 156)、また光合成を行う運動微生物の報告 (例えば S.J. Holmes: Biological Bulletin, Vol. 4(1903) 319-326) がなされてきた。さらに、つめ車や矢印状の流路を使い、細菌群から一方向の回転運動を取り出すことに成功した報告 (R. Di. Leonardo: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0910426107 (2009), 小島ら: 第50回日本生物物理学会年会集, 1PT229(2012)) などがなされてきている。しかし、これらの研究では、取り出せるトルクは微小であり、単に回転運動を系外に取出しデモを示すところまでであり、実用に耐えるトルクを有するモーターを作るには至っていない。

2. 研究の目的

世界に先駆け、光合成により自らエネルギーを生み出し、さらに高い運動効率を有するため究極の持続的エコ動力源となりえる運動微生物と、機械装置を組合わせて用い、高効率で実用高トルクを有する微小モーターの研究開発を目的とする。具体的には、(1) 光合成する各種運動微生物の推進力と移動速度を測定する。(2) (1) で大きな推進力を示した微生物群から、トルク増加・減少遊星歯車装置の起動トルクを十分に上回る実用高トルクを引出す機構を見出すとともに、微生物の中から強力なものを選抜、培養することを繰り返して統制の取りやすいヘラクレス微生物群を作製する。(3) これらの結果を集大成し、超エコで実用高トルクを有する光合成バイオ・メカニカル複合モーターを開発する。

3. 研究の方法

(1) 微生物の推進力・トルクの測定

非常に高感度な走査プローブ顕微鏡を用いる。具体的には同顕微鏡のカンチレバーの変位と電圧および力の関係を求めておき、カンチレバー変位から力を測定する。

(2) 移動速度の測定

光学顕微鏡を通じて微生物の遊泳動画を取り、計測する。

(3) 回転機構

透明な羽根車を押す機構と、歯車形のローターで各歯の半径に垂直方向面から光が出る歯車形機構を検討する。

(4) 微生物の培養

pH 8 の SVM 培地に微生物の溶液を注ぎ、

26 のインキュベーター内で 16 時間明期、8 時間暗期の明暗周期で培養した。

4. 研究成果

(1) ボルボックス rousseletii (5000 細胞) の光線方向への走行性観察

LED で 525nm の波長光をシャーレの一端から照射した場合のボルボックス Roussetii (5000 細胞) とボルボックス Carteri (2000 細胞) を対象とし、走行性を動画で撮影観察した。Roussetii の光への走行性を示す写真例を **図 1** に示す。明確な正の走行性を示すことがわかる。Carteri も同様であった。これらは 5000 個あるいは 2000 個の細胞が同期して安定した正の走行性を示し、さらにそれらの群体は、より大きな力を出すものと考えられた。

なお、ユージェナ、クラミドモナス、クロロゴニウムについても検討したが、これらは単一細胞で動き、必ずしも走行性が正あるいは負に限定されず、また障害物にぶつかった場合、走行性の正・負が入れ替わったりした。

(2) 遊泳速度

ボルボックス Roussetii (5000 細胞) とボルボックス Carteri (2000 細胞) について、(1) と同様に走光性を確認するために LED で 525nm の波長の光をシャーレに当て顕微鏡で動画観察し、遊泳速度解析は、この動画を画像解析ソフト ImageJ を使用し行った。ImageJ により取り込んだ動画を画像化し、測定時間と遊泳距離から速度を導いた。さらに光の有無で遊泳速度に違いがあるかも検討した。

顕微鏡観察により光を当てない場合は不規則な運動であったが、光を当てた場合 Roussetii、Carteri は正の走光性が確認できた。

光を当てない場合の遊泳速度解析より Roussetii、Carteri の各平均速度は約 $202 \pm 75 \mu\text{m/s}$ 、約 $128 \pm 25 \mu\text{m/s}$ であった。光を当てた場合の各平均速度は約 $223 \pm 59 \mu\text{m/s}$ 、約 $141 \pm 27 \mu\text{m/s}$ であり、いずれの微生物も光を当てた場合、速度が速くなった。なお、Roussetii の最高速度は約 $1000 \mu\text{m/s}$ を示した^{1,2)}。

これらのことより、光合成運動微生物はボルボックスの中でも大きい Roussetii (5000 細胞) (以下これをボルボックスという) とした。

(3) 推進力

図 2 に操作プローブ顕微鏡を用いて測定したボルボックスがカンチレバーを縦方向に動かした変位を示す。

カンチレバー縦方向変位が変動した時間にレーザー光強度の変化が見られなかったものをボルボックスがカンチレバーに衝突したデータとした。さらに、波形の形およびビデオ映像からカンチレバーの針先端にボ

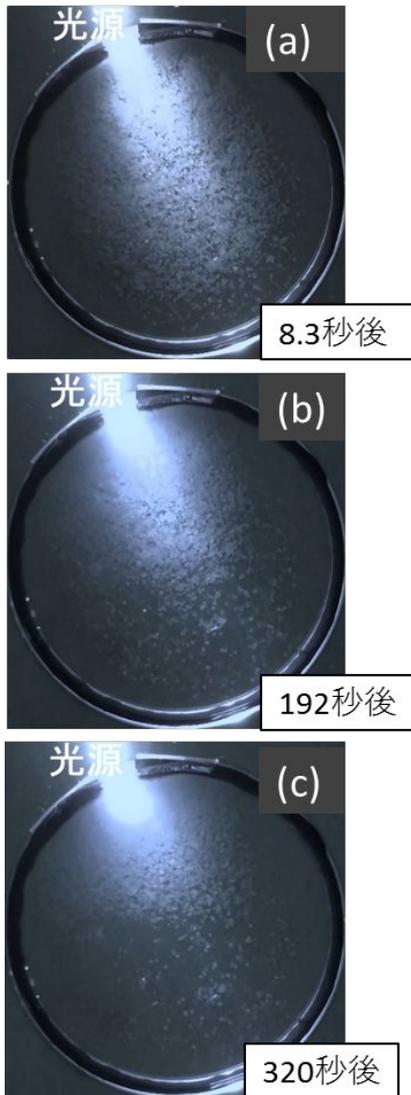


図1 ボルボックス Rrousseletii (5000細胞)の光への走行性写真例

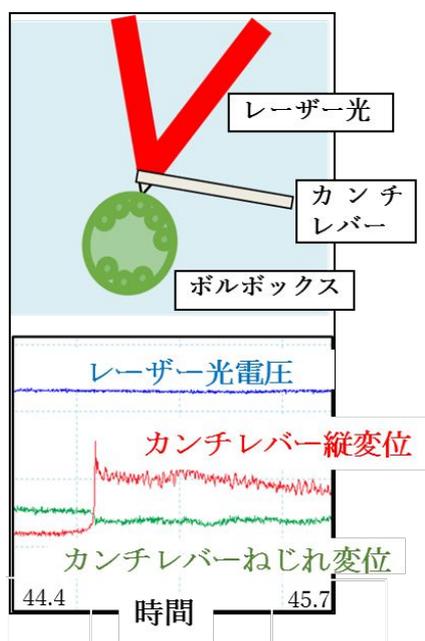


図2 ボルボックスの推進力測定例

ルボックスが当たっていることを確認した。推進力は、カンチレバー縦方向変位が時間に対して安定した領域で、変位とカンチレバーばね定数を掛け合わせて求めた。その結果、ボルボックスの推進力は1個あたり約4 nNであった。また、ピーク値では約7.5 nNであった³⁾。

走査プローブ顕微鏡を用いて運動微生物の微弱な推進力を測定した例は世界でもまだ見られない。

(4) 回転子形状と光制御方法

回転子形状は光制御方法と合わせ、自動光誘導式と点灯誘導式を考案し、それぞれ図3、4に示す⁴⁾。両者について回転するかどうか実験した。

自動光誘導式は直径約35mmの円形容器と、中空の歯車と似た形状の羽根車を組み合わせたもので、容器中央部の透明な軸で羽根車を支えている。羽根車の重さは1.72gである。LED光源で下から照らすと、透明な中心の軸から発せられる光が全羽根車の径線方向の透明部から垂直方向に漏れ出るような仕組みとなっている。

点灯誘導式は約62mmの円形容器と透明で薄い4枚羽根車を組み合わせたもので、容器にLED差込口と透明部を含む突起を6方向から設置し、中央部の無透過な黒色軸で透明な羽根車を支えている。発光LEDを切り替えることで、光の向きを調整することができる。点灯誘導式の透明な羽根車は直径58mm、重さ0.359gで、Volvoxを逃がさないように、容器表面との隙間は最小限に留めた。

(5) 回転子の動作確認

自動光誘導式について、透明部付近にボルボックスが集まっていたので、光操作は成功した。しかし、繰返し実験を行っても、羽根車の回転は見られなかった。

点灯誘導式についても、光源にボルボックスが移動し、かつ、その過程で透明な羽根車をボルボックスが押す様子が確認できた。この場合、羽根車自体の持続的な回転は見られなかった。その平均回転数は約2rph、トルクは約70 pNmであった⁴⁾。回転する様子を撮影した動画から抜粋した写真を図5に示す。ボルボックスを用いて回転子を持続的に回転させた報告は見られない。

(6) 遊星歯車装置の設計と製作

太陽歯車の回転数をN rpm、歯数をZ枚、腕の回転数をa、内歯車の回転数をn=0、歯数をzとすると、a/Nが1/5の場合、Z=6、z=24となる。すべての歯車のモジュールを0.25、圧力角は14.5°と定めた。以上で決定した遊星歯車装置をsolidworksで製図した3D図を図6(a)に占めず。この3D図より、3Dプリンターを用いて造形後、組付けた実装置を図6(b)に示す。Solidworks上のシミュレーション

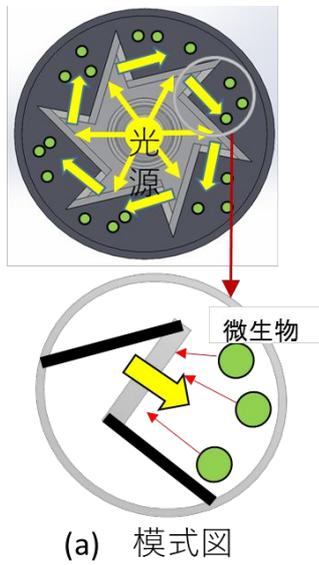


図3 自動光誘導式回転子

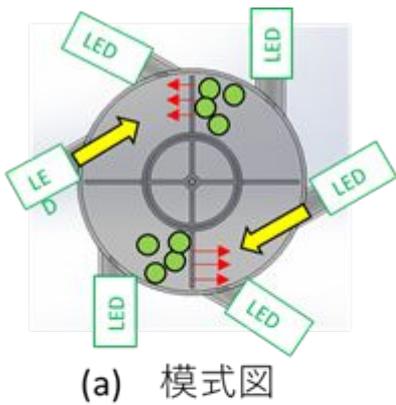


図4 点灯誘導式回転子

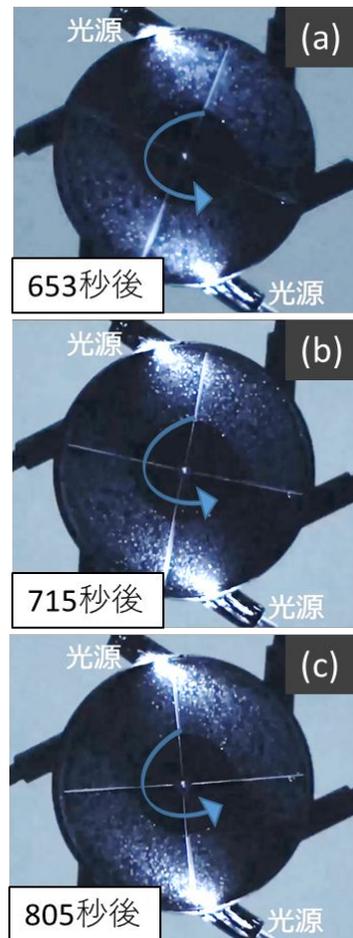


図5 回転子の回転の様子

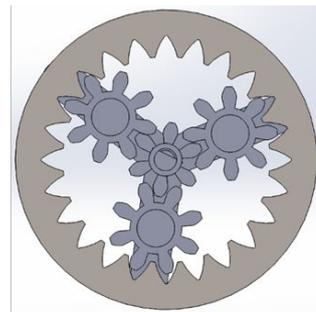


図6 遊星歯車装置

ヨンはもちろん、実物においても干渉なく回転した。内歯車の外形は 30mm である。残念ながら、この遊星歯車装置の起動トルクを測定するところで時間切れとなった。

(7) 今後の展望

点灯誘導式で、原動機ができたが、これを自動光誘導式に改良する。これにより出力はかなり改善できると考えている。

また、遊星歯車装置の起動トルクの測定は、微生物の推進力測定と同じく走査プローブ顕微鏡のカンチレバーのたわみから求める予定である。原動機のトルクとの整合性が取れた時点で、両者の接続を行い、使いやすいバイオ・メカニカル複合モーターを完成させる。

(8) 研究協力者

東京工業大学資源化学研究所附属資源循環研究施設：若林憲一准教授、植木紀子研究員と 2015 年度から共同研究を開始した。両氏は光合成運動微生物の培養方法、運動特性とそのメカニズムの解明で特筆した成果を挙げておられ、微生物の株をいただくとともに、安定した培養方法や、運動特性についてご教授ご指導をいただいた。

<引用文献>

1) 中川 拓朗, 渡部 拓朗, 渡部 拓朗, 渡部 菜摘, 若林 十雲, ダラ リズキ リズキ イスナニ アルマダニ, 植木 紀子, 若林 憲一, 藤田 和孝, 島袋 勝弥, 三留 規誉, 第 19 回化学工学会学生発表会 (豊中大会) 研究発表講演要旨集, p.74, (2017/3/4).

2) 渡部菜摘 (学), 若林十雲 (学), ダラ リズキ イスナニ アルマダニ, 植木紀子, 若林憲一, 藤田和孝, 島袋勝弥, 三留規誉, 第 18 回化学工学会学生発表会(福岡大会)、研究発表講演要旨集, p. , (2016/2/9).

3) 堀永 晃作, 若林 十雲, 渡辺 菜摘, 植木 紀子, 若林 憲一, 藤田 和孝, 島袋 勝弥, 三留 規誉, 第 19 回化学工学会学生発表会 (豊中大会) 研究発表講演要旨集, p.75, (2017/3/4).

4) 恩村友太 (学), 藤田和孝, 三留規誉, 島袋勝弥, 植木紀子, 若林 憲一、第 19 回化学工学会学生発表会 (豊中大会) 研究発表講演要旨集, p.88, (2017/3/4).

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)

[学会発表](計 4 件)

恩村友太 (学), 藤田和孝, 三留規誉, 島袋勝弥, 植木紀子, 若林 憲一:「光合成運動微生物を用いたバイオ原動機の研究開発」, 第 19 回化学工学会学生発表会(大阪大学豊中キャンパス(豊中市))研究発表講演要旨集, p.88, (2017/3/4).

堀永 晃作, 若林 十雲, 渡辺 菜摘, 植木 紀子, 若林 憲一, 藤田 和孝, 島袋 勝弥, 三留 規誉:「走査型プローブ顕微鏡を用いた Volvox の推進力の測定」, 第 19 回化学工学会学生発表会 (大阪大学豊中キャンパス (豊中市)) 研究発表講演要旨集, p.75, (2017/3/4).

中川 拓朗, 渡部 拓朗, 渡部 拓朗, 渡部 菜摘, 若林 十雲, ダラ リズキ リズキ イスナニ アルマダニ, 植木 紀子, 若林 憲一, 藤田 和孝, 島袋 勝弥, 三留 規誉:「ボルボックス科微生物の走行性と遊泳速度の解析」, 第 19 回化学工学会学生発表会 (大阪大学豊中キャンパス (豊中市)) 研究発表講演要旨集, p.74, (2017/3/4).

渡部菜摘 (学), 若林十雲 (学), ダラ リズキ イスナニ アルマダニ, 植木 紀子, 若林憲一, 藤田和孝, 島袋勝弥, 三留規誉:「ボルボックスの遊泳速度解析」, 第 18 回化学工学会学生発表会(福岡大学七隈キャンパス(福岡市))研究発表講演要旨集, M05, (2016/2/9).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 和孝 (FUJITA, Kazutaka)
宇部工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 10156862

(2) 研究分担者

島袋 勝弥 (SHIMABUKURO, Katsuya)
宇部工業高等専門学校・物質工学科・准教授
研究者番号: 70618446

(3) 研究分担者

三留 規誉 (MITOME, Noriyo)
宇部工業高等専門学校・物質工学科・准教授
研究者番号: 90431981