

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 30 日現在

機関番号：33919

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656168

研究課題名(和文)ケミカル・ロコモーションによるマイクロ・ナノロボットの創製

研究課題名(英文)Micro-Nano Robots by Chemical Rocomotion

研究代表者

福田 敏男 (Fukuda, Toshio)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：70156785

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ・ナノロボットの自律駆動を実現するために、触媒反応を利用したケミカル・ロコモーションに注目した。我々は、非対称性を利用することで、触媒金属である白金のみによる新しいマイクロ・ナノロボット構造による駆動方式を提案した。集束イオンビーム加工を用いてマイクロ・ナノロボットを作製し、マイクロ・ナノロボットの形状や環境条件に応じてマイクロ・ナノロボットの動作を解析することで駆動をモデル化し、将来的なマイクロ・ナノロボットの自律駆動を制御するための基礎的な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, we used a chemical locomotion of micro-nanorobots by catalytic reaction as a self-actuation mechanism. We proposed an actuation method by un-symmetrical shape of micro-nanorobots using a platinum as catalytic metal. The micro-nanorobots were fabricated by focused ion beam process experimentally. The shapes and environmental conditions were analyzed to propose an actuation model for prospective self-actuation of micro-nanorobots.

研究分野：工学

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・ナノロボット ケミカル・ロコモーション 集束イオンビーム加工 フォトリソグラフィ
触媒反応

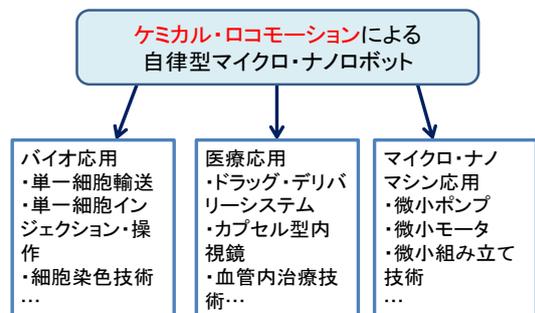


図1 ケミカル・ロコモーションによる自律型マイクロ・ナノロボットの応用例

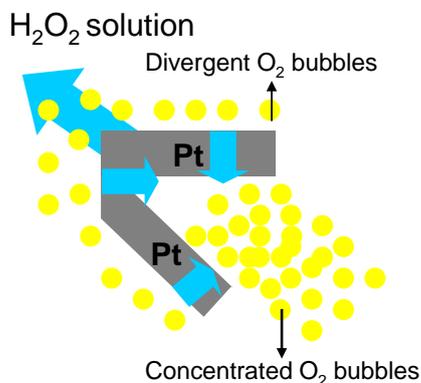


図2 非対称性を利用した白金のみによるマイクロ・ナノロボットの駆動原理

1. 研究開始当初の背景

触媒反応を利用したケミカル・ロコモーションは、マイクロ・ナノスケールの表面力が支配的となるという特異的な現象に基づいた新しく興味深い移動形態である。

この現象を利用して自律型マイクロ・ナノロボットを創製するためには、(1)より効率的な作製プロセスの確立、(2)推進特性の定量的な評価と解析、(3)マイクロ・ナノロボットの形状依存性の解析、が重要な課題であった。

そこで、本研究では、非対称性を利用した白金のみの構造による新しいマイクロ・ナノロボットを提案し、マイクロ・ナノロボットの環境条件や形状などに基づいたマイクロ・ナノロボットの動作を実験的に解析した。

2. 研究の目的

細胞レベルのサイズを有する自律型マイクロ・ナノロボットは、図1に示すように、将来的には、バイオ・医療・マイクロナノマシン応用などの分野で幅広い応用が期待されている。したがって、単一細胞輸送・操作などの生物学的ニーズ、ドラッグ・デリバリーシステムなどの医学的ニーズ、マイクロ・ナノシステム構築などの工学的ニーズに応えるための革新的かつ先端的な技術である。

マイクロ・ナノロボットを自律的に駆動させるためには、①駆動(アクチュエーション)、②センシング、③コントローラ、④通信、⑤エネルギー供給など様々な機能が必要である。本研究では、それらの中で、駆動メカニズムに関して、触媒反応を利用したケミカル・ロコモーションに注目する。この現象は、過酸

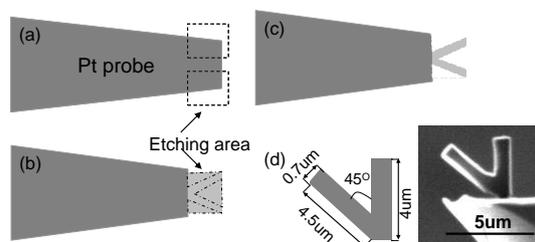


図3 集束イオンビーム加工による白金マイクロ・ナノロボットの作製

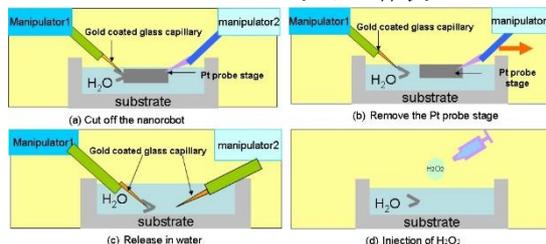


図4 マイクロマニピュレーションによる加工したマイクロ・ナノロボットの溶液中へのリリース手順

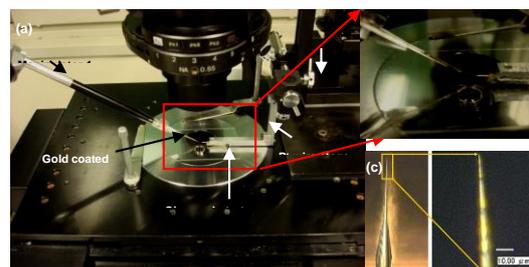


図5 マイクロマニピュレーションによる加工したマイクロ・ナノロボットの溶液中での操作システム

化水素水環境下で白金・金の反応を利用して推進力を得る新しいマイクロ・ナノスケールの駆動メカニズムとして注目を集めている。

本研究では、より効率的な作製プロセスのために、白金のみを利用して移動する新しい構造を実現するために、非対称性形状に注目した。実際に、マイクロ・ナノロボットを作製し、実験的に溶媒の濃度や温度、マイクロ・ナノロボットの形状などを変化させた際の動作を解析することで、モデル化することを目的とした。

3. 研究の方法

図2に本研究で提案する非対称性を利用した白金型マイクロ・ナノロボットの駆動原理を示す。過酸化水素(H_2O_2)において、触媒であるプラチナ(Platinum, Pt)の表面からは、



で示される反応により、酸素ガスが発生する。基本的には、酸素ガスは、プラチナの表面に対して均一に発生する。本研究では、図2に示すような“V型”の非対称性構造体に注目した。このような非対称なV型の形状の場合、V型の内側の部分における酸素ガスの量が、

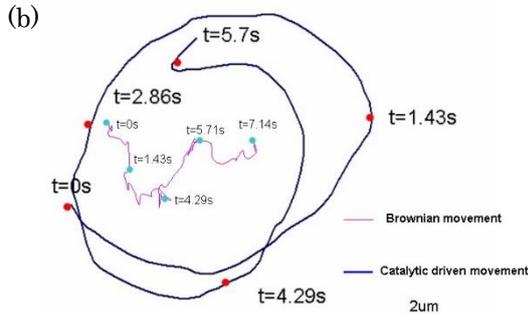
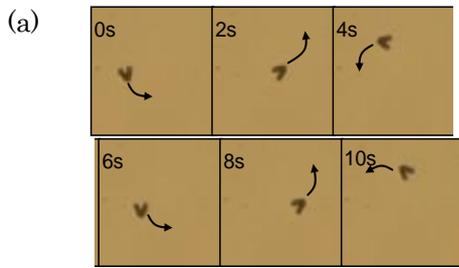


図6 非対称型白金マイクロ・ナノロボットの動作実験，(a)ロボットの動作中の顕微鏡画像，(b)ロボットの動作の軌跡

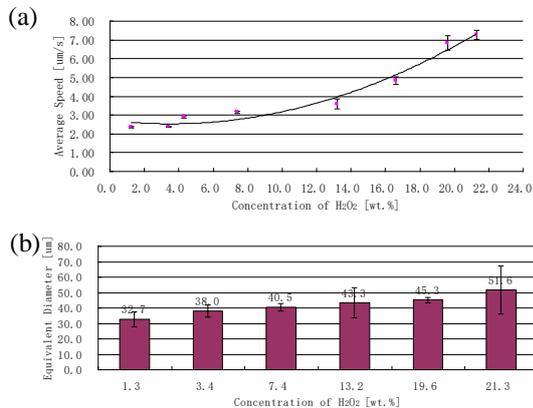
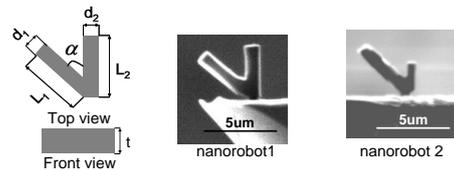


図7 非対称型白金マイクロ・ナノロボットの過酸化水素水の濃度と駆動速度および円運動の直径の関係

V型の外側の部分と比較して増加する。一方で、酸素ガスのバブルの発生により、マイクロ・ナノロボットは反力を受ける。したがって、酸素バブルの反力は、V型の屈曲部方向に作用し、これが、マイクロ・ナノロボットの推進力となる。

4. 研究成果

実際に、作製したマイクロ・ナノロボットを図3に示す。本研究では、集束イオンビーム (Focused Ion Beam, FIB) 加工により、プラチナプローブの先端部分に作製した。マイクロ・ナノロボットを過酸化水素中にリリースするための手順を図4に示す。まず純水中において、光学顕微鏡下でのマイクロマニピュレーションシステムを用いることで、プラチナプローブ先端にあるマイクロ・ナノロボットをマイクロキャピラリー先端部分に取り付ける。そしてプラチナプローブを、別のマイクロキャピラリーに交換する。溶媒を純水から過



	L ₁ (μm)	L ₂ (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	t (μm)	α (deg)
nanorobot1	4.5	4	0.7	0.7	0.7	45
nanorobot2	4.5	2.5	0.7	0.7	0.7	45

図8 非対称型白金マイクロ・ナノロボットの形状

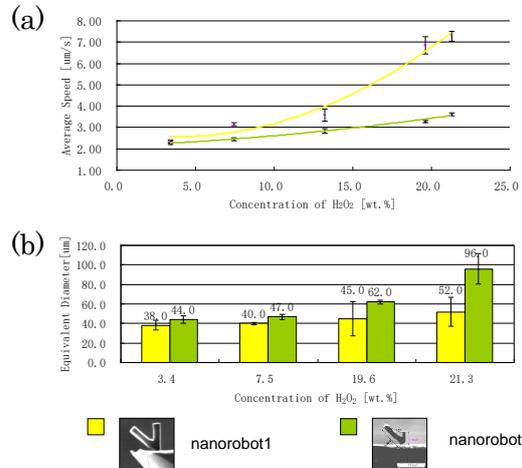


図9 非対称型白金マイクロ・ナノロボットの形状依存性の実験結果，(a)過酸化水素水の濃度と速度の関係，(b)過酸化水素水の濃度と円運動の直径の関係

酸化水素水に置換した後に、マイクロ・ナノロボットを取り付けたマイクロキャピラリーともう一方のマイクロキャピラリーを接触させることで、マイクロキャピラリーからマイクロ・ナノロボットを取り出す。以上により、過酸化水素中にマイクロ・ナノロボットをリリースする。

図6に、非対称型白金マイクロ・ナノロボットの動作実験を示す。図6(a)は、動作中のマイクロ・ナノロボットの光学顕微鏡画像を示す。非対称型白金マイクロ・ナノロボットは、図2に示すように、屈曲部方向に駆動している様子を確認した。図6(b)は、図6(a)で示したマイクロ・ナノロボットの動作の軌跡である。ブラウン運動による軌跡と比較すると、明らかにマイクロ・ナノロボットが過酸化水素中で駆動していることを確認した。

図7に、非対称型白金マイクロ・ナノロボットの過酸化水素水濃度と駆動速度および円運動の直径の関係を示す。駆動速度および円運動の直径は、過酸化水素水濃度に対して増加傾向にあることを確認した。また、同様に、過酸化水素水の温度と駆動速度の関係については、実験結果から、過酸化水素水の温度が上昇するに従い、触媒反応が促進されるため、駆動速度も上昇することを確認した。これらの結果は、将来的なマイクロ・ナノロボットの駆動制御のために重要な知見である。

非対称型白金マイクロ・ナノロボットの形

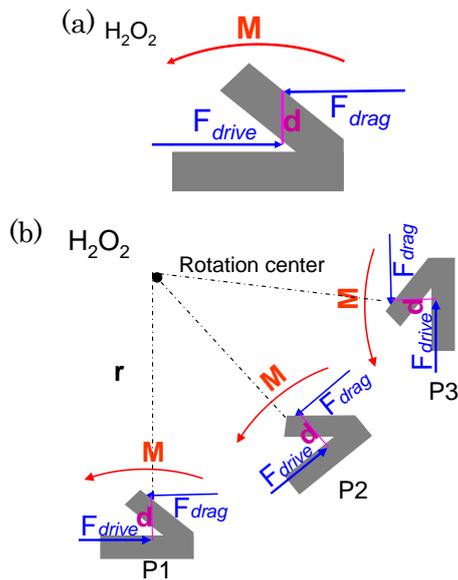


図 10 非対称型白金マイクロ・ナノロボットの円運動のモデル化, (a)円運動における力の釣合関係, (b)P1 から P3 への連続的な円運動

状の駆動特性への依存性を調べるために, 図 8 に示すように, V 型のそれぞれの長さが異なるロボットを作製した. 動作実験の結果を図 9 に示す. マイクロ・ナノロボットの形状によって過酸化水素濃度に対する駆動速度および円運動の直径が異なることが明らかとなった.

これらの結果に基づいて, 非対称型白金マイクロ・ナノロボットの円運動のモデル化を行った. 図 10 に示すように, 非対称型白金マイクロ・ナノロボットが回転運動を続けるためには, 推進力 F_{drive} と流体抵抗力 F_{drag} の差分に対して, 円運動のモーメントが生じると考えられる. したがって,

$$M \cdot a = \sum F = F_{drive} - F_{drag} + R(t) \quad (2)$$

の関係式が得られる. 本研究で提案した V 型のマイクロ・ナノロボットの流体抵抗力は, 下記の式から導出することが出来る.

$$F_{drag} = \left(\frac{4\pi u_f L_1}{\ln(2L_1/d_1) + 0.5} + \frac{4\pi u_f L_2}{\ln(2L_2/d_2) + 0.5} \right) v \quad (3)$$

ここで, 図 9 に示す通り, マイクロ・ナノロボットの V 型形状の, L_1 と L_2 はそれぞれの長さ, d_1 と d_2 はそれぞれの幅を示す.

以上に基づいて, 実験結果から, 回転速度は, $6.3 \mu\text{m/s}$ の場合, 駆動力は, $2.8 \times 10^{-13} \text{ N}$ であることを算出することが出来た.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

Bao Jingjing, Zhan Yang, Masahiro Nakajima, Yajing Shen, Masaru Takeuchi, Qiang Huang,

Toshio Fukuda, Self-Actuating Asymmetric Platinum Catalytic Mobile Nanorobot, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 30, Issue 1, pp. 33-39, 2014. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

[1] Azrena Bakar, Masahiro Nakajima, Toshio Yue, Chegnzhi Hu, Masaru Takeuchi, Shoichi Maruyama, Toshio Fukuda, Micro-Sorting Device by a Micro-Channel with Multiple-size Pores, Proc. 2013 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS 2013), pp. 276-279, 2013. 査読有

[2] Azrena Bakar, Masahiro Nakajima, Toshio Yue, C. Hu, Masaru Takeuchi, Shoichi Maruyama, Masaru Takeuchi, Toshio Fukuda, Fabrication of 3D Porous Micro-Channel for Artificial Capillary Blood Vessel Model, Proc. SICE Annual Conference 2013 (SICE 2013), pp. 2661-2666, 2013. 査読有

[3] Jingjing Bao, Masahiro Nakajima, Zhan Yang, Yajing Shen, Hiroataka Tajima, Toshio Fukuda, Evaluation and Modeling of Temperature Effects for Catalytic Nano-mobile Robot, Proceedings of the 2012 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS 2012), pp. 221-224, 2012. 査読有

[4] Jingjing Bao, Masahiro Nakajima, Zhan Yang, Yajing Shen, Toshio Fukuda, Geometry and Surface Morphology Effects for Catalytic Nano-Mobile Robot, Proceedings of the 2012 12th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-Nano 2012), 4 pages, 2012. 査読有

[5] Jingjing Bao, Masahiro Nakajima, Yang Zhan, Masaru Kojima, Toshio Fukuda, Catalytic Nano-mobile Robot with finely designed geometry, Proceedings of the 2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2012), pp. 368-371, 2012. 査読有

[その他]

ホームページ等

<http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/indexj.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

福田 敏男 (FUKUDA TOSHIO)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号: 70156785

(2)研究分担者

中島 正博 (NAKAJIMA MASAHIRO)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号: 80377837

(3)連携研究者

なし