

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656057

研究課題名(和文)電磁スピニングシステムによるナノ流路駆動極小ポンプの開発

研究課題名(英文)Development of Micro Fluid Driving Technique by Electro-Magnetic Spinning System

研究代表者

酒井 啓司 (SAKAI, KEIJI)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：00215584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、極微小化が可能な遠隔力学操作方式である電磁スピニング(以下EMS)システムを用いて、マイクロ流路中において重要な機械構成部材となるマイクロポンプなどの要素部品を作り上げるための基盤技術を開発することを目的とした。研究では、球のトルクベクトルを3次的に任意制御することにより微小球を任意の場所へ配送するシステムを構築した。また外部トルクによる転がり運動を精密に計測することにより、これまで物理的な定量測定が困難であった静止および動転がり摩擦の計測が可能になった。これらのシステムを用いて、転がり摩擦の変化から分子の吸着状態を精度よく検出するバイオセンサーの研究を展開した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is establish fundamental technologies of the micro driving system of fluid, which can be applied for the transportation devices in the micro-fluidics. The electro-magnetically spinning technique developed by us enables the remote manipulation of micro-mechanical elements, through the three dimensional control of the torque induced to the probe sphere. We successfully constructed an experimental system to deliver small probe sphere to an arbitrary position by driving the rolling motion of the probe. In addition by observing the relation between the driving torque and the motion of the probe, we succeeded in determining the local mechanical properties of the system. We found that the state of the solid-liquid interface is sensitive to the molecular adsorption and we are now extending the field of the system to the accurate detection of the chemical and biological functions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 / 応用物理学一般

キーワード：マイクロ流路 電磁スピニングシステム マイクロマシン マイクロカプセル マイクロモーター

### 1. 研究開始当初の背景

近年、化学反応を分子レベルで制御しながら進行させ、高次のナノ構造を作製する微小化学リアクターの研究が盛んに進められている。この研究の端緒となり、また現在でもその手法の主力となっているのがマイクロ流路技術である。マイクロ流路では $\mu\text{m}$ 領域における流動現象が低レイノルズ数の層流となることを活かし、分子の拡散・移流といった統計力学的輸送現象を通して決定論的に反応を制御するという点で、従来の混合・攪拌・分留といった乱れた過程を用いる化学工学プロセスとは質的に異なる反応経路を経由することに最大の特徴がある。これにより逐次の材料分子の添加、さらに反応・会合過程を通しての擬似細胞作製などの技術が培われつつあり、将来のナノ構造材料創生にとってきわめて期待の大きい技術となっている。

一方、流路を伝搬する物質輸送を物理的観点から見ると、このアスペクト比の大きい反応経路を駆動するための力学的・機械的要素技術の不足がその発展の障害となっている点は否めない。本研究は我々のこれまでの流体物性計測技術マイクロ流路への応用であり、本研究で開発する流体駆動のための微小機械要素は、今後バイオエンジニアリングや医療応用など様々な分野への応用が可能であると考えた。

### 2. 研究の目的

我々はこれまで、電磁的な相互作用を用いて微小物体を遠隔で機械操作する要素技術の開発に取り組んできた。本研究は、極微小化が可能な遠隔力学操作方式である電磁スピニング (以下 EMS) システムを用いて、マイクロ流路ひいてはナノ流路中において重要な機械構成部材となるマイクロポンプ、マイクロバルブ、コックといった要素部品を作り上げるための基盤技術を開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究ではマイクロ流路内において流体を駆動する EMS 方式の極小駆動系を作製した。これを用いて流体中のマイクロ配送システムの実現を図り、その輸送効率などを実験的に検証した。

さらにその性能向上と微細化を目指し、形状設計を流体シミュレーションにより系統的に行い、同時に開発したマイクロ駆動技術を、バルブ、コックなどの他の微小駆動機構へと展開する試みを進めた。

### 4. 研究成果

(1)プローブ球の公転現象観察による界面モニ

### タリング

電磁回転型粘度計 (Electro-Magnetically Spinning [EMS] Viscometer) は、試料中のプローブに電磁相互作用を用いて非接触にトルクを与え、その回転数をレーザーで読み取ることで試料の粘性を計測する。我々が開発したこの方式は、非接触測定以外にも完全密閉環境で少量サンプル (0.3 mL) での測定が可能であり、またサンプル状態を観察しながらの経時測定ができるなど、従来法にはない特徴を有している。一方で、水程度の低粘性 ( $\sim 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) の計測においては測定精度が 5%程度に限られるという問題がある。この精度は従来法に比べて遜色があるものではないが、EMS 法の利点を生かした高温高圧環境での測定、特に超臨界流体への応用を考慮すると必ずしも十分ではない。そこで今回我々は、純水の粘性以下の、あるいはさらに挑戦的には気体の程度の低粘性の計測を実現するために、同じ駆動原理を利用しかつ低粘性計測への適用が可能な球公転型粘度計を開発した。

EMS粘度計の基本原理は、金属球の粘性プローブを試料中に沈め、これに時間変動する磁場を印加して球の運動を駆動するトルクを与え、既知のトルクに対する球の運動速度を計測することにより粘性を決定するというものである。

電磁相互作用によるトルク印加のもっとも簡単な構成は現在すでに市販されている EMS 粘度計である。この EMS 粘度計では水平面内を等速度で回転する磁場によりプローブ球に自転するトルクを加える。これに対し EMR 法ではプローブ球を水平面上で「転がす」トルクを印加する。球が斜面を転がり落ちる速度から粘性を計測する手法は傾斜落球法と呼ばれるが、EMRでは印加されたトルクにより球

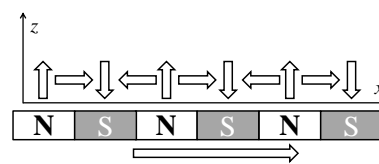


図1 球駆動原理の模式図

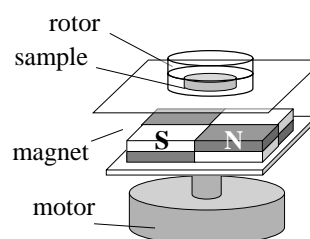


図2 装置の模式図

は水平面内に形成された周回軌道を公転しつづける。このため傾斜経路を何度も傾けて計測する傾斜落球式に比べ、継続して定常的で安定な粘性の計測が可能になる。

EMRの原理を説明するため、等速度で運動する一次元的な周期磁場を考える。このような磁場は図1のような配置で容易に実現できる。鉛直上方を+z、磁場の運動方向を+xとすると、磁場は

$$B_x = B_0 \exp \{i(\omega t - kx)\},$$

$$B_z = iB_0 \exp \{i(\omega t - kx)\}.$$

と表される。

このとき磁石上の一点における磁場は、図1において反時計回りに回転する磁場となる。この回転磁場による誘導電流と磁場とのローレンツ相互作用により、球には磁場の運動に追従して回転するように以下のトルクが加わる。

$$T = \frac{2\pi}{15} n\sigma r^5 B_0^2 \Omega_M.$$

ここでnは磁極NおよびSの組の数、 $\Omega_M$ は磁場回転の角速度、R及びrは球の公転軌道半径並びに球の半径である。この結果、球は左方へと転がることになる。

周回経路が試料液体で満たされているとき、一定のトルクを受けた球の運動速度は粘性に反比例する。このため球の定常回転速度を計測することにより、媒質の粘性を決定することができる。この手法では従来の傾斜落球法とは異なり経路は無限軌道であり、よって周回計測時間を長くとることにより粘性測定精度を任意に向上させることができる。

実際の装置では複数の磁石を周回上に配置しこれを回転させることにより円軌道上の周回運動を駆動するトルクを印加する。実験装置の模式図を図2に示す。溝状の周回軌道は高分子材料で形成し、これをガラスシャーレの底部分に沈めて用いた。回転プローブは直径2 mmのアルミ球であり、これは従来のEMS粘度計で用いられているものと同じであり互換性がある。

周回経路の半径は10~20 mm程度であり、周回経路のみを試料が満たせばよいので測定に必要なサンプル量は400  $\mu$ Lの程度である。球

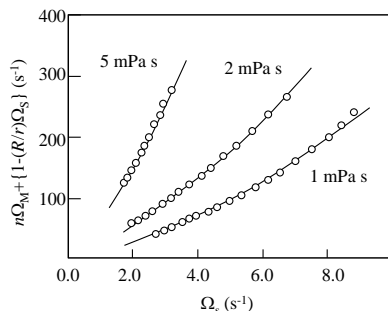


図3 EMRシステムによる粘性測定

の運動は装置上部におかれたビデオカメラにより撮影し、周回にかかる時間を計測する。

図3に、1~5 mPa·sの粘性標準試料を用いて得られた、球への印加トルクと球の周回速度の関係を示す。本方式では、磁石と球の位置の相対運動、またころがる際の球の自転運動を考慮し、トルクTは次式で与えられる。

$$T = n\Omega_M + (1 - \frac{R}{r})\Omega_S.$$

ここで $\Omega_S$ はプローブ球の公転角速度である。

図から純水程度の低粘性領域において、十分な分解能を有していることがわかる。特に低い粘性試料について印加トルク - 周回速度の関係が線形から外れていることが顕著であるが、これはナビエストークス方程式の非線形項の影響である。

以上のとおり、EMS駆動システムを応用し、特に低粘性領域において高精度測定を実現する新たなシステムの開発を行った。現在、この特性を生かし液晶相転移や界面活性剤のミセル形成・曇点検出などの測定を行っている。

## (2)EMS駆動システムによる流体中のマイクロマニピュレーション技術の開発

数マイクロメートルの微小領域内で原料・材料となる物質を目標とする場所へ運び化学反応させ、目的の物質を生成するというプロセスは、環境への負荷が少ない生産システムとして注目を集めている。その中心的存在となるマイクロ流路は、流路パターンの作製過程における機械的処理の精度や化学的なエッチング処理の制御に、未だ改善すべき点が多く残されている。このような観点から、我々は顕微鏡下で実際に観測しながら直感的に操作することのできる微粒子マニピュレーション技術の構築を目指した。

本操作技術で駆動トルクの強度Tを制御するパラメータは、電磁石によって発生させる磁場の強度Bと変調周波数 $\omega$ のみであり、その関係は $T \propto B^2 \omega$ と表される。動作確認のために作成した試作装置は、電磁石のインダクタンスを考慮に入れたマッチングを行っていないため、周波数の増加に伴って流せる電流値が減少し、70 Hz付近で最大トルクに達することが分かった。よって以下の実験では磁場変調周波数を70 Hz近傍に固定し、磁場強度のみを変えながら検証実験を行った。また、実際の実験系では鉛直方向のコイルのうち片方(上部)は設置せず、球の運動を画像解析するための顕微鏡観察システムを取り付けた。

まずはx, y方向とz方向の変調周波数差を2 Hzに設定し単振動運動させ、転がり方向制御の確認を行った。左側の縦列はy方向の磁

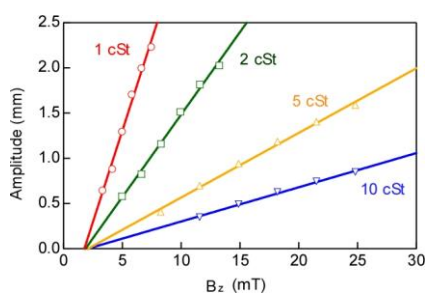


図4 プローブの移動振幅と印加磁場の関係

場のみを OFF にした時の挙動であり、 $T_y$  成分のみが誘起され x 軸に沿った転がり運動となった。一方、右側の縦列は x, y 方向を同強度同位相の磁場で駆動した時の挙動であり、両軸から 45 度傾いた直線上を転がった。この結果は、各軸方向の磁場成分で構成されるベクトル磁場の制御によって任意方向のトルク印加が可能であることを示唆している。次に、粘度標準液の種類を変えながら、同様の単振動運動を観察し、転がり振幅の磁場強度依存性を測定した。その結果を図 4 に示す。単振動運動の周波数を固定しているため、運動の振幅は転がり速度の最大値に比例する。一方、z 方向の磁場強度は駆動トルクに比例する。よって、各々のプロットの傾きは媒質の粘度に反比例することが予想され、結果はほぼ一致した。また、この傾きと溶媒粘度との関係を詳細に調べると、転がり運動に対する摩擦を見積もることができ、その値が一般的な金属とガラスの間の転がり摩擦とほぼ一致することを確認した。さらに、各粘度溶液に対するプロットが磁場軸上に共通の切片を持つことに注目し、転がり開始に必要な閾値を算出した。この値が“最大静止転がり摩擦力”に相当すると考え、プローブ球の凹凸のスケールを見積もると、EMS 粘度計におけるスピン摩擦から予想される値<sup>[1]</sup>とほぼ一致することも分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① T. Hirano, Y. Matsuura, and K. Sakai, Noncontact Manipulation and Delivery Technique for a Spherical Object, Appl. Phys. Express, vol. 6, p.p. 096701 1-4 S, 2013. 査読有.
- ② T. Hirano and K. Sakai, Spontaneous Ordering of Spherical Particles by Electromagnetically Spinning Method, Appl. Phys. Express, Vol. 5, pp. 027301 1-3 2012. 査読有.
- ③ K. Sakai, T. Hirano, and M. Hosoda, Accurate Viscosity Measurement using

Disk-Type Electromagnetically Spinning System, Appl. Phys. Express, Vol. 5, pp. 036601 1-3. 2012 査読有.

- ④ M. Hosoda, T. Hirano, and K. Sakai, Accurate Viscosity Measurement of Ethanol Solution for Determination of Ultrasonic Relaxation Parameters, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, pp. 07GA05 1-2 2012 査読有.

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① M. Yasuda\*, N. Kurauchi\*, Yasuhide Hara\*, M. Nakamura\*, T. Hirano, and K. Sakai Rapid measurement of ultra-high viscosity with EMS system '13. 11. 20~11. 22 The 34th Symposium on UltraSonic Electronics (USE 2013) @Kyoto, Japan
- ② Y. Matsuura, T. Hirano, and K. Sakai Friction torque reduction by ultrasonic vibration and its application to EMS viscometer, '13. 11. 20~11. 22 UltraSonic Electronics (USE 2013) @Kyoto, Japan
- ③ M. Hosoda and K. Sakai, Low viscosity measurement by electro-magnetically revolving method, '13. 11. 20~11. 22 The 34th Symposium on UltraSonic Electronics (USE 2013) @Kyoto, Japan
- ④ 平野太一, 酒井啓司, EMS 法を用いた極低トルク下でのゾル・ゲル物性評価, '13. 11. 11~11. 12 超音波研究会 @金沢工業大学 扇が丘キャンパス
- ⑤ 細田真妃子, 酒井啓司, EMS (電磁式球回転) システムによる固液界面モニタリング '13. 09. 25~09. 27 第 61 回レオロジー討論会 @山形大学 米沢キャンパス
- ⑥ 平野太一, 酒井啓司, ディスク EMS 法を用いた真のゲル化点判定とゲル (ゾル) 物性の評価, '13. 09. 25~09. 27 第 61 回レオロジー討論会 @山形大学 米沢キャンパス
- ⑦ 下河有司, 松浦有祐, 酒井啓司, 新型 EMS 粘度計による超低粘性測定, '13. 09. 25~09. 27 第 61 回レオロジー討論会 @山形大学 米沢キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

- ① 名称: 粘性およびの測定方法および測定装置  
発明者: 酒井啓司  
権利者: 国立大学法人東京大学  
種類: 出願  
番号: 2013-242297  
出願年月日: 2012 年 3 月 4 日

国内外の別： 国内

②名称：粘性およびの測定方法および測定装置

発明者：酒井啓司

権利者：国立大学法人東京大学

種類：出願

番号：2011-109833

出願年月日：2011年5月16日

国内外の別： 国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://sakailab.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井 啓司 (SAKAI, Keiji)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：00215584

### (3) 連携研究者

美谷 周二朗 (MITANI, Syujiro)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：10334369

平野 太一 (HIRANO, Taichi)

東京大学・生産技術研究所・技術職員

研究者番号：00401282