

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870115

研究課題名(和文) 電磁駆動式転がり操作技術を用いた高感度バイオセンサーの開発

研究課題名(英文) Development of in-situ system of measuring surface/interface properties in biomaterials with electromagnetically spinning technique

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁回転式非接触トルク印加装置による金属プローブの操作技術を用いて、表面や界面における物性変化をリアルタイムに検出するような測定システムを確立し、このシステムを生体試料に利用できるような市販の計測器として開発することに成功した。また、低粘度や低ずり速度における測定精度を飛躍的に向上させ、ソル-ゲル転移挙動の観察や転移温度の決定、および活性剤単分子膜のずり速度依存性の測定などを達成した。

研究成果の概要(英文)：I successfully developed a system of detecting temporal change of mechanical properties in surface or interface of sample materials, and have manufactured a proto type of measurement device, which will be commercially available. In this system, an originally developed technique based on the electromagnetically spinning method is used for remotely applying a controlled torque to a probe in/on sample materials. Owing to the advantage of its noncontact control of torque in this system, the high accuracy in measurement of low viscosity and/or low shear rate can be obtained. As a result, a sol-gel phase transition was directly observed, and the phase transition point was determined. Additionally, the relation between surface viscosity and surface shear rate for a monolayer of detergents was measured.

研究分野：流体物性計測工学

キーワード：低粘度の高精度測定 生体試料の物性評価 界面現象モニタリング

## 1. 研究開始当初の背景

近年、分子レベルでの合成や分析技術の進歩に伴い、特異的な機能を発現する新規材料の開発は重要なテーマとなりつつあり、なかでも表面あるいは界面を反応場として利用するようなデバイスの発展は著しい。その一方で、表界面における状態変化を観察する技術の進歩は後れを取っているのが現状である。

特に生体内で使用する機能性材料の有効性や有害性を評価するためには、固液界面の物性変化を正確に捉える必要があり、これを可能にし、かつ *in situ* でリアルタイム検出できるような測定システムの開発に成功すれば、産業応用上も非常に有用なデバイスとなり得る。

## 2. 研究の目的

申請者の開発した電磁回転式 (EMS) 非接触トルク印加装置によって、プローブ球を基板上で平面空間内の任意方向に回転移動させる操作技術を用いて、転がり運動の摩擦係数を高精度に *in situ* で評価可能にする測定システムの構築を第 1 の目標とした。

さらに、転がり摩擦の高精度計測をプローブや基板表面の分子状態のモニタリングに利用し、生体機能性材料へのタンパク質吸着量や抗原抗体反応の進行過程などを、生体内と同様の環境下でリアルタイムに検出するようなバイオセンサーとして、デバイス開発することを最終目的とした。

## 3. 研究の方法

初年度は、トルク印加部の駆動方式を汎用センサーとして製作するために変更し、目的とする試料溶液中での動作確認や測定精度の検証を行った。電磁回転式 (EMS) 非接触トルク印加装置は、その名の通り磁場の時間変化によって導電性プローブ内部に生じる渦電流と、時間変化させている外磁場の相互作用によって、プローブに回転トルクを印加する方式である。動作検証機では、印加可能なトルクの自由度を重視し外磁場を電磁石によって発生させていたが、これには回路に大電流を流すための増幅器が必要であり、将来的なデバイス応用に向けて、永久磁石を取り付けたモーターを制御する方式への転換を図った。

次年度は、転がり摩擦検出による固液界面測定と同程度に興味深い研究対象である、気液界面の物性モニタリングを可能にする、新たな測定手法について比較・検討を行った。

具体的には、薄いディスク形状のアルミ製プローブを試料表面 (液面) に浮かべ、これを EMS トルク印加装置を用いて回転させ、その回転速度の変化を検出するという手法である。この手法は、試料液体のずり粘度を水 ( $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) に対して誤差 1 パーセント未満で測定できるという、驚異的な低トルク検出性能を有しており、気液界面だけでなく、より検出の難しい液液界面における物性変化をもリアルタイムで検出できる可能性を有している。

最終年度は、2 年間の研究によって蓄積されたデータを基に、企業の研究現場で開発に携わっているユーザーや計測器を製作・販売しているメーカーとも協力し、『市販の計測器』を視野に据えたプロトタイプ装置の開発に注力した。実際に、経時変化の大きな試料や密度・表面張力などの測定外の物性値が異なる試料を測定することで、試料に応じた改良点を洗い出し、汎用機器としての仕様策定を行った。

## 4. 研究成果

永久磁石回転方式における測定システムでは、使用する磁石の磁場強度や最適サイズを計算によって見積もり、実際にアルミ球プローブの転がり速度を測定することで、予想された印加トルクが発生していることと、試料溶液のずり粘度を高精度に測定できることを確かめた。しかし、生体試料と同程度の粘度を有する液中では問題無いが、粘度の一次標準である水や水の粘度よりも低い粘度を有する溶剤などの液中では、測定精度が低下してしまうことが分かった。そこで、理論的に予測しうる非線形効果まで考慮に入れた補正項を追加することで、測定精度が保証できる転がり速度の範囲拡張を試みた。その結果、補正項の表式と非線形係数の値を測定によって求めることに成功した。

液面浮上方式における測定システムでは、低トルク性能の飛躍的な向上と、非接触トルク印加という特長を活かし、ゾル-ゲル転移温度を簡便かつ高精度に見極める実験に成功した。また、界面活性剤の表面密度を変えながら測定を行うことで、表面粘度を求めることに成功し、そのずり速度依存性を特に低ずり速度領域において明らかにし、表面単分子膜が降伏挙動を示すような傾向を見つけた。また、液面浮上方式によって得られた知見を下に改良・開発された磁気浮上方式によって、各種気体の粘度 ( $10\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$  オーダー) を精度良く測定することに成功した。この磁気浮上方式は、これまでとは桁違いの粘度測定性能を有しており、今後、細管法に変わる粘度標準を決める測定手法として、期待が高まっている。

プロトタイプ機の開発については、特にディスク形状プローブを用いた方式の製品開発に注力し、医療現場で血液粘度測定を簡便に行うことのできる計測器に関して、生産・販売の足がかりを作った。

#### 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 4 件) 全て査読有り

1. T. Hirano and K. Sakai, "Simple and accurate determination of sol-gel phase transition point using disk-type electromagnetically spinning viscosity measurement system", Jpn. J. Appl. Phys., (2017) [in printing]
2. S. Mitani, M. Hirano, T. Hirano, and K. Sakai, "Development of RheoSpec Viscometer Based on EMS Method", Annu. Trans. Nord. Rheol. Soc., Vol.25, (2017) pp. 329-332
3. Y. Shimokawa, Y. Matsuura, T. Hirano, and K. Sakai, "Gas viscosity measurement with diamagnetic-levitation viscometer based on electromagnetically spinning system", Rev. Sci. Instrum., Vol. 87, (2016) pp. 125105 1-4
4. M. Hosoda and K. Sakai, "Electromagnetically revolving sphere viscometer", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 53, (2014) pp. 126602 1-4

[学会発表](計 15 件)

1. S. Mitani, M. Hirano, T. Hirano, and K. Sakai, "Development of RheoSpec viscometer based on EMS method", Annual European Rheology Conference 2017, 4 Apr 2017, Copenhagen, Denmark
2. K. Sakai, M. Hosoda, and T. Hirano, "Measurement of surface viscoelasticity by EMS method", Annual European Rheology Conference 2017, 4 Apr 2017, Copenhagen, Denmark
3. T. Hirano and K. Sakai, "Rheological measurement system using disk-type electromagnetically spinning technique", The Society of Rheology 88th Annual Meeting, 16 Feb 2017, Tampa, FL, USA

4. T. Hirano and K. Sakai, "Determination of exact gelation point and measurement of tiny elastic modulus using disk-type EMS", The 37th Symposium on UltraSonic Electronics (USE 2016), 16 Nov 2016, Busan, Korea
5. 平野太一, 平野美希, 酒井啓司, "血液粘度計測に向けたマイクロ粒子分散系の流動特性評価", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 9 月 13 日, 朱鷺メッセ
6. T. Hirano and K. Sakai, "Evaluation of Secondary Flow Effect in Parallel-plate Viscometer with Reservoir", 17th International Congress on Rheology (ICR 2016), 11 Aug 2016, Kyoto, Japan
7. 平野太一, 松浦有祐, 平野美希, 酒井啓司, "液面浮上型ディスク EMS システムにおける流動抵抗トルクの解析", 超音波研究会, 2016 年 1 月 28 日, 関西大学 千里山キャンパス
8. T. Hirano and K. Sakai, "Shear thinning behavior of surface viscosity for surfactant monolayer at low shear rate", The Society of Rheology 86th Annual Meeting, 12 Oct 2015, Baltimore, MD, USA
9. 平野太一, 酒井啓司, "ディスク EMS 法による不溶性単分子膜の表面ずり粘性測定", 第 63 回レオロジー討論会, 2015 年 9 月 25 日, 神戸大学工学部
10. 平野太一, 酒井啓司, "EMS 法を用いた極低トルク/ずり流動下での複素弾性率測定", 超音波研究会, 2015 年 1 月 29 日, 同志社大学 今出川キャンパス
11. T. Hirano and K. Sakai, "Accurate measurement of low viscoelasticity near gelation point by electromagnetically spinning system", The Society of Rheology 86th Annual Meeting, 6 Oct 2014, Philadelphia, PA, USA
12. 平野太一, 酒井啓司, "ディスク EMS 法の極小トルクモードを用いた低粘度流動の非線形効果の直接観察", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 18 日, 北大 札幌キャンパス

13. T. Hirano and K. Sakai, "Rheology Measurement of Gel/Sol Solutions under Ultralow Shear", 6th Pacific Rim Conference on Rheology (PRCR-6), 23 July 2014, Melbourne, Australia

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

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