

令和元年6月17日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05650

研究課題名(和文)非線形界面動電現象の基礎と設計基盤の確立

研究課題名(英文) Establishment of the Design Basis on Nonlinear Electrokinetic Phenomena

研究代表者

杉岡 秀行 (Sugioka, Hideyuki)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：20769822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：直接シミュレーション法を用い、非線形界面動電現象の基礎及びその設計基盤を確立することができた。特に、1)位相ずれや濃度問題など非線形界面動電現象(NEKP)の基本問題を解明できた。2)非線形界面動電現象の基礎解明と関連する“拡散イオン系の基本問題”を解明できた。3)電極反応と関係する電流モードによる非線形界面動電現象の発生を予測できた。【論文掲載実績：Physical Review E誌2本、JFM誌1本、他11本(合計14本)】

研究成果の学術的意義や社会的意義

非線形界面動電現象の主要な問題への理解が進み、マイクロ流体技術に応用し小型血液診断システムや小型遺伝子診断システム等へ発展させるための準備が整った。具体的には、1)標準理論からずれる主因がわかり応用デバイスを理論設計できる道が開かれた。2)前提となる拡散イオン系の基礎問題の理解が進み、技術の全体像の理解が進んだ。3)電極反応がある場合の電流モードによる現象について理解が進み、新たな動作モードによる応用デバイスへの道が開かれた。

研究成果の概要(英文)：We have established the design basis on nonlinear electrokinetic phenomena (NEKP) based on a direct multi-physics method. In particular, (1) we clarified fundamental problems of NTKP concerning phase delay effects and high ion concentration phenomena. (2) We clarified fundamental problems of a diffused ion system (i.e., an ion-conserving modified Poisson-Boltzmann theory and an edge vortex flow problem) related to NTKP. (3) We recognized new NTKP due to a current mode resulting from a chemical reaction at the electrodes.

研究分野：化学

キーワード：非線形界面動電現象

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

非線形界面動電現象では、1V 程度の低電圧印加で 1mm/s 程度の高流速を発生できるうえ、流路と金属ポスト及び電極等の単純な構成で様々な機能を実現できる可能性があるため、もし実現できれば、小型血液診断システムや小型遺伝子診断システム等への応用が期待される。言い換えれば、“ $\mu$ TAS (micro-Total Analysis Systems)” や “Lab-on-a-chip” の用語で語られるマイクロ流体技術を利用した近未来システムの性能と小型化を飛躍的に向上させ、真のイノベーションをもたらすことが期待できる。しかしながら、非線形界面動電現象の理論的基礎を固めていく過程で、この現象は当初考えられた標準的な理論だけでは説明できない点を多く含み、基礎的に解明すべき多くの基本問題があることが認識されてきた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、非線形界面動電現象の基礎及びその設計基盤を確立することである。

具体的には、

- 直接シミュレーション法により、非線形界面動電現象の基本問題を解明すること
- 非線形界面動電現象の基礎解明の前提となる“拡散イオン系の基本問題を解明”すること
- 非線形界面動電現象の観測に影響する“複雑な溶液/電極反応を解明”すること

にある。また究極的には、非線形界面動電現象による革新的なデバイスの設計基盤を確立することにある

### 3. 研究の方法

0: 大規模な直接シミュレーションができる環境を構築する。

- 1A: 直接シミュレーション法を発展させ、イオン応答の位相ずれ問題を検証する。
- 1B: イオンの立体効果を考慮した直接シミュレーション法を開発し、イオン濃度問題を検証。
- 2A: イオンの立体効果を考慮したイオン保存型ポアソン・ボルツマン理論を構築する。
- 2B: 直接シミュレーション法により、平行電極のエッジ部に流れが発生するかどうかを検証。
- 3A: Frumkin-Butler-Volmer 方程式を用い、反応を考慮した一次元イオン系の応答を解明する。
- 3B: 電極部と金属ポストに、ファラデー反応を考慮した二次元イオン系の応答を解明する。

### 4. 研究成果

3年間で Physical Review E 誌 2本、JFM 誌 1本、他 11本(合計 14本)の論文掲載実績を得、本研究の目的である「非線形界面動電現象の基礎及びその設計基盤を確立すること」を着実に遂行・発展させることができた。特に、交付申請書に記載した「研究の目的」「研究実施計画」に照らし、次の結果を得た。

非線形界面動電現象(ICEKP)の基本問題を解明:

- (1) 直接シミュレーション法を発展させ、イオン応答の位相ずれ問題を検証できた。具体的には、ICEKP 流速が標準理論予測より数桁低くなる原因の一つがイオン応答の位相ずれであることが明確となった。[Physical Review 誌に発表済み: H. Sugioka: Direct simulation of phase delay effects on induced-charge electro-osmosis under large ac electric fields”, Physical Review E, 94, 022609, 2016]
- (2) イオンの立体効果を考慮した直接シミュレーション法を開発し、イオン濃度問題を検証できた。具体的には、イオン混雑は、むしろ高電圧印加によるイオン不足を補うように働き、流速低下の原因とは考えにくいことを明らかにした。[H. Sugioka, submitting]

拡散イオン系の基本問題を解明:

- (1) イオンの立体効果を考慮したイオン保存型ポアソン・ボルツマン(IC-MPB)理論を構築した。具体的には、改良したヘルムホルツの自由エネルギーから出発し、IC-MPB 解を得、従来の修正ポアソン・ボルツマン(MPB)の問題点を改善することができた。[JPSJ 誌に発表済み: H. Sugioka: Ion-conserving Modified Poisson-Boltzmann Theory Considering a Steric Effect in an electrolyte, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 124006 (6 pages), 2016]
- (2) 直接シミュレーション法により、平行電極のエッジ部に流れが発生するかどうかを検証した。具体的には、水中に配置した有限サイズの平行電極に電圧を印加するとエッジ部にイオン濃度勾配に由来する渦流が発生し、開放型電極へのイオンの無制限な取り込みは抑制されることがわかった。すなわち、開放型電極であっても内部領域はイオン保存型 PB 解で記述することが好ましいことがわかった。[JPSJ 誌に発表済み: H. Sugioka: Edge Vortex Flow due to Inhomogeneous Ion Concentration, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 043401 (5 pages), 2017]

非線形界面動電現象の観測に影響する“複雑な溶液/電極反応の解明”:

- (1) Frumkin-Butler-Volmer (FBV)の式を用いた1次元系解析を行うことで、反応が関与する時のファラデー電流の発生に伴う電極間の電界を明確にした。

(2) 上の解析から、ファラデー電流が発生する場合にも電流モードによって非線形界面動電現象が起こることが予測できた(注: 直接シミュレーションは実施していないが3Bに相当する)。この予測の展開として、静電遮蔽が不完全となるような高電圧下の拡散とFBV式を組み合わせた基礎式の確立が重要と考え、まず、静電遮蔽が不完全となるような高電圧の解析解を明らかにした[投稿中]。

以上より、当初の目的は、ほぼ完了できたと考えているが、JFM誌[H. Sugioka: Direct simulation on nonlinear thermokinetic phenomena due to induced-charge electroosmosis, J. Fluid Mech. 855, 736, 2018]で明らかにしたように非線形界面動電現象には、熱流や温度勾配と関係した複雑な現象があり、さらなる展開が必要と考えている。特に、ラテレットが絡む熱界面問題は、真の目的であるマイクロ流体技術への展開を図る上で、ACEO(ICEKPの一種)ポンプ等の関係が深く、今後、重要となると考えている。また、ICEKP技術を有用な技術とするには、PRE誌で示したような基礎的な実験検証[H. Sugioka, N. Nakano: High-speed broadband elastic actuator in water using induced-charge electro-osmosis with a skew structure, Physical Review E 97, 013105, 2018]がさらに必要であり、今後の課題と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 14 件)

H. Sugioka, S. Segawa, M. Kubota: High-speed side-shooter using Leidenfrost Phenomena, J. Appl. Phys. 125, 134502, 2019

H. Sugioka, M. Kubota, S. Segawa: Leidenfrost mixer, Japanese Journal of Applied Physics 58, 048001, 2019

H. Sugioka: Direct simulation on nonlinear thermokinetic phenomena due to induced-charge electroosmosis, J. Fluid Mech. 855, 736, 2018

H. Sugioka, N. Nakano: High-speed broadband elastic actuator in water using induced-charge electro-osmosis with a skew structure, Physical Review E 97, 013105, 2018

H. Sugioka, S. Segawa: Controllable Leidenfrost glider on a shallow water layer, AIP Advances 8, 115209, 2018

H. Sugioka, H. Dan, Y. Hanazawa: Microcolumn Formation due to Induced-Charge Electroosmosis in a Floating Mode, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 104402 (5 pages), 2017

H. Sugioka: Edge Vortex Flow due to Inhomogeneous Ion Concentration, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 043401 (5 pages), 2017

H. Sugioka: Particle Catcher Using Induced-Charge Electro-Osmosis, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 014401 (10 pages), 2017

H. Sugioka: Ion-conserving Modified Poisson-Boltzmann Theory Considering a Steric Effect in an electrolyte, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 124006 (6 pages), 2016.

杉岡秀行: 誘起電荷界面動電現象による多面粒子の自己組織化の解析、計算数理論文集 16, 04-161202 (6 pages), 2016.

H. Sugioka: Direct simulation of phase delay effects on induced-charge electro-osmosis under large ac electric fields", Physical Review E, 94, 022609, 2016

H. Sugioka: Elastic Beating Pump Using Induced-Charge Electro-osmosis, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 104001 (9 pages), 2016.

H. Sugioka: Molecular Dipole Osmosis Based on Induced Charge Electro-Osmosis, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 094003 (5 pages), 2016.

H. Sugioka: Active Vector Separation Using Induced Charge Electro-osmosis with Polarizable Obstacle Arrays, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 094802 (4 pages), 2016.

[学会発表](計 11 件)

瀬川 慧、杉岡 秀行、浅い水面上を駆動するライデンフラストグライダー. 2019 応用物理学会春季学術講演会 12a-W833-3, 2019.3.12

久保田 眞子、瀬川 慧、杉岡 秀行、ライデンフロスト現象を用いた回転ミキサー. 2019 応用物理学会春季学術講演会 12a-W833-4, 2019.3.12

瀬川 慧、杉岡 秀行、ラテレット電極を用いた AC 電気浸透ポンプ. 2019 応用物理学会春季学術講演会 12p-W833-1, 2019.3.12

杉岡秀行、非線形マイクロ流体技術の進展と生物資源環境の移動現象解析 (依頼講演). 2018 年度界面動電現象研究会 水・高分子界面の移動現象から俯瞰する生物資源と環境のコロイド工学, 予稿集, P11, 2018.3.11

杉岡 秀行、非線形界面動電現象の設計基盤の確立、第 69 回コロイドおよび界面化学討論会講演プログラム. 3F25, 2018.9.20

中野 直, 水野 佑紀, 杉岡 秀行、誘起電荷電気浸透を用いた水中高速弾性アクチュエータ. 第 69 回コロイドおよび界面化学討論会講演プログラム 3F05, 2018.9.20

團 宏暢, 花沢 裕哉, 岡田 健一郎, 杉岡 秀行、誘起電荷界面動電現象による導体粒子の動

的自己組織化現象. 第 69 回コロイドおよび界面化学討論会講演プログラム. 3F03, 2018.9.20  
瀬川慧、久保田眞子、杉岡秀行、ライデンフロスト現象を利用した熱的サイドシュータ. 第  
69 回コロイドおよび界面化学討論会 講演プログラム 2C19, 2018.9.19

Hideyuki Sugioka, Bio-mimic Devices Using Induced-Charge Electro-Osmosis with the  
Fundamental Analysis on Ion Diffusion Phenomena. Abstracts of 12th International  
Symposium on Electrokinetics (ELKIN), 40-40, 2017.9, Dresden Germany.

杉岡秀行、非線形界面動電現象の基礎と設計盤確立 II、サマースクール：土・水・生命環  
境とコロイド界面現象 2017、Summer School: Soil, Water, Life-Environment and Colloid  
Science 2017-Natural Organic Matter (NOM) & Flocculation-, Tokyo, July 28, 2017

杉岡秀行：非線形界面動電現象の基礎と設計基盤の確立に向けて（依頼講演）、  
サマースクール「土・水・生命環境とコロイド界面現象 2016」シンポジウム、筑波大学リサー  
チユニット「生物資源コロイド工学」主催（共催：筑波微粒子界面環境研究会，界面動電現象  
研究会），Tokyo, July 29, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

信州大学研究者総覧 <http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.gpkmbUkh.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。