

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656131

研究課題名(和文)交流電界誘起流体力の複合的利用によるマイクロ流路内ナノ粒子輸送

研究課題名(英文)Microfluidic nanoparticle transportation based on fluidic force induced by AC electric field

研究代表者

本阿弥 真治(Honami, Shinji)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：30089312

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)：ナノ粒子は特異的な物理化学的性質を有するために様々な応用が検討されているが、その検出は依然として困難である。本研究では、マイクロ流体デバイス内部に局所的な交流電界を印加した際に発生する誘起流を利用した新しいナノ粒子の局所濃縮手法の原理的可能性の検証を行った。マイクロ流路内の3次元流動の計測装置を開発し、電場誘起流の詳細な構造を明らかにした。また、ナノ粒子の濃度分布を3次元的に評価する手法を開発し、金属・樹脂製ナノ粒子の局所濃縮が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Nanoparticles have been strongly attracted in various fields due to their unique physicochemical properties. This study investigated a potential of microfluidic nanoparticle concentration using fluidic force induced by alternating-current electric field. We have developed three-dimensional measurement system for microfluidic velocity field and quantified detailed three-dimensional flow field of the electric-field-induced flow. An evaluation technique for three-dimensional concentration distribution of nanoparticles were established. Consequently, the localized concentration of metal and latex nanoparticle in a microchannel with alternating-current electric field was achieved.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：ナノ粒子 マイクロ流体 電場誘起流 局所濃縮 高感度検出

1. 研究開始当初の背景

(1) ナノ粒子は特異的な物理化学的性質を有するため、医療診断やバイオセンサー、重金属検出など、広く応用が検討されているが、その検出は依然として困難で、一般にナノ粒子検出には DMA などの大型装置を要する。

(2) 近年、微細加工技術を用いて製作される、極微量試料の分析が可能なマイクロ流体デバイスには、そのポータブル性、試料量の少なさ、高い安全性、高い反応速度などから、強い関心が寄せられているが、デバイス内部のマイクロ流路中の微量試料に含有される粒子数は必然的に少なく、検出技術の高度化が進められてはいるものの、現状の検出技術には限界がある。

(3) マイクロ流路内に存在する微小粒子群を、流路内の所望部位に適切に輸送することで局所濃度を制御できる技術が存在すれば、検出領域のみの物質濃度を高めることができ、実質的な感度向上が可能となり、マイクロ流体デバイスでの微量物質検出が内包する根源的な問題を解決することができる。しかし、マイクロ流路内でのナノ粒子輸送に適した技術は未確立である。

(4) マイクロ流路における物質移動には電気を用いた手法が、製造技術の相性も良く、センサーとの統合化も可能であることから最も良く用いられている。なかでも電気泳動や誘電泳動等の粒子力を用いた粒子輸送法が良く知られているが、粒子力が対象の体積に比例するため、対象がマイクロスケールであれば適用は充分可能だが、ナノ物質への適用は困難を極める。

(5) 一方、粒子力ではなく流体力を用いた輸送技術は、試料サイズの影響を受けにくいため、流れに追従させる新規ナノ粒子輸送法としての原理的可能性を持つと考えられる。特に、kHz 以上の交流電界はタンパク質や DNA 等の生体試料への影響が小さく、実用にも適していると考えられる。

(6) しかしながら、電極表面に励起される疑似電気二重層により駆動される交流電気浸透流、および 1~2°C 程度の微小なジュール発熱による温度上昇を利用した交流電熱流は、現象単独でも理解が不完全である上、共存現象については全く明らかになっておらず、この両者のナノ粒子輸送、特に検出感度向上への寄与に関する特性を詳細に明らかにする必要があると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、交流電界によって誘起される流動現象の 3 次元構造を各影響範囲も含めて詳細に計測して現象を流体力学的見地より解明し、双方を組み合わせた複合的利用を

提案し、ナノ物質輸送法として確立するとともに、感度増幅に適用した場合の性能評価を行い、実証実験により有用性を示すことを目的とする。

(2) 本研究の特徴は、流体力を駆使したナノ粒子操作、及びそれを駆使した感度増幅法の提案である。交流電界下で発生する流動は、ポンプ・ミキサ等の流体素子としての研究が実施されているが、本課題は、流れを制御して流路内の特定部へ微粒子を誘導する手法に着目した。電極アレイによる流動パターンによみ点へ粒子を集積させることが可能で、濃縮器やフィルタとしても応用できる。

(3) 電気泳動と比べて 1/1000 程度の低電圧で使用でき、実用化の障壁も低い。本研究の遂行は、マイクロ流体力学に新展開をもたらすだけでなく、生化学、医療分析、ヘルスマニタリング、環境センシングなど広範囲な展開が見込まれる。

3. 研究の方法

(1) まずは、粒子輸送現象を引き起こす交流電界誘起流を詳細に計測する実験システムの構築を行う。マイクロ流路内部には、基板の電極アレイが形成する電界に対応した 3 次元流動が発生することが予想されるため、申請者が独自に開発した側方観察マイクロ PIV を、通常の下方向観察マイクロ PIV システムに組み込むことで、3 次元流動計測システムを開発し、基板垂直方向成分の流動も精緻に評価する。

(2) 続いて、交流電界印加時における流動現象を詳細に評価する。交流電気浸透流と交流電熱流の両者について、印加電圧や周波数などのパラメータの依存性を精査し、3 次元流動が粒子輸送へ及ぼす影響について検討し、メカニズムを明らかにする。

(3) 交流電気浸透流および交流電熱流の両者が共存するような系において、マイクロ流路全体の流動について、各種流動の寄与を空間分布で示し、共存現象を理解する手法を確立するとともに、粒子輸送を評価する。

(4) 金属・樹脂と材質の異なるナノ粒子に関して、濃縮効果を定量的に評価し、交流電界がもたらすナノ粒子の局所濃縮効果を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 粒子輸送現象を引き起こす交流電界誘起流の 3 次元構造を計測するための基礎となる、3 次元計測用装置の開発を行った。通常の下方向観察によるマイクロ PIV 用倒立顕微鏡システムに、側方観察マイクロ PIV の組み込みが可能な実験システム (図 1) を開発し、同一装置で基板水平方向及び垂直方向の 3 次

元流動場の計測を可能にした。そして、ガラスに透明導電膜をパターンニングした基板と透明シリコン樹脂流路で構成されるマイクロ流体デバイスを製作した。側方・下方観察マイクロPIV から得られる速度場をそれぞれスキニングして3次元再構成する手法を開発し、3D3C 計測が可能であることを示した。図2にその一例を示す。測定値と理論速度分布(図中実線)が良い一致が見られ、本計測システムの有効性を確認した。

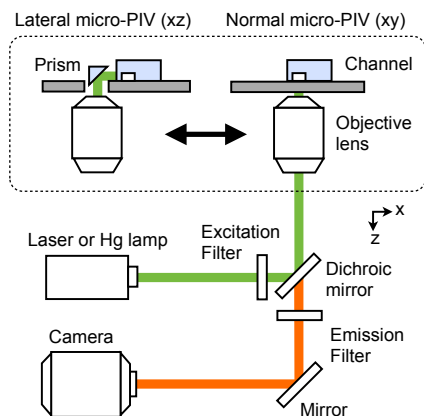


図1 基板に対して水平・垂直方向成分の流動計測が可能な開発した実験システム。

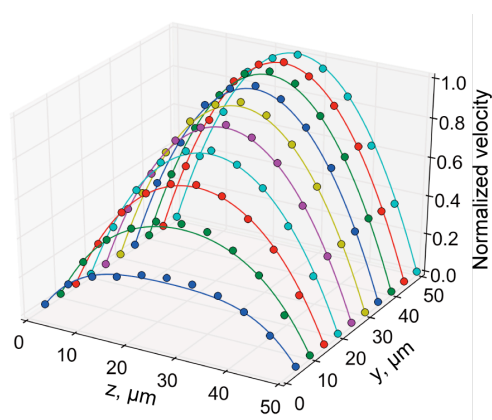


図2 スキニング再構築法によるマイクロ流路内3次元計測例。実線は理論速度場。

(2) 交流電界印加時の流動場の3次元構造を詳細に計測し、基礎データを取得した。電気二重層厚さが厚くなるように電気伝導率を1 mS/m 以下に設定した低導電性水溶液を用いて、kHz オーダーの交流電圧を印加して交流電気浸透流を発生させ、その流動場を周波数・電圧依存性を含めて精査してイオン輸送、流動との関係を実験的に明らかにした。壁面近傍の粒子の抑制 Brown 運動を考慮した解析(図3)により、観察の実効高さが基板上約5 μm となることを求め、正確なデータの評価を可能にした。続いて導電率を高く(> 100 mS/m) 設定し、電気二重層を十分薄くすることで交流電熱流を発生させ、ジュール発熱に伴う物性分布による流れの計測を行い、周波数や電圧依存性について明らかにした。

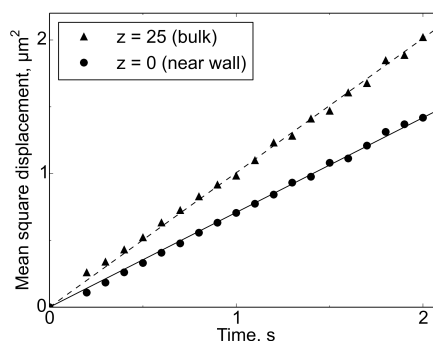


図3 抑制拡散運動モデルによる電極面上の実効計測高さの評価。

(3) 粒子輸送現象・共存流動場の評価：粒子輸送現象を評価するため、電圧 ON/OFF に伴う過渡応答を調査し、濃縮の時定数を明らかにした。続いて、交流電気浸透流及び交流電熱流が共存する流れ場について、両現象の寄与度の空間分布を求めるため、中程度の導電率水溶液(1~100 mS/m)を用いて、電圧を変化させた際の流速場を計測し、各地点での局所速度の電圧依存性をマップ化することで、両者の寄与度合いの分離を行った。その結果、基板近傍は電気浸透流が、遠方では電熱流が支配的であることを明らかにした。

(4) 濃縮対象粒子のスケールダウン：交流電界が誘起する流動を用いた粒子輸送の応用例として、ナノ粒子の高感度測定に焦点を当て、流動制御による高感度分析への適用性評価を実施した。交流電気浸透流を対向するように発生させ、そのよどみ点に粒子が滞留されるような電極形状を考案し、その局所濃縮効果を、3次元蛍光輝度分布から濃度へと換算し、濃縮率(バルク濃度に対する局所濃度の比)を用いて評価した(図4)。また、異種材料への適用性を確認するため、金属ナノ粒子を用いて、その表面プラズモン共鳴による特異的光吸収を用いて吸光度の空間分布を求めて濃縮率を評価し(図5)、広範な材質のナノ粒子の局所濃縮が可能であることを示した。

(5) 本研究によって、電界誘起流体力のナノ粒子操作への可能性を示すことができた。今後は、より多彩な操作の可能性を追求しつつ、実際の応用につながる事例へ適用していく。

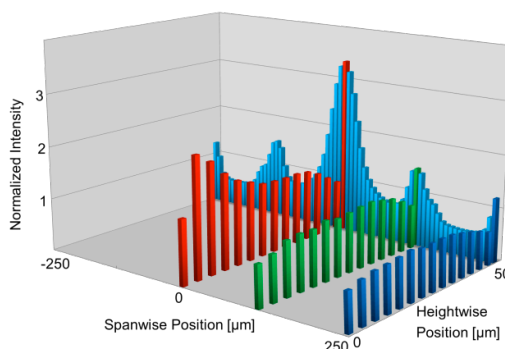


図4 50nm のポリスチレン粒子の3次元濃縮度マップ。

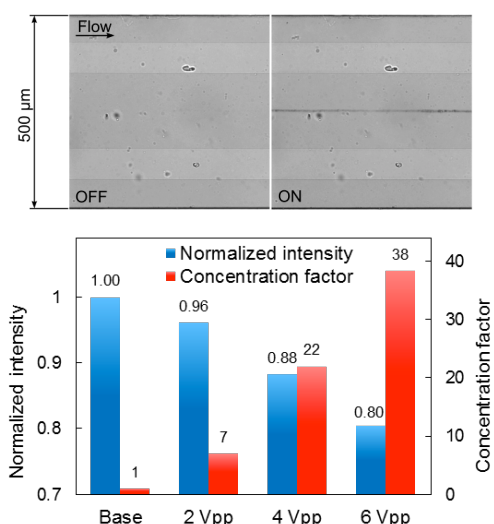


図 5 金ナノ粒子 (直径 100 nm) の濃縮効果の評価。(上) 濃度分布の可視化結果 (下) 各印加電圧における濃縮度。

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 3 件)

- ① Masahiro Motosuke, Keichi Yamasaki, Akihiko Ishida, Hikaru Toki, Shinji Honami, Improved particle concentration by cascade AC electroosmotic flow, *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, Vol. 14, No. 6, pp. 1021-1030, 2013
DOI: 10.1007/s10404-012-1109-1
- ② Akihiko Ishida, Hikaru Toki, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Particle accumulation by AC electroosmosis in microfluidic device with co-planar electrodes, *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読有, Vol. 7, No. 3, pp. 475-486, 2012
DOI: 10.1299/jtst.7.475
- ③ Masahiro Motosuke, Jun Shimakawa, Dai Akutsu, Shinji Honami, Particle migration by optical scattering force in microfluidic system with light-absorbing liquid, *Journal of Heat Transfer*, 査読有, Vol. 134, No. 5, 051025, 2012
DOI: 10.1115/1.4005714

[学会発表] (計 7 件)

- ① Keichi Yamasaki, Masahiro Motosuke, Continuous concentrator for nanoparticle based on cascade AC electroosmotic flow, 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry

and Life Science (micro-TAS), (2013.10.29, Freiberg, Germany)

- ② Akihiko Ishida, Daisuke Ichimura, Masahiro Motosuke, 3D velocity measurement by orthogonal-plane micro PIV for electrokinetic enhancement of surface reaction, ASME 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM), (2013.6.19, Sapporo, Japan)
- ③ Hideharu Kotari, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Particle sorting by optical radiation pressure with low energy density, 3rd European Conference of Microfluidics (2012.12.4, Heidelberg, Germany)
- ④ 神足英春, 元祐昌廣, 本阿弥真治, シート光による光放射圧を受ける微小粒子挙動の観察, 第40回可視化情報シンポジウム (2012.7.24, 東京)
- ⑤ 山崎慶一, 元祐昌廣, 本阿弥真治, 交流電気浸透流を用いたマイクロ粒子のインライン濃縮, 第25回化学とマイクロ・ナノシステム研究会 (2012.5.18, 熊本)
- ⑥ 石田明彦, 元祐昌廣, 本阿弥真治, 交流電場と温度勾配により生じる流れを利用した表面反応の促進, 第48回日本伝熱シンポジウム (2012.5.31, 富山)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本阿弥 真治 (HONAMI, Shinji)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 30089312

(2) 研究分担者

元祐 昌廣 (MOTOSUKE, Masahiro)
東京理科大学・工学部・講師
研究者番号: 80434033

(3) 連携研究者

なし