

マイクロ流体界面計測法の開発

火原 彰秀

東京大学生産技術研究所

1. 研究のねらい

化学装置を数 cm 角のマイクロチップ上の微小流路（マイクロチャネル）に集積化する研究が、近年急速な勢いで進展している。この技術は、分析化学に有用なだけでなく、一般的な化学操作の自動化・効率化に発展する可能性がある。化学操作の微小化に伴い、分離場・反応場としてマイクロスケール油水二相系およびその界面が重要であると考え、詳細に研究を進めてきた。

本研究開始以前に、マイクロ多相流体制御と液液界面現象解析に取り組み、予測とは異なる流線などの特異現象を数例見いだしたが原因は未解明であった。これらの特異現象を解明することは、基礎化学的に重要な知見を与えるだけでなく、抽出効率向上などマイクロ化学プロセスの高度化に繋がると期待できる。

本研究は、マイクロ油水平行二相流の特異現象解明のために、二相流形成の流体力学モデルを詳細に解析すると同時に、界面近傍ナノメートルオーダーの流動特性を計測する顕微放射圧界面変位法を開発することを目的とする。本研究のように流れと相互作用する液液界面特性の詳細解析には、能動的に界面に摂動を加える計測手法が有効と期待した。

2. 研究成果

本研究で用いた、ガラス製マイクロチップの例を図 1 に示す。このチップは、幅 300 μm 、深さ 200 μm のマイクロチャネルを持つ。マイクロチャネル中で安定して油が流れるように、マイクロチャネル壁面を親水/疎水の表面修飾パターンニングしている。このマイクロチャネルを用いて、水と油が層流条件で対向して流れる「マイクロ油水向流」を実現した。また、油水間での物質の分配を利用した向流抽出も実現した。向流抽出は、分析化学の前処理技術としての発展が期待できる手法である。

さらに、マイクロ向流における流線を粒子画像流速測定（PIV）法により解析したところ、レイノルズ数 1 程度の層流条件であるにもかかわらず、渦流やらせん流が観測された。この現象を解析するために、2つのアプローチを検討した。

1つ目のアプローチは、マイクロ向流が形成される油水二相間の圧力バランスモデルを構築し、特異流れが観測される条件を解析することである。まず、油水間の界面張力に起因する「ラプラス圧」と、粘性流体が流れることにより生じる「圧力損失」が、流路のあらゆる位置においてバランスするために、界面形状が位置に依存して変形するモデルを提唱し、これを水/トルエン二相流において実験的に確認した。このモデルに従えば、界面の断面形状は常に単一の円弧であるはずであるが、ある流量条件の場合には三つの円弧で表されることを見いだした。この形状からは、断面内での圧力勾配の存在が示唆され、単純な層流だけでなく「らせん流」や「渦流」が存在することも示唆された。

もう1つのアプローチは、マイクロ流体中の厚み 1 ナノメートル程度の油水界面における液液界面強制振動を解析する新しい顕微分光法を開発し、ミクロな観点から界面における粘弾性などを解析するアプローチで

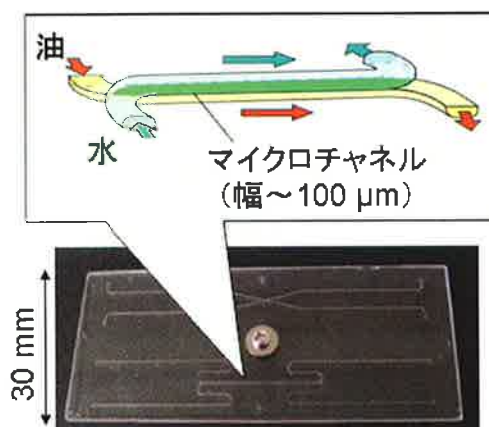


図 1 ガラス製マイクロチップの例
マイクロチャネルは、油水二相流安定化のため、親水/疎水の表面修飾パターンニングした。

ある。この方法を、顕微放射圧界面変位 (μ RaPID) 法と名付けた。本法の原理を 図 2 に示す。励起光の液液界面における放射圧により界面を変位させ、その変位による運動をプローブ光の増減から観測する。励起光とプローブ光の相対位置を流れ方向に調整することにより、流れと強制振動波伝搬の関係を解析した。

マイクロ流体中の水/トルエン界面を解析した結果、界面における流速勾配 (せん断速度) が大きくなるほど、強制振動波が伝搬されやすい現象が観察された。この結果は、界面近傍ナノメートルスケールの空間において、流れの影響で粘度が小さくなっている (ずり流動) と解釈できる。ずり流動は一般に高分子液体で観測される現象であり、水やトルエンのような低分子の溶媒では観測されない。

ナノメートルスケール界面においてこのような現象が観測されたことは、基礎科学的に重要であるだけでなく、溶媒抽出効率向上に向けたマイクロ化学プロセス設計に重要な意味を持つ。また、圧力バランスモデル解析で得られた特異な界面形状 (3つの円弧断面形状) の流量条件で μ RaPID 測定したところ、ずり流動の効果が顕著に現れることを見いだした。

以上の2つのアプローチを総合すると、マイクロ流体の特異流れが、液液界面におけるずり流動 (分子相互作用低下) により起こることがはじめて示唆された。低分子溶媒について、せん断速度と分子相互作用の関係を報告した例はなく、マイクロ流体に特徴的な現象と考えている。分子論的な詳細な解析がさらに必要であると同時に、このような特徴を活かした高度化学プロセスの開発が期待できる。

3. 主な発表

論文

- A. Hibara, S. Iwayama, S. Matsuoka, M. Ueno, Y. Kikutani, M. Tokeshi and T. Kitamori, "Surface modification method of microchannels for gas-liquid two-phase flow in microchips", *Analytical Chemistry* 77(3), 943-947 (2005).
- A. Aota, M. Nonaka, A. Hibara, and T. Kitamori, "Countercurrent laminar microflow for highly efficient solvent extraction", *Angewandte Chemie International Edition*, 46(6), 878-880 (2007).
- A. Aota, A. Hibara, and T. Kitamori, "Pressure balance at the liquid-liquid interface in micro counter-current flows in microchips", *Analytical Chemistry*, 79(10), 3919-3924 (2007).
- A. Aota, A. Hibara, K. Shinohara, Y. Sugii, K. Okamoto, and T. Kitamori "Flow velocity profile of micro counter-current flows", *Analytical Sciences*, 23(2), 131-133 (2007).

招待講演

- 火原彰秀, "マイクロチップ化学とマイクロ多相流, 第24回キャピラリー電気泳動シンポジウム", 2004年12月15日.
- 火原彰秀, "マイクロチップ化学を計測する顕微レーザー分光法", 第三回レーザーアライアンスシンポジウム, 2005年10月25日.
- 火原彰秀, "マイクロ・ナノ流体の制御と解析", 日本化学会東海支部若手研究者フォーラム, 2007年4月20日.

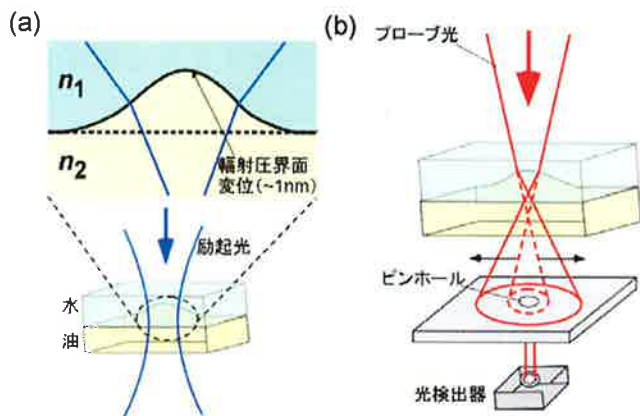


図 2 顕微放射圧界面変位法の原理
(a) 励起光による界面変位。励起光の強度変調により、界面強制振動を印加。(b) プローブ光による変位の検出。ピンホール設置により光の偏向変化を光量変化として検出。