

# 空圧駆動マイクロバルーンデバイスを用いた振動誘起流れの能動制御

## Active control of vibration-induced flow using a pneumatically driven microballoon device

精密工学専攻 32号 佐藤拓  
Taku Sato

### 1. 緒言

マイクロスケールで流体を操作・分析する技術はマイクロ流体技術と呼ばれ、流体及びそれに含まれる試薬成分や微粒子の混合<sup>(1)</sup>、分離<sup>(2)</sup>、反応促進<sup>(3)</sup>など、応用に応じて多岐にわたる操作が実現されている。これまでのマイクロ流体技術として、チップ内に造形された流路にポンプを用いてサンプルを送液し、流路デザインの設計により目的に応じた操作を可能とするデバイスが多く開発されてきた<sup>(2)</sup>。外部ポンプによる送液は、再現性が高く安定した流れが得られるという利点がある一方、システムが煩雑で大型になる、送液時にデッドボリュームが発生する、100  $\mu\text{L}$  以下の微量なサンプルを扱うことが困難、といった課題がある。

外部ポンプを用いないマイクロ流体操作技術として、振動誘起流れが注目されている。これは、マイクロ構造物（マイクロピラー）を有する基板に振動を与えたとき、構造物周囲の流体に局所的に発生する流れを指す（Fig. 1）。この現象を用いた局所流体操作は、微量試薬の操作への応用が期待されている<sup>(4)(5)</sup>。先行研究では、マイクロピラーの形状や配置、および振動の条件を変更することで流れパターンを制御していた。しかし、マイクロピラーは基板に固定されているため（Fig. 1(a)）、一つのデバイスで行える流体操作の種類が限定されていた。

本研究では、空圧により膨張する弾性膜の突起（バルーン）<sup>(6)</sup>をマイクロピラーとして利用することで、振動誘起流れのパターンを能動的に制御するマイクロデバイスを提案する。これにより、流れ場をアクティブに変更でき、単一のデバイスで時空間的な流体操作を可能とする。本論文では、空圧により駆動するマイクロバルーンデバイスを作製し、その制御により誘起される流れ場を定量的に解析した。また、アクティブに変更する2つの流れ場の重ね合わせから、低レイノルズ域の溶液混合に有効とされる流体の引き延ばし・折り畳みの発生しうるかの検討を行った。

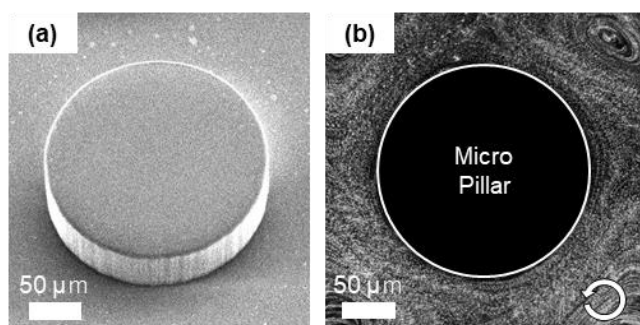


Fig. 1 (a) SEM image of a (conventional) fixed micropillar. (b) Visualization of the vibration-induced flow.

### 2. 空圧駆動マイクロバルーンデバイスの作製

#### 2.1. デバイスの構造及び駆動原理

Fig. 2(a)にデバイスの概観およびその部品構成の模式図、Fig. 2(b)に駆動原理の模式図を示す。本デバイスは、エラストマー薄膜、貫通穴の開いたSiウェハ、PDMS製の空圧路を設けたシートおよび基板から構成されている。PDMS板に挿入したチューブから空気圧をかけることで、空圧路シートの溝を介してSiウェハ表面に張ったエラストマー薄膜が膨張するという仕組みになっている（Fig. 2(b)）。Siウェハには5 $\times$ 5のマトリクス状に穴が開いており、空圧路シートにもそれに対応した位置に5本の流路溝を設置した。5本の流路溝は、交互に2つの空圧路（チャンネル）につながっている。空圧路に、個別に空気圧を与えることで、微小なバルーン構造を列ごとに駆動できる。このバルーン構造が、従来の振動誘起流れの発生に用いられていたマイクロピラーの役割を果たす。以下、両端と中央の3列のバルーン群を駆動するチャンネルを「チャンネルA」、それらの間に位置する2列のバルーン群を駆動するチャンネルを「チャンネルB」と呼ぶ。

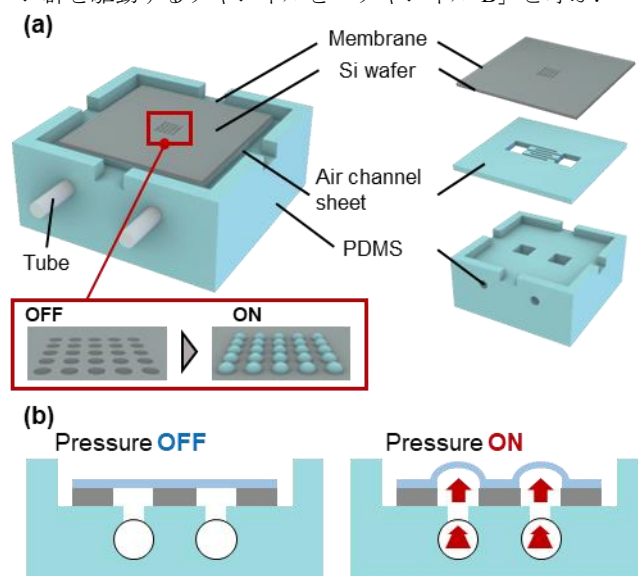


Fig. 2 Diagrams of the (a) device overview and assembly, and (b) pneumatic actuation of microballoons.

#### 2.2. デバイスの作製手順

片面ミラーSiウェハ（厚さ200  $\mu\text{m}$ ）の非鏡面側にエラストマーシリコン樹脂をスピコートし、硬化させた。その後、鏡面側をフォトリソグラフィによってマイクロスケールの円形構造をくり抜いたパターン（円直径200  $\mu\text{m}$ 、円間距離300  $\mu\text{m}$ ）にマスクし、深掘りエッチングにより貫通穴を開けた。Siウェハのサイズは、一辺10 mmの正方形とした。最後

に、残ったレジストを洗浄することで、円形の穴構造を持つ薄膜コート Si ウェハを作製した。

空圧路シートは、フォトリソグラフィで Si ウェハ上に流路構造（高さ 25  $\mu\text{m}$ 、幅 50  $\mu\text{m}$ ）を造形し、透明シリコーンゴム（PDMS）に構造を転写することで作製した。空圧路シートのサイズは、Si ウェハと同様、一辺 10 mm の正方形とした。PDMS 板は、ミリスケールの構造をもたせるため、光造形装置で造形しバリレンを蒸着した鋳型に、PDMS を流し込み硬化させて作製した。

Si ウェハと流路シートの接合は、プラズマボンディングで行った。酸素プラズマ処理後、空圧路シートの接着面にエタノールを 5  $\mu\text{L}$  滴下してから Si ウェハを重ね、顕微鏡下で位置合わせを行った後に接合した。最後に、流路シートと PDMS 板部をプラズマボンディングで接合し、最終的なデバイスを完成させた。

### 3. デバイス特性の評価

#### 3.1. 実験方法

##### 3.1.1. デバイスの駆動確認

2 章の手順で作製したデバイスの動作確認およびバルーンの変位の計測を行った。空圧印加用に PDMS 板部に開けた 2 つの横穴に、直径 0.7 mm のチューブの一端を差し込み、もう一端はコネクタを介して圧力ポンプに接続した。その後、側方観察可能な顕微鏡のステージにデバイスを設置し、空圧を印加した状態で観察を行った。まず、チャンネル A と B にそれぞれ 30 kPa の圧力を印加し、対応するピラーが駆動されるかの確認を行った。次に、印加圧力を 0 から 30 kPa ずつ上げていき、薄膜の印加圧力ごとのバルーン高さの増加、及び可逆性があるかを確認した。

##### 3.1.2. 印加圧力とバルーン高さの関係

接続した圧力ポンプから、0~30 kPa まで、5 kPa ごとに印加圧力を増加させ、そのときのバルーン高さをレーザー顕微鏡で計測した。実験は、膜厚の異なる 2 つのデバイス（膜厚 5.5  $\mu\text{m}$  と 10  $\mu\text{m}$ ）の変位計測を各 4 回ずつ行い、理論式 (1) から予想される変位  $\omega$  と比較した。各パラメータには、穴半径  $R = 100 \mu\text{m}$ 、膜厚  $t = 5.5 \mu\text{m}$ , 13  $\mu\text{m}$ 、ヤング率  $E = 0.345 \text{ MPa}$ 、ポアソン比  $\nu = 0.24$  を代入し、印加圧力  $p$  を変数とした。

$$\omega = \frac{12(1-\nu^2)(5+\nu)R^4p}{64(1+\nu)Et^3} \quad (1)$$

##### 3.1.3. 振動誘起流れの測定

表面をプラズマ処理によって親水化した後、デバイスをピエゾステージ上に乗せ、トレーサとしての蛍光ビーズ（直径 1  $\mu\text{m}$ ）を含む水を表面に 8  $\mu\text{L}$  滴下し、上からカバーガラスを被せた。その後、デバイスに振動（振動数 600 Hz、振幅 3.3  $\mu\text{m}$ ）を引加し、圧力を 0~30 kPa まで 10 kPa ずつ段階的に上げた。各圧力で生じたアクチュエータの周囲の流れ場を、顕微鏡を介してハイスピードカメラで撮影したトレーサの

画像から、PIV 解析により求めた。各圧力での流れ場の可視化及び速度プロットを行った。この結果を基に、アクチュエータの制御により流れの変調が可能であるかの検討を行った。

### 3.2. 実験結果

#### 3.2.1. デバイスの駆動確認

圧力をかけていない状態では薄膜は平坦な状態にあるが、チャンネル A と B に順番に空気圧を印加したところ、それぞれに対応したバルーンが膨張した (Fig. 3)。また、段階的に圧力を変化させた場合、バルーンの高さが徐々に増し、30 kPa までは可逆性のある範囲で薄膜が膨張する様子が確認された (Fig. 4)。以上より、本デバイスが空圧印加により設計通りの挙動を示すことが確認できた。

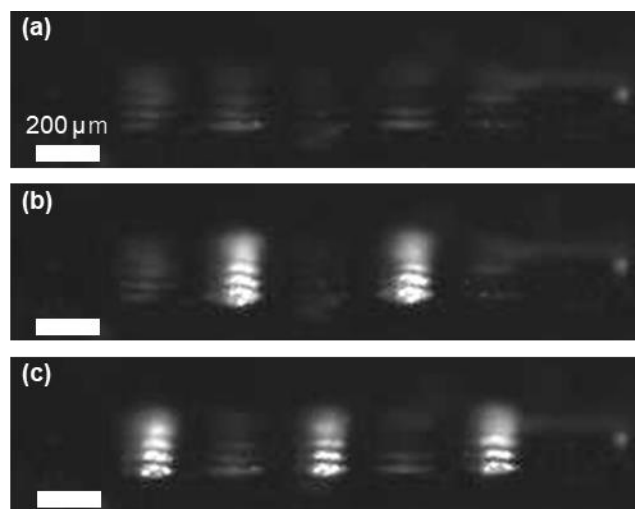


Fig. 3 Side views of the microballoons. (a) No pressure. When 30 kPa was applied to (b) channel A and (c) B.

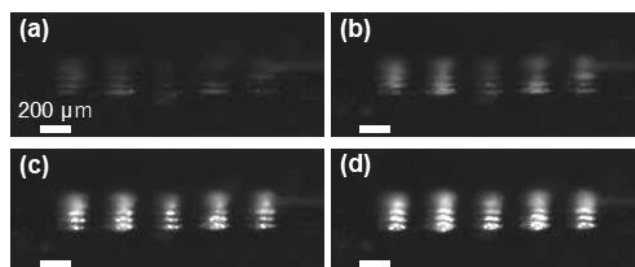


Fig. 4 Actuation of balloons at (a) 0kPa, (b) 10kPa, (c) 20kPa, and (d) 30kPa.

#### 3.2.2. 印加圧力とバルーン高さの関係

膜厚 5.5  $\mu\text{m}$  および 10  $\mu\text{m}$  のデバイスで測定したバルーン高さとの関係を示す。膜厚 5.5  $\mu\text{m}$  では、10 kPa では約 30  $\mu\text{m}$ 、30 kPa では約 50  $\mu\text{m}$  の高さのバルーンが形成され、膜厚 13  $\mu\text{m}$  では、10 kPa で約 20  $\mu\text{m}$ 、30 kPa では約 38  $\mu\text{m}$  の高さのバルーンが形成された (Fig. 5)。膜厚 5.5  $\mu\text{m}$  に対し、13  $\mu\text{m}$  のデバイスでは標準偏差が大きい理由として、薄膜形成時に使用するシリコーン溶液の粘度が高く、ウェハ上で膜厚が不均一であったためだと考えられる。

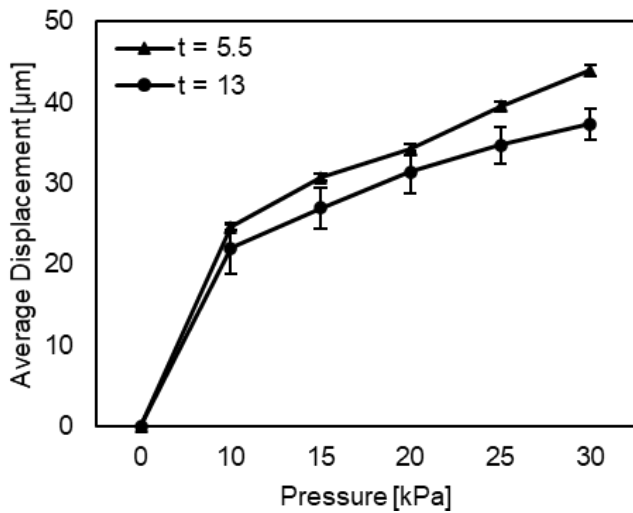


Fig. 5 Relationship between the applied pressure and balloon height.

次に、エラストマーのヤング率とポアソン比を引張実験により求め、式(1)からバルーン中央の変位を算出し、実測値と比較した。各条件下での理論値計算を行った結果、膜厚  $5.5 \mu\text{m}$  では高さ約  $31500 \mu\text{m}$ 、 $13 \mu\text{m}$  では約  $2400 \mu\text{m}$  となった。実測値と比較すると、膜厚  $5.5 \mu\text{m}$  では約 1000 倍、 $13 \mu\text{m}$  では約 100 倍の差が生じており、理論値との整合性は得られなかった。原因として、デバイスの作製過程の中で、深掘りエッチング時の高温によるシリコン膜の硬度変化や、劇薬でのレジスト洗浄時におけるシリコン膜への負荷が影響していることが考えられる。

### 3.2.3. 振動誘起流れ場の測定

エラストマー膜厚  $13 \mu\text{m}$  のデバイスを用い、3.1.2 項で述べた振動を与えた状態で、デバイス表面から約  $35 \mu\text{m}$  上方の流れ場を測定した。バルーンを駆動していない状態 (Fig. 6a) では流れが発生していないのに対し、 $10 \text{ kPa}$  ずつ段階的に圧力をかけていくことで流れの発生する範囲と最大流速がともに大きくなることが確認された (Fig. 6 b-d)。これは、バルーンが大きく膨張することで、周囲の流体に及ぼす影響が大きくなったためだと考えられる。

バルーンを中心から半径方向への速度分布を円周方向に平均化したグラフを Fig. 7 に示す。印加圧力の増加に伴い、流れの最大速度が上昇したことが定量的に確認できた。また、 $20 \text{ kPa}$  における流速のピークは中心から約  $70 \mu\text{m}$  の距離に位置するが、 $30 \text{ kPa}$  では約  $80 \mu\text{m}$  の位置にあることから、バルーンの高さによって流速ピーク位置が変化することがわかった。以上の結果より、空圧制御により流れ場をアクティブに制御可能であることが示された。

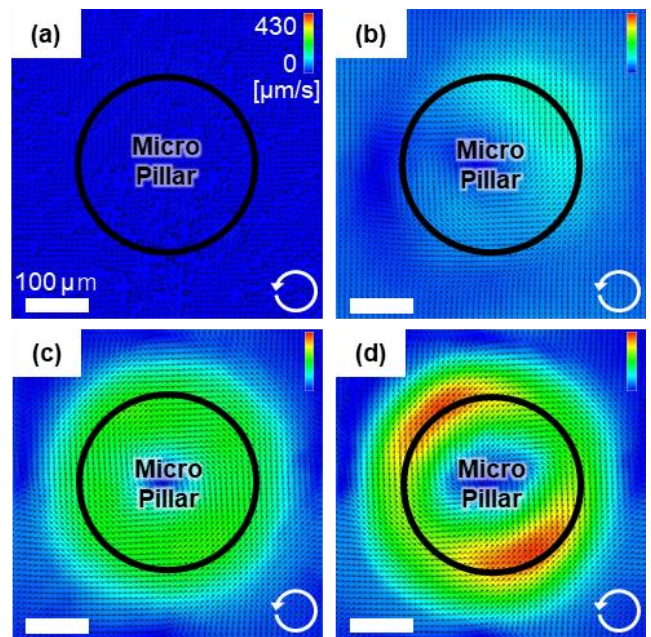


Fig. 6 Velocity field of VIF obtained from PIV. When (a) 0 kPa, (b) 10 kPa, (c) 20 kPa, and (d) 30 kPa was applied.

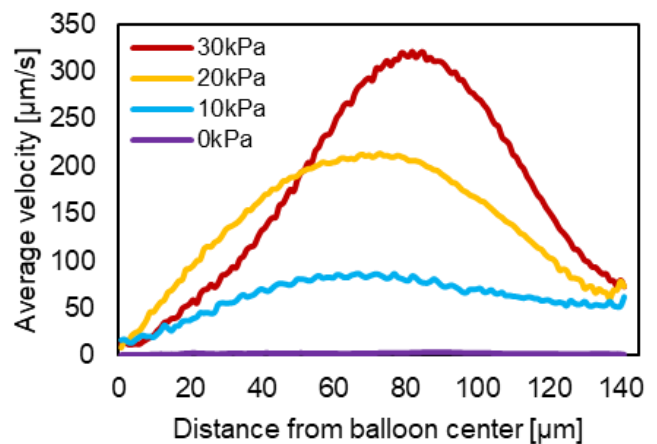


Fig. 7 Velocity distribution along the radial direction of the pillar with various applied pressure.

## 4. 流れ場のアクティブ制御による混合効率向上可能性の検討

### 4.1. 実験方法

3.1.3 項と同様の手順で、チャンネル A, B にそれぞれ  $30 \text{ kPa}$  を印加したときの流れの様子を、2 つのバルーンが収まる視野で、ハイスピードカメラを用いて  $100 \text{ fps}$  のフレームレートで撮影した。このとき、チャンネル A に圧力を印加すると右側のバルーンが膨張するように撮影範囲を調整した。

混合の可能性の検討は、チャンネル A と B を個別に駆動した際に得たそれぞれの流れ場を流線に変換し、それらを重ね合わせた画像からお互いの流れが与える影響を考察することで行った。流線画像は、画像処理ソフトを用いて撮影した動画の重ね合わせを行い、蛍光ビーズの一秒間の軌跡を可

視化することで作成した。このとき、チャンネル A と B の流線の差別化のため、チャンネル A の流線には赤、B の流線には白で色付けを行った。これら 2 種類の流線画像を一つの画像上に重ね合わせ、流線の交差が液体混合に与える影響を検討・考察した。

#### 4.2. 実験結果

チャンネル A に圧力を印加した場合の流れ場では、画像右側にのみ明確な旋回流が発生したことが確認された (Fig. 8a)。同様に、チャンネル B を駆動させたときは画像左側にのみ明確な旋回流が発生した (Fig. 8b)。以上より、チャンネル A, B に個別に圧力を印加することで、流れ場を動的に変化させることが可能なことが確認された。

2 枚の流線画像を重ね合わせた比較画像を Fig. 8c に示す。2 つのピラーの中央部の拡大画像を見ると、赤色と白色の流線が交わっている箇所があることがわかる。流線の交わりは、その個所に位置する流体が異なる流れ場の双方から、異なる方向への引き延ばしを受ける。そのため、流体の引き延ばしと折り畳みが繰り返されるパイコね変換が起こることが知られている<sup>7)</sup>。この、流体操作は、低レイノルズ数においてサンプルを混合するために有効な手段である。以上の結果から、本デバイスは流れ場をアクティブに変化させ、流線の交わりを任意で発生させることができるため、微小液体の混合をおこなうマイクロミキサとして高い性能を発揮できる可能性があることが示唆された。

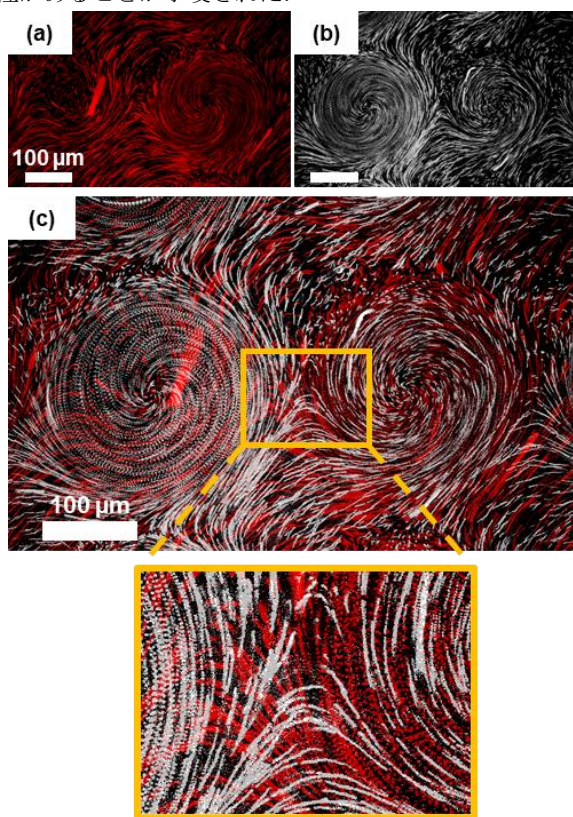


Fig. 8 Trajectories of tracer particles. When the (a) right balloon or (b) left balloon is actuated, respectively. (c) Superposition of two trajectories.

## 5. 結言

本報では、エラストマー薄膜に空気圧を加えることでマイクロスケールのバルーン構造を形成する機構の開発とその特性評価、およびバルーンアクチュエータによる振動誘起流れのアクティブ制御実験を行った。

バルーンアクチュエータの開発では、マイクロスケールの位置合わせの方法を工夫し、異なるチャンネルに対応したバルーン群の個別駆動に成功した。また、エラストマー薄膜が可逆的に駆動できる圧力範囲およびその変位を測定し、膜厚が 13  $\mu\text{m}$  のデバイスでは 0 ~ 30kPa の範囲で最大約 38 $\mu\text{m}$  の変位が得られることを示した。

本デバイスにより振動誘起流れを起こし、その流れ場を測定した結果、印加圧力の大きさに依存したバルーン高さの制御により、流れ場の最大速度、及びピークの位置を制御することが確認された。バルーンの個別駆動による流れ場の比較では、流線画像の重ね合わせにより、流線の交わりが観測できたことから、微小流体、及び低レイノルズ域での溶液混合に有効な流体の引き延ばし・折り畳みが行える可能性があることが示唆された。今回の実験では、デバイス上方に流れいく様子も観察されたが、デバイスを改良することで上方への拡散を防ぎ、より広範囲な流れ場を誘起することが可能であると考えている。

今後、本研究で確立した機構や知見を基に、より効率的かつ効果的な微小流体の制御、及び混合技術が促進されることが期待される。

## 6. 参考文献

- (1) Abraham D Stroock, George M. Whitesides, et al., Chaotic mixer for Microchannels, *Science*, **295**-5555 (2002) pp.647-651.
- (2) Mengxi Wu, Tony Jun Huang, et al., Isolation of exosomes from whole blood by integrating acoustics and microfluidics, *PNAS*, **114**-40 (2020) pp. 10584-10589.
- (3) Lu, Y., Zhang, M., Zhang, H. et al. On-chip acoustic mixer integration of electro-microfluidics towards in-situ and efficient mixing in droplets, *Microfluid. Nanofluid.*, **22**-146 (2018).
- (4) Takeshi Hayakawa, Fumihito Arai, et al., A single cell extraction chip using vibration-induced whirling flow and a thermo-responsive gel pattern., *Micromachines*, **5**-3 (2014) pp. 681-696.
- (5) Kanji Kaneko, Hiroaki Suzuki, et al., Numerical and Experimental Analyses of Three-Dimensional Unsteady Flow around a Micro-Pillar Subjected to Rotational Vibration, *Micromachines*, **9**-12 (2018).
- (6) Bobak Mosadegh, George Gupta, et al., Control of Soft Machines Using Actuators Operated by a Braille Display, *Lab Chip*, **14**-1 (2014) pp. 189-199.
- (7) Ottino, J. Mixing, Chaotic Advection, And Turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **22**-1 (1990) pp. 207-253.