

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560054

研究課題名(和文) 微小液滴マイクロリアクタのための音響流メカニズム解明

研究課題名(英文) Explanation of the mechanism of the acoustic streaming for droplet micro-reactor

研究代表者

近藤 淳 (Kondoh, Jun)

静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：10293606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000 円、(間接経費) 1,230,000 円

研究成果の概要(和文)：弾性表面波(SAW)伝搬面上の液滴中には、放射された縦波により音響流が発生する。SAWの振幅を大きくすると液滴は搬送される。本研究では、実験的に液滴内部の現象を明らかにし、有限要素法によりその現象を説明することである。高速カメラ観察により、液滴が搬送されない場合は縦波放射により発生する音響流を観測することができた。液滴搬送時には液滴の形状は大きく変わり、前方部が音響放射圧でSAW伝搬方向に変形する。一方、後方は変形しない。液滴搬送は、液滴前方部に引きずられて後方が移動することを明確にした。一方、解析では自由境界モデルの取り扱いに苦心しており、実験結果を説明するモデルの確立には至らなかった。

研究成果の概要(英文)：An acoustic streaming is occurred in a droplet on a surface acoustic wave (SAW) propagating surface. The aim of this research is to clarify phenomena in the droplet based on the observations and to explain those using finite element method. Using a high-speed camera, we succeeded to observe the acoustic streaming in a droplet. When the droplet is not manipulated, stable streaming was observed. When the droplet is manipulated, an acoustic pressure force acts to the tip of it and that is extended. However, SAW incident side of droplet is not deformed. When the acoustic pressure force is larger than binding force, incident side of the droplet is dragged and then the droplet is manipulated. Droplet surface is changed during droplet manipulation. To simulate of the droplet manipulation, we must consider free boundary model for the calculation. It is difficult to introduce the free boundary model into our calculation method. This is our future work.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：弾性表面波 音響流 液滴搬送 非線形音響 搬送メカニズム

1. 研究開始当初の背景

本研究では、微小液滴マイクロリアクタ実現に必要な不可欠な弾性表面波によって液滴内に生じる現象を解明することを目的とすることである。固体表面を伝搬する超音波である弾性表面波を用いると、微小液滴の搬送、複数の液滴の均一攪拌、温度制御などが可能である。この現象は液体中への縦波放射によって生じることはよく知られている。しかし、放射された縦波によりなぜ液滴が搬送できるのか明確な説明はまだない。また、液滴内に発生する流れに対する固液界面の接触状態や液滴表面の影響、流れの速度と弾性表面波の振幅の関係など未知な点が数多くある。これらを実験と数値解析の両面から解明し、微小液滴マイクロリアクタの礎とする。

2. 研究の目的

本研究では、微小液滴マイクロリアクタ実現に必要な不可欠な弾性表面波によって液滴内に生じる現象を解明することを目的とすることである。固体表面を伝搬する超音波である弾性表面波を用いると、微小液滴の搬送、複数の液滴の均一攪拌、温度制御などが可能である。この現象は液体中への縦波放射によって生じることはよく知られている。しかし、放射された縦波によりなぜ液滴が搬送できるのか明確な説明はまだない。また、液滴内に発生する流れに対する固液界面の接触状態や液滴表面の影響、流れの速度と弾性表面波の振幅の関係など未知な点が数多くある。これらを実験と数値解析の両面から解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、観察によりモデル化を行う。SAW上に水滴をのせ、水滴内で生じる音響流を観察し、現象を理解する。水滴が搬送されない場合と搬送される場合について比較を行う。また、液滴搬送時に液滴形状がどのように変化するかについて検討する。

4. 研究成果

(1) 静止した液体中の音響流

圧電結晶として128度回転Y板X伝搬LiNbO₃を用いてSAW素子を作成した。周波数は50MHzである。すだれ状電極(IDT)にバースト波を入力すると、圧電逆効果によりSAWが励振される。SAW伝搬面上に水滴をのせ、液滴内の音響流観察を行った。入力電力0.4WでSAWを励振させた。液滴中心をSAWの伝搬幅の中心に一致させたときの液滴中央の断面観察図を図1に示す。SAW励振直後は不安定な流れを示す。しかし、0.3~0.4秒で安定した音響流が観測された。このとき、液滴の形状は変形しない。

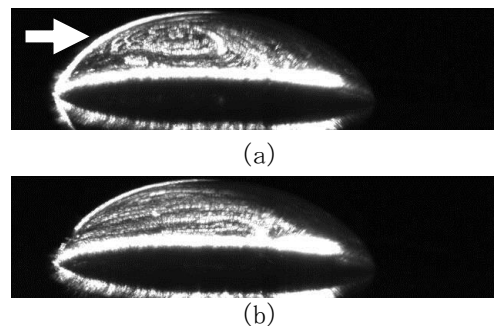


図1 入力電力0.4W時の液滴内の音響流観察結果。SAW入射後、(a) 0.05-0.1秒間、(b) 0.3-0.4秒間の音響流。(矢印はSAW伝搬方向)

(2) 搬送時の観察
搬送による液滴観察を、図1と同じ散乱体を用いた手法と岩絵の具を用いた手法の2通りで行った。散乱体を用いた測定結果を図2に示す。SAWにより液体中に縦波が放射されるとすぐに液滴の形状が変わる。このため、図1のような音響流の観察を行うことができなかった。そこで、岩絵の具を用いた観察を行った。結果を図3に示す。液滴搬送しない場合には2次流と呼ばれる音響流が観測されていた。^[1]しかし、液滴搬送時、図3(a)の静止状態から搬送されると、同図(b)に示すように可視化用の岩絵の具がすべて液滴前方に凝集された。液滴の一部がSAW伝搬路からずれた場合、その部分に粒子が凝集する現象は観察されている。しかし、液滴先端部に凝集するという現象はこれまで見いだされていない。

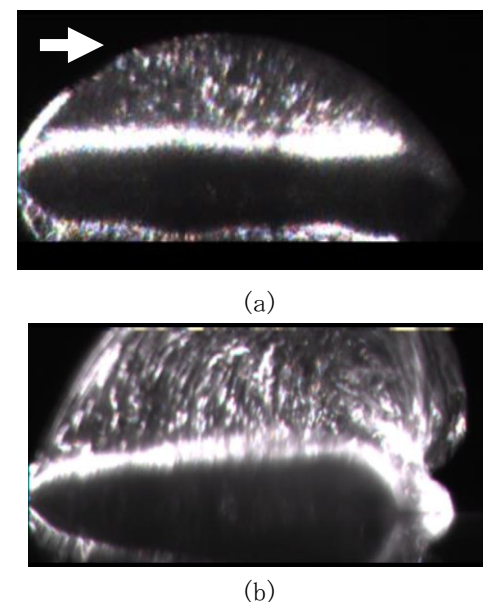
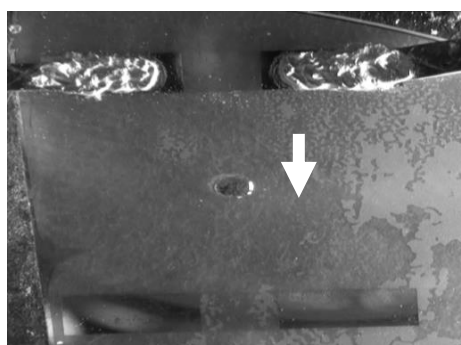


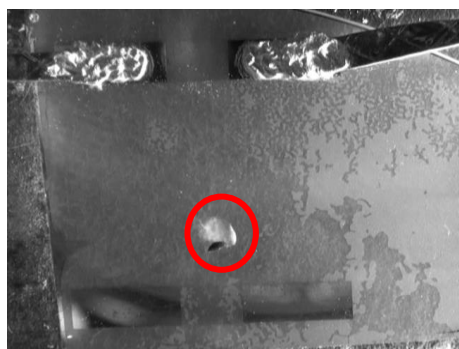
図2 液滴搬送時の観察結果。(a) SAW入射前、(b) SAW入射直後。(矢印はSAW伝搬方向)

図2の測定では液滴搬送時に撮影範囲の外に出た。そこで、広角で搬送時の液滴の振る舞いについて検討した。接触角が約90度の水滴に縦波が放射すると、接触角は減少する。また、液滴の先端部がSAW伝搬方向に伸びる。これは、音響流による力が液滴表面に働き、力>表面張力となるために生じる現象と考

えてよい. 一方, SAW 入射側の液滴部分 (液滴後方部) は移動しない. 例えば, 図 4 に示すように, 丸で囲んだ部分の液滴厚さは, 先端部が伸びる影響で小さくなる. しかし, 圧電結晶と接する部分には力が働かない. このため, この部分が液滴搬送時の拘束力となる. SAW 素子への入力電力を大きくすると, 前方へ液滴を搬送させる力が拘束力よりも大きくなり, 液滴前方に引き摺られるように液滴後方部も SAW 伝搬方向に移動する. これが液滴搬送のメカニズムである.



(a)



(b)

図 3 液滴搬送時の観察結果. (a) 搬送前, (b) 搬送後. (矢印は SAW 伝搬方向)

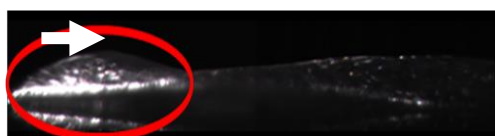


図 4 液滴搬送時の観察結果. (SAW 入射側)

液滴搬送時, 接触角は図 2 (a) の状態から図 4 の状態に変わる. このことを模式的に表したのが図 5 である. このとき生じている力, すなわちストリーミング力について検討する. ストリーミング力 F_s (N/m³) は次式で表される. [2]

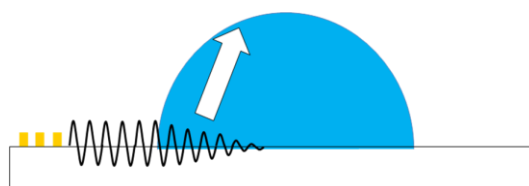
$$F_s = -\rho_0(1 + \alpha_1^2)^{3/2} k_1 \omega^2 A^2 \quad (1)$$

ここで, 水の場合, $\rho_0=1000$ (kg/m³), $\alpha_1=2.47$, $k=1370$ (m⁻¹) である. また, ω は角周波数, A は SAW の基板表面に垂直方向の振幅である. 一方, 液滴後方部に働く拘束力を付着力 F と考えると式 (2) で表される.

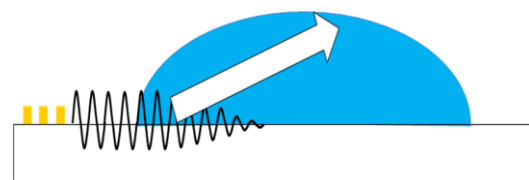
$$F = \frac{mg \sin \alpha}{2\pi r} \quad (2)$$

ここで, m は液滴の質量, g は重力加速度, α は滑落角, r は液滴半径である. 付着力は角度 α の斜面上の液滴が滑り落ちるときに力として考えることができる. 式 (2) より求めた付着力を表 1 に示す. この値と式 (1) を比較する. 式 (1) は単位体積当たりの力なため, SAW 伝搬幅と波長を式 (1) に掛けて単位長さ当たりの力に換算する. SAW の周波数を 50 MHz, 振幅を 1 nm, 波長を 80 μ m, 伝搬幅を 1.5 mm とすると, $F_s=0.115$ N/m となる. この力は表 1 の力よりも十分大きい. しかし, SAW の振幅が 1 nm では液滴搬送は生じない. 液滴サイズ, 表面の影響などを考慮して液滴搬送に必要な力を考える必要がある.

そこで, 解析によるメカニズムの理解を試みている. 解析を行う上でもっとも重要な点が液滴表面の変形の考慮の仕方である. 自由境界として考えるのが妥当と考えている. しかし, 自由境界を考慮したモデルの数式化がまだ終了していない. メカニズムを解明するためにもこの部分が最も重要であり, 今後の課題である.



(a)



(b)

図 5 液滴形状変化に伴うストリーミング力の働く方向の変化. (a) 搬送前. (b) 搬送途中.

表 1 水滴 2 μ L に対する滑落角と付着力の関係.

滑落角 (度)	付着力 (N/m)
30	1.56E-03
45	2.21E-03
60	2.70E-03
80	3.07E-03

参考文献

- [1] S. Ito, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 46, pp. 4718-4722 (2007).
[2] S. Shiokawa, et al., Proc. of Mat. Res. Soc. Symp., 360, pp. 53-64 (1995).

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)

- ① J. Kondoh, H. Toyozumi, T. Sugita, "Digital micro-fluidic system using surface acoustic wave device," AIP Conf. Proc., Vol. 1433, pp. 267-270 (2011). (査読有)
- ② J. Kondoh, H. Toyozumi, "Observation of acoustic streaming in water/sensor plate/thin water layer/128YX-LiNbO3 for realizing disposable digital microfluidic system," AIP Conf. Proc., Vol. 1474, pp. 359-362 (2012). (査読有)
- ③ 近藤淳, "弾性表面波による液滴搬送," 日本音響学会誌, Vol. 69, pp. 613-617 (2013). (査読無)
- ④ 近藤淳, "弾性波による液滴搬送を利用したバイオセンサ," 超音波 TECHNO, Vol. 26, pp. 59-64 (2014). (査読無)

[学会発表] (計 7 件)

- ① J. Kondoh, H. Toyozumi, "Observation of acoustic streaming in water/sensor plate/thin water layer/128YX-LiNbO3 for realizing disposable digital microfluidic system," International Symposium on Nonlinear Acoustics, p. 47 (2012).
- ② 近藤淳, 名和弘紀, 青木一矢, "弾性表面波による液滴搬送現象に関する考察," 非線形音響研究会, 12-2 (2012).
- ③ 名和弘紀, 深谷智彦, 近藤淳, "観察に基づく弾性表面波による液滴搬送現象の検討," 電子情報通信学会超音波研究会, US2012-69 (2012).
- ④ 近藤淳, 青木一矢, 深谷智彦, "SAW ストリーミング現象の検討," 非線形音響研究会, 13-1 (2013).
- ⑤ 深谷智彦, 近藤淳, "SAW ストリーミングによる液滴搬送の検討," 平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, G4-4 (2013).
- ⑥ 青木一矢, 近藤淳, "弾性表面波を用いたデジタル式マイクロ流体システム," 平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, G4-5 (2013).
- ⑦ 深谷智彦, 近藤淳, "弾性表面波を用いた液滴搬送の検討," 日本音響学会平成 26 年春期研究発表会, 3-P4-24, (2014).

[その他]

ホームページ等
<http://www.sys.eng.shizuoka.ac.jp/~j-kondoh>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤淳 (Kondoh, Jun)
静岡大学・創造科学技術大学院・教授
研究者番号：10293606

(2) 研究分担者

横嶋哲 (Yokoshima, Satoshi)
静岡大学・工学研究科・助教
研究者番号：80432194