

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 6日現在

機関番号：84510

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21510131

研究課題名（和文） 集積化化学システムのための多機能型弾性表面波アクチュエーターの提案

研究課題名（英文） Proposal of multifunctional actuator operated by surface acoustic wave for micro total analysis system

研究代表者

才木 常正 (TSUNEMASA SAIKI)

兵庫県立工業技術センター・環境・バイオ部・主任研究員

研究者番号：80470227

研究成果の概要（和文）：

近年、試薬が少なく処理時間が短い等の利点より集積化化学システム( $\mu$ TAS)が注目され、構造が簡単な弾性表面波(SAW)アクチュエーターの研究がされている。そこで、我々は連続流体用の SAW アクチュエーターを最適化するため、楕歯電極(IDT)形状と流体駆動の関係を実験により調べた。その結果、液体の粘度によって最適な IDT ピッチが異なることが明らかになった。次に、高効率 SAW アクチュエーターの設計支援のため、粒子法を用いた数値解析により SAW による連続流体駆動の物理メカニズムを調べた。この結果、SAW による流体駆動は流体の粘性および波打った基板面と流体の相互作用に影響され、SAW の持つエネルギーによって生じていることが証明された。最後に、これら実験と解析結果を基にして、高効率の 2 液混合化学反応チップを設計し製作した。そして、このチップを用いることにより、局所的で迅速な化学反応が行われていることが確認できた。

研究成果の概要（英文）：

Recently, micro total analysis systems ( $\mu$ TAS) have received a lot of attention for its efficiency in producing reactions and in reducing the used amount of reagents. In the area of  $\mu$ TAS, surface acoustic wave (SAW) actuators, because of their very simple structures, have studied. The SAW is generated from an interdigital transducer (IDT). We thus investigated the relationship between IDT's shapes and liquid flows, in order to optimize the SAW actuators. It was found that optimized IDT's pitch depends on viscosity of liquid. Then, in order to support design of the SAW actuators, we investigated the physical mechanism of the liquid flow by using numerical analysis of the moving particle semi-implicit method. It was proven that the liquid flow is caused by the energy of the SAW and is affected by the viscosity of the liquid and interaction between the liquid and a waved plate of a substance. Finally, on the knowledge obtained by the experiment and the analysis, a microchip for mixing and reacting 2 solutions was designed and fabricated. The local and rapid mixing of continuous liquid flow was found to be possible by using the chip.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：マイクロ・ナノデバイス

科研費の分科・細目：マイクロ化学システム

キーワード：弾性表面波、流体、アクチュエーター、MEMS、数値計算、 $\mu$ TAS

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 弾性体の表面に沿って伝わる波(弾性表面波：SAW)を利用したデバイスとして、携帯電話等に使う帯域通過フィルター等が実用化されていた。しかし、SAWを利用したアクチュエーターやセンサについては研究開発段階であった。

(2) 一方、試薬が少なく処理時間が短い等の利点より集積化化学システムが注目され、それ用のアクチュエーターとして構造が簡単で半導体プロセスを用いた集積化が可能であることから、流体駆動用の SAW アクチュエーターの研究が行われていた。主に、日本では静岡大学の塩川らのグループ、海外ではドイツの University of Augsburg の Wixforth らが液滴の輸送およびその噴霧化に関する研究を行っていた。更に、Wixforth らにおいては、SAW を用いた流体駆動デバイスの多機能化を考え、混合器の研究開発も行っていた。

(3) そこで、我々は、送液の操作性及び制御性を向上させるため、液滴ではなく連続流体を対象とした新規 SAW ポンプを提案し、SAW による連続流体の駆動に初めて成功していた。その当時の連続流体の単位時間当たりの輸送量は約  $5\mu\text{L/s}$  程度であった。更に、連続流体用の高速混合器を想定し、SAW ポンプを改良して微小液体ローターを製作し、 $5\mu\text{L}$  の液を約  $2,000\text{rpm}$  の高速で回転させることにも成功していた。

### 2. 研究の目的

(1) 連続流体駆動用の SAW アクチュエーターの最適化については報告されていない。そこで、SAW を発生させる櫛歯電極(IDT)の形状と流体駆動との関係を実験により調べる。

(2) 高効率 SAW アクチュエーターの設計支援のため、粘性流体モデルにより SAW による連続流体駆動の物理メカニズムを数値解析により明らかにする。

(3) 上記の実験と解析の結果を基に、高効率の2液混合化学反応チップを設計し、製作する。そして、実験によりチップの性能を測定し、本設計手法の有用性を確認する。

### 3. 研究の方法

#### (1) IDT 形状と流体駆動

連続流体駆動用の SAW アクチュエーターを最適化するために、IDT のピッチが異なる SAW アクチュエーターと流路を  $\text{LiNbO}_3$  ( $128^\circ$  回転 Y 板 X 伝搬) 基板の上に4つ作成した(図1参照)。ここで、これら IDT のピッチ  $p$  は  $100, 200, 300, 400\mu\text{m}$  である。一方、これら IDT の対数  $n$  と開口  $a$  については全

て同じであり、 $20$  と  $1\text{mm}$  である。また、流路幅は  $1\text{mm}$  であり、その深さは  $250\mu\text{m}$  である。ちなみに、IDT と流路の材料はそれぞれ Al と SU-8(エポキシ系のネガ型フォトリソグリス)である。実験では、IDT に高周波数電圧を印加して SAW を発生せ、流路中の連続流体(純水)を駆動させる。このときの流体駆動の様子を連続流体中のトレーサー(Al 粉)を用いてハイビジョンカメラによって観測した。そして、このトレーサーの推移から流速を計算し、投入電力との関係を IDT ピッチ毎に調べた。

更に、この流速は連続流体の粘度に影響すると考えられるため、粘度と最適な IDT 形状の関係について調べた。ここでは、純水とグリセリンの割合を変えることにより、 $0.91, 3.17, 22.5 \text{ mPa}\cdot\text{S}$  の粘度が異なる3つ溶液を用意した。そして、これらの粘度毎に IDT ピッチ  $p$  と輸送効率  $E$ (流速を投入電力で割った値)の関係性を求めた。

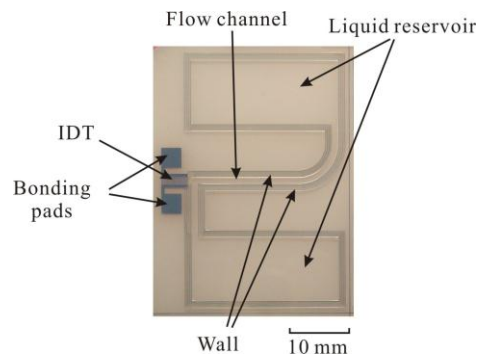


図1 圧電基板上に作製した SAW アクチュエーターと流路の例 (IDT ピッチ： $200\mu\text{m}$ )

#### (2) 粘性流体モデルによる数値解析

IDT から発生する SAW と流体が相互作用すると、流体が振動、流動、飛散する現象が起こることが実験により確認されている。ここでは、飛散現象が存在することから、計算する空間領域を限定しなければならない有限要素法ではなく、粒子法(Moving particle semi-implicit method)を用いることにした。そして、これら3つの SAW による流体駆動現象の物理メカニズムを解明するため、Lennard-Jones potential (LJP)を用いた粘性流体モデルによる数値計算を行う。

具体的には、IDT より発生する SAW の影響による項を、LJP に追加することで、SAW を含めた粘性流体ダイナミクスの解析を行う。SAW の振幅を  $B$ (縦波成分)、 $C$ (横波成分)、波長を  $\lambda_1$ (縦波成分)、 $\lambda_2$ (横波成分)、 $\alpha, \beta$  は位相ずれ、 $t$  は時間、 $\omega$  は角振動数、 $A$  は LJP の係数、 $r_{ij}$  は2体の粒子間距離とすると粒子

に作用するポテンシャル  $\phi_{ij}$  は、下の式で書くことができる。

$$\phi_{ij} = A(2/r_{ij}^{12} - 1/r_{ij}^6) + B \sin(\omega t + x/\lambda_1 t + a) + C \cos(\omega t + x/\lambda_2 + b)$$

実際の計算では、粒子数を 160 とし、1 ステップを 0.0005 秒として速度ベレ法による 20,000 ステップを上記の式第 2 及び 3 項の SAW パラメータを変化させながら逐次行った。

### (3) 高効率の 2 液混合化学反応チップの開発

上記の実験データと連成解析結果を基に、駆動源を SAW のみとする連続流体用の 2 液混合化学反応チップを作製した(図 2 参照)。このチップは SAW で駆動する 2 つのポンプと 1 つの混合器、および Y 型流路で構成される。2 つの SAW ポンプは合流前の流路にそれぞれ配置し、SAW 混合器は合流後の流路に配置している。ちなみに、これら SAW アクチュエーターの IDT は LiNbO<sub>3</sub> 基板の上に Al のパターンニングで作成し、流路壁はネガ型圧膜レジスト SU-8 により製作した。IDT の形状はポンプ、混合器ともにピッチ 200 $\mu$ m、対数 20、開口幅 500 $\mu$ m である。また、流路幅は合流前では 500 $\mu$ m であり、合流後は 1mm である。そして、SAW 混合器の混合部は、我々の先行研究の微小液体ローターの開発から得られた知識により、流路幅より少し大きな直径 1.5mm の円形とした。

そして、この混合化学反応チップを用いて、ルミノール反応による化学実験を行った。具体的には、2 つの流路に、10%の NaOH 15 $\mu$ L にルミノール試薬 0.075mg を混ぜた溶液と、7.5%の H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 15 $\mu$ L にフェリシアン化カリウム 0.45mg を混ぜた溶液を流し、混合器で化学反応させ、その時の様子を高感度カメラで撮影した。

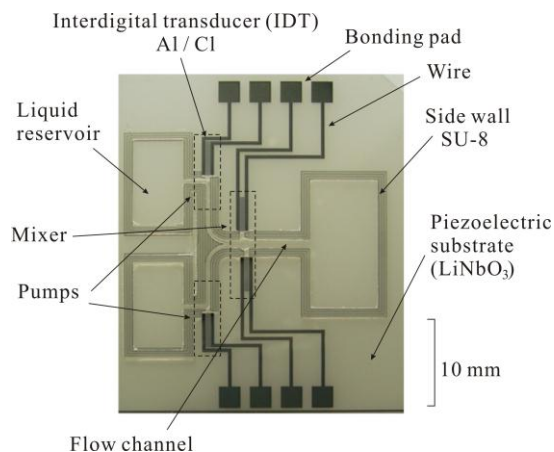


図 2 作製した駆動源を SAW のみとする連続流体用の 2 液混合化学反応チップ

## 4. 研究成果

### (1) IDT 形状と流体駆動

連続流体駆動での IDT への投入電力  $P$  と送液速度  $S$  との関係を図 3 に示す。この図を見ると、SAW アクチュエーターによる送液では供給電力と速度が比例していることがわかり、投入電力により送液速度が制御できることが明らかになった。更に、純水においては、200 $\mu$ m ピッチの IDT が最も効率的に送液ができることも明らかになった。

次に、粘度毎の送液効率  $E$  と IDT ピッチ  $p$  との関係を図 4 に示す。この図を見ると、粘度が 0.91mPa $\cdot$ S の溶液ではピッチが 200 $\mu$ m の IDT において、粘度が 22.5mPa $\cdot$ S の溶液ではピッチが 300 $\mu$ m の IDT において、送液効率が一番高くなっていることがわかる。この結果は、粘度が高くなると、それに伴い最適な IDT ピッチが大きい方にシフトすることを示している。このことから、連続流体の粘度によっても、最適な IDT ピッチが異なることが明らかになった。

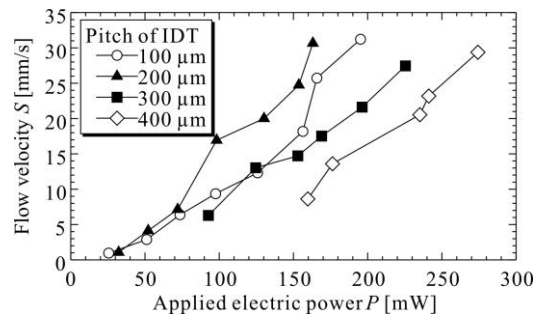


図 3 IDT への投入電力と送液速度の関係

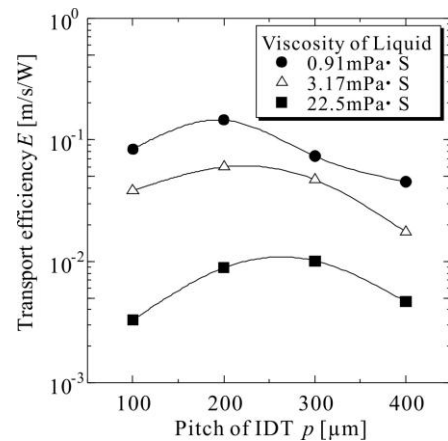


図 4 各粘度における送液効率と IDT ピッチとの関係

### (2) 粘性流体モデルによる数値解析

LJP を用いた粘性流体モデルによる数値計算を行った結果、実験と同じく、3 つの SAW による流体駆動現象のモードが得られた(図 5 参照)。ここでは、計算機の処理性能を考慮し、連続流体ではなく液滴を対象に、更には 3 次元ではなく 2 次元の数値計算を行

っている。その結果、流体の粘性が並進方向のポテンシャルを上回るときは、流体は流動せず振動のみのモードになることがわかった。また、並進方向のポテンシャルが上回った場合は流動現象がみられることもわかった。更に、SAWによるエネルギーが粒子間相互作用ポテンシャルを超える場合は、飛散現象が見られることもわかった。以上のことより、3つの駆動モードは流体の粘性、SAWの持つエネルギー、流体と壁面の相互作用に起因した現象であることが証明され、本粘性流体モデルにより物理メカニズムが解明された。

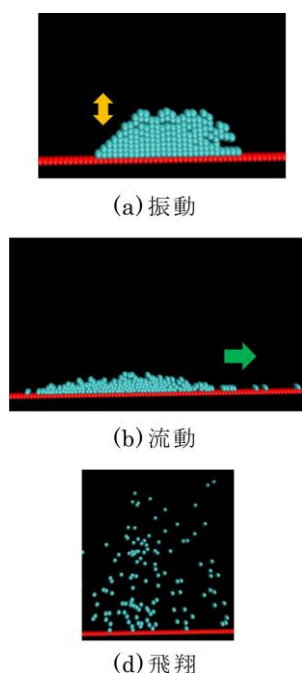
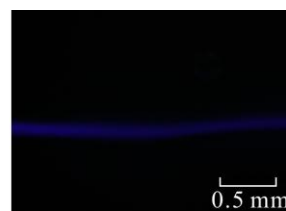


図5 数値計算で確認されたSAWによる3つの流体駆動モード

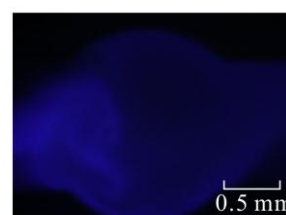
(3) 高効率の2液混合化学反応チップの開発  
高感度カメラで撮影したSAW混合器の混合部のルミノール発光の写真を図6に示す。図(a)はSAW混合器の無稼働時の写真であり、図(b)はSAW混合器の稼働時(SAW混合器の投入電力 $P_m=250\text{mW}$ )の写真である。図(a)を見ると、混合器の無稼働時には、流路中央部に線状の発光しか観測できなかった。このことは、2つの溶液の界面のみでしか反応が起こっておらず、これらの溶液が混ざっていないことを示している。一方、図(b)を見ると、混合器の稼働時には、流路全体にわたり発光が観測できる。これは流路全体にわたり反応が起こっていることを示しており、混合部を通過するまでには2種類の溶液が混ざり合って反応していると推測できる。

SAWポンプによる合流前の流路での送液速度は約 $5\text{mm/sec}$ であることから、SAW混合器の混合部でも同様の速度で溶液が通過

していると想定すると、数百 msec 以下で化学反応が起こっていると推測できる。これらのことから、SAWを用いることで連続流体の局部的で迅速な化学反応が行われ、本混合チップのリアクターとしての有用性が明らかになった。



(a) 無稼働時 ( $P_m=0\text{ mW}$ )



(b) 稼働時 ( $P_m=250\text{ mW}$ )

図6 高感度カメラで撮影したSAW混合器の混合部のルミノール発光の写真

## 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5件)

- ① Tsunemasa Saiki, Katsuhide Okada, Yuichi Utsumi, Micro Liquid Rotor Operated by Surface-acoustic-wave, Micro System Technology, 16, 1589-1594, 2010, 査読有
- ② 才木常正, 岡田勝英, 内海裕一, 弾性表面波を用いた高効率連続流体駆動アクチュエータ, 電気学会論文誌 C, 130, 1717-1722, 2010, 査読有
- ③ Akihiko Yamagishi, Shin-ichi Yokobori, Yoshitaka Yoshimura, Masamichi Yamashita, Hirofumi Hashimoto, Takahashi Kubota, Hajime Yano, Junichi Haruyama, Makoto Tabata, Kensei Kobayashi, Hajime Honda, Yuichi Utsumi, Tsunemasa Saiki, Takashi Itoh, Atsuo Miyakawa, Kenji Hamase, Takeshi Naganuma, Hajime Mita, Kenichi Tonokura, Sho Sasaki, Hideaki Miyamoto, Japan Astrobiology Mars Project (JAMP): Search for microbes on the Mars surface with special interest in methane-oxidizing bacteria, Biological Sciences in Space, 24, 67-82, 2010, 査読有
- ④ 才木常正, 内海裕一, 弾性表面波駆動の流体アクチュエータを用いた高効率混合チッ



プ、電気学会論文誌 C、132、1、70-76、2012、査読有

⑤ 静弘生、奥田孝一、布引雅之、李偉、稲岡孝信、才木常正、内海裕一、ニオブ酸リチウムの延性モード切削に関する研究、砥粒加工学会誌、56、118-123、2012、査読有

〔学会発表〕(計 14 件)

① Tsunemasa Saiki、Katsuhide Okada、Yuichi Utsumi、Micro Liquid Rotor Operated by Surface Acoustic Wave、8th International Workshop on High-Aspect-Ratio Micro-Structure Technology、2009 年 6 月 25 日、Delta Bessborough Hotel、Saskatoon、Canada

② Tsunemasa Saiki、Katsuhide Okada、Yuichi Utsumi、High Efficiency Mixing and Pumping of Continuous Liquid Flow using Surface-Acoustic-Wave、13th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences、2009 年 11 月 1 日、International Convention Center、Jeju、Korea

③ Tsunemasa Saiki、Katsuhide Okada、Yuichi Utsumi、High Efficiency Micro Reactor Operated by Surface-Acoustic-Wave、22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference、2009 年 11 月 16 日、シェラトンホテル札幌

④ Tsunemasa Saiki、Takeshi Komoto、Yuichi Utsumi、Highly Efficient Liquid Flow Actuator Operated by Surface Acoustic Waves、19th Academic Symposium of MRS-Japan、2009 年 12 月 7 日、横浜情報文化センター

⑤ 甲本武士、才木常正、岡田勝英、内海裕一、表面弾性波による連続流体駆動と高効率攪拌を同時実現したマイクロ化学リアクターの提案、第 24 回 エレクトロニクス実装学会講演大会、2010 年 3 月 10 日、芝浦工業大学豊洲キャンパス

⑥ 甲本武士、才木常正、内海裕一、弾性表面波による超小型高効率反応器に関する研究、第 21 回化学とマイクロ・ナノシステム研究会、2010 年 6 月 10 日、東京大学本郷キャンパス小柴ホール

⑦ Takeshi Komoto、Tsunemasa Saiki、Yuichi Utsumi、Application of Surface Acoustic Wave Actuator to Lab-on-a-chip、The 1st Japan-china-Korea Joint Seminar on MEMS/NEMS for Green & Life Innovation、2010 年 8 月 30 日、札幌コンベンションセンター

⑧ 倉本圭、才木常正、小橋昌司、畑豊、内海裕一、SAW デバイスによる液体輸送現象の理論的検討、第 27 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2010 年

10 月 14 日、島根県立産業交流会館

⑨ 山岸明彦、吉村義隆、山下雅道、橋本博文、久保田孝、矢野創、春山純一、田端誠、小林憲正、本多元、内海裕一、才木常正、伊藤隆、宮川厚夫、浜瀬健司、長沼毅、三田肇、戸野倉賢一、佐々木晶、Japan Astrobiology Mars Project (JAMP):火星表面におけるメタン酸化菌探査、日本惑星科学会 2010 年秋季講演会、2010 年 10 月 6 日、名古屋大学

⑩ 畔田吏、甲本武士、才木常正、内海裕一、弾性表面波による超小型高効率反応器に関する研究、2011 年度精密工学会春季大会学術講演会、2011 年 3 月 14 日、東洋大学白山キャンパス

⑪ 富田光、甲本武士、才木常正、荒木望、内海裕一、石垣博之、弾性表面波アクチュエータを用いた粉体輸送に関する研究、平成 23 年電気学会全国大会、2011 年 3 月 16 日、大阪大学豊中キャンパス

⑫ Hikaru Tomita、Tsunemasa Saiki、Nozomu Araki、Hiroyuki Ishigaki、Yuichi Utsumi、Study on Powder Transport Using Surface Acoustic Wave Actuator、9th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology、2011 年 6 月 12 日、Ambassador hotel、HsinChu、Taiwan

⑬ Tsunemasa Saiki、Tsukasa Azeta、Kei Kuramoto、Yuichi Utsumi、High Efficiency Microfluidic Reactor Chip Operated Only Using Surface Acoustic Wave、9th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology、2011 年 6 月 12 日、Ambassador hotel、HsinChu、Taiwan

⑭ Tsunemasa Saiki、Hikaru Tomita、Hiroo Shizuka、Koichi Okuda、Kazusuke Maenaka、Yuichi Utsumi、Reflected Surface Acoustic Wave Actuator Using Micro Groove、37th International Conference on Micro and Nano Engineering、2011 年 9 月 19 日、bcc Berliner Congress Center、Berlin、Germany

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

才木 常正 (SAIKI TSUNEMASA)

兵庫県立工業技術センター環境・バイオ部

主任研究員

研究者番号：80470227

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

内海 裕一 (UTSUMI YUICHI)

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 教授

研究者番号：80326298

倉本 圭 (KURAMOTO KEI)

兵庫県立大学工学部大学院研究科 准教授

シミュレーション解析に関する情報交換

研究者番号：70524627