

SAWストリーミングについて

—SAWによる液体流動・飛翔・霧化・発熱—

塩川 祥子[†] 近藤 淳[‡]

SAW Streaming

—Liquid streaming, jetting, atomizing and heating—

Showko SHIOKAWA[†] Jun KONDOH[‡]

あらまし 20年前に我々は、Rayleighタイプの弾性表面波(R-SAW)伝搬面上に水を負荷すると水が流動、飛翔、霧化することを見出した。これをSAWストリーミングと呼び、この現象の実験的・理論的解明および応用について研究を行ってきた。また、SAWストリーミングを用いて液滴振動、非線型振動及び局所発熱効果などの研究も行ってきた。本稿では、SAWストリーミング研究開始から20年を経過したので、一つの区切りと考えこれまでの研究をまとめた。

Abstract Twenty years ago, we observed various liquid motions such as streaming, droplet formation and atomization on the surface of SAW propagation substrate. We call the phenomena SAW streaming and study experimentally and theoretically. Nonlinear behavior in a water droplet vibration and heating induced by the SAW streaming is also investigated. In this paper, we summarize the SAW streaming investigation.

Keyword leaky surface acoustic wave, SAW streaming, droplet formation, atomization, nonlinear vibration, heating

1. はじめに

(1) 1988年から20年を経て

レーリー弾性表面波(Rayleigh SAW; Surface Acoustic Waves)は、伝搬面上に液体があると漏洩SAWとなり、数波長でSAWのエネルギーは液体中に放射される。128度回転Y板X伝搬LiNbO₃基板50MHzでは、約0.8mm(10λ)伝搬するとSAWエネルギーは液体中に80%漏洩する¹⁾。この局所的なエネルギー放出は、液体に何か変化を生じさせるのではないかと予想し顕微鏡を覗きながら実験を行った。すると液体は、①気泡と共に溶液がぐるぐる回転し、②流動し、③飛翔し、あるいは④霧化した。この現象を観察したのは、今から20年前の1988年である^{2,3)}。これをSAWストリーミングとよび、現象の解明と応用の研究を開始した⁴⁻¹⁰⁾。その後この現象を用いた液滴の非線形振動¹¹⁻¹⁹⁾や局所的な発熱²⁰⁾の研究へと発展させた。今回20年を区切りに、これまでの研究結果や課題などを纏めてみた。

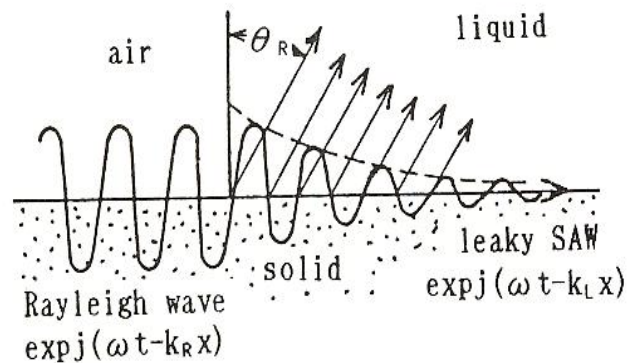


図1 漏洩SAWによる水中への放射

(2) SAWストリーミングの由来

レーリー波が漏洩SAWとなり液体中への縦波放射(放射角:レーリー角θ_R)はよく知られた物理現象²¹⁾である。(図1)しかし、エネルギーの伝搬を示しても液体の移動は生じない。波動の屈折現象だからである。液体流動が生じるには液体を動かす力(体積力)が存在する。それは何か?超音波縦波による液体流動はAcoustic Streamingとして良く知られ、エネ

ルギーの伝搬に伴う損失が液体に体積力を生じ進行方向に流動する²²⁾。そこで SAW の放射に伴う流動は、SAW の漏洩によるエネルギー損失が原因と考えた。基板境界で発生すると推定し SAW ストリーミングと呼んだ⁴⁾。

(3) SAW ストリーミングの特徴

縦波超音波における液体の流動、攪拌、霧化、キャビテーションなどの現象は古くから研究され様々な応用機器も開発されている。SAW も超音波なので同じ現象が生じるが、大きな特徴がある。それは、SAW が高周波のため、局所的な現象となることである。そのため液体の量・種類や圧電基板の表面状態・構成に大きく依存する。また、SAW 入力電圧・周波数依存性も大きい。これらはさまざまな非線形現象を伴っている。

2 節では、SAW ストリーミング現象の特徴と実験結果を示す。3 節で SAW ストリーミング力の検討、4 節で非線形振動と発熱現象、5 節で今後の展望・課題を示す。

2. SAW ストリーミング現象

(1) 特性に影響を与える要素

高周波レーラー SAW の液体中縦波放射は、局所現象であり次の要素が大きく影響する。

①液量：微量と中間・無限大量、②液体種類；水、有機溶媒、油、高粘性 ③SAW 基板および構成：異方性、基板面内等方性、層状構成、親水性、疎水性などの基板表面状態 ④入力電圧・周波数および変調周波数依存性。

例えば、微小水量、基板表面疎水性の場合、入力電圧により、流動・飛翔・霧化²³⁻²⁵⁾が生じる。図 2 は、128 度回転 Y 板 X 伝搬 LiNbO₃ 基板、周波数 50MHz 基板表面疎水性で液滴約 10 μ l、入力 2.5 Vp-p、パルス変調 (1Hz) での飛翔の様子である。一方、基板表面が親水性の場合、流動しながら液膜を形成し複雑な波動となる。図 3 は、図 2 の実験と同じ基板、SAW 励振電圧・周波数で連続駆動、液滴はやや多く約 20 μ l 基板表面を親水性 (Al 蒸着膜) とし、さらに微量の中性洗剤を用いて水の表面張力を小さくしたときの液膜形成と干涉縞を示す。液膜は SAW 進行方向にゆっくり移動する。次に表面を撥水性とし一部金膜上親水性とした。図 4 のように金膜上まで液滴は移動し、SAW 入射付近で液膜に加え飛翔液滴粒子が発生している。粒子は反力により形成されたものであろう⁸⁾。この 3 例から推測されるように、SAW ストリーミング現象による液滴駆動にはさまざまな要因が関連している。その中でも基本的な液量と基板状態について以下に示す。

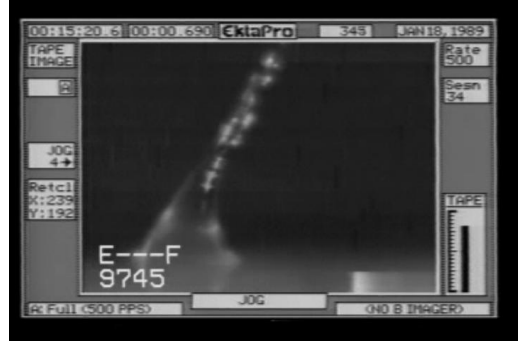


図 2 微小液滴の飛翔実験。

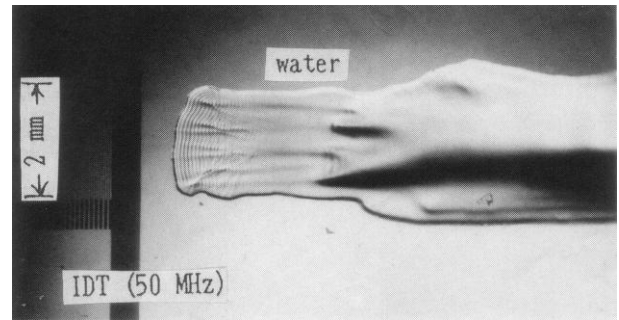


図 3 親水性基板上流動実験。

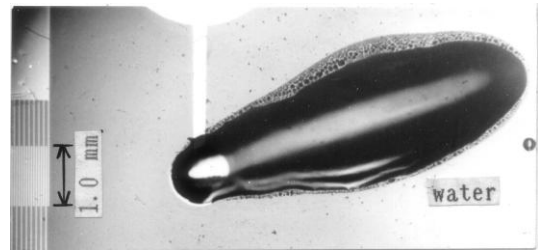


図 4 撥水性基板上の一部親水性金膜上の振る舞い。

(2) 液量

①微量

SAW のエネルギーが効率よく微小体積中に移動するため、きわめてダイナミックな液体挙動が観察されることは、図 2、3、4 でその一端を示した。図 5 のように液滴を基板上に配置し両側 IDT (Interdigital Transducer) 励振すると、微小液滴振動が誘起される。球状液滴の固有振動や高調波、1/2、1/3 振動などの非線形振動を観測できる。また、図 6 のように微小量液上の鋼球も SAW 入力制御により搬送される²⁶⁻²⁸⁾。

②無限量

液中に挿入した SAW 基板がそれに対応する(図 7)。

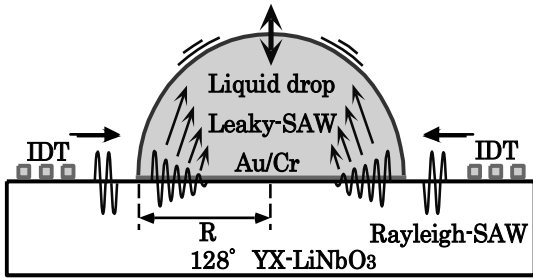


図5 両側励振による微小液滴の振動。

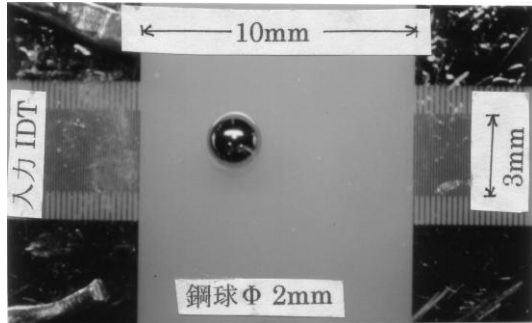


図6 微小液滴上鋼球の搬送。

基板の入射角 θ_i により放射の様子が異なる。図7 (b) は水面に平行、(c) は水面で全反射、(d) は $\theta_i = \pi/4 + \theta_R/2$ のとき基板に平行な波が発生する様子を示す。

図8に、直角入射であっても、SAW ストリーミングの反力により液体が上昇し親水性のような接触角となることを示した。このように、1) 基板/水/空気の境界領域で放射力とその反力が生じる。基板が親水性・疎水性で液面形状が異なり放射角・放射力・反力で複雑な現象を生じる。2) 液体中に縦波放射されたあと Acoustic Streaming が生じる、この二つの現象が同時に連続的に生じる。

溶液中での実験として、生体試料のマニピュレーション実験が報告されている。^{29~31)}

(3) 基板表面の親水性・疎水性及び放射角

接触角 90° で基板の親水性と疎水性を区分する。放射角 θ_R (レーリー角ともいう) は、SAW 伝搬速度 V_R と溶液の縦波音速比 ($\sin^{-1} V_W / V_R$) で示される。水の θ_R は 23° である。接触角が 67° 以上ならレーリー角方向に放射される。親水性が強くと 67° 以下になると図7に示したように基板に平行な波や液面反射波が発生する³²⁾。

基板が疎水性であっても、入力が大きくなると反力のため水が上方に押し上げられ、接触角が小さくなる。これにより親水性のように振る舞い、微小液滴や霧化が発生する。

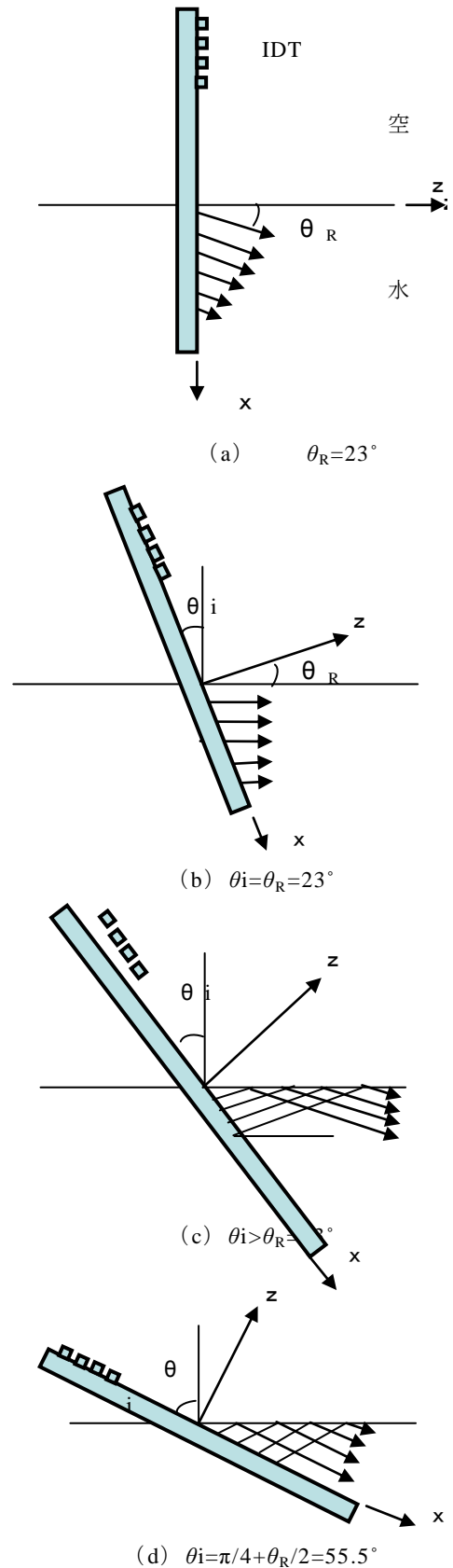


図7 基板の水中入射角 θ_i と放射の様子。

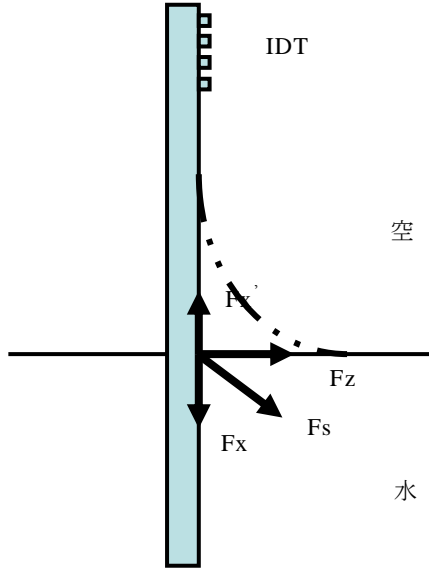


図 8 SAW ストリーミングによる液面上昇。

3. SAW ストリーミング力の検討

Acoustic Streaming の解析で用いられる、Navier-Stokes と連続の式を漏洩 SAW に適用した^{4,6)}。対流項といわれる $\rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ は、時間平均しても零にならない。速度 \mathbf{v} に空間的な勾配が存在するとストリーミングが発生する。この項に漏洩 SAW の変位分布を代入し、力を算出した結果が表 1 である。Acoustic Streaming や重力に比してかなり大きい。放射圧を調べた実験値とオーダーが一致した⁴⁾。対流項は非線形である。

4. 非線形現象

①液滴振動とダイナミクス¹¹⁻¹⁹⁾

図 5 に示す両側 IDT 励振により液滴振動を再現性良く得られる。液滴は固有の振動数を持つが、SAW のエネルギーが大きくなると、高調波やサブハーモニックの非線形振動が励起される。図 9 にその一例を示す。再現性が良好で非線形振動の研究に適した系である。

②液滴の加熱²⁰⁾

SAW 入力を増大すると液滴は霧化する。そのとき水の液温は約 70℃であった。SAW のエネルギーの一部

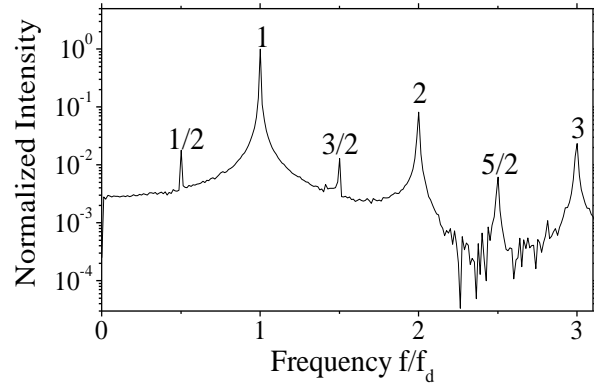


図 9 液滴の非線形振動。入力電圧 6V_{P-P}, f_d=78Hz。

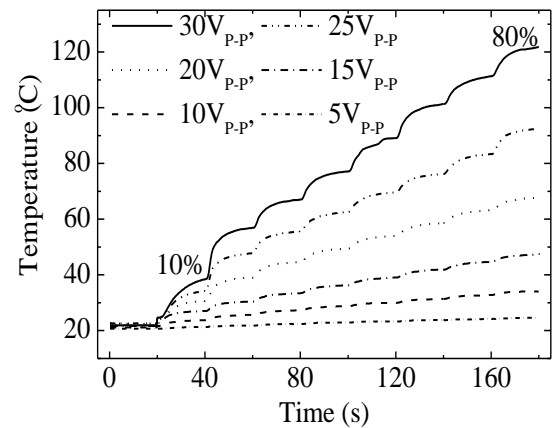


図 10 グリセリン溶液による温度制御実験。電圧を 5～30V_{P-P}, Duty 比を 10～80% まで変えて制御。

が温度に変換されたと解釈した。液量、液体種を変えると局所高温が得られる。

図 10 は、グリセリン溶液による温度制御結果を示す。

5. 今後の展望と課題

本稿で、SAW ストリーミング現象により局所的な溶液流動、液滴ダイナミクスが容易に生じることを示した。また、影響を与える要因が多々あり、それらはお互に関連しあう。このような要因にたいする検討は十分でない。今後の課題である。これまで SAW ストリーミングが示す基本的な現象の解明³³⁾に終始し応用するに当たっての構成はほとんど考慮していない。

表 1 SAW ストリーミング F_{1s}、SAW 放射圧 Ω_s、アコースティックストリーミング F_{1a}、放射圧 Ω_a の理論式と計算値。

	理論式	計算値
SAW streaming F _{1s}	$\rho_0 (1 + \alpha_1^2)^{3/2} k_i \omega^2 A^2$	$2.57 \times 10^6 \text{ N/m}^3 = 260 G_0 \rho_0$
Acoustic streaming F _{1a}	$\rho_0 \alpha_w^2 \omega^2 A^2$	$1.4 \times 10^3 \text{ N/m}^3 = 0.14 G_0 \rho_0$
SAW radiation pressure Ω _s	$1/2 (\rho_0 (1 + \alpha_1^2) k_i \omega^2 A^2)$	$3.5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$
Acoustic radiation pressure Ω _a	$1/2 (\rho_0 \alpha_w^2 \omega^2 A^2)$	$0.5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$

計算に用いた値

f₀ = 50 (MHz), k_i = -1370 (m⁻¹), α₁ = 2.47, α_w = 14.2 (m⁻¹), A = 10 (Å), G₀ = 9.8 (m/s²):重力加速度, ρ₀:水の密度

収束音場を利用するための SAW 電極の工夫や複数の SAW デバイス集積化による多機能化、圧電基板上に溶液を介して次の基板に超音波を伝達する層状配置など、実際の使用にあった構成の検討が今後なされるであろう³⁴⁾。

超音波振動子による化学作用・霧化・洗浄・攪拌・溶接・加工などを SAW ストリーミングに適用することが考えられている。SAW を用いると反応場が局所的になることが特徴であり、それを生かした装置の開発と利用が望まれる。その際新しい現象も見出されると期待している。

文 献

- [1] 森泉豊栄、中本高道、菊池恒男、交差指電極水中トランスジューサ用圧電体の選択；信学論文誌 J65-A No.5(1982/5)489
- [2] 塩川祥子、杉本祐次、森泉豊栄、”SAW による水の流動現象の実験“：第 35 回応用物理学会春季 28a-d-3(1988)379
- [3] 塩川祥子、上田年彦、森泉豊栄、SAW による水の流動実験：日本音響学会講演論文集 2-5-9(1988)851
- [4] 塩川祥子、上田年彦、松井義和、SAW ストリーミング現象の解明とその応用：信学技報 US89-51(1989)41
- [5] Showko SHIOKAWA, Yoshikazu MATSUI and Toyosaka MORIIZUMI, Experimental Study on Liquid Streaming by SAW: Jpn. J. Appl. Phys.28(1989)Suppl. 28-1 p.126
- [6] Showko SHIOKAWA, Yoshikazu MATSUI and Toshihiko UEDA, Study on SAW Streaming and its Application to Fluid Devices.: Jpn. J. Appl. Phys.29(1990)Suppl.29-1,p.137
- [7] 松井義和、上田年彦、塩川祥子、SAW ストリーミング現象の超音波モータへの応用：日本音響学会秋季講演論文集 2-5-1(1990)797
- [8] 上田年彦、松井義和、塩川祥子、SAW ストリーミングの推力：日本音響学会講演論文集 1-P-17(1990)813
- [9] 鈴木孝幸、松井義和、塩川祥子、SAW ストリーミングを用いた微小ポンプの研究：日本音響学会講演論文集 1-Q-22(1991)1051
- [10] 上田年彦、鈴木孝幸、塩川祥子、圧電セラミック基板を用いた SAW ストリーミング現象とその応用：日本音響学会講演論文集 2-2-15(1991)721
- [11] 村田好司、島康史、松井義和、塩川祥子、SAW ストリーミングによる水滴の非線形振動：日本音響学会講演論文集 1-2-7(1994)1089
- [12] 山本敬央、松井義和、塩川祥子、SAW ストリーミングにより励起された水滴振動の検討：信学技報 US95-61(1995)9
- [13] Showko Shiokawa, Yoshikazu Matsui, The Dynamics of SAW Streaming and its Application to Fluid Devices: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.360(1995)53
- [14] 塩川祥子、山北滋之、松井義和、SAW ストリーミング励振された液滴振動による液体の粘性、表面張力、接触角の測定：信学技報 US97-75(1997)13
- [15] Shigeyuki YAMAKITA, Yoshikazu MATSUI and Showko SHIOKAWA, New Method for Measurement of Contact Angle (Droplet Free Vibration Frequency Method), Jpn. J. Appl. Phys.38(1999)3127
- [16] 長友晋介、松井義和、塩川祥子、SAW 励振による微小液滴の非線形振動の研究：信学技報 US2000-68(2000-11)7
- [17] Koji MIYAMOTO, Shinsuke NAGATOMO Yoshikazu MATSUI and Showko SHIOKAWA, Nonlinear Vibration of Liquid Droplet by Surface Acoustic Wave Excitation: Jpn. J. Appl. Phys.41(2002)3465
- [18] 塩川祥子、宮本幸治、近藤淳 松井義和、SAW 励振による微小液滴非線形振動のダイナミクス：信学技報 US20002-8(2002-05)13
- [19] 池谷好裕、松井義和、近藤淳 塩川祥子、微小液滴振動に対する非線形方程式の検討：信学技報 US2004-15(2004-05)417
- [20] Jun Kondoh, Norifumi Shimizu, Yoshikazu Matsui and Showko Shiokawa, Liquid Heating Effects by SAW Streaming on the Piezoelectric Substrate: IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,52-10(2005)1881
- [21] B.A.Auld, ”Acoustic Fields and Waves in Solids”, Vol. II ,p.283, A Wiley-Interscience Publication (1973)
- [22] W.L.M.Nyborg “Acoustic Streaming” W.P.Mason: ”Physical Acoustic” Vol. II partB,p.265
- [23] 丁野克己、近藤淳、松井義和、塩川祥子、SAW ストリーミングを用いた霧化現象とその制御：日本音響学会講演論文集 1-Q-17(2002)1169

- [24] Katsumi CHONO, Norifumi SHIMIZU, Yoshikazu MATSUI, Jun KONDOH and Showko SHIOKAWA, Development of Novel Atomization System Based on SAW Streaming, Jpn. J. Appl. Phys.43 (2004)2987
- [25] M. Kurosawa, et al., "Characteristics of liquids atomization using surface Acoustic Wave", Tech. Dig. Of Solid-State Sensor and Actuators, 3A3.01(1997)
- [26] 松井義和、佐野彰彦、辻貴生、塩川祥子、弾性表面波による微小物体移動：信学技報 US97-14(1997)25
- [27] Akihiko SANO, Yoshikazu MATSUI and Showko SHIOKAWA, New Manipulator Based on Surface Acoustic Wave Streaming: Jpn. J. Appl. Phys.37(1998)2979
- [28] S. Alzuaga, et al., "A large scale X-Y positioning and localization system of liquid droplet using SAW on LiNbO₃", IEEE Ultrasonic Symp. (2003)1790.
- [29] M. Takeuchi and K.Yamanouchi, "Ultrasonic micromanipulation of small particles in liquid," Jpn J. Appl., vol.33, No.5B(1994)3045
- [30] 竹内正男、"微小物体の超音波マイクロマニピュレーション、" 音響誌、 vol.52, no.3(1996)203
- [31] 竹内正男 山之内和彦、漏洩弾性波トランスジューサを用いたマイクロマニピュレーション：第36回通研シンポジウム1997年2月 p. 47
- [32] M.de Billy and G.Quentin,"Experimental study of the Scholte wave propagation on a plane surface partially immersed in a liquid", J. Appl. Phys. 54(8), August 1983, p.4314
- [33] 鈴木孝幸、静岡大学工学部光電機械工学専攻修士論文 "SAW ストリーミングの基礎と応用", pp.12,1993.
- [34] 菊池恒男、中本高道、森泉豊栄、圧電体/水/ガラス構造の超音波伝搬特性の解析：信学論文誌 J68-A No.7(1985/7)696