

# デジタル式マイクロ流体システムのための弾性表面波を用いた液滴の微小位置検出とその応用

静岡大学創造科学技術大学院

近藤 淳

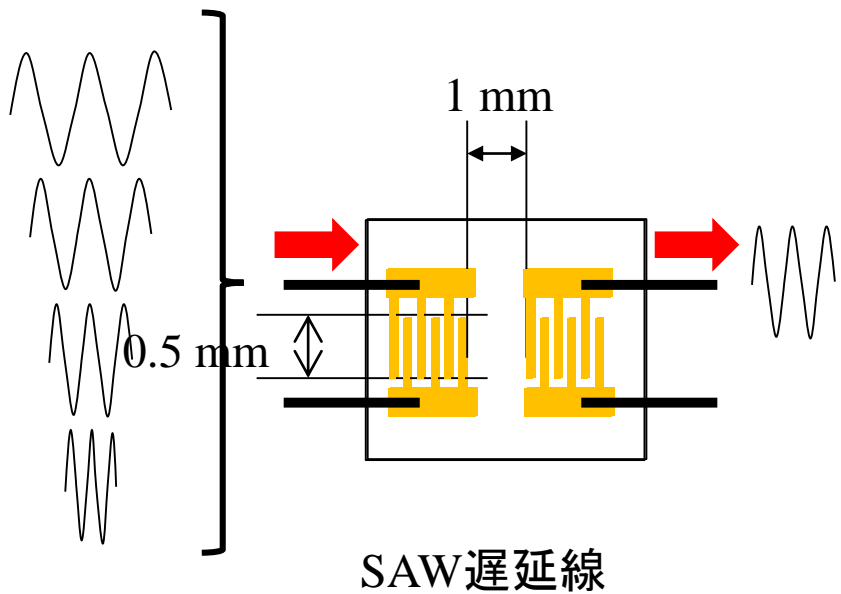
# 弾性表面波 (SAW) とは

- 弾性表面波 (surface acoustic wave: SAW) とは弾性体表面にエネルギーを集中して伝搬する波である.
- 弾性体として圧電結晶 (水晶,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  など) を利用すると, 電氣的に SAW の発生, 検出を行うことができる. このとき, 圧電結晶表面に作成される電極をすだれ状電極 (interdigital transducer: IDT) と呼ぶ.
- IDT に電気信号を入力すると, 逆圧電効果により SAW が発生する. また, 反作用 (圧電効果) により IDT で SAW から電気信号に変換される.

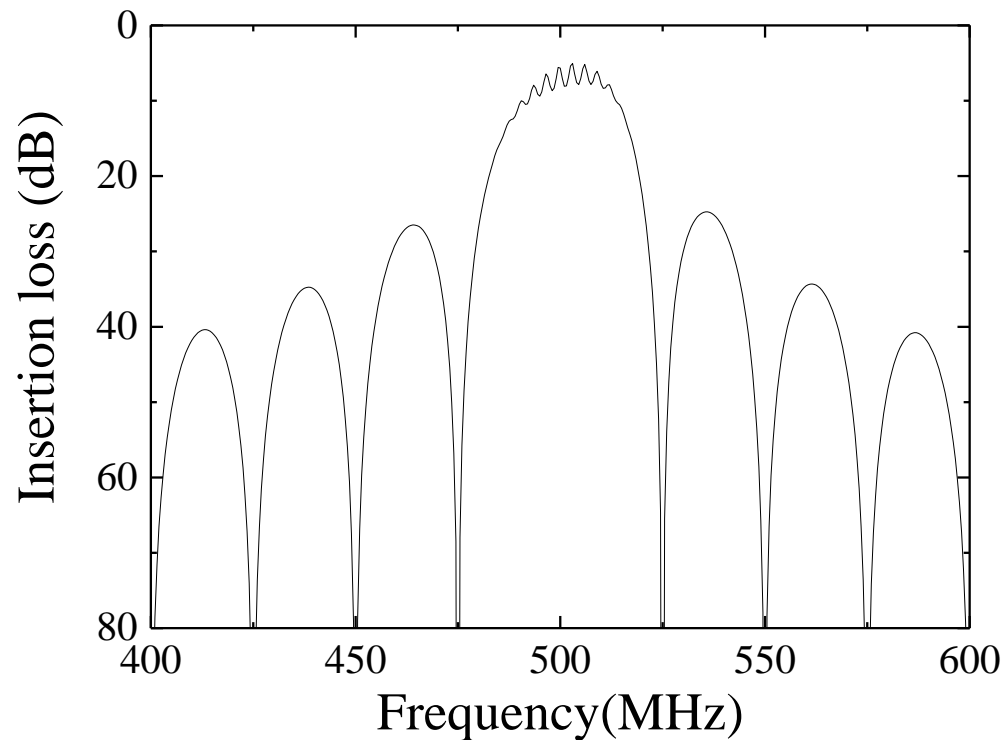
# 信号処理用としてのSAWデバイス

- SAWを発生させるには, IDTの電極幅, 電極間隔などにより決まる周波数信号を, IDTに入力すれば良い.
- 言い換えると, IDT構造により決定される周波数以外の信号を入力しても, SAWを励振できない.
- IDTにより決まる特定の電気信号のみを通過させる**フィルタ**が実現できる.
- SAWフィルタの研究・開発では, 日本の研究者・企業は世界をリードしている.

# SAWデバイスの基礎特性



中心周波数: 500 MHz  
波長: 8  $\mu\text{m}$



損失が小さい周波数の信号のみ通過  
させることができる(=フィルタ)

# 信号処理以外のSAWデバイスの応用

## □ SAWおよびSAWデバイスの特徴

- IDTを用いることにより電氣的に制御可能
- 圧電結晶表面にエネルギーを集中して伝搬

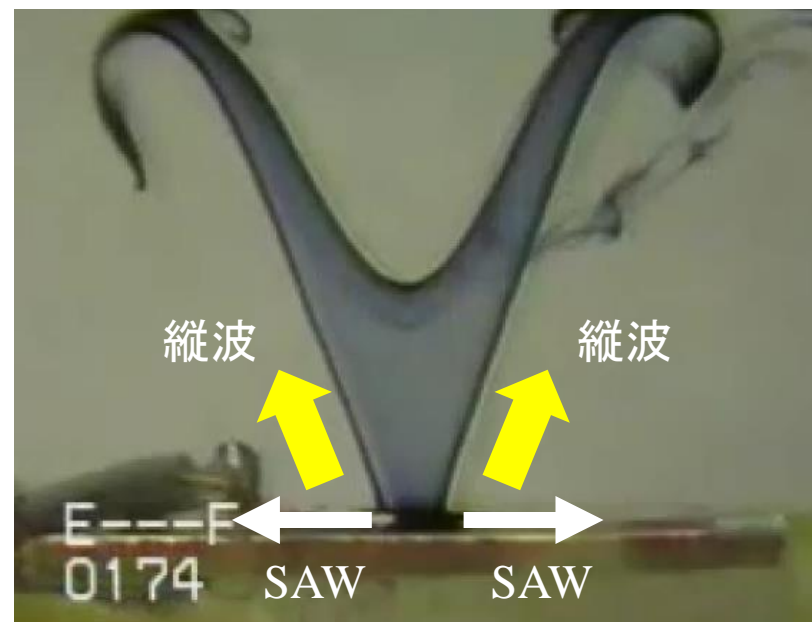
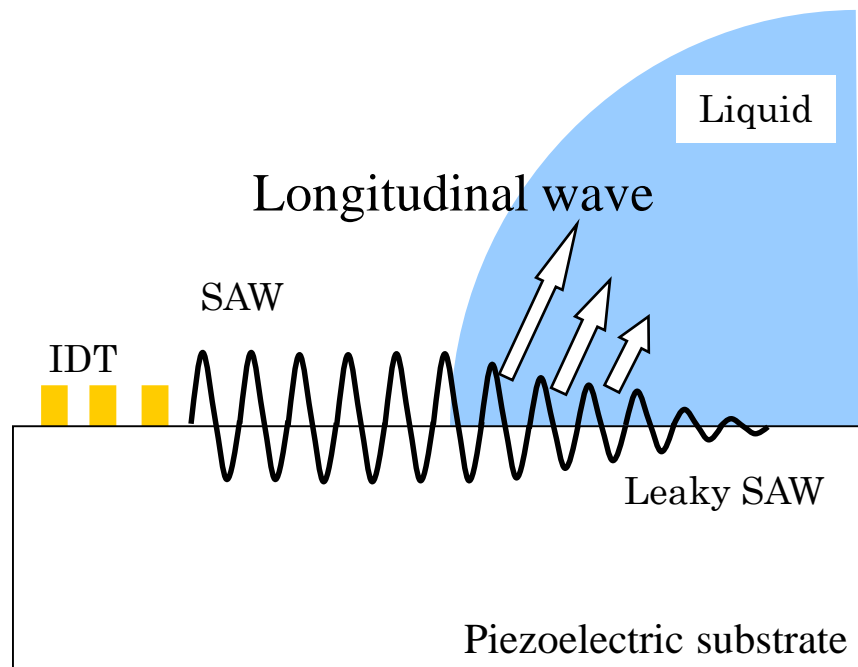
- SAW伝搬面ならびに伝搬面に接する媒質が物理的・化学的に変化すると、その影響によりSAW速度や振幅が摂動を受ける。

→SAWセンサ応用

- SAW伝搬面に液滴を付加すると、液体中に縦波を放射し、SAWは減衰する。放射した縦波のエネルギーを利用すると非線形現象が生じる。その結果、例えば液滴搬送が可能となる。

→SAWアクチュエータ応用

# SAWによる液体中への縦波放射

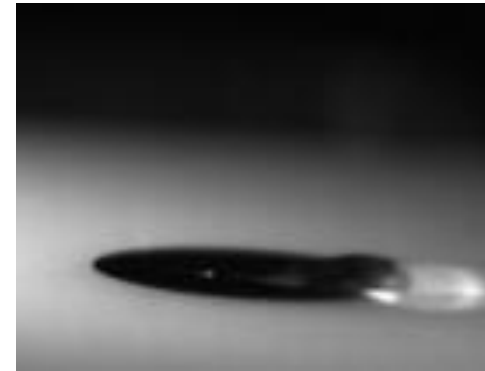
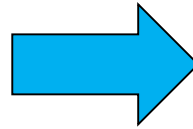
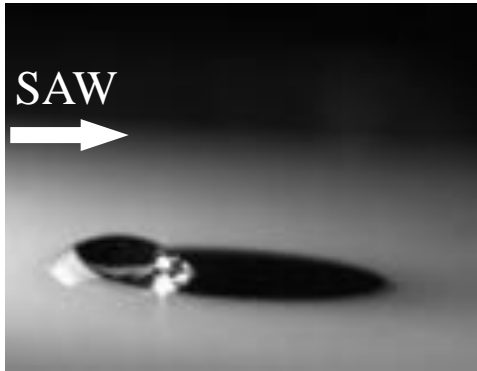


IDT上に液体がある場合の縦波放射観察結果。

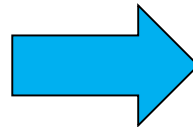
- SAWは固液界面で液体中に縦波を放射しながら減衰する leaky-SAWとなる。放射角はレイリー角と呼ばれる。
- SAWの振幅は入力する電力に依存する。電力を増加すると、様々な非線形現象が生じる。

# SAWによる非線形現象

## □ SAWによる液滴搬送

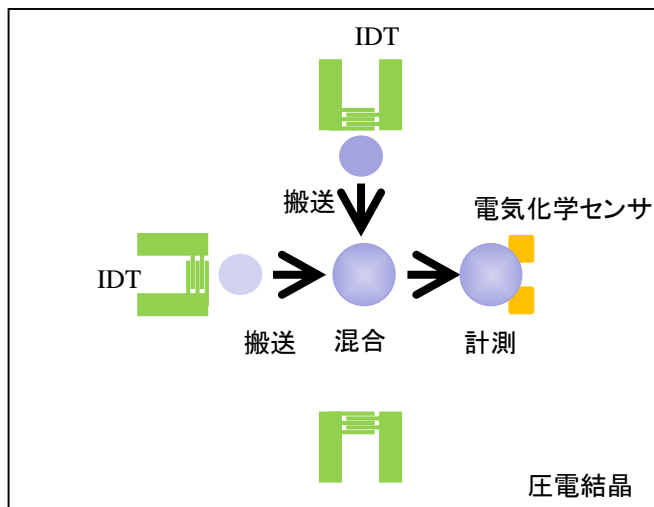


## □ SAWによる微小液滴飛翔



# SAWによる液滴搬送＋計測

- SAW液滴搬送面にセンサを集積化すれば、「液滴搬送＋計測」が実現できる.
- マイクロ流路を連続的に液体を流して計測する技術は、「マイクロ流体システム」, 「 $\mu$ TAS (micro total analyzing system)」などと呼ばれている.
- SAWの場合, 液滴を利用するので, 「デジタル式マイクロ流体システム (digital micro fluidic system)」と呼ばれる.



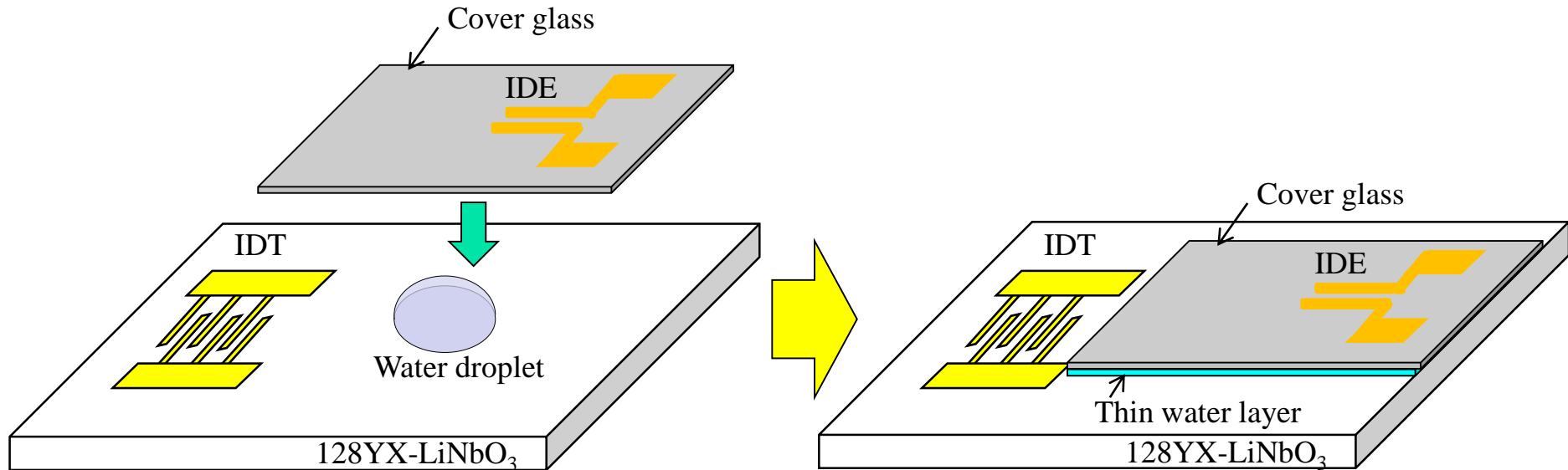
圧電結晶表面に作成したDMFS



# 圧電結晶表面を利用したDMFSの問題点

- 抗体, 抗原などのバイオ系材料を扱うと, 表面への付着が避けられない.
  - 同じデバイスを用いて複数回実験を行うには, 実験ごとに表面洗浄は必要となる. またはデバイスの使い捨てが必要となる.
  - 表面洗浄には手間がかかる. また, 使い捨てするにはデバイスサイズが大きいため経済的ではない.
- 解決策: センサプレート/液体層/圧電結晶から構成されるDMFS

# 使い捨て可能なDMFSの提案



センサプレート:カバーガラス, 液体層:水, 圧電結晶:128YX-LiNbO<sub>3</sub>を用いた場合の作成方法.

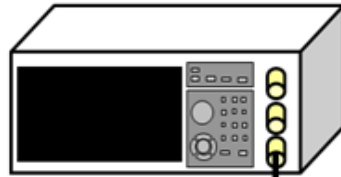
# 使い捨て可能なDMFSを用いた測定例

## カバーガラス上の液滴の温度制御と血液凝固測定への応用

- 血液凝固測定の最適温度は37度である。通常はヒータなどを利用して加熱する。しかし、SAWデバイスを基盤技術とするDMFSでは、温度制御と同時に攪拌ができる。よって、バイオなど様々な分野へ適用が可能である。

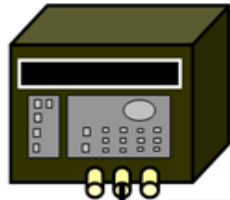
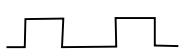
# DMFSを用いた温度制御

50 MHz

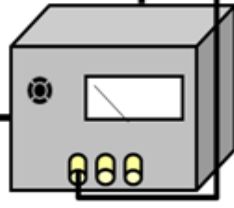


Signal Generator

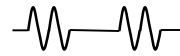
1 Hz



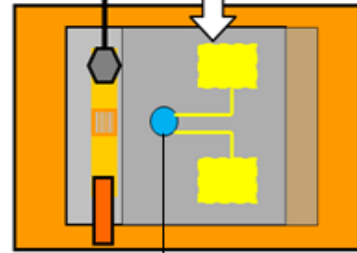
Function Synthesizer



RF Power Amplifier

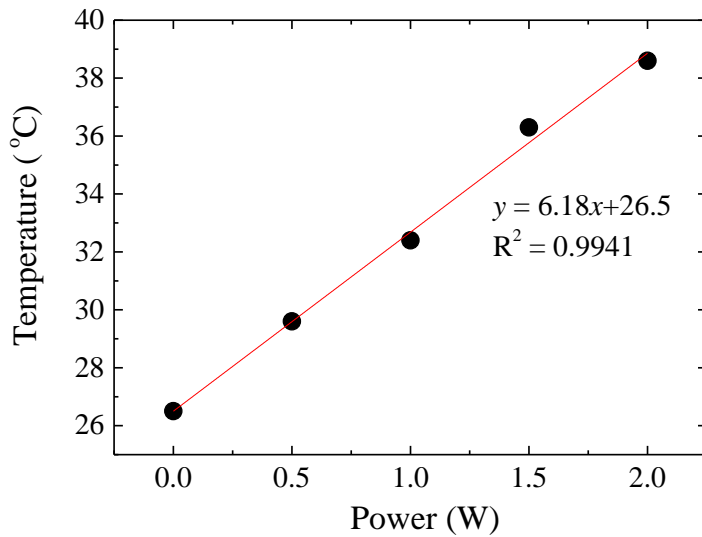


DMFS

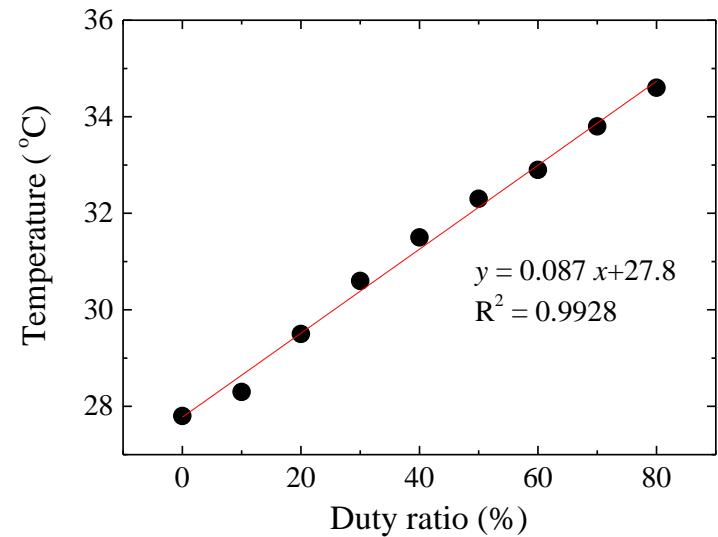


Grand

thermocouple



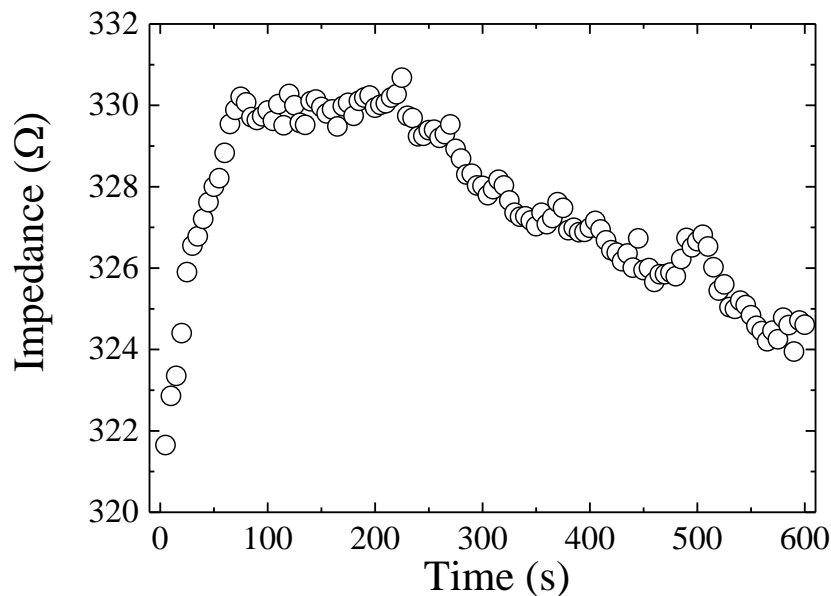
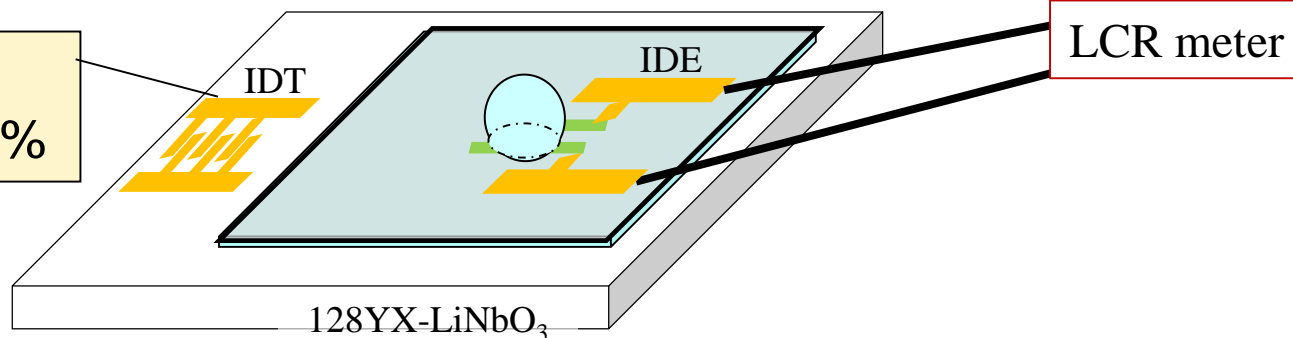
デューティー比 50%



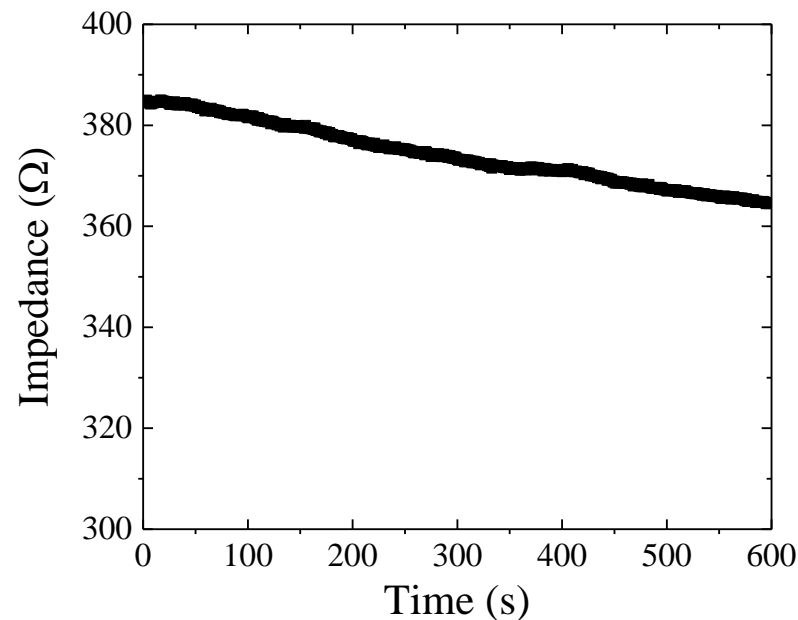
入力電力 1 W

# 37度に保ったときの凝固測定

入力電力: 1W  
デューティー比: 80 %



温度制御あり



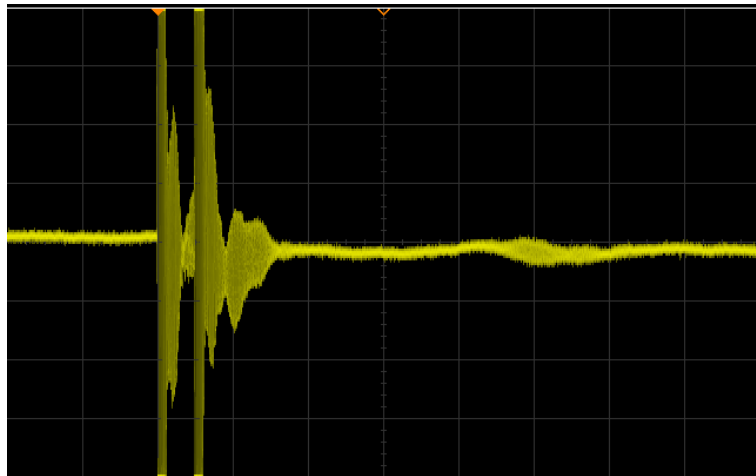
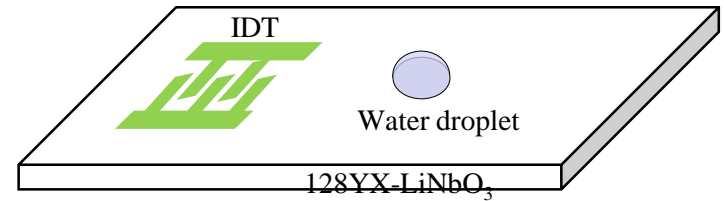
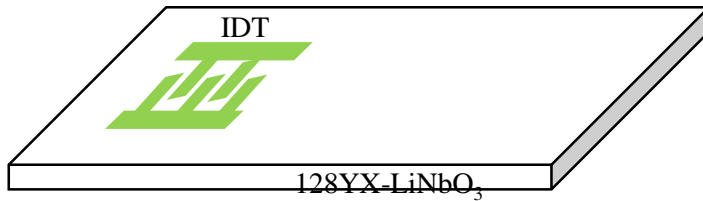
温度制御なし

# DMFSの自動化に向けた課題

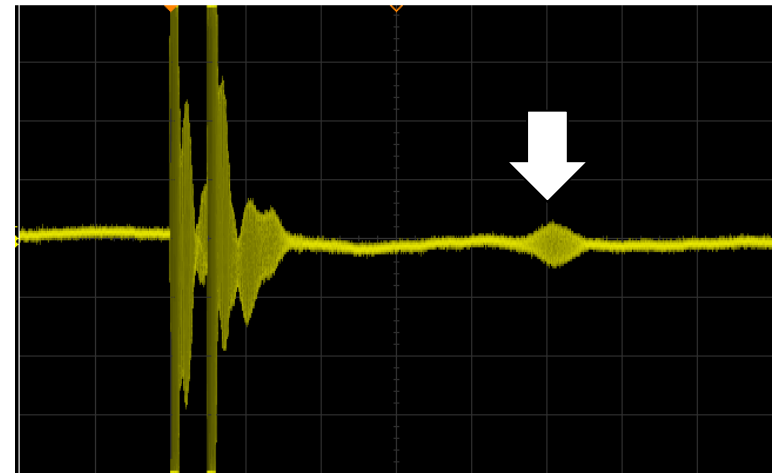
- 液滴を適切に制御するには、液滴位置の把握が必要.
- カメラなどの画像情報を用いれば容易にできる.  
しかし、装置構成要素は増やしたくない.  
→ 従来の測定系で可能な方法があるのでは？
- 過去の文献で測定例はある.  
しかし、複数の液滴を用いる必要がある.  
→ **一つの液滴のみでその位置を把握することは可能か？**

# エコー信号の測定

入力電気信号: 50 MHz × パルス波 (1 kHz, Duty 1 %)



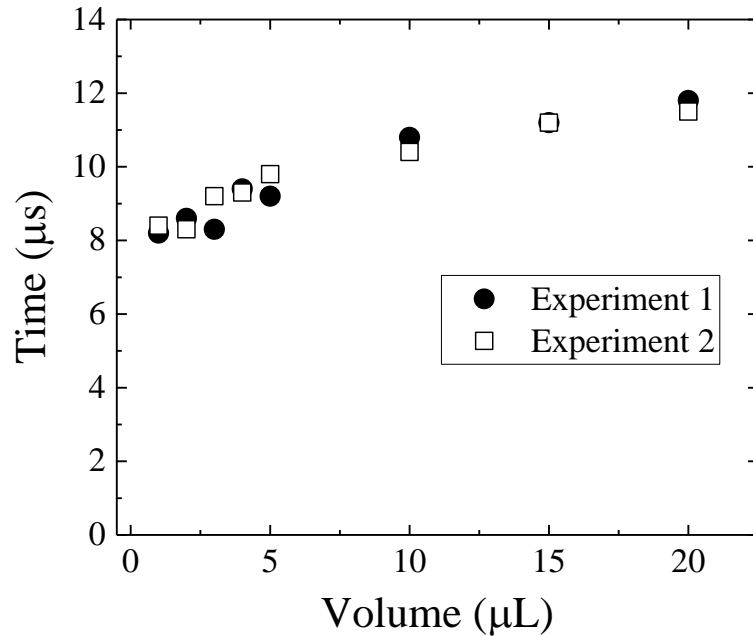
伝搬面上に水滴がない場合



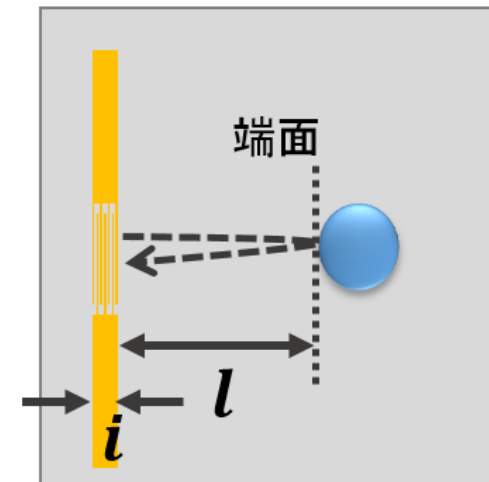
伝搬面上に水滴がある場合

矢印の応答について詳しく調べよう！

# エコー信号の測定（液滴量を変えた場合）



エコー信号が最大となる時間は液滴量に依存する. このことより, エコーは液滴端面から生じているのではない.

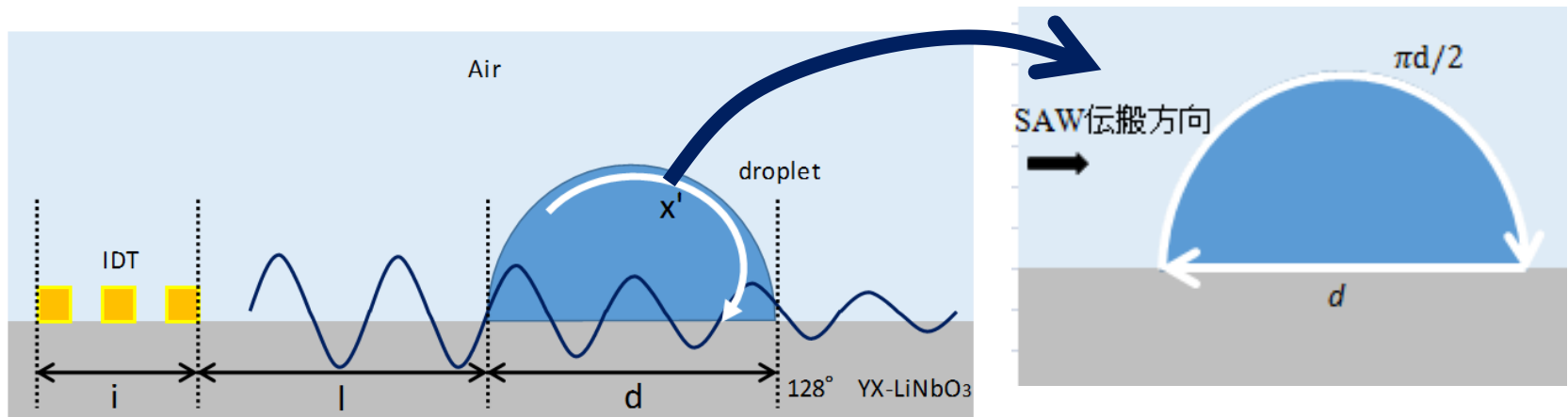


このモデルは適用できない



# エコー信号の生じる原因の検討1

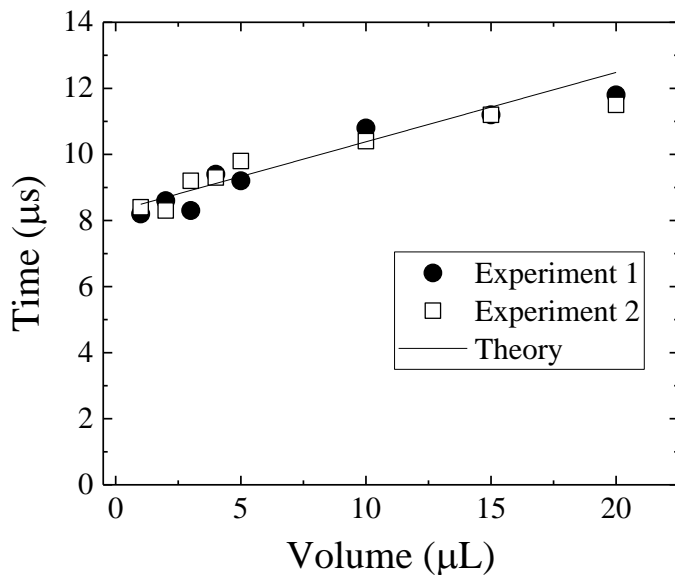
- 液滴への縦波放射角(レイリー角)はSAWの伝搬速度と液体の縦波音速で決まる. しかし, レイリー角に基づいた液滴内部の音波伝搬経路ではエコー信号は確認できない.
- 下図のように液滴内を縦波が伝わると仮定し定式化.



$$t = 2 \left( \frac{l+i}{V_{SAW}} \right) + \frac{d \left( 1 + \frac{1}{2} \pi \right)}{V_L}$$

$V_{SAW}$ : SAWの位相速度  
 $V_L$ :液体の縦波音速

# エコー信号の生じる原因の検討2



$l = 5\text{mm}$ とした時, 実験値と仮定した式の結果は良く一致する. このことは, 仮定した式が有効であることを示す.

- 仮定した式をより, 液滴位置を検知することが可能.
- 他にも応用できないだろうか?

# 微小液滴を用いた音波物性測定への応用

$$t = 2 \left( \frac{l + i}{V_{SAW}} \right) + \frac{d \left( 1 + \frac{1}{2} \pi \right)}{V_L}$$

- 液滴サイズが既知の場合，エコー信号が最大値となる時間を測定することにより，液滴内を伝わる縦波音速を測定することが可能！
- 数 $\mu\text{l}$ の液滴より，縦波音速測定が可能であることは，液滴物性評価，化学反応やバイオ反応の測定などにも応用することが可能である。
- このような報告例はまだない！

# (DMFS) 従来技術とその問題点

液滴を搬送させる方法として以下の方法が提案されている

1. 静電気力を利用する方法
2. エレクトロウェットティング法

しかし、複数の電極を搬送面に全体に配置する必要があり、また、電極への入力信号制御が困難である。

搬送だけであり、攪拌などを行うことはできない。

温度制御にはヒーターが必要である。

# (DMFS) 新技術の特徴・従来技術との比較

- 電極構造はシンプルである. また. 搬送面全体に電極を配置する必要はない.
- 液体中への縦波放射により, 均一攪拌だけでなく温度制御も可能 → ヒーターを別途必要としない.
- 使い捨て可能なDMFSも簡単に構成できる.

# 微小液滴を用いた音波物性計測

- 従来法では、バルクタイプの超音波送受信装置を必要とする。このため、数 $\mu\text{l}$ の試料量での計測は困難。
- SAWデバイスを伝わるSAWを利用した方法である、数 $\mu\text{l}$ の試料量で音波物性を測定できるので、コスト削減につながる。

# 実用化に向けた課題

## □ DMFS

- 電気化学センサ以外のセンサの集積化(例えば局在表面プラズモンを利用した光センサ)と多機能化
- 実際に必要とされる用途の探索
- 複数の液滴の位置検出ならびに制御
- DMFSの最適設計論の確立
- 自動液滴滴下装置(改良)

## □ 微小液滴を用いた計測

- 仮定の妥当性の検証
- 縦波発生メカニズムの検証
- 水以外の液体を用いた測定
- 減衰が大きい液滴での測定法の検証

# 企業への期待

## □ DMFS

- 少ない試料量で混合，計測などの応用に有効→バイオセンサ関連企業，製薬関連企業などとの共同研究を希望.
- (光センサの集積化により)電気化学的計測や光学的計測など一つのサンプルに対して様々な方法での計測をいたい場合に有効な手段. → $\mu$ TAS関連の企業との連携

## □ 微小液滴の計測

- 新しい液体計測装置なり得るので，計測機器関連の企業との共同研究を行いたい.
- 僅かな液滴量で計測が可能なので，例えば同じサンプル容器から異なる位置(深さ)から抽出した試料の比較により，均一性の評価ができる. 溶液を取り扱っている企業全般に有効な技術になる可能性が高いと考えている.



# 本技術に関する知的財産権

## □ DMFS

- 発明の名称 : 弾性波デバイス
- 出願番号 : 特願2009-531109
- 特許番号 : 特許第5283232号
- 出願人 : 国立大学法人静岡大学
- 発明者 : 近藤淳

## □ 微小液滴の計測

- 発明の名称 : 液滴検知装置及び液滴検出方法
- 出願番号 : 特願2015-136967
- 出願人 : 国立大学法人静岡大学
- 発明者 : 近藤淳, 杉浦健

# お問い合わせ先

◎共同研究および関連する特許については、  
静岡大学イノベーション社会連携推進機構に  
お問い合わせください。

TEL : 053-478-1702

Email : [sangakucd@cjr.shizuoka.ac.jp](mailto:sangakucd@cjr.shizuoka.ac.jp)

