

齊木和幸 超音波システム研究所 代表

1. はじめに

超音波洗浄の現象には沢山の条件があり、それぞれの影響が複雑に関連しています。その中で、洗浄対象物や洗浄液に伝搬する超音波の伝搬状態に関して、測定・解析装置の開発を含めた研究が少ない状況が続いています。洗浄レベルの向上が要求されている状況で、超音波伝搬状態に関して、洗浄効果の高い非線形現象を洗浄レベルに合わせて最適化するためには、最大100MHz程度の周波数範囲での音圧測定解析が必要です。音圧測定解析に基づいて検討し、20MHz以下の発振で、300MHz以上の超音波をダイナミックに制御する、新しい超音波洗浄システムを開発しました。このシステムを使用して、超音波によるナノレベルの「精密洗浄」「表面改質処理」「攪拌・分散・粉砕」・・・を行っています。ここでは、球形サイズで20μm以下の、ファインバブルを安定して利用する技術を含めた超音波の制御方法を紹介します。

2. 脱気ファインバブル発生液循環装置

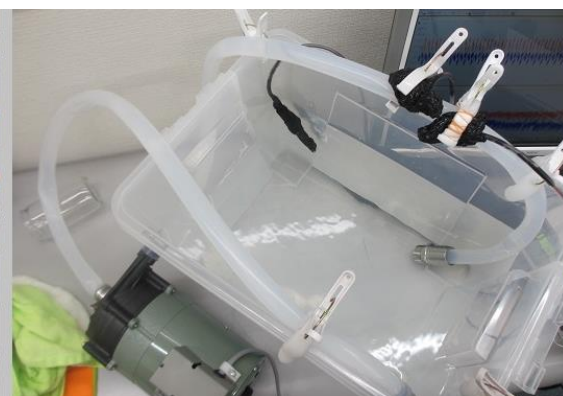
超音波制御を効率よく行うために、洗浄液を均一化して、超音波の伝搬状態を安定させる。

「揚程の高い、マグネットポンプの吸い込み側のバルブ(配管)を絞る」と言う、ポンプメーカーの禁止事項を行います。(通常マグネットポンプで15年以上機能します。揚程の高さとバルブの絞り状態の設定で、マイクロバブルの発生量とサイズを調整できます) 特許の問題はありません(公知とされています)。

揚程の高いマグネットポンプ

例1 株式会社イワキ マグネットポンプ MD-70RZ

例2 三相電機株式会社 マグネットポンプ PMD-1521B6E



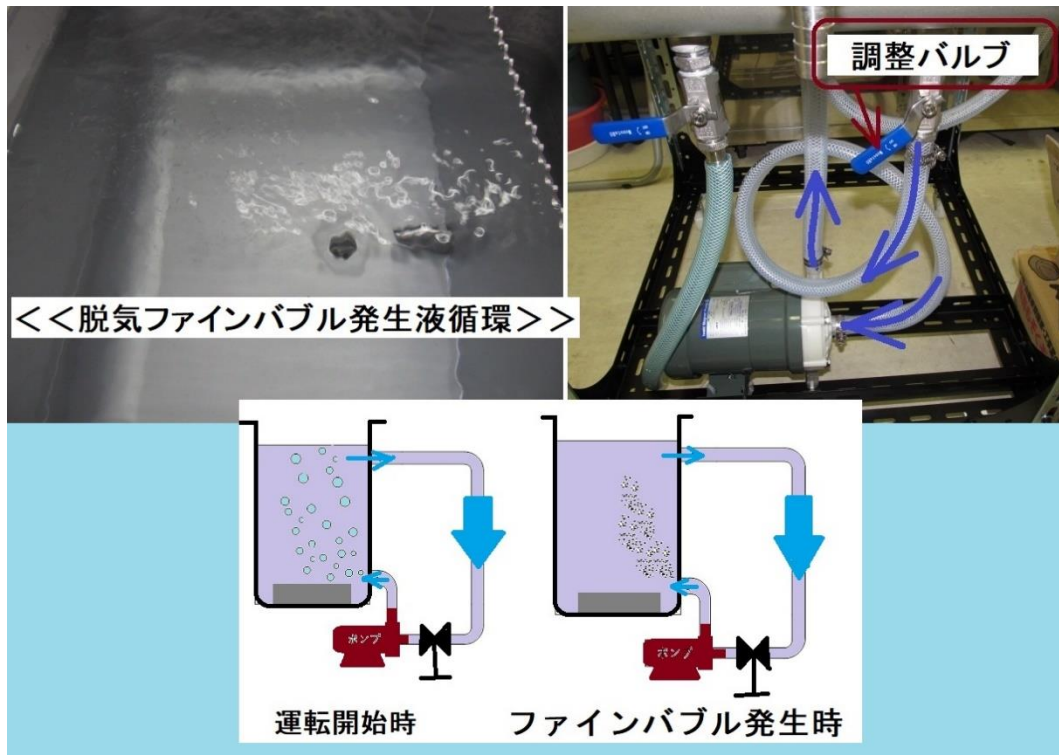


図1 脱気ファインバブル発生液循環装置

3. 超音波洗浄のメカニズムとしての、問題点

3. 1 : 洗浄装置・洗浄液・・・の振動現象の管理について

<説明1> 物理作用として、振動現象を利用する装置の場合

装置の設置による、床面・・・からの低周波振動現象と、装置固有の振動現象に加え、洗浄対象物・治工具・・・の振動現象が、相互作用により、複雑に変化します。洗浄効果のある、多くの事例では、ダイナミックな非線形性の振動現象が発生しています。振動測定による音圧データを解析して、非線形性の確認を行い、洗浄状態を管理するために、論理的な学習と振動計測に関する理解が必要です。特に、10メガヘルツ以上の超音波振動に関しては音圧データの非線形性に関する測定解析が非常に重要です。経験や類似の成功事例だけでは、目に見えない瞬間的な共振現象と(超音波刺激の強い)非線形現象の判断は難しい状況です。

<説明2> 洗浄液の化学作用として、洗浄効果を利用する装置の場合

洗剤の濃度管理が重要です。水槽内の濃度分布測定よりも、濃度分布の解消(均一化対策)が必要です。液温、湿度、気温、気圧・・・による環境との相互作用により、各種の分布は、複雑に変化します。

特に、溶存気体濃度の分布は化学反応に於いて大きな影響がありますが、溶存気体濃度を均一にする方法は知られていません。(20 μ m以下のファインバブルによる拡散性の利用が推奨方法です)水槽内の液体に、単純に洗剤を投入しても、

濃度分布のバラツキを大きくしているだけの場合、洗浄効果のバラツキをより大きくする結果になります。

3. 2 : 気候・環境・各種変化・が洗浄効果に影響する

<説明> 台風の季節に多いトラブルの原因に、気圧の変化があります。気温や湿度と異なり、人が感じにくいため原因として考慮しない傾向があります。(台風が来る1週間前あたりから低気圧になり影響が出始める傾向があります) さらに、気圧の変化が、超音波を減衰させる大きな要因となります。(ゆっくりと低気圧になる傾向が、洗浄効果(注)を下げます。台風直後、気圧が上昇する傾向では、洗浄効果も上昇します)

注：キャビテーション・音響流の発生効率

3. 3 : 洗浄物の表面は、製造方法の開発・改善、保管・処理技術の発展とともに変化する。洗浄レベルの要求も変化する。

<説明> 20年前の脱脂洗浄は、様々な洗浄方法が効果を出していました。現在、多くの脱脂洗浄は、超音波洗浄あるいは洗剤・溶剤洗浄が主体となっています。次工程の、めっき・溶接・各種コーティング・・・での要求(不良率やナノレベルのコンタミ除去・・・の洗浄レベル)が高く、洗浄後の保管状態にも注意が必要な状況です。クリーンルームでの、めっき処理、コーティング処理が増えています。ナノレベルの1滴の油分が、溶接温度の低下、コーティングの不純物として問題視されている現状です

3. 4 : 洗浄管理、洗浄評価に関する技術・研究・機器は不十分

(洗浄は解明されていない：洗浄物に対する固有の汚れに対する除去方法を開発する必要がある)

<説明> 超音波洗浄機の場合、音圧測定に関して、音圧レベルが高いと洗浄効果が大きいという単純な傾向はありません。(超音波洗浄機の出力レベルを下げることで、洗浄液や洗浄物に伝搬する超音波(音圧レベル、伝搬周波数)が変化して、洗浄効果を改善した事例が多数あります)。つまり、伝搬周波数や非線形現象を把握(測定・解析)しないと、洗浄効果につながる具体的な改善ができません。そもそも、安定した超音波照射を長時間、実現できる装置は非常に少ない状態です。不安定な変化は、共振現象を起こし、低周波の振動状態に発展し、液面の揺れや大きな騒音に発展して、洗浄効果を大きく低下させます。洗浄装置以上に、洗浄物の表面に伝搬する超音波振動の把握(測定・解析)が必要です。(このような実験・検討は、ほとんど行われていません。超音波システム研究所は、15年間のコンサルティングで、各種超音波洗浄装置の測定解析を行い、洗浄物

の特性に合わせた制御技術を実験・検討・開発対応してきました) 洗浄物の形状・材質・数量・・・に合わせた、各種(超音波・液循環)制御・専用治工具の工夫が必要です。これは、個別の研究・開発となるため、ほとんど研究(あるいは公開)されていません。

4. 具体的対策を行った、超音波洗浄機事例

問題点の多い現状の超音波洗浄装置に対して、出力7-15Wのメガヘルツ超音波を追加して発振制御する方法を紹介します。標準的には、2本の超音波発振制御プローブを、図2のように利用します。1本は、測定解析に基づいた、スイープ発振制御を行います。1本は、スイープ発振の共振現象を最適化する周波数の、パルス発振を行います。

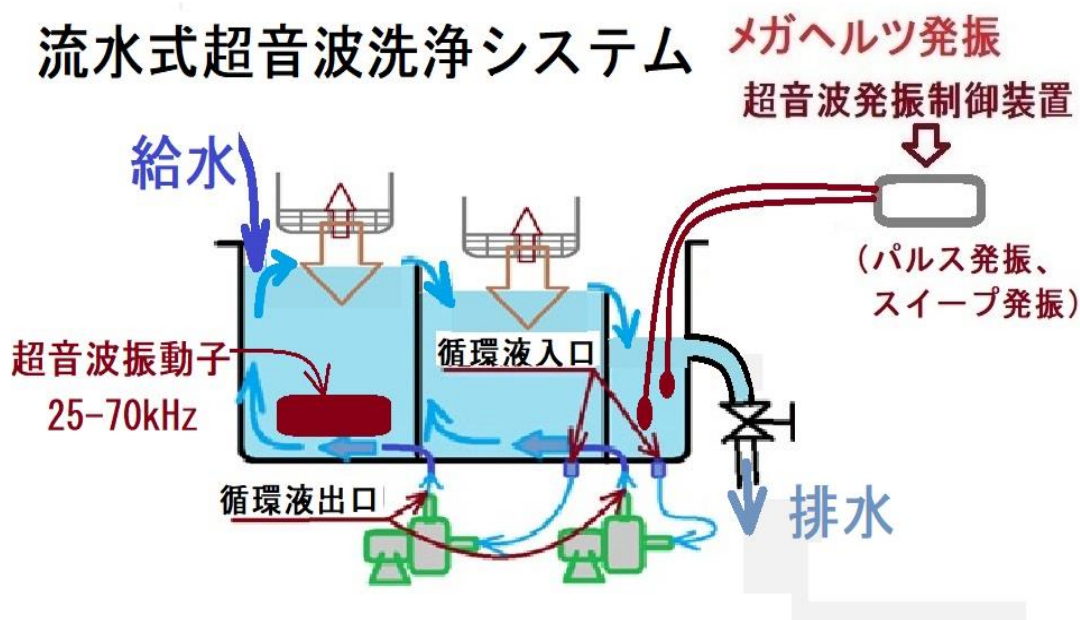


図2 流水式超音波洗浄システム

脱気ファインバブル発生液循環装置 2台 ONOF制御

ON1 : 213秒 OFF1 : 30秒、ON2 : 114秒 OFF2 : 23秒

超音波1 35kHz 150W (出力最大)

ON : 57秒 OFF : 17秒

超音波2 メガヘルツの超音波発振

メガヘルツの超音波発振制御プローブ1 パルス発振

7.7MHz (出力8W)

メガヘルツの超音波発振制御プローブ2 スイープ発振

1MHz~20MHz (出力10W)

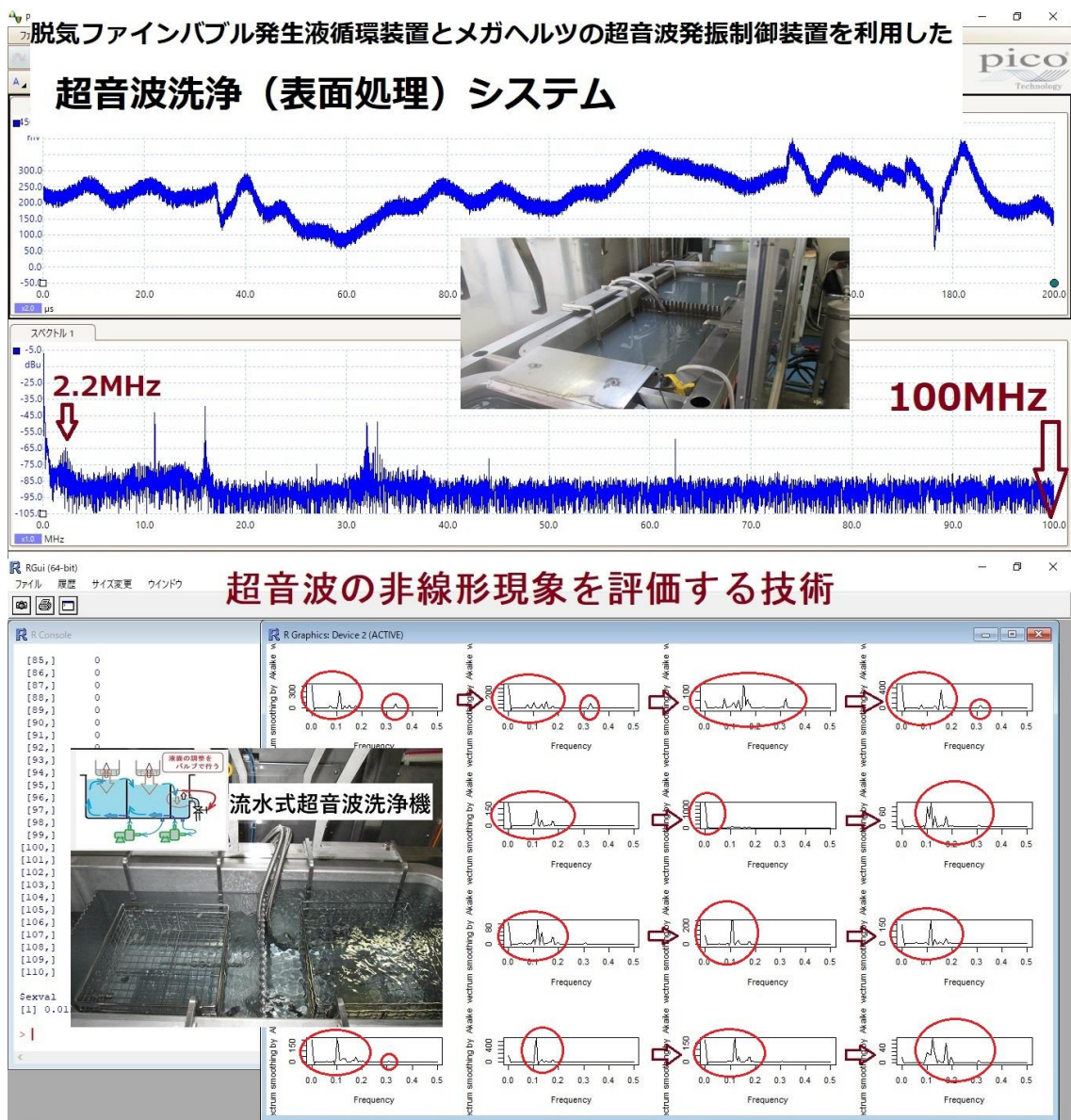


図3 超音波洗浄（表面改質）システム

<概要>

脱気ファインバブル発生液循環装置 2台 ONOF制御

超音波1 35kHz 150W（100%出力） ONOF制御

超音波2 28kHz 300W（30%出力） ONOF制御

メガヘルツの超音波発振

メガヘルツの超音波発振制御プローブ1 パルス発振

メガヘルツの超音波発振制御プローブ2 スイープ発振

効果1：脱脂した油分の分解を実現

効果2：洗浄物の表面残留応力の緩和を実現（金属疲労強度の向上）

5. 結論

5. 1 : 球形サイズで $20\mu\text{m}$ 以下のファインバブルの効果
洗浄液の溶存酸素濃度を均一化する

5. 2 : ファインバブルと超音波の組み合わせ効果

ファインバブルの超音波振動による崩壊が、対象物の表面刺激（洗浄・表面改質・・・）となる

5. 3 : 出力7-15Wのメガヘルツ超音波の発振制御効果

超音波発振制御プローブのスイープ発振とパルス発振により、目的に合わせた、超音波振動のダイナミック制御を実現する（キャビテーションと音響流：非線形現象の最適化）

注：最適化 変化の範囲（音圧レベル・周波数）を、制御条件（超音波、液循環、水槽、設置方法、治具・・・）により利用目的に合わせて最適化する

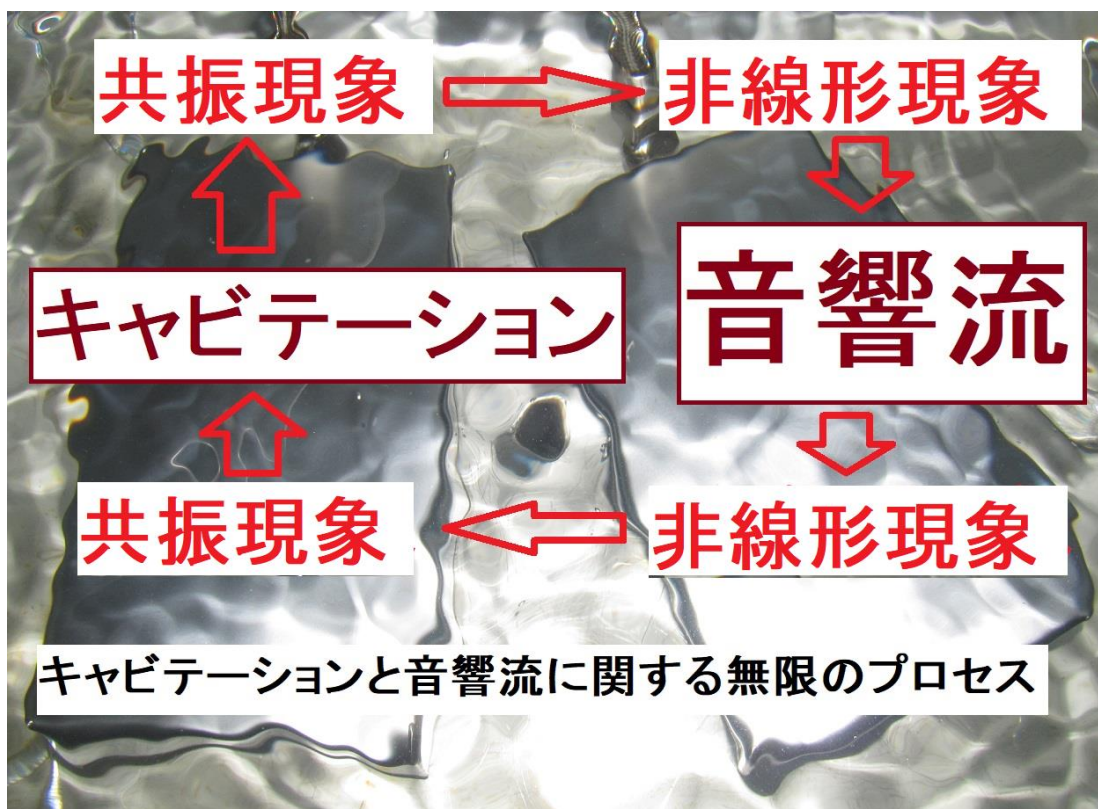
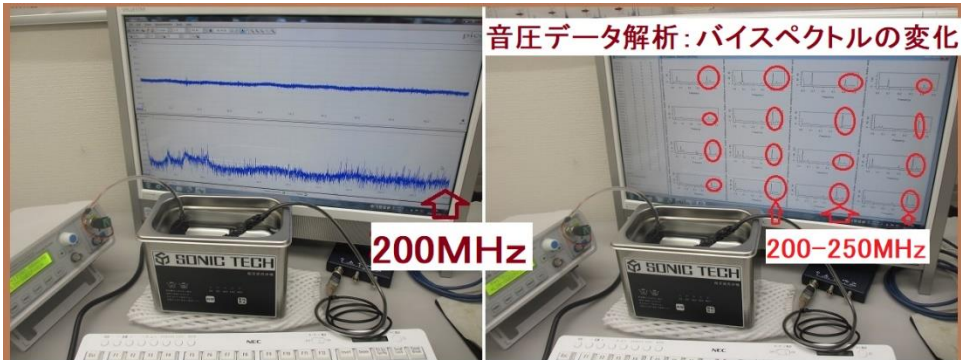


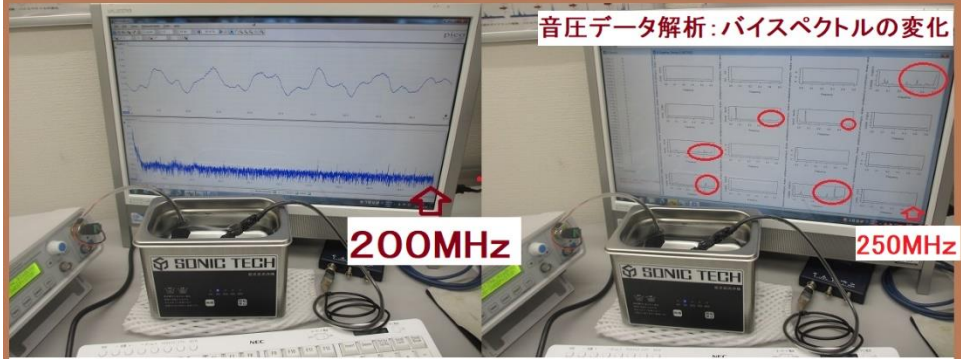
図4 超音波のダイナミック制御モデル

参考文献

- 1) 赤池 弘次/共著 中川 東一郎/共著：ダイナミックシステムの統計的解析と制御：サイエンス社 1972.1
- 2) ベア.アグラナート/[他]共著 青山 忠明/訳 遠藤 敬一/訳：超音波工学と応用技術：日ソ通信社 1991.8
- 3) マイクロバブル・ナノバブルの技術と市場 2021:株式会社シーエムシー出版 2021.6

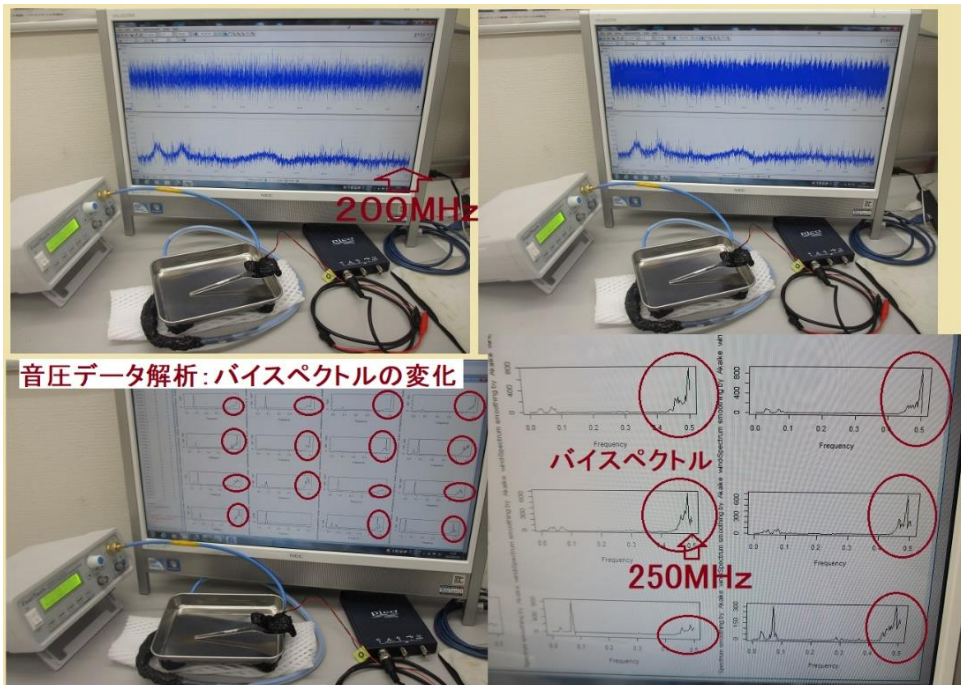


600MHz以上の超音波伝搬状態の実現



超音波洗浄器(42kHz 35W)とメガヘルツ超音波の組み合わせ技術

図5 応用技術：：600MHz以上の超音波伝搬状態を実現



700MHz以上の超音波伝搬状態

図6 応用技術：：700MHz以上の超音波伝搬状態を実現

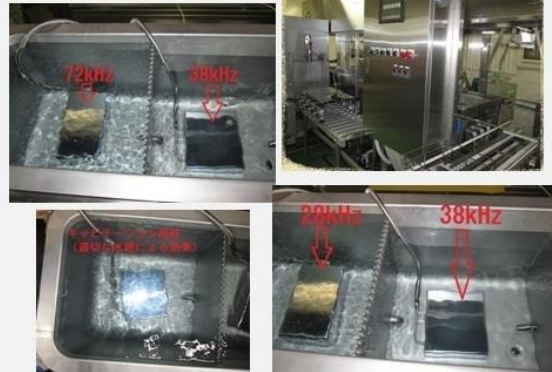


超音波とファインバブルによる表面改質処理
専用水槽

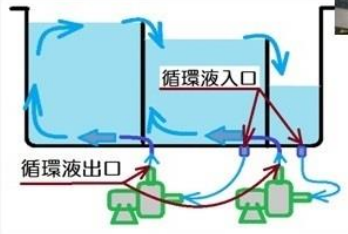


流動デザイン

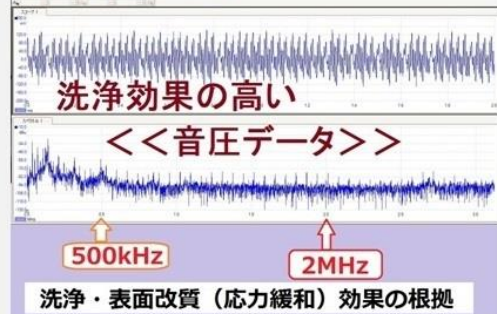
...オリジナル超音波洗浄装置



脱気ファインバブル発生液循環システム
液循環システム

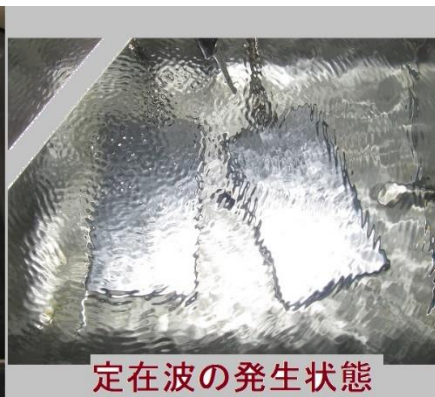
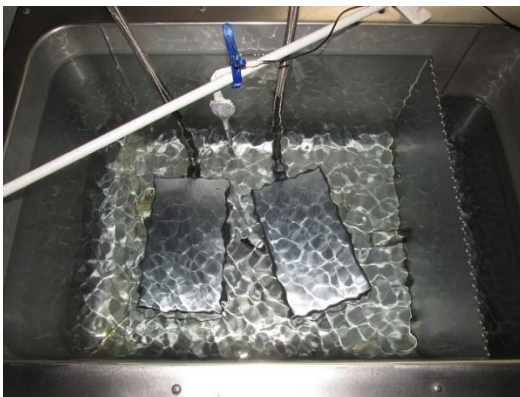
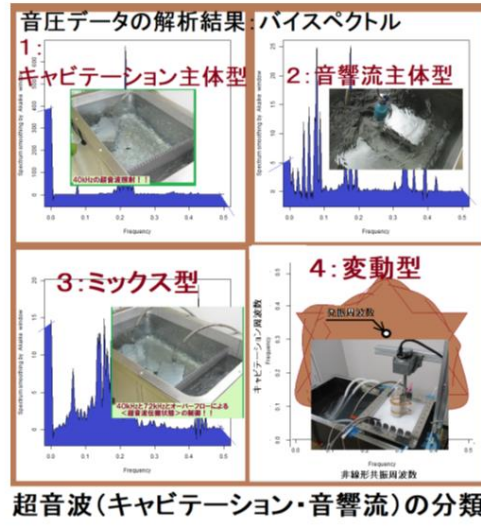
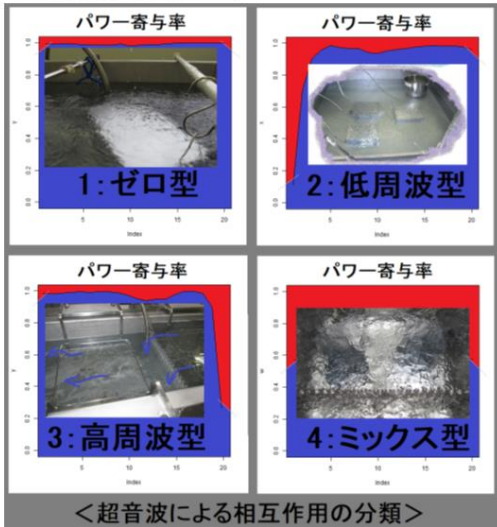
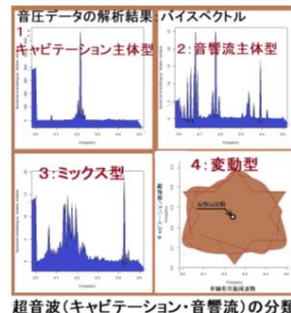
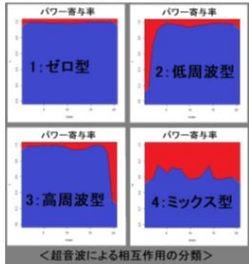


オリジナル製品：音圧測定解析システム
音圧測定解析



28kHzと38kHzによるメガヘルツ発生音の音圧データ

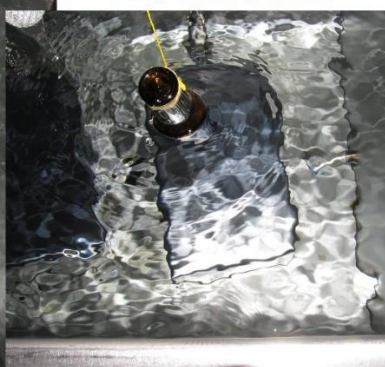
音圧測定・解析に基づいた、超音波の分類



定在波の発生状態

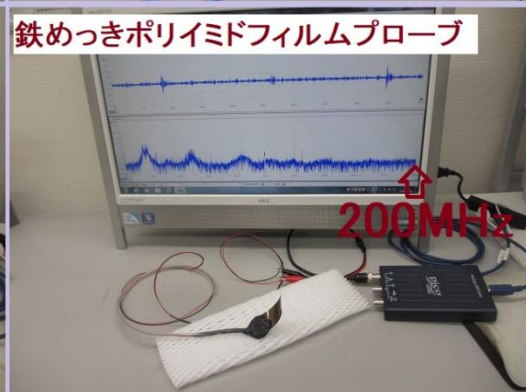
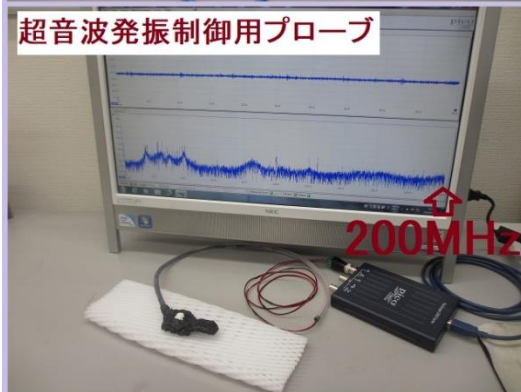
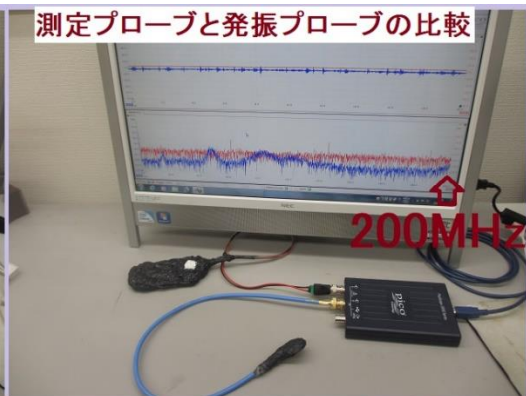
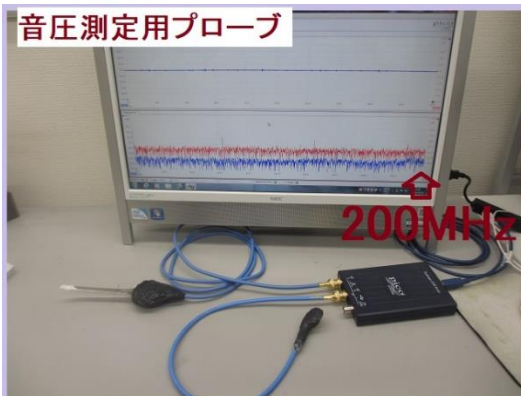


ガラス容器による音響流制御

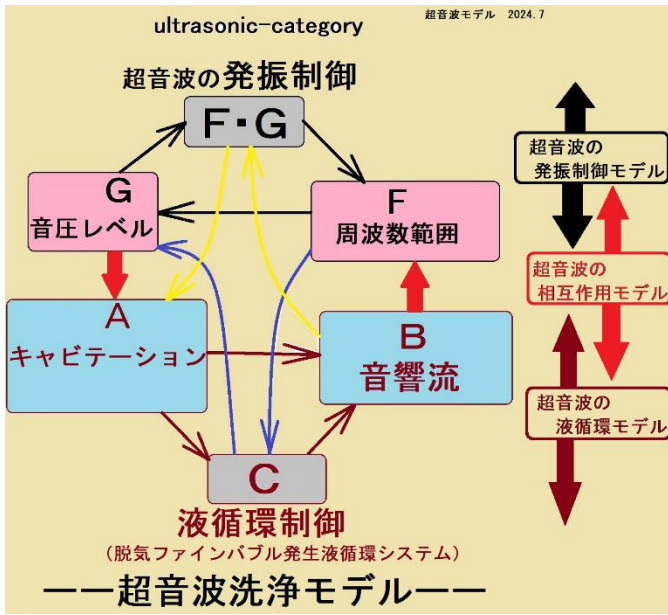




超音波発振システム



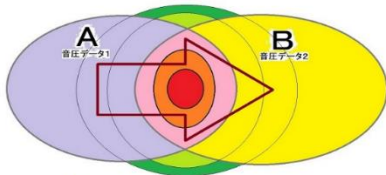
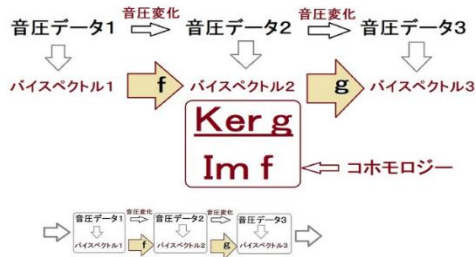
超音波プローブの特性評価



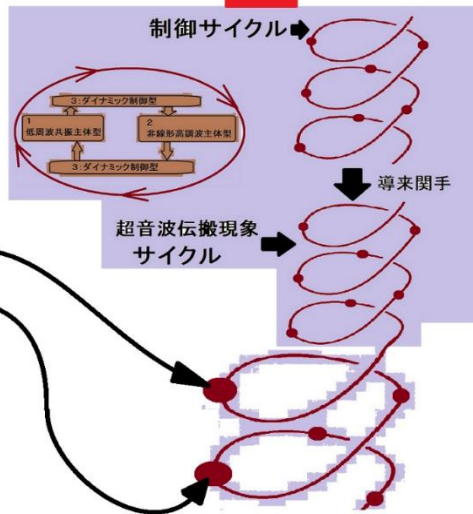
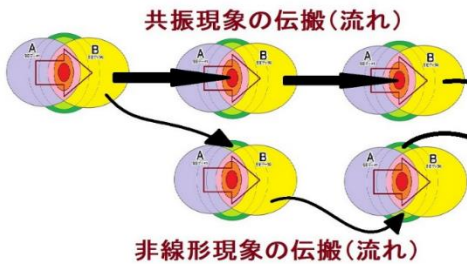
＜超音波の抽象代数モデル＞

超音波システム研究所
2023. 12. 5

**核(kernel)
像(image)**



AからBが層の**カテゴリー**であれば、
線形現象・共振現象により**低調波が発生する**
AからBが層の**カテゴリー**にならない**前層**のカテゴリーであれば
非線形現象の発生により**高調波が発生する**



超音波の伝搬特性

- 1) 振動モードの検出 (自己相関の変化)
- 2) 非線形現象の検出 (バースペクトルの変化)
- 3) 応答特性の検出 (応答特性の解析)
- 4) 相互作用の検出 (パワー寄与率の解析)

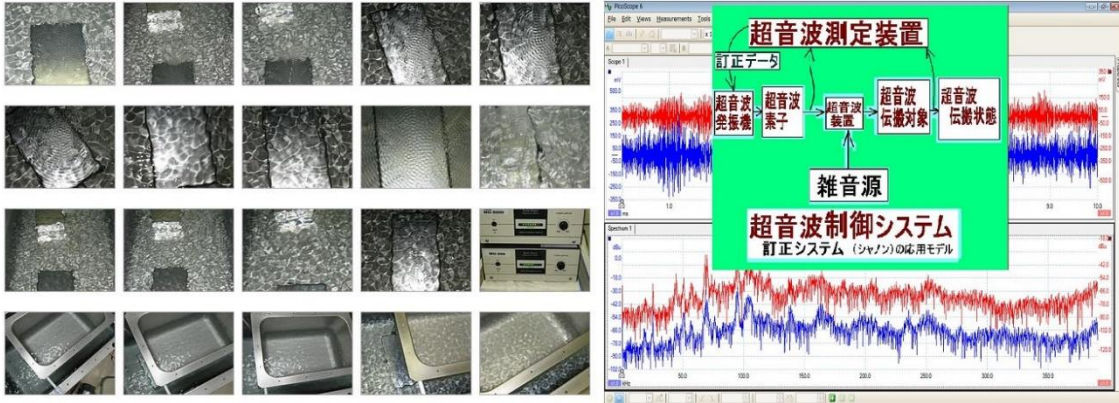
注: 「R」フリーな統計処理言語かつ環境

autcor: 自己相関の解析関数

mulmar: インパルス応答の解析関数

bispec: バースペクトルの解析関数

mulnos: パワー寄与率の解析関数



$$H = W \log_2 \pi e N$$



最も効果的な音響流制御タイミング (物の出し入れ)

シャノンのジャグリング定理を応用した「メガヘルツの超音波制御」方法

<https://www.ipros.jp/catalog/detail/586564>

<https://www.aperza.com/catalog/page/10010511/53668/>

シャノンの第一定理に関する経験—オリジナル技術開発—

<https://www.aperza.com/catalog/page/10010511/75817/>

<https://www.ipros.jp/catalog/detail/768701>

シャノンのジャグリング定理を応用した「超音波制御」方法

<http://ultrasonic-labo.com/?p=1753>

ジャグリング定理を応用した「超音波制御」方法

<http://ultrasonic-labo.com/?p=19322>

以上