

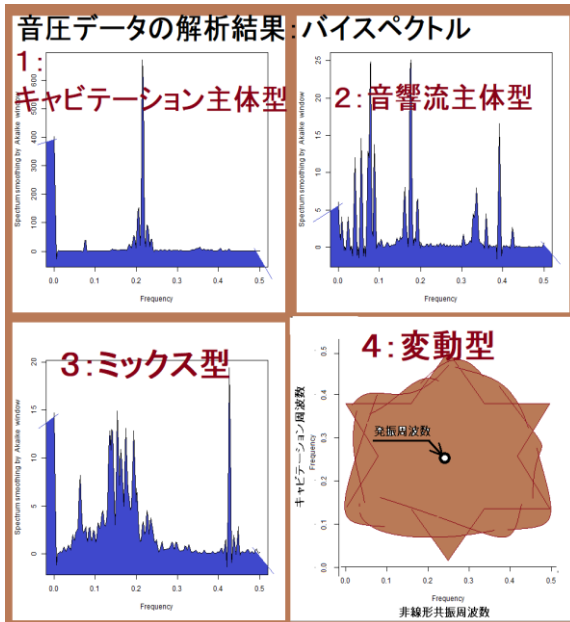
# 超音波とファインバブルのダイナミック制御による精密洗浄技術

## はじめに

超音波の安定したコントロールには、洗浄液の溶存気体の安定した状態が必要である。洗浄液の溶存気体が均一な濃度で洗浄水槽内に分布をした状態では、超音波が水槽全体に均一に広がり、超音波（音圧、周波数、変化）の制御が目的に合わせて実現出来る。しかし、超音波・ファインバブルの洗浄現象には、洗浄対象物を含め、超音波振動子・水槽・治具・・・沢山の条件（サイズ、材質、構造、製造方法、設置方法・・・）があり、それぞれの影響が複雑に関連している。（例：キャビテーションが、溶存気体濃度の分布を変化させている）

その中で、最も重要な事項が、音響流（非線形現象）である。

超音波の音圧データを測定・解析（バイスペクトル）・評価することで、超音波のキャビテーションと音響流の関係性について分類を実現した。この分類に基づいて、超音波とファインバブルによる洗浄・乳化・分散・加工・化学反応・表面処理・・・を行っている。その結果、超音波とファインバブルの制御により、目的とする音響流（非線形現象）のダイナミック制御が実現した。



超音波(キャビテーション・音響流)の分類

図1：キャビテーション・音響流の分類

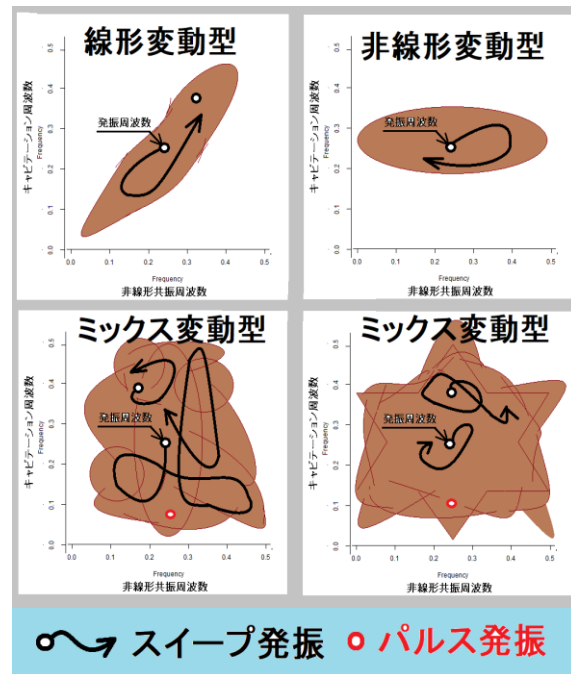
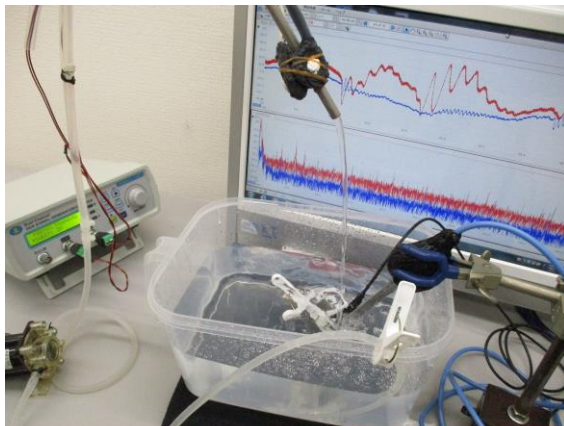


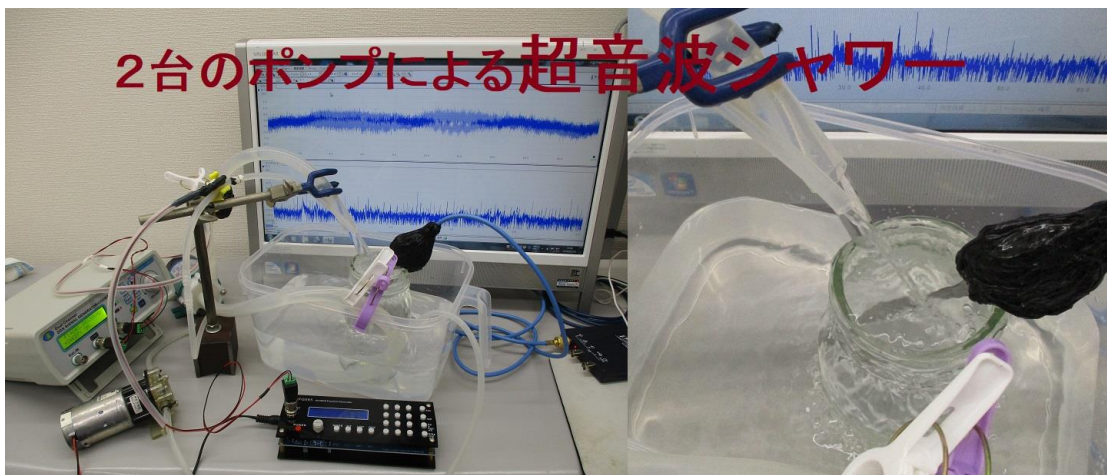
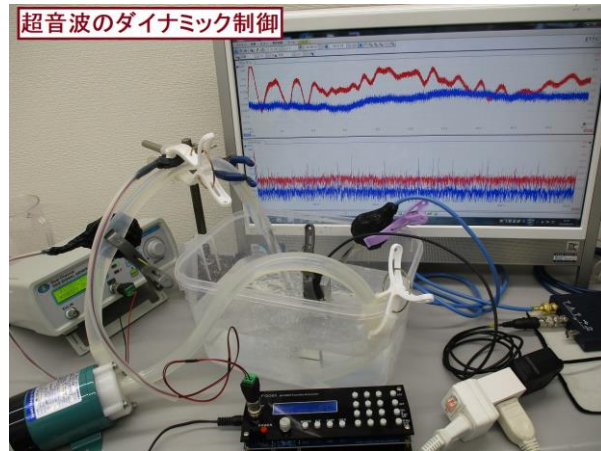
図1-2 変動型の分類

特に、100 kHz以下の超音波と1メガヘルツ以上の超音波の組み合わせによる、ファインバブル超音波シャワーの利用で、金属表面の金属組織への刺激処理は、精密洗浄をはじめ、新しい効果に発展している。

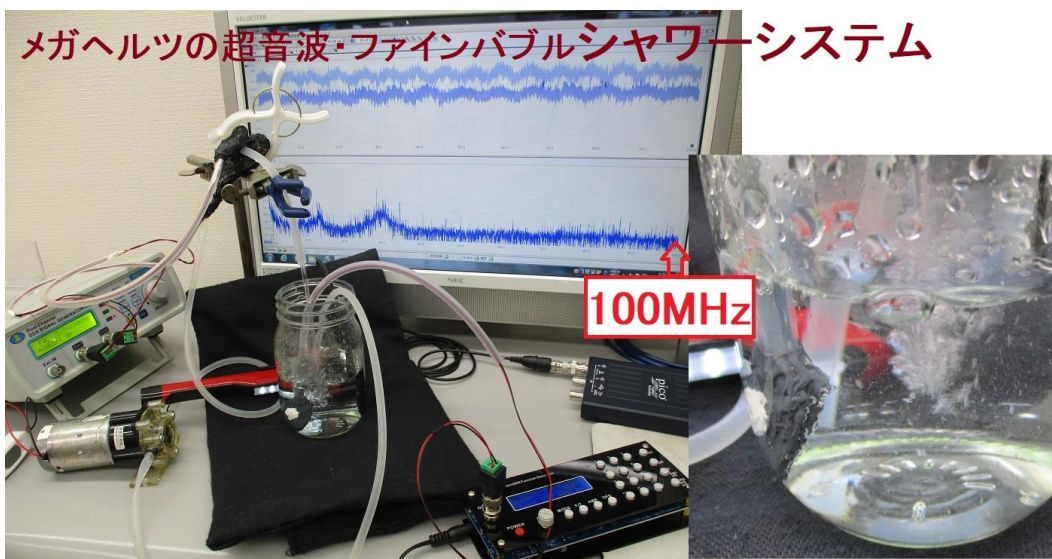
## 超音波プローブを利用した超音波シャワー



チタン製ストローを利用した超音波シャワー



## メガヘルツの超音波・ファインバブルシャワーシステム



## 2. どのようにして解決するのか？

2. 1 脱気ファインバブル発生液循環装置による、洗浄液（洗剤濃度、溶剤濃度、溶存酸素濃度）の均一化により、超音波（音圧レベル、周波数分布）を安定して制御可能な状態にする。

<<脱気ファインバブル発生液循環装置>>

2. 1-1) 揚程の高いマグネットポンプあるいはギアポンプの吸い込み側のホースを絞ることで、キャビテーションを発生させる。（禁止事項だが20年以上問題なく動作する）

2. 1-2) キャビテーションにより溶存気体を含んだ気泡が発生する。

上記が脱気液循環の状態。

2. 1-3) 洗浄液の溶存気体濃度が低下すると、キャビテーションによる溶存気体の気泡サイズが小さくなる。

2. 1-4) 水槽内の洗浄液全体が循環する、適切な液循環の設定により、 $20\mu$ 以下のファインバブルが発生する。

上記が脱気ファインバブル発生液循環の状態。

2. 1-5) 上記の脱気ファインバブル発生液循環状態に対して（高次の高調波を伴ったダイナミックな）超音波を照射すると、ファインバブルを超音波が分散・粉碎して、ウルトラファインバブルが発生する。測定を行うと、ウルトラファインバブルの分布量がファインバブルの分布量より多くなる。

上記が、超音波制御可能な液循環状態。

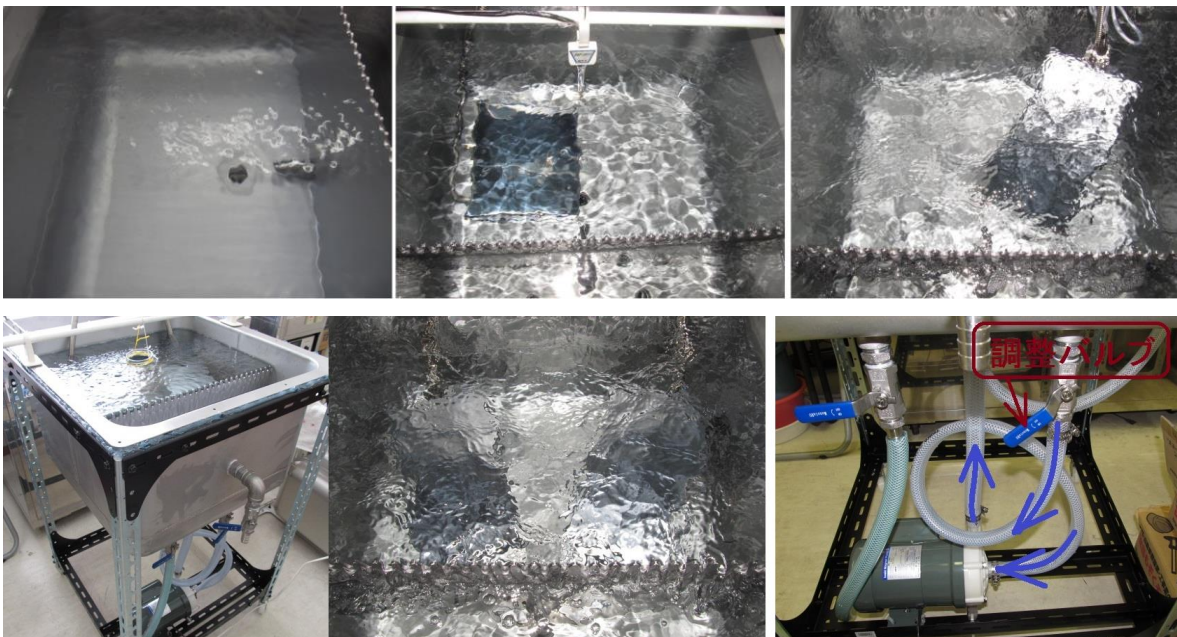


写真1：脱気ファインバブル発生液循環システム

2. 2 均一な洗浄液と適切な液循環に基づいて、

## 対象物に有効な超音波

(キャビテーションと音響流のダイナミック特性)を測定・確認する。

超音波と液循環の非線形制御により、音響流をコントロールすることで、

目的に合わせた効果的な超音波のダイナミック制御が実現する。

特に、100kHz以下の高出力(300-600W)の超音波と、

低出力(10-30W)の1-10メガヘルツの超音波を発振制御することで、

音響流(非線形現象)のコントロールが可能になる。

(上記の超音波による洗浄液は10-3000リットルが対象範囲)

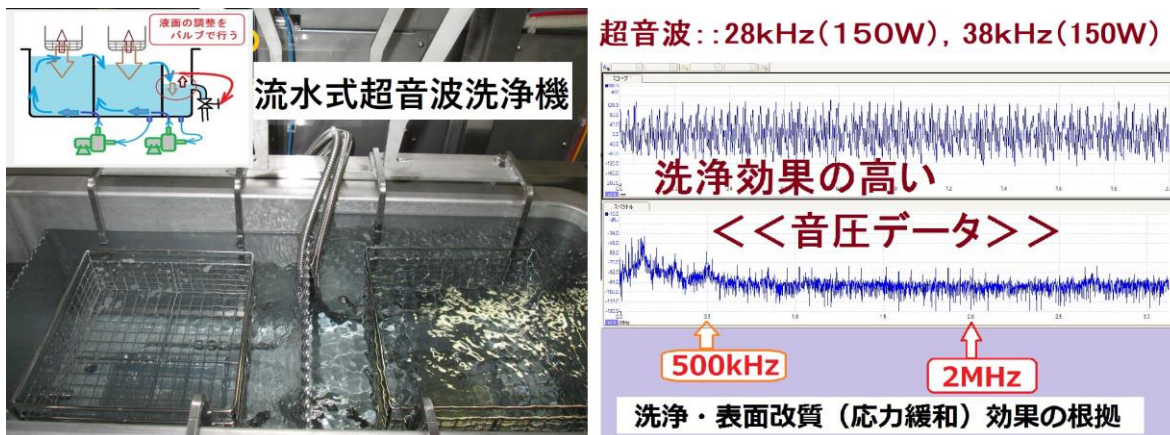
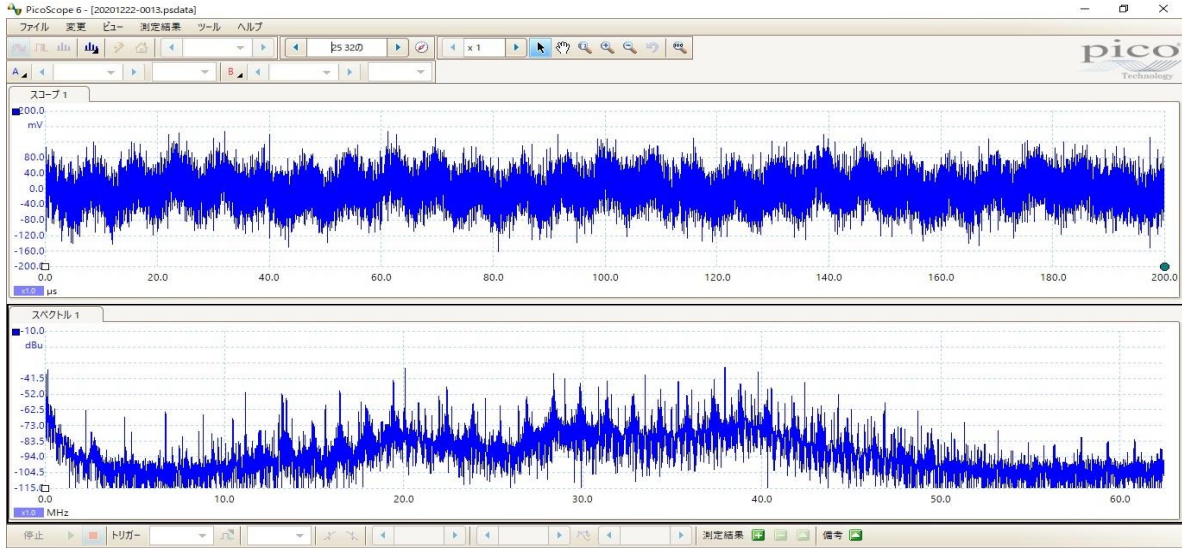


図2：超音波洗浄機と音圧データ

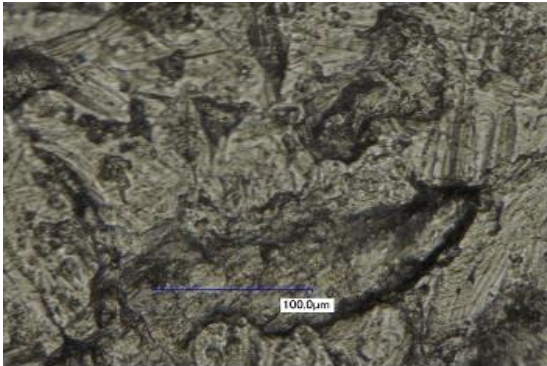
注意事項<音圧測定解析に基づいた、音響流とキャビテーションの最適化>

- 1) 洗浄液が淀まない洗浄水槽と液循環を採用
  - 2) 強度バランスの良い(特に弱い部分のない)洗浄水槽構造を採用
  - 3) 洗浄液の分布を均一にする(溶存気体濃度、洗剤濃度、液温、流速 等)
  - 4) 振動子上面の洗浄液の流れを調節可能にする(流量・流速・バラツキをコントロール)
  - 5) 超音波の主要周波数の出力にあわせた液循環を設定
  - 6) 洗浄水槽の強度バランスは超音波の主要周波数の1/2,1/4,1/8,・・・周波数に対して設定
  - 7) 洗浄水槽の製造方法は、超音波の主要周波数の減衰レベルに合わせて設定
  - 8) 洗浄操作、液循環、音響流・流体の流れに対して、洗浄水槽の特性を設定  
(例 水槽のコーナー部の設計、オーバーフロー槽の構造、・・・)
  - 9) 音響流のダイナミック特性により洗浄システムとしての制御構造を設定
- 以上のパラメータを考慮して超音波の伝搬(洗浄)状態を最適化する

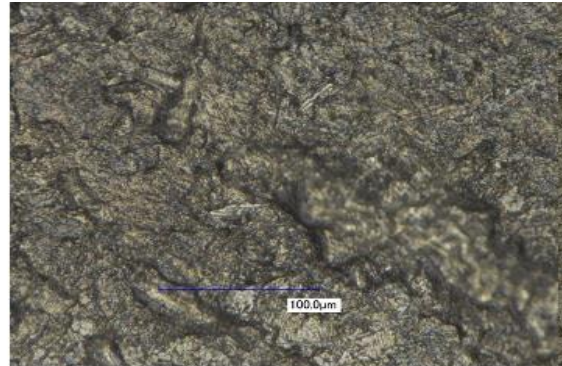


グラフ上 縦軸: 電圧 -200~200mV 横軸: 時間 0-200 μs  
 グラフ下 縦軸: -10dBu~-115dBu 横軸: 0-64MHz

### 超音波水槽の音圧データ



標準品



超音波ファインバブル処理品

汚れの除去  
 表面への細かい刺激



図3：音圧データと表面処理（洗浄・残留応力の緩和）結果

## 2. 3 音圧データの測定・解析・確認

洗浄目的に最適な超音波伝搬状態（音響流）を、量産対応として実現する

（各種の相互作用を解析確認）

2. 3-1) 超音波専用水槽に対して、超音波とファインバブルで表面処理を行う

2. 3-2) 水槽の設置

1：ダイナミックな振動変化に対して（共振・干渉の少ない）専用部材を使用

2：水槽の音響特性に合わせた主要超音波周波数・出力の最適化

2. 3-3) 超音波振動子は専用部材を利用して、音響流を目的の状態にする

2. 3-4) 目的の超音波状態を音圧測定解析（超音波テスター）で確認する。

ポイント

適切な超音波（周波数・出力）と液循環のバランスが重要。

液循環の適切な流量・流速と超音波キャビテーションの設定により

超音波による音響流のダイナミックな変化をコントロールする。

ファインバブルの効果として、均一に広がる超音波伝搬状態が

水槽サイズや液量の拡大による超音波の減衰問題を解決する。

水槽内の液体全体の液循環と液体の均一化により、超音波の伝搬効率が高くなる。

（10Wの超音波出力でも

1000リットルの洗浄液全体にキャビテーションを発生させることができる。

200Wの超音波出力で

4000リットルの洗浄液全体にキャビテーションを発生させることができる。）

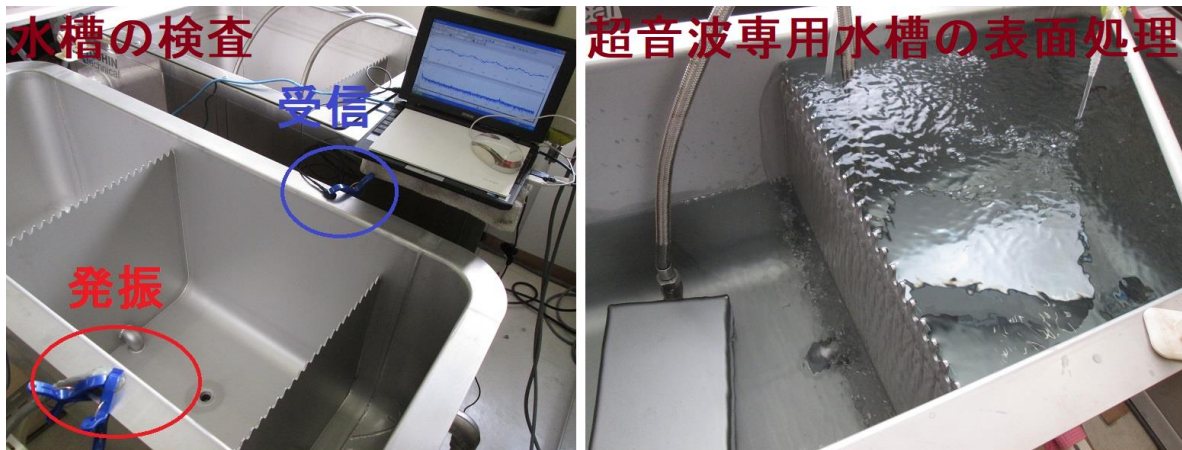


写真2：水槽の検査、水槽の表面処理

## 2. 3-5 << 超音波の音圧測定・解析 >>

2. 3-5-1) 音圧の時系列データに関して、多変量自己回帰モデルによるフィードバック解析で、測定データの統計的な性質（超音波の安定性・変化）を解析評価

2. 3-5-2) 超音波発振による影響を、インパルス応答特性・自己相関の解析により対象物表面への超音波振動応答特性として解析評価

2. 3-5-3) 発振と対象物（洗浄物、洗浄液、水槽・・・）の相互作用を、パワー寄与率の解析により評価

2. 3-5-4) 超音波の利用目的（洗浄・加工・攪拌・・・）に関して、超音波効果の主要因である対象物（表面弾性波の伝搬）あるいは対象液に伝搬する非線形振動（バيسペクトル解析結果）現象を、超音波のダイナミック特性として解析評価

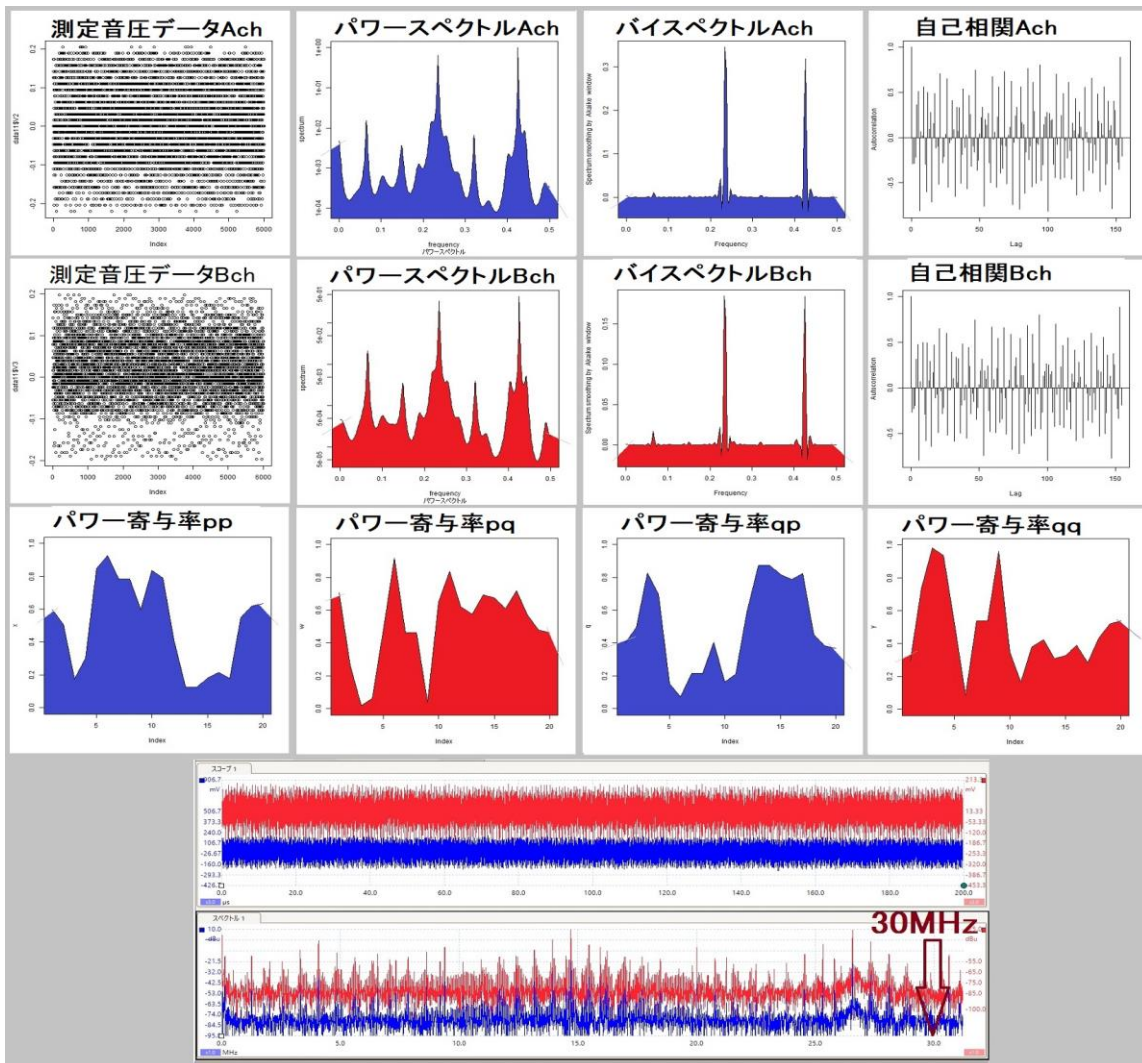


図4：音圧データの解析結果（自己相関・バイスペクトル・パワースペクトル・パワー寄与率）

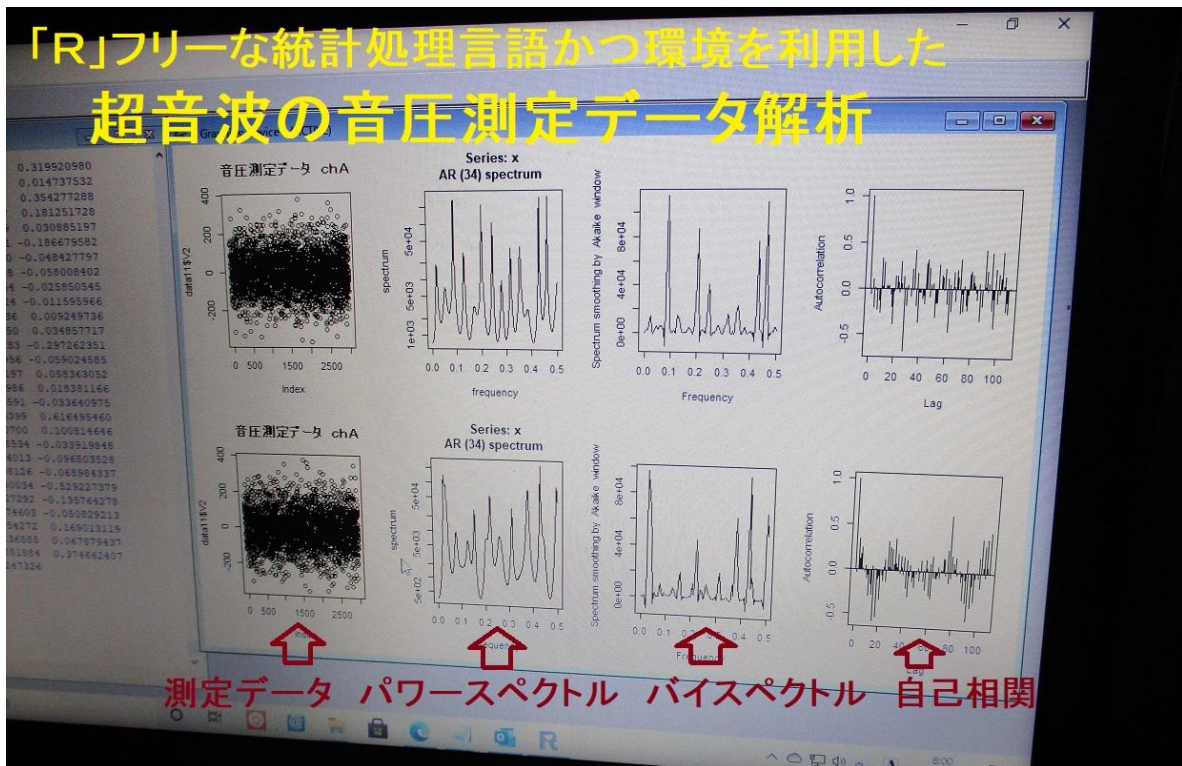
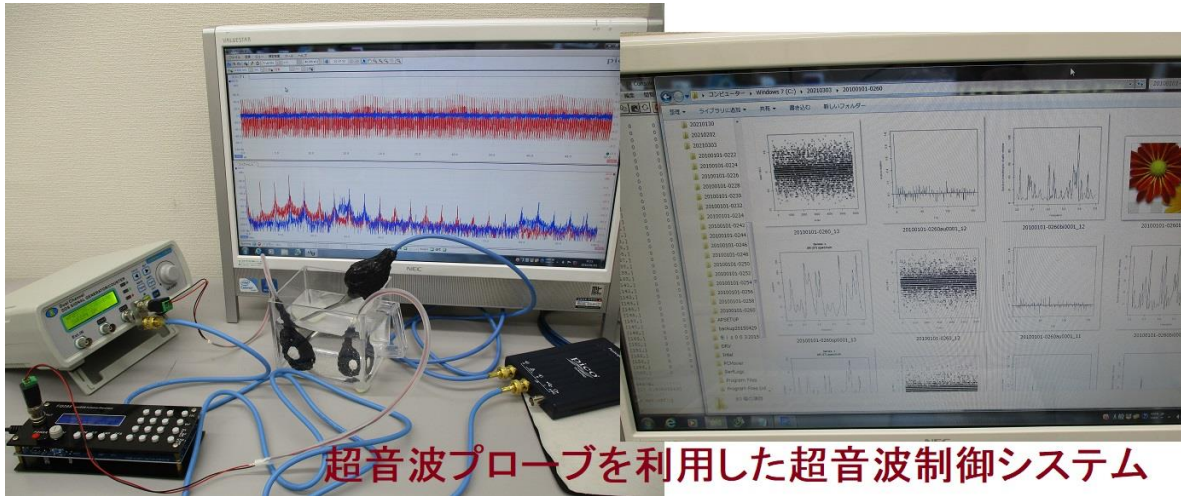
この解析方法は、複雑な超音波振動の音圧データを、時系列データの解析手法に適応させる、これまでの経験と実績に基づいて実現している。

注：解析には下記ツールを利用

注：OML(Open Market License)

注：TIMSAC(TIME Series Analysis and Control program)

注：「R」フリーな統計処理言語かつ環境





## 2. 4 <上記の問題に対する実用的な対応>

ファインバブル・超音波・液循環について、実用的な制御・管理を行うために、以下の技術を利用。

### 2. 4. 1 超音波伝搬状態の測定・解析技術

#### << 超音波測定解析システム（超音波テスター）>>

特徴（100MHz仕様の場合）

- \*測定（解析）周波数の範囲 0.1Hz から 100MHz
- \*表面の振動計測が可能      \*24時間の連続測定が可能
- \*任意の2点を同時測定      \*測定結果をグラフで表示
- \*時系列データの解析ソフトを添付

超音波プローブを利用して、様々な測定

（洗浄液の音圧、洗浄物・洗浄水槽・治工具の表面振動・・・）を行う。

測定した音圧データについて、位置や状態・弾性波動を考慮した解析で、  
各種の振動・相互作用・・・を音響特性として検出・評価する。

## 超音波テスター（タイプNA）

超音波機器の音圧管理から音響特性を確認して

### 最適な超音波の「管理」・「検討」が可能なセット

内容

超音波洗浄機の音圧測定専用プローブ 1本

超音波測定汎用プローブ 1本

オシロスコープセット 1式

解析ソフト・説明書・各種インストールセット 1式(USBメモリー)



写真3：超音波測定解析システム

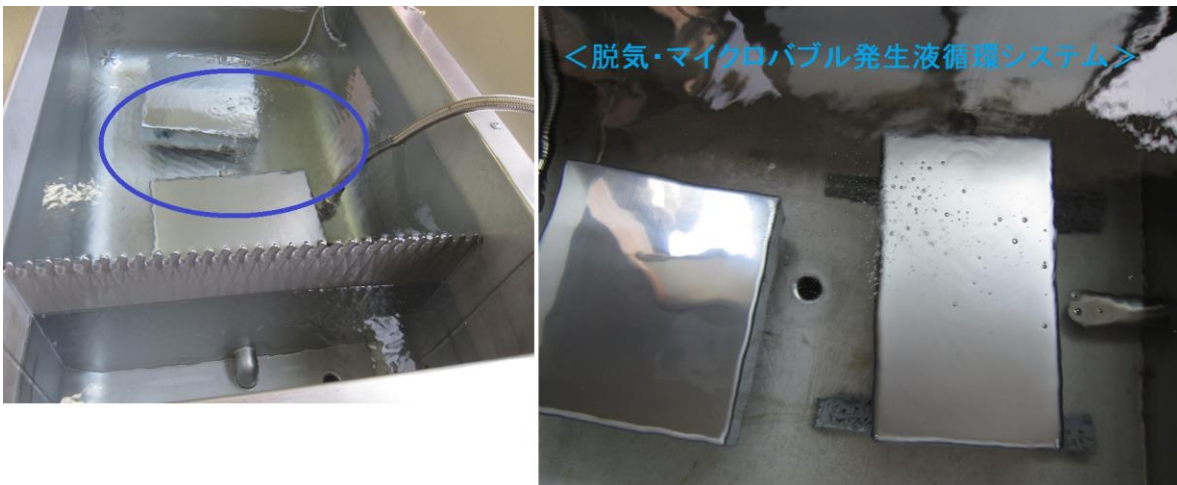
#### 2. 4. 2 超音波専用水槽の設計・製造技術

水槽構造を適正に設計（例 汚れの流れを考慮したオーバーフロー構造）。溶接や加工に対して超音波の減衰要因を小さくする製造方法（溶接位置や加工方法）を採用。

水槽や超音波振動子の表面は、ファインバブルと超音波による、表面改質（表面残留応力の緩和処理）を行う。

#### 2. 4. 3 液循環技術

脱気・ファインバブル発生液循環（水槽内に溶存している気体を一定レベルに脱気して、脱気できないレベルの気体の一部をファインバブルにする）



**写真4**：オーバーフローによる流れで、空気が大量に水槽に入り、超音波が大きく減衰するという現象が起きないファインバブル発生液循環の状態。

ポイント：適切な超音波とファインバブル発生液循環のバランス。ファインバブル発生液循環の適切な流量・流速と超音波（出力・周波数のダイナミックな変化）の設定により、超音波（キャビテーション・音響流の効果）をコントロール。

ファインバブル発生液循環により、以下の自動対応が実現。

- 1) 溶存気体は、水槽内に分布を発生させ、レンズ効果・・・により、超音波が減衰。
- 2) 適切な超音波照射時は、大量の空気（気体）が液面から水槽内に取り入れられても、キャビテーションによる、大きな気泡となり、水槽の液面から出ていく。

（従って、超音波照射を行っていない状態で、大量にオーバーフローの液循環を行い続けると水槽内に、不均一な濃度分布が発生する。）しかし、この空気を取り入れる操作は必要。液循環の無い水槽で、長時間超音波照射を行い続け、溶存気体の濃度が大きく低下する部分が発生すると、一時的には高い音圧が実現するが、継続して音圧を測定解析すると、音圧も超音波周波数も大きく低下して、キャビテーションや音響流の効果も小さくなる（不安定な超音波の状態を繰り返しながら超音波の効果が小さくなっていく）。この濃度分布の解決には、ファインバブ

ルの効果（分散性）が必要。洗浄水槽内の洗浄液全体を均一にするためには、水槽に合わせた、脱気・ファインバブル発生液循環により均一な溶存気体濃度分布が実現する。この洗浄液の状態により、超音波の音圧と周波数（キャビテーションと音響流）の制御が可能になる。液循環制御条件（液の吐出・吸い込み位置、流路、流量、流速分布）のコントロールにより、洗浄対象へ目的の超音波伝搬状態が実現する。以上の各技術を基礎として、対象物へのファインバブルと超音波の制御を実現。

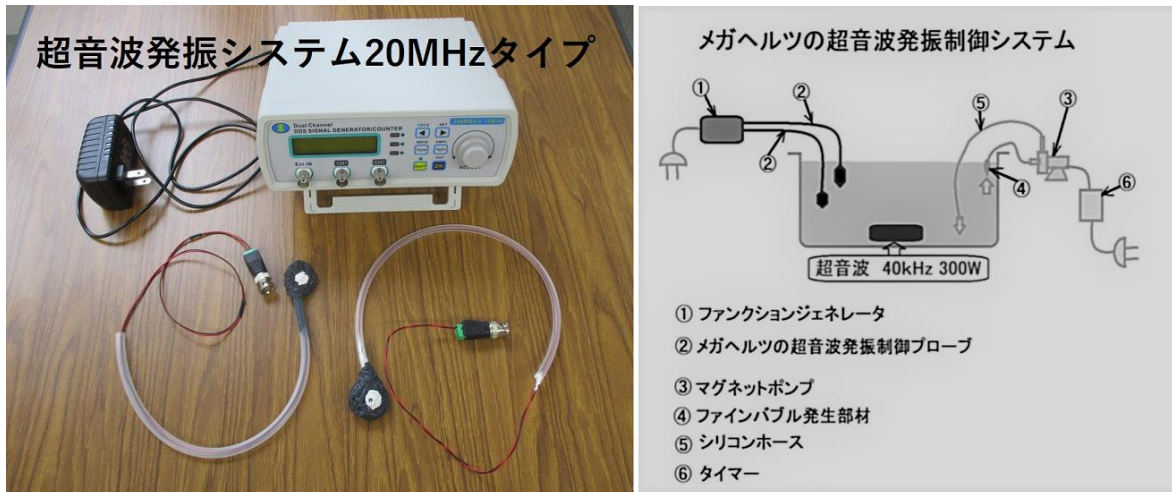


図5：メガヘルツの超音波発振システム

### 3. どうして新しい超音波システムなのか？

超音波システムの特徴

機械設計技術（材料力学、流体力学、熱力学、加工工学、振動工学、・・・）

制御設計技術（自動制御工学、システム工学、統計学、プログラミング・・・）

上記により、現状では検出・解決が難しい、ファインバブルと超音波伝搬状態の最適化問題を解決した。その結果、超音波システム研究所は、「音響流のコントロールによるメガヘルツの超音波制御」技術を開発。

超音波発振制御プローブとファンクションジェネレータにより 20 kHz～10 MHz の超音波発振制御を行うことで、1～100 MHz の音響流（超音波伝搬状態）制御が可能な超音波洗浄技術に発展した。

超音波伝搬状態の測定・解析・評価・技術に基づいた、精密洗浄・加工・攪拌・・・への新しい応用技術。

各種材料の音響特性（表面弾性波）の利用により、20W以下の超音波出力で、1000リッターの水槽でも、対象物への超音波刺激は制御可能。

弾性波動に関する工学的（実験・技術）な視点と、抽象代数学の超音波モデルにより、音響流（非線形現象）の応用方法として開発。

ポイントは、治工具（弾性体：金属・ガラス・樹脂）の利用。対象物の条件・・・により、超音波の伝搬特性を確認することで、オリジナル非線形共振現象（注1）として応用。

注1：オリジナル非線形共振現象

オリジナル発振制御により発生する高調波の発生を、共振現象により高い振幅に実現させたことで起こる超音波振動の共振現象

## 4. <具体例>

超音波とファインバブルの効果（洗浄・表面改質・・・）について

使用しているファインバブルは、対象物の表面・超音波との相互作用により、複雑な形状変化（球状、線状、樹状構造・・・）が発生する。特に、 $10\mu$ 以下のファインバブルに対するメガヘルツの超音波刺激（制御）により、洗浄・表面改質・・・が高い効率で実現する。

この超音波とファインバブルの刺激を超音波制御技術として応用発展させている。

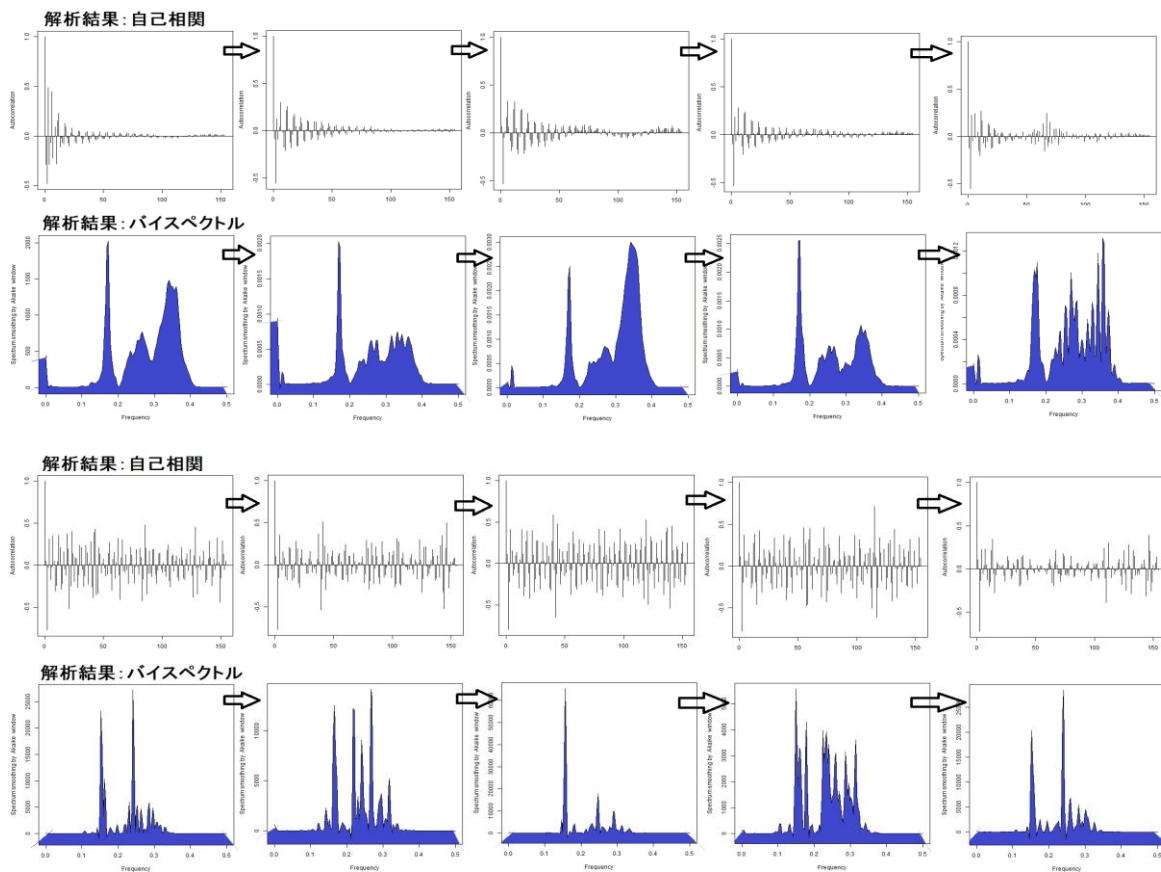


図6：超音波のダイナミック制御（100MHz以上の高調波の発生）

超音波伝搬状態のコントロール技術を応用した、各種の**超音波利用事例**。

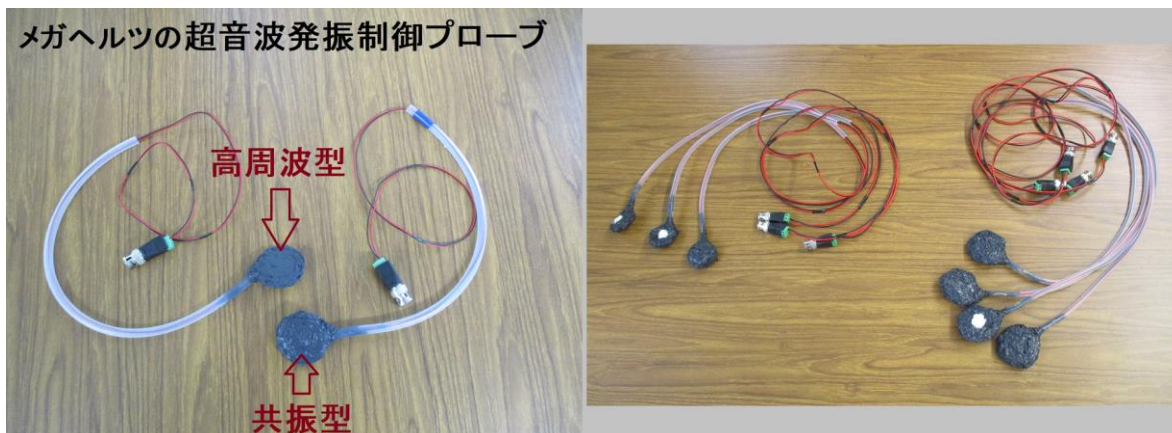


写真5：超音波発振制御プローブ

1：超音波発振制御（超音波プローブの製造技術）

【対応課題】超音波利用について、超音波の伝搬周波数の範囲と、測定解析の周波数範囲を広げることで、目的に合わせた超音波伝搬現象を効率よく効果的に実現。

オリジナル超音波発振制御プローブ

測定解析範囲 0.01Hz～1GHz

発振範囲 0.1kHz～20MHz

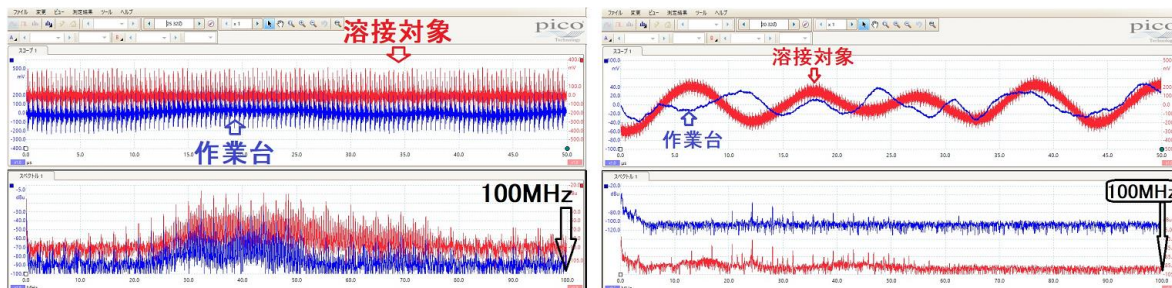


図7：超音波溶接の音圧データ

2：超音波溶接

【対応課題】溶接時・溶接部の温度管理が難しく、溶接後、表面残留応力のバラツキが大きい  
ため、強度（特に、金属疲労強度）の低下・ミクロの割れ・・・が発生する問題を超音波伝搬制御で改善。

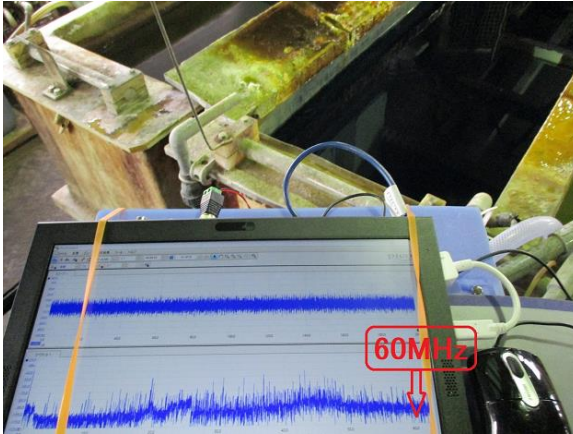


写真6：超音波めっき処理

### 3：超音波めっき

【対応課題】めっき処理の化学反応は制御が難しく、大量にめっき処理を行うと、めっき後、めっき厚さ・光沢・硬度・成分・・・のバラツキが大きく、強度（特に、金属疲労強度）の低下、変色、・・・が発生する。この問題を、各種の化学反応に応じた超音波のダイナミック制御で改善。

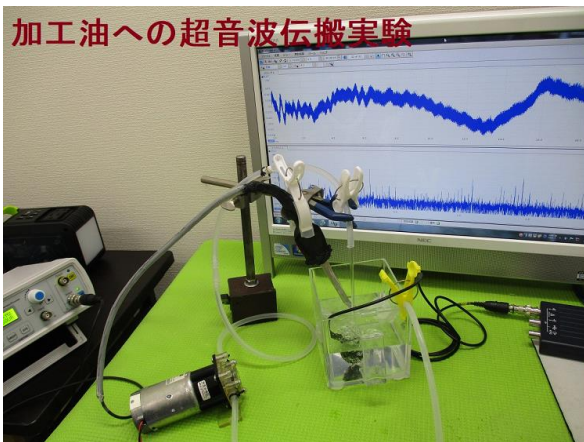


写真7：超音波加工

### 4：超音波加工

【対応課題】機械加工時・加工部（刃物・加工油・加工表面）の各種管理が難しく、加工後、加工表面残留応力のバラツキにより、精度、強度（特に、金属疲労強度）の低下・不均一な表面状態・・・が発生する。この問題を、加工油へ（加工による振動モードに合わせた）メガヘルツの超音波伝搬制御で改善。



写真8：流水式超音波洗浄機

5：流水式超音波洗浄機

【対応課題】超音波洗浄機利用について、超音波洗浄効果の主要因である音響流を測定解析評価することで、洗浄目的に合わせた音響流のコントロールが実現。各種部品の精密洗浄に応用。

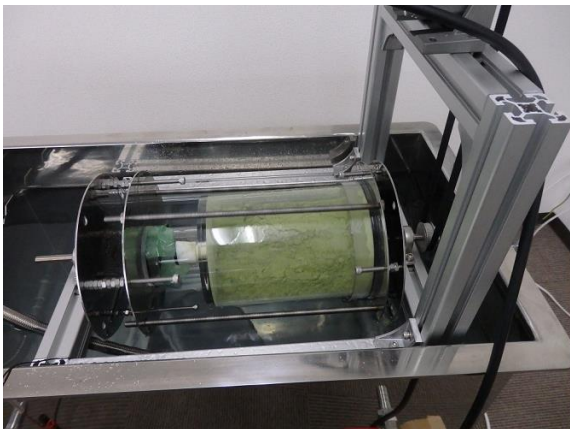


写真9：超音波処理（攪拌・乳化・分散・・・）装置

6：【発明の名称】超音波処理装置及び超音波処理方法

【対応課題】超音波の発振により、被処理液中の物質を分散させたり、使用済みの洗浄液等に含まれる油等の汚れを分解したりすることが簡単にできる超音波処理装置について、メガヘルツの超音波によるラジカル反応をウルトラファインバブルとの相互作用で、洗浄した油分の分解を効率よく実現（具体例：廃液を十分の一に削減）。

注：各社との実績に基づいた超音波制御技術（特許出願済み）

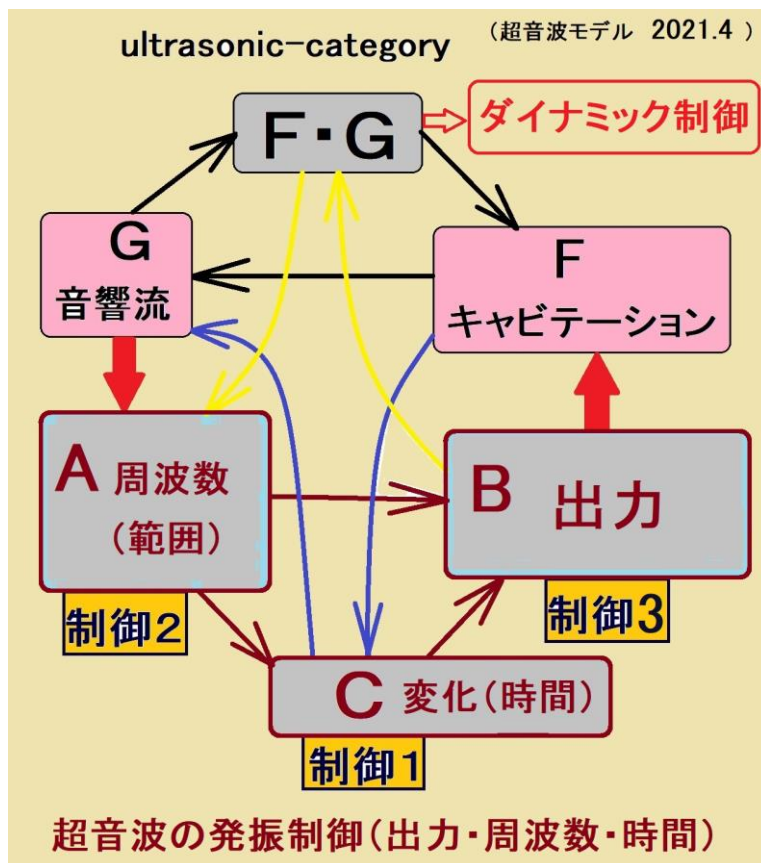
## まとめ

技術の進化とともに、新しい応用（ナノ粒子・粉末の表面処理・・・）や、新しい組み合わせの可能性が大きく広がっている。特に、異質なジャンルや根本的な学問（数学の圏論やシステムに関する哲学的な思考）を取り入れることで、今後ますます超音波・ファインバブルという組み合わせの技術は飛躍すると感じる。

ファインバブルの可能性を考え、各種の偏った考え方を捨て、自由な超音波・ファインバブルに対する発想により、新たな応用を検討していきたいと考えている。

## 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年）
- 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年）
- 3) 川端 昭/編著 一之瀬 昇/高橋 貞行 著：  
やさしい超音波工学：工業調査会（1998年）



以上