

超音波（キャビテーション・音響流）の分類

超音波システム研究所 齊木和幸

序章

○研究の背景

超音波洗浄機の音圧測定については、
USMAJ S-004 超音波出力測定法（注1）により、
「超音波の音響エネルギーが洗浄槽へ放射されると熱に変換される事を利用し、
水温上昇を測定する事で超音波出力を求める方法」が採用されている。

注1) 超音波工業会規格 改訂年月：2016.11（旧 JIETA 規格番号：AE-4005A）

○研究の目的

超音波による振動現象はダイナミックに変化している。
特に複数の振動モードが複雑に発生していると、
非線形現象による高調波が発生し、各種の主要効果として実用化されている。
従って、超音波の時間経過に伴う振動現象の測定解析が必要である。
そのために、音圧測定解析システムを開発し、測定データの解析に基づいて超音波洗浄機の状態を評価する技術の開発を目的とした。

○構成

- 1) 超音波の音圧測定装置（超音波テスター）
- 2) 音圧測定・解析事例
- 3) 超音波（キャビテーション・音響流）の分類
- 4) 分類に基づいた超音波制御
- 5) 新しい超音波の可能性

○他社の超音波測定装置

- 1) 日本エマソン株式会社 ブランソン事業本部 型式 USM-015
超音波音圧計（ウルトラソニックメーター） 測定周波数 10kHz～2MHz
- 2) 株式会社カイジョー
超音波音圧計 測定周波数 14.5kHz～2MHz
- 3) 新科産業有限会社
超音波メーターSonic A0（旧 SM1000）型 測定周波数 1kHz～500 kHz
キャビテーションメーターMCT-2000&MCT-1200 Range: 20 kHz to 1.2 MHz

研究の手法

超音波の音圧変化に関する特性を利用して

超音波の伝搬状態を明確(数値、グラフ)にすることで、超音波の効果と伝搬状態の関係を調べる。

そのために、超音波の測定解析が容易にできる

超音波テスターNA(オシロスコープ 100MHz タイプ)を開発した

システム概要(超音波テスターNA100MHz タイプ)

1. 内容

超音波洗浄機の音圧測定専用プローブ 1本

品番 120A16:タイプA

コード長さ 1000mm 先端部(ステンレス) 130mm 重量 76g 接続プラグ BNC

コード太さ 直径3mm (参考規格 ICE-61010 CATII)

超音波測定汎用プローブ 1本

品番 120B25:タイプC

コード長さ 1000mm 先端部(圧電素子) 直径22mm 重量 40g 接続プラグ BNC

コード太さ 直径3mm (参考規格 ICE-61010 CATII)

オシロスコープセット 1式

(・帯域幅(-3dB):100MHz ・最大サンプリングレート:1G サンプル/s)

解析ソフト・説明書・各種インストールセット 1式

2. 特徴(標準的な仕様)

* 測定(解析)周波数の範囲

仕様 0.1Hz から 100MHz

* 超音波発振

仕様 1Hz から 1MHz

* 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

超音波プローブによる測定システム。

超音波洗浄機の音圧測定専用プローブを水槽に入れて音圧測定を行う。

測定したデータについて、位置・状態・弾性波動を考慮した解析で、

各種の音響性能として検出。



写真1：超音波テスターNA（オシロスコープ 100MHz タイプ）

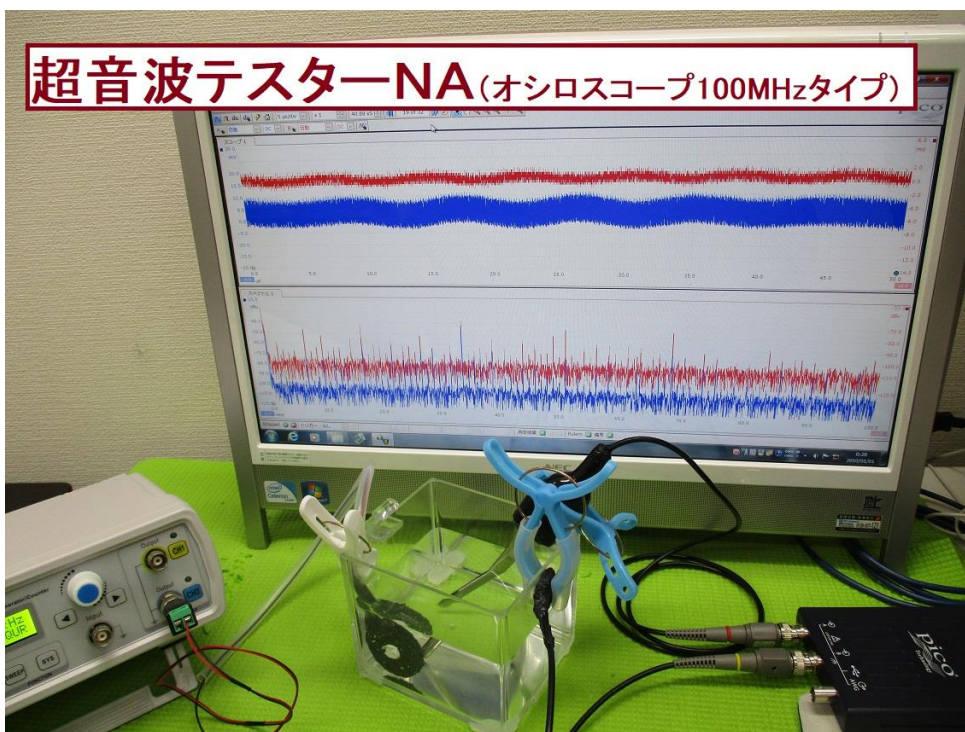


写真2：超音波テスターNAによる音圧測定状態

説明：グラフ青は、液体に伝搬している超音波の音圧

グラフ赤は、容器の表面に伝搬している超音波の音圧

<< 超音波の音圧測定データ解析 >>

1) 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により

測定データの統計的な性質（超音波の安定性・変化）について解析評価

2) 超音波発振による、発振部が発振による影響を

インパルス応答特性・自己相関の解析により

対象物の表面状態・・・に関して超音波振動現象の応答特性として解析評価

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

4) 超音波の利用（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超音波の

非線形（バイスペクトル解析結果）現象により

超音波のダイナミック特性を解析評価

この解析方法は、

複雑な超音波振動のダイナミック特性を

時系列データの解析手法により、超音波の測定データに適応させる

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する

注：OML、TIMSAC、「R」フリーな統計処理言語かつ環境

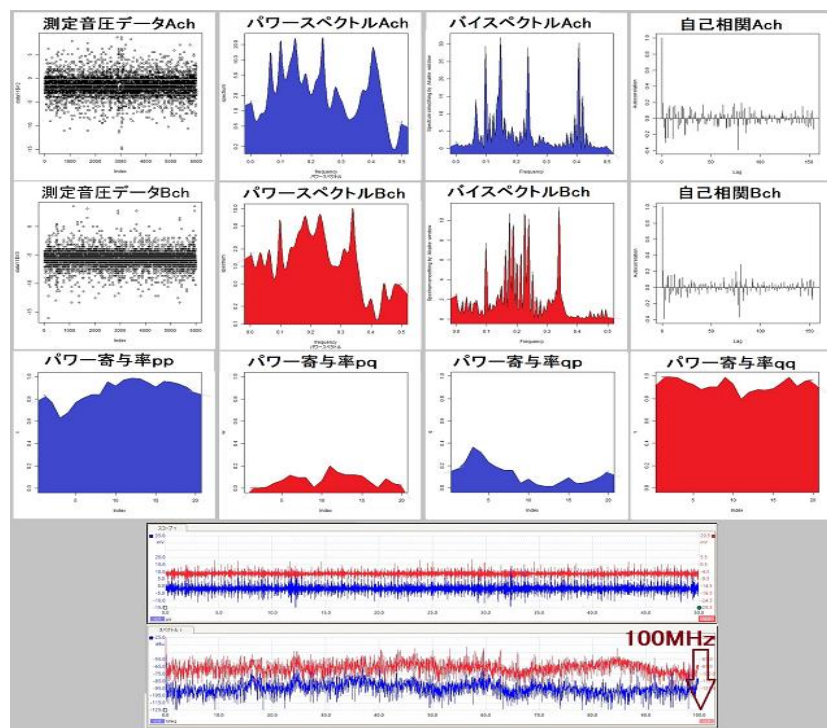
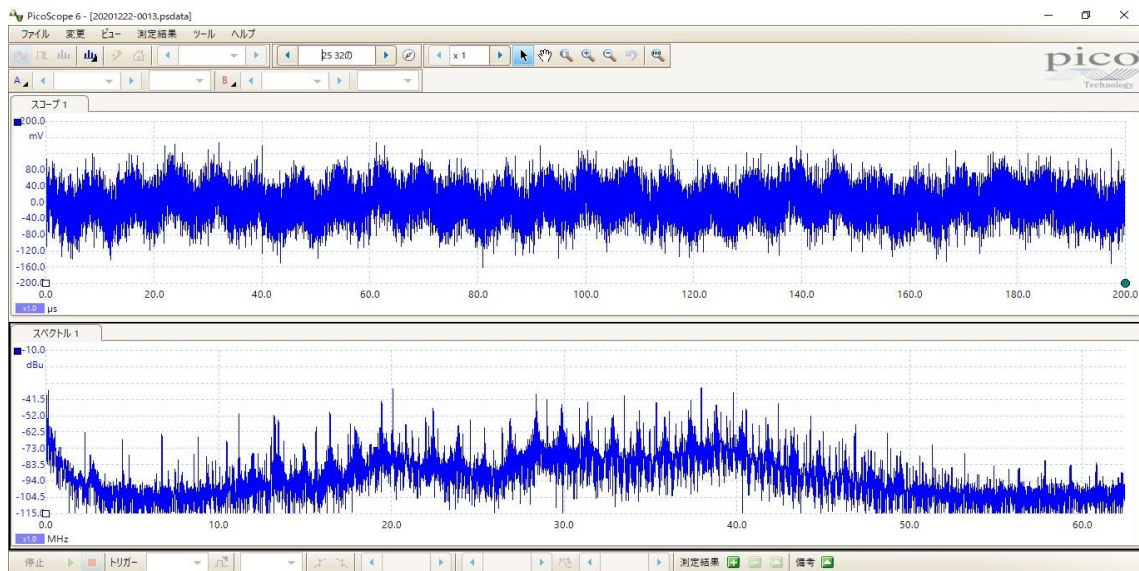


図 1：音圧測定解析

結果

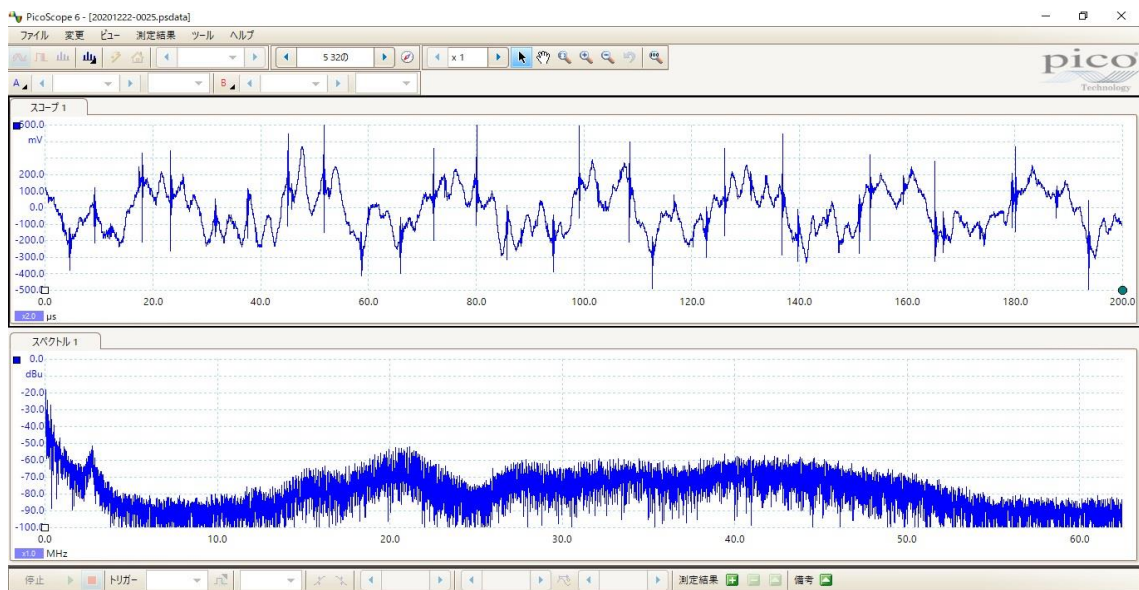
音圧測定データ



グラフ上 縦軸:電圧 $-200 \sim 200 \text{ mV}$ 横軸:時間 $0 \sim 200 \mu \text{s}$
グラフ下 縦軸: $-10 \text{ dBu} \sim -115 \text{ dBu}$ 横軸: $0 \sim 64 \text{ MHz}$

超音波水槽の音圧データ

図2: 音圧データ



グラフ上 縦軸:電圧 $-500 \sim 500 \text{ mV}$ 横軸:時間 $0 \sim 200 \mu \text{s}$
グラフ下 縦軸: $0 \text{ dBu} \sim -100 \text{ dBu}$ 横軸: $0 \sim 64 \text{ MHz}$

超音波水槽の音圧データ

図3: 音圧データ

実験装置

水槽(材質 塩ビ、サイズ 5m * 1m * 1.5m、 液量 6500リットル)

超音波1(35kHz 600W 1台 タイマーによるONOFF制御)

超音波2(ファンクションジェネレータによる66kHz~4.3MHzのスイープ発振 出力13V 1台)

脱気ファインバブル発生液循環装置(流量10リットル/min 2台 タイマーによるONOFF制御)



写真3:実験装置



写真4:実験装置

超音波と脱気ファインバブル発生液循環装置のONOFF制御設定により、超音波伝搬状態は様々に変化する。対象物の表面に効果的な刺激(非線形振動現象)が効良く発生する制御設定を検出して実験条件とする。

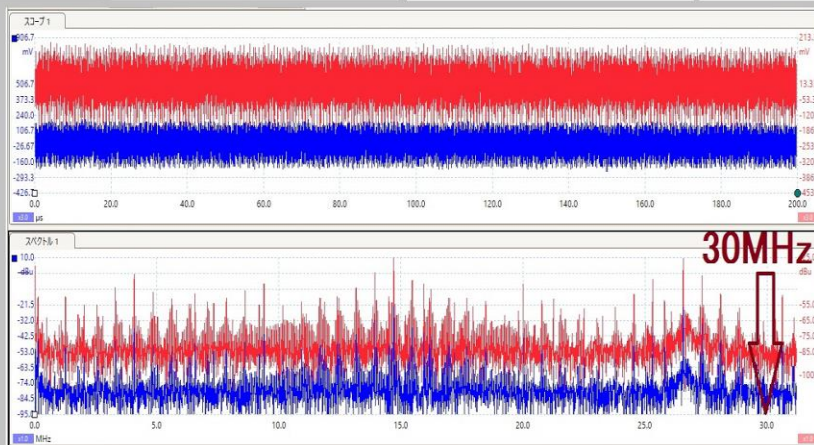
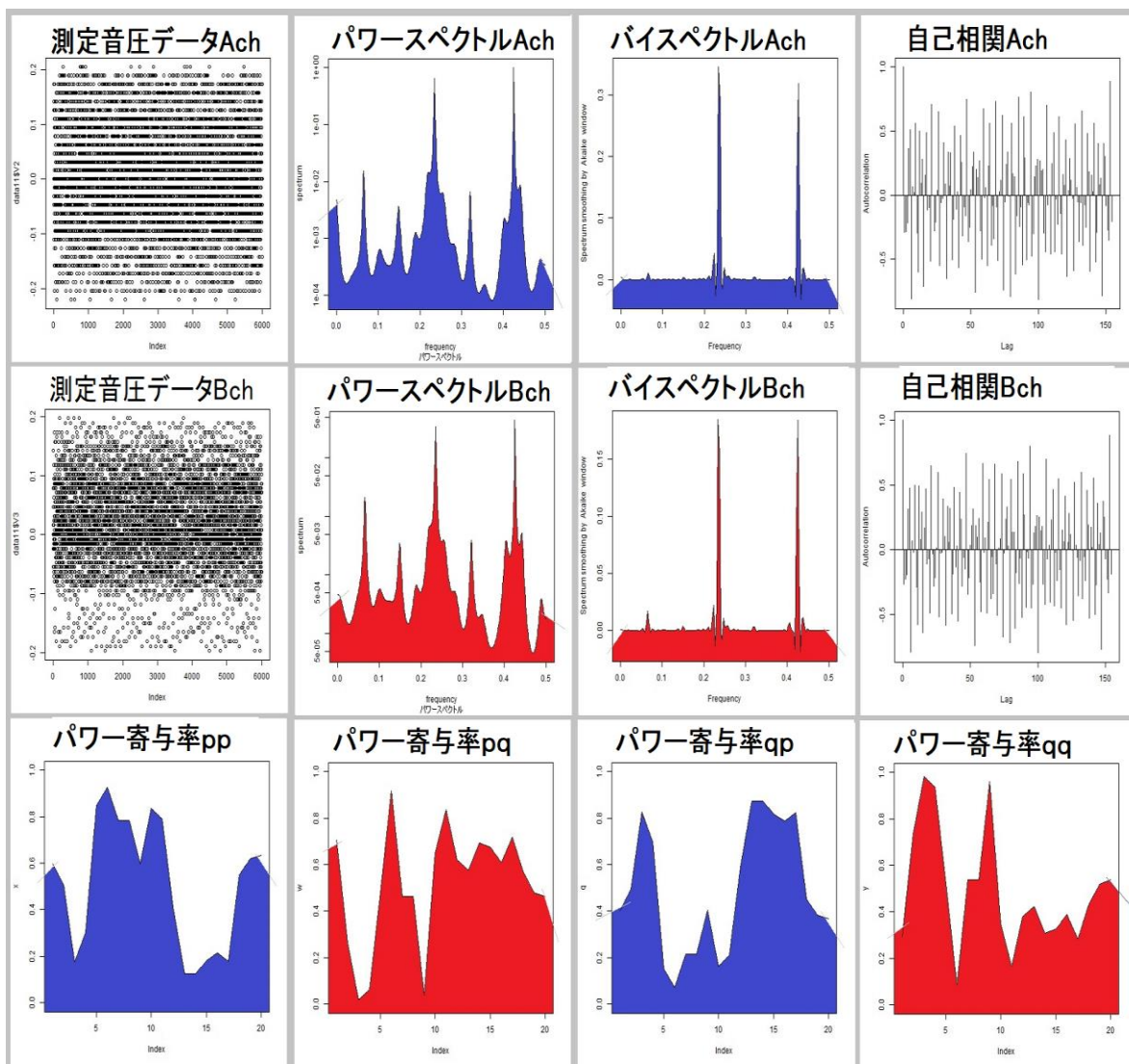


図 4：音圧測定解析結果

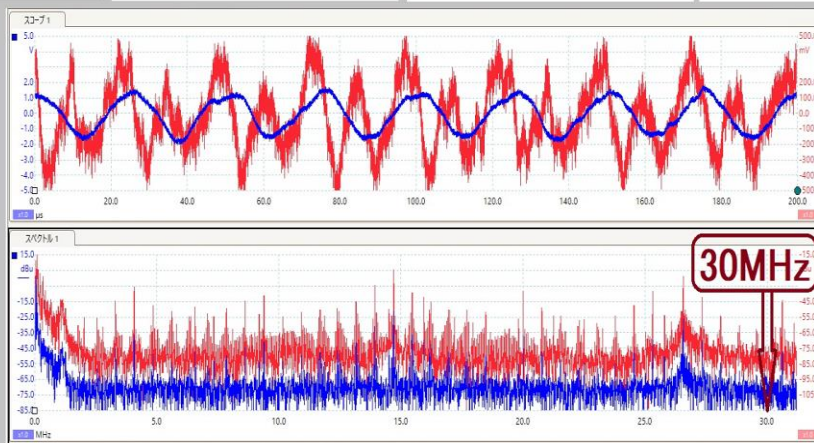
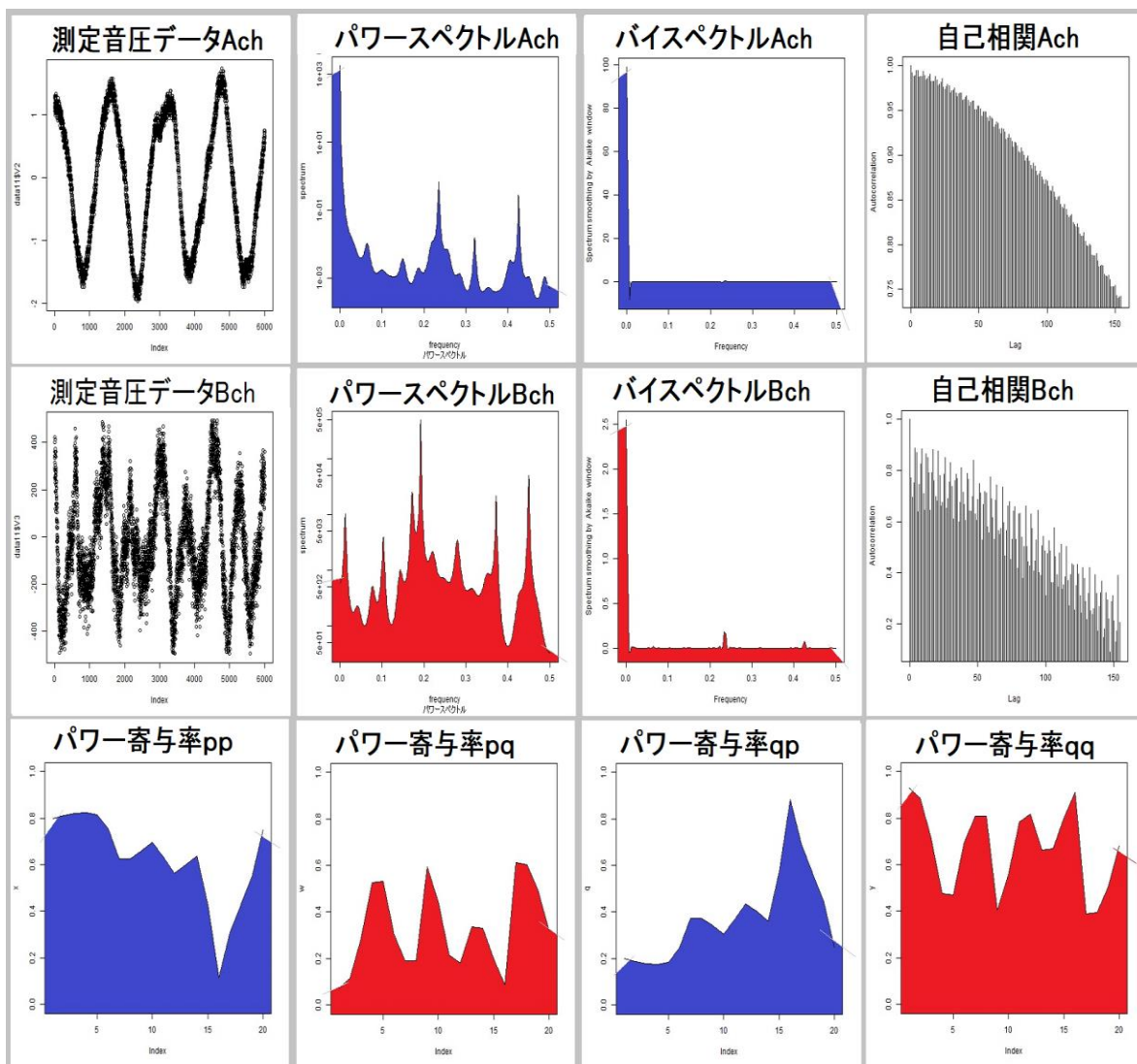


図 5：音圧測定解析結果

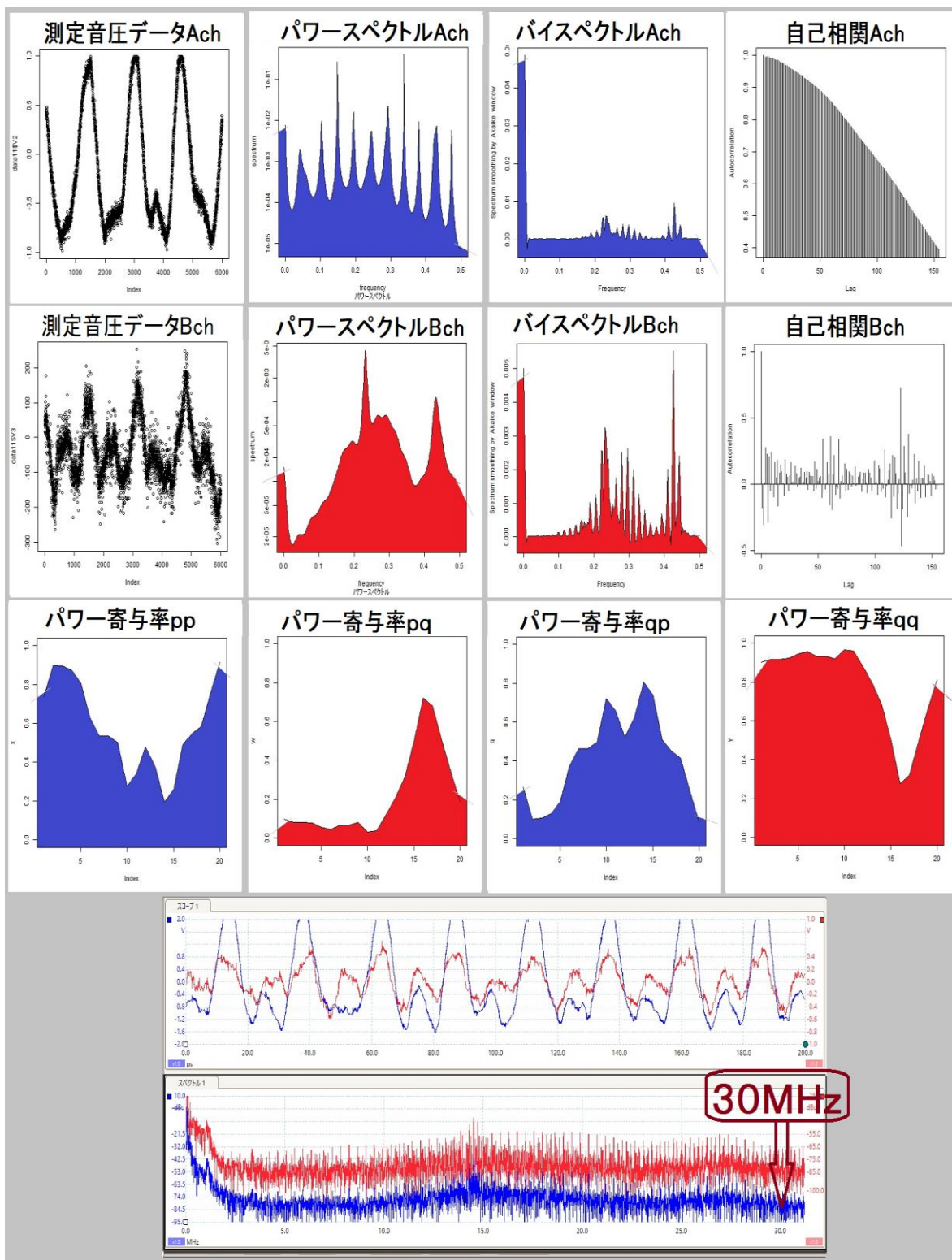


図 6：音圧測定解析結果

解析結果と対象物（アルミ部材）への効果

注) ⇒は、200 μ s 経過

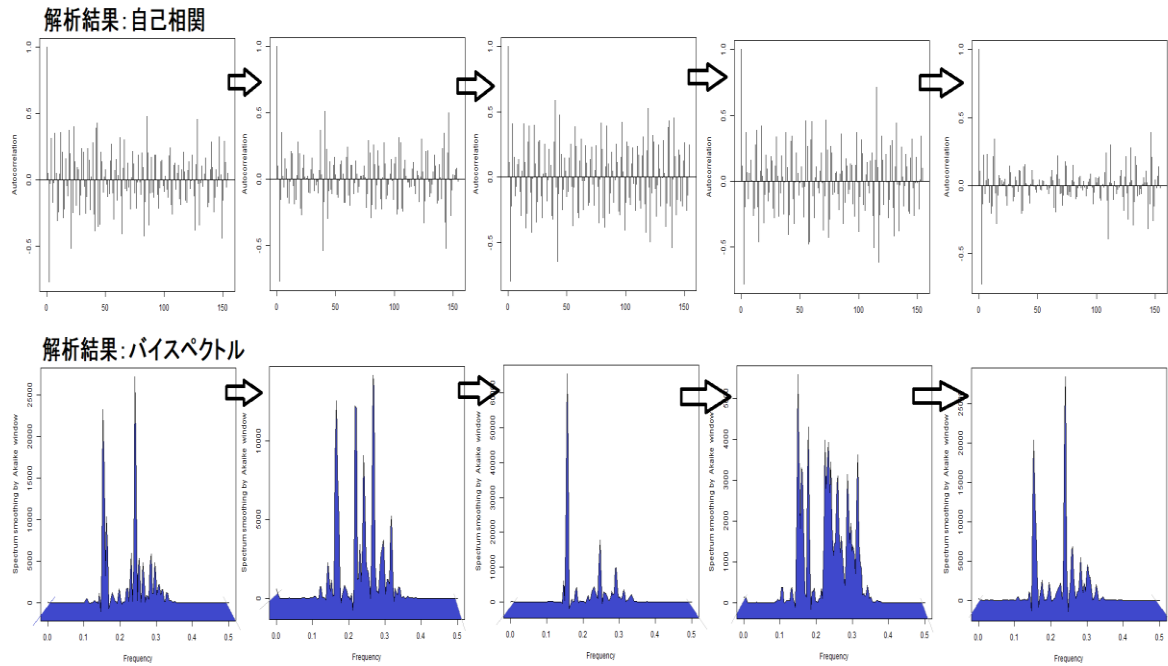


図 7：音圧測定解析結果

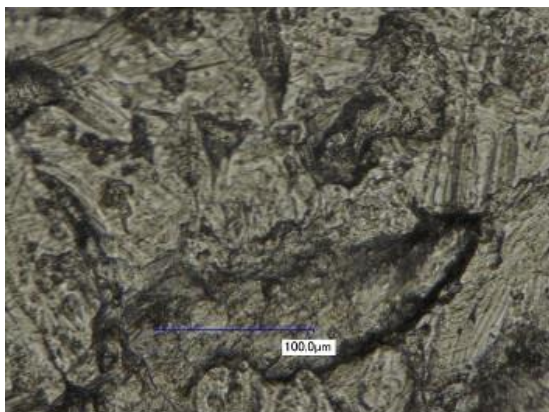


標準品

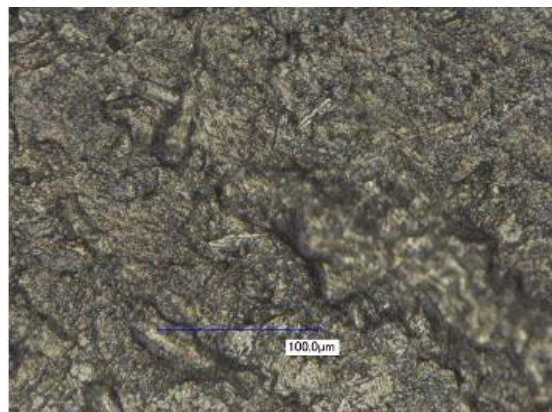


超音波ファインバブル処理品
均一な表面

写真 5：対象物の表面比較



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

写真 6：対象物の表面比較

解析結果と対象物（ステンレス部材）への効果

注）⇒は、200 μ s 経過

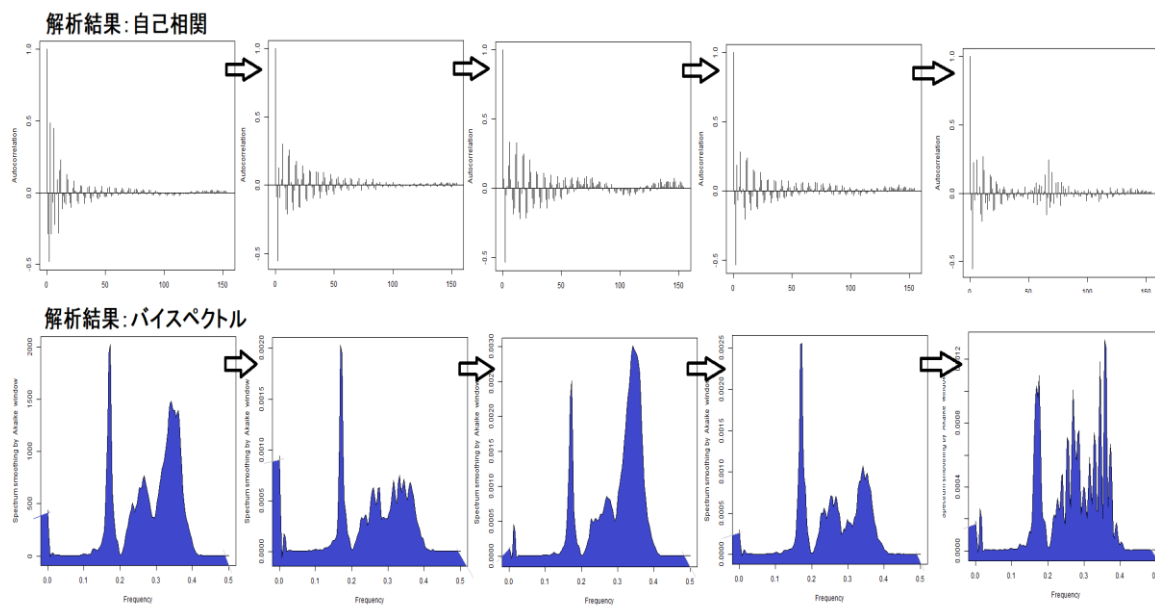
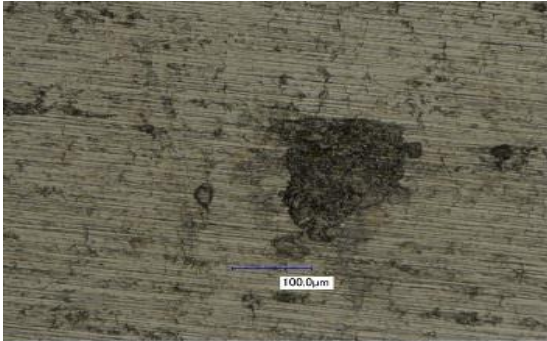
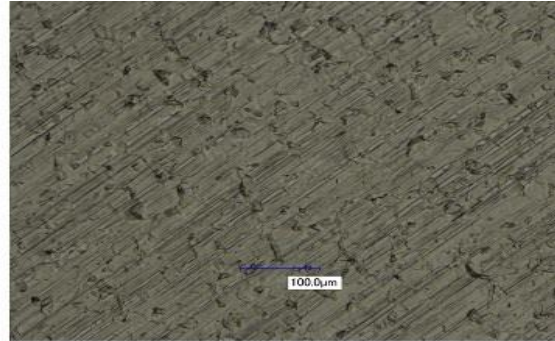


図 8：音圧測定解析結果

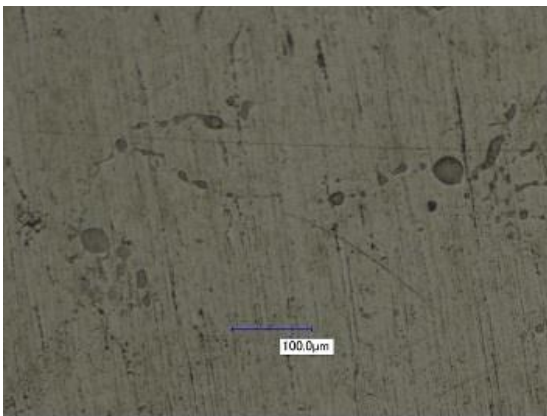


標準品

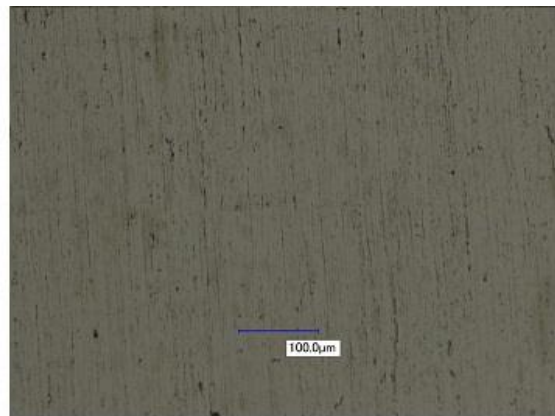


超音波ファインバブル処理品
 汚れの除去
 表面への細かい刺激

写真 7 : 対象物の表面比較



標準品



超音波ファインバブル処理品

写真 8 : 対象物の表面比較

考察

超音波の伝搬状態に関する主要となる周波数(パワースペクトル)のダイナミック特性(非線形現象の変化)により線形・非線形の共振効果を音圧データの解析結果(下記グラフ:バースペクトル)として把握する。

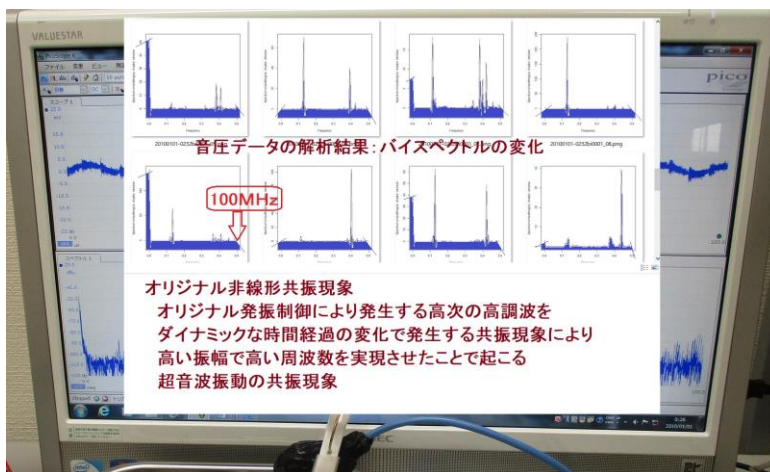


写真9: 超音波のダイナミック制御

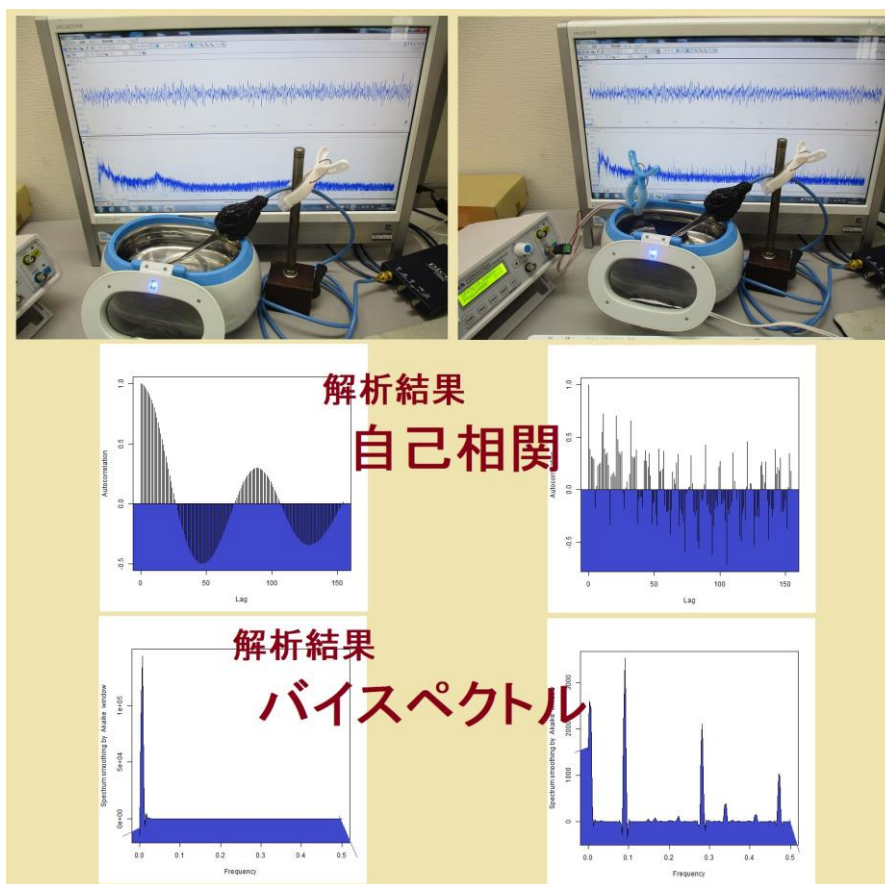


写真10: 超音波のダイナミック制御

これまでのデータ解析経験から
効果的な利用方法を、以下のような4つのタイプに分類する。

- 1:線形型(3次までの高調波、1/4までの低調波)
- 2:非線形型(10次以上の高調波の発生)
- 3:ミックス型(線形型と非線形型の組み合わせ)
- 4:変動型(オリジナル非線形共振現象の発生(注2))

注2):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

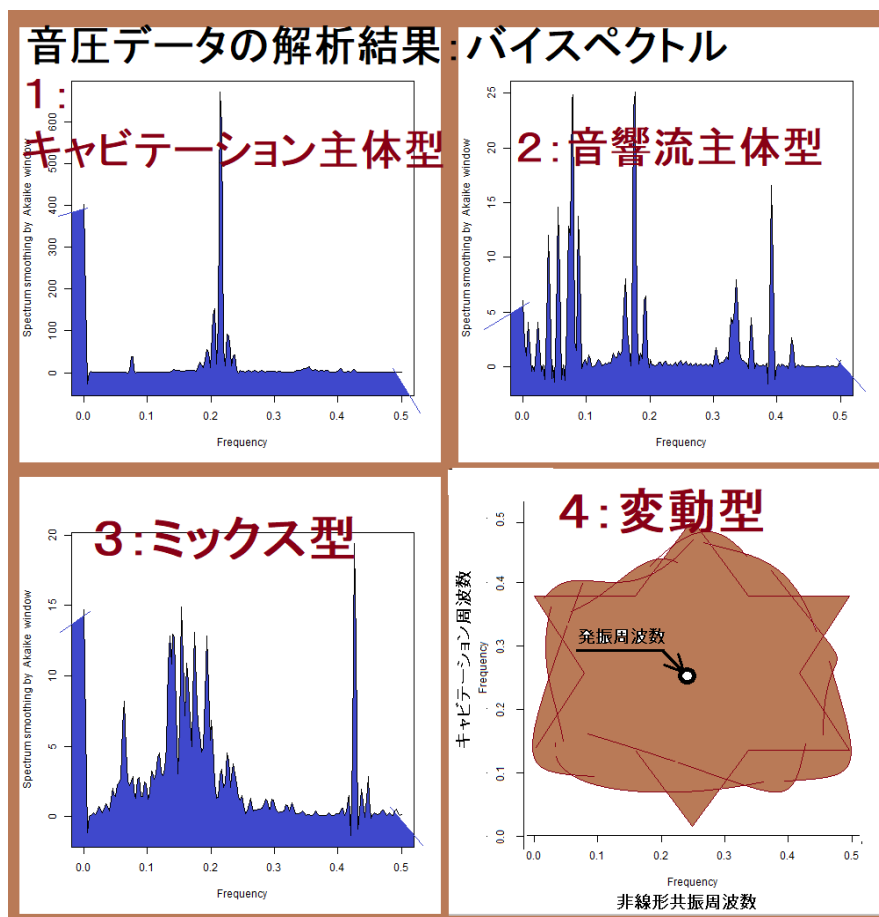
特に、

安定性・変化の状態・・・に関して、周波数成分による詳細な分類により、
目的と効果に対する、効率のよい各種条件の設定・調整が可能になる。

さらに、洗浄に関しては

汚れの特性やバツキに関する情報が得られにくい

このような分類をベースに実験確認することで、効果的な超音波制御が、実現する。



超音波(キャビテーション・音響流)の分類

図9:超音波の分類

結論／展望

○結論

超音波のダイナミックに変化している振動現象を測定解析することで、キャビテーションと音響流の効果を、バースペクトルの変化として明らかにした。

○展望

特に、超音波加湿器と超音波洗浄機の組み合わせ利用・・・キャビテーションと音響流の分類に基づいた、様々な超音波の利用技術が発展している。今後は、対象物の表面に伝搬する表面弾性波を測定解析することで、各種の相互作用について、より詳しい超音波現象を追求して応用発展していきたい。

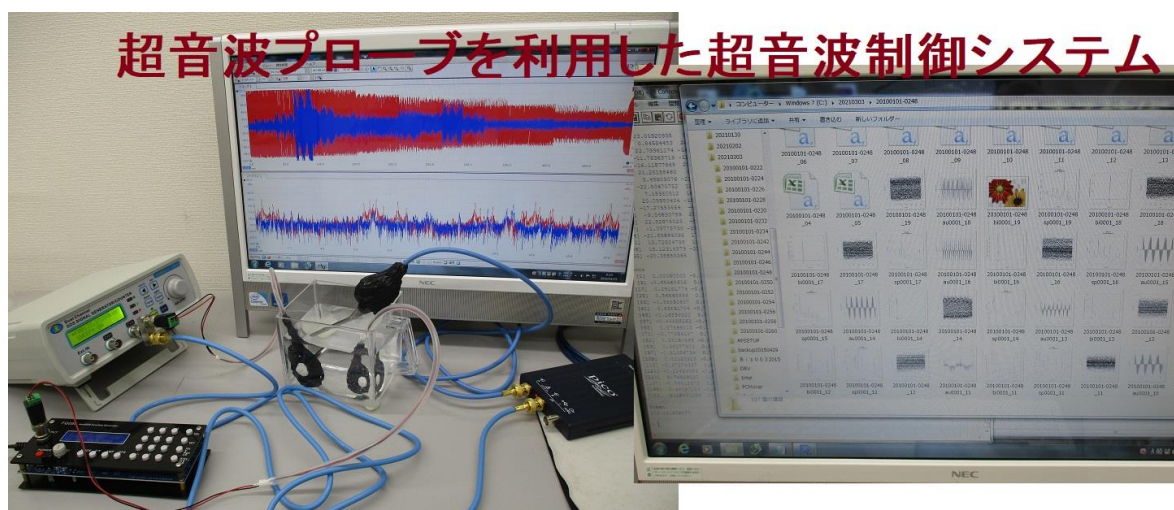


写真10:複数の超音波発振制御実験

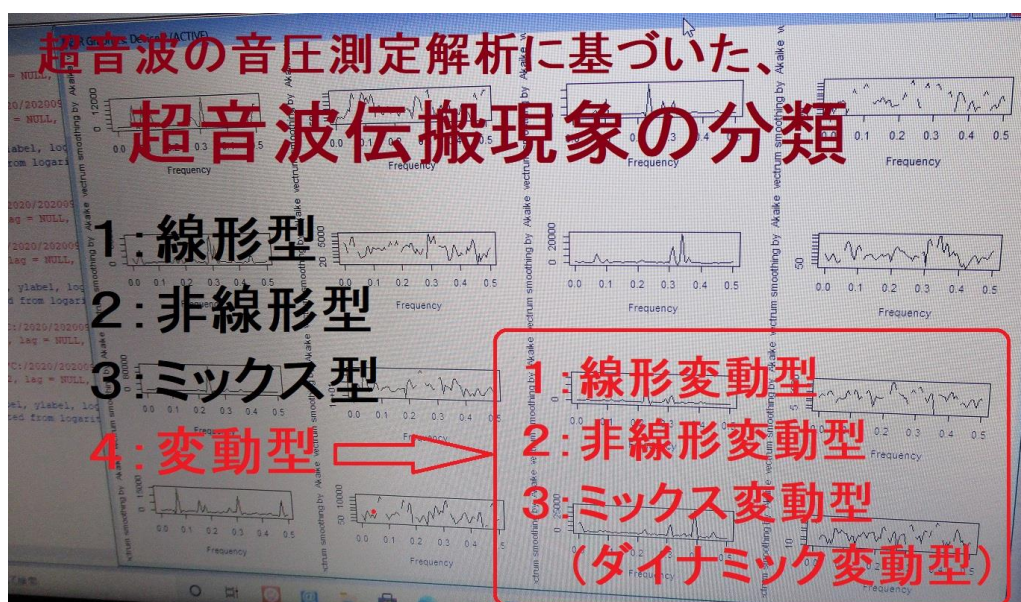


写真11:超音波のダイナミック制御に基づいた分類検出

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)

付録 (Appendix)

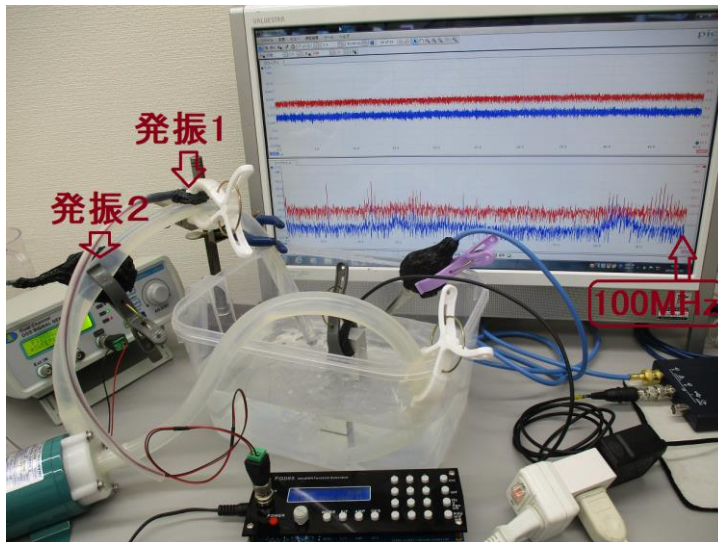


写真 1 2 : 超音波のダイナミック制御実験

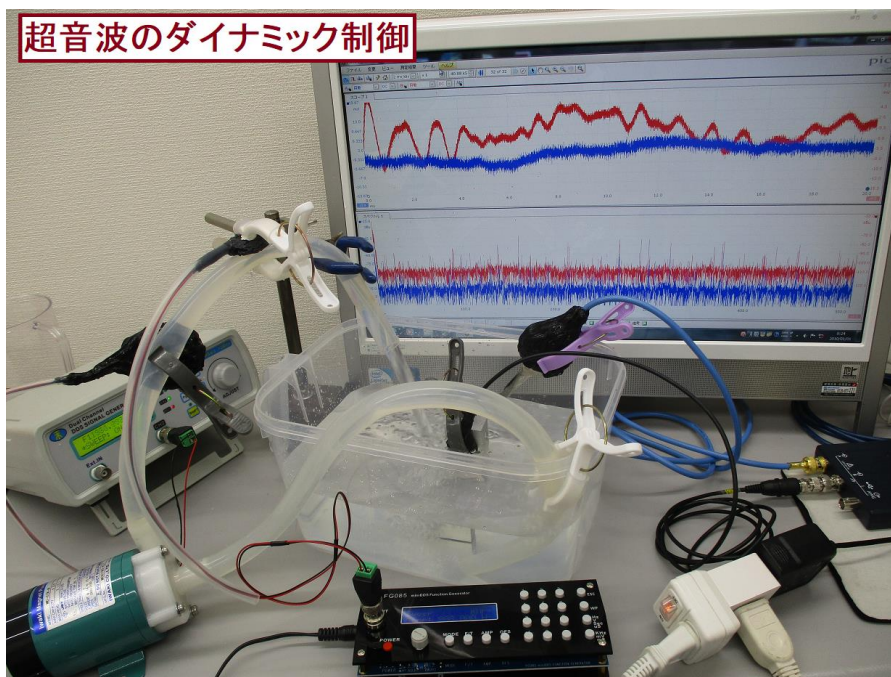
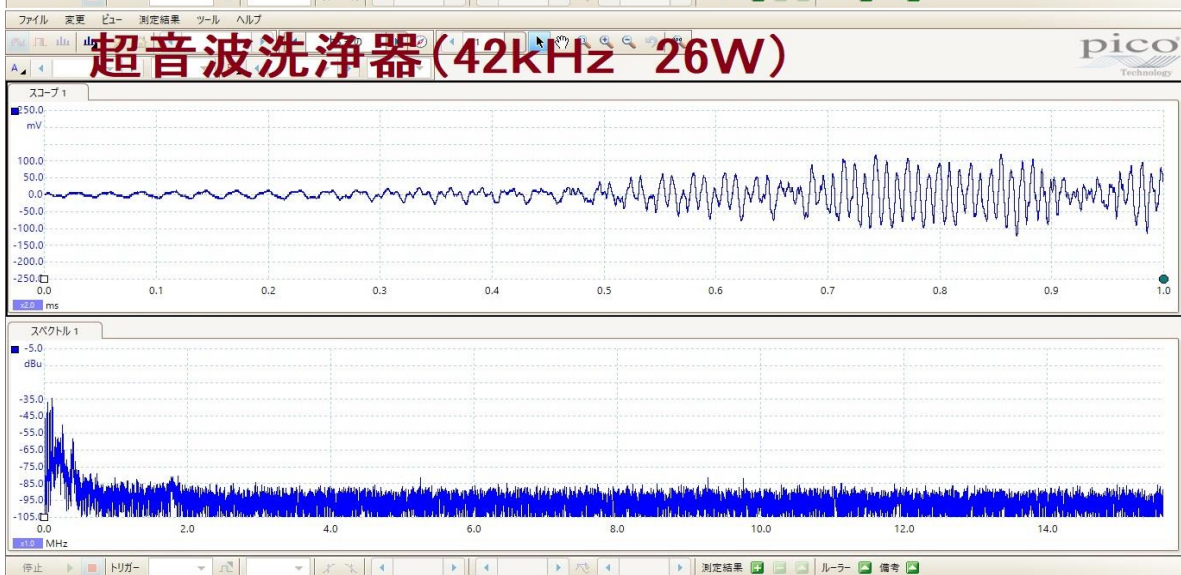
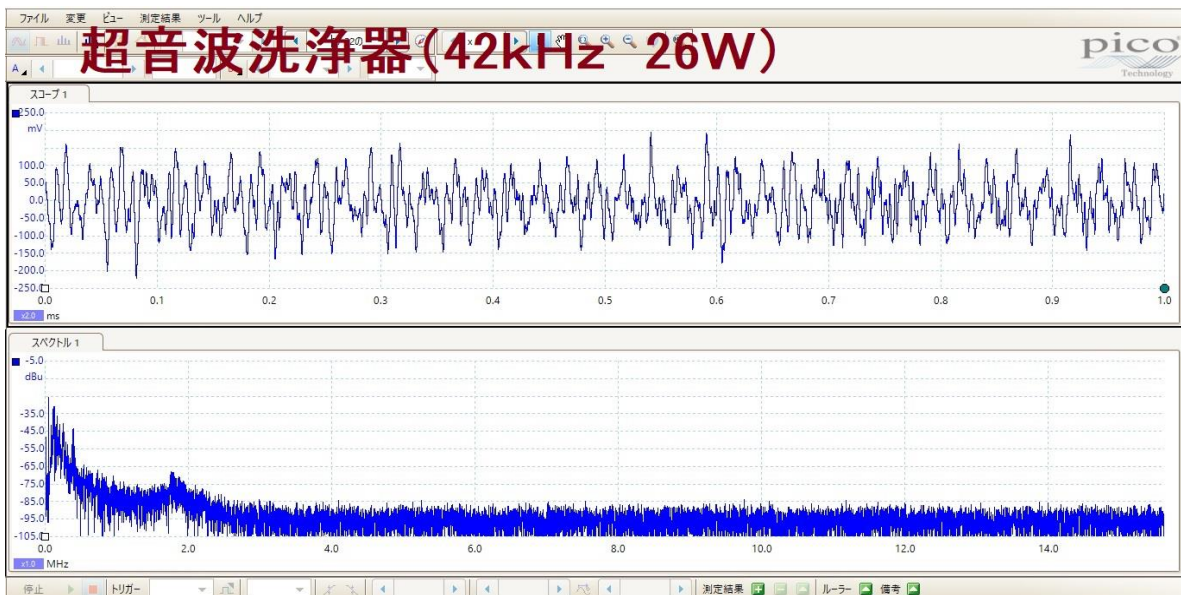
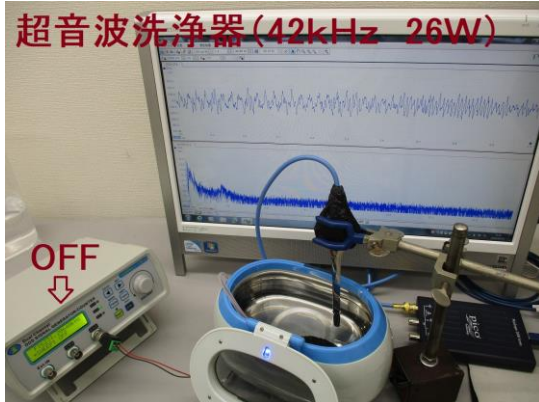
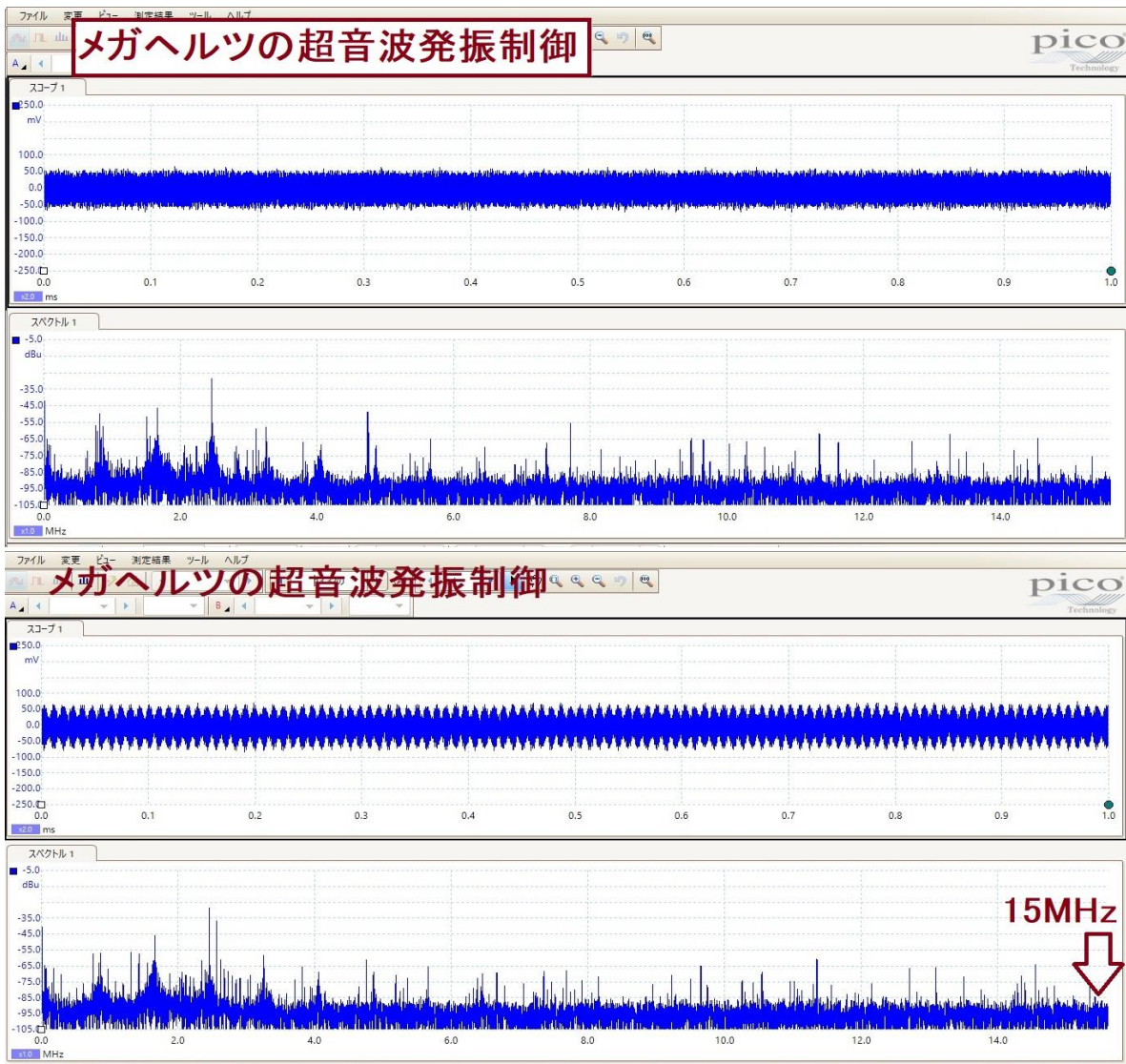
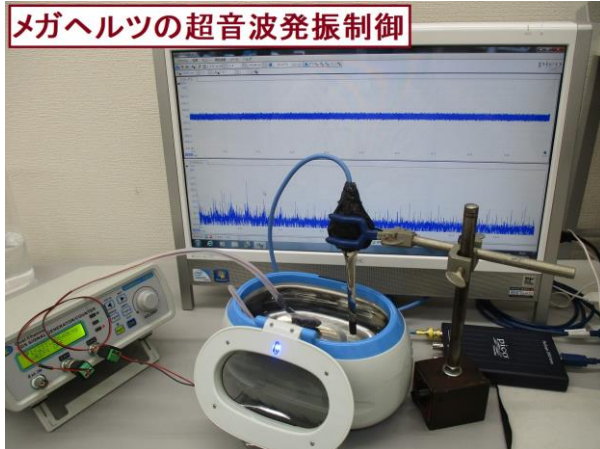


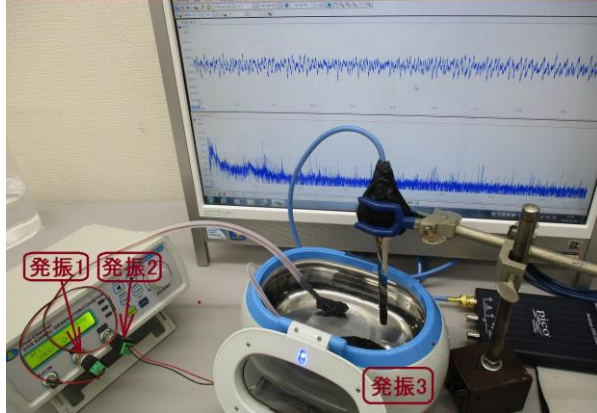
写真 1 4 : 超音波のダイナミック制御実験



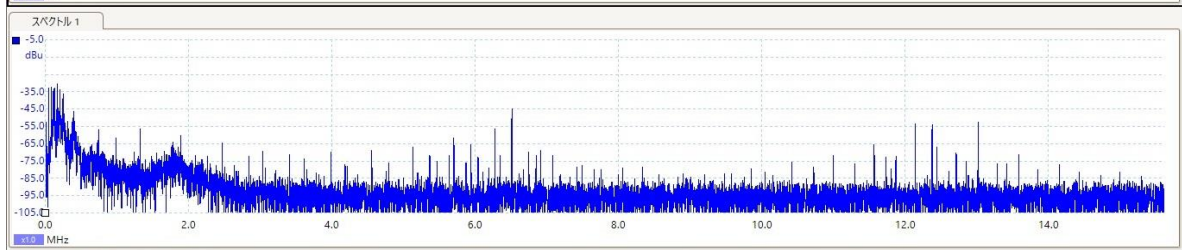
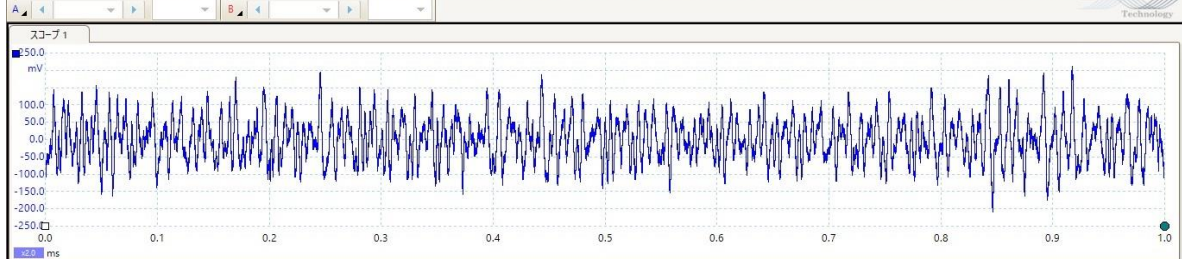
メガヘルツの超音波発振制御



超音波洗浄器(42kHz 26W) + メガヘルツの超音波発振制御



超音波洗浄器(42kHz 26W) + メガヘルツの超音波発振制御



超音波洗浄器(42kHz 26W) + メガヘルツの超音波発振制御

