

超音波の伝搬現象について

Ver 4

2024. 10. 17

超音波システム研究所

超音波システム研究所は、

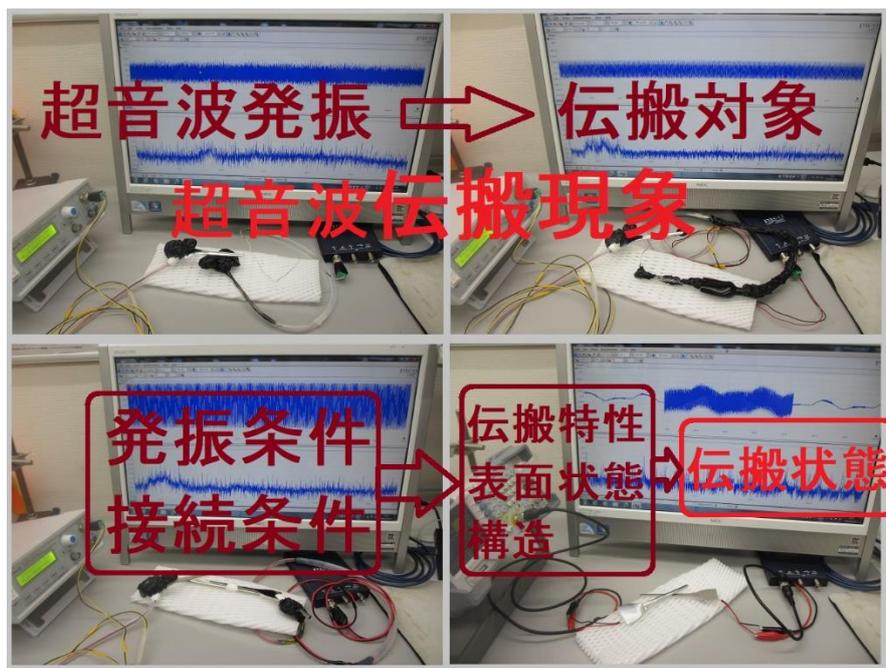
オリジナル超音波実験（発振制御に対応する対象物の超音波伝搬状態の測定解析）により、以下の事項を確認し、様々な応用・コンサルティングに利用しています。

- 1) 伝搬する音圧レベルは、対象の共振状態が主要因である
(共振現象は、対象の固有振動数の影響が大きいので、強度が重要になる)
- 2) 伝搬する周波数は、対象の表面状態と端部が主要因である
(小さなバリ、キズ・・・により高い周波数（高調波）の発生が起きるが
低周波の共振現象で高調波は減衰する)

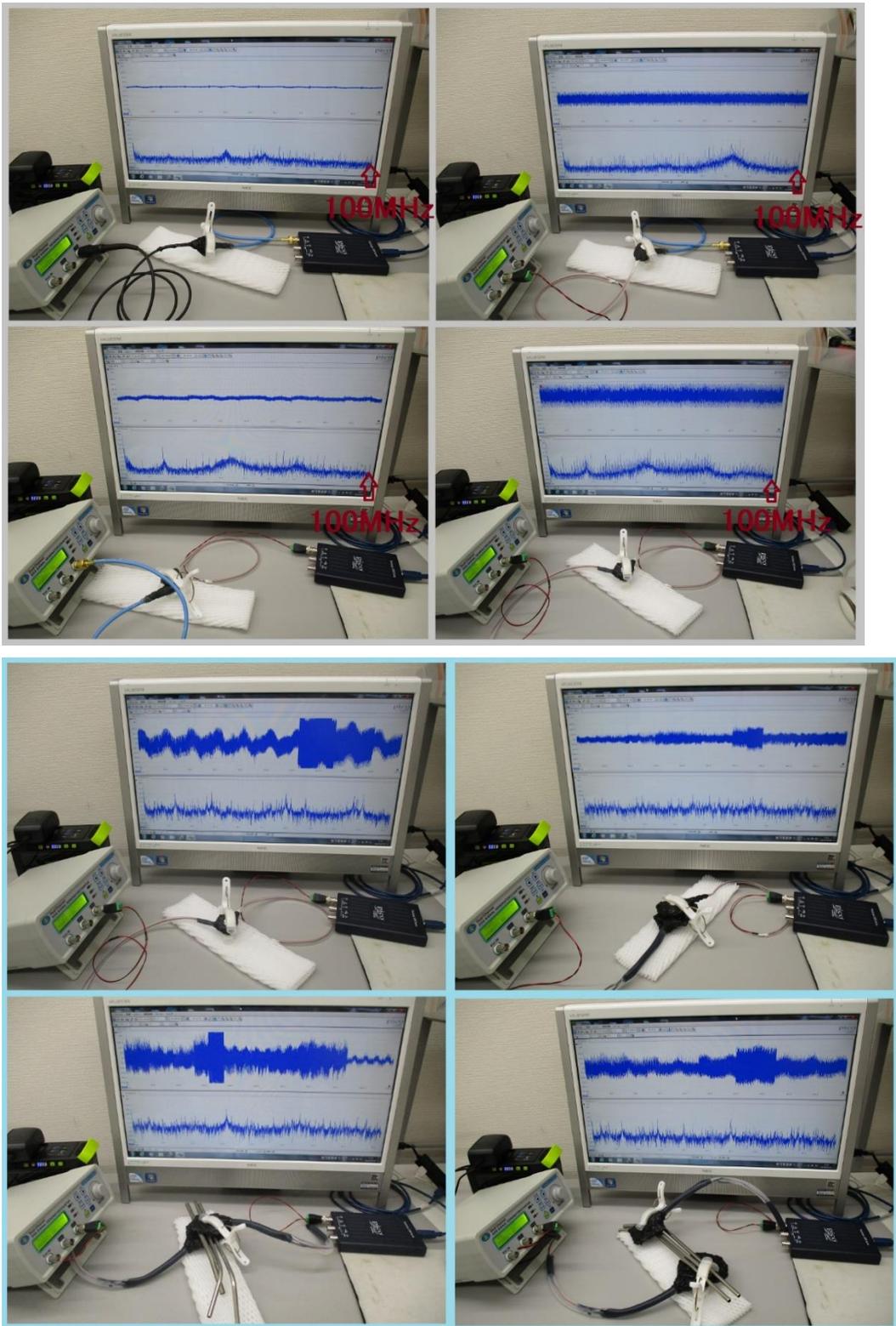
- 3) 最も重要な事項は、
対象の構造と超音波素子の接触状態による、
伝搬する超音波のダイナミックな変化である
(単純な構造による単純な接触状態では共振現象による振動モードの変化が発生し、
複雑な構造による点接触の状態では、非線形現象による高調波の変化が発生する。
しかし、均一な構造と安定した接触状態の実現は難しいため、構造と接触状態が
複雑な各部分の相互作用により、複雑な振動モードの変化が起きる

従って、変化を測定し、各作用を解析評価することが重要になる

さらに、解析結果に基づいた超音波制御により目的の伝搬状態に改善する

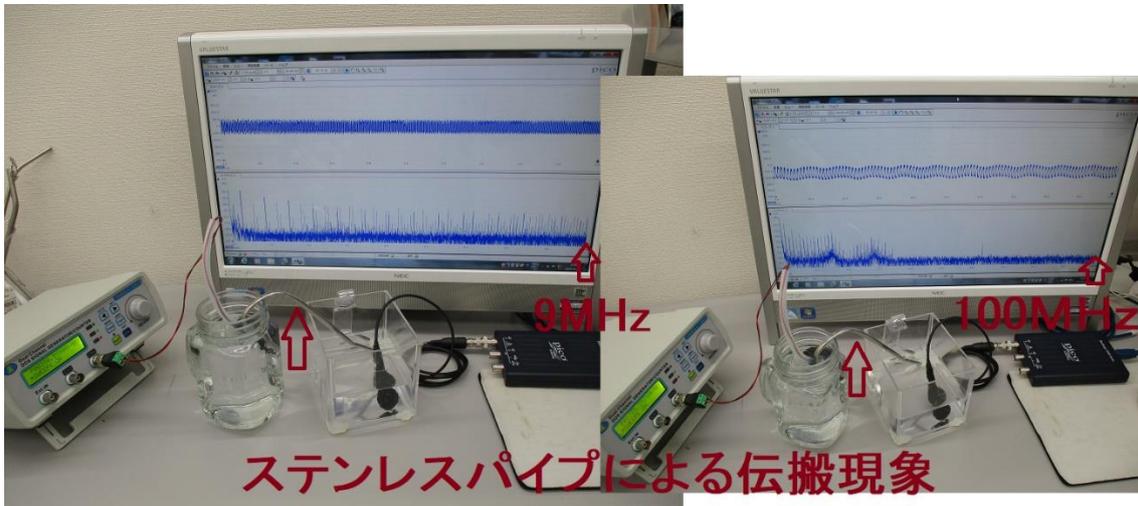


基礎実験（写真上：高周波の伝搬状態 写真下：共振現象）

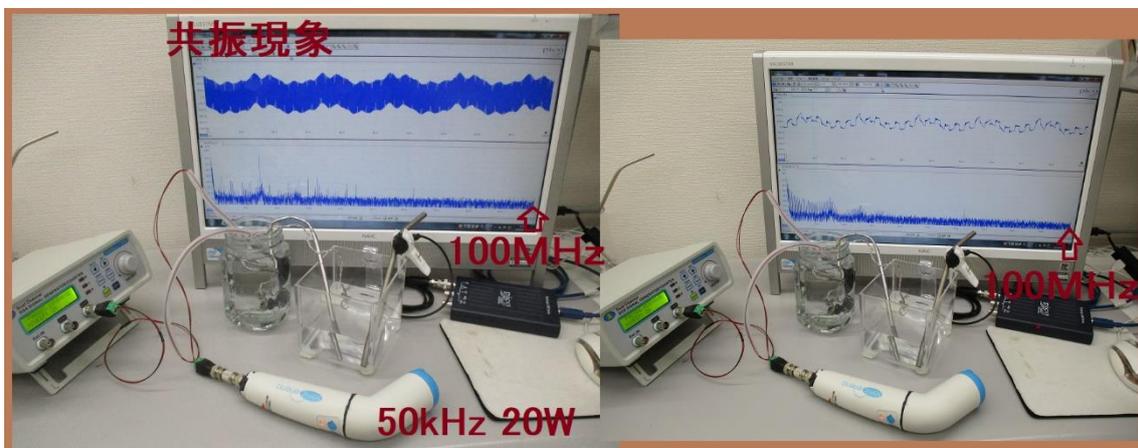
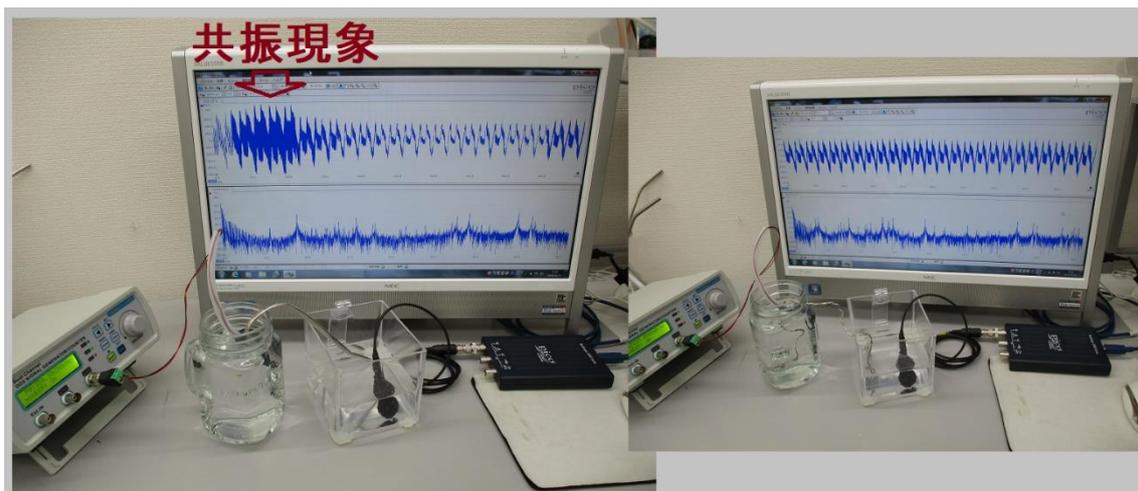


説明：超音波素子の表面・接触状態や伝搬経路による、共振現象と非線形現象

超音波伝搬実験

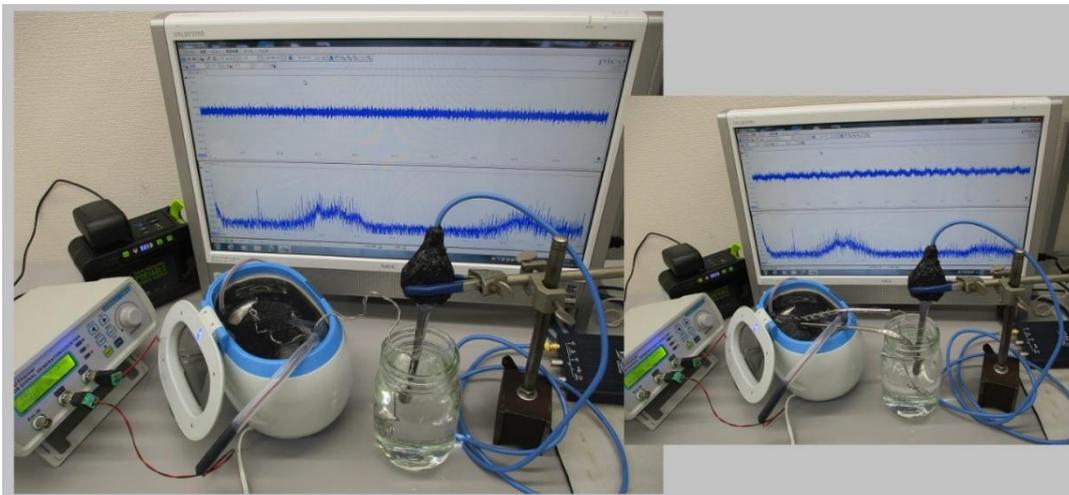


説明：ステンレスパイプの超音波伝搬特性による、共振現象と非線形現象

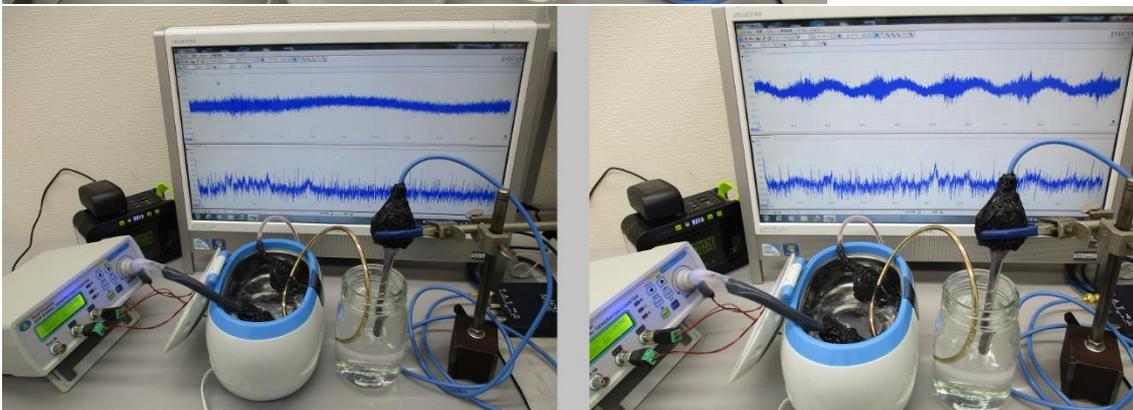
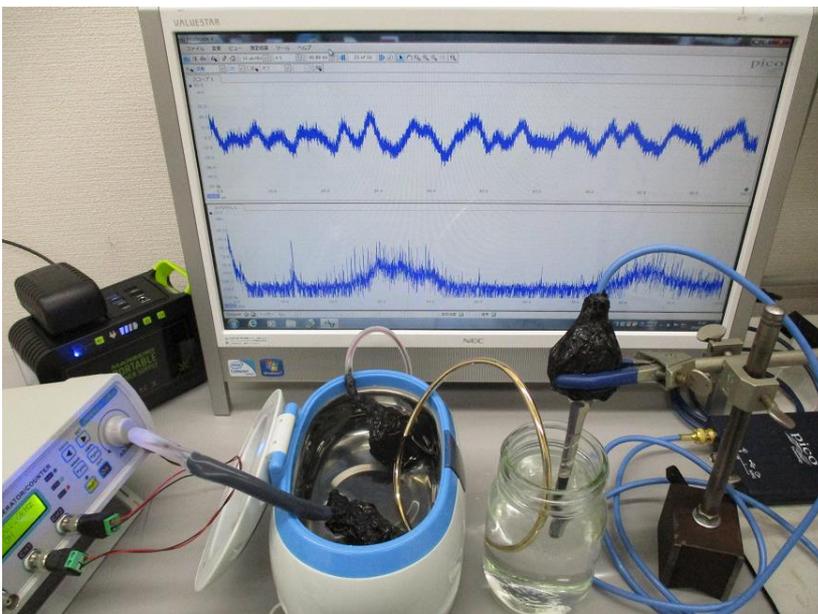


説明：50kHz 20Wの超音波による、共振現象の発生と、非線形現象の減衰

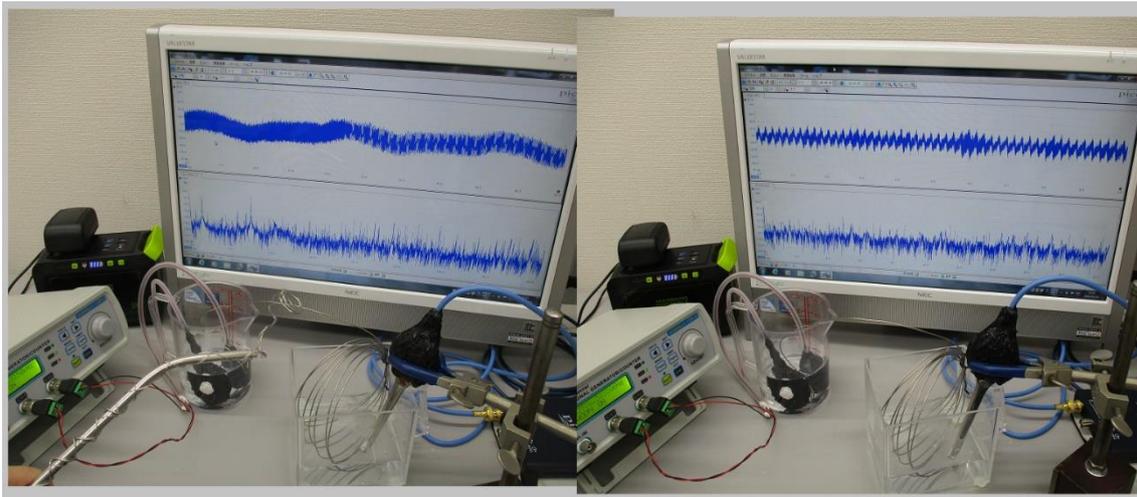
伝搬対象物の構造による変化



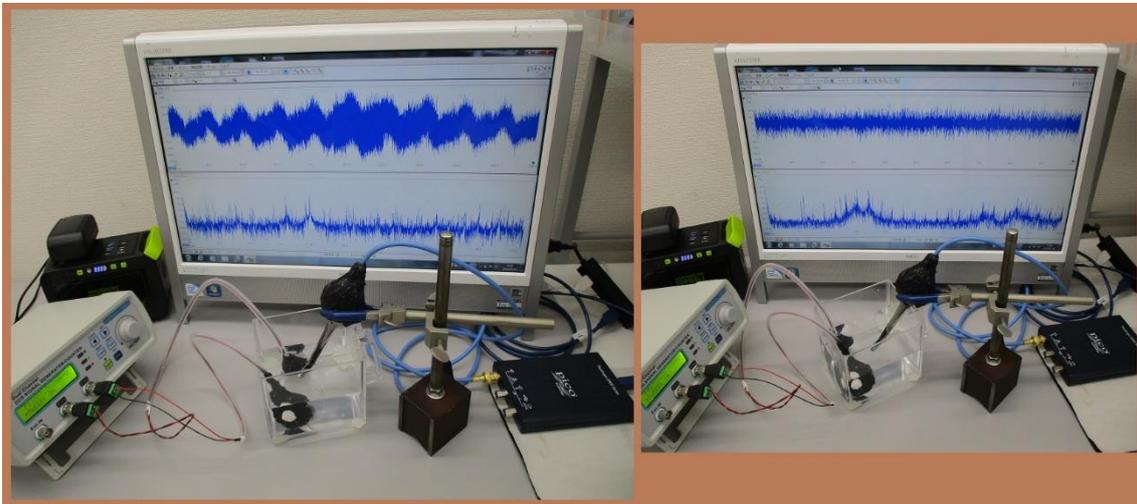
説明：ステンレスパイプとステンレス線の組み合わせによる、高調波（70MHz以上）の発生



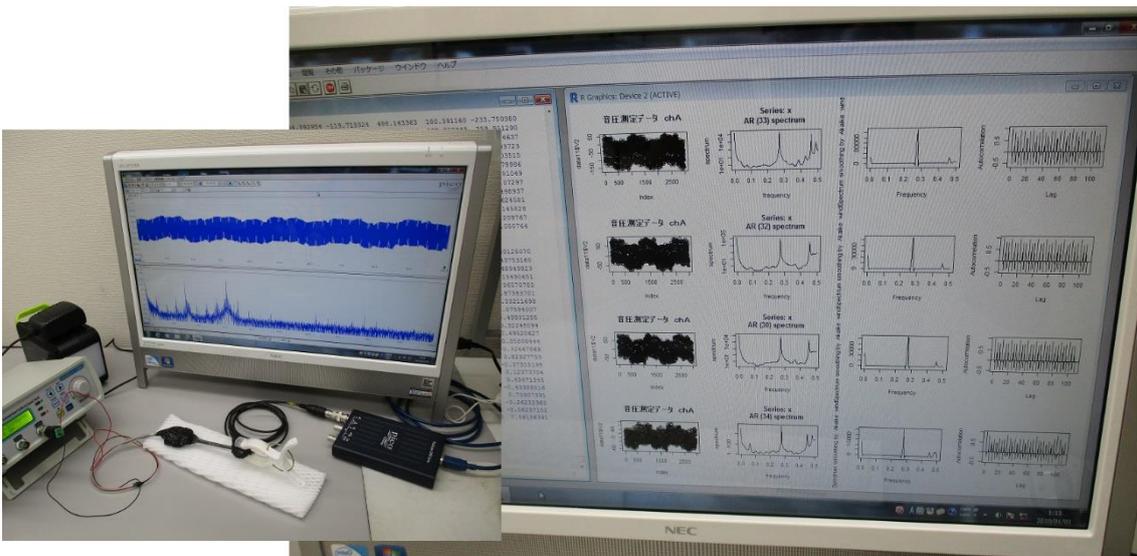
説明：洗浄器(42kHz 26W)と高調波(70MHz以上)の組み合わせた状態に対する、金属部品(金色の伝搬部材)の伝搬特性による**超音波のダイナミックな変化(制御)**



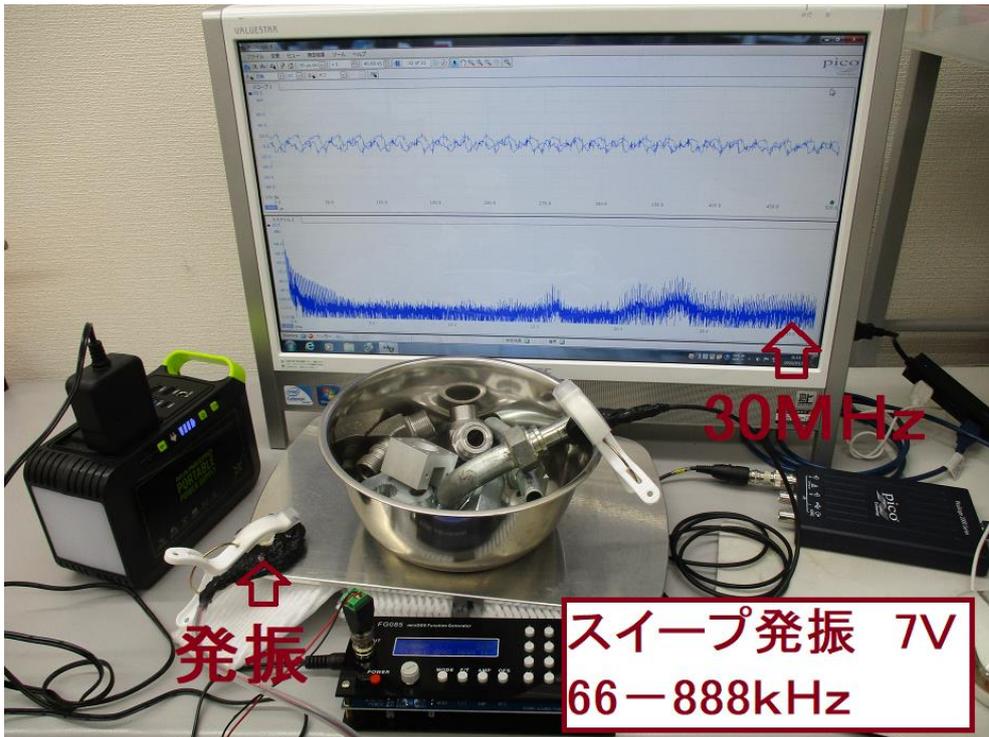
説明：ステンレス線による、共振現象の発生



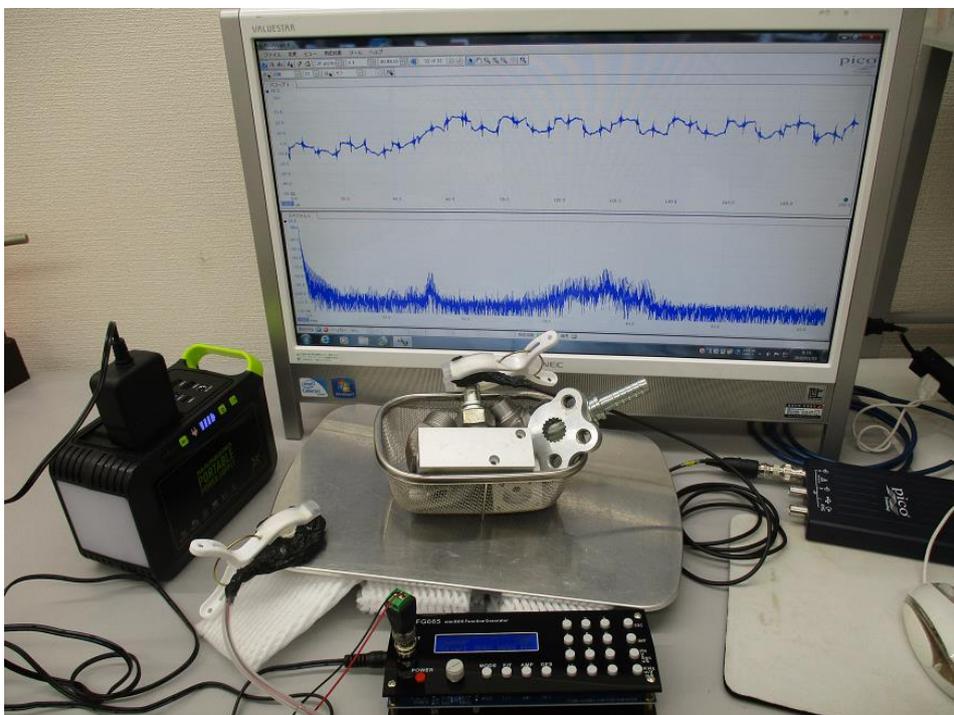
説明：ステンレス線が無い場合の伝搬状態。振動系固有の共振現象と非線形現象



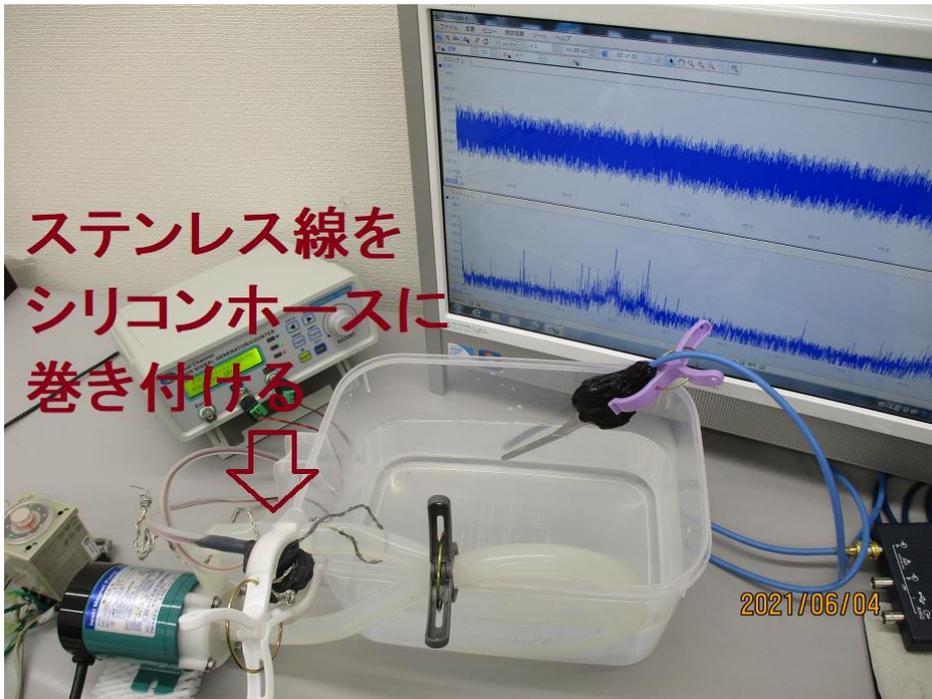
説明：超音波プローブの送受信テストにより、超音波の伝搬状態・伝搬特性を解析評価



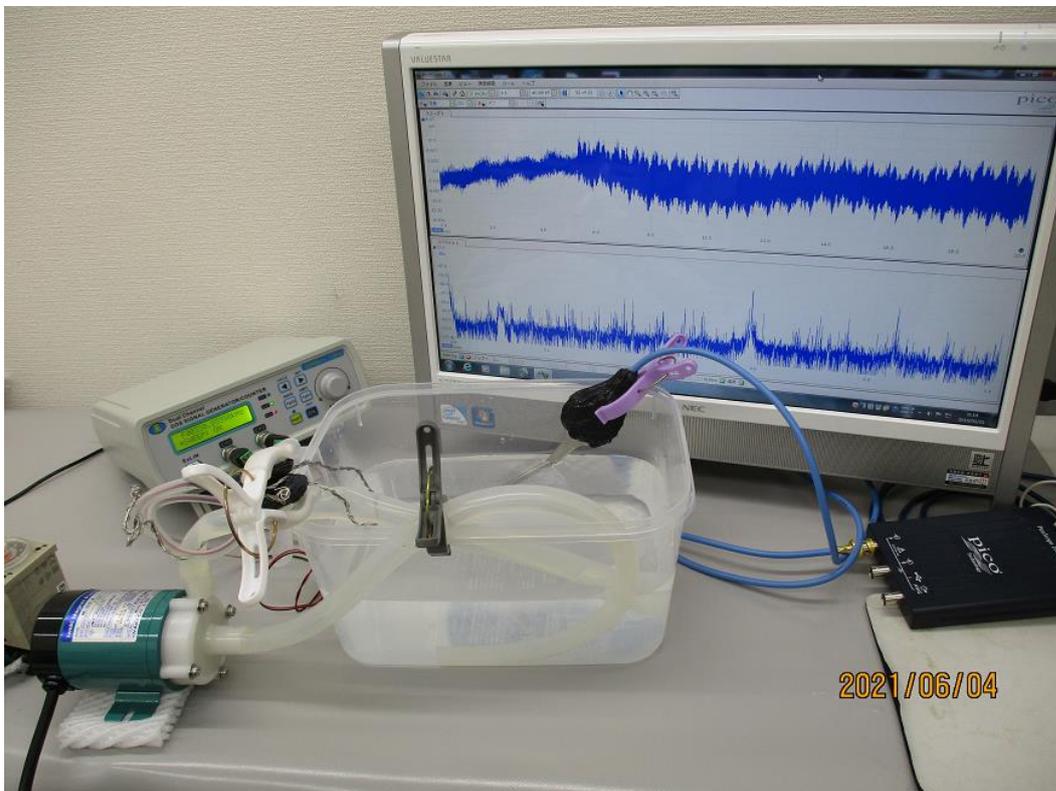
説明：金属部品の表面処理：表面残留応力の緩和処理（10-20分で効果を確認できます）
 ダイナミックな非線形伝搬現象の利用（発振出力 5W）
 表面処理した部品は、超音波伝搬特性が大きく変わります



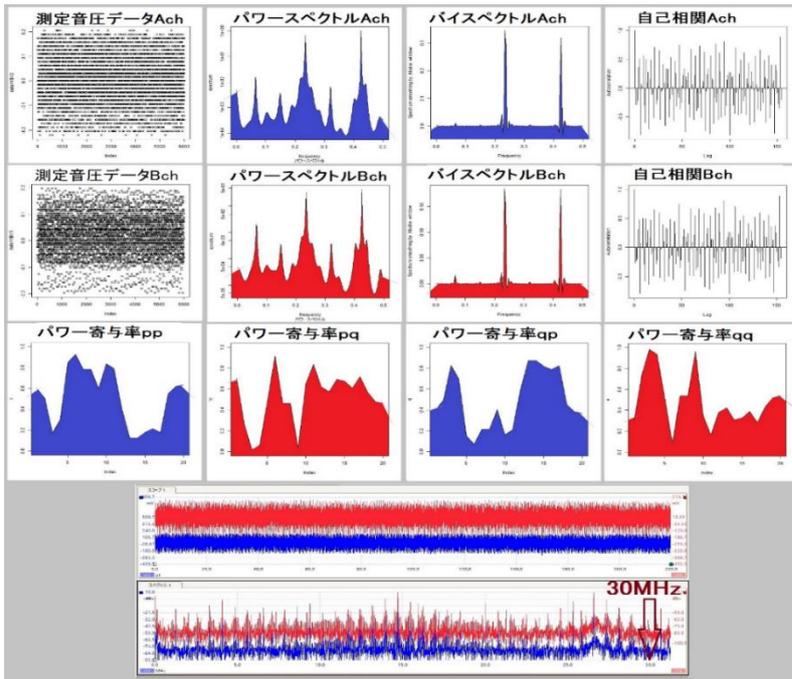
説明：金属部品の表面処理：表面残留応力の緩和処理
 台（アルミ板）と網カゴにより、ダイナミックに変化する振動モードを利用して
 低周波（1-3kHz）から、高周波（30-45MHz）の範囲で、
 金属部品の表面に超音波振動による刺激を与えています



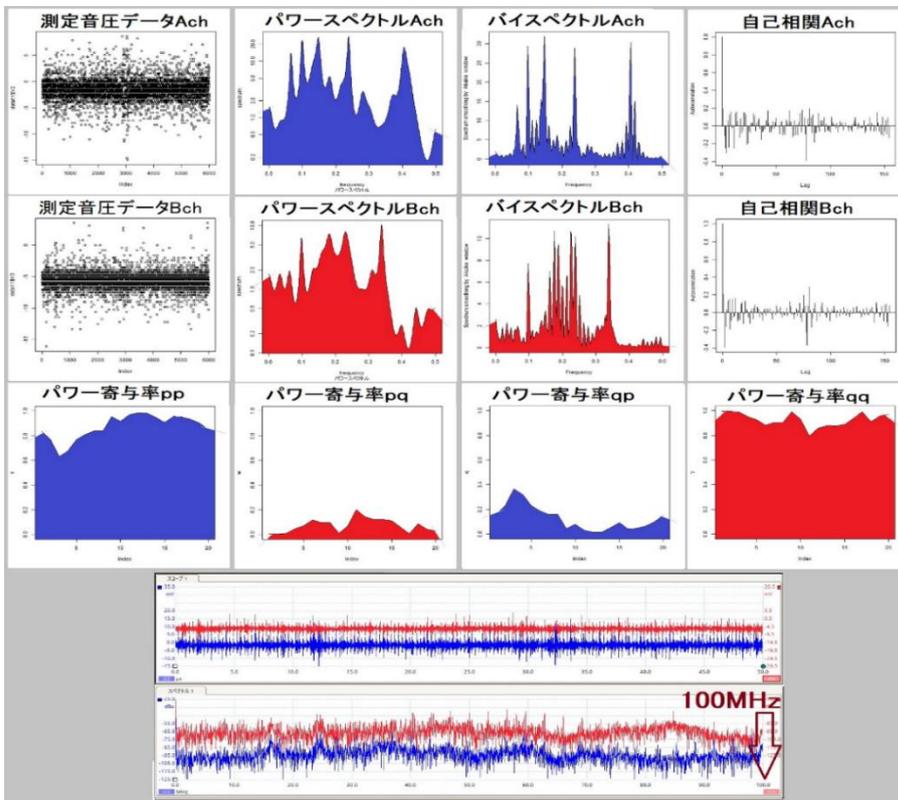
説明：ステンレス線にメガヘルツの超音波を発振制御することで、超音波が流れる水に伝搬して、流れの変化とステンレス線の振動モードと超音波のスweep発振条件で、目的に合わせた、流水式超音波システムが実現出来る（簡易モデル実験）



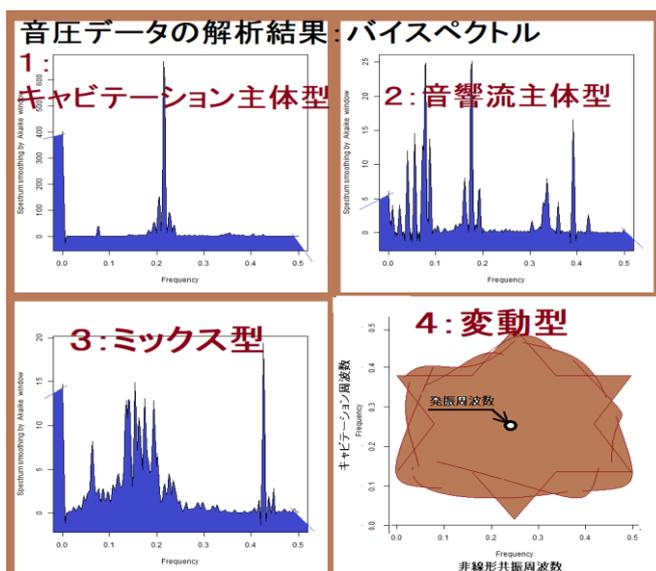
説明：超音波プローブのスweep発振とパルス発振の組み合わせによりダイナミックに変化する共振現象を制御している様子（洗浄や攪拌に有効）



説明：グラフ青 洗浄液、 グラフ赤 水槽表面
 洗浄液と水槽が相互の影響しながら、安定した超音波の状態を伝搬している様子
 一般的には、**洗浄効果の低い状態**



説明：グラフ青 洗浄液、 グラフ赤 水槽表面
 洗浄液と水槽が独立した固有の振動モードで、超音波を伝搬している様子
 一般的には、**洗浄効果の高い状態**



超音波(キャビテーション・音響流)の分類

分類の詳細

1：線形型（キャビテーション主体型）

超音波の発振周波数に対して、伝搬状態の主要（最大エネルギー）周波数が低調波（発振周波数の $1/4$ 、あるいは $1/2$ ）から高調波（発振周波数の 1 倍、 \dots 3 倍）の範囲で、若干の変化がある状態

注：低調波（発振周波数の $1/8$ ）以下の場合
低周波の共振状態により、不安定な共振と干渉が発生し
安定した状態が実現しない傾向になります

2：非線形型（音響流主体型）

超音波の発振周波数に対して、伝搬状態の主要（最大エネルギー）周波数が高調波（発振周波数 10 倍以上）の範囲で、若干の変化がある状態

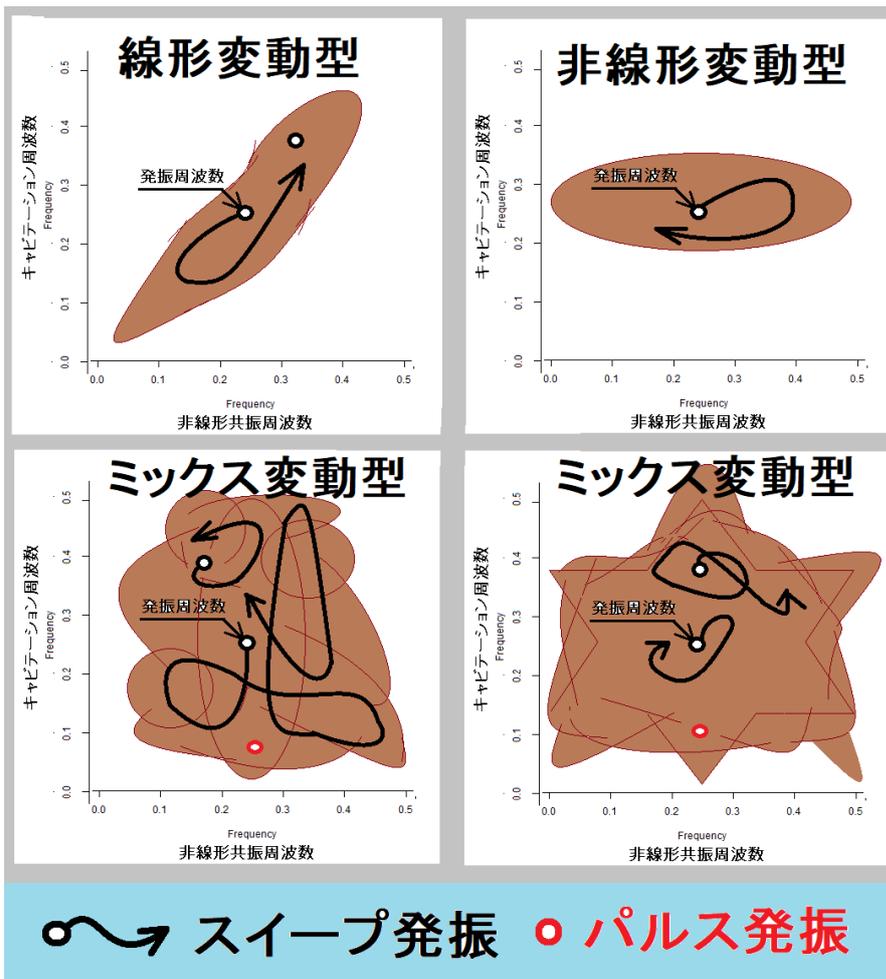
注：高調波は、超音波振動子、発振プローブ \dots の
表面状態の工夫（特願 $2020-31017$ 超音波制御）により
発振周波数の 100 倍を実現することも可能です

3：ミックス型（キャビテーションと音響流の組み合わせ型）

超音波発振部材の設置方法や接触部材 \dots の相互作用により
発振周波数に対して、伝搬状態の主要（最大エネルギー）周波数が
低調波（発振周波数の $1/8$ 、 $1/4$ 、あるいは $1/2$ ）
から高調波（発振周波数の 1 倍、 \dots 10 倍）の範囲で
自然に発生する、大きな変化がある状態

コメント

上記の1, 2, 3は、基本的な伝搬状態ですが
振動現象が、安定して長時間同じ現象を続けるためには、各種制御 \dots 工夫が必要です
上記の1, 2, 3は、一定の発振状態を継続すると
周波数の低下や超音波の減衰現象が発生し
超音波の利用効果は小さく、無くなっていきます
そのために、実用的には、変動型を利用することが必要です



4：変動型（各種制御による変化を利用するタイプ）

4-1：線形変動型

複数の超音波発振部材や発振制御・・・を利用して
伝搬状態の主要（最大エネルギー）周波数が、低調波から高調波を、
目的の範囲（発振周波数の $1/8 \sim 10$ 倍程度）で、制御可能にした状態

4-2：非線形変動型

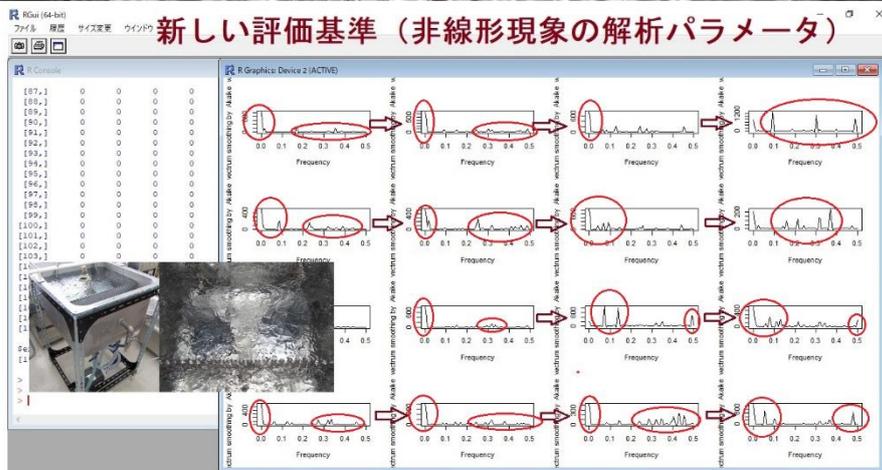
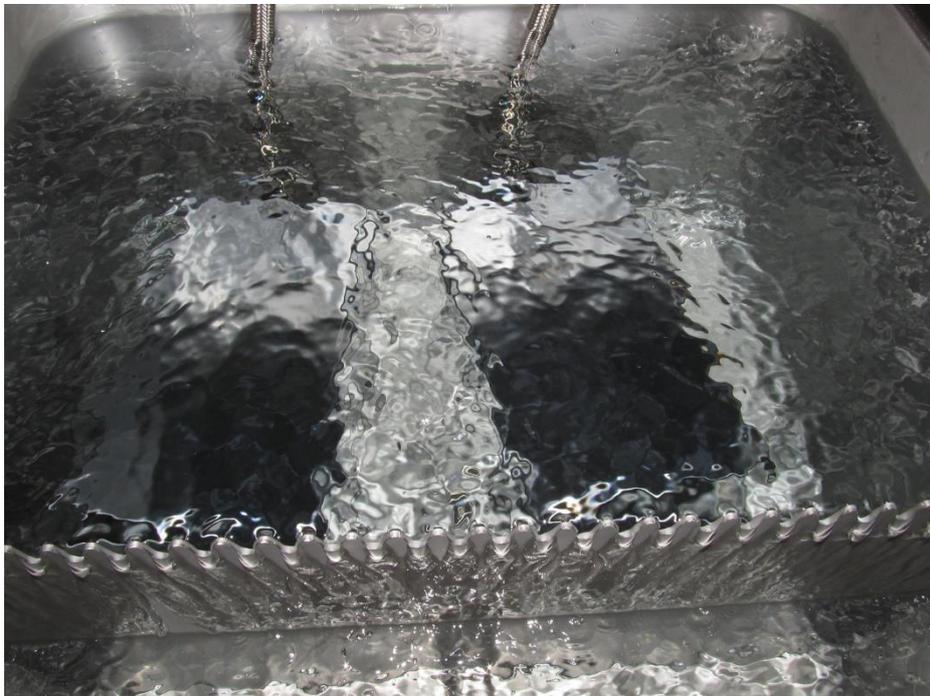
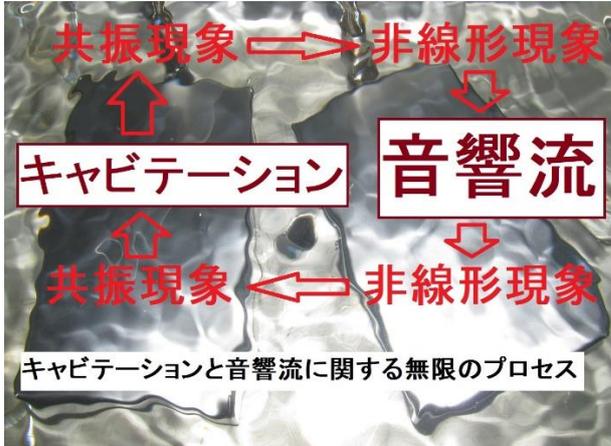
複数の超音波発振部材や発振制御・・・を利用して
伝搬状態の主要（最大エネルギー）周波数が、低調波から高調波を、
目的の範囲（発振周波数の $1/2 \sim 50$ 倍程度）で、制御可能にした状態

4-3：ミックス変動型（ダイナミック変動型）

複数の超音波発振部材や発振制御・・・の
音響特性や相互作用の確認に基づいて、伝搬状態の主要（最大エネルギー）周波数が
低調波から高調波を、目的の範囲（発振周波数の $1/16 \sim 100$ 倍程度）で
制御可能にした状態

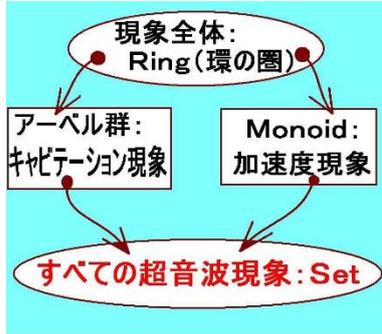
分類としては上記の通りですが、
実用的には、ミックス変動型（ダイナミック変動型）として
低調波から高調波を最適化する事が、超音波制御になります

超音波洗浄機の事例：ミックス変動型（ダイナミック変動型）

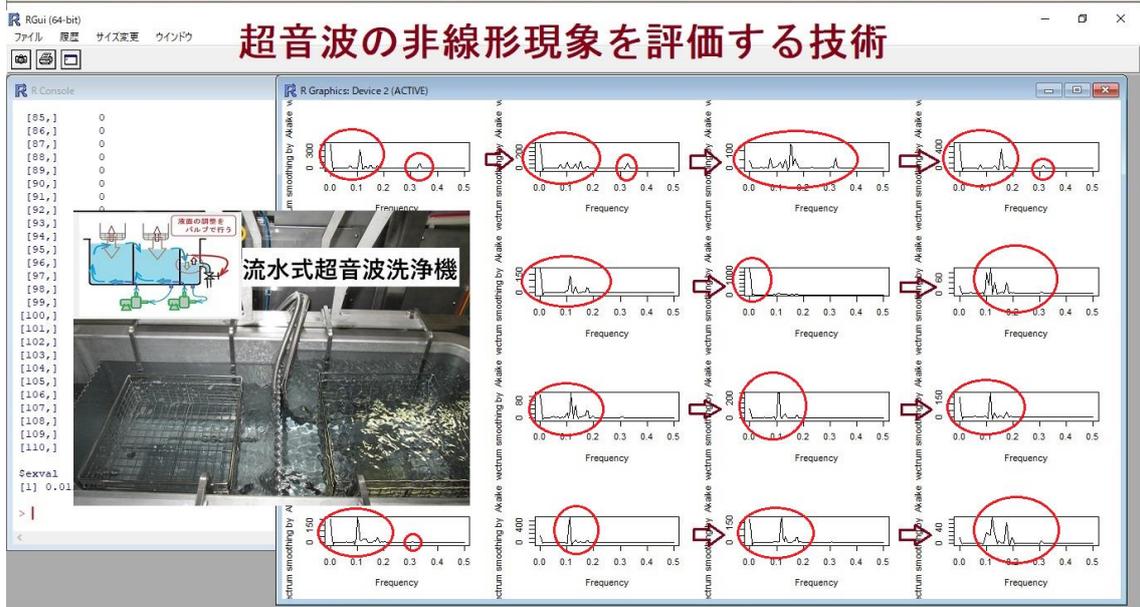
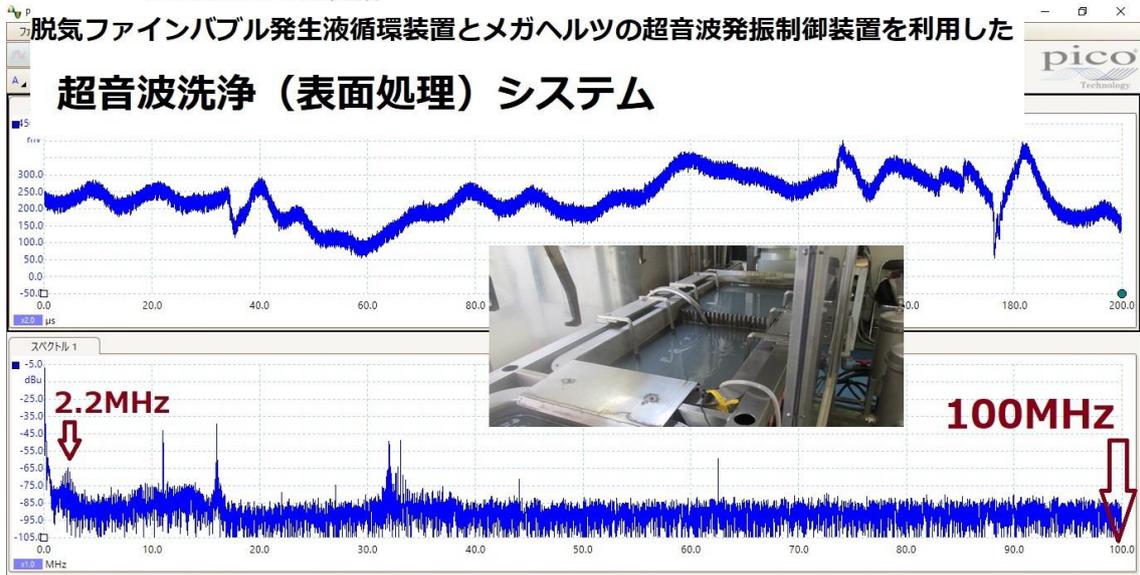


説明：28kHz、72kHz、メガヘルツの超音波による非線形制御（解析パラメータ：バイスペクトル）

超音波洗浄機の事例：ミックス変動型（ダイナミック変動型）



超音波の
Monoid (モノイドの圈) モデル
超音波システム研究所



説明：28kHz、38kHz、メガヘルツの超音波による非線形制御（解析パラメータ：バイスペクトル）
矢印の時間経過：2 μ秒 0 - 6 5 MHz の範囲によるダイナミックな変化

<参考>

超音波プローブ（発振型、測定型、共振型、非線形型）の製造技術
<http://ultrasonic-labo.com/?p=1566>

超音波プローブ
<http://ultrasonic-labo.com/?p=11267>

超音波伝搬現象の分類 1
<http://ultrasonic-labo.com/?p=10908>

超音波伝搬現象の分類 2
<http://ultrasonic-labo.com/?p=17496>

超音波伝搬現象の分類 3
<http://ultrasonic-labo.com/?p=17540>

超音波の最適化技術 1
<http://ultrasonic-labo.com/?p=15226>

超音波の最適化技術 2
<http://ultrasonic-labo.com/?p=16557>

超音波制御技術
<http://ultrasonic-labo.com/?p=16309>

超音波プローブの発振制御による振動評価技術
<http://ultrasonic-labo.com/?p=15285>

超音波技術：多変量自己回帰モデルによるフィードバック解析
<http://ultrasonic-labo.com/?p=15785>

統計的な考え方を利用した超音波
<http://ultrasonic-labo.com/?p=12202>

超音波の非線形現象を評価する技術
<http://ultrasonic-labo.com/?p=13919>

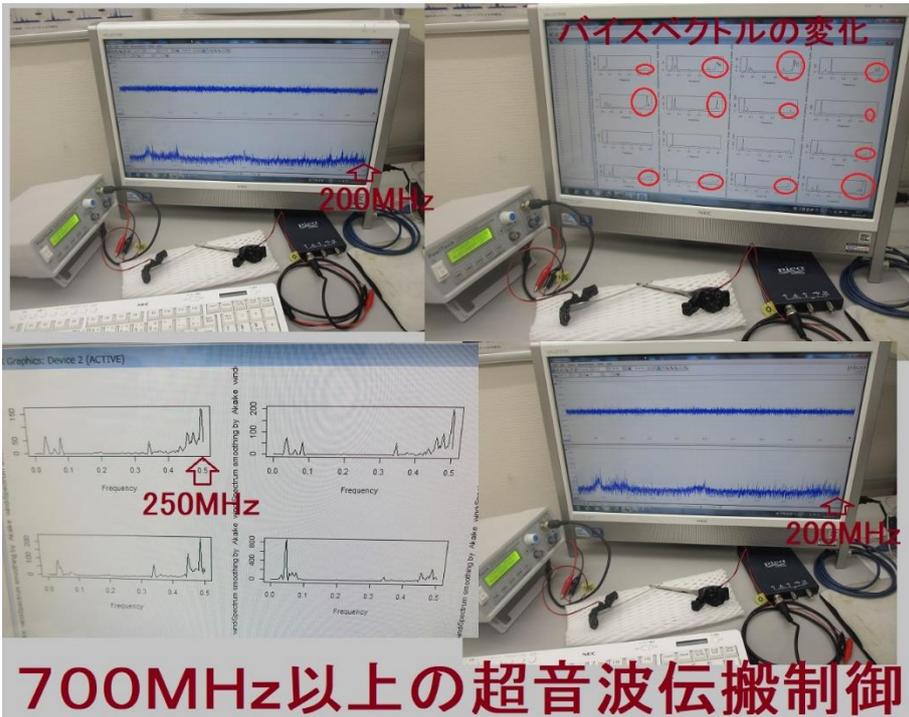
超音波洗浄に関する非線形制御技術
<http://ultrasonic-labo.com/?p=1497>

超音波システム（音圧測定解析、発振制御）
<http://ultrasonic-labo.com/?p=19422>

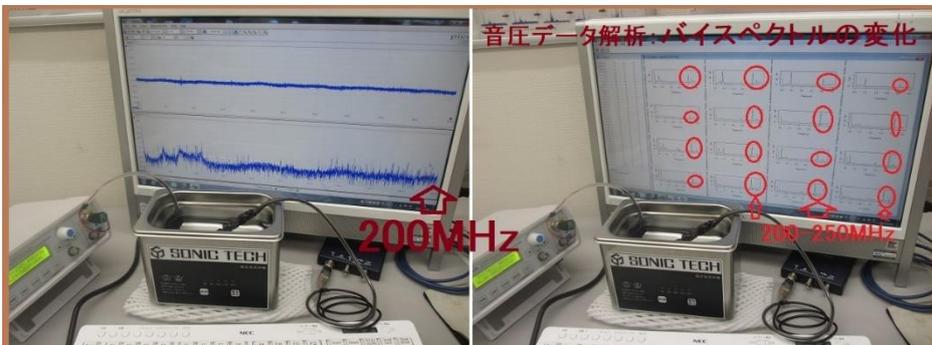
メガヘルツ超音波の効果 1
<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/adfb30ef89e6f5a76e9a04e70a0ca395.pdf>

メガヘルツ超音波の効果 2
<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/513b007f36fc8fb58a2b9c1f558d289c.pdf>

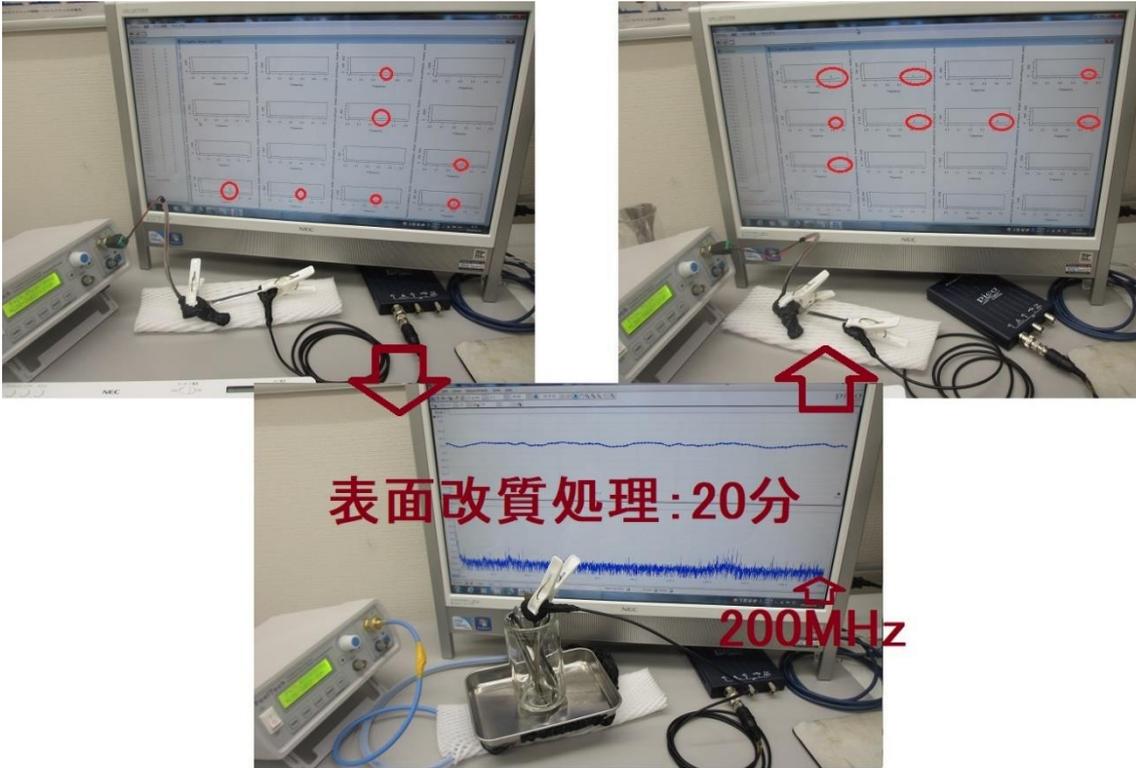
その他：参考



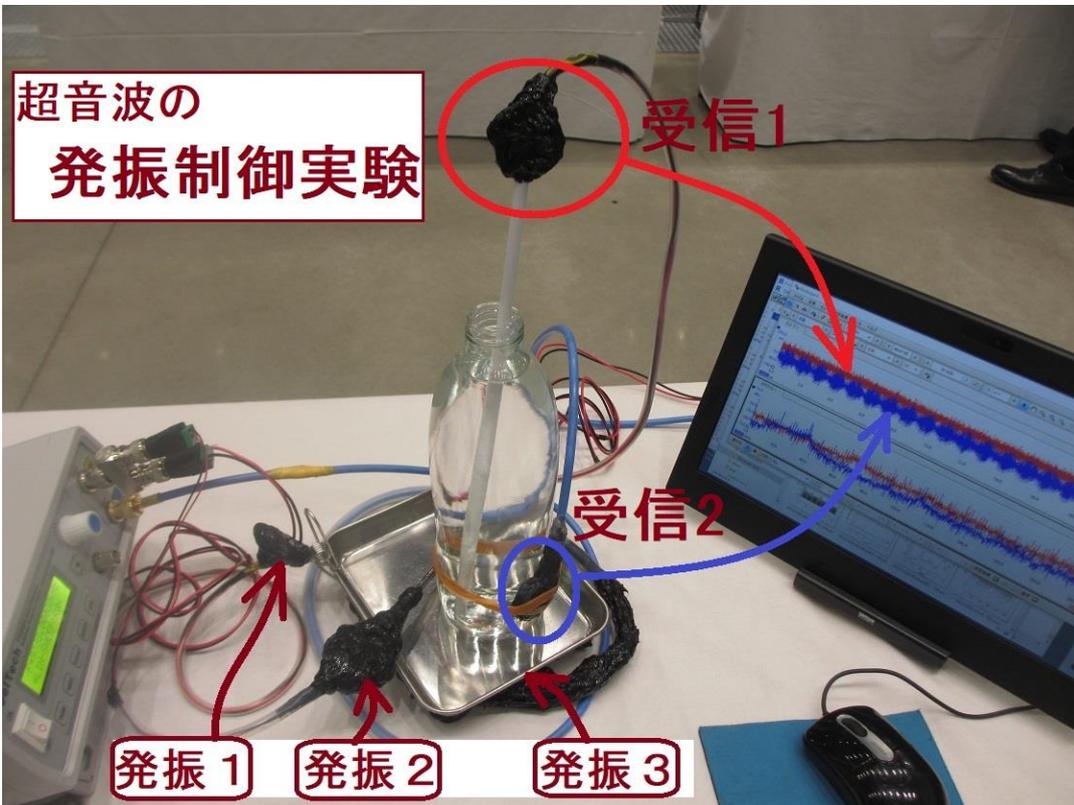
説明：超音波素子にステンレス部材を取り付けたプローブを点接触することで、非線形現象による高い周波数（ $250 \times 3 = 700\text{MHz}$ 以上）の超音波伝搬状態を実現した実験



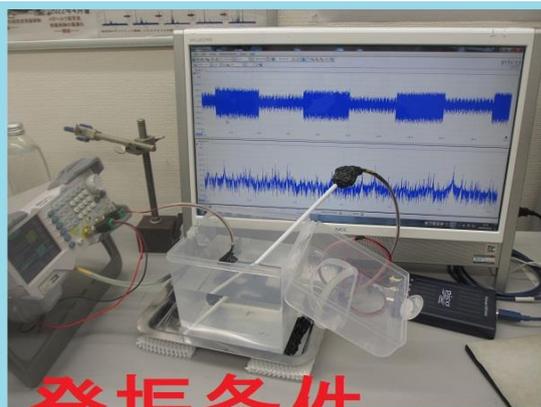
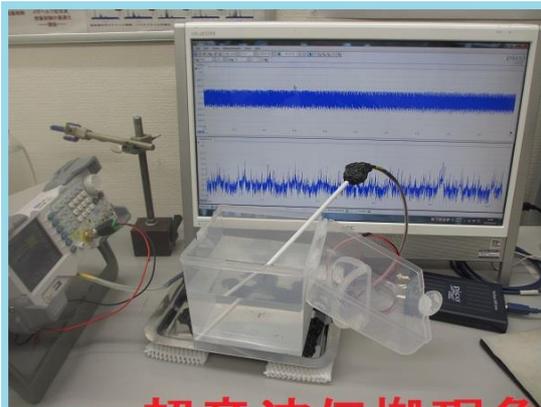
説明：超音波とファインバブルで表面処理した水槽の特性を利用した、 600MHz 以上の超音波伝搬制御実験（ナノレベルの洗浄・攪拌・・・効果が高い状態）



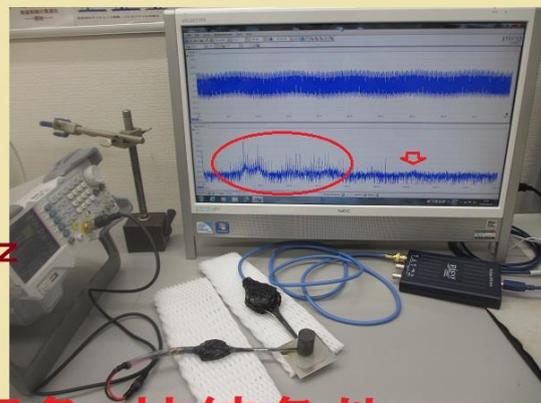
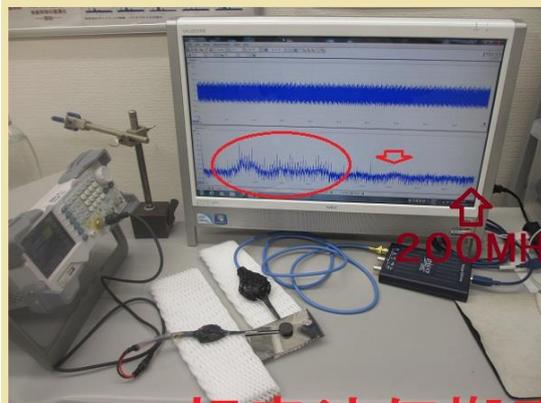
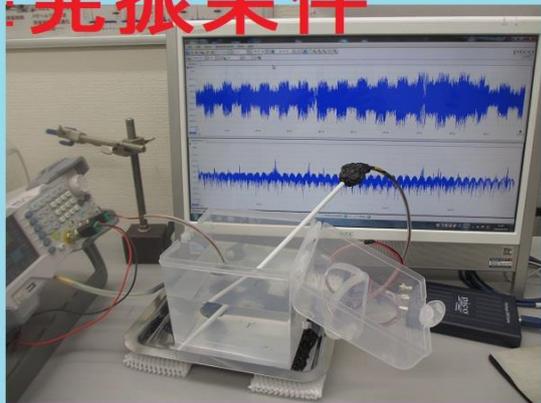
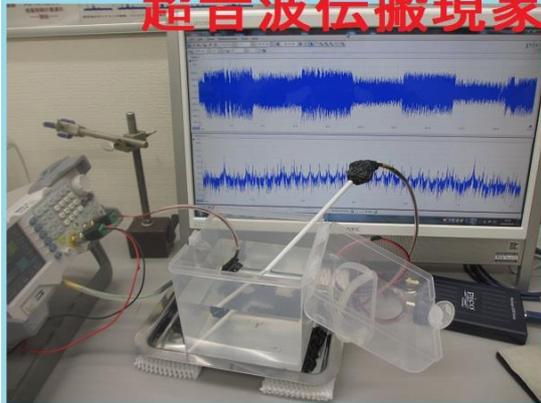
450MHzの伝搬状態可能な表面が、750MHz以上の伝搬状態可能に変わりました
 説明：メガヘルツの超音波とガラス容器による、ガラス容器内のステンレス部品の表面処理



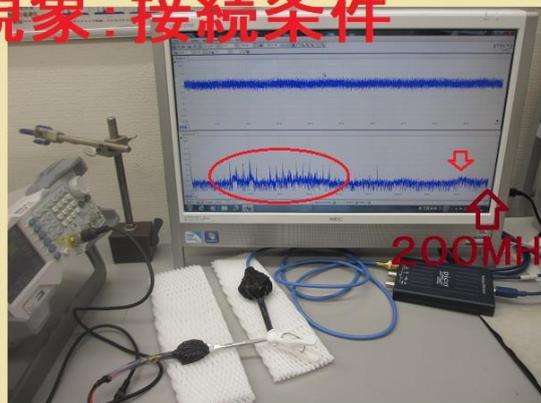
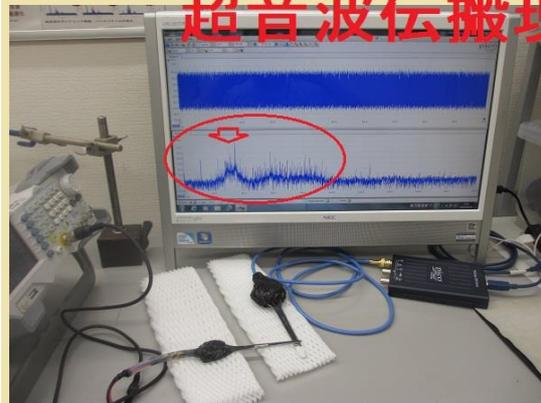
説明：メガヘルツの超音波による化学反応実験システム



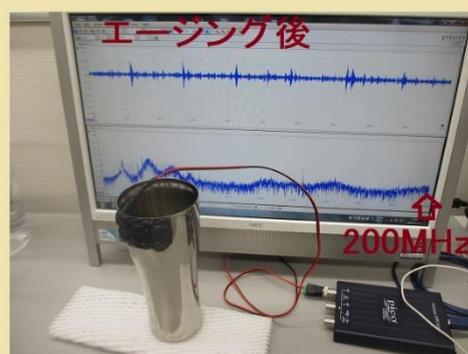
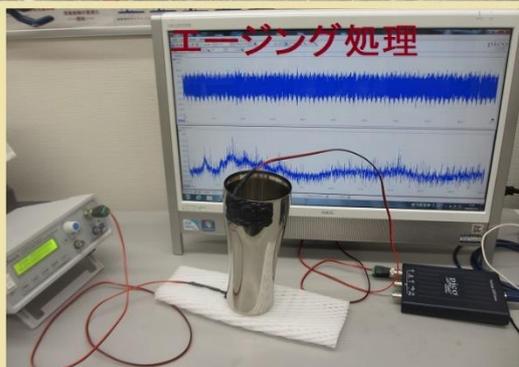
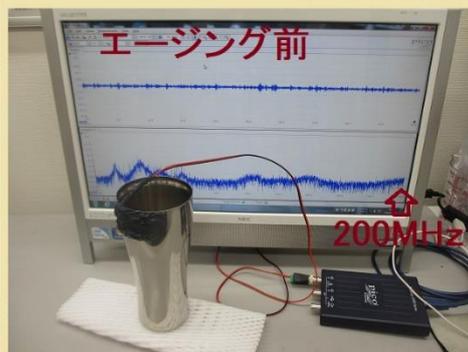
超音波伝搬現象：発振条件



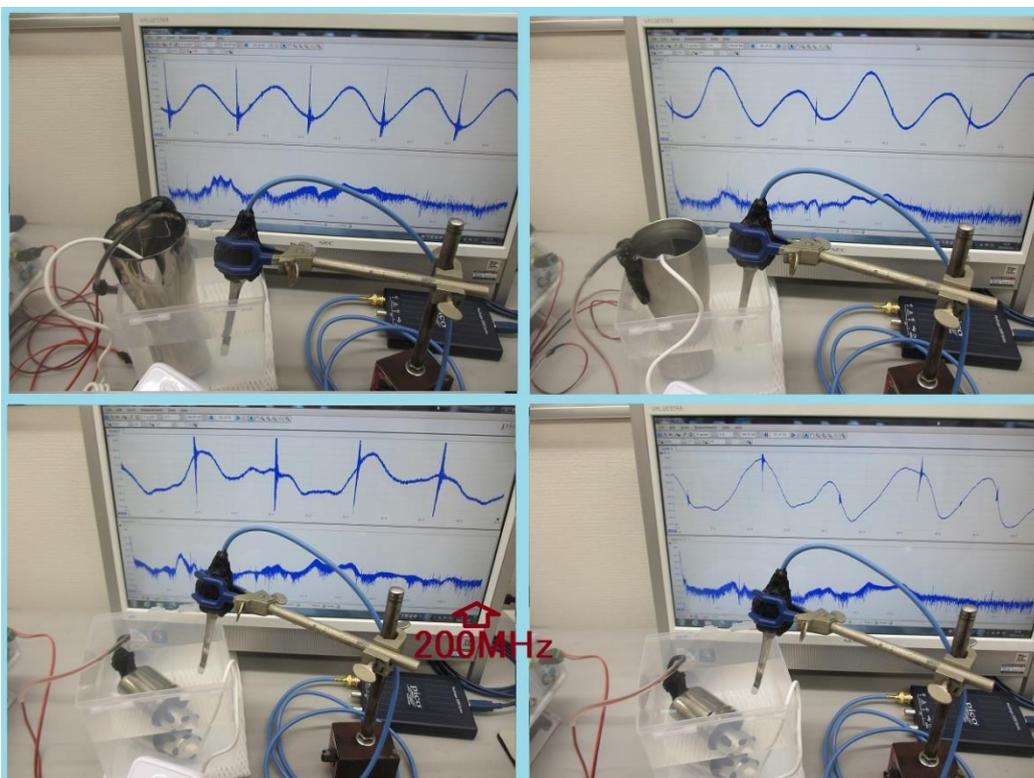
超音波伝搬現象：接続条件



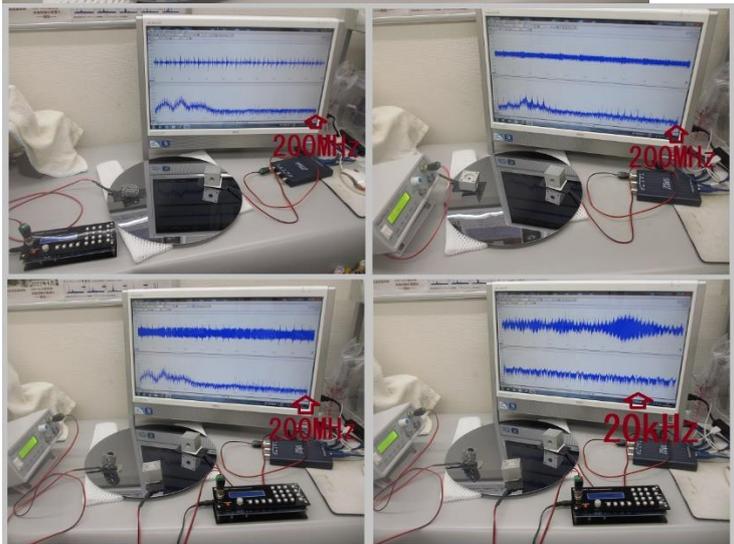
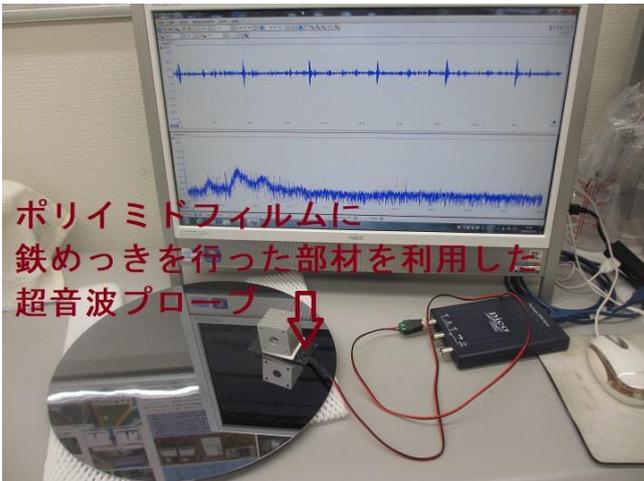
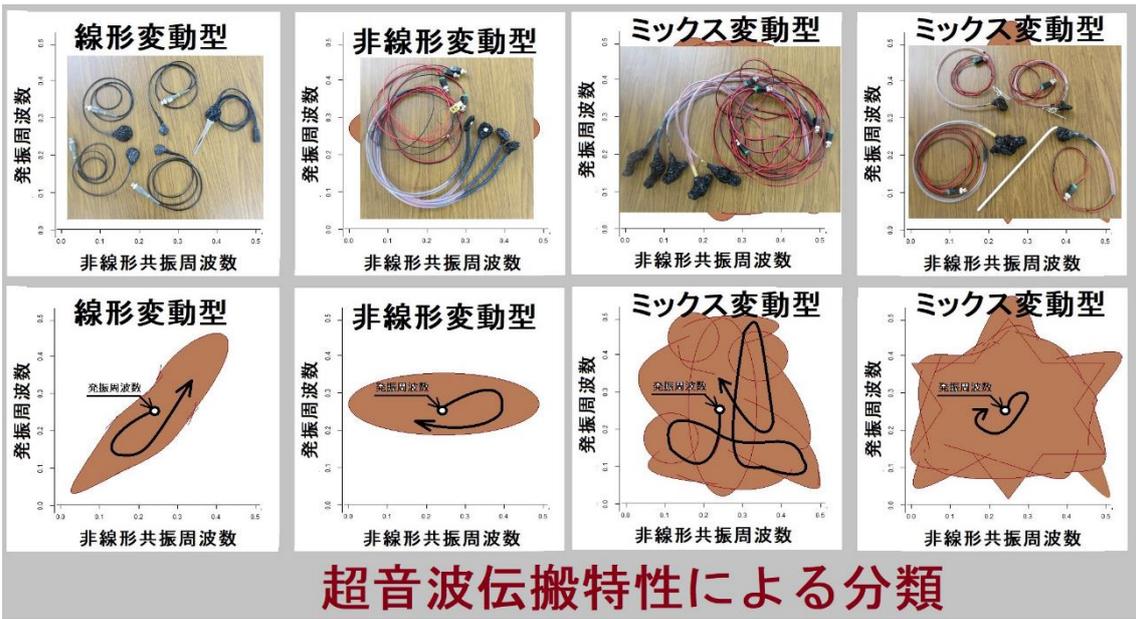
参考：応用事例



超音波プローブの製造技術



ステンレス容器を利用した超音波発振制御プローブ



ポリイミドフィルムに鉄めっきを行った部材を利用した超音波プローブによる半導体ウェハの超音波伝搬特性

以上