

超音波とファインバブルによる、表面処理（改質）技術

2020/4/15 超音波システム研究所

超音波とファインバブルによる

- 1) 表面残留応力の緩和処理技術
- 2) 化学反応の制御技術
- 3) 表面処理（めっき、各種コーティング、他）技術

はじめに

超音波とファインバブルの現象には複雑な相互作用があり、効果的な利用には、適切な、測定・評価・管理が必要となる。

特に、超音波振動の音圧測定に関して、音圧レベルの測定装置が多く、周波数の測定表示や測定データの解析を行っている測定装置（製品）や研究が少ないため、超音波のダイナミック特性の重要性が認識されていない状況である。

この、超音波のダイナミック特性について検討し、超音波とファインバブルの組み合わせによる新しい超音波システム技術を開発した。このシステム技術を使用して、超音波とファインバブルによる「樹脂・金属の表面改質」・・・様々な応用を行っている。その結果、超音波とファインバブル（ウルトラファインバブル）を利用することで、目的とする表面刺激（超音波伝搬状態）に対して適正な制御が可能な、超音波とファインバブルシステムが実現した。

特に、ナノレベルの攪拌、精密機械加工、溶接（ろう付け）、表面処理（めっき・・・）への応用や、グラフェン、CNT、・・・、金属粉末、・・・を利用した材料開発は、新しい効果に発展している。

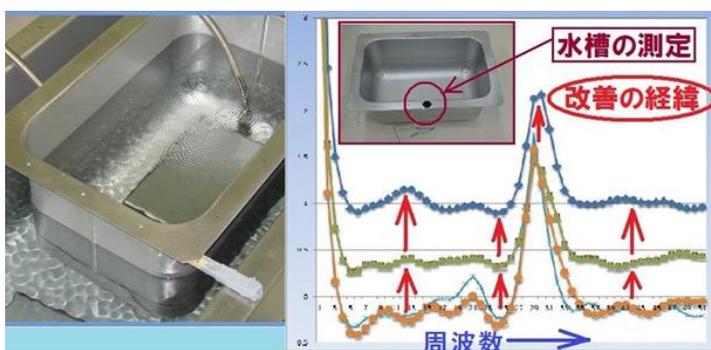


写真1 超音波水槽の表面改質効果

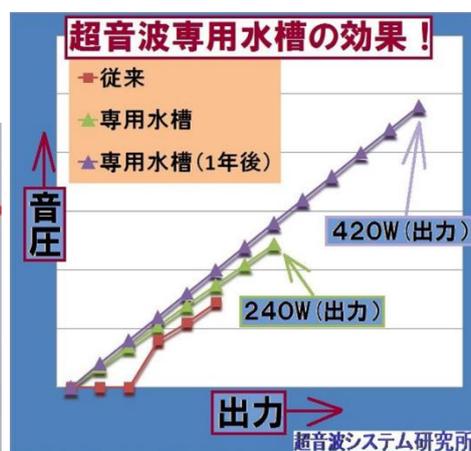


写真2 超音波振動子の表面改質効果

1. 何が問題か？

現在、ファインバブルを利用した、表面残留応力の緩和処理・・・は幅広く利用されているが、多数の問題がある。最大の問題は、対象物の表面全体に、表面状態に合わせた、均一でダイナミックなファインバブルの刺激が行われていないことである。具体的には、ファインバブルを、対象物の表面付近に移動させる超音波のコントロール技術が不十分なことである。

さらに、

- 1) 対象物の表面に関する振動（音響）計測・解析が十分に行われていない
- 2) 対象物の表面の特性に合わせた、
ファインバブルサイズの効果的な制御が実現していない
- 3) 水槽内のファインバブル分布が不均一（成り行き状態）である
- 4) ファインバブルの大きさに、バラツキがある、
あるいは時間とともに大きさが変化する
- 5) 1日、1週間、1年・・・を通して安定して利用できる構造（システム）がない

特に、適切な制御方法（技術）がないために

ファインバブルの安定した効果を継続できないことで、

偶然（対象物、治具、環境、気候の変化 等）に左右されているのが実状である。

上記の、実用化に関する問題を、ファインバブルと超音波の組み合わせによる、超音波とファインバブルのダイナミック制御技術で解決し、

（対象に最適なファインバブル・ナノバブルの移動を、超音波による音響流制御で操作する）

効率の良い、目的に合った「超音波ファインバブルシステム」が可能になった。

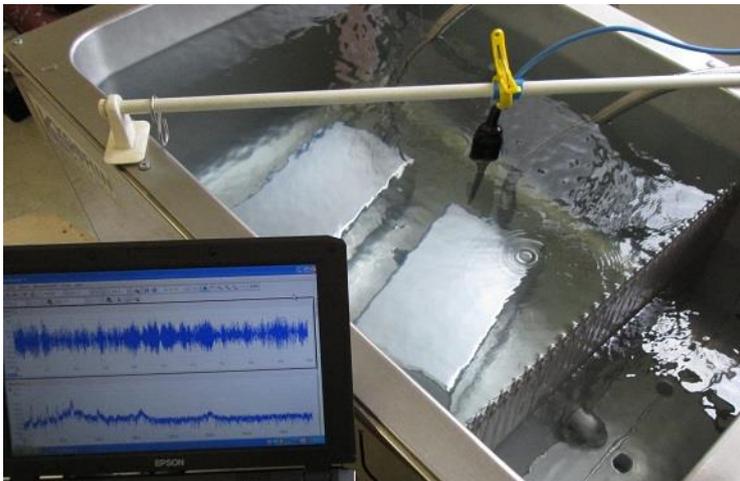


写真3 超音波洗浄機の音圧測定

2. どのようにして解決するのか？

ファインバブルと超音波の組み合わせ

20 μ 以下のファインバブルは、100 kHz以下の超音波により、瞬間的に無くなる。

その時、サイズが小さいほど、瞬間的に、大きなエネルギーを放出する。この現象を、

ファインバブルのサイズと超音波の周波数をダイナミックにコントロールすることで、目的に合わせた利用が可能になる。特に、ナノレベルの対象物への刺激やダメージが発生しやすい物への対応として、メガヘルツの超音波利用が有効になる。理由は、対象物のサイズが小さいほど、対象物の表面を伝搬する超音波刺激としての、表面弾性波は、1 MHzの刺激を受けても、50 MHz以上の周波数が主要成分になるからである。このことを、測定確認して超音波とファインバブルを制御することが解決のポイントとなる。

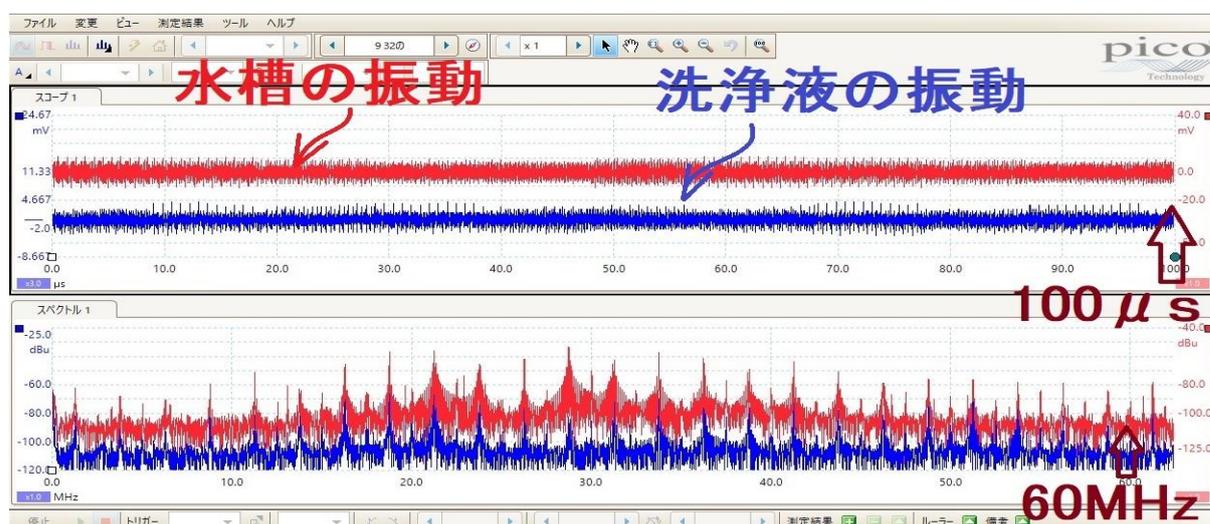


図1 音圧データ

2. 1 ファインバブルと超音波の組み合わせ効果1

通常、ファインバブルで、アルミ箔・・・に対して強い刺激（ダメージ・穴をあける・・・）を与えることはできない。超音波の場合、超音波の周波数に合わせた高い音圧レベルのキャビテーション位置で刺激（ダメージ・穴をあける・・・）を与えることができる。ファインバブルと超音波の組み合わせを行うと、超音波とファインバブルの相互作用により以下の事象が発生する、

2. 1. 1 ファインバブルの超音波共振による破壊・崩壊（エネルギーの放出）
2. 1. 2 ファインバブルの超音波共振による分散・粉碎（移動・ナノバブルの発生）

上記1、2に、超音波の非線形現象（注）である音響流により、超音波の周波数に合わせた高い音圧レベルのキャビテーション位置以外でも、アルミ箔・・・に対して強い刺激（ダメージ・穴をあける・分散・粉碎・・・）を与えることができる。

注：超音波の音圧データに関して、自己相関とバースペクトルの解析結果を評価することで超音波の非線形現象の状態を数値化（グラフ化）し、より効果的な音響流の最適制御を実現する

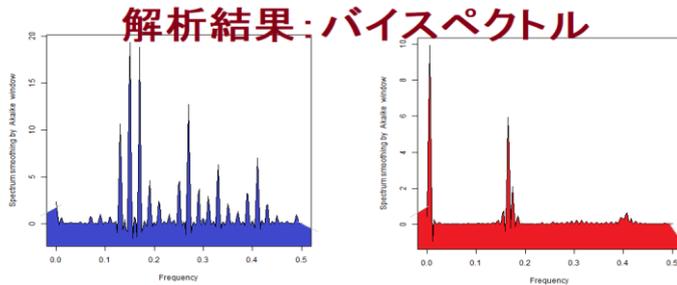


図2 音圧データの解析結果（バースペクトル）

2. 2 ファインバブルと超音波の組み合わせ効果2

組み合わせ効果1により以下の状態が実現する。

2. 2. 1 水槽内の液体の均一化。

（温度分布は、その他の方法でも実現できるが、溶存気体の濃度分布を均一にすることはファインバブルの重要な効果である）

2. 2. 2 液体の均一化により、超音波の伝搬効率が良くなる。

（10Wの超音波出力でも150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。100Wの超音波出力でも1600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超音波出力でも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。）

重要なことは、液体の均一化（温度分布や各種の濃度分布を小さくすること）で、超音波の効率が良くなるとともに、水槽内全体に、超音波の伝搬周波数の変化に応じた、ダイナミックな刺激が発生する。

以上により、水槽内の任意の位置で、アルミ箔・・・対象物に対して目的に合わせた刺激（ダメージ・穴をあける・乳化・分散・粉碎・攪拌・・・）を与えることができる。



写真4 ファインバブルとメガヘルツの超音波

2. 3 ファインバブルと超音波の組み合わせ効果3

組み合わせ効果1、2により、ファインバブルと超音波によるキャビテーション・音響流のダイナミック制御により、目的に合わせた、対象への刺激が可能になる。

特に、ファインバブルが、超音波によりウルトラファインバブルに粉碎され、水槽内のファインバブルの量よりもウルトラファインバブルの量が多くなると、超音波伝搬状態が安定し、超音波刺激のダイナミック制御が簡単に実現できるようになる。

この状態になると、ボルト・ナット・・・ネジの谷部を含めた表面全体に対する、表面改質効果が短時間で実現する。（注意：従来の超音波水槽や超音波振動子では難しい状態である。理由は、音圧測定解析に基づいた、水槽や振動子の表面が十分に改質（均一化）されていないために、均一な超音波照射が実現しない。）

2. 4 ファインバブルと超音波の制御

ファインバブルと超音波の組み合わせによる、効果的な表面への刺激は可能である、実用化には、対象物（目的、材質、構造、表面状態、サイズ、数量・・・）に合わせた、ファインバブルと超音波（キャビテーション・音響流）の制御方法が必要になる。

単調な制御は、以下の問題につながる（改質効果が小さい）

- 1) 低周波の振動モードの発生（超音波の減衰）
- 2) ファインバブルの結合傾向が高くなる（大きなサイズのファインバブルになる）
- 3) 淀み・渦の発生（溶存気体の濃度分布発生で、超音波が屈折する）
- 4) 非線形現象（高調波の発生）の減衰（最も有効な超音波刺激：音響流の効果が小さくなる）



写真5 ファインバブルと超音波



写真6 超音波計測装置（超音波テスター）

＜単調な制御問題に対する実用的な対応＞

ファイナブル・超音波による超音波刺激について、
実用的な制御・管理を行うために、以下の技術を利用する。

2. 4. 1 超音波伝搬状態の測定・解析技術

＜＜ 超音波計測装置（超音波テスター） ＞＞

特徴（標準的な仕様の場合）

- *測定（解析）周波数の範囲 0.1 Hz から 10 MHz
- *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です。

超音波プローブを応用（間接容器や対象物に取り付ける・・・）して、様々な測定を行います。

測定したデータについて、位置や状態と、弾性波動を考慮した解析で、各種の振動・音響性能として検出します。

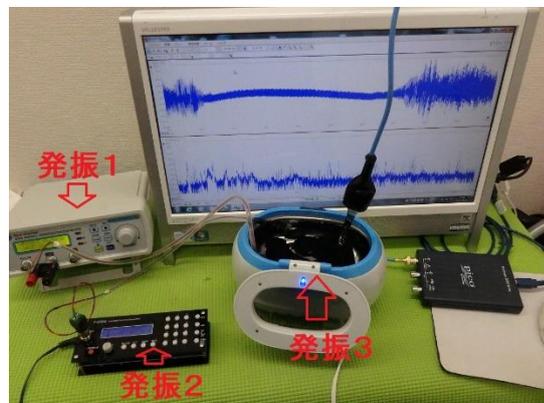
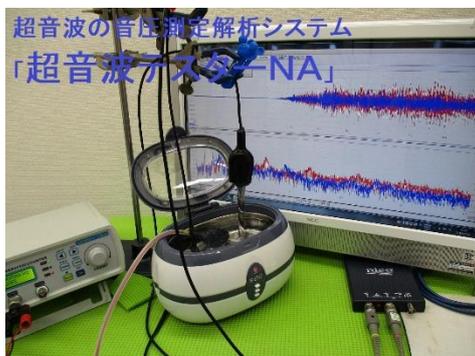


写真7 超音波計測装置（超音波テスター）

2. 4. 2 超音波専用水槽の設計・製造技術

音響インピーダンスと水槽構造の強度バランス（断面2次モーメント）を適正に設計する。

水槽内に淀みや渦が発生しにくい角部にする。

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を採用する。

水槽の表面は、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。

（超音波振動子の表面についても同様な設計・処理を行う。）



写真8 超音波専用水槽

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9 超音波専用水槽



写真10 オーバーフロー付き水槽

説明：オーバーフローの流れで、空気が水槽に入り、

超音波が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：音圧測定に基づいた、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（出力制御）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・・・の組み合わせにより、超音波が減衰する。

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、大量に空気（気体）を水槽内に入れると水槽内に、不均一な濃度分布が発生する。）

通常、超音波照射により、脱気は行われ、溶存気体の濃度は低下して、分布が発生する。

単純な液循環では、この濃度分布は解消できない。解決には、ファインバブルの効果（分散性）が必要。脱気・ファインバブル発生液循環が有効な理由。

超音波専用水槽の利用により、超音波の音圧と周波数のダイナミック制御が可能になる。

制御は液循環条件（配管位置、流路、流量、流速分布）のコントロールにより実現できる。

制御は複数の超音波について、液循環制御に合わせた、超音波の個別制御でも実現出来る。

以上の各技術を基礎として、対象へのファインバブルと超音波による刺激の制御を実現する。

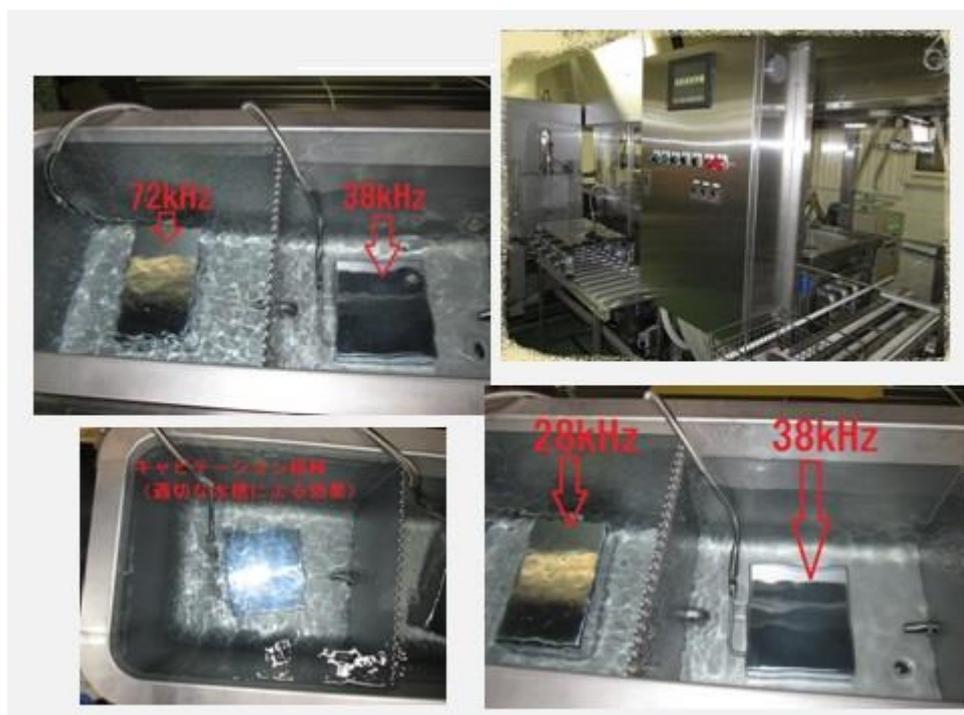


写真 1 1 液循環の最適化システム

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・・・）

コンピュータ技術（A I，データ処理、論理モデル、最適化、数学、・・・）

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する。そのための制御に、超音波システム研究所は、＜統計的な考え方＞を利用した「ファインバブル・超音波制御」方法を、実現する「測定・解析・評価方法」を開発した。

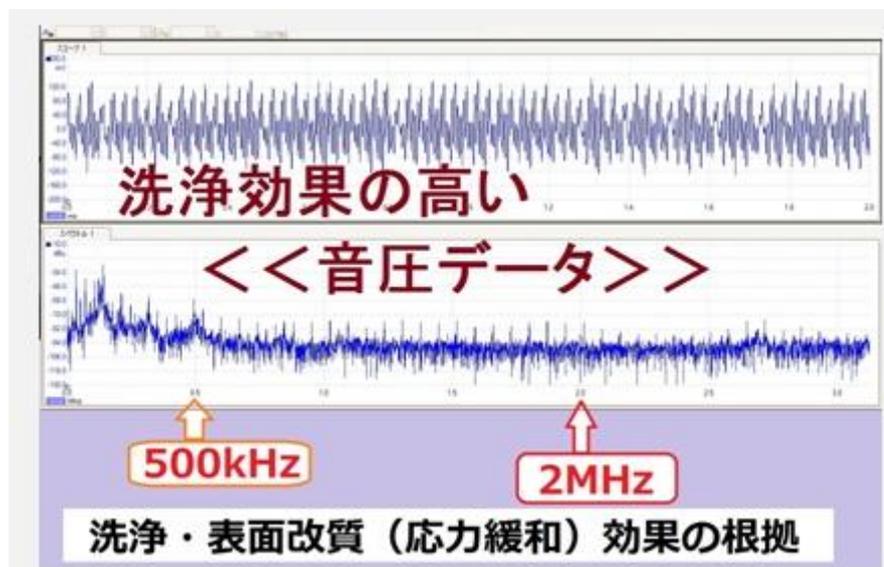


図3 28kHzと38kHzの超音波によるメガヘルツの音圧データ

<統計的な考え方について>

統計数理には、抽象的な性格と具体的な性格の二面があり、
具体的なものとの接触を通じて、抽象的な考えあるいは方法が発展させられていく、
これが統計数理の特質である

<超音波の研究について>

「キャビテーションの効果を安定させるには統計的な見方が不可欠」

<モデルについて>

モデルは対象に関する理解、予測、制御等を効果的に進めることを目的として構築されます。
正確なモデルの構築は難しく、常に対象の複雑さを適当に"丸めた"形の表現で検討を進めます。
その意味で、モデルの構成あるいは構築の過程は統計的思考が必要です。

<論理モデルの作成について>

(情報量基準を利用して)

1) 各種の基礎技術(注)に基づいて、対象に関する、

D1=客観的知識(学術的論理に裏付けられた理論)

D2=経験的知識(これまでの結果)

D3=観測データ(現実の状態)

からなる「情報データ群」、 $DS=(D1,D2,D3)$ を明確に認識し

その組織的利用から複数のモデル案を作成する

2) 統計的思考法を、

情報データ群(DS)の構成と、それに基づくモデルの提案と検証の繰り返し
によって情報獲得を実現する思考法と捉える

3) AICの利用により、様々なモデルの比較を行い、最適なモデルを決定する

4) 作成したモデルに基づいて、超音波装置・システムを構築する

5) 時間と効率を考え、以下のように対応することを提案しています

5-1) 「論理モデル作成事項」を考慮して

「直感によるモデル」を作成し複数の人が検討する

5-2) 実状のデータや新たな情報によりモデルを修正・検討する

5-3) 検討メンバーが合意できるモデルにより装置やシステムの具体的打ち合わせに入る

上記の参考資料

1) ダイナミックシステムの統計的解析と制御

: 赤池弘次/共著 中川東一郎/共著:サイエンス社

2) 生体のゆらぎとリズム コンピュータ解析入門

: 和田孝雄/著:講談社

ポイントは

表面弾性波の利用です、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

対処することが重要です

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

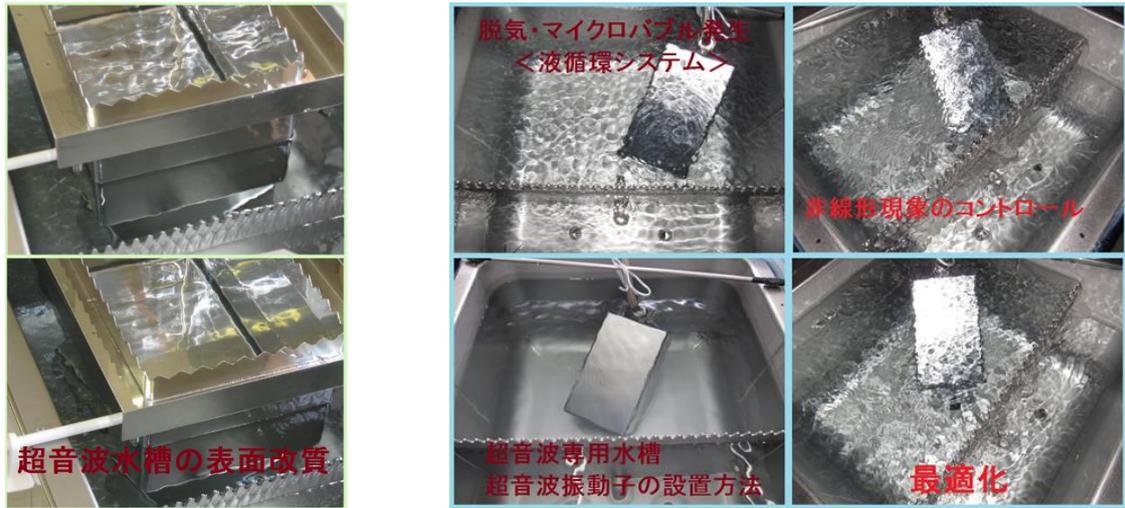
共振現象により高い振幅に実現させたことで起こる超音波振動の共振現象

4. <具体例>

超音波とファインバブルの効果について

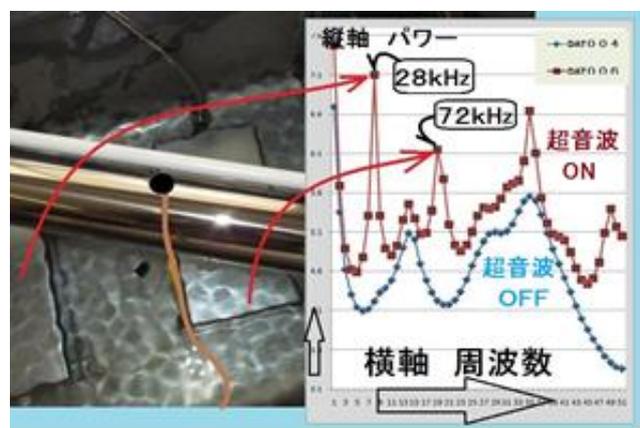
使用しているファインバブルは、対象物の表面と超音波による相互作用を利用して、複雑な形状変化（球状、線状、樹状構造・・・）が行われている。

特に、 10μ 以下のサイズに対する、水槽内の液体に伝搬する50メガヘルツ以上の超音波制御により、表面改質の効率を高くしている。



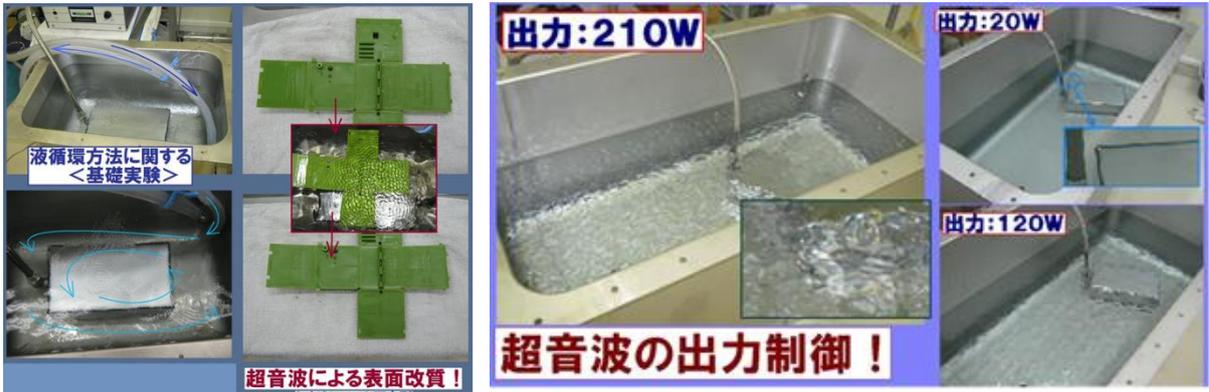
事例1： 超音波水槽（写真11）

事例2： 超音波振動子（写真12）



事例3： 自動車部品（写真13、写真14）

説明 自動車のマフラーに使用されるステンレスパイプの溶接技術は非常に高いが、溶接部分には一定レベル以上の応力分布が発生している。写真11は、ファインバブルを発生させた、超音波シャワー状態で、応力緩和させている様子。写真14は、ステンレスパイプの表面に伝搬する超音波を測定しながら、超音波制御している様子。写真14は、2種類（28kHz、72kHz）の超音波振動子を使用している。青と臙脂のグラフは、2種類の超音波の干渉状態と独立した伝搬状態。この2つの状態変化を利用（制御）することで、 10μ 以下のファインバブル形状を有効にコントロールしている。



事例4： 樹脂部品 (写真15, 16)

説明 樹脂部品はダメージを与えないように注意することが必要である。

写真13は、ファインバブル・ナノバブルの効果で、超音波出力に合わせて水槽内全体に、均一な伝搬状態の制御ができることを示した写真。樹脂部品によっては出力を10Wにした事例もある。写真12は、液循環の設定と超音波制御により、樹脂表面の離型剤の洗浄と応力緩和を行った実験写真。

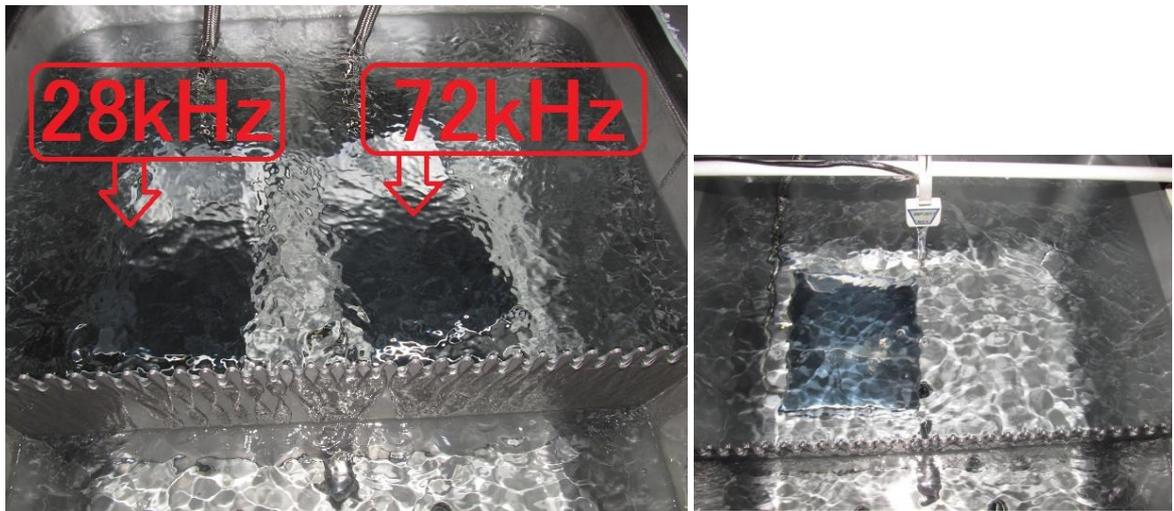


写真 17 音響流のコントロール

実際の効果 (具体例)

通常のステンレス水槽の溶接では、2種類の異なる超音波振動子を同時照射することで、高い音圧と高い周波数の超音波伝搬現象により、溶接割れが発生する。写真1の場合、(超音波水槽の表面改質効果により) 溶接割れは発生しない。(その他、超音波利用時には、数 μ のバリ取り・・・さまざまな効果がある) 写真2 (超音波振動子の表面改質効果) のような均一な状態になると、超音波振動子の効率は3000時間程度の使用までは、使用するほど均一で効率的な超音波照射を

実現する。(適切な条件では、出力300W仕様の振動子で、600Wの超音波出力状態を実現している) さらに、適切なファインバブルの利用により、28kHzや40kHzの超音波振動子が20年間以上安定して使用できる。(通常、3年以内に超音波の音圧レベルが減衰し、伝搬周波数が低周波にシフトする)

樹脂部品の場合、特にプラスチックレンズやエンジニアリングプラスチックの、コーティングや表面処理に関して(均一な塗装、製造時の歩留まりの改善...) 多数の実績がある。

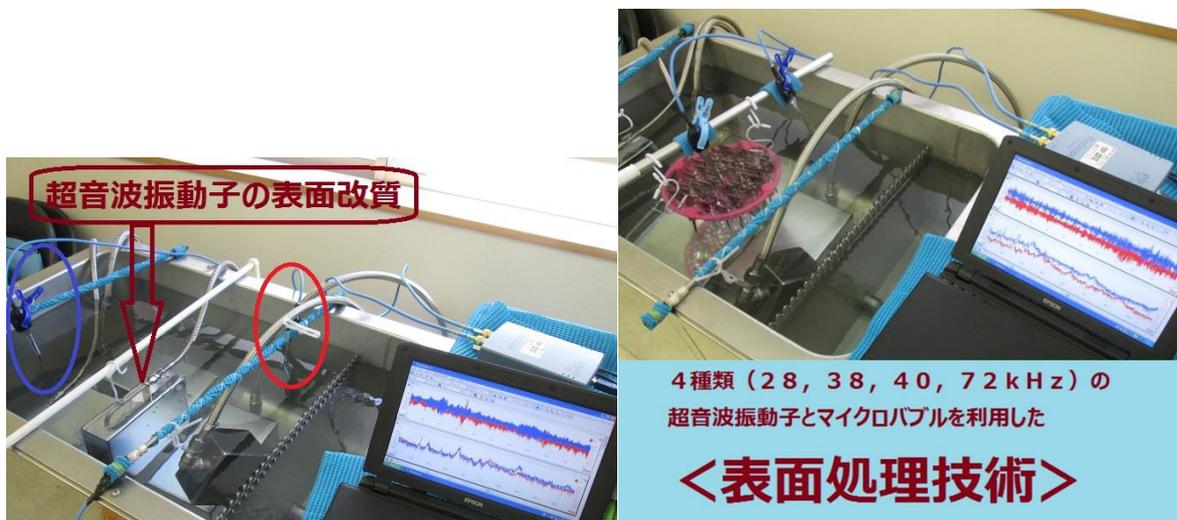
まとめ

技術の進化とともに、新しい応用(新素材の開発:樹脂と金属・ガラス...の組み合わせ...)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(数学や哲学)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。

超音波の非線形現象の可能性を考え、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

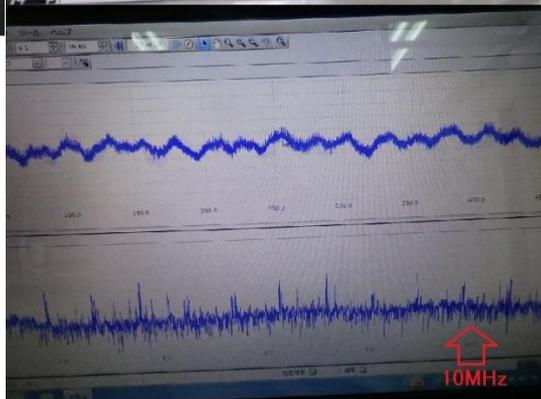
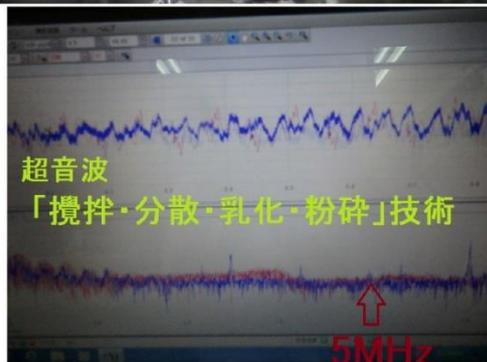
- 1) ダイナミックシステムの統計的解析と制御:赤池 弘次/共著 中川 東一郎/共著:サイエンス社
- 2) 超音波工学と応用技術:ベ.ア.アグラナート/[他]共著 青山 忠明/訳 遠藤 敬一/訳:日ソ通信社
- 3) やさしい超音波工学:川端 昭/編著 一之瀬 昇/高橋 貞行 著:工業調査会



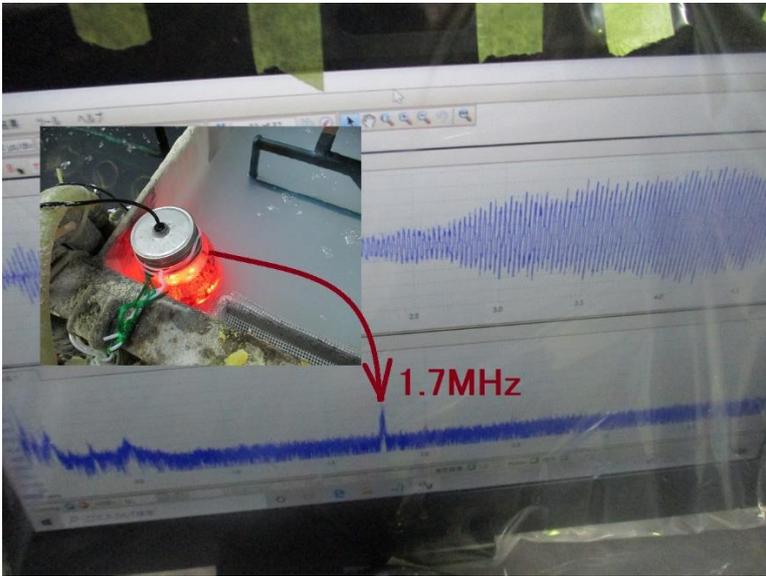
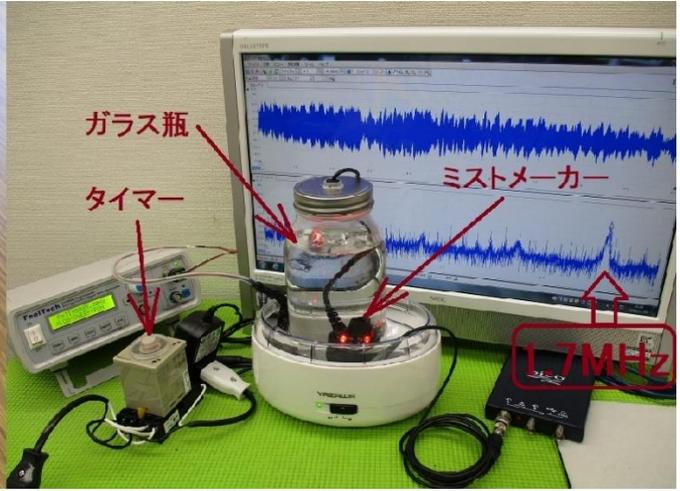
参考写真 応用（ナノレベルの処理：攪拌・乳化・分散・粉碎、粒子・粉末の表面改質・・・）

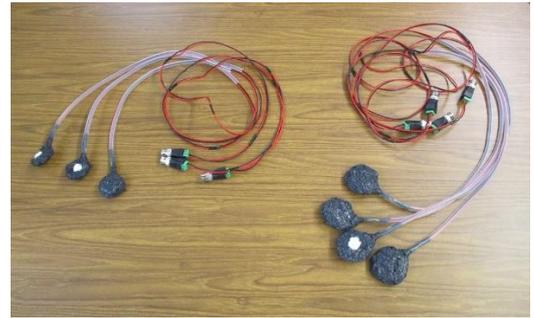


上記の状態でCNTのナノ化が実現します
回転させると、確実に良くなります



メガヘルツの超音波利用事例





超音波の音圧測定解析システム

<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/6276f8682dfb73e51431dd9b93f0c530.pdf>

メガヘルツの超音波発振制御プローブを利用した実験動画

<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/202589aebc71d44adfc97ee9255ae430.pdf>

超音波技術 (R言語)

<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/4e8bd13014b40d79f1ccb1f5bad9a249-1.pdf>

脱気ファインバブル発生液循環システム

<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/581ee1643264a31d011434361a0e99bf.pdf>

<<参考>>

音圧計見積もり資料20190930

<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/1d3ed28f158a77e2811b41c99bc8c7f6.pdf>

メガヘルツの超音波発信プローブ (SSP仕様書verNA40抜粋)

<http://ultrasonic-labo.com/wp-content/uploads/e38cc1cf12893769f473033b9b703a5f.pdf>



【本件に関するお問合せ先】

超音波システム研究所

住所：〒192-0046 東京都八王子市明神町2丁目25-3

SOHOプラザ京王八王子 303

担当 齊木 ホームページ <http://ultrasonic-labo.com/>