

## マイクロバブル・ナノバブル制御による、樹脂・金属の表面改質

(超音波とマイクロバブルによる表面残留応力の緩和処理技術)

### はじめに

マイクロバブル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る。

その中に、影響の大きさに比べ研究が少ない事項が、水槽と液循環である。

この条件をマイクロバブルについて検討し、超音波との組み合わせによる新しいマイクロバブル・超音波システムを製作した。このシステムを使用して、超音波とマイクロバブルによる「樹脂・金属の表面改質」を行っている。その結果、超音波による、マイクロバブルのナノバブル化を利用することで、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、

「樹脂・金属の表面改質」（超音波専用水槽と液循環装置による）システムが実現した。

特に、大きな部品表面に対する、マイクロバブル・超音波シャワーの利用や、金属粉末における表面処理は、新しい効果に発展している。

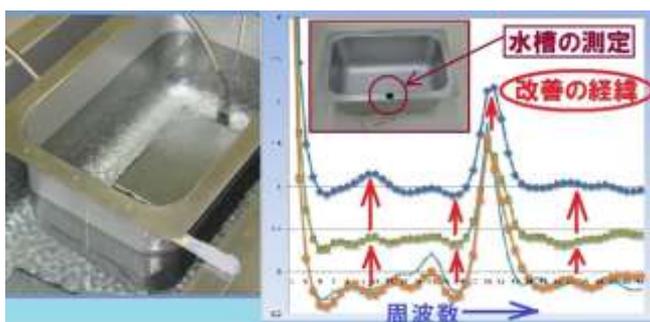


写真1 超音波水槽の表面改質効果

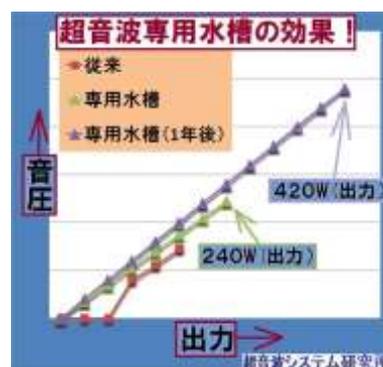


写真2 超音波振動子の表面改質効果

### 1. 何が問題か？

現在、マイクロバブルを利用した、表面残留応力の緩和処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、均一なマイクロバブルの刺激が行われていないことである。具体的には、マイクロバブル・ナノバブルを、対象物の表面付近に移動させる安定した手段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、マイクロバブルサイズの効果的な制御が実現していない
- 3) 水槽内のマイクロバブル分布が不均一（成り行き状態）である
- 4) マイクロバブルの大きさに、大きなバラツキがある
- 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、適切な制御方法がないために

マイクロ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、マイクロバブルと超音波の組み合わせにより解決し、

（対象に最適なマイクロバブル・ナノバブルの移動を、超音波による音響流制御技術を利用する）  
効率の良い、目的に合った「表面改質（残留応力の緩和処理）」が可能になった。

## 2. どのようにして解決するのか？

マイクロバブルと超音波の組み合わせ

### 2. 1 マイクロバブルと超音波の組み合わせ効果1

通常、マイクロバブルで、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。マイクロバブルと超音波の組み合わせを行うと、超音波とマイクロバブルの相互作用により以下の事象が発生する、

2. 1. 1 マイクロ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 マイクロ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・・・）を与えることができる。

### 2. 2 マイクロ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マイクロ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。200W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。）

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に応じた、均一な刺激が発生する。

以上により、水槽内の任意の位置で、アルミ箔・・・に対して強い刺激（ダメージ・穴をあける・・・）を与えることができる。

## 2. 3 マイクロ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、マイクロバブル・ナノバブルの破壊・崩壊エネルギーと超音波によるキャビテーション・音響流の効果により、均一で、効率の高い、表面刺激：「樹脂・金属の表面改質（表面残留応力の緩和処理）」が可能になる。

特に、マイクロバブルが、超音波によりナノバブルに粉碎され、水槽内のマイクロバブルの量よりもナノバブルの量が多くなると、超音波伝搬状態が安定し、音圧レベルの均一な照射・コントロールが（適切な液循環の制御により）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、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 マイクロバブルと超音波の制御

マイクロ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、マイクロバブルと超音波（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) マイクロバブルの結合傾向が高くなる（大きなサイズのマイクロバブルになる）
- 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3 マイクロバブルと超音波



写真4 超音波計測装置（超音波テスター）

<上記の問題に対する実用的な対応>

マイクロバブル・ナノバブル・超音波による表面改質について、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。

### 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バランスを適正に設計する。

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、マイクロ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。）

### 2. 4. 3 液循環技術

脱気・マイクロバブル発生液循環（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マイクロバブルにする）



写真5 超音波専用水槽      写真6 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マイクロバブル発生液循環の状態。

ポイント：適切な超音波とマイクロバブル発生液循環のバランス。マイクロ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。

マイクロ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、溶存気体の濃度が低下すると、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低下して、キャビテーションの効果も小さくなる。（説明としては、キャビテーション核の必要性が空気を入れる理由。）

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、マイクロバブルの効果（分散性）が必要。脱気・マイクロ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

以上の各技術を基礎として、対象物へのマイクロバブルと超音波による刺激の制御を実現する。

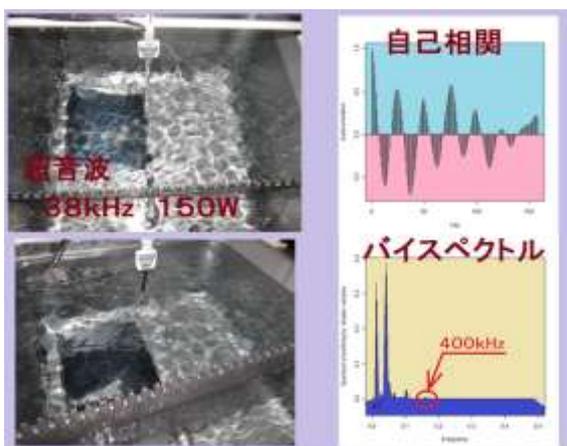


写真7 液循環の最適化例

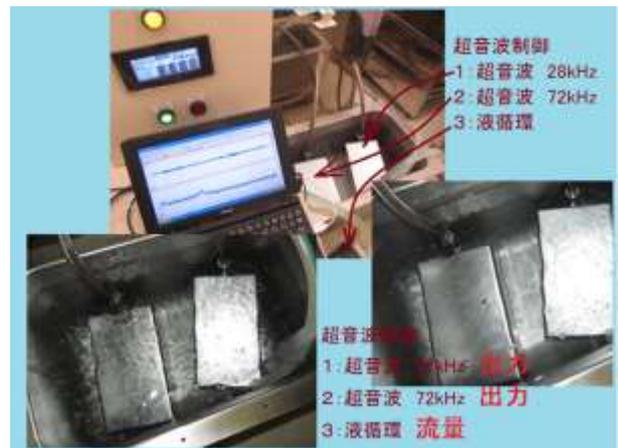


写真8 ジャグリング定理を応用した制御

### 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、マイクロ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、シャノンのジャグリング定理を応用した「マイクロバブル・超音波制御」方法を、実現する制御装置（制御BOX）を開発した。

注：株式会社ワザワ様との共同開発により制御装置を製作。

<制御について>

各種データの時系列変化の様子を解析・評価して、時間で移動するボールのジャグリング状態に相当する、超音波伝搬現象の「サイクル」と、「影響範囲」を見つける。この関係性からボールN個のジャグリング状態を設定して制御を行うと、システムの状態に適した制御となり、効率の高い表面改質システム（マイクロバブルと超音波の最適化状態）となる。

<< シャノンのジャグリング定理の応用 >>

シャノンのジャグリング定理

$$(F + D) * H = (V + D) * N$$

F : ボールの滞空時間 (Flight time)      D : 手中にある時間 (Dwelling time)

H : 手の数 (Hands)      V : 手が空っぽの時間 (Vacant time)

N : ボールの数 (Number of balls)

<< 応用 >>

F : 超音波の発振・出力時間      D : 循環ポンプの運転時間

H : 基本サイクル (キャビテーション・加速度のピークの発生する)

V : 脱気・マイクロバブル発生装置の運転時間

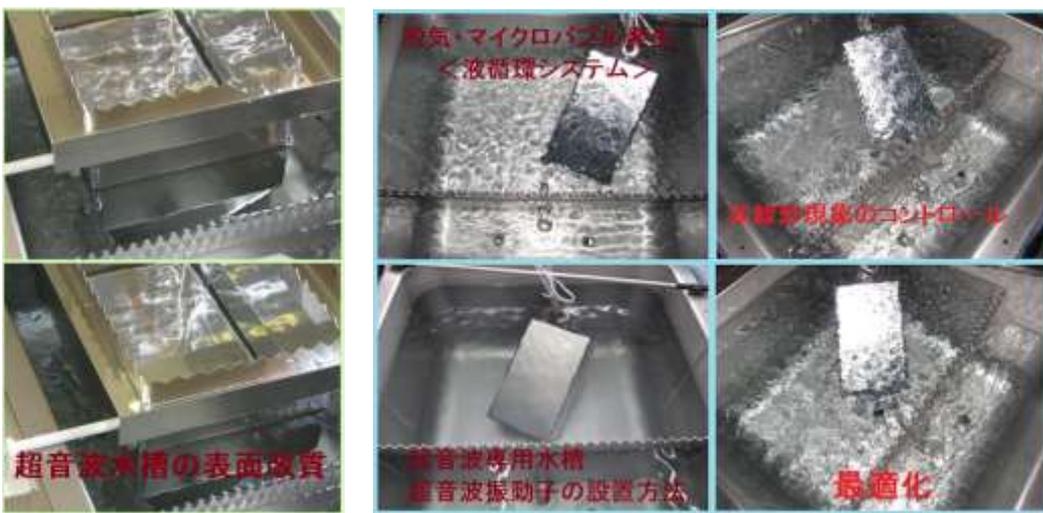
N : 超音波 (発振) 周波数の異なる振動子の数

4. <具体例>

超音波とマイクロバブルの効果 (表面改質) について

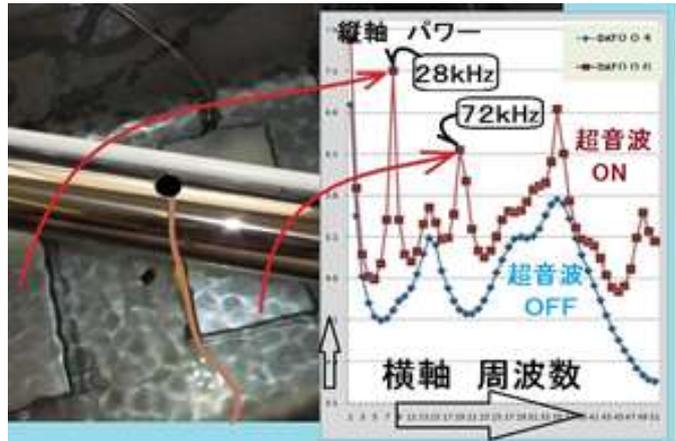
使用しているマイクロバブルは、対象物の表面と超音波による相互作用を利用して、複雑な形状変化 (球状、線状、樹状構造・・・) が、行われている。

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。



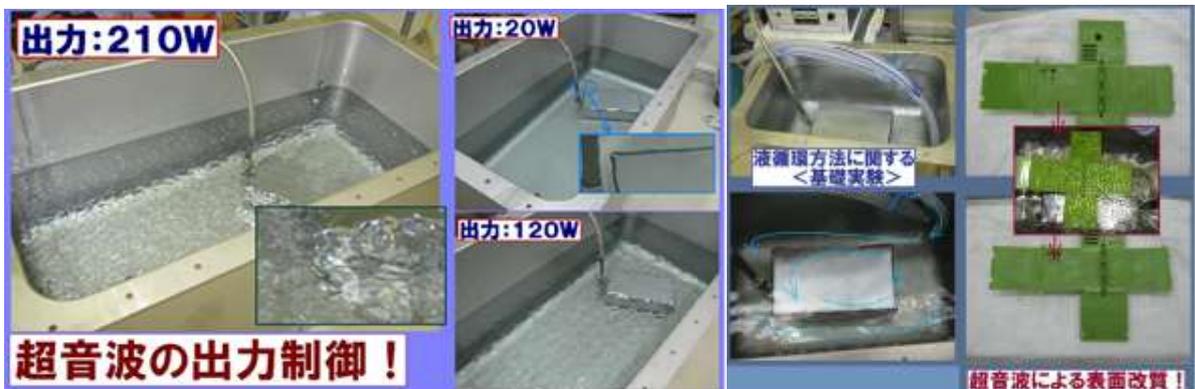
事例1 : 超音波水槽 (写真9)

事例2 : 超音波振動子 (写真10)



事例3： 自動車部品 （写真11、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、マイクロ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、10 $\mu$ 以下のマイクロ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12、13）

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12は、マイクロバブル・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13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。

## 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 $\mu$ 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の出力を実現している）さらに、適切なマイクロバブルの利用により、28kHzや40kHzの超音波振動子が10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

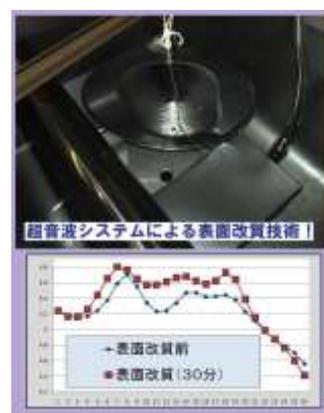
技術の進化とともに、新しい応用（ナノ粒子・粉末の表面処理・・・）や組み合わせの可能性が大きく広がっている。特に、異質なジャンルや根本的な学問（数学や哲学）を取り入れることで、今後ますます超音波・マイクロバブルという組み合わせの技術は飛躍すると感じる。

マイクロバブル・ナノ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・マイクロ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

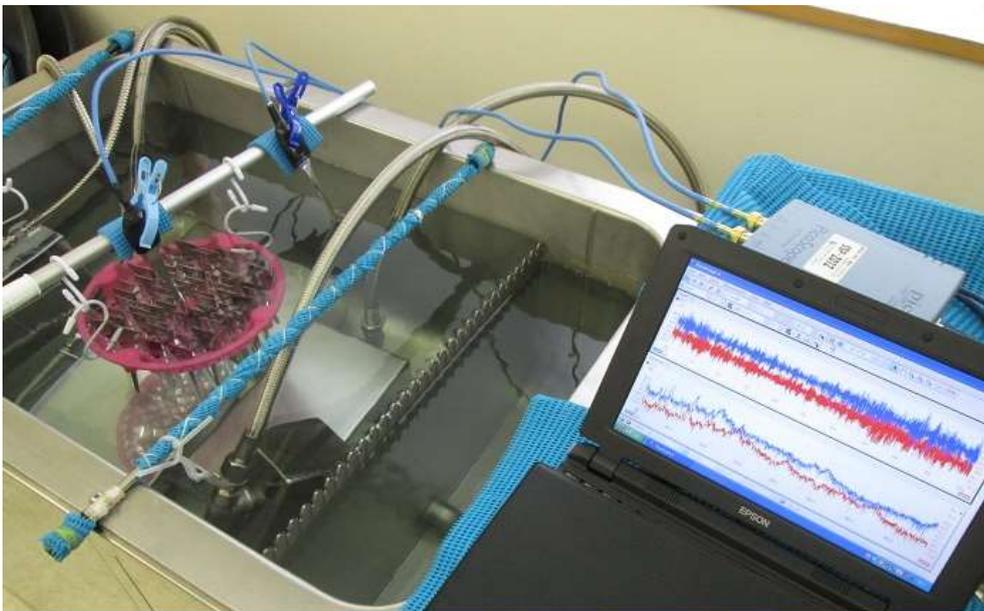
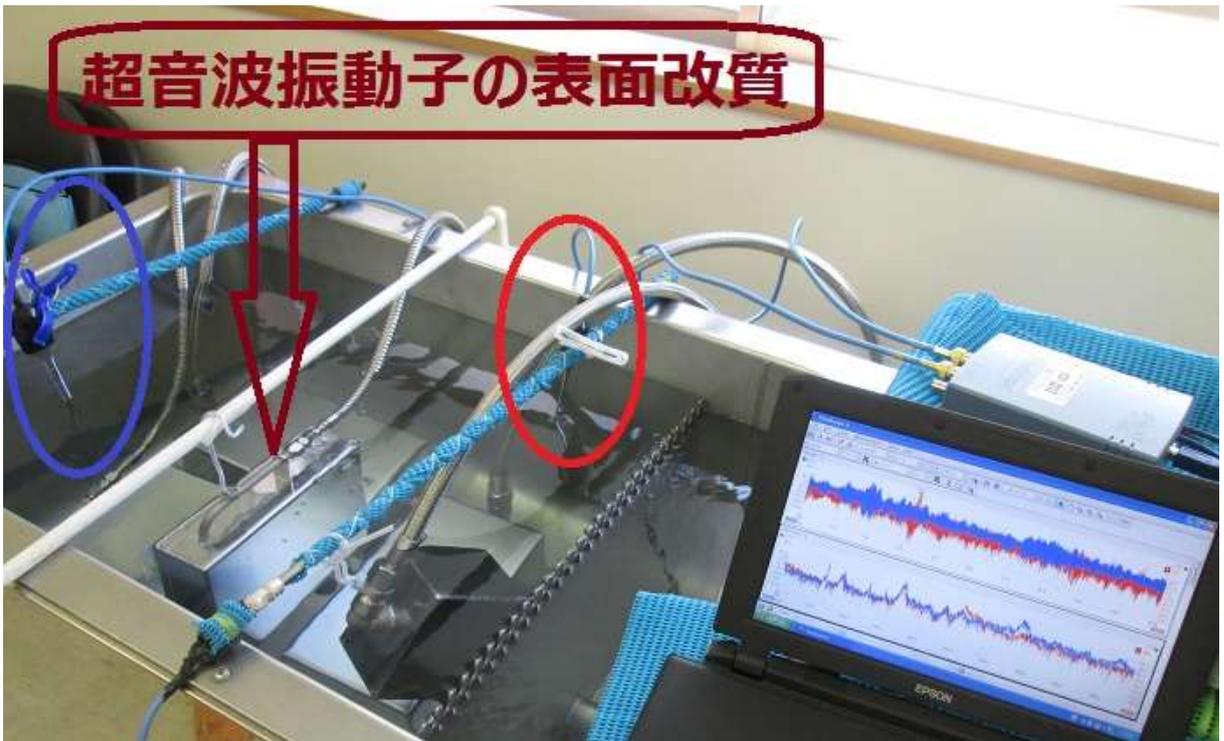
- 1) ダイナミックシステムの統計的解析と制御:赤池 弘次/共著 中川 東一郎/共著:サイエンス社
- 2) 超音波工学と応用技術:ベ.ア.アグラナート/[他]共著 青山 忠明/訳 遠藤 敬一/訳:日ソ通信社
- 3) やさしい超音波工学:川端 昭/編著 一之瀬 昇/高橋 貞行 著:工業調査会

追加可能であれば以下の写真も添付してください



参考写真 新しい応用（ナノ粒子・粉末の表面処理・・・）

## 超音波振動子の表面改質



4種類（28, 38, 40, 72 kHz）の  
超音波振動子とマイクロバブルを利用した

＜表面処理技術＞



★未だ解明されていない点も多い、超微細気泡の謎に迫る！  
各種メカニズムに関する最新の知見と各種応用技術を詳述！

## マイクロバブル(ファインバブル)の メカニズム・特性制御と実際応用のポイント

### 発刊・体裁・価格

発刊 2015年3月27日 定価 63,000円+税  
体裁 B5判 ソフトカバー 469ページ ISBN 978-4-86502-079-3 詳細、申込方法はこちらを参照

### 本書のポイント

- 各種発生方式別にみる、気泡発生メカニズムやその特徴・挙動、応用のポイント等を解説！  
～加圧溶解法・エジェクター方式・ベンチュリ管式・ナノ多孔質フィルム・超音波方式等々～
- マイクロバブル・ナノバブル(ファインバブル・ウルトラファインバブル)の発生・合体・消滅・安定化メカニズム、洗浄効果・生物活性効果等の機能発生メカニズムについて考察！
- バブルの物性・特性とその収縮挙動・温度の影響・化学反応・相互作用・中和反応とは！？
- 気泡径どのように測定する？各種法の原理・長短所とその選定法とは？  
粒子挙動・特性評価に向けた各種シミュレーション事例も紹介！
- 様々な分野ごとの研究開発・利活用の最新状況や、各分野事情・実状に対応した条件設定の考え方・性能を引き出す方法等、適用のポイントについても解説！  
～ナノ粒子合成・エマルジョン・晶析・膜ろ過・水処理・光化学反応・洗浄・殺菌・食品・農業・養殖・バブル製剤・美容・船舶・土木・土壌浄化等々～

## 2015年(上記の書籍発行) 以降の進展について

LCP樹脂(注1)と超音波との関係について  
超音波システム研究所が

1) 2014年6月から超音波伝搬に関する測定確認を開始しました

2) 2015年8月から

富士高压フレキシブルホース株式会社様(注2)の  
超音波洗浄機で使用開始しました

3) 2015年12月から

日本バレル工業株式会社様(注3)の  
超音波を利用しためっき処理で使用開始しました

4) 富士高压フレキシブルホース株式会社様

日本バレル工業株式会社様

2017年2月から

表面残留応力処理を行った各種治具を利用して  
表面弾性波を制御することで

超音波加工・溶接・化学反応・表面検査・・・応用を開始しました

注1:樹脂名:LCP樹脂(上野液晶ポリマーUENOLCP) <https://www.ueno-fc.co.jp/lcp/>  
UENO LCPIは、液晶ポリマーの世界的原料(モノマー)メーカーである、上野製薬株式会  
社がその強みとノウハウを活かし、独自に研究開発した熱可塑性ポリマーです。

LCP樹脂の製造販売:上野製薬株式会社 <https://www.ueno-fc.co.jp/>

注意:特許出願済み

LCP樹脂(液晶ポリマー)の超音波利用に関しては

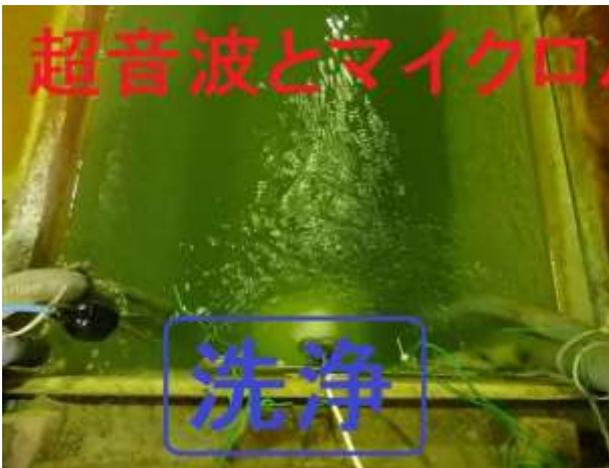
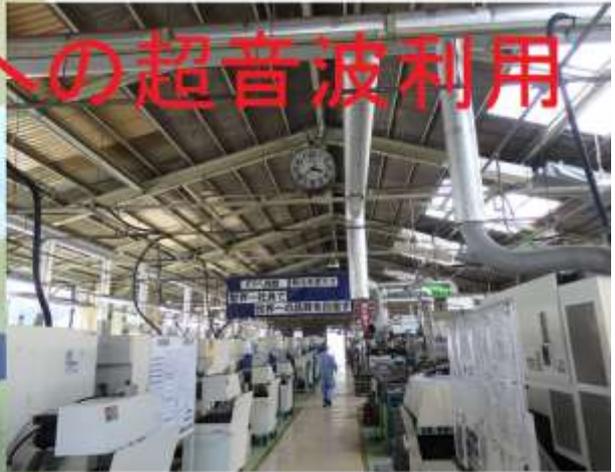
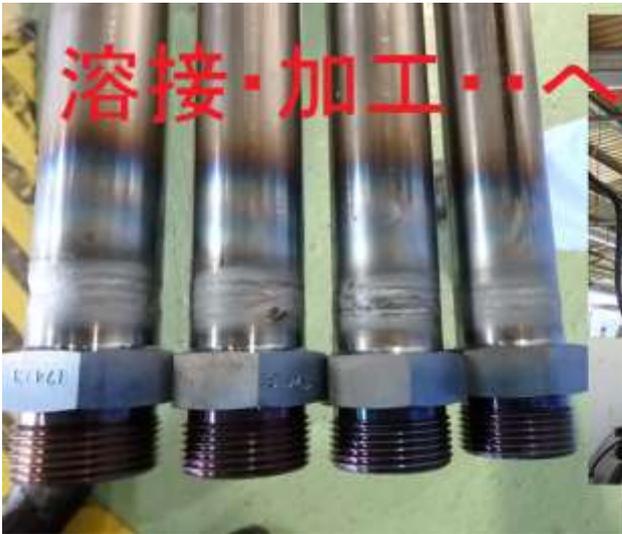
上野製薬株式会社による特許出願が行なわれています

注2:富士高压フレキシブルホース株式会社

〒743-0063 山口県光市島田六丁目2番20号 <http://fujikoatsu.jp/>

注3:日本バレル工業株式会社

〒734-0022 広島市南区東雲1丁目2-7 <http://www.n-bareru.co.jp/>





【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/>

超音波コンサルティング <http://ultrasonic-labo.com/?p=1852>

超音波コンサルティング <http://ultrasonic-labo.com/?p=2187>

オリジナル技術リスト

<http://ultrasonic-labo.com/?p=10177>

富士高圧様オリジナル超音波洗浄装置の特徴  
1) 専用水槽

流動デザイン

富士高圧様オリジナル超音波洗浄装置の特徴  
2) 液循環システム

富士高圧様オリジナル超音波洗浄装置

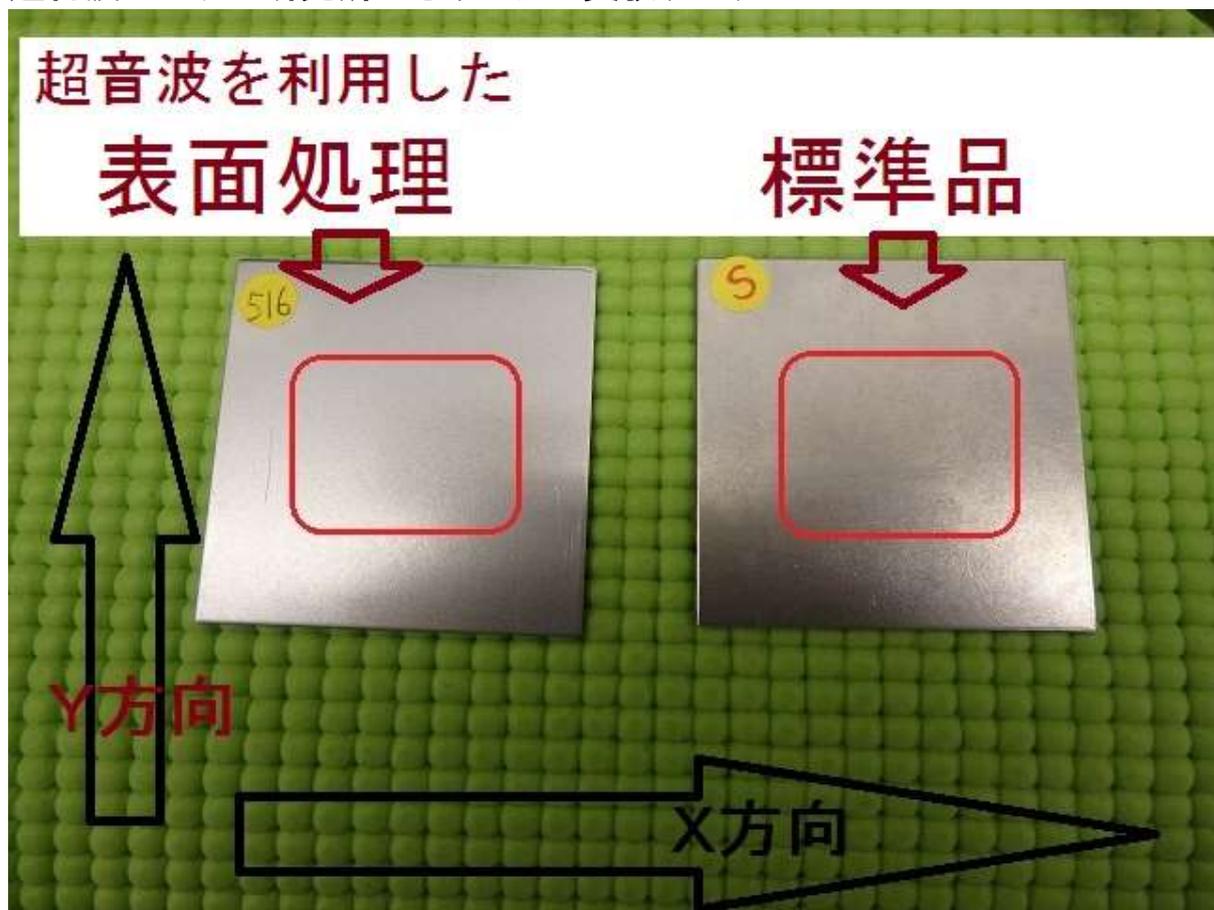
富士高圧様オリジナル超音波洗浄装置の特徴  
4) 音圧測定解析

洗浄効果の高い  
<<音圧データ>>

500kHz 2MHz

洗浄・表面改質（応力緩和）効果の根拠

## 超音波システム研究所のオリジナル実験データ



### 部品：

幅W(mm): 50 長さL(mm): 50 板厚t(mm): 1

材質: 鉄(SPCC相当)

	応力値[MPa]	標準偏差[±MPa]
超音波処理品	-40	32
標準品	-7	57

