

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300195

研究課題名（和文）強力水中超音波音場計測技術開発に関する研究

研究課題名（英文）Study on technique for measuring high power ultrasound

研究代表者

菊池 恒男（KIKUCHI TSUNEO）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・科長

研究者番号：90356866

研究成果の概要（和文）：本研究は、強力水中超音波計測技術の開発を目的として、以下の成果を得た。強力水中超音波音場計測用デバイスの開発では、高音圧測定用ハイドロホンを設計・試作し、強力水中超音波音場下でも長時間劣化しにくい事を実証した。強力水中超音波パワー計測技術の開発では、水槽構造や水温測定方法を最適化し、カロリメトリ法による超音波パワー測定の再現性を改善した。キャビテーションに関する実験では、高周波超音波信号（BIV）がキャビテーション発生量の指標として利用できる可能性を実証した。

研究成果の概要（英文）：Purpose of the study is the development of high power ultrasound measurement technique, the following results have been obtained. In case of the development of a device for measuring high acoustic pressure, we developed the robust hydrophone with hydrothermally synthesized PZT film. The robust hydrophone could be measured the high intensity ultrasound signals for long time. In case of the study of a technique for measuring high ultrasonic power, structure of novel water vessel and a novel measurement method was proposed. In case of measurement technique of the amount of generated acoustic cavitation, Broadband integrated voltage measured by using high spatial resolution cavitation sensor has the potential to be used an index of the amount of generated acoustic cavitation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：超音波医科学・標準・強力水中超音波・カロリメトリ法・キャビテーション・水熱合成法

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、超音波は医用診断・治療の分野で積極的に利用されている。歴史的には、超音波は、安全であるとされてきた。しかし近年、医用超音波機器の高度化に伴い、従来よりも“強い”超音波が使用されつつある。

(2) 医用治療分野では、癌の温熱治療等を目的とする HITU(High Intensity Therapeutic Ultrasound)と称される非常に強い超音波が使われつつある。

(3) また、強力水中超音波に付随して発生するキャビテーションの効果を利用した新たな治療法も提案されている。しかし、キャビテーションは生体組織を破壊する効果もあり、効果と安全性の両立を図る観点から、発生を精密に”制御“する必要がある。

(4) ソノケミストリーの分野で、キャビテーションを応用した様々な研究が行われており、今後産業や工業への発展が期待されている。

(5) 上記に示したような分野で強力水中超音波の応用が広がっている。しかし現状は応用研究等が先行し、強力水中超音波音場計測技術の開発が遅れている。このことは、超音波照射時の人体に対する安全性への懸念やソノケミストリーの産業応用への障害になっている。そのために、強力水中超音波音場を精密に計測する技術の確立は喫緊の課題である。

(6) 強力水中超音波の計測技術の開発は、国際的にも重要な課題であり、各国計量標準機関でも研究が開始されたところである。また、IEC 国際規格立案の場でも、強力水中超音波の工業標準化の議論が始まった。今後更に拡大が予想される強力水中超音波応用のニーズに対応し、且つ諸外国標準研と同等以上の技術力を維持するためにも、強力水中超音波計測技術の研究開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、強力水中超音波音場計測技術の開発を目的として、期間内に強力水中超音波音場計測デバイスの開発、強力水中超音波パワー計測技術の開発及びキャビテーション発生量の定量計測技術の開発を行い、以下の点を明らかにする。

(2) 強力水中超音波音場計測用デバイスの開発では、強力水中超音波音場でも音圧測定可能な堅牢な hidroホンを開発する。

(3) 強力水中超音波パワー計測技術の開発では、強力水中超音波領域の超音波パワー(20 W

～200 W)の計測システムを完成させる。現在、主に用いられている天秤法では、20 W 以上の超音波パワー領域では、受圧板の熱的損傷等の影響により測定が困難となる。そのため、超音波エネルギーによる水温上昇から、超音波パワーを算出するカロリメトリ法の超音波パワー計測システムを完成させる。

(4) 現在、キャビテーション発生量は、ソノケミカルルミネッセンス (SCL) 等の化学的方法や音圧等で評価しており、キャビテーション発生量自体を計測していない。そこで、キャビテーション発生量の定量計測技術の開発では、キャビテーションから発生する高周波超音波信号を高感度超音波センサを用いて検出する技術を開発し、キャビテーション発生量の定量計測を目指す。

3. 研究の方法

(1) 強力水中超音波音場計測用デバイスの開発

① 強力水中超音波音場下で破壊されない高音圧測定用 hidroホンを設計・試作する。圧電材料には、熱的及び機械的ダメージに強いチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を用いる。PZT の生成には、水熱合成法を用いる。そのため、オートクレープ内の温度や圧力、溶液攪拌羽の回転数が制御可能な水熱合成装置の設計・試作を行う。

② 水熱合成法による PZT の合成条件の最適化を目的として、温度、圧力及び回転数と PZT の結晶成長率、結晶密度の関係を検討する。PZT の結晶成長や結晶密度の評価には、XRD パターンや SEM 画像を用いる。

③ 最適化した成膜条件により生成した PZT を用いて、高音圧測定用 hidroホンを試作し、受波感度測定や強力水中超音波音場下の耐久性等の特性を評価する。

(2) 強力水中超音波パワー計測技術の開発

① カロリメトリ法の従来の超音波パワー算出方法では、熱電対の位置依存性、Viscous heating 等の影響により、再現性の良い測定が困難であった。そこで、本研究では、超音波照射前後の水温測定値から超音波パワーを算出する新しい方法を検討する。

② カロリメトリ法で用いる水槽構造を最適化する。超音波振動子から放射された超音波が振動子に再入射しない事、超音波振動子から放射された超音波がすべて水温上昇に寄与する事、これら 2 つの条件を満たすため、水

槽壁面及び底面に空気層を設けたカロリメトリ測定用水槽を試作する。

③ 試作したカロリメトリ測定用水槽内の超音波伝搬特性を確認するために、超音波伝搬路上に hidroホン をセットし、振動子から放射された超音波パルス波形を観察する。

④ カロリメトリ法の実験システムを用いて、100 W までの超音波パワー測定が可能である事を実証する。また、カロリメトリ法による測定値の妥当性評価のため、カロリメトリ法による超音波パワー測定値と天秤法による超音波パワー測定値を比較する。

(3) キャピテーション発生量の定量計測技術の開発

① キャピテーションバブルから発生する高周波超音波信号 (Broadband Integrated Voltage : BIV) を検出する円筒形のキャピテーションセンサを試作する。

② キャピテーションセンサによるキャピテーション発生量の定量計測を実用化するには、センサの出力信号を周波数で積分して得られる BIV がキャピテーション由来の信号である事を実証する必要がある。そこで、キャピテーションの発生条件である蒸留水の溶存酸素濃度や SCL の発光強度と BIV との関係測定する。

③ 従来、キャピテーションの発生評価には、一般的に音圧が用いられている。BIV と音圧の空間分布を計測し、その結果を SCL の発光分布と比較検討する。センサは、水槽下部に設置した超音波振動子表面を横切る方向と超音波伝搬方向に走査させる。

4. 研究成果

(1) 強力水中超音波音場計測用デバイスの開発

① 温度 300 °C、圧力 10 MPa、攪拌羽の回転数 500 rpm まで制御可能で、強アルカリ溶液に耐える水熱合成装置を設計・試作した。

② PZT の合成条件の最適化を行った。その結果、温度 160 °C、圧力 0.6 kPa、回転数 250 rpm の成膜条件において、PZT の結晶成長率が 6.5 μm から 7.2 μm に、結晶密度 2.9 g/cm³ から 5.4 g/cm³ に改善された。

③ 最適条件で生成した PZT を用いた高音圧測定用 hidroホン を試作した。この hidroホンは、キャピテーション等の機械的作用から PZT や電極を保護する目的で、受波面を

厚さ 50 μm の Ti 箔で覆う構造にした。高音圧測定用 hidroホン の模式図を図 1 に示す。

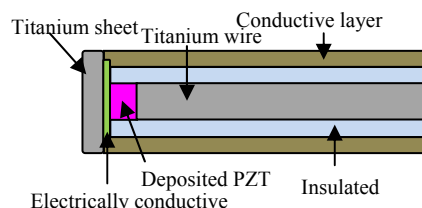


図 1 高音圧測定用 hidroホン の模式図

④ 超音波洗浄機の水槽内の強力水中超音波音場下で高音圧測定用 hidroホン の耐久性実験を行った。hydroホンは、受波面が Ti 箔で覆われていないものと覆われているものの 2 種類を用意した。その結果、受波面が Ti 箔で覆われている hidroホン の方が、長時間超音波信号を受信できる事を実証した。

⑤ 高音圧測定用 hidroホン の受波感度の周波数特性の結果を図 2 に示す。hydroホンの感度を改善するために、hydroホンの特性を等価回路により数値解析した結果、受波面に用いた Ti 箔の厚さを 50 μm から 5 μm 以下にする事で、受波感度の改善が可能であることを確認した。

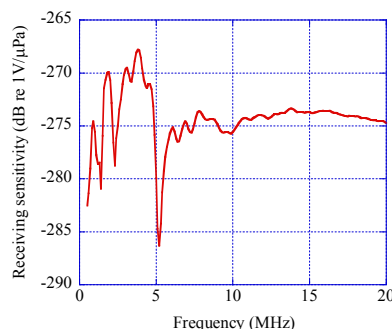


図 2 高音圧測定用 hidroホン の受波感度の周波数特性

⑥ まとめ → 水熱合成法を用いた高音圧測定用 hidroホン を試作し、強力水中超音波音場下で、従来の hidroホン よりも劣化しにくいことを実証した。この成果は、内外で高い評価を受け、ある日本の超音波機器メーカーで、本研究で試作した hidroホン 構造に準拠した製品開発を検討中である。

(2) 強力水中超音波パワー計測技術の開発

① 本研究では、従来のカロリメトリ法の問題点を解決するために、超音波照射中の水温測定を避け、照射前後の水温測定値から、式(1)を用いて超音波パワーを算出する方法を提案した。

$$P = \frac{\Delta T}{t_x} \cdot C_p \cdot M \quad (1)$$

測定開始 t_1 秒後に超音波照射を開始し、 t_x 秒間照射を継続し、照射終了後 t_2 秒間、水温測定を継続する。 t_1 、 t_2 の間は水温変化が十分緩やかであると仮定し、それぞれの測定結果を超音波“OFF”の時刻に直線補間する。外挿して得られる2つの温度 T_{before} 、 T_{after} の差 ΔT を、超音波照射に起因する水温上昇と定義する。この方法を用いて測定した結果、従来法に比べて、再現性が改善されることを示した。

② カロリメトリ測定用水槽の構造の最適化を行った。図3に試作したカロリメトリ用疑似自由音場水槽の模式図を示す。

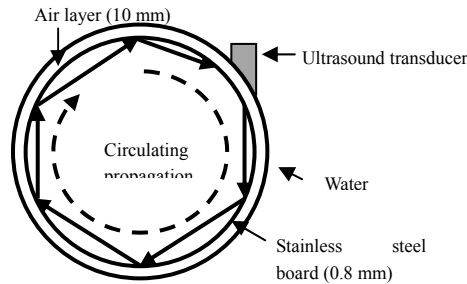


図3 カロリメトリ測定用水槽の概略図

水槽は、直径 150 mm、深さ 90 mm の円筒形で、水槽内壁の板厚は約 0.8 mm である。壁面及び底面で超音波を全反射させるため、側面及び底面に、幅 10 mm の空気層を設けた。壁面に入射する超音波はほぼ全反射しながら、一方向に伝搬し、水中でほぼ完全に吸収減衰して、水温上昇に寄与する。また、超音波が振動子面に再入射しないため、放射特性の変動を避けることができる。

③ カロリメトリ測定用水槽内の超音波伝播特性を測定した。結果を図4に示す。

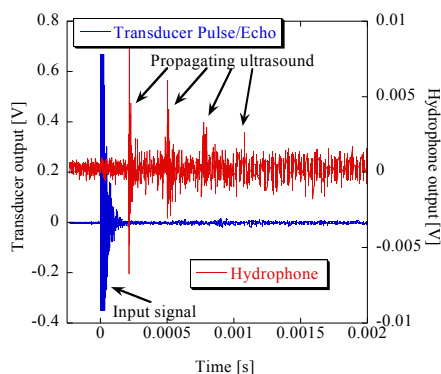


図4 ハイドロホンにより測定した水中を伝搬する超音波波形

振動子のパルスエコー出力信号(青)には反射波が観察されず、超音波が振動子面へ再入射しないことが確認できた。一方、ハイドロホン出力信号(赤)には、周期的且つ徐々に減衰するパルス列が観察された。パルス間隔から

算出される距離は、水槽の内壁の円周長にほぼ対応しているため、これは超音波パルスが水槽中を周回しながら徐々に減衰していることを示す。

④ カロリメトリ測定用水槽を用いて、100 W までの測定が可能である事を実証した。また、カロリメトリ法による超音波パワー測定結果の妥当性を確認するため、25W までの範囲で、カロリメトリ法と天秤法による超音波パワー測定値を比較した。その結果、カロリメトリ法と天秤法の測定値に10%程度の系統的なずれがあった。この系統的なずれは、超音波振動子表面に位置するPZTの発熱が主な要因と仮定し、発熱の異なる2つのPZTを用いた超音波振動子を試作して実験を行った。図5に結果を示す。青は発熱の大きい振動子、赤は発熱の小さい振動子を用いた結果である。その結果、超音波振動子表面の発熱が、カロリメトリ法の測定に影響を与えていることを明確にした。

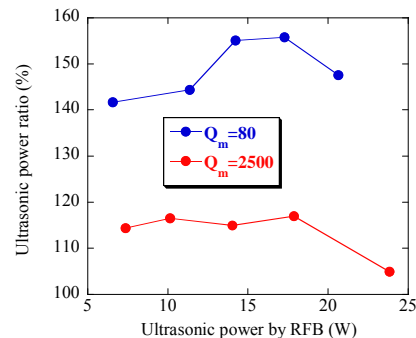


図5 天秤法とカロリメトリ法による超音波パワー測定値の比

⑤ まとめ → カロリメトリ法について検討した結果、強力水中超音波パワー精密計測の可能性を実証した。水を発熱体とするカロリメトリ法を国家標準として検討しているのは、世界的にも我々のグループのみであり、内外で高い評価を得ている。今後の課題は、超音波振動子の発熱や、比熱容量と溶存ガス濃度の関係などについて検討する。

(3) キャピテーション発生量の定量計測技術の開発

① 円筒形キャピテーションセンサを試作した。

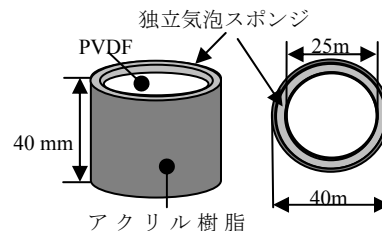


図6 キャピテーションセンサの概略図

アクリルの内側に、音響アイソレータとして、厚さ 5 mm の独立気泡スポンジを接着した。さらに独立気泡スポンジの内側表面に、厚さ 110 μm のポリフッ化ビニリデンフィルムを接着した。その概略図を図 6 に示す。

② BIV と蒸留水の溶存酸素濃度、SCL との関係性を評価した。溶存酸素濃度の結果を図 7 に示す。図 7 の結果から、キャビテーションセンサにより測定した BIV は、蒸留水の溶存酸素濃度に依存する事を確認した。また、BIV は SCL の発光強度と正の相関があることを確認した。以上の結果により、BIV はキャビテーション由来の信号であると考えられる。

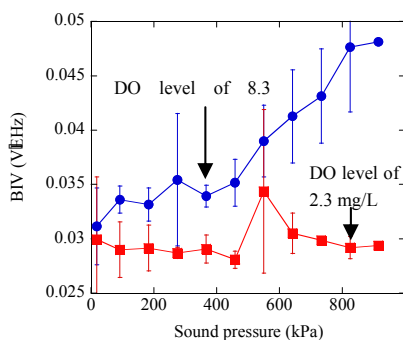


図 7 溶存酸素濃度による BIV の変化

③ 水槽内のキャビテーションの空間分布を測定するために、BIV と音圧分布を測定した。超音波振動子表面を横切る方向に走査その結果を図 8 に示す。

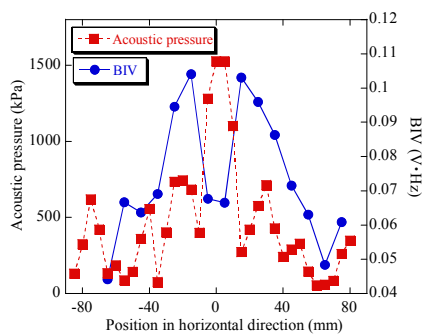


図 8 水面と平行軸における BIV と音圧の分布

図 8 により、BIV と音圧の最大値の位置が異なることを確認した。両者の最大値が一致しない原因を検討するために、SCL の発光分布を観察した。SCL は、水槽内のキャビテーションバブルの発生位置を観察できる。実験の結果、SCL の発光と、バブルからの信号である BIV の最大値の位置が一致した。上記の結果を総合すると、振動子の中心軸上で鉛直上向きに発生する音響流の影響で、バブルが中心軸上にトラップされなかったことが原因として推測される。そのため、BIV が中心軸上

で減少し、結果として音圧の最大値の位置と一致しなかったと考えられる。

④ 次に、高さ 2 mm の高空間分解能キャビテーションセンサを設計・試作し、超音波伝搬方向の BIV の空間分布を測定した。図 9 の結果により、水面近傍の BIV が、駆動周波数の半波長である約 5 mm 周期で分布を確認した。更に、SCL でも、約 5 mm 間隔で発光していることを確認した。このように、BIV 分布と SCL の発光分布との間には相関があることがわかった。③と④の結果から、BIV を用いることにより、水槽内のキャビテーション発生分布を、従来よりも精密に測定することが可能であることを実証した。

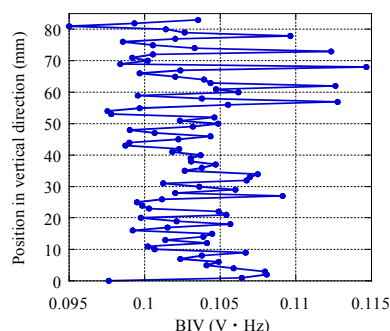


図 9 超音波伝搬方向における BIV の変化

⑤ まとめ → 本研究では、BIV を用いたキャビテーション発生量の精密測定の可能性を示した。これらの研究成果は、世界的に見ても初めてであり、論文や国際学会において、内外から高く評価された。今後は、キャビテーションセンサの特性評価や、BIV による超音波洗浄能力の評価を行う。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 内田武吉、竹内真一、菊池恒男、Measurement of Amount of Generated Acoustic Cavitation : Investigation of Spatial Distribution of Acoustic Cavitation Generation Using Broadband Integrated Voltage, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有、50、2011、07HE01-1-07HE01-4、DOI:10.1143/JJAP.50.07HE01
- ② 内田武吉、竹内真一、菊池恒男、A Study on Spatial Distribution of Cavitation Generation by Using Cavitation Sensor, Proceeding of Symposium on Ultrasound Electrics 2011、査読無、32、2011、389-390、DOI:なし
- ③ 菊池恒男、内田武吉、Calorimetric method for measuring high ultrasonic power using water as a heating material, Journal of Physics: Conference Series 279、査読有、279、

- 2011、
DOI:10.1088/1742-6596/279/1/012012
- ④ 内田武吉、佐藤秀信、竹内真一、菊池恒男、Investigation of Output Signal from Cavitation Sensor by Dissolved Oxygen Level and Sonochemical Luminescence、Jpn. J. Appl. Phys.、査読有、49、2010、07HE03-1-07HE03-2、
DOI:10.1143/JJAP.49.07HE03
- ⑤ 内田武吉、竹内真一、菊池恒男、Study on Measurement for Amount of General Acoustic Cavitation –Effect of Dissolved Oxygen Level and Acoustic Streaming-、Proceeding of Symposium on Ultrasound Electrics 2010、査読無、31、2010、367-368、
DOI:なし
- ⑥ 内田武吉、佐藤秀信、竹内真一、菊池恒男、Characterization of output signal from hollow cylindrical cavitation sensor、Acoust. Sci. Tech.、査読有、31、2010、199–201、
<http://dx.doi.org/10.1250/ast.31.199>
- ⑦ 内田武吉、竹内真一、菊池恒男、Study of Measurement of the Amount of Generated Acoustic Cavitation : Relationships among Broadband Integrated Voltage, Dissolved Oxygen and Sonochemical Luminescence、2010 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings、査読無、2010、2223-2226、DOI:なし

[学会発表] (計 28 件)

- ① 内田武吉、A study on Spatial Distribution of Cavitation Generation by Using Cavitation Sensor、超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、2011年11月、京都大学、京都府
- ② 内田武吉、A study on Measurement Technique for Amount of Generated Acoustic Cavitation (Investigation of Broadband Integrated Voltage by Comparing with Sound Pressure and Sonochemical Luminescence)、International Congress on Ultrasonics 2011、2011年9月、University of Gdansk, Poland
- ③ 内田武吉、Study on measurement technique for the amount of generated acoustic cavitation -Investigation of the characteristics of broadband integrated voltage by using dissolved oxygen level and sonochemical luminescence-、WIMRC 3rd International Cavitation Forum 2011、2011年7月、University of Warwick、UK
- ④ 竹内真一、Analysis with equivalent circuit for characteristics of hydrophone with hydrothermally synthesized PZT film and Ti front layer、超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、2010年

- 12月、明治大学、東京都
- ⑤ 内田武吉、Study on Measurement for Amount of Generated Acoustic Cavitation –Effect of Dissolved Oxygen Level and Acoustic Streaming-、超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、2010年12月、明治大学、東京都
- ⑥ 竹内真一、Hydrophone with hydrothermally deposited lead zirconate titanate poly-crystalline film on titanium film as acoustic receiving surface for estimation of high power acoustic field by HIFU、2010 IEEE International Ultrasonics Symposium、2010年10月、Convention Center、USA
- ⑦ 内田武吉、Study of Measurement of the Amount of Generated Acoustic Cavitation : Relationships among Broadband Integrated Voltage, Dissolved Oxygen, and Sonochemical Luminescence、2010 IEEE International Ultrasonics Symposium、2010年10月、Convention Center、USA
- ⑧ 菊池恒男、Calorimetric Method for Measuring High Ultrasonic Power Using Water as Heating Material、Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine、2010年5月、Teddington、UK

[その他]

ホームページ等

<http://www.nmi.j.jp/~acs-vbr/acs-ultsn/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 恒男 (KIKUCHI TSUNEO)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・科長

研究者番号：90356866

(2) 研究分担者

内田 武吉 (UCHIDA TAKEYOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70455434

松田 洋一 (MATSUDA YOUICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：00358029

吉岡 正裕 (YOSHIOKA MASAHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：60358322

(3) 連携研究者

竹内 真一 (TAKEUCHI SHINICHI)

桐蔭横浜大学・医用工学部・教授

研究者番号：50267647