

ウルトラファインバブル水の広帯域超音波における減衰係数と
気泡数密度測定*Attenuation Coefficient of Ultrafine Bubble Water in Broadband Ultrasound and
Measurement of Bubble Number Density赤 松 重 則** 上 田 義 勝***
AKAMATSU Shigenori UEDA Yoshikatsu

Abstract Bubbles with a diameter less than $1\mu\text{m}$ are called ultrafine bubbles (UFB). And UFB is expected to be applied in the environment, agriculture and medical treatment. In this study, we will examine the possibility by using ultrasonic waves and ultrapure water (UPW), also the attenuation characteristics of UFB water, to analyze the properties of UFB. The attenuation characteristics of UFB water in broadband ultrasound waves up to 32.5 MHz were investigated. In the 1.5-2.5 MHz ultrasonic band, the attenuation coefficient in the near-field was relatively close to the theoretical value calculated from the bubble density measurement results. For the 32.5 MHz ultrasound, there was a clear difference in the attenuation coefficient for the bubble density distribution between the UPW and the UFB water. In addition, the change in the number density distribution of bubbles and the change in the attenuation coefficient were observed depending on the elapsed days after UFB generation. It is possible that the change is related to the increase in the bubble diameter of the UFB.

Keywords: Ultrafine bubble, Ultrasonic attenuation, Frequency dependence, Bubble diameter

1. 緒 言

これまで「マイクロバブル」や「ナノバブル」と呼ばれていた微細気泡は国際標準化機構 (ISO) において、直径 $100\mu\text{m}$ 未満の気泡を「ファインバブル」、直径が $1\sim 100\mu\text{m}$ の気泡を「マイクロバブル」、 $1\mu\text{m}$ 未満の気泡を「ウルトラファインバブル」(以下 UFB と呼ぶ) と定義されている[1]。ファインバブルは環境との親和性や高い安全性、更に産業的に有用な性質から、環境改善[2]、農水産業[3]、医療[4]などの一次産業をはじめとする幅広い分野で基礎研究および実用化に繋げる応用研究が進められている[5]。

ファインバブルを幅広く産業分野で応用する

には、基礎的なファインバブルの特性を定量的に評価する必要がある。UFB 水の特性測定については、気泡数密度測定のためにはレーザ散乱を利用したブラウン運動解析[6]、レーザ回折式粒子径分布測定装置[7]、共振式質量測定法[8]など、いくつかの手法が用いられてきている。ブラウン運動解析による特性解析などは通常良く使われるが、装置そのものが高額である他、市販の装置はほとんどの測定対象が固体粒子であり、そのまま UFB を測定するためには十分な解析装置ではないことが多い。

既存の研究報告では気泡に関する特性測定として超音波を用いた気泡検出がある。主に海洋に

* 2022.1.31 受付

** 高知工業高等専門学校 〒783-8508 高知県南国市物部乙 200 番 1

TEL: (088)864-5522 FAX: (088)864-5522 E-mail: aka@me.kochi-ct.ac.jp

*** 京大大学生存圏研究所

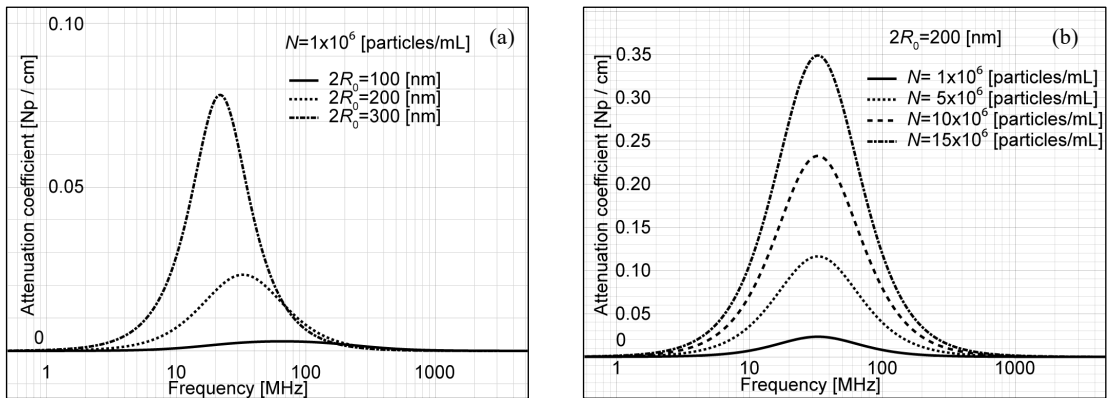


Fig. 1 Attenuation coefficient for sound wave in a bubbly liquid. (a) shows the dependence of attenuation on bubble diameter, (b) the dependence on bubble concentration.

おける研究として、ミリサイズの気泡検出、マイクロサイズの気泡の減衰率測定などの研究が過去に行われている[9,10]。我々は、この超音波を用いた UFB 水 の特性測定に着目している。これまでに電気的な特性と、気泡数密度との関係[11]、また、超音波と UFB との相互作用について実験を行ってきており、気泡数密度と超音波の減衰についての理論化を検討している[12,13]。本研究においては超音波と水、および UFB 水の減衰特性を用いることで、UFB の特性解析が行えるかどうか検証し、その可能性についての検討を報告する。

2. 気泡性液体中の音波伝搬特性

2.1 水中の音波減衰

音波が媒質中を伝播するとき、拡散以外に媒質の粘性、比熱、熱伝導率などに依存して減衰する。 x 方向に音波が伝播し、位置 x において音圧振幅 $P(x)$ の音波が、微小距離 Δx を伝播し $P(x)\Delta x$ に比例した量だけ音圧振幅が減少するとき、その比例定数を α とすると、 $\Delta P = -\alpha P(x)\Delta x$ と表せる。 $\Delta x \rightarrow 0$ として微分方程式にすると $dP/dx = -\alpha P$ となり、この解から $P = P(0)\exp(-\alpha x)$ と表せる。 α を減衰係数といい水中において、kHz~MHz 帯では、減衰係数 α は周波数の 2 乗の関数となり、さらに温度にも依存する[14~18]。水温 20~30°C における減衰係数 α/f^2 は、 $2.63 \times 10^{-16} \sim 1.97 \times 10^{-16}$ Np sec²/cm となる。

2.2 気泡の振動特性

液体中の気泡振動の共振周波数は、Minnaert の式として式(1)から求めることが出来る[19]。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_0}} \quad (1)$$

ここで、 f_0 は共振周波数、 R_0 は気泡半径、 γ は比熱比、 P_0 は液体の静圧、 ρ_0 は液体の密度である。

2.3 気泡を含む液体の音速と減衰

単位体積当たり N 個の気泡を含む液体において、気泡間の相互作用を考えない場合、気泡を含む液体中の複素音速 $\tilde{c}$ は次式で与えられ、角周波数 ω に依存して変化する[20]。

$$\frac{1}{\tilde{c}^2} = \frac{1}{c_0^2} + \frac{4\pi N R_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\delta\omega_0\omega} \quad (2)$$

ここで、 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 、 ω は伝播する音波の角周波数、 c_0 は気泡のない液体中の音速、 δ はダンピング係数、 N は UFB の数密度である。式(2)の実部は音速を、虚部は減衰係数を与える。静水圧下での条件を想定し、 $P_0 = 10^5$ Pa、 $\rho_0 = 10^3$ kg/m³、 $\gamma = 1.4$ 、 $c_0 = 1500$ m/s とする条件で求めた減衰係数を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a)には UFB 数密度 $N = 1 \times 10^6$ particles/mL とし、気泡径を 100~300 nm 変化させた結果を示している。気泡径の増加にともない減衰係数が指数関数的に増加している。減衰係数は周波数に依存しており、そのピークは式(1)で与えられる気泡の共振周波数に一致する。Fig. 1(b)には気泡径を 200 nm とし、UFB 数密度を $N = 1 \times 10^6 \sim 15 \times 10^6$ particles/mL 変化させた結果を示している。UFB 数密度の増加に比例して減衰係数が増加している。気泡径が変化する場合と異なり、減衰係数のピーク周波数が UFB 数密度に

依存しないことがわかる。

3. UFB 水の超音波測定実験

3.1 1.6~2.5 MHz 帯域の実験

3.1.1 実験装置及び方法

1.6 MHz~2.5 MHz の帯域における超音波特性測定では、2 種類の超音波振動子を使った実験環境を構築した。超音波振動子には電子通商株式会社のセラミック超音波振動子 1.6 MHz 用（1.6 MHz 振動子）と同社のセラミック超音波振動子 2.5 MHz 用（2.5 MHz 振動子）の 2 種類を用いている。セラミック超音波振動子 1.6 MHz の基本共振周波数は $1.6 \text{ MHz} \pm 50 \text{ kHz}$ であり、セラミック超音波振動子 2.5 MHz の基本共振周波数は $2.5 \text{ MHz} \pm 125 \text{ kHz}$ である。

送信側の超音波振動子に交流電圧を印加することで、超音波に変換し、受信側の超音波振動子にて受信することで、同様に受信電圧としてその速度と減衰率を評価している。交流電圧はファンクションジェネレータ（株式会社エヌエフ回路設計ブロック WF1966）を用い、電圧波形確認にはオシロスコープ（Tektronix MSO2024）を用いた観測を行った。送受信のための超音波振動子を水中に設置するため、ウレタンシートにて反射防止処理を施した大きさ $5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の容器を用

意し、超音波振動子同士の距離に応じて、オシロスコープで観測した送受信波形の位相差を利用して音速を算出している。また、超音波振動子そのものが引き起こす反射の影響も無くするため、パルスエコーオーバーラップ法を採用[21]した。具体的にはファンクションジェネレータのバースト発振モード（10 cycle の正弦波と、999 cycle の休止期間）により、振動子による反射の影響を無くした。音速の測定には、複数回測定して平均化し、その誤差を抑えている。

なお、超音波振動子による音場は近距離音場と遠距離音場に分かれる。近距離音場は振動子に近い領域を指し、ビーム端から近距離音場限界点（近距離音場と遠距離音場の境目）までの長さは近距離音場限界距離と呼ぶ。近距離音場内では振動子が生成する自然なビーム集束が表れるが、遠距離音場内ではビーム径が拡大しエネルギーが消散する。近距離音場限界距離（ L_{near} ）は振動子の周波数、振動子の直径、および媒質の音速の関数であり、円型振動子の場合以下のように計算される。

$$L_{near} = \frac{D^2 f}{4c} \quad (3)$$

ここで D は超音波振動子の直径、 f は周波数、 c は

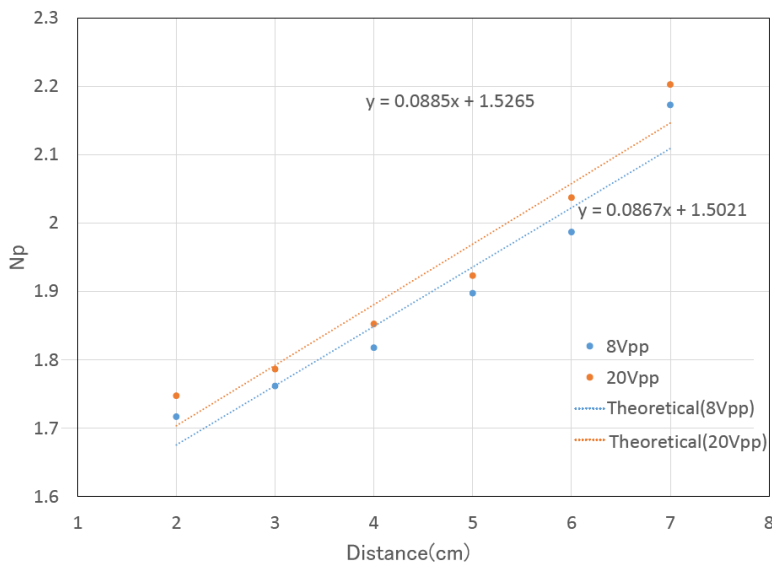


Fig. 2 An example of attenuation characteristics (1.6 MHz, pure water).

Table 1 Attenuation coefficient of pure water obtained from measurements.

Frequency (MHz)	Attenuation coefficient (8Vpp) (Np/cm)	Attenuation coefficient (20Vpp) (Np/cm)
1.5	5.98×10^{-2}	5.93×10^{-2}
1.6	5.07×10^{-2}	5.28×10^{-2}
1.8	1.10×10^{-2}	9.40×10^{-3}
2.0	4.51×10^{-2}	4.95×10^{-2}
2.2	5.20×10^{-3}	5.50×10^{-3}
2.65	1.81×10^{-2}	1.72×10^{-2}
3.0	4.10×10^{-3}	4.50×10^{-3}

媒質中の音速である。超音波振動子の直径は、1.6 MHz 振動子が 24 mm、2.5 MHz 振動子が 20 mm であるので、式(3)を参考に、今回の振動子の近距離音場限界距離を確認しつつ、実験を行った。

ファンクションジェネレータの使用の際には、入力電圧 (8 Vpp と 20 Vpp) と周波数 (振動子の種類に依存) の調整のほかに、振動子間距離 2.0 cm ~ 7.0 cm を 1.0 cm ごとに調整して測定している。また、水温は、 $11.5^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ の範囲で測定を行った。固体粒子としては、シリカ粒子溶液としてシーホスター KE-W10 (平均粒子半径 100 nm、比重 1.1) を用い、原液の 10 倍、100 倍に希釈した溶液を用意した。UFB 水は、(株)Ligatic (現、西日本高速道路エンジニアリング関西(株)) の UFB 生成装置 BUVITAS HYK-32 を用いた。酸素ガスと精製水により生成し、生成後の UFB は平均粒

径は 100 nm、気泡数密度は 10^{14} particles/mL 程度であったため、この数値を仮の値として理論計算にて用いている。

3.1.2 純水による校正手順データ取得

超音波振動子の電力効率がデータシートなどで確認出来なかったため、実測により、事前に純水 (古河薬品工業株式会社・高純度精製水) を用いて入出力電圧の減衰を測定し、その結果を校正のための減衰特性とした。また、温度依存性や水中の音速については測定前に確認し、温度変化による測定結果が理論値と一致したため、本実験で影響が無いことを確認している。Fig. 2 に測定結果の一例 (1.6 MHz) を示す。減衰 (Np) に関しては、距離に応じて減衰値が大きくなっていることがわかる。また、減衰係数として周波数別に測定したものを Table 1 に示す。この値を、3.1.3 の結果及び考察にて減衰係数を考察する際の校正基準となる水の減衰率として用いている。なお、周波数特性測定では、2.5 MHz の値については外部からの干渉などがあり正確に測定できなかったため、代わりの値として、2.65 MHz を用いている。

3.1.3 結果及び考察

減衰係数の測定結果を Fig. 3 に示す。全体的な傾向としては、印加電圧 20 Vpp の時の結果が全体として理論値より高く、8 Vpp の時の方が低い傾向になっていることがわかる。また、別実験で行った固体粒子の減衰との比較では、1.5、1.6

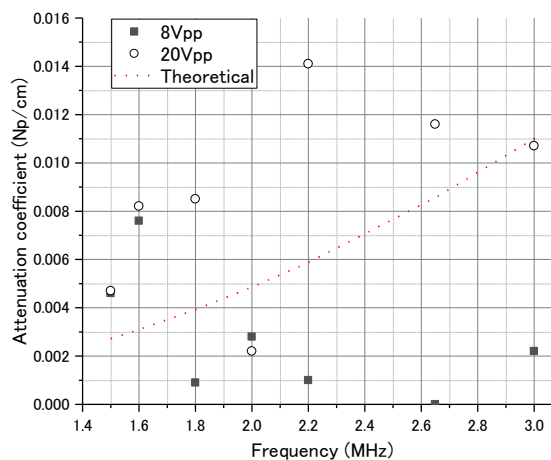


Fig. 3 Comparison of attenuation coefficient and theoretical value of UFB water.

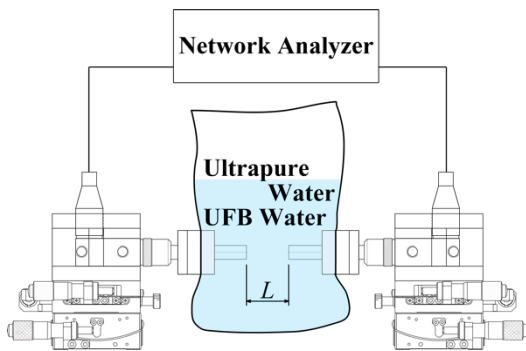


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus.

MHz での測定結果が電圧に関わらず安定しており、理論値に近い結果となった。これらのことは、超音波振動子による違いの他、UFB 水の帯電などの可能性も考えられるが、現状はまだわかっていない部分が多く、今後詳細な測定が必要である。また、今回用いた理論値は気泡粒径と数密度を一定として計算しているが、実際の UFB 水の気泡粒径には分布があり、また数密度もそれぞれの粒径で違っているため、数密度の分布関数をこの結果から求める場合は、もっと幅広い周波数の減衰係数を求め、そこから分布関数を推定する計算が必要になる。

3.2 25~32.5MHz 帯域の実験

3.2.1 実験装置および方法

UFB 水の生成には、(株)Ligarc 社製 (現、西日本高速道路エンジニアリング関西(株)) の BUVITAS (HYK-25-D) を使用した。本装置は気液混合せん断方式により、100 mm 径の UFB を発生させている。生成時には温度上昇を抑えるため、冷却しながら生成した。原水には超純水 (メルクミリポア製 Milli-Q Reference) を用いた。

Fig. 4 に実験装置の概略図を示す。超音波の減衰測定にはネットワークアナライザ (KEYSIGHT E5063A) を使用した。超音波振動子には、(株)検査技術研究所製 (25K3I: 振動子径 3 mm) を用いた。この超音波振動子の公称中心周波数は 25 MHz の広帯域タイプである。送受信の超音波振動子を対向させ、精密移動ステージにより同一軸線上に配置した。超音波振動子間距離 (Fig. 4 中の L) を 1~50 mm まで、1 mm ごとに精密移動ステージに

より変化させて超純水および UFB 水の減衰測定を行なった。超純水および UFB 水は、273 mm × 268 mm、厚さ 0.06 mm のウォーターバック (ポリエチレン製) に保持し、防水カプラを介して超音波振動子をウォーターバック内の水中に挿入させた。

UFB 水の気泡粒度分布および数密度測定には、ナノ粒子トラッキング解析法である ZetaView (マクロトラック・ベル(株)) を用いた。溶存酸素濃度の測定には、蛍光式溶存酸素計 (HACH2785 LDO10101 HACH 社) を用いた。

3.2.2 結果および考察

超純水と UFB 水の超音波減衰測定の結果を Fig. 5 に示す。減衰の値は超音波振動子の周波数特性に依存するため、それぞれの測定周波数において異なる絶対値を示している。実験に用いた超音波振動子の公称中心周波数は 25 MHz であるが、校正試験の結果 26.1 MHz であった。

Fig. 5 (a) 25.0 MHz では、振動子間距離の増加に伴い減衰が増加しており、約 50 mm の変化で約 10 dB の増加となっている。1~約 15 mm までの間では、超純水、UFB 水の双方で減衰の振動が観察された。超純水と UFB 水の間に減衰の有意差は見られなかった。

(b) 27.5 MHz では、約 50 mm の振動子間距離増加に伴い約 12 dB 減衰が増加した。1~約 15 mm までに大きな周期のうねりのような減衰の増減が見られるが、25.0 MHz のような激しいものではない。また、この振動子間距離では超純水に比べて UFB 水の減衰が若干大きくなる傾向が見られた。20 mm 以降の範囲では超純水と UFB 水の間に減衰の有意差はほとんど見られなかった。

(c) 30.0 MHz でも、約 50 mm の振動子間距離増加に伴い約 12 dB 減衰が増加した。一方で、(a) 25.0 MHz と (b) 27.5 MHz に見られた振動子間距離 1~約 15 mm の間での減衰の振動やうねりは観察されなかった。50 mm までの距離全体の範囲で、若干ではあるが超純水に比べて UFB 水の減衰が大きくなる傾向が見られた。

(d) 32.5 MHz では、約 50 mm の振動子間距離増加に伴い約 14 dB 減衰が増加した。減衰の振動やうねりは観察されなかった。50 mm までの距離全体の範囲で、(c) 30.0 MHz の場合よりも超純水に比べて UFB 水の減衰が大きくなる傾向が見られた。

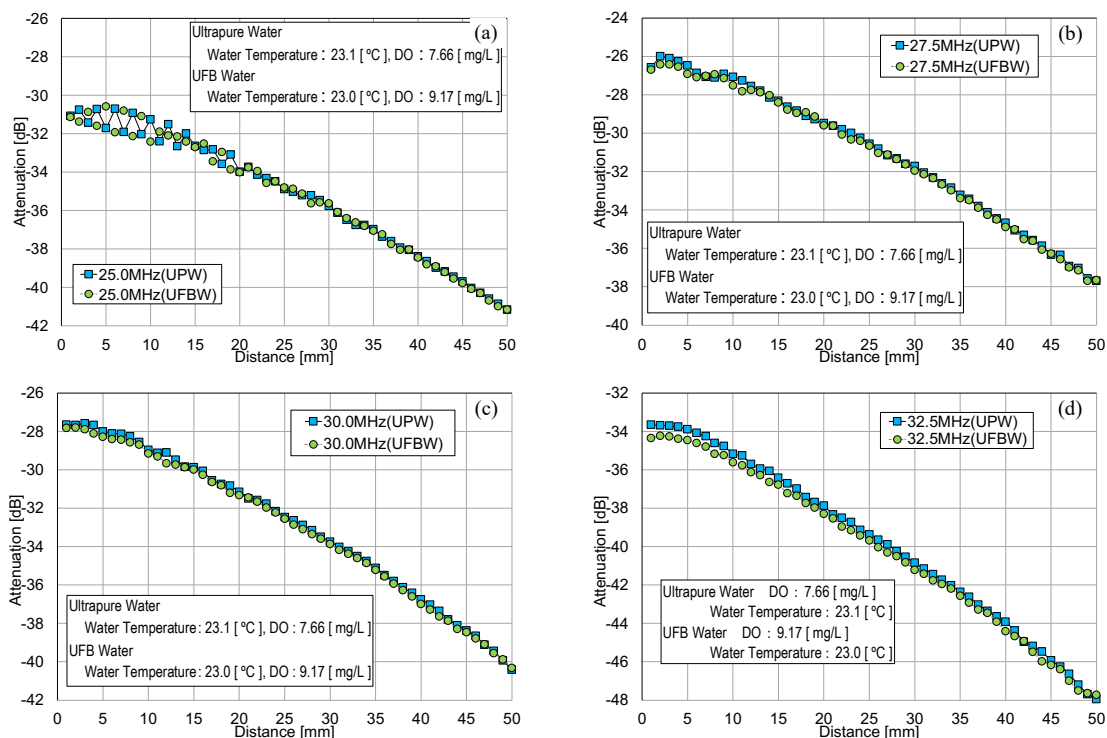


Fig. 5 Frequency-dependent attenuation. The absolute value of attenuation depends on piezoelectric transducer frequency response. (a) shows results on 25.0 MHz of which center frequency of probes, (b) 27.5 MHz, (c) 30.0 MHz, (d) 32.5 MHz respectively.

蒸留水中の超音波吸収による減衰の温度依存性については実験的に解明されており、古典理論による減衰よりも大きくなることが報告されている[14–18]。Fig. 5の超純水の減衰測定結果についてこれらの報告結果と比較したところ、(a)～(d)の全てにおいて約 3.5 dB 大きい減衰を示した。測定を行った各周波数でばらつき無く測定できていることから、精度良く減衰測定できていると考えられる。

Fig. 5の結果において、32.5 MHzの場合が超純水に比べて UFB 水の減衰が最も大きくなる結果となった。このことより高い周波数において UFB を測定しやすい傾向にあると考えられる。

Fig. 6に 32.5 MHz における UFB 水の減衰測定結果と UFB 気泡粒度分布測定結果を示す。(a) は UFB 水生成後 2 日目の測定結果である。気泡径 100 nm 程度の気泡が最も数多く生成されており、300 nm 以下の気泡がほとんどとなっている。気泡径 100 nm の気泡数密度は 13.9×10^6

particles/mL、1 mL あたりの全気泡数は 53.0×10^6 particles であった。(b) は UFB 水生成後 14 日目の測定結果である。(b') において最も多い気泡数を示す気泡径は 100 nm のままであるが、その数密度は 5.91×10^6 particles/mL と減少している。気泡径 200 nm までの気泡数が経時変化により減少しており、200 nm 以上の気泡数は全ての気泡径において僅かに増加した。1 mL あたりの全気泡数は 30.4×10^6 particles であった。UFB 水生成後 14 日目における超音波減衰測定結果では、1～50 mm の全ての振動子間距離において減衰の有意差が観測された。UFB 水生成後 2 日目の全気泡数よりも少ない気泡数に経時変化したが、UFB 水の減衰が増加する結果となった。

32.5 MHz の共振周波数を持つ気泡径は式(1)より 200 nm となる。UFB 気泡粒度分布測定結果 Fig. 6 (a'), (b') の気泡径 200 nm における気泡数密度を比較すると、12 日間の経時変化により 2.801×10^6 から 2.982×10^6 particles/mL へとわずかに増加し

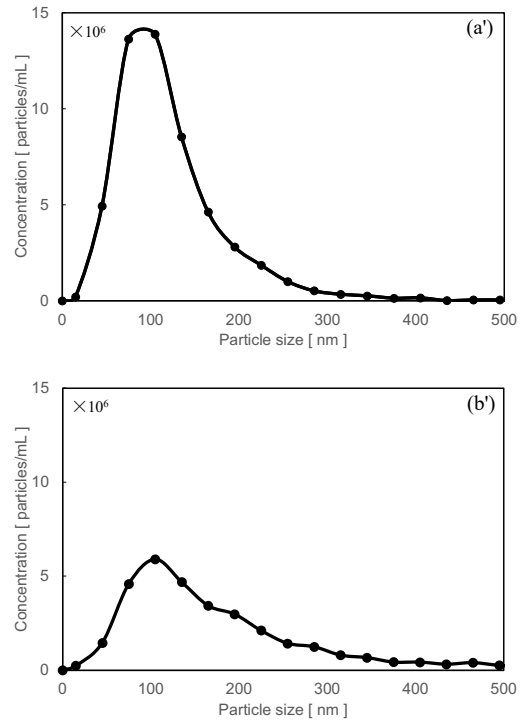
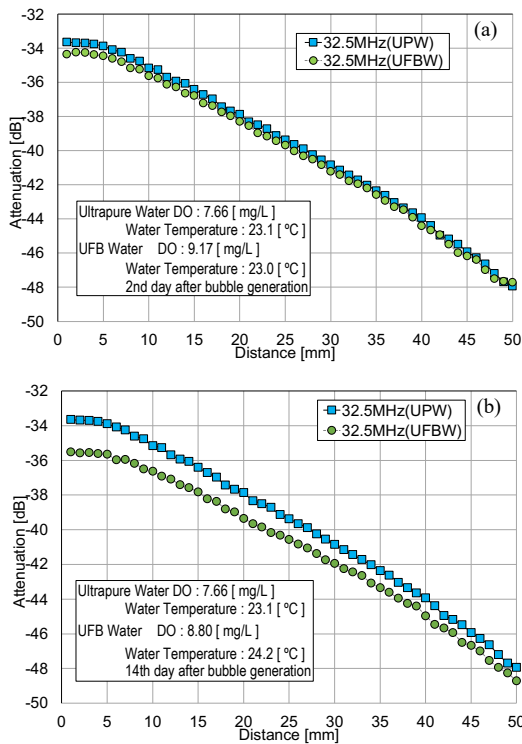


Fig. 6 Attenuation measurement results on 32.5 MHz and particle size distribution of the ultrafine bubbles respectively. (a), (a') and (b), (b') shows for the second day and for the 14th day after bubble generation the attenuation measurement results and the particle size distribution measurement results, respectively.

ている。気泡径 200 nm より小さい径の気泡数は経時変化により減少している、この気泡数減少に影響を受ける超音波減衰は減少すると考えられるが、32.5 MHz における超音波減衰は増加した。したがって、32.5 MHz における超音波減衰は気泡径 200 nm を下回る気泡数の影響をうけていないと予想される。

気泡径 200 nm を上回る気泡数増加が減衰に与える影響を見るべく、25 MHz の減衰測定結果との比較を Fig. 7 に示す。気泡数の増加により式(2)から算定される 25 MHz の減衰係数増加量は、32.5 MHz のそれに比べて約 5 倍大きく見積もられるが、25 MHz の実験結果はほぼ同じ値となった。式(1)は気泡 1 個に対する理論解析であり、式(2)では複数の気泡間の相互作用を考慮する解析になっていない。超音波周波数ごとの減衰係数測定結果と気泡数密度分布とを関連づけるためには、気泡間の相互作用がもたらす影響について、今後理論的な検討を行う必要があると考える。

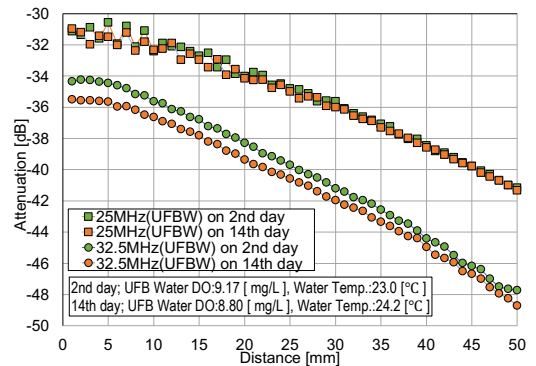


Fig. 7 Comparison of attenuation measurement results with aging.

4. 結 言

30 MHz 帯域までの広帯域超音波に対する UFB 水の減衰特性について調査し、その特性を利用した気泡数密度測定の可能性について検討した。1.5~2.5 MHz 帯の超音波においては、近距離音場

における減衰係数について、気泡数密度測定結果から計算した理論値と比較的に近い結果を確認する事が出来た。しかしながら、気泡数密度分布から精密に理論値を求めている事から、今後はより精度の良い実験を行っていく必要がある。

また、32.5 MHz の超音波に対しては、超純水と UFB 水との間に、気泡数密度分布に対する減衰係数の違いがはっきりとみられた。超音波周波数ごとの減衰係数測定結果と気泡数密度分布とを関連づけるためには、気泡間の相互作用がもたらす影響について、今後理論的な検討をする必要があると考える。

謝 辞

本研究は、西日本高速道路エンジニアリング関西㈱との共同研究により遂行できたことに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] International Organization for Standardization, Fine Bubble Technology - Characterization of Microbubbles - Part 1: Off-Line Evaluation of Size Index, 21910-1 (2020).
- [2] Okuda, T., Matsui, K., Hashimoto, K., Ueda, Y., Nakai, S. and Nishijima, W., Effect of Ultrafine Bubble onto Accumulation and Structure of Urinary Calculus, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 32(1), 12-18 (2018).
- [3] Hata, T., Nishiuchi, Y., Tada, K., Okumura, H. and Akamatsu, S., Fine Bubble Cleaning Technology for Recycling Society, Japan Society for Design Engineering, Vol. 52(5), 291-297 (2017).
- [4] Sato, T., Ueda, Y., Takahashi, K. and Takaki, K., Sterilization and Virus Inactivation by Fine Bubbles, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 35(2), 251-258 (2021).
- [5] Terasaka, K., Himuro, S., Ando, K. and Hata, T., Introduction to Fine Bubble Science and Technology, Nikkan Kogyo Shimbun Ltd., (2016).
- [6] Worldwide Malvern Instruments, Nanoscale Material Characterization: a Review of the Use of Nanoparticle Tracking Analysis (NTA), ©2017 Malvern Instruments Limited, 6-24 (2017).
- [7] Sonoda, A., Measurement of Ultra Fine Bubble Using Laser Diffraction Method, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, Vol. 54, 590-595 (2017).
- [8] Kobayashi, H., Kashiwa, M., Maeda, S., Nishihara, I., Fujita, T., Newey-keane, L. and Fatkin, J., Identification of Ultrafine Bubbles and Solid Particles by Resonant Mass Measurement Method Using MEMS Device, The Japanese Society for Multiphase Flow Symposium 2014, OS-13, D123 (2014).
- [9] Takagawa, S., A Study on Estimation Method of Bubble Distribution from Acoustic Attenuation (1st Report: Theoretical Research), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1987(162), 39-49 (1987).
- [10] Takagawa, S., A Study on Estimation Method of Bubble Distribution from Acoustic Attenuation (2nd Report, Experimental Research), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1988(164), 66-73 (1988).
- [11] Ueda, Y., Tokuda, Y., Yoko, T., Takeuchi, K., Kolesnikov, A. I. and Koyanaka, H., Electrochemical Property of Proton-conductive Manganese Dioxide for Sensing Hydrogen Gas Concentration, Solid State Ionics, Vol. 225, 282-285(2012).
- [12] Ueda, Y. and Tokuda, Y., Measurement and Evaluation of the Fine Bubble via Ultrasonic Wave Attenuation, The Japanese Society for Multiphase Flow Symposium 2017, OS-11, F122 (2017).
- [13] Ueda, Y., Akamatsu, S., Tokuda, Y. and Hata, T., Fine Bubble Properties by Using Ultrasonic Wave Measurement, The Japanese Society for Multiphase Flow Symposium 2018, OS-11, F113 (2018).
- [14] Pinkerton, J. M. M., The Absorption of Ultrasonic Waves in Liquids and its Relation to Molecular Constitution, Proc. Phys. Soc., Vol. B62, 129-141 (1949).
- [15] Smith, M. C. and Beyer, R. T., Ultrasonic Absorption in Water in the Temperature Range 0-80 °C, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 20, 608-610 (1948).
- [16] Fox, F. E. and Rock, G. D., Ultrasonic Absorption in Water, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 12, 505-510 (1941).
- [17] Pancholy, M., Temperature Variation of Velocity and Absorption Coefficient of Ultrasonic Waves in Heavy Water (D₂O), J. Acoust. Soc. Am., Vol. 25, 1003-1006 (1953).
- [18] Kishimoto, T. and Nomoto, O., Absorption of Ultrasonic Waves in Organic Liquids (II), Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 9(6), 1021-1029 (1954).
- [19] Minnaert, M., On Musical Air-Bubbles and the Sounds of Running Water, Phil. Mag., Vol. 16, 235-248 (1933).
- [20] The Acoustical Society of Japan ed., Acoustic Bubble and Sonochemistry, 26-32, Corona Publishing, Tokyo (2012).
- [21] Negishi, K. and Takagi, K., Ultrasonic Technology (in Japanese), University of Tokyo Press (1984).