

超音波による水中を上昇する気泡の揺らぎ計測

Measurement of the Fluctuation of Rising Bubble in Water using Ultrasonic Technique

平尾友二*

Yuji Hirao

抄 録

水中の気泡に超音波を照射すると、空気と水の音響インピーダンスの違いから、気泡表面の境界面ではほぼ全反射する。この原理を利用して反射パワーから水中の気泡の有無を検出する方法がある。本研究では、水中を上昇する気泡に水平方向から超音波を当て、その反射周波数を観測することにより、気泡の上昇に伴う軌道の揺らぎ（横方向の振動）を周波数の偏移量として検出した。そして、周波数偏移量から気泡の大きさを正しく推定できることを、実験によって示す。

1 はじめに

水中を上昇する気泡が、螺旋軌道やジグザグ軌道を描くことはよく知られている。このような気泡の揺らぎは、多くの研究者による数十年に渡る研究で解明されつつあり、規定された水質環境下での気泡の上昇軌道は、気泡が大きい場合にはレイノルズナンバーで規定される形状の変形パターンを踏襲して横方向に大きく振動しながら、小さい場合には形状の変形を伴わず横方向への振動も少ないことなどが解っている。一方で、気泡の振る舞いには、未だ解明されていないことも多く、今なお研究が続けられている。

本研究は、超音波を使って水中を上昇する微少な気泡の大きさを正確に推定する方法に関するものである。

2 原理

水中を上昇する気泡の大きさは、水中を上昇する際の揺らぎ（横方向の振動）により一義的に求めることが可能である。水中に設置した細管から漏れ出る気泡は、水圧と細管内への印可気圧との差によって生成され、式1のような簡略式で表される。水中の気泡サイズや振る舞いは、水温や粘度・密度などの水質環境によって変化するが、水質環境が不変の場合には、気泡の発生とその上昇軌道は一義的で再

$$\Delta Sb(t) = \frac{\kappa}{Pa(t) - Pw} \quad \text{式(1)}$$

Sb : 気泡の体積, Pa : 細管内の気圧,
 t : 時間, Pw : 水圧, κ : 定数

現性を示す。一般に水質環境は極短時間では大きく変化しえないことから、連続限定時間内においては、気泡の発生とその上昇軌道は一義的で再現性を示すものと考えることができ、水中を上昇する気泡の横方向の振動もまた、一義的で再現性を示すと言える。

水中の気泡に超音波を照射すると、空気と水の音響インピーダンスの違いから、気泡表面の境界面ではほぼ全反射する。この原理を利用して反射パワーから水中の気泡の有無を検出する方法がある。本研究では、水中を上昇する気泡に水平方向から超音波を当て、その反射周波数を観測した。水中には上昇運動を伴わないマイクロバブルが存在しているため、水流がない場合には、送信周波数と同じ周波数の信号が観測されるが、ミリバブルと呼ばれる上昇を伴う気泡が超音波ビーム内を横切ると、気泡の上昇に伴う軌道の揺らぎ（横振動）は周波数の偏移量として検出される。前述のとおり、気泡の軌道は気泡の大きさにより一義的に決まることから、周波数の偏移量は気泡の大きさを示すこととなり、偏移量から気泡径を推定することが出来る。

*電子機械課

3 方法

超音波を水平方向から照射し、その反射波を捉えるには、センサを共用化してパルス送信による送受信切り換えを行う方法があるが、この方法ではビームを横切る気泡を連続して捉えることが出来ない。このため、送信用超音波センサと反射受信用超音波センサを図1のように上下に10°の対向角を設けて配置した。実験に用いた超音波センサは、送受信共に感度の良いPZTリニアアレイ型で20x20mmの送受信面を有しており、気泡との距離は約300mmである。送信信号は約2MHz、±10Vppで駆動され、受信信号は受信回路で増幅した後、スペクトラムアナライザ（Agilent N9000A）を用いて周波数分布を観測した。なお、実験に使用した細管ノズル、超音波センサ、超音波送信回路、超音波受信回路はすべて当所で設計して外注したオリジナル品である。

水没させた細管はノズルが交換できるようになっており、印可する圧縮空気の供給量調整と、形状の異なるノズルへの交換によって、発生する気泡サイズを変化させた。気泡の直径は、水面付近でガラス板面に付着した気泡をマイクロスコープで目視計測した。実験では、上昇に伴う気泡自身の形状変化が少ない直径1mm以下の気泡について調べた。水槽内には、水道水を満たし、水温を38～40℃とした。

4 結果と考察

図2に気泡が発生していない時に観測された周波数スペクトル分布を示す。気泡がない場合には、送信信号である約2MHzのスペクトルのみが-30dB程度のパワーで観測された。これは、水槽内での反射に

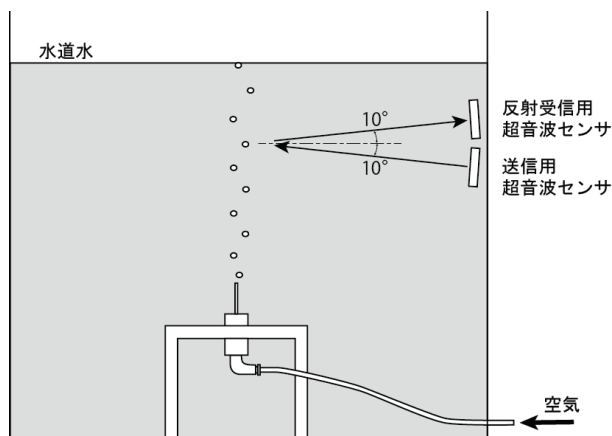


図1 実験装置の概略図

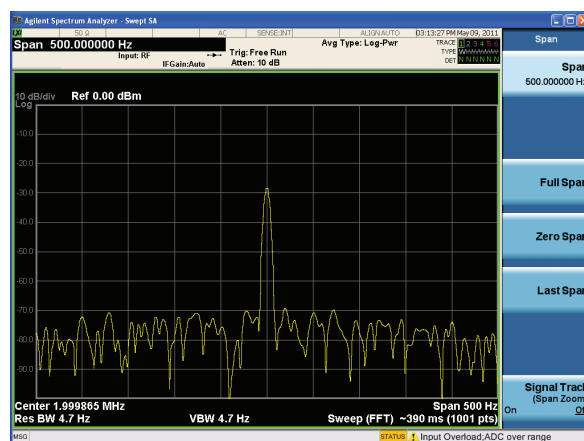


図2 気泡がない場合の周波数スペクトル分布

よるものと考えられる。また、-70～90dB程度のノイズが定在しており、受信系の白色ノイズと考えられる。

実験では、細管ノズルの交換と圧縮空気供給量の調整だけでは意中の気泡サイズを生成させることは困難で、生成できた気泡は、おおよそ直径0.15mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.7mm, 1.0mmであった。図3に直径1mmの気泡が観測された周波数スペクトル分布を示す。このように、気泡が有る場合には、送信周波数から一定量ずれた両側に特徴的なスペクトルの上昇（山）が観測された。この例では、その偏移量は約155Hzであった。

図1のように送受信センサは上下に角度を有して配置されているので、ここで観測された周波数偏移が気泡の上昇速度を反映したもので無いことを検証しておく。第1に、気泡の上昇速度すなわちドップラー効果による偏移であれば、片側にしか生じないが、ここでは周波数偏移が両側のほぼ等位置に観測されている。第2に、上昇速度によるドップラー偏移であれば、音源となる送信側から観測者たる気泡は遠ざかっているため、観測される周波数は式(2)で表される。

$$f = \frac{c - \frac{v}{\sin \theta_o}}{c} f_0 \quad \text{式(2)}$$

一方、観測者たる受信側では、音源たる気泡が近づいてくるので、式(3)となる。

$$f = \frac{c}{c - \frac{v}{\sin \theta_s}} f_o \quad \text{式(3)}$$

両式より式(4)となり、上昇速度によるドップラー偏移は観測されない。ここで、 c は水中の音速 (1500m/s), f は観測される周波数, f_o は源信の周波数, θ_s , θ_o はセンサの対向角度 (10°) である。

$$f = \frac{c - \frac{v}{\sin \theta_o}}{c - \frac{v}{\sin \theta_s}} f_o \quad \text{式(4)}$$

$$f = f_o$$

ただし、厳密には θ_s , θ_o は気泡の上昇に伴い変化しているので、仮に $\theta_s = 5^\circ$, $\theta_o = 15^\circ$ として、直径 1mm の気泡の上昇速度 6m/s で計算すると、周波数偏移は約 64kHz となり、図 3 で観測された周波数と大きく異なる。従って、観測された周波数偏移は、気泡の上昇に伴う横振動を捉えたものである。

図 4 に直径 0.15mm の気泡が観測された周波数スペクトル分布を示す。この例でも、一定量ずれた両側に特徴的なスペクトルの上昇(山)が観測され、その偏移量は約 15Hz であった。

前述の通り、意中の気泡サイズを生成させることは難しく、実験においては、図 5 のように直径の異なる複数の気泡が混在して観測される場合があった。また、図 6 のように片側の周波数偏移が小さく観測

されることがあり、これは、気泡の横振動が往復運動であるために、スペクトル解析のタイミングが必ずしも均等な折り返し期間でなく、往路や復路期間

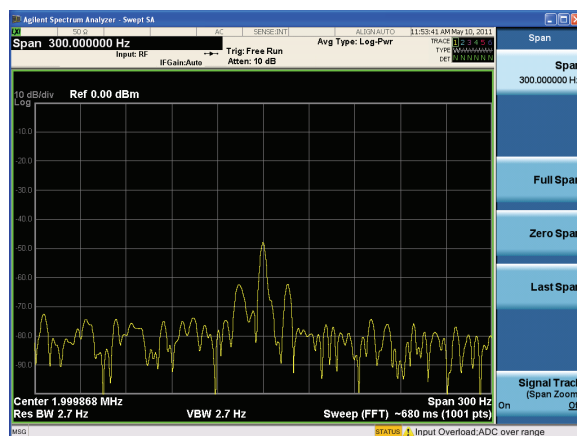


図 4 直径 0.15mm の気泡を観測した時の周波数スペクトル分布

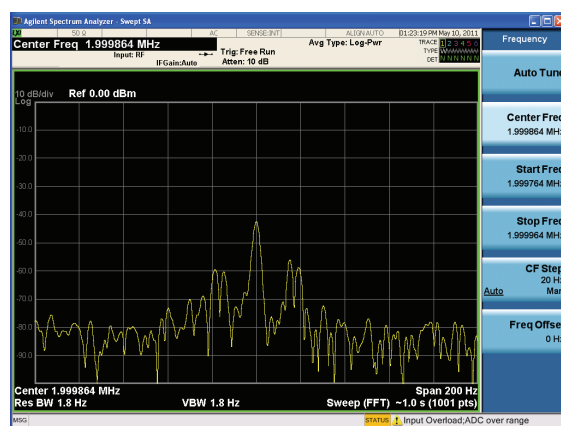


図 5 直径 0.15mm と 0.2mm の気泡が混在時に観測された周波数スペクトル分布

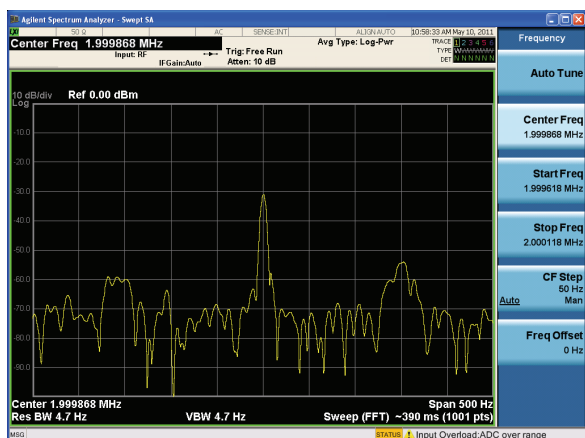


図 3 直径 1mm の気泡を観測した時の周波数スペクトル分布

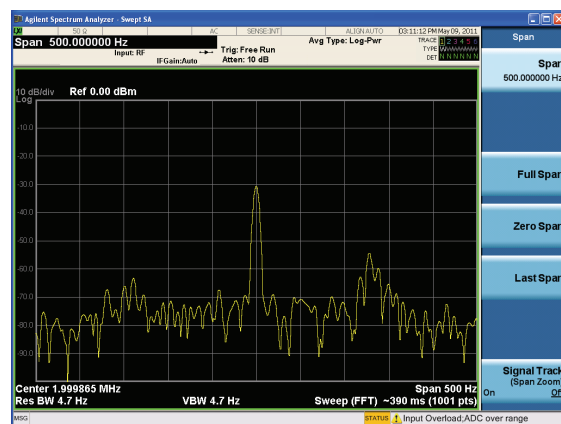


図 6 直径 1mm と 0.2mm の気泡が混在時に観測された周波数スペクトル分布

であった場合には片側が消失しやすいためと考えられる。この他、図3の下側周波数偏移のように周波数偏移ピークが周波数幅を持った平坦であったり、図6の上側周波数偏移のように周波数偏移ピークが近傍に複数存在したりする波形も観測された。これらは、直径が0.7mm以上の気泡において、気泡が大きいほど高頻度で観測された。この理由は現時点では想像の域を出ないが、①気泡が形状変化を伴っていたため、②水流などが横振動の運動に影響を与えたため、③超音波の照射により気泡表面の境界面に音圧の影響を生じて、気泡形状の変化や横振動の運動に影響を与えたため、などの原因が考えられる。

そこで、このような不明瞭な観測データを除外し、観測された気泡サイズや周波数スペクトルに再現性が認められたデータについて、観測された気泡の直径と周波数偏移との関係を求めた。共に目視値であるため、10回の平均値とした。これを表1に示す。

表1 気泡の直径と周波数偏移の関係

観測された		近似式から求めた近似値[Hz]
直径[mm]	偏移周波数[Hz]	
0.15	15	15.3
0.2	20	21.1
0.3	35	33.5
0.7	95	95.3
1.0	155	154.7

得られた5つの観測点から求めた近似式を式(5)に、この近似式から求め直した近似値を表1に併せて示す。近似式の検討においては、 n 次多項式との比較も行ったが、結果に差異はほとんど無かった。

$$f(d) = 61.7d^2 + 93d \quad \text{式(5)}$$

$f(d)$: 周波数偏移量[Hz], d : 気泡の直径[mm]

図7に表1をグラフ化して示す。ここで、波線は観測点を直線で結んだ折れ線グラフ、実線は観測点から近似式で求めた2次曲線である。

これらの結果から、水中を上昇する気泡に水平方向から超音波を当てることによって、気泡の上昇に伴う軌道の揺らぎ（横振動）を周波数の偏移量として検出し、その周波数偏移量から気泡の大きさを正し

く推定できることが示された。

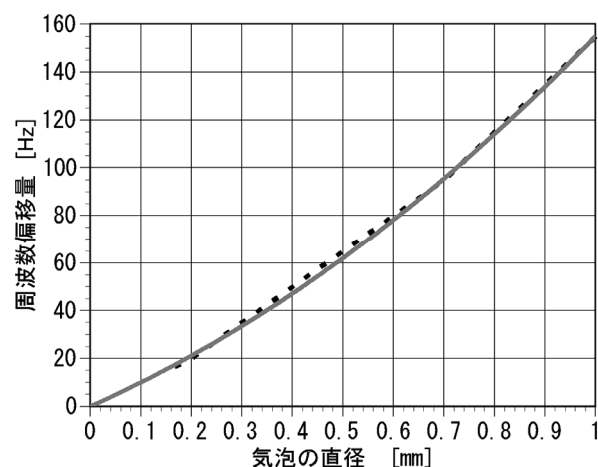


図7 観測された気泡と周波数偏移の関係

5 おわりに

最初に触れたとおり、水中を上昇する気泡の軌道には水質環境に影響を受ける。水流が無視できる場合には、主に粘性と温度に影響を受けるものと考えられ、本研究成果の産業応用には、温度と粘性の変化による影響を実験的に求め、データベース化する必要がある。

参考文献

- 1) G.Ryskin, and L.G.Leal: "Numerical Solution of Free-Boundary Problems in Fluid Mechanics. Part2. Bouyancy-Driven Motion of A Gas Bubble through A Quiescent Liquid", J.Fluid Mech., Vol.148, pp19-35(1984)
- 2) Mingming Wu, and Morteza Gharib: "Experimental Studies on The Shape and Path of Amall Air Bubbles Rising in Clean Water", J.Physics of Fluids, Vol.14, No.7, ppL49-L52(2002)
- 3) P.G.Saffman: "On the rise of small air bubbles in water", J.Fluid Mech., Vol.1, pp249-275(1956)
- 4) 高曾徹・國陽裕介・渡海博史・速水洋: 「上昇する気泡の後流渦と気泡軌跡」, 機械学会流体工学部門講演会論文集, pp236-237, 鳥取市(1999-10)
- 5) T. Ushijima, and S.Yazaki: "Towards Modelling The Motion of Rising Air Bubbles in A Hele-Shaw Cell". Proc. of the Czech-Jap. Seminar in Appl. Math. 2005, pp146-152, Oita(2005-9)