

Jet 下に生成される気泡の物理特性について

Physical characteristics of bubbles generated under the jet

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 大塚淳一(Junichi Ohtsuka)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐伯 浩(Hirosi Saeki)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 渡部靖憲(Yasunori Watanabe)

1. はじめに

砕波ジェットの水塊への突入によって生成される大量の気泡はその浮力及び抗力により流体運動に大きな影響を与えるだけでなく、海岸工学的分野において、海底砂の浮遊及び堤体の洗掘等の原因の一つとして指摘されているだけでなく、沿岸域における生物の酸素供給源として水産工学的分野においてもその役割が大きいことが指摘されている。

著者ら(1999)は定常流下に生成される気泡の速度及び気泡流中の水粒子の速度をPIVにより計測を行うと共に、高速ビデオカメラによって撮影された画像をもとに気泡の生成機構を特定することにより混入気泡の流体運動への影響を報告している。さらにレーザーシートで水路縦断方向に断面を切り、そのレーザーシート上に水塊を落下させそのシート内に写る気泡を高速ビデオカメラで撮影し、気泡の速度及び気泡計、ボイド率の計測を行った(大塚ら2000)。しかし、気泡の重なりの影響は低減するものの、レーザーシートを横切るような気泡の三次元的挙動をとらえることが難しい点、気泡がレーザー光を散乱させてしまう問題より、レーザーシートを用いたとしても十分な精度で計測することが出来ないことが明らかとなった。このように画像処理による気泡径及び

ボイド率等の計測には限界があり新たな方法を考える必要がある。

吉田ら(1998)の研究ではノズルから単気泡が生成される際に発生する音の周波数を調べることによりその気泡の径の気泡径の計測を行っている。

本研究においても同様な手法を用い単気泡が生成される時の音の周波数から気泡径の計測を行うと共に、jetのモデルとして静水面にjetを落下させその時に発生する音を水中マイクロホンにより計測し、その周波数から気泡径の計測を行った。

周波数解析としてFFTによるスペクトル解析を、時間周波数解析としてウェーブレット解析手法を採用した。なお、マザーウェーブレットとして周波数分解能が高いBスプラインウェーブレットを適用した。

2. 実験方法と実験条件

実験は長さ20m、幅0.6m、深さ1mの二次元水槽で行われた。単気泡の径の計測では内径4mm、6mm、8mmの亚克力パイプを気泡生成装置に接続しパイプの先端から気泡が離れる際の音を水中マイクロホン(B&K8103)によってサンプリング周波数5KHzで計測を行った。単気泡の径の計測における水中マイクロホンの設置位置は、高さはパイプの先端と同じで水平方向にはパイプの中心から水平方向に2cm離れた位置に設置し計測を行った。またこの実験においては単気泡の生成の様子をビデオカメラで撮影を行い画像処理によって単気泡の径の計測を行った。なお気泡が出てくるパイプの先端から水面までの距離は常時31cmとした。

jetの落水実験は表1に示す9ケースについて行われた。亚克力パイプの端ラテックスシートを張り、そこに水を入れパイプ中を通る針でゴム膜を破ることによりjetを静水面に落下させた(図1参照)。水中マイクロフォンはjet着水後に生成される気泡が直接水中マイクロフォンに当たらないようにjet着水点から水平方向に7cm、水面からの深さ4cmの位置に設置し、jetが静水面に当たり気泡が生成される時の音を計測した。球形気泡の基本周波数と気泡径には以下の関係があり、周波数から径を算出することができる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho r_0^2}} \quad (1)$$

f : 音の周波数 γ : 比熱比

P_0 : 絶対水圧 ρ : 流体の密度 r_0 : 気泡の半径

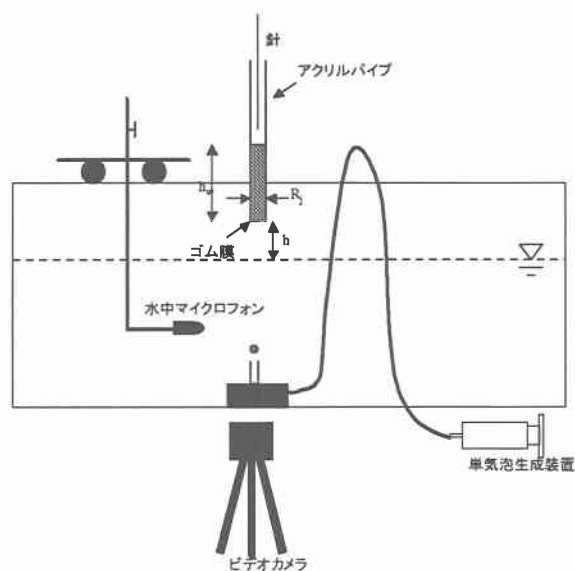


図 1 実験装置

	$R(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$h(\text{mm})$		$R(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$h(\text{mm})$		$R(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$h(\text{mm})$
case1	20	25	100	case4	26	25	100	case7	30	25	100
case2	20	50	100	case5	26	50	100	case8	30	50	100
case3	20	100	100	case6	26	100	100	case9	30	100	100

表 1 実験ケース

3. 結果

音圧は音源からの距離に反比例して低下するため水槽内

ガラス面からの反射は非常に小さいと考えられる。本実験においては反射音の影響はないものとして議論を進めていく。

3.1 単気泡生成による音の計測と気泡径の計測

図2はパイプ内径6mmにおける単気泡生成の様子の連続画像である。気泡がパイプから離脱する瞬間に気泡内の圧力の変動により気泡が大きく振動し、その振動が音として伝わる。通常半径3mmの気泡の振動数はおよそ1000Hz、半径1mmの気泡でおよそ3000Hzで振動する。(1)式からもわかるように、小さな気泡ほどこの振動の周波数は大きくなる。この振動の形態はいくつかあるが、今回の計測では表面張力の影響を無視し、膨張、収縮といった振動(0次モードの振動)のみを考えることとする。図3はパイプ内径6mmにおける典型的な時系列である。気泡がパイプから離脱すると同時にピークが現れ、その後減衰振動をする。この時系列データからスペクトルを求めたのが図4である。図4を見るとわかるようにおよそ270Hz、830Hz、1100Hzの3つのピークが見られた。他のケースにおいても同様な複数のピークが確認された。Manassehら(19??)によれば単一気泡には唯一のピークが存在するようであるが現在のところこの複数のピークの発生原因はわかっていない。縦軸をビデオカメラによって撮影された画像から求めた気泡の半径とし、そのときの気泡の周波数を横軸として第1ピークから第3ピークまでプロットしたのが図5である。ただし内径4mmのパイプでは第2ピークまでしか確認することができなかった。図中の曲線は式(1)から求められた曲線である。全てのパイプ径における第1ピークの値が約500Hz低く表されている。これらの低周波の音の原因は不明であるが各パイプ径の第2ピークでは先程の曲線に近い値となっている。今回の実験では第2ピークを気泡の自然周波数とみなして今後はこの曲線の値をもとに議論を進めることとする。

図6は図2の時系列データをウェーブレット解析した結果である。aは分解された(ローパスした)時系列であり、bがその時のウェーブレット係数を表している。図4のスペクトルでは270Hz、830Hz、1250Hzの3つのピークが見られたが、ウェーブレット解析では315Hz、625Hz、

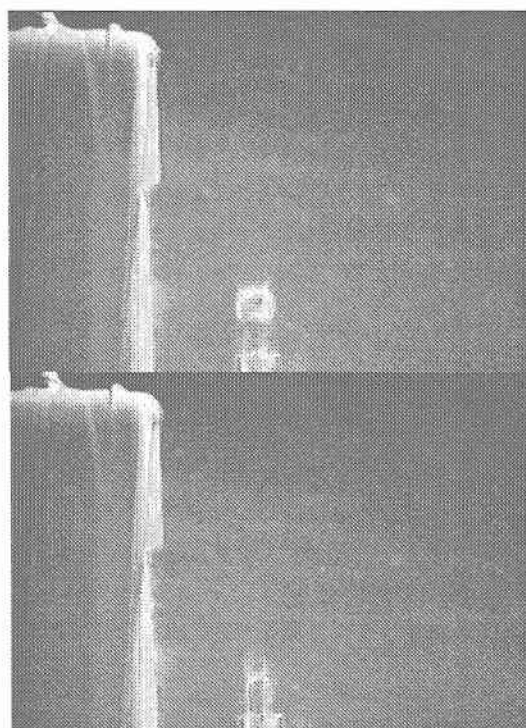


図 2 単気泡の生成の様子(位相:1/30 秒)

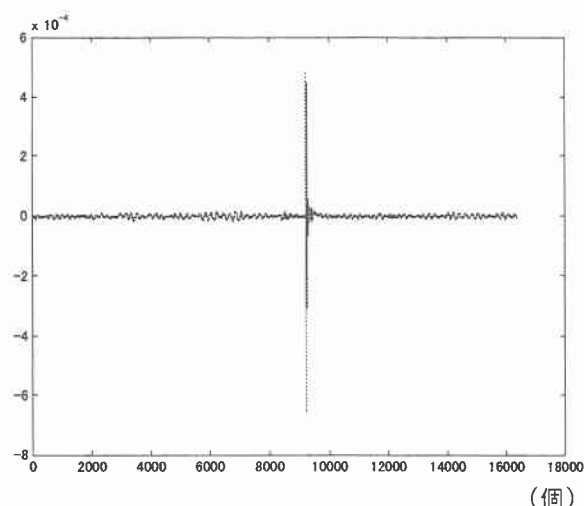


図 3 単気泡の音の計測(時系列) 内径6mm

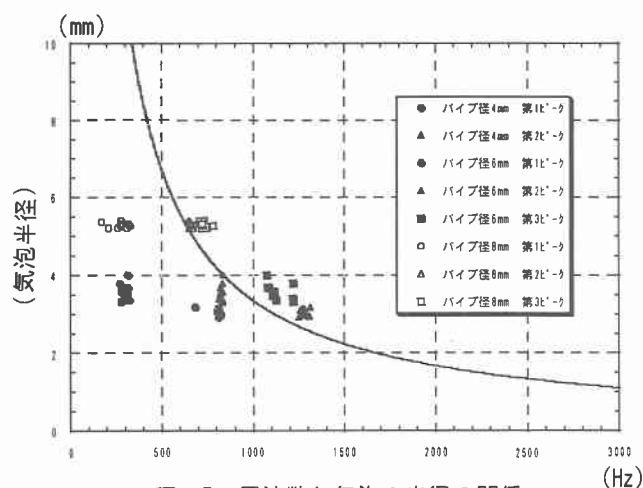


図 5 周波数と気泡の半径の関係

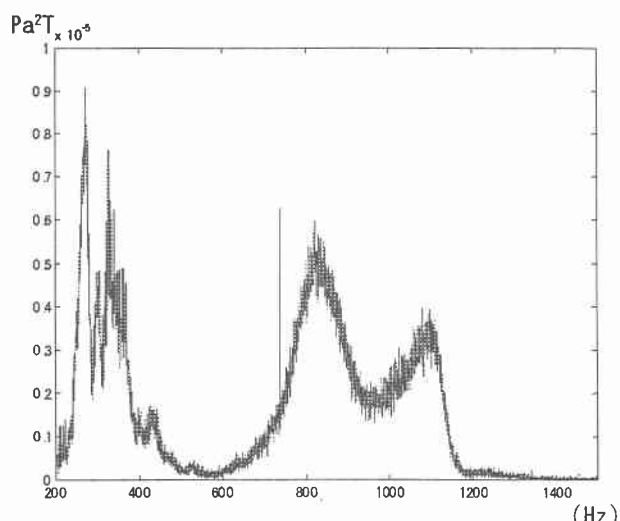


図 4 単気泡の音の計測(スペクトル) 内径6mm

1250Hzに強い値が得られた。ウェーブレット解析では時間周波数解析を行えるという有利な面がある一方で、2の階乗でしか分解能がないという不利な面があるためこのような差が生じたと考えられる。このため、連続して生成される気泡群を時間的に終えるが厳密なその径についての決定は難しいといえる。

3.2 jet 下に生成される気泡の径の計測

図7はcase2におけるjetの着水の様子である。jet着水後、着水点近傍にくさび状の界面が着水点を軸として同心円状に現れる。著者ら(1999)は定常ジェット下においても同様にくさび状の界面が現れ、このくさび形状が細かく振動することにより気泡が生成されることを確認している。jetの着水後、同様くさび形水面が発達しこのくさび形状を維持できなくなりくさびがjetによって取り込まれた水塊と離れると同時に大きな気泡塊が生成される。この気泡塊はその大きさゆえに不安定であり底面へ向かいながら分裂していく。この分裂後比較的大きな気泡はすぐに水面へ向かい上昇をはじめ、小さな気泡はさらに分裂を繰り返しながら底面へ向かう。そして細かく分裂した気泡は十分な浮力を有しないためその上昇速度はかなり遅いものとなり水中に浮遊する時間が長い。図8はcase1における時系列のグラフである。図9は図8の時系列データからスペクトルを求めたものである。明確なピークが現れておりその周波数はおよそ365Hzである。先程の図5における曲線からこの周波数での気泡の半径を求めると約9mmと推定できる。単気泡の生成の結果と異なりjet着水によって比較的多くの気泡が生成分裂し多くの気泡の音が計測されられたがスペクトルには一つのピークがあるのみであった。しかしながらビデオ映像や目視では明らかに多くの気泡が生成されているように見えた。jet着水直後には水溜りに石を投げたときのような‘トボン’という一回の比較的大きい音が発生を確認した。この音というのは上で述べたくさびがjetによって取り込まれた水塊と離れる時に発生する音と考えられる。そしてこのとき生成された大きな空気塊が細かく分裂して我々の目には大量に気泡が生成しているように見えていると考えられる。jetの着水と同時に大量の気泡が生成されるのではなく、はじめはひとかたまりであった大きな気泡塊が分裂しているため水中マイク近傍で生成された大気泡の情報が非常に強く、気泡の移流途中で分裂した音圧が大きくなったためスペクトルには一つのピークしか現れなかった可能性がある。今後は高速ビデオカメラを用いて気泡の微細な動きに注目して検証をすすめる必要がある。

図10は図8の時系列データをウェーブレット解析を行った結果であるレベル3に強い周波数成分が存在しているのがわかるこの周波数は625Hzでありスペクトル解析のピークを示す365Hzと大きく異なる。この原因も前述したウェーブレット解析の分解能の低さに原因があると考えられる。

4 結論

水中マイクロホンを用いて単気泡が生成された時の音

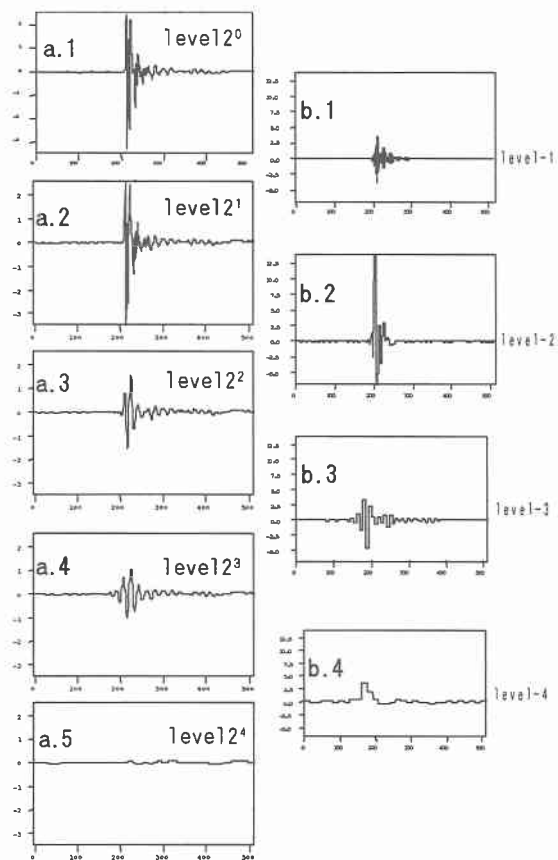


図 6 ウェーブレット解析による周波数成分分解 (単気泡)右:ウェーブレット係数 左:時系列

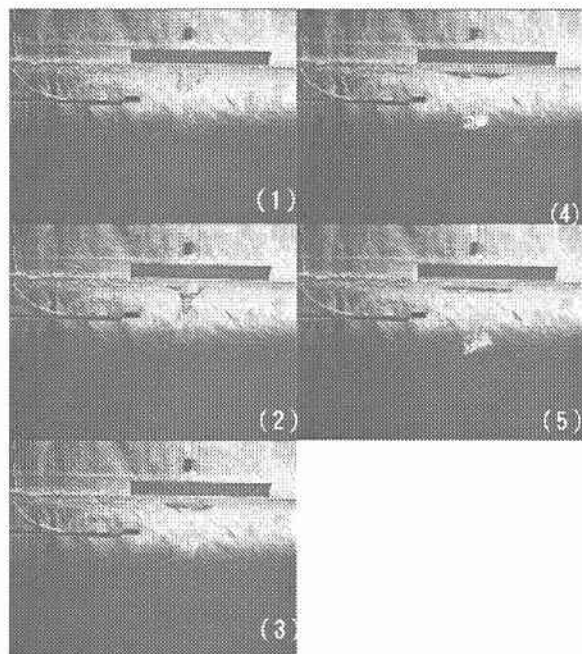


図 7 jet 下における気泡の生成の様子

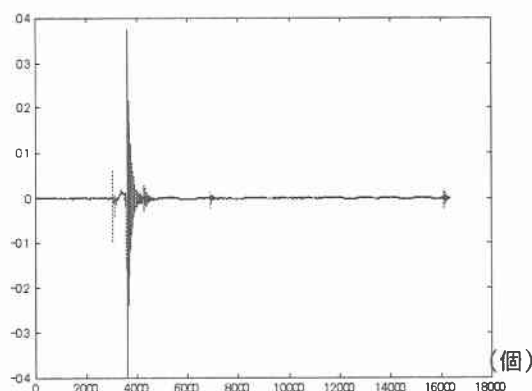


図 8 jet 下における気泡の音の計測(時系列)

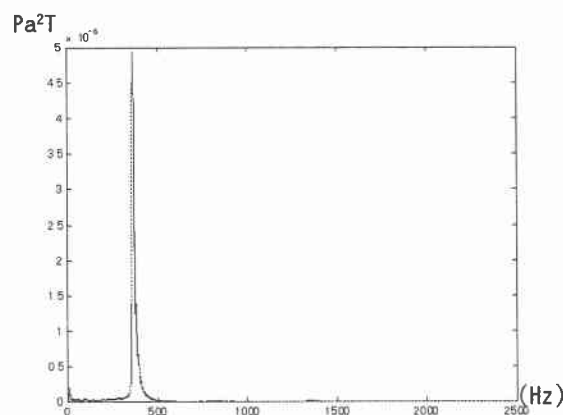


図 9 jet 下における気泡の音の計測(スペクトル)

を計測し、その周波数を調べることでより気泡径の計測を行った。今回の実験においては第1次から第3ピークが現れ第2ピークが理論曲線に近い値を示した。第1ピークに比較的低い周波数は現れるか原因は不明であるが気泡の表面の運動を詳細に調べ解明する必要がある。

ウェーブレット解析は任意の時間において周波数を特定することができる利点があるが周波数分解能の低さから、厳密に気泡の基本周波数を決定するのは困難である。フーリエ解析と併用することで多気泡の周波数特性を算定できる可能性がある。

参考文献

- 1) Ali Kolaini, Ronald A. Roy, David L. Gardner: Low-frequency acoustic emissions in fresh and salt water, J. Acoust. Soc. Am. 96, pp1766-1772, 1994.
- 2) Ali R. Kolaini: Sound radiation by various types of laboratory breaking waves in fresh and salt water, J. Acoust. Soc. Am. 103(1), pp300-308, 1998.
- 3) Richrad Manasseh, Shizuo Yoshida, Murray Rudman: Bubble formation processes and bubble acoustic signals, Third International Conference on Multiphase Flow, 1998.
- 4) 渡部靖憲, 大塚淳一, 佐伯 浩: 自由落下水塊に伴う気泡の生成・運動機構, 海岸工学論文集, 第46巻, pp116-120, 1999.

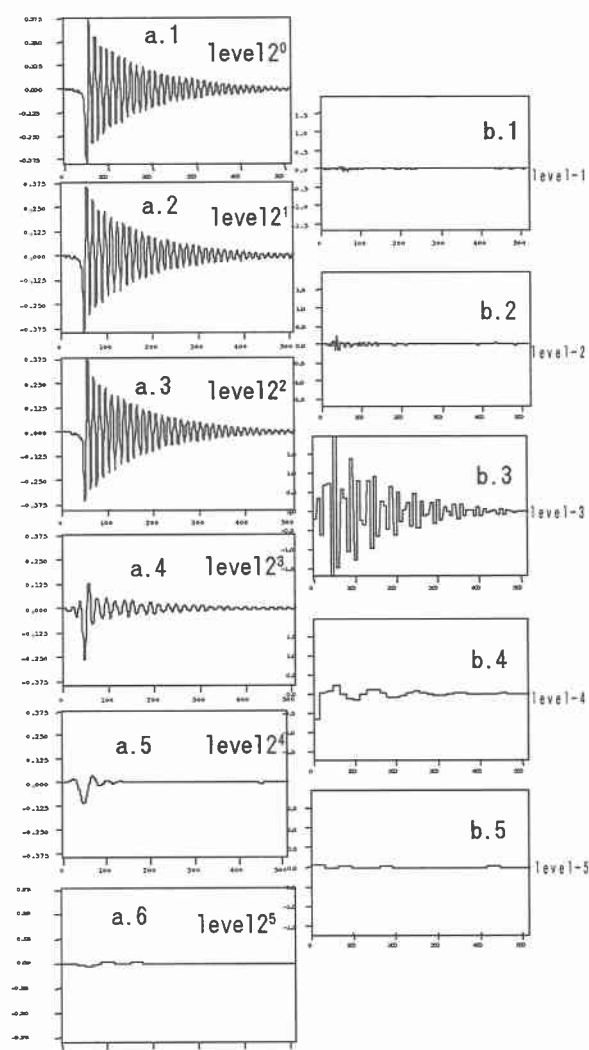


図 10 ウェーブレット解析による周波数成分分解 (jet) 右: ウェーブレット係数 左: 時系列