

砕波帯における生成気泡群構造と気泡カウンティング

On Bubble Counting in the Structure of Bubble Clouds after Wave Breaking

北海道大学工学研究科 学生会員 ○山内 悠司 Yuji Yamauchi
 北海道大学工学研究科 正会員 渡部 靖憲 Yasunori Watanabe
 北海道大学工学研究科 フェロー 佐伯 浩 Hiroshi Saiki

1. はじめに

砕波は大量の気泡を水中に混入させ、この混入気泡は沿岸波動場において沖合から伝播した波のエネルギーを散逸させるなどの力学的影響のみならず、海生生物への酸素供給源としての生物的寄与、さらに熱輸送、水質浄化の観点においても非常に重要な役割を有する。特に、砕波帯においては、水中に大量の気泡の混入によって形成される混相流は非常に複雑なものになる。さらに、ジェットの着水から、ボア領域、Swash Zone に至るまでの砕波の過程において、大気が水面を巻き込んで発達する気液混相乱流構造は、気泡の生成過程を変化させるために、生成気泡径、気泡含有体積(ボイド率)、気泡個数の局所の変化、時間的変化が非常に大きくなり、それらを解明することは上述した現象の観点において非常に重要なことである。

これまで、著者ら(渡部, 2002)は気泡径を求める手段として、気泡生成時に放出される音波をハイドロフォンによって計測し、砕波遷移に伴う気泡径分布の変化及び、波浪パラメータに対する依存性を resonance relation (Strasberg, 1956) から明らかにした。また混入気泡量に関しては、実海域と実験水槽で気泡をトラップする方法及び、気泡径推定と同様な音響技術による方法によって砕波帯における岸沖方向の気泡量分布を明らかにした。一方, Medwin and Daniel (1990)は、水深の急変する水槽内に崩れ波砕波を発生させ、ハイドロフォンにより砕波下に発生した気泡音を受信し resonance relation から気泡径を推算し時系列から気泡個数を推測した。しかし、気泡生成は水面近傍の局所的な渦構造やそれを特徴付ける波浪パラメータさらに界面の状態に強く依存し、分裂を経て初期生成からの遷移も顕著となるため経験式から数値モデルのパラメータを予測することは困難と考える。気泡のサイズ及び量は、気液間の力学的作用以外にも海底砂の浮遊や海生生物環境にとっても重要なパラメータとなるため、適切な気泡モデルの構築が望まれている。

本研究は実験水槽で巻き波を与えその砕波帯での気泡生成、輸送の様子を高速デジタルビデオカメラの撮影によって可視化することで、その時間変化と局所的な変化を明らかにすることを目的とする。また、砕波後の水面直下に存在する渦構造の発達過程と連行気泡との関係についても、同様のビデオ映像を基に議論を行う。

2. 実験方法

砕波帯においては砕波の進行に伴い水中に混入する気泡径、気泡体積、気泡個数の分布が大きく変化することは知られている(渡部ら, 2002)。そこで本研究では、気泡生成の時間及び局所的な変化を調べるために、砕波の様子を高速デジタルビデオカメラ(Photron 製)によりサンプリング周波数 1/250 秒で砕波帯でのレーザーシート散乱光を撮影した。

1/20 の勾配をもつアクリル製造波水槽(幅 24cm × 高さ 40cm × 長さ 8cm)に造波機位置での水深を 25cm とし、周期 0.7s, 砕波波高 12cm(砕波点を $X=0\text{cm}$ とする)の波を与えた。撮影方法に関しては、それぞれの撮影ポイントにレーザーシートを波の進行方向に対して鉛直方向(実験-a とする)、水平方向(実験-b とする)と 2 通りの向きにあて、レーザーシートの位置を、実験(a)に関しては、 $X=25\text{cm}$ から 10cm 間隔、実験(b)に関しては、 $X=5\text{cm}$ から 7cm 間隔でそれぞれ 5 点、6 点(波の進行方向の順に a 点、b 点…とする)で撮影を行った。(図-1(a), (b)) またカメラの位置は実験(a)が波の進行方向とは逆の向きに水槽の側面に対して斜めから、実験(b)は水槽の側面に対して平行に撮影を行った。ここで、実験は暗室で行われたため、撮影された画像は、レーザーシートを通過する界面のみがレーザーを拡散させ映し出される。

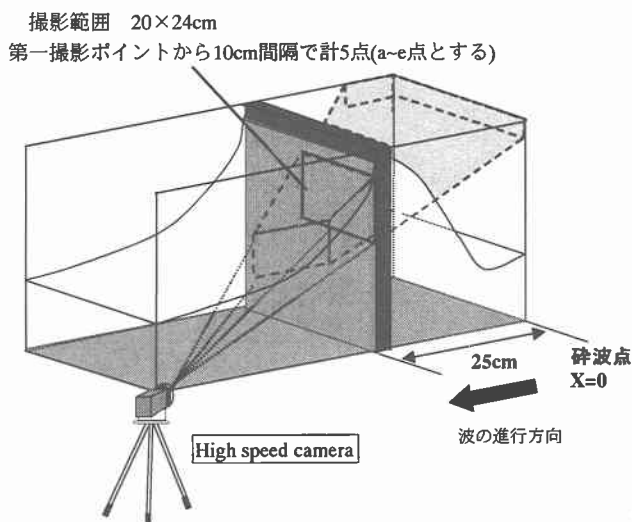


図-1(a) 実験装置 (実験-a)

撮影範囲 $5.25 \times 7\text{cm}$
 第一撮影ポイントから岸方向に7cm間隔で計6点(a~f点とする)

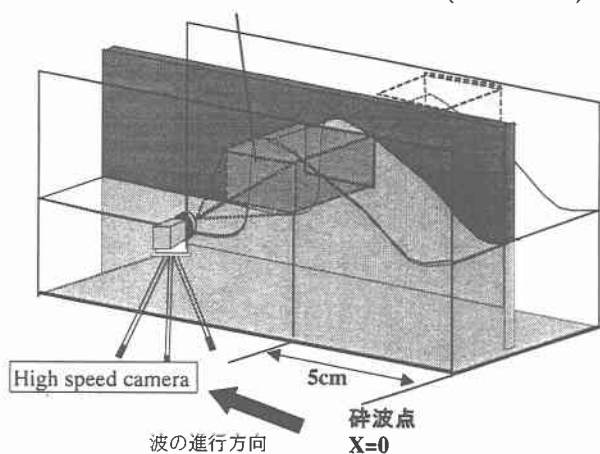


図-1(b) 実験装置 (実験-b)

3. 解析方法

3.1 実験-(a)

高速ビデオカメラによる撮影によって得られた画像を気泡以外のものがレーザーに反射して画像に映し出されるノイズやレーザーに反射した光の飽和したものを取り除くために、いったん画像に Gaussian フィルターをかけた。さらに、得られた画像の波が通過していく範囲における数十枚の画像をつなぎ合せ、画像濃度の等値線を示すことによって、気泡生成の時間変化及び局所的な変化を可視化した。

ここで注目するのは、ジェットが突っ込む水面下の気泡の様子で、その近傍で見られる大量の気泡が集中して形成される気泡塊の生成特性と生成分布についても議論を行う。

3.2 実験-(b)

実験(a)と同様に、実験によって得られたオリジナルの画像(図-2(a))を Gaussian フィルターをかけ、さらに円状 Top-Hat フィルターをかけた(図-2(b))。この Top-Hat フィルターをかけることによって、いく面からの散乱光を排除し、球状に光っているもののみをピックアップしている。よって、図-2(b)の画像は気泡のような円状投影面を持つもののみが撮影されていると見なしてよい。ここではさらに、フィルターをかけた後、画像中の連結画素のしきい値 $\alpha=0.05$ 以上のピークを抽出し(図-2(c))、それぞれの気泡の画像上での位置を $x-y$ 座標で表した。図-2(d)は画像の連結画素ピークを抽出する際のしきい値 α を図-2(b)の 2 倍にしたものである。ここで今回用いたしきい値 α の値はいくつかのケースの画像でオリジナルの画像と連結画素のピークを抽出した画像とをてらしあわせ、できるだけ気泡によるレーザーシート散乱光を精度よくとらえている値を採用した。これらの画像処理により得られた画像のデータを基にレーザーシート設置となる断面での気泡個数のカウンティングが可能となる。また、気泡個数の時間的な変化に注目することで、場所によって変化する気泡の残存時間及び、気泡個数のピークの時間的な変化について議論を行う。



図-2(a) 高速ビデオカメラによって撮影されたオリジナル画像



図-2(b) Top-Hat フィルターをかけた画像

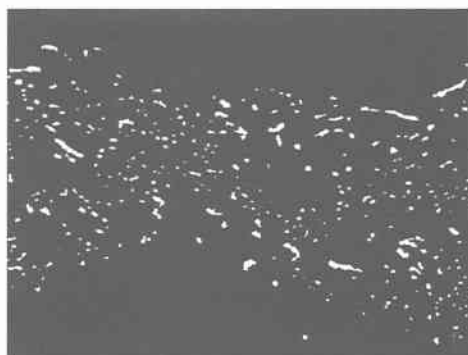


図-2(c) 連結画素のピークを抽出した画像
しきい値 $\alpha=0.05$

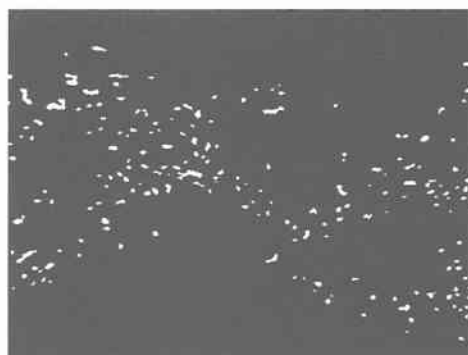


図-2(d) 連結画素のピークを抽出した画像
しきい値 $\alpha=0.1$

4. 実験結果

4. 1 実験-(a)

図-3(a-c)に示すのは、順に a 点, c 点, e 点におけるオリジナル画像にフィルター処理を行った後の画像濃度の等断面図である。a 点は、ジェットに着水点にあたり、図-3(a)を見てみると、着水点直下で形成される気泡塊は比較的小さく小規模であり、横断方向に狭い間隔(約 4~6cm 間隔)で生成されている。また、この領域では、約 0.05 秒から 0.2 秒に至るまで同じような様子の等値断面図が見られることから、ジェットの着水点近傍では、連続して同規模の気泡塊が生成され発達していくのが分かる。大量の気泡がこの気泡塊と共にボア領域へと輸送される。

さらに、a 点より 20cm 岸方向に進んだ c 点での同図(図-3(b))を見ると、気泡塊がボアフロントの進行とともに進行し、その分布は広がり、間隔も側方へと広がっているのが分かる(約 5~10cm 間隔)。

さらに、c 点より 20cm 岸方向に進んだ e 点の同図を見ると、気泡塊は完全に水面近傍から移動し、その分布を見ると下方及び側方へと疎らになりながら発達しているのが分かる。そして水面近傍ではほとんど見られなくなっている。

4. 2 実験-(b)

前述の 2.2 で述べたように、画像処理によって得られた画像(図-2(c)参照)から気泡個数のカウントを行い、各地点における気泡個数の時間変化の様子を図-4(a)-(c)に示した。(a), (b), (c)はそれぞれ a 点, c 点, f 点での気泡個数を表し気泡個数は、同じ地点での十波のアンサンブル平均をとったものである。これらの図からジェットの先端が着水してから、ボア領域に至るまで局所的に混入気泡個数が増加しているのが分かる。また、碎波の初期状態にあたる a 点では、その領域での気泡の残存時間がほかの地点に比べて非常に短い。これはジェットが水面に達したときに水面下で形成される渦が生成した気泡を直ちに波の進行方向に輸送するからだと考えられる。逆に f 点では、比較的長時間大量の気泡が残存している。これは、ボアが発達するに従って、水槽の低層部分で、波の進行方向とは逆向きの流速が生じ、波の進行方向への気泡の輸送があまり働かなくなるからと考えられる。

また a 点, c 点では比較的滑らかな曲線を描いているのに対して、f 点では、いくらか気泡個数に変動が見られる。これは、完全なボア領域にあたる f 点では先ほど述べた前方からの輸送による気泡の残存だけでなく、そのほかに渦運動など気泡の個数を変動させる何らかの影響があると推測している。この問題に関しては、これからの研究の課題の一つとして、その解明を急ぎたい。

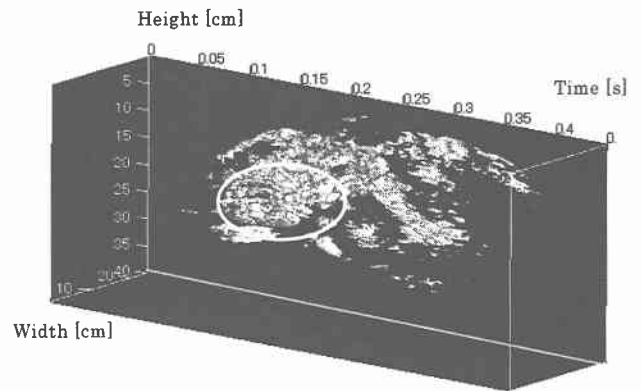


図-3(a) 画像の濃度の等値断面図 a 点

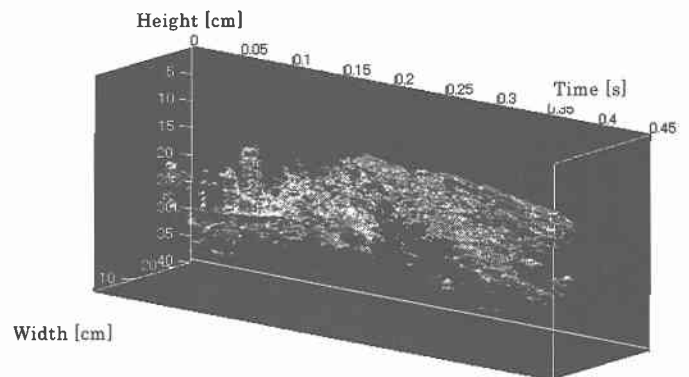


図-3(b) 画像の濃度の等値断面図 c 点

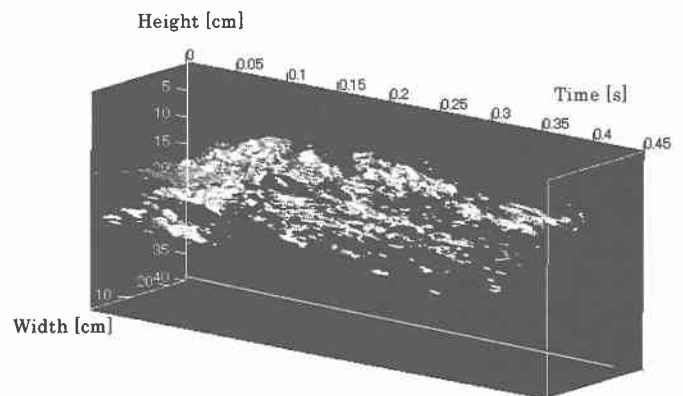


図-3(c) 画像の濃度の等値断面図 e 点

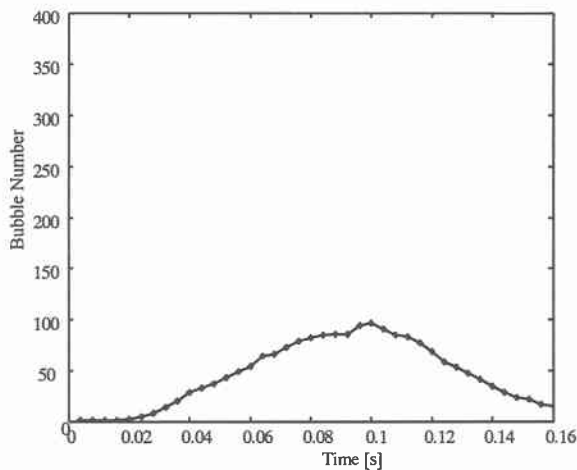


図-4(a) 推定気泡個数の時系列 a 点

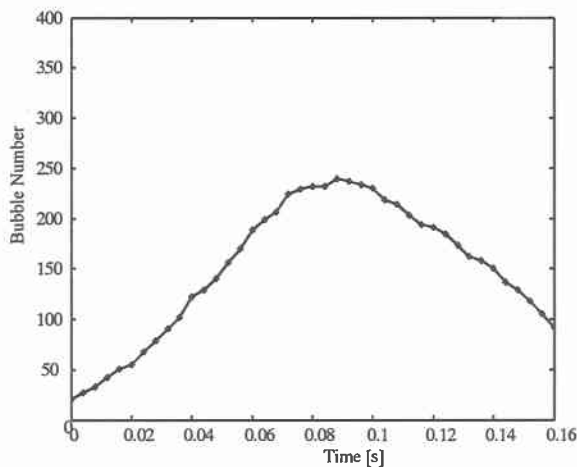


図-4(b) 推定気泡個数の時系列 c 点

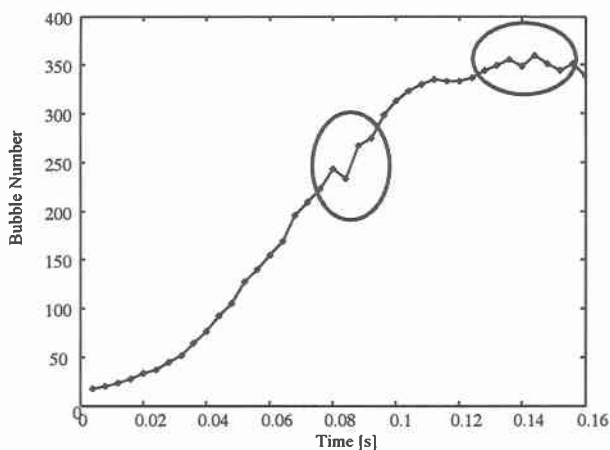


図-4(c) 推定気泡個数の時系列 f 点

4. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ・ ジェットの着水点直下で形成される気泡塊は比較的小さく小規模であり、時間とともにそれぞれの間隔は広がり、下方へと発達していく。
- ・ 気泡個数は、砕波が進行するに従い増加していく。
- ・ ある場所での気泡の存在時間は、砕波が発達していくにつれて、長くなる。
- ・ 完全なボア領域にあたる f 点では前方からの輸送による気泡の残存だけでなく、そのほかに渦運動など気泡の個数を変動させる何らかの影響がある可能性がある。

5. 参考文献

- ・ 渡部 靖憲, 山内 悠司, 佐伯 浩 (2002): 砕波遷移に伴う気泡生成特性変化とマイクロバブル量に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, vol.1, pp106-110
- ・ 渡部 靖憲, 大塚 淳一, 安原 幹雄, 加藤 雅也, 王 毅, 佐伯 浩 (2000): 実海域における砕波に伴う気泡生成及び連行特性, 海岸工学論文集, 第 47 巻, vol.1, pp131-135
- ・ Medwin. H and N. D. Breitz (1989): Ambient and transient bubble spectral densities in quiescent seas and under spilling breakers, J. geophys Res, Vol.94, pp. 12751-12759.
- ・ Kolaini. A. R(1998): Effects of salt on bubble acoustic radiation in water, Acoustical Society of America, Vol.105 (4), pp. 2181-2186.
- ・ Kolaini .A .R(1997): Sound radiation by various types of laboratory breaking waves in fresh and salt water, J. Acoust. Soc. Am. 103, pp. 300-308.
- ・ Medwin. H and N. D. Breits(1989): Ambient, and transient bubble spectral densities in quiescent areas and under spilling breakers, J. Geophys.Res. 84,pp. 12751-12759.
- ・ Medwin. H and Daniel A. C Jr (1990), Acoustical measurements on bubble production by spilling breakers, J Acoust Soc Am, Vol.88, pp. 408-412.
- ・ Pandit. A. B and J. Varley, R. B. Thorpe and J. F. Davidson (1991): Measurement of bubble size distribution: An acoustic technique, Chemical Eng Sci, Vol.47, No.5, pp. 1079-1089.
- ・ Peregrine. D. H.(1983): Breaking Waves on Beaches, Annual Reviews of Fluid Mechanics Vol. 15 pp. 149-178.
- ・ Strasberg,M. (1956): Gas bubble as source of sound in liquids, J.Acoust.Soc. Am, Vol.28, pp. 20-26.
- ・ Thope. S. A and A. J. Hall (1982): The characteristics of breaking wave, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar, Continental Shelf Research, Vol.1, No.4, pp. 353-384.