

砕波帯内の気泡群物理特性に関する研究

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 山内 悠司
北海道大学大学院 正員 渡部 靖憲

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流体運動、低質輸送等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学的寄与、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。特に砕波帯内に混入気泡によって形成される混相流は砕波に伴う乱れとの coupling によって非常に複雑なものとなり、流速場の適切な評価を行うため適切な気泡群モデルの構築が望まれている。しかしながら、砕波帯のような多方向に変動する非定常流速場においては、気泡径、気泡量等の基礎量を計測する適当な手法が存在しないため、これらのモデル化が非常に

困難であるのが現状である。white-capをはじめとする深海域の砕波下の混入気泡についてはエコーシグナルを利用し音波の気泡群通過に伴う流速変化を現地において計測することで、気泡径、気泡群を評価するアクティブアコースティック計測法が使われている。(例えば Thorpe, 1944, Su, 1988)

しかしながら、この手法は沿岸砕波のような浅海波における局所性の強い気泡混入形態に対しては適用が困難であると考えられる。

一方、水滴下の気泡等局所性の強い問題に対しては、気泡から放出された音波をハンドロフォンによって受信し、その周波数から気泡径を算定するパッシブな方法が採用されてきた。渡部ら(2001)は、同様な方法で、得られた音波を wavelet - packet 解析するにより、ジェット下の気泡生成、分裂過程を通じた時間遷移を精度よく評価可能であることを明らかにした。

一方、淡水、塩水、そして海水中に混入される気泡特性が大きく異なる点は、以前から指摘されている。(例えば Ali R. Kolani) その原因は表面張力の違い界面における電氣的、化学的な作用によるものだと考えられている。実海域と実験室における気泡特性の際は、実験結果の実海域へのアプリケーションを考えた場合非常に大きな問題になることは明らかであり、界面の物理特性の差異に対する混入気泡物理量の関係を明らかにする必要がある。

本研究は実海域及び波動水槽実験における砕波帯内に存在する微細気泡を採取し海水、淡水そして界面活性剤が混入された淡水中の微細気泡量を比較しその特性を明らかにするものである。

また、砕波後に生成される気泡の膨張圧縮を通じてはつする気泡音を計測し、気泡径及び気泡量の時間変化の特

徴を排出すると共に界面物理特性の差異についても議論を行う。

2. 現地観測とは動水槽実験

微細気泡量 現地観測平成13年10月4回石狩湾(北海道石狩市)にて行われた。海底地形を図-1に示す。

砕波ジェットの着水点及びボアフロント直下では比較的大きな気泡が生成されている可能性があるが、一般に混入される気泡は非常に小さく(M. Y. Su 1987)によれば気泡サイズ(スペクトルは約 $20 \mu m$)、これらの微細気泡は混入後体積に比例する浮力は極端に減少し相対的に抗力が増加するため浮上しにくくなり水中に滞在する。観測では図-1の砕波点において図-2でしめされる容積253.70cm³の丸底フラスコ内に海水を採取密閉しフラスコに超音波による高周波振動を与えることにより混入微細気泡をフラスコ上部(ゴムチューブ内)に集めその容積を計測した。海水採取はランダムに(波浪の通過とは無関係に)各採取点に関して5回行った。なお1回の海水採取に要する時間は約30~40秒であり、入射波浪の周期($T_{1/3} = 4.70$ 秒)より十分長く平均量として考えることができる。

一方ハイドロフォン(B & K 社製)による気泡径計測実験も同一の実験水路(図-3参照)で行われた。ハイドロフォン(と波向に対して垂直に設置された容量的波高計による水位変動は50 kHzで計測される。計測は、砕波帯内の岸沖方向6点で行われた。表-1で示される波浪条件の各ケース10

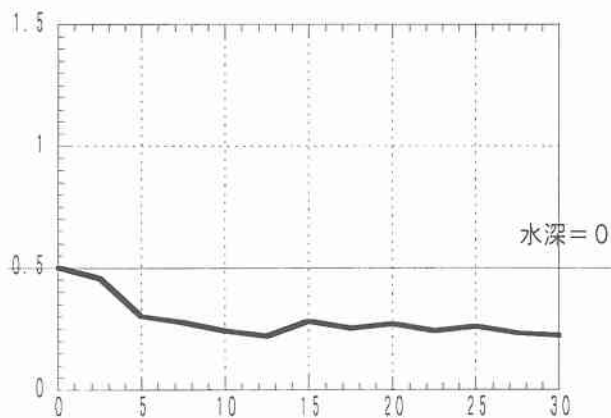


図-1 観測地点

回の試行が行われた。界面活性剤を使用した。

3. 残存微細気泡量の岸沖分布

前述した様に、砕波によって生成された気泡の内、非常に小さな気泡混入後すぐには浮上せず水中に滞留する傾向をゆうする。図-4は石狩浜における微細気泡量の岸沖分布を表している。計測時の波浪は $T_{1/3}=4.70$ 秒、 $H_{1/3}=41.2$ cmであり砕波は汀線から20~40cmの範囲で発生していた。砕波帯では岸方向に徐々に気泡量が増加していき、ボア領域 Suash Zone にかけて急激に増加する傾向がある。

図-5は水道水を用いた水理実験による規則波下の同様な気泡量の分布 (case1) を表している。模型縮尺は観測波浪の1/

としているが、海底勾配も異なるため、単純に観測結果と比較できないが、砕波後の遷移域では緩やかな勾配をもちボア域から急速に増加する気泡量の傾向は同一である。しかしながら、気泡量自体は観測結果の2割程度低い値を示した。

図-6は不規則波下 (Case5) における気泡量を表している。



図-2 気泡トラップ用フラスコ

表-1 波浪条件

	周期 (s)	波高 (m)	界面活性剤の湯有無
case1	2	10	有り
case2	2	12	有り
case3	2	8	有り
case4	1.5	10	有り
case5	1.5	12	有り
case6	1.5	8	有り
case7	2	10	無し
case8	2	12	無し
case9	2	8	無し
case10	1.5	10	無し
case11	1.5	12	無し
case12	1.5	8	無し

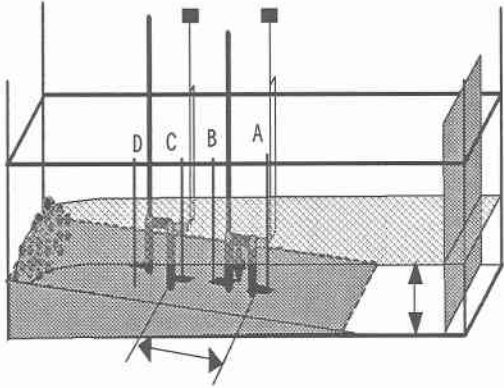


図-3 実験水槽

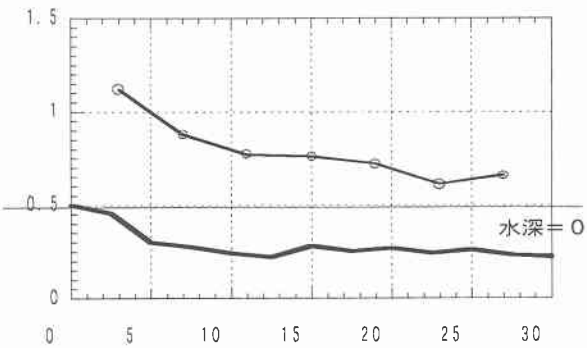


図-4

図-4 現地観測における微細気泡量分布

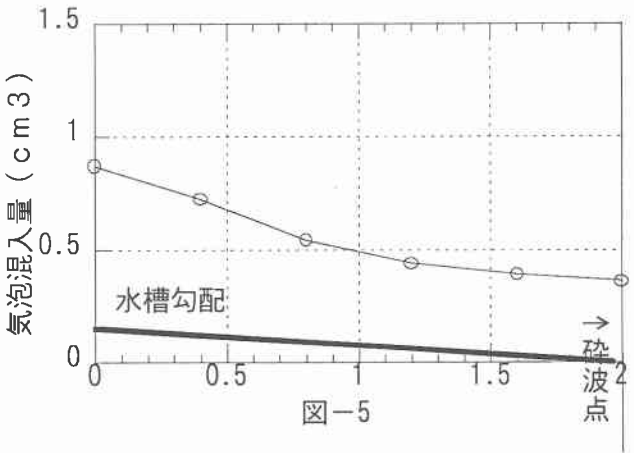


図-5

図-5 実験水槽規則波下の気泡量分布

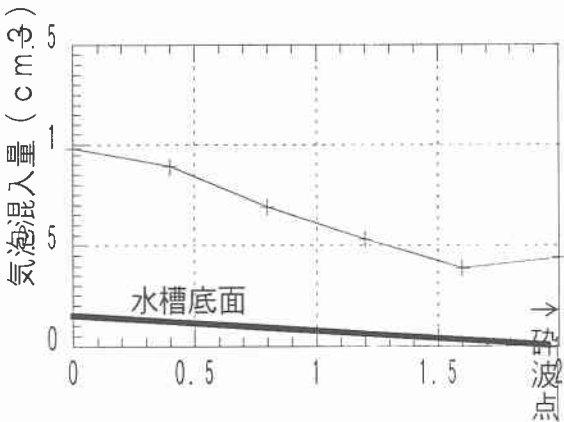


図-6 実験水槽不規則波下の気泡量分布

沖岸分布の傾向は、前図と同様ではあるが、全域において気泡量が約1割ほど高い値を示した。この結果は継続的な同程度の砕波のほうが微細気泡の混入に影響する可能性を示している。

4. 気泡周波数の時空間遷移

図-6(a)(b)(c)(d)はCase1のA点における砕波直後のそれぞれ1周期間にわたる水位変動、音圧、100Hzのハイパスフィルタ操作された音圧の時系列及び音圧スペクトルの一例を表したものである。クレスト部の通過後、わずかに高周波の圧力変動が発生していることが分かる。この時点では、波の通過に伴う大規模な圧力変動と比べて高周波変動の振幅波非常に小さい。現れるスペクトルピークは200Hzと400Hz近傍の比較的low周波側のみに発生し、砕波直後はlow周波 narrow bandのスペクトルとして特徴付けられる。

図-7は同一波浪(case1)のD点(ボア領域)における同様な図である。この地点では非常に強い圧力変動がボアフロント通過時に発生しているのが分かる。音圧スペクトルは2000Hz以下のlow周波数に強いエネルギーを有するが、10000Hzにまで及ぶブロードバンドスペクトルとなる。これは前章で議論されたボア領域における微細気泡量の急激な増加に直接関係する特徴と考えられる。なお完全に特定可能な(d)中のスペクトルピーク2700Hz、3500Hz、3800Hzに対応する気泡径は、気泡の共鳴振動数と気泡径の関係により1.5mm、0.8mm、0.5mmであると算定できる。図-8(a)(b)は図-6及び同一波浪、同一地点に対応する界面活性剤を混入したケースに対する音圧スペクトルを表したものである。(a)と図-6(d)を比較すると同様に200~400Hz程度のlow周期数帯だけでなく3000~7000Hzの周波数帯に弱いエネルギーが現れているのが分かる。

Dirty Bubbleと呼ばれる界面活性剤に覆われた気泡は、一般の水で生成された気泡(Clean Bubble)と大きく異なる性質を持つことが知られている。例えば(Thorpe, 1982)。砕波時には微細気泡の生成に大きく寄与することが分かる。一方ボア域結果(b)は、図-7(d)において顕著な高エネルギー域である2000Hz以下のlow周波帯が2800Hz近傍に周波数遷移しているのが分かる。また、高周波帯においても有意なエネルギーを有する特徴もある。図-9(a)(b)はCase3におけるA点及びD点のClean Bubbleに対する音圧スペクトルである。砕波波高が全ケースよりも大きいこのケースでは際は直後及びボア領域でより高周波側のエネルギーが卓越していることを表している。この結果は前章の大規模な砕波が砕波帯内の微細気泡量の増加に寄与するであろうという推察を裏づけるものである。

図-10は、Case3(H=8cm)気泡音圧時系列に対するWavelet-Packet解析結果である。このケースは小規模な崩れ波砕波であるため混入気泡数が少なく、wavelet-Packetsによる気泡のカウント及び対応する気泡径の特定が可能である。

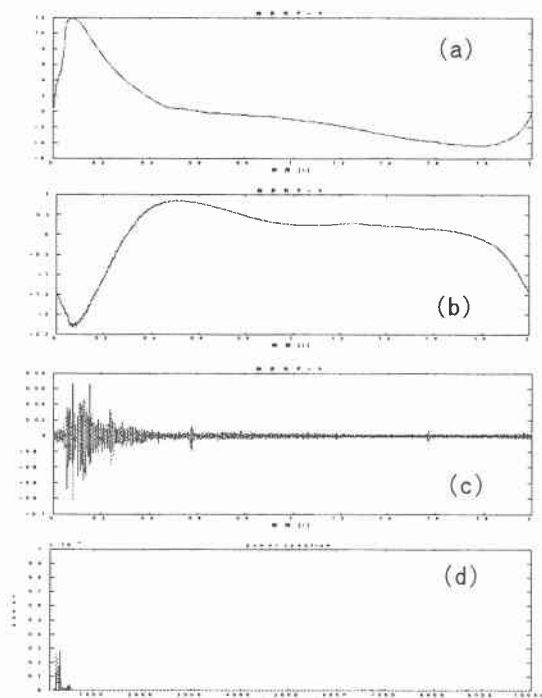


図-6 CASE 1の気泡特性 (A点)

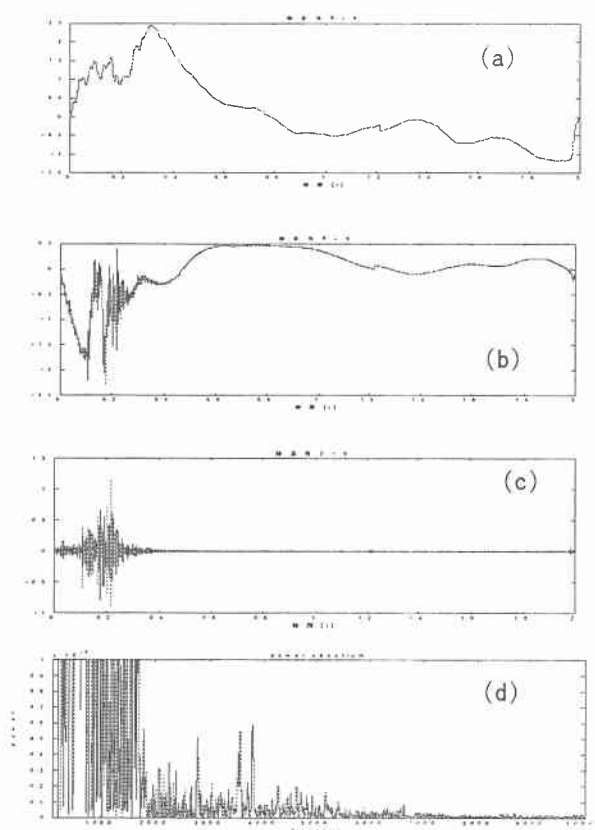


図-7 CASE1の気泡特性 (D点)

砕波フロント通過後、6msec 以内に図中矢印で示す。少なくとも 7 個以上の砕波気泡の生成が確認できる。

一方比較的多数の気泡を含む 3000Hz 低周波数帯の気泡雲の特定ではないが、同一時間内に 30～40 個低度のピークを読み取ることができる。これについてはその精度を何らかの方法で検証する必要がある。

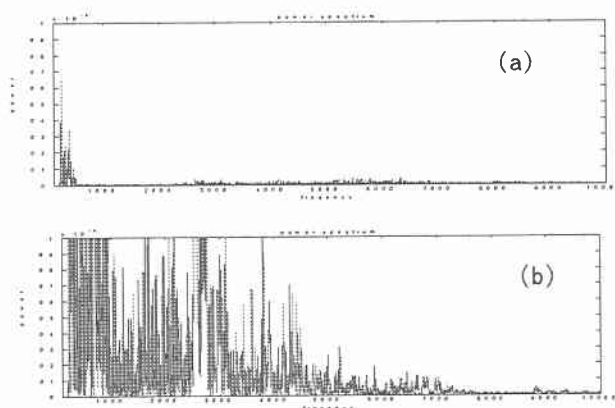
5. 結論

現地観察及び室内水槽実験により砕波帯内の気泡生成及び残存気泡量の特性を調べ、以下に示す結論を得た。

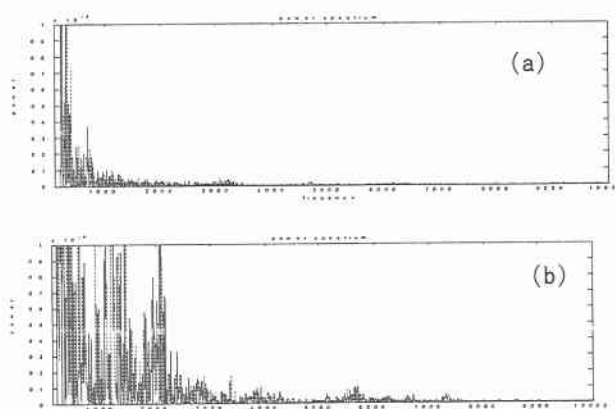
- ・大規模砕波は大量の小気泡を生成させる。
- ・残留微細気泡はボア域から、Swash Zoneにかけ急激に増加する。
- ・気泡音は砕波直後低周波 narrow Band スペクトルを示しボア域で急速に、Broad Band 化し、幅広いレンジの径を有する気泡を生成する。
- ・気泡生成は砕波フロント通過後 4 ms～6ms 生成されつづける。
- ・界面活性剤を混入した水に混入される DIRTY BUBBLE は音圧スペクトルを高周波遷移させる。
- ・生成気泡の比較的小さい崩れ波砕波では、WAVELET-packet 解析により各気泡径によるカウントを行うことができる可能性がある。

6. 参考文献

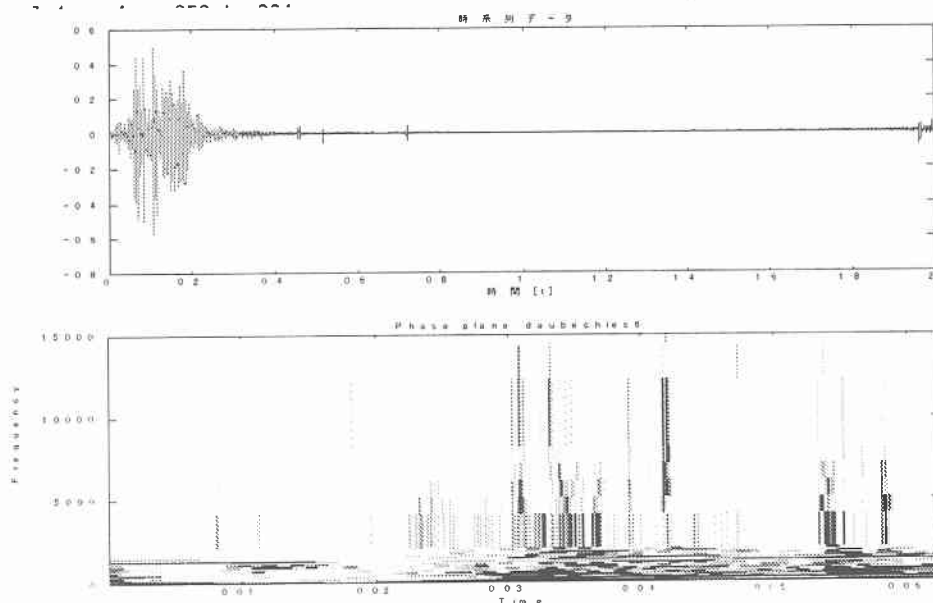
- ・渡部 靖憲・大塚 淳一・佐伯 浩 (2001) 非定常ジェット着水時に発生する気泡の物理特性, 海講工学論文集 第48巻 p 57～p 60
- ・S.A.Thorpe・A.J.Hall (1982) the characteristics of breaking waves, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar, continental shelf research



図－8 界面活性剤混入時の気泡特性



図－9 CASE 2 に対する気泡特性



図－10 CASE3の気泡音時系列と wavelet-packet 解析結果