

砕波混入気泡および残留泡沫に対する界面活性効果

Surfactant effect on wave breaking entrained bubbles and residual foams

北海道大学大学院工学院 ○学生員 野中拓実 (Nonaka Takumi)
北海道大学教授大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Watanabe Yasunori)

1. はじめに

海洋の砕波によって海中に取り込まれる気泡群はその混入から浮上、泡沫として残留し崩壊する一連の過程で大気海洋間の諸量の交換を担っている。砕波によって気泡が混入されることによって波浪エネルギーが散逸され、気泡が海中および水面に泡沫として滞留する間にその高い内圧により活発な熱や気体輸送が行われる²⁾ほか、泡沫の破裂は大気中に水分を大量のエアロゾルとして放出する³⁾。このように砕波混入気泡および残留泡沫は大気海洋間輸送の重要なパラメータとなり得るが、その発達過程は表面張力が支配する現象であり、界面活性の影響を強く受ける。Callaghan et al. (2013) は界面活性効果により砕波気泡の混入深およびその消散時間、残留泡沫の残存時間、被覆面積が増加することを実験的に明らかにしている⁴⁾。さらに海洋の界面活性効果は生物活動由来の物質に左右されるため地域性や季節性を持っており⁵⁾、それに伴い砕波気泡群を介した大気海洋間輸送も変化し得る。

本研究は砕波気泡群を介した大気海洋間輸送の界面活性効果依存性を定量化するために、一連の砕波過程にわたる混入気泡および泡沫残留の界面活性に依存した特徴を可視化実験により明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

図-1 は実験装置の模式図である。1/30 の勾配を設定した壁面および底面が透明アクリル製の可変勾配水槽（800cm×50cm×25 cm）に造波板の原点（ $x=0$ ）にて水深が 20 cm となるように水を溜め、0.5 Hz の規則波を造波した。造波された波は進行するにつれ浅水変形により波高が増大し、やがて砕波する。本実験では $x=257\text{cm}$ の地点にて最大波高を迎え砕波することを確認している。

	A	B	C	D	E	F	G	H
x (cm)	305	325	345	385	405	425	445	515

表-1 各地点の x 座標

砕波によって水中に混入される気泡、および水面に残留する泡沫を各地点 A~H（表 1）の計測領域にて側方およびミラーを介した上方から高速カメラ(125 Hz)で水槽側面、底面に設置されたそれぞれ青色、赤色の LED パネルによるバックライト法により造波開始から同時に撮影した。混入気泡の計測領域は各地点を中心とした幅 10 cm、静水位から底面までであり、残留泡沫の計測領域は各地点を中心とした 10 cm 四方である。なお、残留泡沫を撮影するカメラには側方の LED パネルからの青色光による干渉を避けるために 580 nm 以上の波長を透過するロングパスフィルターを取り付けた。また、 $x=100\text{cm}$ の地点に波高計が設置される。波高計とカメラは接続された同一のシグナルジェネレーターからトリガー信号が送られることによって同期され、波高計の計測値により別々に測定される各地点および各ケースの造波した波との位相が合わせられる。

さらに A~H の各地点、及び砕波地点($x=257\text{cm}$)と $x=100\text{cm}$ に波高計を設置し、同様に造波した波の波高を計測した。砕波波高は定常状態で平均 10.75cmであった。

以上の実験を水道水にノニオン系界面活性剤 Triton-X100 を濃度 C で溶解した界面活性剤溶液で行った。実験に用いた濃度は $C=0, 200, 400\text{ }\mu\text{g/L}$ であり $C=200, 400\text{ }\mu\text{g/L}$ の濃度はそれぞれ中栄養、富栄養状態の海洋の界面活性と対応している。

本研究では波高が定常になる造波開始から 6 波目が砕

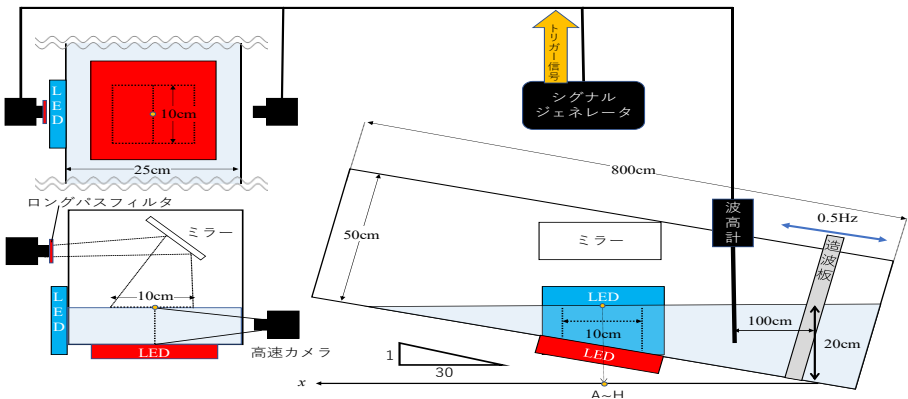


図-1 実験装置模式図。（右）側面図，（左上）上面図，（左下）正面図

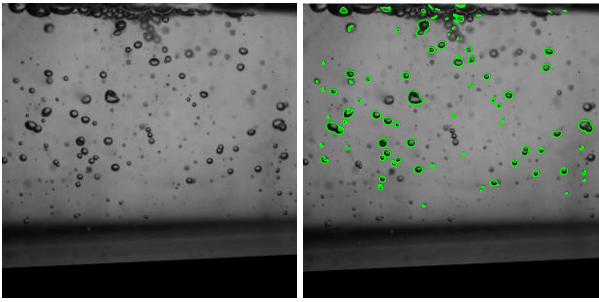


図-2 Level set 法による気泡検出

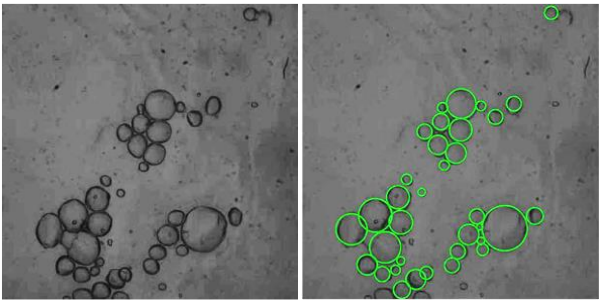


図-3 PCHT による泡沫検出

波地点に到達 ($t=0$) してから 8 秒間を解析対象として各地点で 5 回実験を行い、その平均値を計測値とする。

3. 画像解析

水槽側方より混入気泡を撮影した画像は実座標にキャリブレーションの後、Level set 法⁶⁾により気泡が検出される(図-2)。検出した気泡の等価円の直径として気泡径 D を、また気泡数を計測した。

水面上方より撮影された残留泡沫画像は実座標にキャリブレーション後、画像より円形状を抽出する Phase Coded Hough 変換 (PCHT) フィルター⁷⁾によって泡沫が検出される(図-3)。検出された泡沫の直径を泡沫径 D 、および泡沫数を計測した。

4. 結果

図-4はC地点における各ケースにおける典型的な残留泡沫と混入気泡の撮影画像である。界面活性効果の増加に伴い混入気泡、残留泡沫はともに小さくなり数は増加していることが確認できる。

図-5は x 座標に対する混入気泡と残留泡沫の平均径 $\bar{D}$

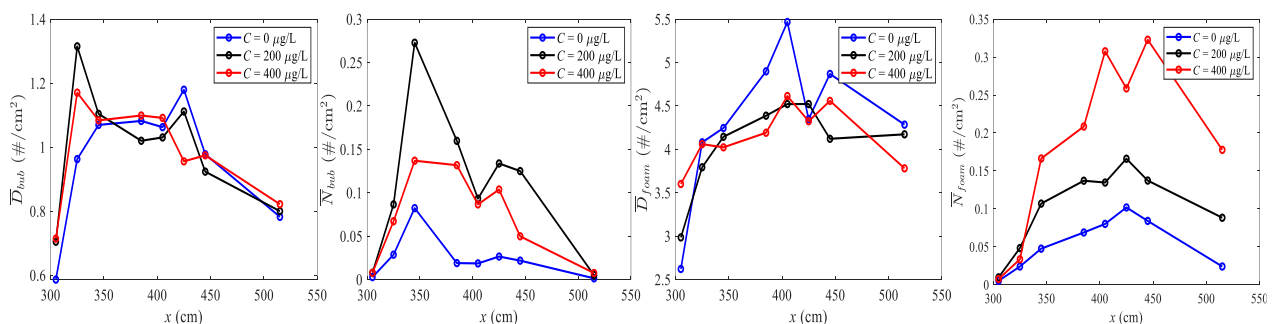
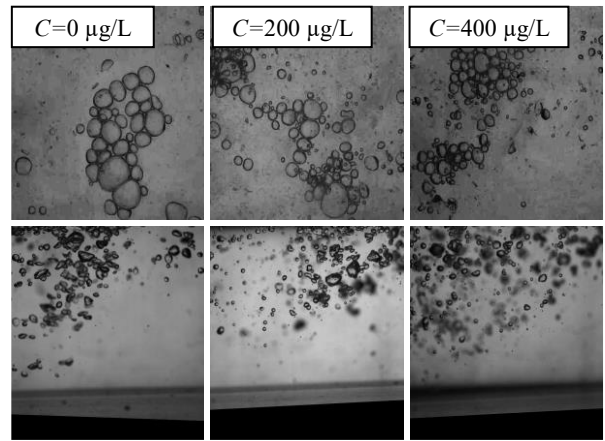

 図-5 x 座標に対する混入気泡と残留泡沫の平均径 $\bar{D}$ および単位面積当たりの平均数 $\bar{N}$


図-4 C 地点の各ケースの泡沫 (上段), 気泡 (下段)

および単位面積当たりの平均数 $\bar{N}$ を界面活性剤濃度ケースで比較したものである (添え字 *foam* は残留泡沫, *bub* は混入気泡のものを表す)。混入気泡の平均径, 平均数はともにどの界面活性ケースにおいても $x=350$ cm 付近でピークを迎え, 砕波の進行による波浪エネルギーの散逸にともない減少していく。また残留泡沫の平均径, および平均数のピークは混入気泡のものよりも砕波が進行した地点で現れる。これは水面の残留泡沫が波によって岸側に移流された結果と考えられる。界面活性ケースと比較すると混入気泡数は界面活性の増加に伴い有意な増加が見られる。これは砕波によって取り込まれる空気層の分裂が表面張力の低下により促進された結果⁸⁾と考えられる。残留泡沫については界面活性の増加によって泡沫数が増加し泡沫径が小さくなる。これは混入気泡の増加に加え, 泡沫同士の合体の抑制, さらにには泡沫同士が隣接して形成されるクラスターによる安定化が作用していると考えられる⁹⁾。

図-6は $C=0, 400 \mu\text{g/L}$ のケースで C 地点において計測された波形と観測された混入気泡数 N_{bub} , 泡沫数 N_{foam} を時系列で比較したものである。波峰が過ぎ去った直後に N_{bub} のピークが, さらにその後に N_{foam} のピークが現れた。この時間差は気泡が混入し浮上して残留する一連の過程を表しており, どの計測地点, 界面活性剤濃度ケースでも同様の傾向がみられた。また $C=0 \mu\text{g/L}$ のケースでは数がピークを迎えたのちに急激に減少しているのに対し, 界面活性のあるケースではその減少率は小さい。

図-7は C 地点で $C=0, 400 \mu\text{g/L}$ のケースで波形と平均

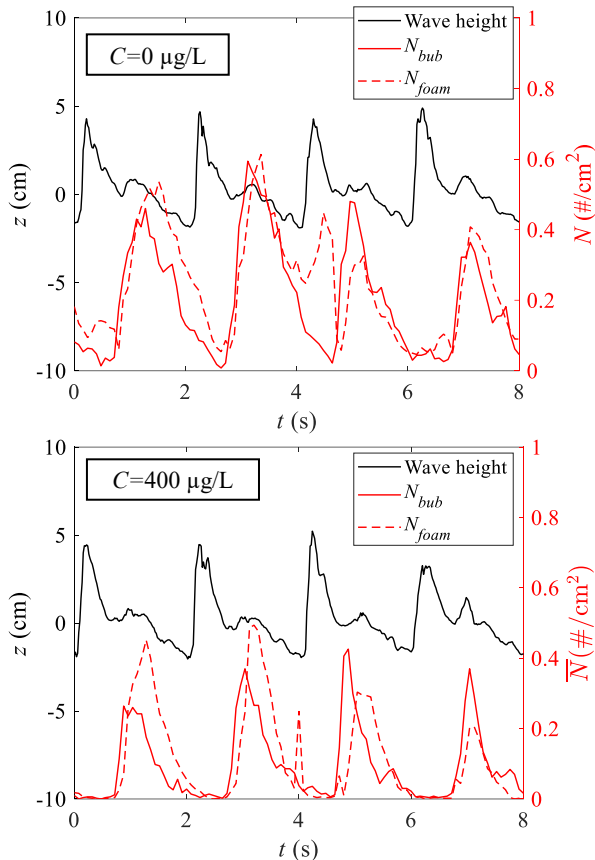


図-7 C 地点での波形（黒線）， N_{bub} （赤実線）泡沫数 N_{foam} （赤破線）の時系列変化。

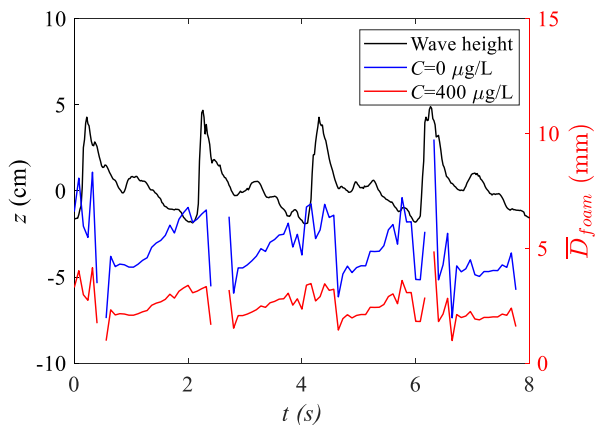


図-8 C 地点での波形（黒線）， $\bar{D}_{foam}$ の時系列変化

泡沫径 $\bar{D}_{foam}$ の時系列変化を比較したものである。 $C=0$ のケースでは波峰の通過後、次の波が到達するまで $\bar{D}_{foam}$ が上昇し続けるという位相への依存性がみられる。界面活性効果のある $C=400 \mu\text{g/L}$ のケースにおいても同様の傾向が見られるが、傾きが小さくなっており、波の位相への依存性は小さい。図-6の泡沫数と比較するとこれは界面活性の低い液体では混入気泡の浮上後、泡沫同士の合体により小径泡沫が減少、さらに大径化も進行していると考えられる。反対に界面活性効果のある液体では合体が抑制、さらには泡沫同士のクラスター形成により安定化され泡沫数や泡沫径の波の位相に対しての依存度が小さくなっていると推察される。これらの傾向はど

の地点においても見られた。

5. 結論

一連の砕波過程における混入気泡群、および残留気泡の界面活性依存性を画像計測により調査した。

混入気泡、残留泡沫の双方の径、数は界面活性に大きく依存し、特に数は界面活性の増加に伴い顕著に増加する。これは界面活性が気泡の混入の初期の段階で大径気泡が活発な分裂を引き起こすこと、泡沫残留過程で泡沫の合体を抑制し、さらには泡沫同士のクラスタリングにより安定化させるという異なるメカニズムが作用していると考えられる。

またそれらのピークの位置は混入気泡と残留泡沫で異なり、残留泡沫のピークがより岸側で出現する。

さらに波の位相との関係をみると砕波の波峰が通過後浮上した泡沫は合体により次の波が到達するまで合体により大径化する傾向にあり、界面活性が低いほど顕著である。そして界面活性の増加は泡沫の減少率を低下させる。残存している泡沫が次に到達した砕波により再び気泡とし取り込まれると考えられるため、このことは実海域の砕波を考えると界面過程に複雑な影響を与え得る。

今後は気泡や泡沫のサイズ分布の時系列変化を追っていくなどさらなる詳細な調査を行っていく。

参考文献

- 1) Lamarre, Eric, and W. K. Melville.: Air entrainment and dissipation in breaking waves. *Nature*, 351, pp. 469-472, 1991
- 2) Asher, W. E., & Wanninkhof, R.: The effect of bubble - mediated gas transfer on purposeful dual - gaseous tracer experiments. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 103(C5), 10555-10560, 1998
- 3) Blanchard, Duncan C., and Lawrence D. Syzdek. "Film drop production as a function of bubble size. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93.C4, 3649-3654, 1988
- 4) A. H. Callaghan, G. B. Deane and M. Dale Stokes: Two Regimes of Laboratory Whitecap Foam Decay: Bubble Plume Controlled and Surfactant Stabilized, *Journal of Physical Oceanography*, 43, pp. 1114-1126, 2013
- 5) O.Wurl, E.Wurl, L. Miller, K. Johnson, and S. Vagle: Formation and global distribution of sea-surface microlayers. *Biogeosciences*, 8, pp.121-135., 2011.
- 6) Niida, Y. and Watanabe, Y.: Oxygen transfer from bubbleplumes, *Physics of Fluids*, 30, 107104, 2018.
- 7) T.J. Atherton and D.J. Kerbyson: Size invariant circle detection, *Image and Vision Computing*, 17, pp. 795-803, 1999
- 8) 渡部靖憲, 野中拓実: 気泡群の混入, 浮上, 残留過程に対する界面活性効果, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I 73-I 78, 2019
- 9) 渡部靖憲, 野中拓実: 残留泡沫の組織化と合体, 消失過程, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I 19-I 24, 2020