気泡残留過程における界面活性依存性

Surfactant effect on residual bubbles

北海道大学工学院 北海道大学大学院工学研究科教授

○学生員

野中拓実 (Takumi Nonaka) 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

海洋での風波砕波に伴う気泡群は発生から浮上,残留, 破裂し消失する一連の過程において,大気海洋間の水分, 熱、気体といった諸量の交換を担っており」、その気泡 群のサイズ分布や海中での滞留時間は海水の界面活性効 果が大きな影響を与える 2). また,海洋では微生物の活 動に依存した物質が界面活性物質として大きく寄与して いることから界面活性効果に地域性や季節性が存在する ことが分かっており³⁾,界面活性が地域的なフラックス 輸送過程を決定するパラメータになることが示唆される が未だその定量化はなされていない.

本研究は砕波気泡群が界面で残留、消失する過程にお ける大気海洋間での熱,気体交換の界面活性効果の寄与 をパラメータ化するための基礎研究としてエアレーショ ンにより生成され水面に残留する気泡群のバックライト 可視化実験を行い、界面活性に依存した残留過程の特徴 を明らかにしようとするものである.

2. 実験方法

液体をガラス製矩形水槽 (390mm×215mm×190mm) に水深 18cm で溜め, エアストーンによるエアレーショ ンを行い、水面に残留する気泡の界面活性に依存した幾 何学的特性を調査する.

実験には海水の界面活性の指標となる界面活性剤 Triton-X100 をそれぞれ中栄養、富栄養状態に分類され る濃度 C=200,400 µg/L³⁾, さらに過度の濃度 C=800 µg/L を純水に溶解した液体と純水(C =0 μg/L)を用い,比較実 験を行った.

水槽は透明なガラス製ステージ上に設置され、ステー ジ下には LED バックライト (300mm×300mm) が設置 される. エアポンプから送り出された空気は連結された フローコントローラにより流量 500 cc/min で制御され、 水槽底面の短辺方向中央, 短辺側壁に接するよう固定さ れた気泡噴出部直径 5cm (外径 6cm) のエアストーンよ り放出され気泡プリュームが発生する. 浮上後, 残留す る気泡の気泡影をエアストーン端部より流下方向 8cm, 幅6cmの計測領域において、水槽上面に設置したミラー を介し高速度カメラによりシャッタスピード 1/80000s, 1Hz で 60 秒間撮影した (図-1).

3. 画像解析

撮影された画像は実座標へキャリブレーションの後, 気泡射影を真円と仮定し, Circle Hough Transform(CHT) フィルター4)を用いて気泡を検出した.

CHT フィルターは画像の勾配強度,勾配方向分布に おいて理想的な円画像の特徴との合致度に比例した応答 を示すフィルターおよび、検出する円の半径のレンジを 0~2πで位相符号化したフィルターの組み合わせで形成



図-1 実験装置(上:水槽上面図,下:側面図)



図-2 CHT フィルターによる円検出例: (左) 原画像(中) アキュムレータ空間(右) 検出円

され、微分画像に対し適応すると、絶対値が円の中心座 標に高いピークを持つ複素アキュムレータ空間を得る. アキュムレータ空間内のピーク点の座標より円の中心座 標、ピーク点の位相を復号することにより円の半径を得 ることができる(図-2).

本研究では、撮影した画像に CHT フィルターを適用 し,検出された円の中心座標を気泡の水面における二次 元座標,直径を気泡径 Dとして計測した.

4. 結果

図-3は撮影された残留気泡を界面活性ケースごとに比



(a) $C = 0 \mu g/L$ (b) $C = 400 \mu g/L$ (c) $C = 800 \mu g/L$

較したものである.純水(*C=0 µg/L*)のケースでは気泡 径に広いレンジを持ち,流下方向に沿って大径気泡が多 くみられる.富栄養状態(*C=400 µg/L*)のケースでは純 水のケースと比較して,気泡数も増加し,気泡同士が隣 接し合うクラスターを形成しているものが多くみられる. さらに過度の栄養状態(*C=800 µg/L*)状態では気泡径が 著しく減少し,気泡数も増加する特徴が見られた.



図-4 は図-5 のように計測領域を x 軸方向に幅 1cm で分割し, x 軸に沿って①~⑧の領域番号を付け,各領域に

おいての平均的な気泡の被覆率を算出し各界面活性ケー スごとに比較したものである.気泡は移流と共に消滅し ていくため全てのケースで被覆率はx軸方向へ単調に減 少していく傾向を持つ.残留気泡の供給源であるエアス トーンに最も近い領域①では純水(C=0 µg/L)のケース の被覆率が界面活性のある他ケースと比較して有意に小 さい.このことは純水のケースでは気泡の安定性が低く, 浮上した気泡が残留しにくいため,計測領域への残留気 泡の供給が少ないことを示している.また,C=0,200, 400 µg/Lのケースではx軸方向への被覆率の減少は同様 の傾向を示すのに対し,過度の界面活性 C=800 µg/L の ケースでは領域⑤以遠において急激な減少を示した.



図-6 は各ケースにおいて検出された気泡の平均径 \bar{D} および 1frame 当たりに計測領域に存在する平均気泡数 \bar{N} を 界面活性濃度 C で比較したものである. 各界面活性濃度 の平均径は C=800 μ g/L のケースで著しい減少が見られ たものの,その他のケースでは界面活性に依存した特徴 が確認できなかった. 一方,平均気泡数は界面活性の増 加に伴い有意に増加する傾向を持つ. 気泡数は計測領域 に供給される気泡の量へ依存する他,特に過度の栄養状 態である C=800 μ g/L においての気泡数の増加は平均径 の著しい減少から気泡同士の合体が抑制された結果と考 えられる.

図-7,8 はそれぞれ各界面活性ケースごとの気泡径分 布とそれを各ケースの平均気泡径**D**で正規化した分布 である.純水のケースではピークが鈍く、大径気泡側に 広いレンジを持つが、界面活性効果のある液体では分布 形が明らかに異なり、鋭いピークを持ち、大径気泡は指



図-7 気泡径分布: (a) C=0 µg/L (b) C=200 µg/L (c) C=400 µg/L (d) C=800 µg/L

数関数的に減少していく形状を取ること分かる.界面活 性効果のない純水のケースでは様々なサイズ同士の気泡 の合体により気泡径に広いレンジを持つことができるが, 界面活性効果が高くなるほど気泡の合体が抑制され,結 果的に平均的なサイズ分布を持つようになる.このこと は図-8からも裏付けられる.

図-9は検出された残留気泡の気泡径と位置関係により 隣接する気泡同士のグループをクラスターとして判別し, 一つのクラスターを形成する平均の気泡数を界面活性濃 度ケースで比較したものであり,界面活性濃度の増加に 伴い単調増加を示す.これは存在する気泡数に比例する ほか,クラスターの形成は気泡が隣接しても合体してい



図-8 正規化気泡径分布: (a) C =0 µg/L (b) C =200 µg/L (c) C =400 µg/L (d) C =800 µg/L

ないことを意味しているため,界面活性による気泡の合体の抑制を示していると考えられる.

5. 結論

エアレーションにより生成され残留する気泡の幾何形 状の界面活性依存性を調査した.

界面活性による気泡数の有意な増加や、気泡径分布の 変化が明らかになった.また中栄養状態と富栄養状態で は今回調査したいずれの性質においてもあまり差異が見 受けられなかったが、過度の栄養状態では著しく異なっ た性質を示した.これらの特徴は気泡の合体頻度と気泡 の安定性の界面活性依存性が大きくかかわっていると考 えられ、今後、連続画像による気泡の追跡による気泡の



ライフタイムや合体の調査など更なるパラメータスタディを行い、実際の砕波気泡群の残留過程の特徴を明らかにしていく.

参考文献

- G. O. Marmorino and G. B. Smith: Bright and dark ocean whitecaps observed in the infrared. *Geophysical ResearchLetters*, 32, L11604, 2005.
- 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
- 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.
- ATHERTON, Tim J.; KERBYSON, Darren J. Size invariant circle detection. *Image and Vision computing*, 1999, 17.11: 795-803.