

気泡流の界面活性効果依存性

Bubble plume dependency on surfactant effect

北海道大学工学部 ○学生員 野中拓実(Takumi Nonaka)
北海道大学准教授大学院工学研究院 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

砕波に伴って生成される大量の気泡群はエネルギー散逸にかかわる力学的寄与に加えて、海中への気体輸送、界面への浮上後残留気泡膜上の気化冷却、そして気泡膜の破裂に伴う微細飛沫の放出を通して大気、海洋間の気体、熱、水分輸送過程に大きく影響を与える。特に気泡からの気体溶解量は海中での対流時間が重要なパラメータとなり、これを決定する浮上速度は海中での対流時間が重要なパラメータとなり、これを決定する浮上速度は気泡界面の活性効果に依存する。さらに残留気泡の膜厚、及び表面張力もまた界面活性剤効果が支配するため、海中のイオン及び生物活動の結果として生じる界面活性が熱、気体環境に影響し、再帰的に生物活動や海洋生態系に寄与している可能性がある。Callaghan et al.(2013) は、界面活性効果により、海洋砕波に伴う気泡プルームの貫入深、滞留時間及び、残留気泡群の消失時間に有意な差異が発生することを実験的に証明している。Marmorino&Smith(2005) は残留気泡群上で有意海面温度の低下が生じることを発見し、界面活性効果を経由した界面温度の輸送機構が存在することが示唆される。Wurl, O. et al.(2011) は広域の海水分析から界面活性効果の地域的差異、特に富栄養化状態では貧栄養化状態と比較し海面活性剤の濃度が高く、またバルクから表層での濃縮率は小さくなることを発見し、海水環境、特に生物活動に起因して地域的界面活性が大きく変動することを明らかにしている。即ち、地域的海水環境に応じて地域的海水環境に応じて、砕波に伴う曝気過程、大気海洋間フラックスの輸送過程、さらには波エネルギーの散逸過程が異なる可能性が示唆される。

本研究は、界面活性に依存した砕波に伴う気泡の生成、移流、海面での残留と消失過程の大気海洋間気体・熱交換への寄与のパラメータ化を行うための基礎研究として、静水中での気泡プルームの運動並びに残留気泡の物理特性に対する界面活性依存性を可視化実験を基に明らかにしようとするものである。

2.実験方法

純水を溶媒としてノニオン系界面活性剤である Triton X-100 の濃度が C となるよう調製した溶液を底面が19cm 四方のガラス水槽に入れ行った。Wurl, O. et al.(2011) によれば Triton X-100 は自然界に存在する界面活性物質とよく似た働きをする。

図.1 に実験装置の概略図を示す。内径 d のニードルの先端が水槽底面中央直上の水深 15cm となるように固定し、エアポンプにより送り出された空気がホースとフローコントローラーを通してニードルから気泡プルームを発生させる。放出される空気流量 q はフローコントロー

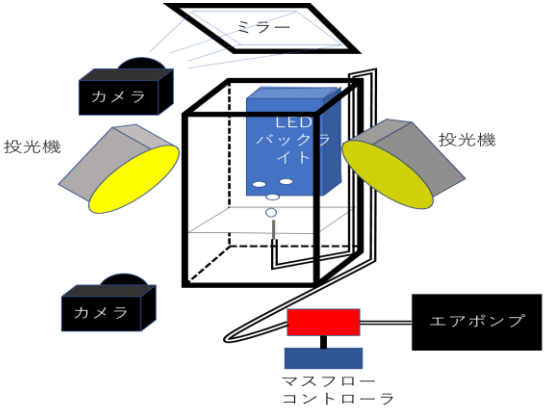


図-1 実験装置概略図

	気泡プルーム	水面		
撮影周波数(Hz)	500	60	d[mm]	1.2
シャッタースピード(s)	1/8000	1/4000	C[μg/L]	0(純水),200,400
撮影フレーム数	500	180	q[cc/min]	10,50,100,200,300,400
撮影条件			実験条件	

表-1 撮影条件(左)、実験条件(右)

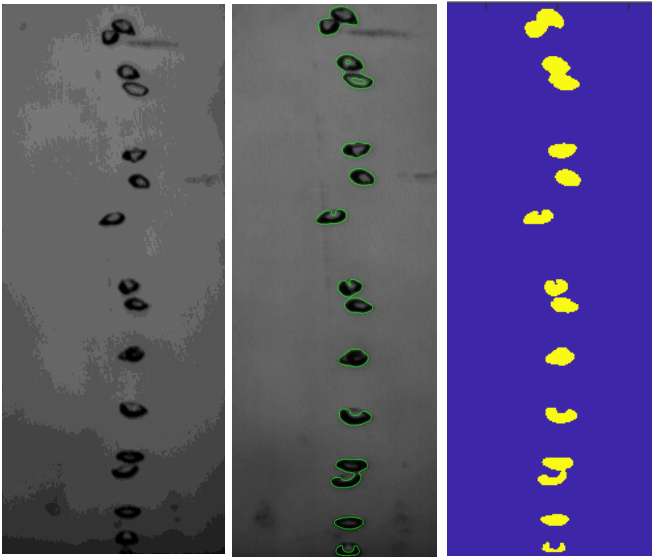
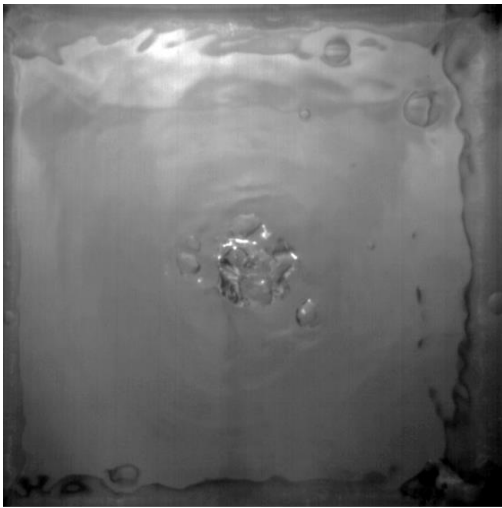


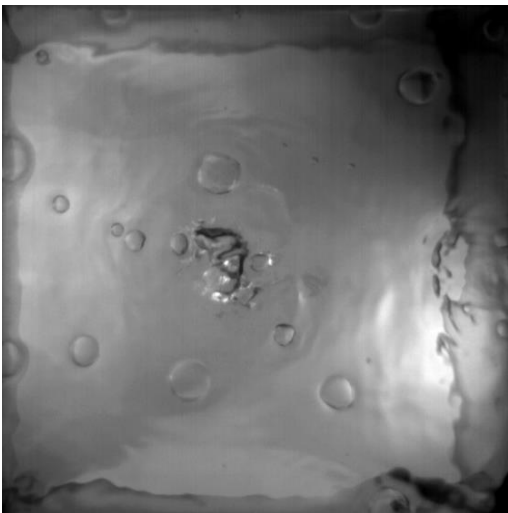
図-2 Level set 法

ラーによって制御される。

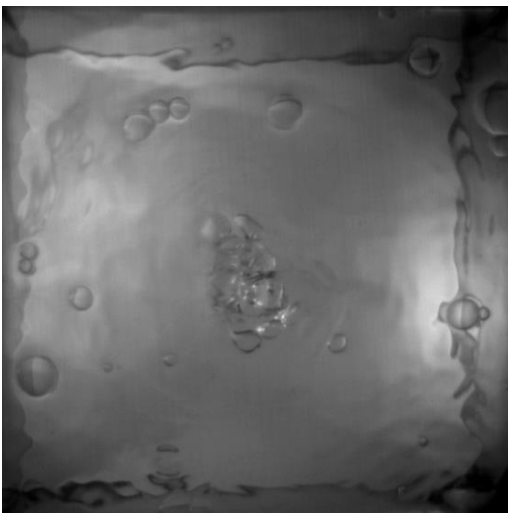
発生した気泡プルームとそれによる水面の残留気泡を高速度カメラでそれぞれ撮影する。それぞれの撮影条件は表 1 (左) に示す。気泡プルームの撮影には青色 LED バックライトパネルで照射して撮影する。撮影画像は実



0 μg/L(純水)



200 μg/L



400 μg/L

図-3 水面の残留気泡の様子

座標で幅 6cm、水面下 1.5cm から高さ 13.5cm の長方形となるようキャリブレーションされる。残留気泡の撮影

では水槽内に白色の亚克力板をニードル先端から 1cm 下方に底面と並行となるよう設置し、亚克力板に向けて両側面から投光器を照射して、水槽の上部に設置されたミラーを通して撮影する。撮影画像は実座標で水槽底面中央の直上を中心とした 12cm 四方の正方形となるようキャリブレーションされる。

ニードル内径 d 、界面活性剤濃度 C 、空気流量 q に表 1(右)の通りに異なる値を与えて各々の条件で実験を行った。

3.画像処理

図-2 は Level set 法による二値化処理である。撮影した画像をキャリブレーションした後、Level set 法によるエッジ抽出を行い二値化画像とし、さらにノイズを除去することによって気泡部分のみを抽出した。解析はこの画像を用いて行う。

4.結果

図 3 はそれぞれの界面活性剤濃度の条件で流量 400cc/min で空気を送り出し、水面の残留気泡を撮影し、静水面でキャリブレーションしたものである。

気泡をフォーカス面に中心をもつ球形と仮定したときの半径を気泡径と定義し、気泡ブルームの二値化画像からニードル径 1.2mm の各実験条件で気泡径の平均を計算した。図-4 はその結果を流量、濃度ごとに比べたものである。

粘性が十分小さくストークス近似が可能な流体において上昇する気泡の終端速度は次の式(1)であらわされることが知られている。

$$v_s = \frac{2}{9} \frac{r^2(\rho_{air} - \rho_w)g}{\eta} \quad (1)$$

v_s : 終端速度 r : 気泡半径 ρ_{air} : 空気の密度
 ρ_w : 水の密度 g : 重力加速度 η : 粘性

図-5 は流量 50cc/L で気泡ブルームを発生させるケースにおいて、ある 1 つの気泡の重心位置、気泡径を解析画面頂上に到達するまで追跡することによって、その気泡がニードルの噴出地点からの垂直距離 y の時点での鉛直速度、その気泡径から式(1)で推測される速度を各界面活性剤濃度条件毎にプロットしたものである。また、図-6 は気泡がニードルから 10cm 上昇して以降の速度を平均したもののである。

5.考察

水面の残留気泡を撮影した画像において、界面活性剤濃度毎に視認で比較すると純水より界面活性剤を添加したものの方が残留気泡が長時間、また画面上に多く存在することが確認できた。よって界面活性剤が気泡の安定化機構に関与していることが明らかである。

図-4 の平均気泡径のグラフより空気流量が大きくなるほど大きな気泡が作られる傾向があるのが分かる。これは空気流量が大きくなれば 1 つの気泡に含まれる空気体積も大きくなるからである。また界面活性剤濃度が高くなるほど小さい気泡が作られる傾向があり、界面活性剤効果の影響と考えられる。しかしそれらの傾向が当ては

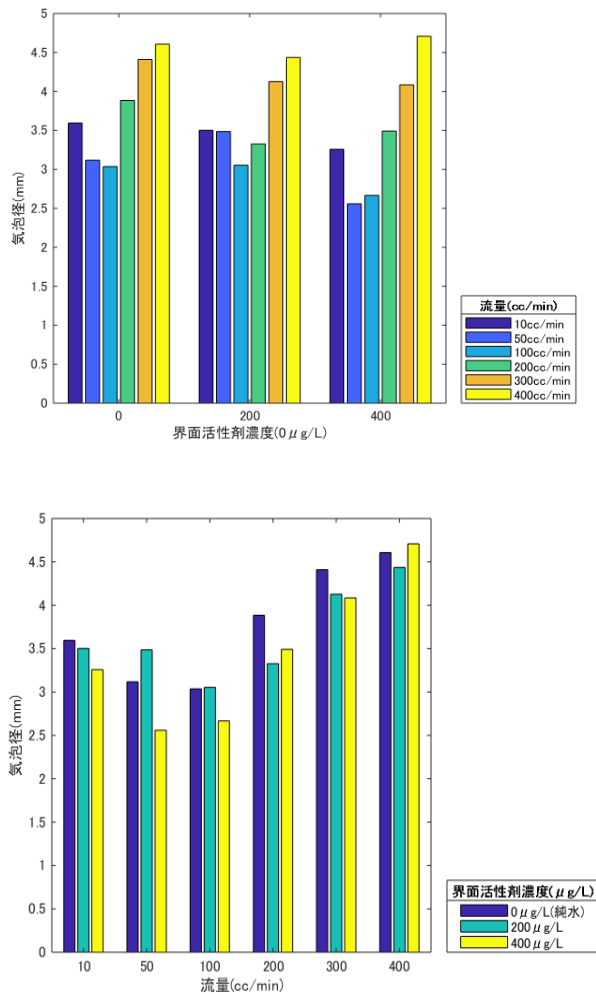


図 4-平均気泡径

まらないケースも見受けられる。原因の一つとしては Level set 法による気泡の抽出方法が考えられる。例えば図-7 のように複数の気泡が近接した状態ではアクティブコンターは分割されず1つの気泡として径が過大評価され得る。またアクティブコンターはフォーカス面のみの輪郭を抽出するため大きな一つの気泡が複数の領域に分割されているケースも見受けられた。これらをすべて含めていることは算出される平均気泡径にも影響及ぼしているだろう。

図-6 より界面活性剤濃度が高くなると気泡の上昇速度が遅くなっているのが分かる。これは浮上に伴い界面が上方より水深方向へ引っ張られることによって界面活性剤濃度が高いほど気泡の上部と下部で表面張力差が生じ、それによって速度を小さくしている。考えられる。

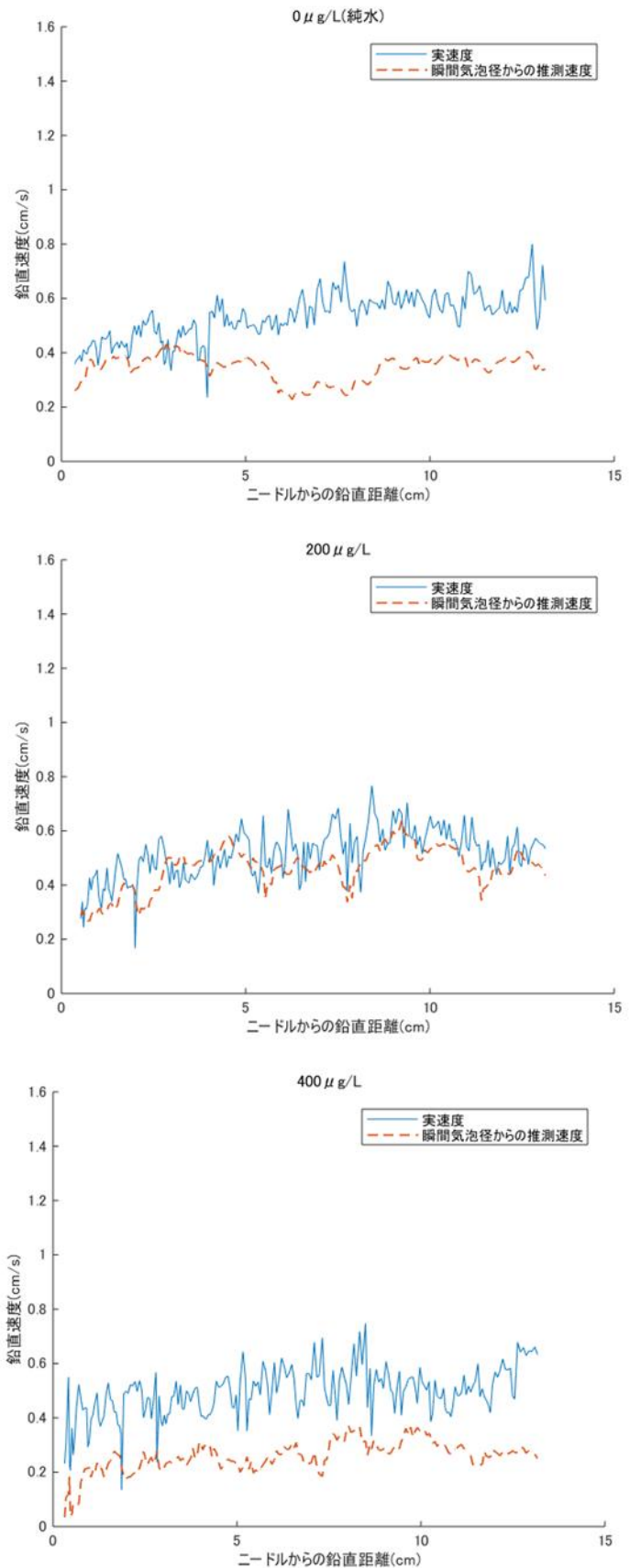


図 5-気泡の鉛直速度

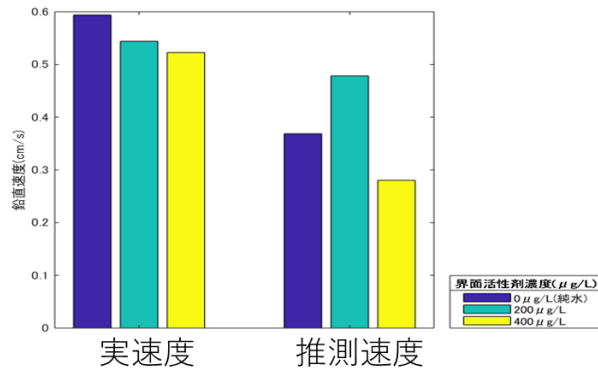


図-6 気泡上昇の終端速度

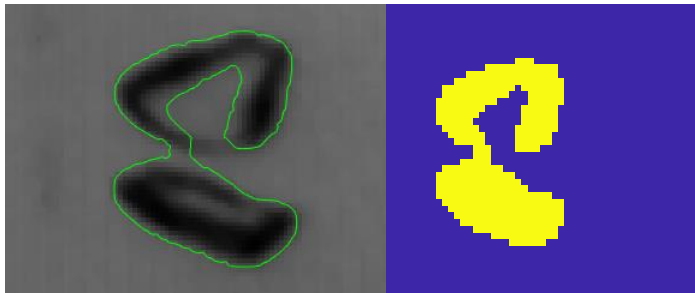


図-7. Level set 法でのエラー

6. 結論

水面の残留気泡は物理特性を解析的に調べる必要がある。また気泡の抽出やそのデータの扱いにはなんらかの統計的手法によって上述のようなエラーを除くなど改善の余地があると思われる。さらに、速度の解析ではそれぞれの濃度で1ケースのみしか解析していないためさらなるケーススタディが必要である。

7. 参考文献

- Marmorino&Smith 2005: Bright and dark ocean whitecaps observed in the infrared. Geophysical Ocean Letters 32(11):L11604, 2005.
- Adrian H. Callaghan, Grant B. Dean and M. Dale Stokes 2005: Two Regimes of Laboratory Whitecap Foam Decay: Bubble-Plume Controlled and Surfactant Stabilized. Journal of Physical Oceanography vol. 35, 1114-1126
- Wurl, O., E. Wurl, L. Miller, K. Johnson, and S. Vagle, 2011: Formation and distribution of sea-surface microlayers. Biogeosciences, 8, 121-135.