

26. ジェット下の気泡流中の酸素輸送モデル

新井田 靖郎¹・渡部 靖憲²

¹正会員 一財)電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

* E-mail: niida@criepi.denken.or.jp

本研究では砕波下の気体輸送過程の解明を最終的な目標に、マイクロスケールからのアプローチとして、ジェット下の気泡混入過程や気泡 - 乱流間相互作用、気泡流中の酸素輸送機構について実験またはパラメータ化を行い、砕波イベントを模擬した鉛直円柱ジェットの水面への衝突時に形成される気泡乱流中の酸素輸送過程について調査した。本研究で構築された気液混相乱流中の酸素輸送フラックスモデルはこれまで困難であった気泡乱流中の局所的、瞬時的な水中溶存酸素濃度の変化を計算可能とし、溶存酸素濃度分布の決定には気泡 - 乱流間の力学的な相互作用が重要な役割を果たしていることを示した。

Key Words : bubble, turbulence, air-sea exchange, LES, LIF

1. はじめに

海洋における風波砕波、並びに沿岸砕波時には、砕波ジェットの着水に伴って海中に大量の混入気泡が発生する¹⁾。これらの混入気泡は大気海洋間の気体輸送を大きく左右し、海洋の化学的、生物的応答と直接結びついて²⁾いる。砕波時の混入気泡量や気泡サイズ分布は砕波ジェットの着水過程に依存する他、溶解した酸素を拡散し、ソースである気泡自体をも移流させる砕波乱流は気泡-乱流間の力学的相互作用を通じてその特性を変化させる。本研究では砕波下の気体輸送過程の解明を最終的な目標に、マイクロスケールからのアプローチとして、ジェット下の気泡混入、気泡 - 乱流間相互作用、気泡流中の酸素輸送機構について実験またはパラメータ化を行い、砕波イベントを模擬した鉛直円柱ジェットの水面への衝突時に形成される気泡乱流中の酸素輸送過程について調査する。

2. 研究方法

(1) 気泡流からの酸素輸送画像計測

本研究では、モデル化すべき気泡サイズと酸素輸送フラックスの関係を調査する為、蛍光励起画像計測(LIF)³⁾を用いて、固有のサイズで構成される気泡プルーム周り

の瞬時的な溶存酸素濃度場を測定した。

暗室内において矩形のガラス水槽(15×17×20 cm、水深17cm、水温23度)を用い、流量をコントロールした酸素ガスを水槽底面に設置したニードルより放出することで気泡を生成した。水槽中には溶存酸素濃度に応じて蛍光輝度に変化する試薬ピレン酪酸を混入させ、水槽底部に取り付けた紫外線ライトによって励起させる。高感度カメラによって蛍光分布画像を取得すると同時に高速カメラによって気泡画像を取得し、同時刻、同一位置における酸素濃度と気泡位置を特定する。本研究では実験結果より個々の気泡からの酸素輸送フラックスをモデル化し、次節に述べる気泡乱流数値モデルに組み入れる。

(2) 気泡-乱流two-way数値モデル

本研究ではLarge Eddy Simulation (LES) とサブグリッド確率気泡運動モデルを相互にカップリングさせることにより、気泡-乱流間の相互作用を数値的に再現する。自由水面を持つ液相乱流はWatanabeら⁴⁾と同様のスキームで計算し、個々の気泡運動はBasset-Boussinesq-Oseen方程式によって計算する。Basset-Boussinesq-Oseen方程式を解くのに必要な気泡位置でのサブグリッドスケール流速は一般化されたLangevin方程式⁵⁾で計算する。本研究では2つの基礎的なエアレーション過程について計算を行った。はじめに、(1)の実験に相当するものとして、静水状態の矩形水槽内同一ポイント(水槽底部中央直上6.5 cm)か

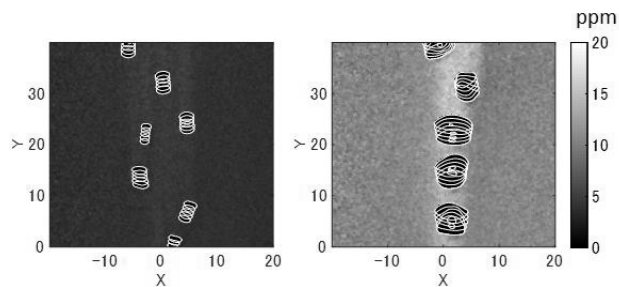


図-1 気泡放出開始から5分後の純水中での気泡周りの溶存酸素濃度分布. 左)気泡径2.6mm. 右)気泡径4.2mm.

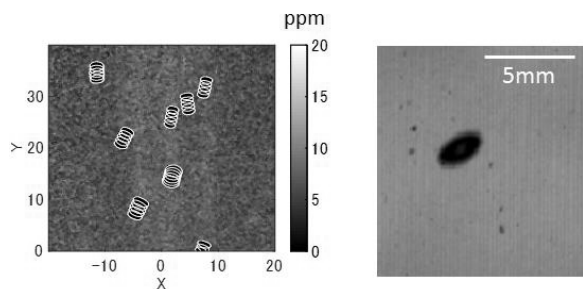


図-2 左)気泡放出開始から5分後の海水中での気泡周りの溶存酸素濃度分布(気泡径:2.6mm). 右)海水中の気泡の画像. 径2.6mmの気泡の周りに微細気泡が発生している.

ら固定直径の酸素気泡を連続的に放出し、気泡ブルーム中の個々の気泡速度、平均液相流速、平均液相乱れエネルギー、溶存酸素濃度変化について実験結果と比較を行った。次に砕波ジェットの水面上への着水時に形成される気液混相乱流場を模擬したケースとして、直径 8.0 mm の円柱状ジェットを鉛直流速2.17m/sで静水中に流入させ、乱れとの相互作用を含む気液二相流中の酸素輸送を計算した。自由水面からの気泡混入は水面の安定限界角度⁶⁾を超えた段階で行われ、放出される個々の気泡径は、慣性小領域内の乱れ速度スケールに対する限界ウェーバー数⁷⁾の関係から決定した。

3. 結果と考察

(1) 気泡ブルーム周りの酸素濃度測定

気泡周りの溶存酸素濃度分布を計測したところ、気泡近傍に高濃度酸素領域が存在し、気泡からの酸素の溶解が矛盾無く観察された(図-1)。気泡からの酸素輸送過程は気泡のサイズに大きく依存し、大径気泡は小径気

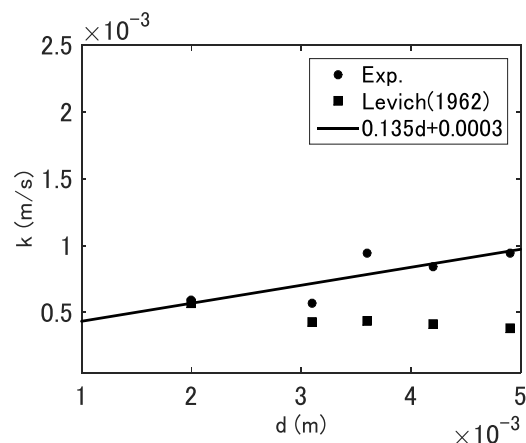


図-3 気泡径 d と気体輸送速度係数 k の関係

泡に比べ、気泡表面積、液相流体乱れへの影響が大きいため一つ当たりの酸素輸送・拡散への寄与は大きくなる(図-1参照)。

一方、海水での飽和溶存酸素濃度は純水での飽和溶存酸素濃度に比べて低く⁷⁾、酸素フラックスを駆動する濃度勾配が小さいにもかかわらず、酸素濃度上昇速度が早い(図-1、図-2参照)。これは図-2右)に示すように海水中では溶け込んだ様々なイオンの影響で純水中では見られなかった微細な気泡が発生し⁸⁾、同一流量の酸素ガスに対して気液の接触表面積が大きくなったためであり、気体輸送における微小気泡の重要性があらためて示された。

気泡からの酸素輸送フラックスモデルの構築は気泡の特性量と酸素輸送速度係数 k のパラメータ化に帰結する。図-3に本実験の結果求められた純水中における気体輸送速度係数と気泡径の関係を示す。図-3にはLevich⁹⁾による理論値も併記している。実験結果より求めた純水での k は、小径気泡においては理論値とよく一致するが、気泡径の増大に伴って緩やかに減少する理論値とは対照的に気泡径に比例して大きくなる。大径気泡近傍では液相乱れの発達や界面変形による影響で濃度境界層厚さが相対的に薄くなった為に k が増大し、乱れや界面変形を考慮していない理論値との間に乖離が生じたものと考えられる。実験によって決定した d と k の関数に最小自乗法を適用し以下のモデル式を作成した。

$$k = 0.135d + 0.0003 \quad (1)$$

式(1)により k を求め、濃度勾配を与えることで、気泡からの酸素輸送フラックスが評価可能となる。

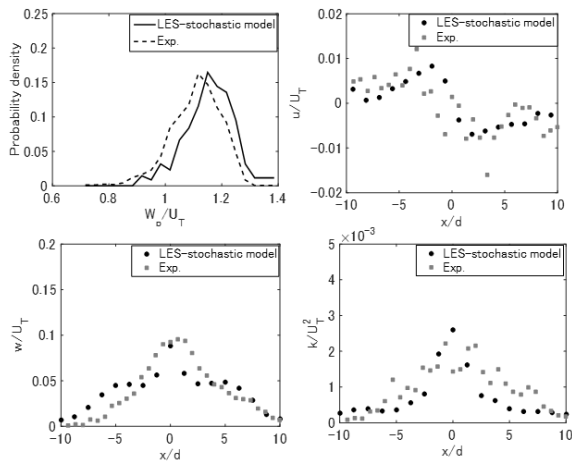


図4 気体流量15 mL/min, 気泡径 $d=2.6$ mmの気泡プルーム中の個々の気泡の上昇速度の確率密度分布(左上), 水平方向流速の水平方向分布(右上), 鉛直方向流速の水平方向分布(左下), 乱れエネルギーの水平方向分布(右下). U_T は

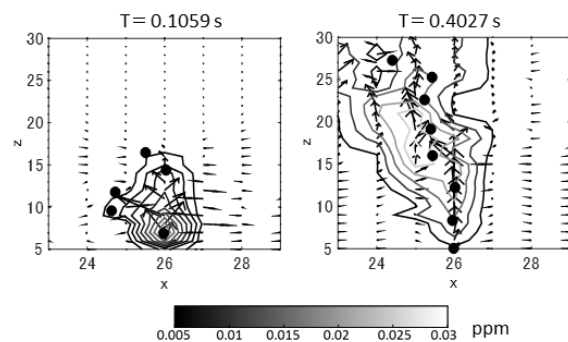


図5 気泡プルームによる初期濃度(2.5 ppm)からの濃度上昇のコンターライン. 左)気泡放出開始から0.11秒後, 右)気泡放出開始から0.11秒後.

(2) 気液乱流中の酸素輸送フラックスモデル

本研究のtwo-way モデルの妥当性を検証するため, 気泡速度, 液相鉛直流速, 液相乱れエネルギーについて提案モデルによる計算結果と実験結果¹⁰⁾と比較した(図-4). 気泡の浮上速度 W_p の頻度分布を求めたところ, 個々の気泡速度は先行する気泡群が引き起こす上向き鉛直流速の影響で単一気泡上昇速度 U_T よりも高速側へシフトし, 気泡が液相に与える付加的な乱れの影響を受けて速度分布に幅を持つことが示された. 計算では気泡を発生させるノズルの条件や気泡界面のアクティブな変動を考慮していないため, 実験結果と厳密に一致することはないものの, 両者は概ね同様の分布を示している. 上昇気泡群によって水槽内に対流が形成され, 水槽下部での水平方向流速は気泡プルームの中心に流れ込むように分布し, 鉛

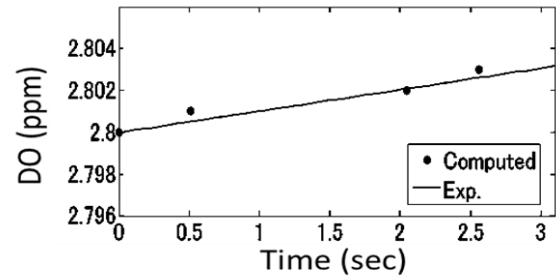


図6 気泡プルーム中の溶存酸素濃度の時間変化.

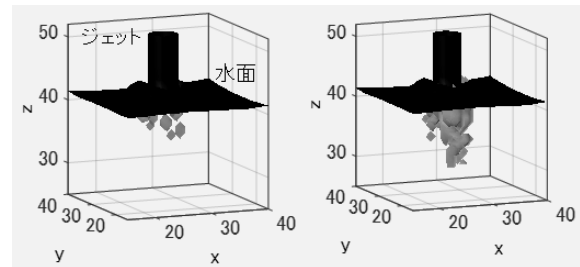


図7 鉛直ジェット下(鉛直流速 2.17m/s, 直径 8.0mm)に形成される気泡乱流中の酸素溶解の計算結果. (左)ボイド率の等値面, (右)溶存酸素濃度の等値面.

直流速の水平方向分布は気泡プルーム中心軸上に最大値を持つ分布形状を示す. 水平方向流速, 鉛直方向流速, 乱れエネルギーのいずれも実験結果を概ね再現しており, 本モデルは, 気泡の変形を無視できる範囲において, 個々の気泡運動と液相乱流との相互作用を適切に評価できている.

この気泡乱流間の力学的な相互作用は溶存酸素濃度分布に深く関わっている. 図-5 はバブリング開始より0.11秒後と0.40秒後における気泡プルーム中の溶存酸素濃度上昇値の計算結果である. 同一ポイントから連続して気泡をリリースしたため, バブリング開始直後では溶存酸素は底面近傍の気泡が共通して通る領域で高濃度となるが, ソースである気泡の上昇と気泡が引き起こす鉛直上向き流速によって酸素高濃度領域も上方に移流される. 気泡が引き起こす液相乱れが発達してくると, 溶解した酸素が広領域に拡散していく一方で, ソースである気泡自体も拡散し, 酸素濃度上昇域が広がっていく. 以上のように, 気液二相流中の酸素濃度分布には乱流中での個々の気泡位置や気泡が引き起こす流れ, 付加的な液相乱れが大きな影響を与える.

水槽内のバルクの溶存酸素濃度変化速度について実験結果と計算結果を比較した(図-6). 気泡が頻繁に通過する領域では溶存酸素濃度の変動が大きいので, 気泡から十分に離れた一点での計測結果を使用した. 今後は複数

点の計測結果との比較・検証を行う必要があるが、今回検討した範囲では、計算結果は実験結果に対して矛盾のない値を示している。

砕波ジェットを模擬した鉛直定常ジェットによるエアレーションを計算した。図-7 にエアレーション開始より 2.9×10^3 秒後のボイド率の等値面分布と溶存酸素濃度の等値面分布を示す。気泡はジェットと受け側水面との間に形成される局所的に水面低下した高曲率キャビティ一部で混入し、混入後の気泡の運動はジェット流速と浮力との相対性によって決定される。溶存酸素濃度は、はじめ気泡が混入するキャビティ周辺で高くなるが、ボイド率とは対照的に、せん断流れと混入気泡の影響を受けて発達した乱れによって広く拡散し、強い鉛直下向きの流れによって急速に移流される。

図-7 に示すようにボイド率と液相乱れエネルギー、溶存酸素濃度の空間分布の相関は必ずしも高くなく、ボイド率のみのパラメータでは気液混相乱流場での溶存酸素濃度分布の推定は困難であるが、本モデルを用いることによって、気泡乱流中の局所的、瞬時的な水中溶存酸素濃度変化を捉えることが可能となる。

4. 結論

本研究では砕波下の気体輸送過程の解明を最終的な目標に、マイクロスケールからのアプローチとして、ジェット下の気泡混入、気泡 - 乱流間相互作用、気泡流中の酸素輸送機構について実験またはパラメータ化を行った。

蛍光励起画像計測を用いて海水と淡水中での気泡ブルーム周りの溶存酸素濃度を計測した。同一酸素流量の気泡ブルームでの海水と淡水の酸素濃度上昇速度を比較したところ、フラックスを駆動する濃度勾配が小さいにもかかわらず、微小気泡の発生によって気液の接触面積が増加する海水のほうが濃度上昇が速かった。

大径気泡近傍では液相乱れの発達や界面変形による影響で濃度境界層厚さが相対的に薄くなり気体輸送速度係数が増大し、乱れや界面変形を考慮していない理論値との間に乖離が生じる。本研究では実験によって決定した気泡サイズと純水での気体輸送速度係数の関係に最小自乗法を適用し、モデル式を作成した。

気泡ブルーム中の個々の気泡速度は先行する気泡群によって引き起こされる液相流速・液相乱れの影響をうけて変動し、気泡上昇速度の平均値は単一気泡の上昇速度よりも大きくなる。本研究で作成された数値モデルによる計算結果は実験結果を概ね定量的に再現し、本モデルが個々の気泡の並進運動と乱流との相互作用を正しく評価できている事を示した。

気泡 - 乱流間の力学的な相互作用は溶存酸素濃度分布の決定に深く関わっている。気泡ブルーム中の溶存酸素濃度は、バブリング開始直後では底面近傍の気泡が共通して通る領域で高濃度となるが、気泡の上昇・拡散によって酸素の溶解領域が広がっていき、溶解した酸素も気泡が引き起こす液相流速や乱れによって移流拡散していく。計算モデルによる気泡ブルーム中の溶存酸素濃度変化速度は実験値に対して矛盾の無い値を示した。

本モデルを砕波ジェットを模擬した鉛直ジェット下の気泡乱流に適用し、ジェット下に形成される気泡乱流中の酸素輸送過程について、その特徴を調査した。ボイド率と液相乱れエネルギー、溶存酸素濃度の空間分布の相関は必ずしも高くなく、従来使われてきたボイド率のみをパラメータとするモデルでは気液混相乱流場での溶存酸素濃度分布の推定は困難であるが、本モデルを用いることによって、気泡乱流中の局所的、瞬時的な水中溶存酸素濃度変化を捉えることが可能となる。

参考文献

- 1) Farmer, D. M., C. L. McNeil and B. D. Johnson: Evidence for the importance of bubbles in increasing air-sea gas flux, *Nature*, Vol. 361, pp. 620-623, 1993.
- 2) Deane, G. B. and M. D. Stokes: Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, *Nature*, Vol. 418, pp. 839-844, 2002.
- 3) 新井田靖郎・渡部靖憲：気泡群から水中への酸素輸送拡散速度計測，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，67，pp. 66-70，2011.
- 4) Watanabe, Y., H. Saeki and R. J. Hosking: Three-dimensional vortex structures under breaking waves, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 545, pp. 291-328, 2005.
- 5) Pope, S. B.: *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, pp. 463-557, 2000.
- 6) Longuet-Higgins, M. S.: Bubbles, breaking waves and hyperbolic jets at a free surface, *J. Fluid Mech.*, Vol. 127, pp. 103-121, 1983.
- 7) Weiss, R. F.: The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *DeepSea Res.*, 17, pp. 721-735, 1970.
- 8) Slauenwhite, D. E., B. D. Johnson: Bubble shattering: Differences in bubble formation in fresh water and seawater, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 3265-3275, 1999.
- 9) Levich, V.: *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, pp. 395-471, 1962.
- 10) Niida, Y. and Y. Watanabe: Turbulent flows responding to local behaviors of buoyant bubbles, *Proceedings of 7th International Conference on Coastal Dynamics*, pp.1287-1298, 2013.