



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ジェット下に形成される気泡流中の気泡-乱流間相互作用及び酸素輸送機構 [全文の要約]
Author(s)	新井田, 靖郎
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11453号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55683
Type	doctoral thesis
File Information	Yasuo_Niida_summary.pdf



学位論文の要約

専攻分野の名称： 工学

氏名： 新井田 靖郎

ジェット下に形成される気泡流中の気泡 - 乱流間相互作用及び酸素輸送機構

Oxygen Transfer in Bubble-Laden Turbulence Generated by Splashing Jets

第1章 序論

砕波に伴うエアレーションは海中の溶存酸素濃度を大きく左右し、これらの物理イベントは海中の化学的、生物的応答と直接結びついている。室内実験及び海洋観測によってマクロな海中溶存酸素濃度と波浪との相関が確認され、特に酸素のような難溶性の気体の大気から海中への輸送には気液接触界面積を著しく増大させる砕波ジェット着水時の混入気泡が大きな役割を果たすことが知られている(e.g. Farmer et al., 1993)。従来の大気 - 海洋間気体輸送研究では、海上風速と気体輸送速度係数の関係を定量化することに主眼が置かれており(Jähne and Haubecker, 1998)、これらの研究に基づいたバルクモデルでは浅水変形によって砕波が生じる沿岸域の海中溶存酸素濃度の定量的評価は不可能である。沿岸域に形成されている豊富な生態系を対象とした定量的環境評価手法の確立のためには、局所的・短期的な変動を含む海中溶存酸素濃度の見積もりが必要であり、そのためには既存のバルクモデルを脱却し、ジェット着水に伴って発生する気泡量や気泡サイズスペクトルを適切に評価し、砕波規模・砕波形式に応じて変化する砕波乱流中での気泡の輸送過程を通して溶解する酸素の移流拡散を記述可能な新たなモデルの構築が不可欠となる。しかし、現在までのところ、ジェット着水過程に依存して変化する砕波イベント時の気泡サイズ分布や気泡量のパラメータ化には至っていない上、気泡サイズ、数密度、浮上速度及び圧力等多数のパラメータが関連する個々の混入気泡からの酸素輸送フラックスの定量化は不十分である。また、これまでの砕波時の混入気泡分布や気泡 - 砕波乱流間相互作用に関する研究は、個々の混入気泡を追跡しマクロな気泡流の特性に結び付けるのではなく、気泡の体積率であるボイド率を唯一のパラメータとしてその特性を記述したものが多く、気泡サイズに強く依存する混入気泡の砕波乱流中での輸送過程やその輸送過程を通じて行われる乱流変調など、気泡 - 乱流間の相互作用については不明な点が多い。

そこで本研究では、砕波イベント時の個々の気泡からの溶解酸素をインテグレートするマイクロスケールからのアプローチとして、最新の流体画像計測技術と流体計算技術を用いて、ジェットによる気泡混入過程およびサイズ毎に異なる個々の混入気泡と乱流との力学的相互作用、気液二相流中の酸素輸送過程を調査し、複雑な砕波帯の気液二相乱流場に

も適用可能な酸素輸送・拡散モデルを開発する.

第2章 気泡流中の物理モデル

- (1) 固有の径で構成される気泡ブルームに **Back - Light** 法による高速画像計測と **Level-set** 法による流体エッジの検出法を適用し, 気泡の形状や軌道, 水平・鉛直方向速度を測定すると共に, **Keane et al. (1995)** によって提案された **Super resolution Particle Image Velocimetry (SRPIV)** を用いて, 液相流速・乱れエネルギーを取得し, サイズ毎に異なる気泡-乱流間相互作用の基礎的特性を調査した.
 - 気泡流中の小径気泡は典型的なジグザグ軌道を描いて上昇し, また気泡形状の変化が気泡運動の方向変化に連動している事が観察された. 一方, 大径気泡は直線的に上昇するものの, その形状は短い周期で激しく変動する.
 - 平均ボイド率空間分布と液相流速分布・液相乱れエネルギー空間分布の相関は必ずしも高くなく, これまで気液二相流の運動学的特性の解析に用いられてきた平均ボイド率のみでは, 気泡流の運動学的特性を把握できない事が明らかになった.
 - 気泡によって引き起こされた液相乱流は気泡の並進運動に影響を与えるのみならず, 気泡形状を変形させる. その結果として生じる気泡の速度変動は再帰的に液相乱れを作り出す.
- (2) **Basset Boussinesq Oseen** 方程式と一般化された **Langevin** 方程式 (**Pope, 2000**) を用いて乱流中の気泡運動をラグランジュ的に記述した.
 - 本モデルを用いた気泡運動のシミュレーションでは, 試行毎に異なる気泡軌道を描き, 乱れエネルギーに応じて分散する気泡の様子が示された.
 - 気泡形状の変化が少ない小径気泡の計算結果は実験結果とよく一致し, また計算による気泡速度の **rms** 値は乱流拡散係数と同様に気泡の等価直径の増加とともに単調増加している事などから, 本モデルを用いる事で液相乱れと気泡速度変動の関係を適切に再現可能であることが明らかになった.
 - 一方で, 大径気泡の気泡速度の **rms** 値は実験結果を大きく上回っており, 液相乱れによる気泡形状の変動並びに気泡の形状変化に伴う速度変動の重要性を示唆する結果となった.
- (3) (2) で構築した気泡運動の確率モデルを **Large Eddy Simulation (Watanabe et al., 2005)** と連成し, 乱れ-平均流-気泡運動を相互にカップリングさせた **two-way** モデルを構成した.
 - 本モデルを用いて(1)の実験で発生させた気泡ブルームを計算し, 気泡速度及び上昇気泡群によって引き起こされる液相流速, 気泡運動に伴い誘発される乱れに着目し, その特徴を調査すると共に実験結果との照合を行った. モデルによる計算結果は, 気泡界面のアクティブな変動が無視できる範囲において実験結果を矛盾なく記述する

ことができる。

- 本モデルによって気泡群の浮上に伴いその近傍に乱れが発生し、その乱れによって気泡運動の変動が促進されるという気泡—乱流間の再帰的エネルギーの輸送が再現された。

第3章 気泡からの酸素輸送フラックスモデル

本章では、酸素イオン数に応じて紫外線蛍光強度が変化する蛍光試薬ピレン酪酸水溶液中に、気泡ブルームを発生させ、気泡サイズに応じた時空間的な酸素濃度変化の基礎的特性を明らかにし、実験結果を基に気泡サイズスペクトルを入力値とした個々の酸素輸送フラックスを評価するモデルを開発した。

- 気泡ブルーム周りの溶存酸素濃度空間分布を取得したところ、気泡近傍に溶存酸素濃度の高濃度領域が存在しており、気泡からの酸素溶解が観察できた。
- 溶存酸素濃度の水平分布は気泡上昇軸上に最大値をもつ典型的な噴流に現れるようなガウス分布となり、気泡の放出時間と共に軸上の最大濃度は増加し、気泡流が引き起こす対流および乱れによって拡散輸送される。
- 大径気泡で構成される気泡ブルームでは、気泡が直線的に上昇するために、気泡自体の側方への拡散が大きい小径気泡の気泡ブルームに比べて気泡上昇中心軸上の酸素濃度が高い。
- 時間とともに気泡近傍領域及び水槽全体の濃度が上昇し、その様相は構成気泡のサイズに大きく依存する。同一数密度ならば、大径気泡は小径気泡に比べ気泡表面積が大きく、また周囲流体の乱れへの寄与も大きくなるため酸素輸送フラックスは大きくなる。
- 継続的な気泡の放出により、噴流周辺の濃度が徐々に高くなるため、酸素フラックスは時間と共に減少する。
- 海水では、同一条件同一時刻の純水での実験結果に比べ、溶存酸素濃度が高くなっている。これは海水中に溶け込む様々なイオンによって、気泡形成時に界面が不安定になり純水中では見られなかった微小気泡が数多く発生した事が原因である。
- 実験結果より求めた純水での酸素輸送速度係数は、小径気泡においては理論値 (Levich, 1963) 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。界面変形による内部圧力変動の影響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。
- 実験結果を基に気泡サイズ及び初期濃度を与えることで、気泡からの酸素輸送フラックスを評価可能なモデルを提案した。

第4章 ジェット下のエアレーション

(1) 砕波ジェットを模擬した定常鉛直ジェットに Back-light 法による高速画像撮影や Large eddy simulation を適用し、気泡混入過程の基礎的特性を調査するとともに、ジェット下に形成される気液二相流中の溶存酸素濃度変化を計測し、第 3 章で構築した酸素溶解ソースモデルの砕波帯への適用可能性を検討した。

- ジェットと水面との間に形成されるキャビティの大きさはジェットの流速に対して単調増加した。
- ジェット下の混入気泡のサイズスペクトルは幅広く、ジェットの流速が速くキャビティが大きくなるほど、小径気泡が減少し、大径気泡が増大する傾向がみられる。
- 第 3 章で構築した酸素溶解ソースモデルをジェットによって発生した気泡サイズスペクトルに適用し、水槽内の溶存酸素濃度の時間変化を計算したところ、モデルによる計算結果は計測結果を概ね再現しており、本モデルが複雑な気液流れ中の気体輸送に対して矛盾無く適用可能であることが確認された。
- 高速撮影画像より、キャビティの鉛直下方向への急速な伸長およびキャビティ幅の急激な収縮が観察された。Large eddy simulation による計算結果では、ジェットを囲むように鉛直方向渦が形成されており、渦核もジェットと受け側水面の間より鉛直下向きに伸びていた。これらの結果はジェット下に形成される鉛直方向の渦が個々のキャビティの発達や不安定に大きな役割を果たしている事を示唆している。

(2) ジェット着水に伴って自由水面から気泡を生成放出する気泡混入モデルを提案した

- このモデルにより円柱ジェットの静水への着水に伴う気泡混入を計算し、その特徴を考察した。ジェットの静水への流入着水点において高曲率のキャビティを形成し、安定限界を超えた高曲率部から気泡が放出され、混入気泡数及びボイド率はジェット軸の周辺で最も高くなる典型的な分布が再現された。
- 気泡の混入はキャビティ近傍の流速及び乱れエネルギーを大きく強化するため、さらに水面を不安定にして気泡の生成を促進するという相乗的なエネルギー輸送があるものと考えられる。

第5章 気泡流中の力学機構に基づく酸素輸送フラックスモデル

本章では砕波イベントを通じて発生する個々の気泡から溶解する酸素をインテグレートするマイクロスケールからのアプローチとして、本論文 2 章で構築した気泡-乱流 two-way モデルと、第 3 章で構築した気泡からの酸素溶解ソースモデル、第 4 章で構築した気泡混入モデルを統合する事で、ジェット下に形成される気泡流中の気泡 - 乱流間相互作用を経由した酸素輸送拡散モデルを構築した。

- モデルを用いて気泡プルーム中の溶存酸素濃度変化を計算したところ、上昇する

個々の気泡から酸素が溶解し、気泡の軌道が集中する領域で高濃度溶存酸素濃度領域が形成された。気泡から溶解した酸素は上昇気泡群が作り出す上向きの流れ及び、液相乱れによって移流拡散される。

- モデルを用いてジェット下に形成される気液混相乱流場の溶存酸素濃度変化を計算した。はじめ気泡が混入するキャビティ近傍で溶解した酸素はジェット下の液相乱れによって拡散し、またジェットによる強い鉛直下向きの流れによって移流される。
- 本モデルを用いることによって、既存のバルクモデルでは不可能な気泡流中の局所的、瞬時的な水中溶存酸素濃度変化を捉えることが可能である。

第6章 結論

本研究は、ジェット下の気泡混入プロセスを通じた気泡 - 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、砕波帯にも適用可能な気泡流中の力学機構に基づく酸素輸送フラックスモデルを構築するものであり、その成果は近海域を対象とした定量的環境評価の確立に多大な貢献をするものである。

参考文献

- 1) Farmer, D. M., C. L. McNeil and B. D. Johnson (1993): Evidence for the importance of bubbles in increasing air-sea gas flux, *Nature*, 361, pp. 620-623.
- 2) Jähne, B. and H. Haubecker (1998): Air-water gas exchange, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30, pp. 443-468.
- 3) Keane, R. D., R. J. Adrian and Y. Zhang (1995): Super-resolution particle imaging velocimetry, *Meas. Sci. Technol.*, 6, 754-768.
- 4) Levich, V. G. (1962): *Physico-Chemical Hydrodynamics*, Prentice Hall.
- 5) Pope, S. B (2000): *Turbulent Flows*, Cambridge University Press.
- 6) Watanabe, Y., H. Saeki R. J. Hosking (2005): Three-dimensional vortex structures under breaking waves, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 545, pp. 291-328.