

研究課題名 閉鎖性水域の水質改善を目的としたマイクロバブル生成機構の研究
所属研究機関名 独立行政法人 産業技術総合研究所
研究者氏名 高田 尚樹

研究計画の概要

研究の趣旨・目的

我が国の内湾、内海、湖沼等の閉鎖性水域は、流入する汚濁負荷が大きい上に汚濁物質が蓄積しやすい、汚濁しやすい。これに加えて、窒素、燐等の物質が流入し、藻類、その他の水生生物が繁殖繁茂することに伴い、その水質が累進的に悪化する。特に、汚濁物質が堆積した底部は、COD (Chemical Oxygen Demand、化学的酸素要求量、水中の有機物を酸化分解するのに必要な酸素量)の値が高く、いわば恒久的な酸素欠乏状態に置かれている。

これまでに、これら閉鎖性水域における水環境の保全対策として、水質総量規制または堆積した有機性汚泥の浚渫等の対策が講じられてきたが、近年は、溶存酸素量を増すことにより、好気性細菌の活動を活性化するという、いわば自然の浄化メカニズムを利用した新しい環境修復技術が注目を浴びつつある。この技術においては、溶存酸素量を増すため、マイクロバブルの使用が検討されている。マイクロバブルは直径10～30 μm程度の微小気泡であり、酸素の溶解能力が極めて高いこと、水中での滞在時間が長いこと、

比表面積が大きいこと、帯電特性を持つこと等、通常の曝気法に比べて数多くの利点をもつが、その生成法に多くの問題を抱えている。特に、マイクロバブルは回転せん断流れ場における気泡の合体分裂、細分化機構を利用して形成されるが、今なお気泡径分布、個数密度等の予測制御法が確立しておらず、環境修復技術として活用する上での隘路となっている。以上を踏まえて、本研究では、マイクロバブルの生成機構、ならびに空気-水界面を通した酸素などの物質輸送機構の基礎を解明することにより、気泡径分布、個数密度、酸素の溶解・溶存量等の予測と制御、およびマイクロバブルの環境修復機能の評価法の確立に関する指針を示し、得られた知見をもとにマイクロバブルを用いた水域環境修復技術の実用化の普及と改良発展に寄与することを目的とする。

研究計画の概要

(1)マイクロバブル生成機構の解明

旋回流れ(回転せん断流れ)場におかれた気泡の分裂挙動等、多相流体中での気泡界面や物質の拡散現象等の複雑流体現象は、一般的な流体力学に基づく微分方程式による記述が現実的に困難である。そこで本研究項目では、分子の集合体に相当する仮想的な流体粒子の運動の支配方程式に基づく新しい統計力学的手法である格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)を用いて、気泡の変形・分裂・拡散流動を伴う複雑な現象をメソスケールから簡潔に記述する数値モデルおよび解析技術を開発する。さらに、これを用いてマイクロバブル生成機構を解明するとともに、実験的手法によってマイクロバブルの発生量、運動性、電気化学的特性を検証することを試みた。

(2)界面を通した酸素輸送機構の解明

界面を通して、気体側から液体側に酸素が輸送される。マイクロバブルを用いた場合、表面張力の効果により内圧が環境圧より高くなり、酸素の溶解能力が増す。例えば、気泡径が10 μmの場合で約0.3atm、1 μmの場合で約3atm 圧力が上昇する。加えて、マイクロバブルの界面と液体側の乱流構造との相互作用により、界面を通した物質輸送は飛躍的に促進される。マイクロバブルの自然浄化機能のメカニズムを解明する上で、気液界面を通過する酸素の量を正確に評価することが強く求められる。そこで、本研究項目では乱流と界面との相互作用による酸素の輸送促進機構を解明するとともに、マイクロバブルが持つ酸素溶解能力を実験的に検証する。

・所用経費一覧

(単位：百万円)

研究項目	所要経費					
	12年度	13年度	14年度	年度	年度	合計
1. マイクロバブル生成機構の解明	12.5	11.7	6.7			
(1) 格子ボルツマン法に基づく3次元二相流体モデルの開発	3.5	0.4				3.9
(2) せん断力による流体微細化の数値シミュレーション		3.3	6.7			10.0
(3) マイクロバブル生成実験	9.0	8.0				17.0
2. 界面を通した酸素輸送機構の解明	1.0	2.6	6.0			
(1) 回転乱流流れ場の数値解析	1.0					1.0
(2) 界面付近の乱流構造と乱流熱物質輸送に及ぼすせん断力効果の直接数値解析		2.0				2.0
(3) 気液界面を通した酸素輸送の流体数値実験			1.3			1.3
(4) マイクロバブルを利用したガスハイドレートの生成実験		0.6	4.7			5.3
所要経費(合計) (管理費を含む)	13.5	14.3	12.7			40.5

研究成果の概要

研究成果の概要

マイクロバブル(Micro Bubble, MB)生成機構の解明に関する研究項目では、新たに開発した格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)に基づく二相流体モデルを用いて、せん断力による二相流体の変形分裂の流体力学に基づく数値シミュレーションを実施した。その結果、開発したLBMのモデルの計算精度は妥当なものであり、気体を分裂させて微細化しMBを生成するには、せん断力の強さだけでなく、気泡の初期体積、数密度とそれらの初期配置・相互位置関係が重要であることがわかった。一方、実験においては、MBの直径毎の上昇速度、表面電位の大きさ、MBの発生個数と気泡直径分布が明らかになった。また、直径数 μm 以下の気泡核(NB)の形成が古典理論から予測できることを確認し、液体中でのNBの存在とNBがMBの発生量に影響を及ぼすことがわかった。

また、気液界面を通じた酸素輸送機構の解明に関しては、直接数値解析手法に基づく乱流場の流体数値実験において、流れ場の回転効果の効率的な制御が気泡の微細化と高効率生成に重要であること、自由界面を通過する酸素輸送量の計算では界面上の速度変動とそこに作用するせん断力を考慮することが重要であること、等が確認された。さらに、界面近傍の渦構造と界面との相互作用、ならびに気液間での酸素輸送促進の力学的プロセスも解明され、汚れた界面では汚染のない場合より輸送速度が最大で約20%低下することが明らかになった。実験においては、MBを利用した効率的なガスハイドレート生成により、MBが持つ高い溶解ドライビングフォースが証明された。

以上により、本研究では、マイクロバブルの生成機構、ならびに空気-水界面近傍での酸素輸送機構の基礎を解明し、マイクロバブルの発生の予測と制御、および環境修復機能の評価法の確立に関する指針を示すことができた。

波及効果、発展方向、改善点等

本研究で得た知見の波及効果としては、(1)酸素が不足しがちな閉鎖性水域の環境修復技術の発展(気体注入口などの微細気泡発生装置の最適化設計の詳細を検討する)のほか、(2)大気と海洋の間で起こる酸素や水蒸気、二酸化炭素 CO_2 、熱エネルギーなどの熱物質輸送機構の解明による局所または地球規模の気象予測技術の高精度化、(3)地球温暖化の一因と考えられている CO_2 を大気中に放出せずに海洋中へ溶解させる地球温暖化抑制技術、(4)火力発電所や廃棄物焼却場で発生する CO_2 を分離するためガスハイドレートの高効率生成技術、等の基礎的研究・開発の進展が考えられる。また、数値実験で用いた格子ボルツマン法に基づく二相流体モデルや直接乱流数値解析法そのものも、マイクロバブル技術の研究以外にも一般的に適用可能な精度を持っており、上記(1)、(3)の環境工学的な研究利用以外に、化学反応プラント、火力・原子力発電プラント等での工業的な気液二相流の数値解析や、上記(2)のような物理学分野での数値実験による研究で広く役立つものと期待できる。

今後は、溶解過程を含めた各種ガス(空気・酸素・二酸化炭素 CO_2)の気泡の挙動や、大規模な気泡集団の直接数値シミュレーションを実施し、数値実験および室内実験によって微細な気泡を含む液体の特性の解明をさらに進めたい。また、流体微細化の数値シミュレーションでは、微細な気泡の生成機構の基礎的な解明を目的としていたため、流れ場を最も単純にモデル化し、一様せん断速度場内に規則的に配置される二相流体を計算対象に選択したが、実際には速度が3次元空間的に、かつ時間的にも複雑に変動している。よって、改善点としては、2番目の研究項目との融合を図り、発生装置内部の状況に類似した旋回(回転とせん断が同時に起こる)する乱流場に浮遊している多数の気泡の変形・分裂挙動を対象とすることが挙げられる。また、空気と水に近い、より高い質量密度比の二相流体を扱うための数値計算モデルの利用も今後検討していきたい。以上に加え、本研究員ならびに所属する研究グループ自身によっても、得られた知見を基礎にして新しいマイクロバブル発生装置を開発するか、もしくは既存装置の改良法を提案し、現象の解明に留まらず水質環境修復技術をより積極的に発展させることも検討していきたい。

研究成果の公表等の状況

(1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	0件	1件	8件	9件
国際	13件	0件	13件	26件
合計	13件	1件	21件	35件

(2) 特許等出願件数

0件 (うち国内0件、国外0件)

(3) 受賞等

0件 (うち国内0件、国外0件)

(4) 主な原著論文による発表の内訳

国外誌

- 高田尚樹, 富山明男, 細川茂雄: 「Three-dimensional Simulation of bubble Motion by Lattice Boltzmann Method」, Proceedings of the 2001 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FED-Vol.254, FEDSM2001-18179, (2001).
- 高田尚樹, 富山明男, 細川茂雄: 「Simulation of Two-Phase Fluid Motion by Lattice Boltzmann Method」, Proceedings of the 4th International Conference on Multiphase Flow(ICMF2001), (2001).
- 永翁龍一: 「Turbulent heat transfer at a gas-liquid interface with uniform shear stress」, Proceedings of the First International Symposium on Advanced Fluid Information, 702-707, (2001).
- 高橋正好ほか: 「Kinetic study on PMMA-CO₂ system by Raman spectroscopy」, Conference Proceedings of ANTEC 2002, 3737-3741, (2002).
- 高橋正好ほか: 「A novel manufacturing method of gas hydrate using the micro-bubble technology」, Proceedings of the 4th ICGH 2002, 825-828, (2002).
- 高田尚樹, 富山明男, 細川茂雄: 「Lattice Boltzmann Simulation of Drops in a Shear Flow」, Proceedings of the 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference (CD-ROM), Honolulu, Hawaii, USA, Paper No. FEDSM2003-45166, (2003).
- 高田尚樹, 富山明男, 細川茂雄: 「Lattice Boltzmann Simulation of Two-phase Fluid Motion」, Proc.5th JSME-KSME Fluids Engineering Conference, Nagoya, Japan, Nov.17-21, (2002).
- 高田尚樹, 富山明男, 細川茂雄: 「Lattice Boltzmann Simulation of Interfacial Deformation」, International Journal of Modern Physics B, Vol.17, No.1&2, 179-182,(2003).
- 高橋正好ほか: 「Kinetic Characteristic of Bubble Nucleation in Superheated Water using Fluid Inclusions」, J. Physical Society of Japan, 71, 2174-2177 (2002).
- 永翁龍一, R. A. Handler: 「Statistical analysis of coherent vortices near a free surface in a fully developed turbulence」, Physics of Fluids, Vol.15, No.2, 375-394 (2003).
- R. A. Handler, R. I. Leighton, G. B. Smith, 永翁龍一: 「Surface effect on passive scalar transport in a fully developed turbulent flow」, International Journal of Heat and Mass Transfer

Vol.46, No.12, 2219-2238, (2003)

12. 高橋正好ほか:「Effect of shrinking micro-bubble on gas hydrate formation」, Journal of Physical Chemistry B,107-10, 2171-2173, (2003).

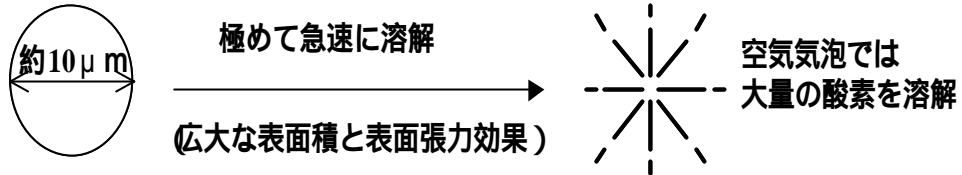
13. 高田尚樹ほか:「Simulation of Bubble Motion under Gravity by Lattice Boltzmann Method」, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.38, No.5, 330-341,(2001).

(5) 主要雑誌への研究成果発表

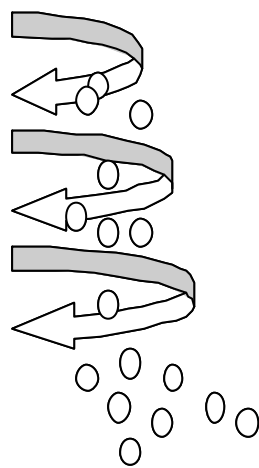
Journal	Impact Factor
International Journal of Heat and Mass Transfer	1.268
International Journal of Modern Physics B	0.607
Journal of Nuclear Science and Technology	0.572
Journal of Physical Chemistry B	3.611
Physics of Fluids	1.697

マイクロバブルによる環境浄化技術

COD改善技術 : 微小気泡の極めて優れたガス溶解能力
を利用した酸欠環境の劇的な改善



マイクロバブル生成法の確立



マイクロバブル発生過程

II

回転せん断流れ場における
気泡の分裂 細分化過程



気泡径分布、
個数密度制御法

格子ボルツマン法により説明

