

審査の結果の要旨

論文提出者氏名： クハティープ・ヌールウルフダ

本論文は、「Numerical simulation of bubbly flows with biochemical reactions for water purification systems (水質浄化システムに関する生化学反応を伴う気泡流の数値シミュレーション)」と題し、水処理システムの曝気槽に関連して、微細気泡を用いた高効率な水処理に関する数値解析を実施している。発展途上国における水処理システムの重要性は、そこで生活するヒトの生死にも大きな影響を与える重要な課題であるだけでなく、先進国においても、水処理に費やすエネルギーやコスト、処理システムを設置する場所の問題も含め、コンパクトで高効率な水処理システムを開発することが重要な課題となっている。本研究では、そのような状況を背景に、バクテリアによる生化学反応を考慮に入れた、多数の微細気泡を含む流れの大規模 3 次元数値シミュレーションを実施し、微細気泡の特性を活かした曝気の仕方や水深の影響などについて調べている。気泡径については、標準的なマイクロバブル発生装置で、比較的容易に生成できる気泡サイズである、200 ミクロン、500 ミクロン、1 ミリの 3 種類を対象にシミュレーションを実施し、気泡径の違いの影響について調べている。

本論文は、全 6 章から構成されている。

第 1 章「Introduction」では、研究の背景として曝気槽を利用した水処理システムについて、一般的な方法を説明し、バクテリアによる生化学反応を取り入れた数値解析用の標準モデルである ASM モデルなどについて説明を行っている。第 2 章「Biochemical reaction model」では、生化学反応を取り入れた気泡流の計算について、数値計算モデルの説明とシミュレーション結果の解析を行っている。まず始めに、本数値計算モデルで扱っている生化学反応について、その詳細をまとめ、気泡流との連成手法について説明を行っている。本研究の新規性は、大規模気泡流の計算に、この章で説明されている複雑な生化学反応モデルを連成させているところにある。様々な文献を調べ、重要と考えられる化学反応を組み込んでいる。また、採用した生化学反応モデルと計算結果の妥当性を検証するため、他者による実験結果との比較による検証を行っている。さらに、ここで提案された数値計算モデルを用いて、曝気槽内気泡流の大規模数値シミュレーションを行い、水槽底部中央より気泡を吹き込む方法と底部全面より一様に吹き込む方法の違いについて議論している。数値シミュレーション結果より、気泡系が 500 ミクロン以上の気泡の場合には、気泡の上昇運動が誘起する循環流の影響で、生化学反応の活性化が促進される効果が現れてくるが、直径 200 ミクロンの微細気泡を用いた際には、曝気槽の底部より一様に吹き出す方が、気泡の微細化による上昇速度の低下を有効に活用でき、効率よく生化学反応が進むことを示すことに成功している。さらに、水面の高さについても検討を行い、直径 200 ミクロンの気泡を底部より一様に吹き込むことにより、水面高さ 0.1m の曝気槽でも気泡が水面に到達するまでに十分な生化学反応を引き起こすことができるのを示した。第 3 章「Bacteria floc model」

では、バクテリアの凝集体を考慮にいたした数値計算モデルを提案し、まずモデルの説明を行った後、第 2 章と同様に提案しているモデルの妥当性を検証し、さらに大規模数値シミュレーションより、水よりも密度が 4% 大きいバクテリア凝集体が沈降してくる影響を調べ、このときも曝気槽底部からの微細気泡の一様吹き込みが非常に有効であることを示している。第 4 章「MPI Parallelization」では、スーパーコンピュータを用いて大規模並列計算を効率良く実施するために行った並列化について説明している。本手法は、流れ場をオイラー的に、気泡はラグランジュ的に追跡する Euler-Lagrange 手法を適用しているため、この手法に適した並列化アルゴリズムを提案し、並列化性能を弱スケーリングおよび強スケーリングの両方で評価し、良好なスケーラビリティを得ている。第 5 章「Granule modeling」は、ここまでで開発してきた数値計算モデルを拡張し、汚水物質が液体中に溶け込んでいる場合だけでなく、粒子として浮遊している場合のモデリングについて、第 6 章「Temperature modeling」では化学反応に伴って発熱があり、温度変化を伴う場合、第 7 章「Flotation phenomena」は、浮遊選別（フローテーション）により水処理を行う系に対するモデルの提案を行っている。第 8 章は、「Conclusions」と題し、本論文で得られた結論をまとめている。

以上、本研究では、曝気槽を用いた水質浄化の数値シミュレーションにより、水槽底面からの微細気泡の一様吹き込みによるコンパクトかつ高効率の水処理システムの可能性を示した。開発された手法は、微細気泡を用いた様々なタイプの機器に適用可能であり、微細気泡（マイクロバブル）を利用した高効率システムの開発の観点からも、その工学的意義は大きい。

よって本論文は博士（工学）学位請求論文として合格と認められる。