

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15079

研究課題名(和文) ミクロマクロ現象同時制御による超音波処理スケールアップ指針の確立

研究課題名(英文) Establishment of guideline for scale-up method of ultrasonic processing by simultaneous control of micro- and macro- phenomena

研究代表者

山本 卓也 (Yamamoto, Takuya)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：10804172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超音波を液体中に照射した際の超音波処理プロセスのスケールアップ指針を構築するため、本研究では、ミクロスケールでのキャビテーション気泡の振動、マクロスケールでの音響流と超音波伝播までを統合的に解析することができる数値解析モデルを開発した。この開発した数値シミュレーションモデルを利用したところ、外部流を与えることで乱流拡散が増大し、それに伴い反応槽全体での反応速度が向上することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波処理はナノ粒子合成やエマルジョン化、表面洗浄や有機物分解等の様々な応用が期待されているが、小さい領域でのみしか反応を進行させられないことが問題であった。本研究によって、スケールアップ、反応槽全体での処理効率向上のための指針と方法を開発することに成功した。これにより、超音波処理の様々な応用範囲での活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to establish scale-up guideline for ultrasonic treatment when ultrasound is irradiated in liquids, the present study developed a numerical simulation model capable of integrating the micro-scopic oscillations of cavitation bubbles, macro-scopic acoustic streaming and ultrasonic wave propagation. Through the developed numerical simulation model, it was found that the turbulent diffusion was increased by providing an external flow, resulting in enhancement of whole reaction rate in a vessel.

研究分野：移動現象論

キーワード：Ultrasonic processing Numerical simulation Mass transfer

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

超音波を液体中に照射することで様々な効果を引き出すことができる。例えば、溶液中の有機物分解、ナノ粒子合成、メッキ処理、超音波鋳造、エマルジョン化、霧化、分離プロセス等が挙げられる。このように、幅広い応用範囲があるのにも関わらず、産業応用化された事例は少ない。超音波処理の大きな問題点として、超音波処理装置が大型化できないこと、超音波が安定して動作しにくいことがある。超音波処理は圧電素子を用いて電気信号を振動に変換し、その振動を増幅させて液体中に照射するが、増幅する際にはホーンを共振させることで高振幅の超音波を発生させることができる。しかしながら、ホーンを共振させるため、多数の共振モード発生を避けるために、ある一定サイズ以下のホーンを使用せねばならず、超音波照射面を大きくすることが困難である。加えて、液体中に超音波を照射すると音響キャビテーションが生成し、音響キャビテーションによって上記の有効な効果を引き出すことができる一方で、キャビテーション気泡の存在によって超音波が散乱、減衰する。この減衰によって超音波伝播領域が狭くなり、さらに反応領域を広めることが困難となる。このような背景のもと、超音波処理を大容量化、高効率化することが強く求められている。

2. 研究の目的

上記のように超音波処理を大型化、高効率化することが可能なスケールアップ指針を構築するために、ミクロスケールでの気泡運動とマクロスケールでの超音波伝播、音響流と物質移動を同時に解明することの数値モデルを開発し、高効率化を達成しうる条件を探索することを本研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) 数値モデルの開発

数値モデルとして、超音波の伝播、音響流に加え、熱移動、物質移動までを考慮する必要がある。そこで、超音波の伝播には気泡振動を加味した Helmholtz 方程式、超音波による外力を考慮した Navier-Stokes 式、連続式、物質拡散方程式、エネルギー式を連成した。ここでの連成手法として、超音波の伝播を表す Helmholtz 方程式を第一段階として解く。さらに、第一段階として得られた音波場を元に流れ場、温度場、物質拡散場を第二段階として解いた。また、キャビテーション気泡の分布を求めるために、Jamshidi らのキャビテーション気泡体積分率と音圧振幅の関係性[1]を利用した。また、この際には Blake の閾値[2]を利用し、キャビテーション気泡発生限界を規定した。この関係性を利用することで、キャビテーション気泡の発生量を音圧分布から求めることができる。これらを連成して解くことで、超音波分布、流れ場、温度場、濃度場、キャビテーション気泡体積分率分布を得ることができる。加えて、キャビテーション気泡が存在する領域においては、有機物が分解する反応が進行する。この化学反応をモデル化するため、拡散方程式に化学反応項を導入した。この化学反応モデルではキャビテーション気泡が存在する領域においてのみ反応が進行するようモデル化し、任意の反応速度定数で反応が進行するとした。

加えて、キャビテーション気泡の振動に関してもモデル化した。気液界面の運動を直接計算し、超音波条件下での気泡運動を解析することで、キャビテーション気泡の振動と音波散逸も計算した。

(2) 実験による検証

本数値モデルの結果を検証するために、ローダミン B を用いた有機物分解実験との結果と比較した。外部からの流れ場を考慮するため、循環型反応器を用いて分解実験を行った。ローダミン B の濃度の時間変化を紫外可視分光光度計によって計測した。

4. 研究成果

本モデルを利用した流速分布とキャビテーション気泡分布を示した結果を図 1 に示す。音響流によってホーン表面から下に向かって強い流れが発生し循環流が発生している。また、この際にキャビテーション気泡はホーン端面付近ではその体積分率は大きいものの、直ぐに音波が減衰する

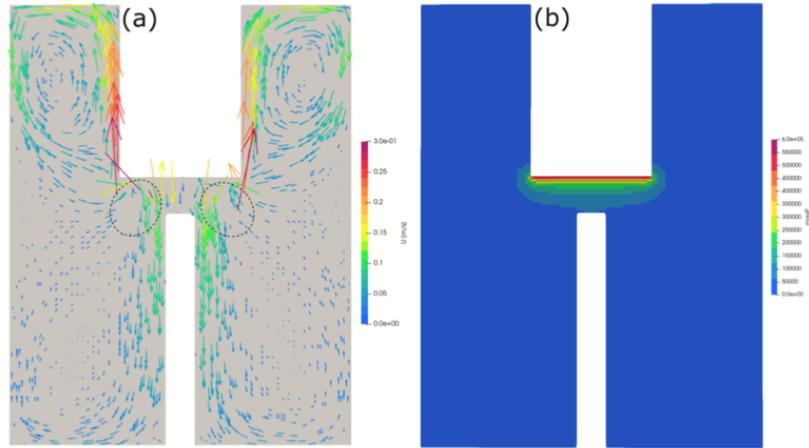


図 1 超音波槽内における断面上の現象：(a) 速度ベクトル分布、(b) キャビテーション気泡分布

ことでキャビテーション気泡領域はあまり広がっていない状況となった。外部流を加えた場合、音響流によって発生する流れを上回る条件で分解速度が向上した。この際には、外部流による流れが支配的になり、乱流拡散が増大し、キャビテーション領域内に分解物質が多く拡散されたため、分解速度が向上したと説明することができた。また、この現象は実験によっても確認された。

また、このような気泡密集状況での気泡運動を詳細に解明すると、図 2 に示すように気泡が多数存在する条件下では、音響後流効果によって気泡振動が増幅され、さらに超音波が散乱することが示唆された。これらの現象を踏まえると、大域的な音響流や超音波場だけでなく、微細な気泡もクラスター化を防ぎながら、キャビテーション気泡体積分率を向上させない方法論が重要であることがわかった。

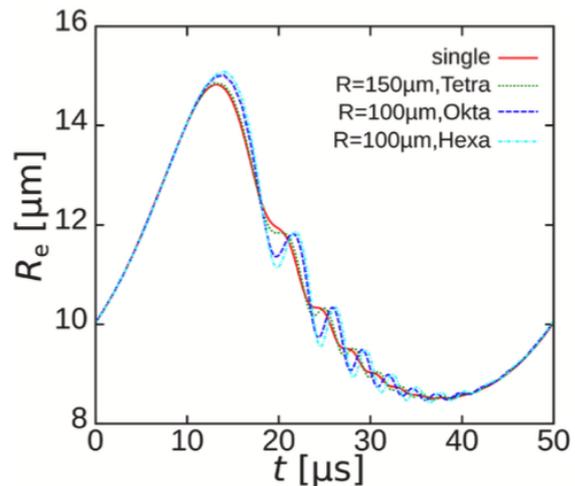


図 2 複数気泡存在時の超音波照射条件下での気泡半径の経時変化

参考文献

- [1] R. Jamshidi *et al.*, Chem. Eng. J. **189-190**, 264-375 (2012).
- [2] F.G. Blake Jr., Technical Memo, No.12, Acoustic Research Laboratory, Cambridge (1949).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamamoto Takuya, Kubo Kazuki, Komarov Sergey V.	4. 巻 71
2. 論文標題 Characterization of acoustic streaming in water and aluminum melt during ultrasonic irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ultrasonics Sonochemistry	6. 最初と最後の頁 105381 ~ 105381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ulsonch.2020.105381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto Takuya, Matsutaka Ryo, Komarov Sergey V.	4. 巻 71
2. 論文標題 High-speed imaging of ultrasonic emulsification using a water-gallium system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ultrasonics Sonochemistry	6. 最初と最後の頁 105387 ~ 105387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ulsonch.2020.105387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto Takuya, Komarov Sergey V.	4. 巻 294
2. 論文標題 Influence of ultrasound irradiation on transient solidification characteristics in DC casting process: Numerical simulation and experimental verification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Processing Technology	6. 最初と最後の頁 117116 ~ 117116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmatprotec.2021.117116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto Takuya, Komarov Sergey V.	4. 巻 78
2. 論文標題 Enhancement of oscillation amplitude of cavitation bubble due to acoustic wake effect in multibubble environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ultrasonics Sonochemistry	6. 最初と最後の頁 105734 ~ 105734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ulsonch.2021.105734	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Xu Yifan, Yamamoto Takuya, Hariu Daiki, Komarov Sergey	4. 巻 83
2. 論文標題 Effect of gas injection on cavitation-assisted plasma treatment efficiency of wastewater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ultrasonics Sonochemistry	6. 最初と最後の頁 105941 ~ 105941
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultsonch.2022.105941	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山本卓也
2. 発表標題 超音波利用プロセススケールアップに向けた基礎現象解明と数値モデル開発
3. 学会等名 化学工学会反応工学部会若手会 (反好会) 第20回反好会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Yamamoto, S. V. Komarov
2. 発表標題 Enhancement of oscillation amplitude of cavitation bubble in a cavitation cloud
3. 学会等名 ESS-JSS-AOSS Joint Sonochemistry Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本卓也、コマロフセルゲイ
2. 発表標題 マルチバブル系における音響キャピテーション気泡の振動に対する数値解析
3. 学会等名 第30回ソノケミストリー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本卓也、コマロフセルゲイ
2. 発表標題 マルチバブル系における音響ウェーク効果による音響キャビテーション気泡振動増幅
3. 学会等名 第20回キャビテーションに関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本卓也、コマロフセルゲイ
2. 発表標題 OpenFOAMにおけるVOF法の最適利用方法の探索
3. 学会等名 OpenCAEシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本卓也
2. 発表標題 ソノケミカルプロセス設計指針構築に向けた基礎現象解明
3. 学会等名 化学工学会第87年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------