

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03930

研究課題名（和文）格子ボルツマン法を基とした気液界面と音の相互作用の直接計算手法の確立

研究課題名（英文）Construction of lattice-Boltzmann method for direct simulation of the interaction between a gas-liquid interface and sound

研究代表者

片岡 武（Kataoka, Takeshi）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20273758

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）：計算負荷の小さい2次元モデルで、液相と気相は異なる2種類の粒子を用いることにより、液滴と音波の相互作用を計算するLBMモデルを開発した。気相と液相が大きく異なる点は、密度と圧縮性であるが、分子間力に相当する力を組み込み液体の圧縮性を模擬した。これらの要素を組み込んだモデルで、液滴が液面に衝突する際のシミュレーションを実施し、液滴と液面との衝突面で発生した水中音が液滴内および液相内を伝播するとともに、空中にも伝播していく様子が捉えられ、同時に液に細かな気泡が取り込まれることにより、音の放射が2重極的になることも確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気液界面から発する空中音ならびに水中音、あるいはこれらの音と気液界面との相互作用は、多くの解明すべき問題が残っており、その詳細を調べる方法として、数値シミュレーションが有力である。

本研究の学術的意義は、格子ボルツマン法を導入することにより、これらの要素をひとつのモデルの中に組み込み、これらの要素を同時に直接シミュレーションできる手法を開発した点にある。気液界面の様々な要素が複雑に絡みあった気液界面と音波との相互干渉現象を解明する上において強力な解析手段が与えられたことになる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a two-dimensional LBM model that can simulate interaction of a water droplet with sound by introducing two different kinds of particles for the liquid and gaseous phases. The most striking difference between the liquid and gaseous phases is their density and compressibility, and their differences are modeled by the use of appropriate intermolecular forces. With these modifications being incorporated, a newly developed LBM model is able to simulate a collision of a droplet and quiescent surface appropriately. Specifically, the underwater sound was generated by the collision of the droplet with the water surface and it propagates either in a droplet and liquid phase, as well as into the air. At the same time, small air bubbles are generated and thus make the sound propagation to be a dipole type.

研究分野：数値流体力学

キーワード：流体音 気液界面 数値計算法

1. 研究開始当初の背景

気液界面の変形により生じる音(空中音)ならびに水中音,あるいは水中音および空中音と気液界面との相互干渉は

- (1) キャビテーションノイズおよび崩壊現象
- (2) 雨音, 滝の音, 波の音
- (3) 液滴による騒音低下
- (4) ソノルミネセンス
- (5) 超音波キャビテーション
- (6) 超音波診断におけるマイクロバブルによる造影作用(音の反射)
- (7) 超音波乾燥

などとも関連するが,これらのメカニズムの詳細は明らかではない。

これらの現象にはスケールの小さい液滴あるいは気泡が主に関与しており,これらはある場合には音源であり,ある場合には音を吸収し,また反射・散乱する。これらの作用はきわめて短い時間でおこり,詳細を実験的に明らかにするのは極めて難しい。理論においても,モデル研究が主流であり,そのモデル自体の検証は実験に頼ることとなるが,十分とはいえない。気液界面の変形により生じる音,あるいはこれらの音と気液界面との相互干渉は,液滴による騒音低減やソノルミネセンスなどの幅広い実際現象があるにも関わらず,そのメカニズムの詳細は明らかではない。その詳細を調べる方法として数値シミュレーションが有力であるが,液滴あるいは気泡の変形を考慮に入れ,かつ周りの音場を同時に連成問題として解く手法は複雑かつ困難であった。

一方,本研究で使用する格子ボルツマン法は,複雑流体現象の数値シミュレーションにおいて優れた特徴を持つことが分かっている。我々はこの手法に圧縮性気体に対するモデルを開発し,これまで音波の解析に用いて成功を収めてきた。また混相流を扱う場合にも場の関数である粒子の分布関数を解くが,粒子法としての特性も持ち,界面を扱うのに非常に適した手法である。計算において気液界面を計算する必要がなく,モデルの中で気液が分離し自発的に界面が生成される。また液面からの水蒸気の蒸発,凝縮が起こる場合,気液界面近傍(クヌッセン層)は非常に強い非平衡状態であるため,流体力学方程式であるナビエ・ストークス方程式が適用できない。この領域においても格子ボルツマン法は,注意を要するが適用可能である。

2. 研究の目的

流れの新しい数値計算手法である格子ボルツマン法は,音波や気液界面を伴う混相流などの複雑流体現象の数値シミュレーションにおいて優れた特徴をもち,申請者もこれまで計算モデルの開発,安定化を図ってきた。本研究は,この「格子ボルツマン法」を用いて,気液界面と音の相互作用の直接数値計算手法を確立することを目的とする。

つまり格子ボルツマン法を導入することにより,これらの要素をひとつのモデルの中に組み込み,これらの要素を同時に直接シミュレーションできる手法を開発することである。液中の気泡,特にキャビテーション気泡においては,水の蒸発あるいは水蒸気の凝縮が重要な要素となる。分子気体の簡単なモデルと考えられる格子ボルツマンモデルにおいては,この相変化もモデルに組み込むことが可能である。

このように気液界面の変形,空中音,水中音,水蒸気の蒸発・凝縮を同時に直接シミュレートできるモデルを開発する。本モデルが完成すれば,上記した要素が複雑に絡みあった気液界面と音波との相互干渉現象(前頁に記した(1)~(7)をはじめとする現象)を解明する上において強力な解析手段が与えられることになる。

3. 研究の方法

(i) 液滴と音波の相互作用

まずは計算負荷の小さい2次元モデルで,液滴と音波の相互作用を計算する。液相と気相は異なる2種類の粒子を用いる。気相と液相が大きく異なる点は,密度と粘性それに圧縮性であるが,気液界面にはまた界面張力が働く。格子ボルツマンモデルは元来理想気体のモデルであるが,このモデルに分子間力に相当する力を組み込み液体の圧縮性を模擬する。また空気,水の場合には密度において約800倍の違いがあり,このモデル化は液相での加速度を小さくすることによって

可能であることがわかっている。水中音の計算のため、液相を完全な非圧縮とせず気相での音速の4倍ほどの音速になるモデルを開発しているので、このモデルを用いる。

これらの要素を組み込んだモデルで、液滴が液面に衝突する際のシミュレーションの結果を得ている（次ページに示した図）。液滴と液面との衝突面で発生した水中音が液滴内および液相内を伝播するとともに、空中にも伝播していく様子が捉えられ、同時に液に細かな気泡が取り込まれることにより、音の放射が2重極的になることも確認できる。

一方、格子ボルツマン法における蒸発、凝縮現象のモデル化は、凝縮相（蒸発、凝縮が起こる面）での気体に対する速度分布関数を、その場所での飽和蒸気圧（実際には密度）に対応する平衡分布関数に置き換えることにより、簡単に達成される。ただ、格子ボルツマン法のモデルは、本来の気体分子の運動を正確に表しているわけではないので、パラメータを適切に選ぶ必要があり、これらの最適なパラメータを見出す。

2次元での計算法の確立の後、3次元モデルでの計算に進むが、3次元の計算においてはMPIを用いた並列計算を行う。並列計算の手法については取得済みである。計算機は購入予定のPCクラスターを使用する。

(ii) 気液界面からの蒸発・凝縮効果

上記モデルに、気液界面からの水蒸気の蒸発・凝縮効果を導入する。気液界面付近の気相側には、分子の平均自由行程のオーダーであるクヌッセン層での物理量（密度、温度、圧力、流速）のとびが生じる。水蒸気の蒸発・凝縮現象、特に凝縮課程において非凝縮気体（今の場合、空気）の存在が大きく影響する。

またマイクロバブル崩壊時のソノルミネセンス（気泡内の圧力が大きく上昇し、光を発する）においては、凝縮気体が液化した後、非凝縮気体が大きな圧縮を受けるためと考えられており、凝縮気体と非凝縮気体の共存が、現象の本質である。この2種類の気体を計算モデルに取り入れるために別の粒子を加え、液相と2種の気体、合計3種類の粒子を考える。凝縮気体には、気液界面の気相側において飽和蒸気圧に対応する平衡分布関数を定義する。一方非凝縮気体に対しては、密度、温度を気相から外挿することにより定義する。これにより非凝縮気体の質量は、気相において保存される。

非凝縮気体の、蒸発・凝縮現象への影響は、いくつかのベンチマークテストを分子気体力学を基礎とした計算結果を示した過去の論文を参考に行い、モデルの妥当性を確認する。

蒸発は気液界面で起こるので、気液界面に最も近い気相領域内の格子点において、上記の境界条件（飽和蒸気圧に対応した平衡分布関数）を適用する。液の変形縮小は、局所的に蒸発した水蒸気量から求め、計算に組み込む。これにより蒸発・凝縮による液滴変形を、計算により求め得るモデルとする。この際、液面変形の計算において大きなノイズが生じると、界面と音波の干渉が正確に求められない。蒸発・凝縮による液滴変形のシミュレーション手法構築は、細心の注意を払って行う必要があり、本研究に置ける最も困難な部分である。蒸発・凝縮による流れに伴う2気体の分布、および非凝縮気体の存在によるとくに凝縮速度の変化などは、キャビテーション崩壊に決定的な影響を与え、ひいてはキャビテーション騒音予測においても見過ごせない要素であり、この複雑な現象の解析法を提供する。また、大きな応用が期待されているソノルミネセンスにおいても、マイクロバブル崩壊時の気相の挙動が重要な要素と考えられており、これらの現象の解明にも有用なツールとなる。

4. 研究成果

まずは計算負荷の小さい2次元モデルで、液滴と音波の相互作用の計算を実施した。液相と気相は異なる2種類の粒子を用いた。気相と液相が大きく異なる点は、密度と粘性それに圧縮性であるが、気液界面にはまた界面張力が働く。格子ボルツマンモデルは元来理想気体のモデルであるが、このモデルに分子間力に相当する力を組み込み液体の圧縮性を模擬する。また空気、水の場合には密度において約800倍の違いがあり、このモデル化は液相での加速度を小さくすることによって可能であることがわかっている。水中音の計算のため、液相を完全な非圧縮とせず気相での音速の4倍ほどの音速になるモデルを開発しているので、このモデルを用いた。

これらの要素を組み込んだモデルで、液滴が液面に衝突する際のシミュレーションの結果を得た。液滴と液面との衝突面で発生した水中音が液滴内および液相内を伝播するとともに、空中にも伝播していく様子が捉えられ、同時に液に細かな気泡が取り込まれることにより、音の放射が2重極的になることも確認できた。

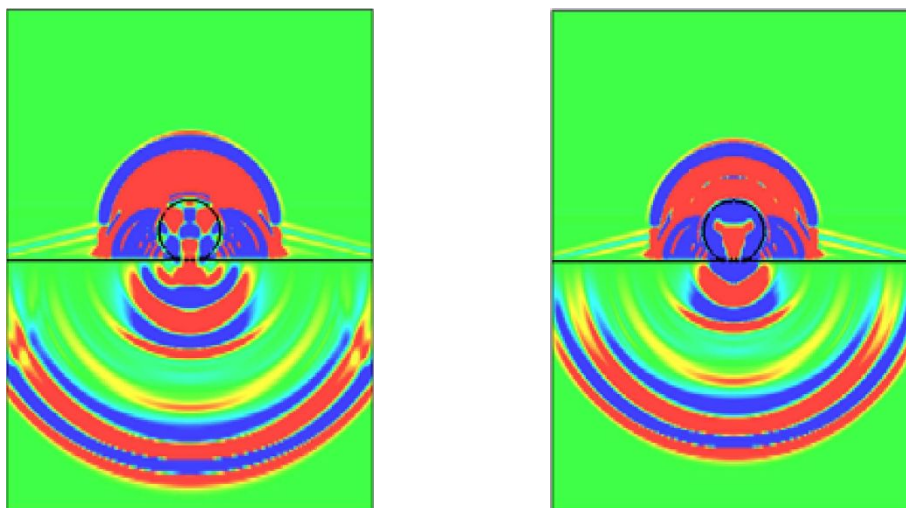
格子ボルツマン法における蒸発、凝縮現象のモデル化は、凝縮相での気体に対する速度分布関数を、その場所での飽和蒸気圧（実際には密度）に対応する平衡分布関数に置き換えることにより、簡単に達成される。ただ、格子ボルツマン法のモデルは、本来の気体分子の運動を正

確に表しているわけではないので、パラメータを適切に選ぶ必要があり、これらの最適なパラメータを見出す必要がある。今後の研究課題である。エオルス音やエッジトーンなど、純粋な流れと音の相互作用について、より安定的に計算可能なモデルを開発した。流れと音という異なるスケールの物理現象下においても、広いパラメータ範囲で安定的に計算可能なモデルである。本基本モデルをベースに、気液界面の界面張力、液体の圧縮性の要素を組み込んだモデルを開発し、液滴が液面に衝突する際のシミュレーションの結果を得ている。液滴と液面との衝突面で発生した水中音が液滴内および液相内を伝播するとともに、空中にも伝播していく様子が捉えられ、同時に液に細かな気泡が取り込まれることにより、音の放射が2重極的になることも確認できた。

一方、格子ボルツマン法における蒸発、凝縮現象のモデル化は、凝縮相（蒸発、凝縮が起こる面）での気体に対する速度分布関数を、その場所での飽和蒸気圧（実際には密度）に対応する平衡分布関数に置き換えることにより、簡単に達成される。ただ、格子ボルツマン法のモデルは、本来の気体分子の運動を正確に表しているわけではないので、パラメータを適切に選ぶ必要があり、これらの最適なパラメータを見出す必要がある。そこで、界面の境界条件において、いくつかの過去の計算モデルを導入した。ベンチマークテストを分子気体力学を基礎とした計算結果を示した過去の論文を参考に行い、モデルの妥当性を確認した。気液界面に最も近い気相領域内の格子点において、上記モデルの境界条件（飽和蒸気圧に対応した平衡分布関数）を適用し、安定性が改善することを確認した。

これらの要素を組み込んだモデルで、液滴が液面に衝突する際のシミュレーションの結果を得た。液滴と液面との衝突面で発生した水中音が液滴内および液相内を伝播するとともに、空中にも伝播していく様子が捉えられ、同時に液に細かな気泡が取り込まれることにより、音の放射が2重極的になることも確認できた。

2次元での計算法の確立の後、3次元モデルでの計算に進んだが、3次元の計算においては本モデルの拡張では安定的な計算を行うことができなかった。計算のMPI手法については取得済みであり、PCクラスターを使用した計算を実施したが、安定的な計算を可能とする最適パラメータを同定することができなかった。原因としては、3次元の分子速度空間に対して、十分な離散点を配分できなかったことが原因の1つと考えられ、今後改良モデルを継続して開発する予定である。



図：2次元液滴が液面に衝突した際に発生する空中音および水中音。

水中音の速度が空中を伝播する音速の4倍となっている。また細かな気泡が取り込まれることにより、音の放射が2重極的になることも確認できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hanada Takaya, Kataoka Takeshi	4. 巻 93
2. 論文標題 Lattice Boltzmann method for compressible Euler equations based on exact kinetic system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Fluids	6. 最初と最後の頁 2554-2569
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/flid.4987	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Jamin, T.Kataoka, T.Dauxois, and T.R. Akylas	4. 巻 907
2. 論文標題 Long-time dynamics of internal wave streaming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A 2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2020.806	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T.Kataoka and T.Hanada	4. 巻 91
2. 論文標題 New lattice Boltzmann model for the compressible Navier-Stokes equations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Fluids	6. 最初と最後の頁 183-197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/flid.4748	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Hanada, T.Kataoka	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical simulation of compressible flows using the free-molecular-type LBM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29)	6. 最初と最後の頁 6 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Hanada, T.Kataoka	4. 巻 64
2. 論文標題 Improvement of stability of Free-Molecular Type LBM by Using Median Filter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Mechanics	6. 最初と最後の頁 31-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11345/nctam.64.9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Kataoka, T.R.Akylas	4. 巻 142
2. 論文標題 On three-dimensional internal gravity wave beams and induced large-scale mean flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Studies in Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 419-432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/sapm.12257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 片岡 武
2. 発表標題 自由分子型運動学的方程式を基とした圧縮性流れの格子ボルツマン法
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片岡武, 花田卓也
2. 発表標題 圧縮性NS方程式系に対する新しい運動学的方程式モデル
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Kataoka
2. 発表標題 Transverse Instability of Surface Solitary Waves and Breaking
3. 学会等名 Workshop on Nonlinear Water Waves, Kyoto (国際学会)
4. 発表年 2018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