

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560230

研究課題名（和文）浮遊液滴の回転振動特性と内部・外部流動に関する研究

研究課題名（英文）Rotation and oscillation characteristics of levitated droplet and in and outside flow fields

研究代表者

渡辺 正（WATANABE TADASHI）

福井大学・附属国際原子力工学研究所・特命教授

研究者番号：50391355

研究成果の概要（和文）：結晶製造及び物性測定に用いる浮遊液滴技術の中心課題である回転振動液滴の挙動を明らかにするため、数値シミュレーションにより液滴内外の流れ場を検討し、液滴の振動振幅と回転数の最適な組み合わせによって、精度の高い表面張力測定が可能であることを示した。また、液滴表面から放射状の流れが発生すること、液滴周囲に大きな定常渦流れが現れること、液滴近傍に薄い流れの層が形成されること等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to study the characteristics of an oscillating-rotating droplet, which is the key point of levitation method for crystal processing and measurement of material properties, inside and outside flow fields of droplet have been simulated numerically. The accurate measurement of surface tension was found to be possible by an appropriate combination of oscillation amplitude and rotation. Radiating flows from the droplet surface, large steady vortices around the droplet, and thin flow layers on the droplet surface were also found.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：浮遊液滴、回転、振動、表面張力、数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

浮遊液滴は、容器壁の影響を受けないため、均質な結晶製造や液体金属の物性測定に利用することが検討されてきていた。しかしながら、液滴を浮遊させ制御するためには静電力や超音波などの外力を加える必要があり、液滴は、これら外力の複合作用による形状変形をおこし、液滴内部の応力バランスが変化することが知られていた。また、変形振動に

伴う内部・外部流動は結晶成長に影響を与え、物性測定における誤差の要因となることが懸念されていた。

物性測定において、表面張力は、形状変形振動の周波数から、また、粘性係数は振動の減衰から、線形理論に基づいた関係式を用いて求められる。測定のためには、液滴径及び変形のいずれをも大きくすることが望ましいが、線形理論の仮定からは、変形は十分小

さくなければならない。振動振幅及び回転の非線形効果は、それぞれ個別に、実験及び理論等によって確認されていた。しかしながら、非線形性が大きい範囲では理論的扱いが困難となり、また、液滴内部流動や応力場等に関しては実験による測定が困難であるため、非線形効果の影響、あるいは液滴内外の流れ場と液滴の回転振動挙動の関係等は明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究では、結晶製造及び物性測定に用いる浮遊液滴技術の中心課題である回転振動液滴の挙動に関して、理論的に扱うことが困難である非線形性の影響が顕著となる範囲において、実験的に計測することも困難である液滴内部の流れ場も含め、詳細な数値シミュレーションを実施することにより、液滴の回転振動特性と形状変化、内外流れ場の関係等を明らかにする。

3. 研究の方法

数値シミュレーションには、巨視的なレベルと微視的なレベルの、スケールの異なる2種類の手法を用いる。巨視的な数値シミュレーションでは、ナビエストークス方程式を解くことにより液滴内外の流れ場を求める。また、流れ場の中での液滴表面の変形運動を模擬するために、表面の運動方程式を同時に解くことにより、液滴の形状変化と流れ場の連成現象としての回転振動挙動を系統的にとらえる。液滴表面の運動については、ナビエストークス方程式の計算と同等以上に精度よく解析する必要があるため、数値解法が複雑となり計算時間がかかるが、精度の高い解法であるレベルセット法を適用する。

まず、巨視的な液滴の回転振動特性を明確にするために、摂動理論により得られる振動周波数変化について、理論値とシミュレーション結果を定性的及び定量的に比較するとともに、液滴形状変化及び振動液滴の内部流動について、実験で得られている平均的な流れ場を比較検討し、数値シミュレーションによる流動現象模擬の妥当性の確認を行う。また、詳細な数値シミュレーションのためには多大な計算機資源が必要となることから、数値計算の並列化を含む高速化、膨大な数値データの可視化を含む効率的ポスト処理等の、計算機利用技術も、あわせて確立する。これにより、理論解析の及ばない非線形効果の影響を定量的に明らかにし、物性測定において利用される線形関係式の適用範囲等を明確にする。また、振動周波数変化に及ぼす回転と振動の複合効果を、幅広い流動条件に対して検討し、物性測定に必要な精度の高い振動周波数測定のための条件を明らかにする。

さらに、巨視的な液滴の運動に影響を及ぼ

す局所的な流れ場の変動等を検討するために、微視的スケールの数値シミュレーションを実施し、より一層の液滴の回転振動挙動の理解を目指す。巨視的な数値シミュレーションにおいては、液滴表面の運動を扱うための運動方程式を必要とし、さらに、液滴内外の流れ場を接続するための解析モデル上の仮定が不可欠である。微視的シミュレーションでは、巨視的な流体方程式であるナビエストークス方程式よりも、一段階微視的なレベルから分子運動論に基づき導出されているボルツマン方程式に基づく数値解法を採用し、可能な限り解析モデル上の仮定を排除した原理的な数値シミュレーションを行う。巨視的シミュレーションと同様、理論値及び実験結果等との比較により、巨視的流れ場に対する微視的レベルからのアプローチの妥当性を確認するとともに、微視的な扱いによって得られる結果により、液滴挙動と流れ場の解明を進める。

4. 研究成果

21年度は、流体の運動方程式であるナビエストークス方程式と液滴表面の運動方程式を同時に解くことによる巨視的な数値シミュレーションによって、流れ場と液滴の基本的な回転振動特性の検討を行った。まず、表面張力測定に必要な振動周波数に及ぼす振動振幅と回転の影響を調べ、振幅の大きさと回転数の最適な組み合わせによって、精度の高い表面張力測定が可能であることを示した。また、液滴の粘性等の物性値が回転振動特性に及ぼす影響を定量化した。さらに、より高精度のシミュレーションを行うために、液滴表面位置の数値解法について検討し、振動周波数を正確に計算するためには、液滴の質量保存を厳密に保つ必要があることを明確にした。シミュレーション環境については、まず、条件の異なる多数のシミュレーション結果を効率的に理解するため、結果の可視化、動画化等のデータ処理環境を整備し、シミュレーションプログラムの出力形式の最適化を行った。また、シミュレーションプログラムにおける処理の効率化、並びに並列化の検討を進めた。さらに、より現実的な条件においてシミュレーションを行うために、浮遊液滴の制御に必要な音響力等の外力場を模擬する手法についての検討を行った。

22年度は、巨視的な数値シミュレーションを行うために開発した、ナビエストークス方程式をレベルセット法により解くシミュレーションコードにおいて、液滴の質量保存のために付加的に使用する方程式の効果を明瞭にし、パラメータの最適化を行った。これにより、本シミュレーション手法を、液滴挙動の定量的評価を確実なものにする精度の高い解析法として確立した。図1に表面張力

を表す無次元数 (We) を横軸に、振動周波数の依存性を示した。数値シミュレーションの結果と理論値は一致しており、これにより、本手法により、定量的比較が可能であることが確認できた。

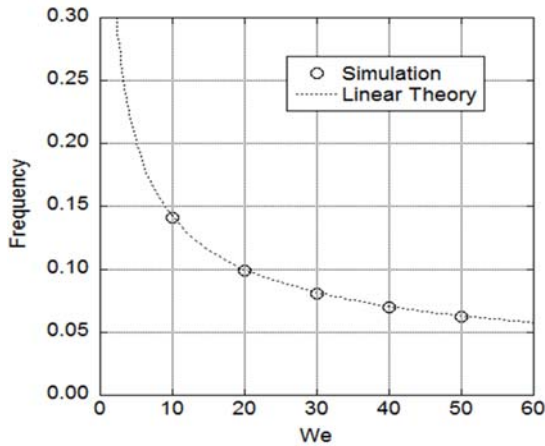


図1 振動数の表面張力による変化

次に、浮遊液滴を制御するために印加する音響力の影響を明らかにするため、開発したコードに、液滴を含む計算領域全体の圧力場の振動と圧縮性の効果を模擬できるような解析機能を追加した。ここでは、基礎方程式の対流項に振動する座標速度を導入し、また、圧力変化に応じた密度変動を考慮するためのコードの改造と検証計算を行った。これにより、音響場においては、液滴周囲に、液滴表面から圧力の振動方向へ向かう放射状の流れが発生することが明らかになり、既存の実験結果を再現することが可能となった。図2に、上下方向に振動する圧力場におかれた液滴周囲に誘起される流れを示す。液滴表面から振動方向に向かう流れが発生し、液滴上下に大きな渦が形成されることがわかる。

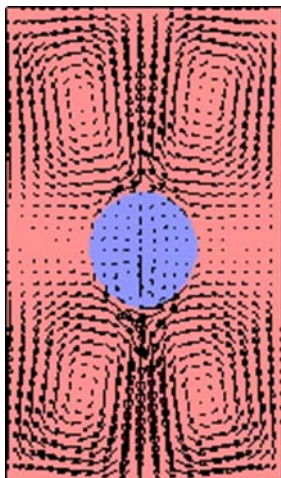


図2 音響場における液滴周囲の流れ

また、振動圧力場において浮遊液滴周囲に誘起される流れは、静止圧力場において、強制的に振動させた液滴周囲に形成される流れ場と類似したものとなることが分かった。さらに、振動圧力場内においては、液滴は定在波の節の方向へ移動し、安定にとどまることが明らかになった。

23年度は、巨視的なレベルの数値シミュレーションのために開発整備を行ってきた非圧縮性ナビエーストックス方程式に基づくシミュレーションコードを用いて、液滴表面近傍の微視的な流れを再現するために開始した詳細な計算格子を用いたシミュレーションを継続して実施した。液滴に作用する振動圧力場は、計算格子自体の振動及び擬似的な圧縮性による微小密度変化により模擬し、流体の運動方程式及び液滴表面位置の移流方程式の対流項に振動する座標速度を導入するとともに、圧力変動に対応する密度変化を考慮している。振動圧力場内の液滴表面に誘起される流れ場について、物性および振動条件は既存の実験条件を模擬しているため、計算格子やタイムステップが計算結果に及ぼす影響を検討した。また、液滴内部の圧縮性の影響も併せて検討した。これにより、計算領域の大きさが異なる場合でも液滴周囲に大きな定常渦流れが現れること、液滴表面近傍には渦流れと異なる表面流れが形成されること等を確認した。図3に液滴表面近傍の非定常な流れ場を拡大して示す。全体の流れが下方に向かう際に、表面近傍に上昇流が現れる、また、全体の流れが上方に向かう際に、表面近傍に下降流が現れることが明らかになった。

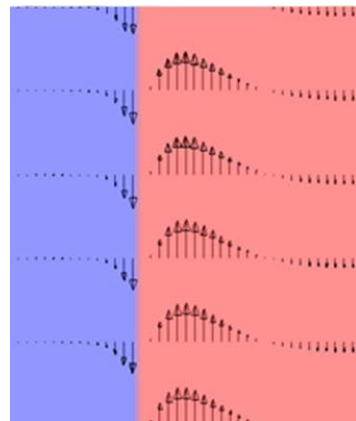


図3 表面近傍の流れ

これらの結果により、巨視的なシミュレーションモデルを用いても、ナビエーストックス方程式が成立する連続領域であれば、微視的な流れ場の再現が可能であることが明らかになった。さらに、ナビエーストックス方程式よ

りも微視的なレベルの数値シミュレーションを実施するため、分子運動論から導かれたボルツマン方程式に基づくシミュレーションプログラムの開発に着手した。気相と液相の密度差があまり大きくはない仮想的な条件においてではあるが、試験計算を実施し、基本的な液滴振動は模擬できることを確認した。

24年度は、巨視的なスケールの数値シミュレーションのために開発を進めてきたナビエーストックス方程式に基づくシミュレーションコードを用いて、振動圧力場において液滴内外に誘起される界面近傍の流れを再現するためのシミュレーションを継続して実施した。ここでは、流体の運動方程式及び液滴表面位置の移流方程式の対流項に、振動する座標速度を導入することにより液滴に作用する振動圧力場を模擬しているが、本手法の理論的背景を明確にし、音響圧力場以外の振動する気液二相流現象への手法の応用について示した。図4に、地震加速度により左右に振動する液面のシミュレーション例を示す。複雑な液面の変形挙動が、本手法により再現できることが明らかになった。

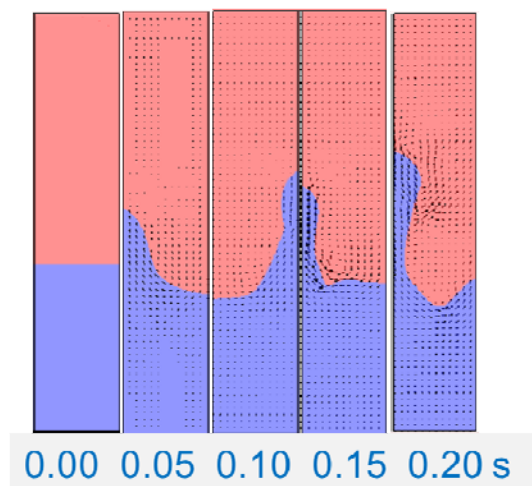


図4 地震により振動する液面

また、擬似的な圧縮性を液滴内外に導入し、圧力変動に対応する密度変化を考慮した。256台の並列計算機により、圧力変動に起因する液滴内外の流れ場の過渡現象を詳細に検討し、振動的な表面流れの発生とそのメカニズムを明らかにした。また、平均的な流れ場に発生する渦構造を検討し、液滴上下及び側面に二つの定常渦が形成されることを示した。このうち、上下の渦については振動圧力場におかれた円形物体の周りに発生する音響流に起因するものと同一のものであり、計算領域を上下に拡大するとそれに応じて渦中心の位置が移動することが確認された。側面の渦は、液滴表面近傍に形成されると理

論的に予測されているものの、これまで実験では確認されていない渦に対応するものである可能性を示した。また、ナビエーストックス方程式よりも微視的なスケールの数値シミュレーションを実施するため、分子運動論から導かれたボルツマン方程式に基づくシミュレーションプログラムの開発整備を進め、液滴の形状振動に対する、流体物性および計算パラメータの影響等を明らかにした。形状振動の振動数、振幅の減衰等について、巨視的なスケールのシミュレーションと比較検討を行い、定性的に等価な結果が得られることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Tadashi Watanabe, Numerical simulation of droplet motion and two-phase flow field in an oscillation container, Int. J. Multiphysics, 査読有, 5(2011)35-46, DOI: 10.1260/1750-9548.5.1.35
- ② Tadashi Watanabe, Nonlinear oscillations and rotations of a liquid droplet, Int. J. Geology, 査読有, 1-4(2010)5-13, <http://www.naun.org/multimedia/NAUN/geology/20-062.pdf>

[学会発表] (計10件)

- ① Tadashi Watanabe, Numerical Simulation of the Oscillating Flow around a Droplet, International Conference on Fluid Mechanics, 2013年1月9日, ミラノ(イタリア)
- ② Tadashi Watanabe, Accurate measurement of surface tension using a levitated liquid droplet, Int. Conf. Electromagnetic Processing of Materials, 2009年10月22日, ドレスデン(ドイツ)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 正 (WATANABE TADASHI)
福井大学・附属国際原子力工学研究所・特
命教授
研究者番号：50391355

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：