

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05788

研究課題名(和文) 高周波圧力場で高速に回転する浮遊液滴の内部応力場及び内外流れ場に関する研究

研究課題名(英文) Study on internal stress and inner and outer flow fields of levitated droplet rotating with high speed in high-frequency pressure field

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・教授

研究者番号：50391355

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：浮遊液滴の回転変形挙動を利用した高温溶融材料の物性評価技術の確立のために、数値シミュレーションにより液滴の形状変化と内部流れ場を検討した。分裂に至る非軸対称形状における変形と回転数の関係は、既存の実験結果とよく一致した。また、形状変化に伴って発生する液滴内部の循環流により、内部応力場は対称ではないことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations of levitated rotating droplets are performed, and the shape variation and internal flow field are studied for the development of measurement technique of high-temperature molten material properties. The relationship between the deformation of asymmetric droplet and rotation rate agrees well with the existing experimental result. It is found that the internal stress field is asymmetric due to the circulating flow formed by the deformation.

研究分野：流体工学

キーワード：浮遊液滴 回転 変形 内部応力 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

高温の熔融材料の物性評価は、福島第一原子力発電所における熔融炉心の挙動解析を行う際に不可欠であるばかりでなく、熔融金属利用や材料創製技術にとっても重要である。しかしながら、二千度を超える高温下では通常の直接接触による物性測定が困難となるため、浮遊液滴を用いる技術が検討されている。

浮遊液滴を用いた高温熔融物の物性測定においては、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。これまでの研究により、振動現象の非線形性の影響と対処方法等について明らかにされ、測定技術としての精度向上が図られてきている。しかしながら、形状振動を利用する方法は、振動を誘起することが可能な低粘性材料に限られることから、液滴を回転させ、軸対象の回転楕円体形状における遠心力、表面張力、粘性応力のバランスによる動的な形状変形を利用する方法が提案されている。ただし、この方法は高粘性材料に適しているとされており、中間の粘性領域に対しては、非軸対称形状の回転液滴の適用可能性が指摘されているものの、具体的な方法はいまだ明示されていない。

浮遊回転液滴については、回転速度と形状変化、回転楕円体から非軸対称への遷移等が、実験的に検討されているが、物性測定へ応用するための内外流れ場の研究は、これまで、ほとんど行われていない。このため、非軸対称形状液滴における表面張力と遠心力が作用する変形過程での回転数と変形量の関係や、内部応力場の特性等については、ほとんど知見が得られていない。

2. 研究の目的

本研究では、高速で回転する浮遊液滴の形状変化と内部応力場、内外流れ場を数値シミュレーションにより明らかにすることによって、新たな物性測定技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

数値シミュレーションには、流体の運動方程式であるナビエ-ストークス方程式に基づく手法を用いる。液滴内部は、液単相、外部は空気単相として、それぞれ単相流れとして厳密な数値シミュレーションを行うことにより、液滴内外の流れ場を同時に、かつ定量的に求める。流れ場の中での液滴表面の変形運動を模擬するために、液滴内外の流体の運動方程式と同時に表面の運動方程式を解くことにより、液滴の形状変化と流れ場の連成現象としての軸対称及び非軸対称変形挙動をとらえる。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はかかるものの、

精度の高い解法であるレベルセット法を適用する。これまでの研究で、レベルセット法において、レベルセット関数の精度と質量保存を確保することにより、液滴の形状振動挙動を精度良く安定に計算可能であることが示されており、非線形性の影響の小さい範囲の振動液滴であれば、その内部速度場等が詳細に計算可能であることがわかっている。しかしながら、毎秒 30 回転を超える高速回転条件において変形がさらに大きくなり、軸対称形状から非軸対称形状に遷移する過程は、これまでレベルセット法で厳密に扱われたことがないため、界面の大変形に対応可能な数値条件はもとより、液相と気相を連成させるための計算パラメータや領域サイズの検討等を新たに行う必要がある。液滴変形が大きくなり分裂に至る過程では、液滴をとらえるために必要な計算格子数が増加し、計算時間やメモリーの増加が懸念されるため、並列化を含む計算の効率化も検討する。

また、実験との比較を行うために、実験で測定されている液滴のサイズと回転数を数値的に求める方法を考案し、シミュレーション手法及び計算環境の開発整備とあわせ、現象の系統的な検討を進める。変形挙動については、回転速度と形状変化の関係を明らかにするため、非軸対称形状について、実験結果との比較を通して、シミュレーション手法の検証及び回転液滴の基本的特性の理解を進める。さらに、流動条件や物性条件の影響の検討を進め、非軸対称形状における回転速度と形状変化の関係、回転座標系における変形時の内部流動等を明らかにする。

4. 研究成果

平成 27 年度は、高速に回転する非軸対称形状液滴の数値シミュレーションを系統的、かつ定量的に行うための計算環境の整備を重点的に進めた。数値シミュレーションには、流体の運動方程式であるナビエ-ストークス方程式に基づく手法としてレベルセット法を用いた。液滴表面の変形運動を模擬するために、液滴内外の流体の運動方程式とあわせて、液滴表面からの距離を表すレベルセット関数の移流方程式を解き、液滴の質量保存を確保することにより、形状振動挙動を精度良く安定に計算できた。プログラムはフォートラン言語を用いて作成しており、並列化を施した。並列シミュレーションプログラムを効率的に利用するために、まず、linux 環境の計算機システムにおいて、フォートランコンパイラーと並列計算ライブラリーである MPI の実装を行い、各種計算環境用変数の依存関係等を整備した。次に、レベルセット法によるシミュレーションプログラムの試計算を進めたところ、データ転送に関して MPI の不具合が発生することがわかったが、プログラムの修正により回避し、20 コアを利用した並列計算による高速なシミュレーション環境を構築した。シミュレーションでは、既

存の実験により回転数と液滴形状の関係が測定されている条件を基本とし、シミュレーション領域の大きさ、回転数や物性値を変更した際の変形挙動の差、変形から分裂に至る過程等について試算を行い、回転液滴の変形挙動の基本特性が良好に再現可能であることを確認した。

平成 28 年度は、前年度に行った数値シミュレーション環境と手法の整備に基づき導入した計算機、フォートラン及び MPI ライブラリを用いた並列計算により、高速に回転する非軸対称形状液滴のシミュレーションを進めた。公表されている既存の実験結果のひとつを基準ケースとして物理的な解析条件を設定し、計算を安定に行うことができる数値パラメータを確認した。液滴の初期形状は球とし、剛体回転を与えることにより、回転変形挙動を模擬することとした。基準ケースでは、回転液滴の等価径は 4 mm であり、回転とともに形状が変化し、アレイ形状となることにより、分裂に至る。非線形性の小さい回転液滴に対するこれまでの検討では、結果に対する解析領域の影響は、液滴径の 2.5 倍ほどの解析領域で見られなくなったが、液滴が分裂する段階まで変形すると、このサイズでは、解析領域の影響が表れることがわかった。このため、詳細なシミュレーションによる定量的な検討を実施するため、感度解析により、シミュレーション結果に影響を与えない範囲を求めた。その結果、回転面の水平方向は、14.1 mm × 14.1 mm、垂直方向は 7.7 mm で充分となることがわかり、これを基準ケースの領域サイズとした。図 1 に、回転軸方向からみた液滴の変形過程の時間変化例を示す。回転楕円体形状から非軸対称形状になり、さらに中央部分がへこむことで、アレイ形状に変化していくことがわかる。

次に、実験との比較を行うために、実験で

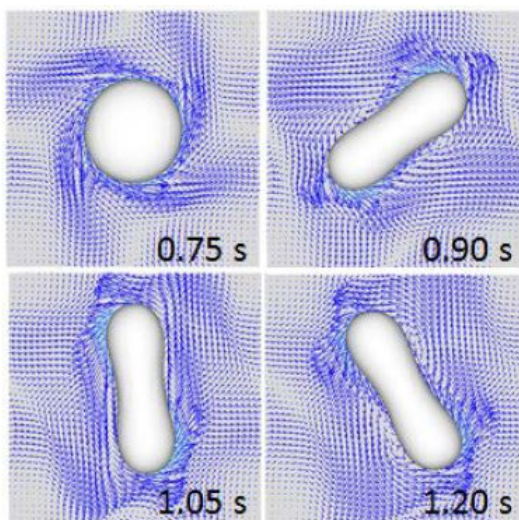


図 1 液滴サイズと回転数の関係

測定されている液滴のサイズと回転数を求める方法について検討した。実験では、液滴上で観測される最大の長さを液滴サイズとしているため、シミュレーションでは、液滴界面位置から液滴内部に向かう弦長の最大値を液滴サイズと定義し、この最大の弦が回転する角度から、回転速度を定義した。これにより求めた基準ケースでの回転数と液滴サイズの間関係を図 2 に示す。実験では、球形から非軸対称形状までを準定常的に計測しているのに対し、シミュレーションでは、静止液滴に剛体回転を与え、図 1 に示すような過渡変形により非軸対称形状を模擬している。このため、変形の小さい段階で変形振動が残り、やや実験とあわないが、準定常的に変形が増加する回転領域では、実験結果とよく一致していることがわかり、シミュレーション手法や計算パラメータ、境界条件等が妥当であったことが確認できた。

平成 29 年度は、前年度まで進めてきた数値シミュレーション環境と手法の整備に基づき、回転液滴の変形、分裂挙動を定量的に評価する数値シミュレーションを継続的に実施した。初期条件として与えた回転によるエネルギーは、回転変形とともに消費され、準定常状態においては初期値と大きく異なり、また、初期回転数により、準定常状態に静定するまでの過渡変形振動挙動が異なるため、もっとも安定に準定常状態が継続する解析条件を決定した。また、粘性係数や表面張力を変化させた場合の変形挙動をしらべ、図 2 にみられる液滴サイズと回転数の関係に及ぼすそれらの影響が小さいことを確認した。これらの検討結果を踏まえ、変形液滴内部の応力場を調べるため、準定常状態から分裂に至る過程での液滴内部流動を数値的に計測した。シミュレーションにより得られる静止座標系の流れ場を回転座標系に変換した結果、液滴内部には、回転楕円体からア

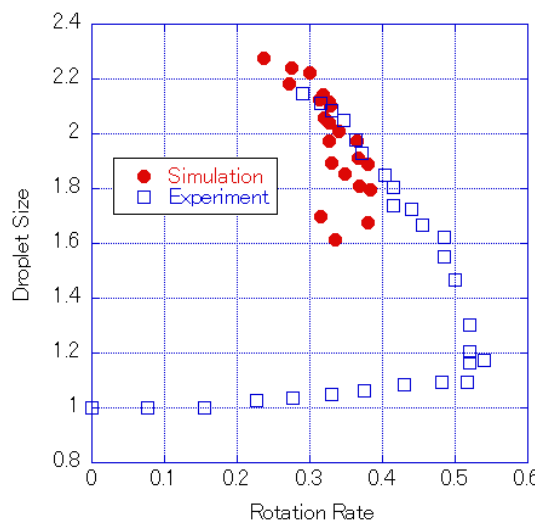


図 2 液滴サイズと回転数の関係

レイ形状に変形する過程で渦が発生し、分裂に至るまで循環流が持続することが明らかとなった。循環流は、回転楕円体の表面が凸型であるのに対し、アレイ形状への変形過程で凹型に変化する際に発生することが確認され、この循環流により、準定常状態では、内部応力場が軸対称ではないことが明らかとなった。この結果は、準定常状態から分裂に至る過程を利用して粘性係数を測定する場合に、考慮しなければならない点であることが示された。

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4件)

T. Watanabe, Deformation of a rotating two-lobed droplet, Int. J. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 10(2016)179-184. <http://www.naun.org/main/NAUN/ijmmas/2016/a442001-001.pdf>

H. Kitahata, R. Tanaka, Y. Koyano, S. Matsumoto, K. Nishinari, T. Watanabe, K. Hasegawa, T. Kanagawa, A. Kaneko, Y. Abe, Oscillation of a rotating levitated droplet: Analysis with a mechanical model, Physical Review E92, 062904(2015)062904-1 - 062904-8. DOI: 10.1103/PhysRevE.92.062904

[学会発表](計10件)

渡辺正、非軸対称回転液滴の数値シミュレーション、流体工学部門講演会、山口大、11月12日(2016)

T. Watanabe, Rotation and Deformation of a Levitated Droplet, 13th Int. Conf. on Fluid Mech. And Aerodynamics (FMA '15), Recent Advances in Fluid Mechanics and Thermal Engineering, Salerno, Italy, June. 27-29 (2015)13-18.

[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・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：

(4)研究協力者

()