

審査の結果の要旨

氏名 石川 晴基

修士（工学）石川 晴基 提出の論文は、「回転浮遊液滴のダンベル型大変形および分裂挙動の数理解析モデルの構築 (Mathematical modeling of deformation and breakup of levitated two-lobed droplets in rotation)」と題し、5章からなっている。

回転浮遊液滴が強い遠心力によってダンベル型形状を取りながら回転し分裂に至る過程は、非接触無容器での液滴の制御や未知の流体物性値測定といった工学的応用の可能性を持っており重要である。ダンベル型大変形の定常回転とこれに付随する変形は数値計算により網羅的に解かれているが、数値計算による解析は多数のパラメータが関わっており動的な変形が直観的に扱いづらい他、非定常分裂過程に対する挙動も形状の特異性ゆえにこれまであまり詳しく調べられてこなかった。以上の研究背景のもと本研究では、分裂過程を含むダンベル型回転浮遊液滴の形状変形の全体を直接的かつ簡易に、また非常に良い近似で再現する数理解析モデルを提案した。複数の先行研究との比較によりモデルの妥当性及び有効性を示し、またその液滴モデルを用いて理論解析を実行し、新たな液滴分裂の解析手法を提案している。

第1章は序論であり、回転浮遊液滴のダンベル型大変形に関するこれまでの理論及び実験を概観するとともに、本研究の位置づけを示している。特に、液滴を適切な数学関数で幾何学的モデル化をすることで変形の直感的理解が容易になり、液滴形状関数の工夫次第で特異的な形状も扱えることを述べている。そして液滴の大変形の解析手法の主流である界面分割法による数値計算との差別化を議論するとともに、本研究の新規性とその意義を明確化している。

第2章では、本研究で提案するダンベル型液滴の数理解析モデルの定式化を行っている。前半ではダンベル型回転浮遊液滴を一般的な関数で表現し、液滴全体の力の釣り合い式と角運動量変化式を導出している。後半では本研究で液滴形状関数に設定した「カッシーニ曲線」を定義し、変形特徴量であるダンベル長手方向距離と回転角速度を従属変数としてその時間変化を直接記述する「カッシーニ液滴モデル」を提案した。本章で定式化した液滴モデルは、ダンベル型形状を矛盾無く再現しつつその変形を非常に少数の変数の時間発展に落とし込む

ことに成功しており、極めて扱いやすく拡張性に優れていることが示されている。

第3章では、提案するダンベル型液滴の数理解析モデルであるカッシーニ液滴モデルが実験・数値解析の両先行研究と比して妥当であるかの確認と、その理論解析が行われている。前者に関しては、液滴モデルの定常回転解の導出とその安定性解析、有限要素解析による形状解や先行実験の変形・回転角速度履歴との最小二乗回帰等により、提案液滴モデルが非粘性液滴の定常回転変形と分裂挙動を非常に良い近似精度で再現することを確認している。後者については、液滴が低粘性かつ角運動量が保存される仮定のもとでカッシーニ液滴モデルの非定常回転・変形の支配方程式を解き、非粘性の場合には分裂過程の厳密解を得ており、低粘性の場合には摂動展開による近似解の構成を行っている。加えて、カッシーニ液滴モデルの非定常的変形のレイノルズ数等を計算し、カッシーニ液滴モデル単独で分裂に至るまでの模擬が十分に可能な粘性範囲を求めている。

第4章では、本研究の提案液滴モデルを用いて高粘性液滴の分裂間際に現れる液糸形成を伴うダンベル型液滴の回転変形が扱えるかを議論した。液糸部を双曲線関数で表現しつつカッシーニ液滴モデルと結合させた拡張モデルを定義した結果、当該モデルは液糸付きダンベル型液滴分裂の回転・変形軌道を再現したほか、モデルの直接的な数値計算により実液滴の分裂間際の挙動と矛盾無く整合することを示した。

第5章は結論であり、本研究の成果をまとめている。

以上、要するに、本論文は、浮遊液滴が遠心力により小滴に分裂する過程全体に関して、変形特徴量の時間発展を直接的かつ直観的に解くことが出来る数理解析モデルを提案し、その有効性と妥当性を示したものである。従来の数値計算手法では分裂形状の特異性ゆえ計算が困難であった液滴の分裂過程に関し、これを簡易かつ高精度に解く新たな計算手法の提案を行ったものであり、流体力学分野での様々な応用も期待でき、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。