

(論文内容の要旨)

本論文は、内側と外側の2つの流体層からなる、軸対称かつ軸方向に無限に長い2層円環形液体シートの一様な流れの、軸方向に周期的な微小擾乱に対する線形安定性、および振幅の大きい擾乱に対する非線形時間発展やシートの崩壊現象を調べることによって、2層円環形液体シートの力学的特性を明らかにしたものである。第1章では、液体シートの不安定性や非線形挙動に関する、先行研究や重要な基礎概念について説明している。第2章では、薄膜近似と呼ばれる手法に基づいて得られた新しいモデル方程式を用いて、一様な厚さと一様な軸方向流速をもつ2層円環形シートの基本流の、軸方向に周期的かつ軸対称な微小擾乱に対する安定性を、解析的及び数値的に調べている。その結果、擾乱の固有モードとして、外側と内側の界面および2層の界面である中心界面が同位相で振動する反対称モード、および外側と内側の界面が逆位相で振動する対称モードの他に、中心界面が内外界面と逆位相で振動する内部モードが存在することを見出している。また、これらのモードはいずれも長波長の擾乱に対して不安定となり、反対称モードの成長率は他のモードの成長率に比べてかなり大きいことが示されている。さらに、内外層の密度比及び厚さ比、各界面での表面張力係数の比などのパラメータの値に対するそれぞれのモードの成長率の依存性を詳細に調べ、2層の密度に大きな差があるときには、1層シートの場合と違って成長率最大となる固有モードの波数が0でない値となり、この固有モードにおける各界面の変位の振幅の比が典型的な反対称モードの振幅比とかなり異なることを明らかにしている。

第3章では、上述の基本流に線形安定性解析で得られた各固有モードを擾乱として加えた場合の2層液体シートの時間発展を、上述のモデル方程式を数値的に解くことによって調べている。そして、線形不安定な固有モードを初期擾乱とした場合、擾乱が十分大きく成長した後においては、初期モードの種類によらず反対称モードが支配的となることを示している。また、2層の密度の差が十分大きいときには、密度の小さい方の層の厚さが0となって液体シートが崩壊することを明らかにしている。さらに、安定性解析に基づく線形解と非線形数値解の時間発展を比較することによって、非線形性の効果は、内側界面の半径の最小値の減少を促進するが、各層の厚さの最小値の減少を抑制することを見出している。

また、かなり大きい振幅の線形安定な固有モードを初期擾乱とした2層液体シートの時間発展の計算では、初期モードの種類やパラメータの値によらず、液体シートは内外層の両方もしくはどちらか一方で厚さが0となって崩壊することが示されている。この最終的に厚さが0となる層については、初期厚さが大きく異なるときには、その値の小さい方の層で厚さが0となる傾向があることが示されている。また、各界面での表面張力に大きな違いがある場合には、表面張力の小さな層での擾乱波形の基本正弦波からのずれが大きくなるために、両端の界面での表面張力の平均値が小さい方の層の厚さが0になりやすいことも明らかにしている。さらに、2つの層の密度が大きく異なる場合には、密度が大きい方の層で厚さが0となる傾向があることを示している。最後に、シート崩壊に至るまでの時間である崩壊時間についても詳細に調べ、初期の固有モードの種類やパラメータの値によってこの時間が大きく異なることが示されている。

第4章では、得られた結果がまとめられている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、軸対称かつ軸方向に無限に長い2層円環形液体シートの一様な流れの、軸方向に周期的な微小擾乱に対する線形安定性、および振幅の大きい擾乱に対する非線形時間発展やシートの崩壊現象を調べたものである。2層円環形液体シートの振る舞いの解析は、先行研究例がほとんどないが、1層液体シートとの力学的特性の違いを明らかにすることが学術的に興味深いだけでなく、新たな工学的応用につながる可能性もある重要な研究テーマであると考えられる。

本論文では、薄膜近似と呼ばれるモデル化手法を初めて2層液体シート問題に適用して、モデル方程式を導出している。この導出においては、中心界面での平均圧力という新たな変数を導入し、それに関する2階の常微分方程式を含む新しい定式化に成功している。

また、このモデル方程式に基づいて、一様な厚さと一様な軸方向流速をもつ2層液体シートの基本流の微小擾乱に対する安定性を調べ、固有モードとして、反対称モード、対称モードの他に内部モードが存在することを示したあと、各固有モードの成長率の大きさの比較や、この成長率の内外層の密度比や厚さ比、液体シートの各界面での表面張力係数の比などのパラメータに対する依存性を明らかにしている。これによって、2層液体シートの不安定性の特徴が明らかにされ、1層シートとの類似点、相違点が明確になったと考えられる。

さらに、上述の各固有モードを有限振幅の擾乱として加えた場合の2層液体シートの時間発展を、モデル方程式を数値的に解くことによって調べ、この固有モードが線形不安定あるいは線形安定である場合について、各固有モード成分の成長の様子や、液体シートの崩壊パターンおよび崩壊時間の初期固有モードの種類およびパラメータに対する依存性を明らかにしている。これらの結果は、非線形性の効果が大きい状況における2層液体シートの振る舞いを、その崩壊過程に至るまで明らかにし、さらにそのパラメータに対する詳細な依存性を明らかにしたという点で、高く評価できる。

以上のように、本論文は、2層円環形液体シートの一様な流れの、微小擾乱に対する線形安定性、および有限振幅擾乱に対する非線形時間発展やシートの崩壊現象を、薄膜近似に基づく新しいモデル方程式を用いて調べ、2層円環形液体シートの力学的特性を明らかにしたものであり、本論文の研究によって、液体シートのモデル化手法や振る舞いに関する理解が大きく進展したと判断される。

よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成20年8月20日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。