

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	松嶋俊樹
論文題目	大気中の微細渦の力学に関する数値的研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本研究は、ダストデビルや竜巻に代表される、大気中の小規模渦の力学を数値的に明らかにしようとした研究である。</p> <p>発達したダストデビルや竜巻は中心軸付近で下降流を伴う2セル構造を示す。本研究では、ナビエ・ストークス方程式の厳密解の中で2セル構造を持つサリバン渦の安定性解析を初めて行った。擾乱の水平二次元性を仮定すると方位角波数2のモードの発達率が常に最大となった。しかし三次元擾乱に対する局所線形安定性解析では、水平二次元的モードと三次元的モードのどちらが最大発達するかは鉛直方向の位置に依存し、地表境界から離れた上空ほど鉛直流のシアの影響が強くなり、波数1の左手回りの螺旋構造をもつモードの発達率が最大となった。さらに、渦レイノルズ数が大きくなると、卓越するモードが左手回りの螺旋構造をもつ波数1のモードから二次元的な波数2のモードに変化することを明らかにした。</p> <p>次に、竜巻を模した渦の数値計算を行うため、平面の上方に広がる半無限領域においてナビエ・ストークス方程式の時間発展を解くスペクトル法モデルの開発を行った。粘性項に関わる演算子の固有関数を水平方向の基底関数とすることで、渦度の積分制約条件を半無限領域の数値計算に初めて適用した。また、チェビシェフ多項式を用いて鉛直方向の微分方程式を離散化して解く場合、解像度が高くとると連立方程式が悪条件となってしまうが、そのことを克服するため、2つの反復法を導入して数値解の精度を改善した。これにより、数値誤差を劇的に減らせることを示した。</p> <p>開発した数値モデルの応用の一つとして、渦輪を壁に衝突させる数値実験を行った。まず、先行研究にない大きな渦レイノルズ数の設定のもとで軸対称性を課した数値実験を行い、渦輪が壁に衝突する際に、境界付近の渦度分布に微細な構造が現れること、渦シートのシア不安定によって多くの渦輪が生成されることを明らかにした。軸対称性を仮定しない三次元の場合については、過去の室内実験と同程度の渦レイノルズ数で数値実験を行った。この実験では、境界で生成された二次渦輪が不安定となり、ある部分では主渦輪に巻きつき、主渦輪は大きく屈曲する。実験結果の解釈において、境界上の粘性応力に対する応答による境界上の仮想粒子の運動の収束・発散を表す指標となる量を新たに導入し、主渦輪と二次渦輪の相互作用によって、下端境界で花びら状のパターンが現れることを示した。</p> <p>最後に、開発した数値モデルに埋め込み境界法を適用し、回転する円柱容器内に浮力強制を与える設定にすることによって、竜巻を模した渦の生成に関する数値実験を行った。数値実験結果の解釈に際して、重みつき渦度という量を新たに導入することにより、竜巻を模した渦の時間発展のメカニズムを明快に記述することを可能にした。特に、重み付き渦度の生成項の分布を調べることにより、竜巻を模した渦が発達していく際に現れる2セル構造および、下端が粘着境界である場合に現れる流線が波打つ構造は、角運動量の分布に依存する重み付き渦度の生成項によって作られることを明らかにした。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

大気中の特に地表面付近には、ダストデビルや竜巻などの小規模渦が頻繁に発生しているが、それらの挙動は地表面の影響もあって複雑である。本研究は、理想化された渦に関する安定性解析、地表面の影響を取り込み高精度の数値実験を行う数値モデルの新しい手法に基づいた開発、そしてそれを用いた数値実験結果の新しい概念を導入した解釈、の3つの部分からなっており、大気中の微細渦の力学を解明するための数値的研究を包括的に行っている点に特色がある。

本研究ではまず、サリバン渦と呼ばれる、ナビエ・ストークス方程式の厳密解に関する安定性解析を行った。サリバン渦は、中心軸付近で下降流を伴う2セル構造を持つ解であり、発達したダストデビルや竜巻の一種の理想化モデルとして考えられている。サリバン渦に類似した2セル渦の安定性については先行研究でも調べられていたが、そこでは擾乱の二次元性が仮定されているなど不十分なものであった。本研究では、鉛直流のシアの影響も考慮した三次元の線形安定性解析を行うことによって、局所的に発達する擾乱の構造が二次元的になるか三次元的な螺旋状になるかが鉛直方向の位置および渦レイノルズ数に依存することを初めて明らかにした。これは、ダストデビルや竜巻に見られる多重渦構造の成因の理解につながる重要な成果である。

本研究では次に、平面の上空に広がる半無限領域においてナビエ・ストークス方程式の時間発展を解くスペクトル法モデルの開発を行った。このような半無限領域におけるスペクトル法モデルの構築は過去の研究に例をみないものであり、人工的な境界を側方または上方に課す必要がないという画期的なものである。また、そこでは、下端境界条件を渦度の積分制約条件という形で組み込むという手法を半無限領域の数値モデルとしては初めて取り入れただけでなく、数値解の精度を高めるための複数の反復手法を導入するなど、独自の工夫を施すことによって、高解像度計算を可能にしているなど、数値流体力学的見地からも高く評価できるものである。

本研究では最後に、開発された数値モデルを用いて、渦輪の壁衝突および竜巻を模した渦に関する数値実験を行っている。開発された数値モデルの能力を生かした高解像度・高精度計算を行い、先行研究では報告されていなかった下端境界付近の渦度場の微細構造を新たに見出している。また、境界上の粘性応力に対する応答による境界上の仮想粒子の運動の収束・発散を表す指標となる量を新たに導入し、室内実験で報告されている粒状体が存在する壁への渦輪衝突時に生じる花びら状のパターンの成因を明らかにしている。さらに、軸対称な場に関して、本研究で新たに導入された重みつき渦度という概念は、竜巻を模した軸対称渦の時間発展における2セル構造の生成過程の力学について理解を深めるための新しい道具となりうるものである。

以上のように、本研究の成果は、申請者の大気力学に関する力量の高さを立証している。また、大気力学の発展に寄与するものであり、高く評価できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について2017年1月18日に試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降