

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	さいとう なおあき 齊藤 直彬
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 23 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科地球惑星科学専攻
(学位論文題目) 回転系における熱対流と平均流の相互作用に関する研究	
論 文 調 査 委 員	(主査) 石岡 圭一 准教授 余田 成男 教授 町田 忍 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	齊藤 直彬
論文題目	回転系における熱対流と平均流の相互作用に関する研究		

(論文内容の要旨)

惑星大気中の熱対流を考える場合、惑星回転の影響だけでなく、背景の流れ（平均流）の影響も考慮する必要がある。本研究は、木星等の外惑星を念頭に置き、回転系において、水平方向に $\sin$ 型の速度分布を持つ平均流（ $\sin$ 型水平シア流）中の熱対流に関する数値実験を行い、回転系における熱対流と平均流の相互作用について体系的に調べた研究である。回転系の回転軸の鉛直方向からの傾きの設定を変えることによって、惑星上の緯度の違いによる影響を取り入れている。

まず、回転軸が鉛直方向を向いている場合について非線形時間発展および線形安定性解析を行い、時間発展の初期に形成されるロール状対流のパターンが崩れる原因が定常ロール解の不安定によるものであることを示した。さらに、エネルギー解析も行うことにより、時間発展において自発的に出現する順圧（鉛直方向に依存性のない）構造をもつ水平波数 1 の渦構造のパターンの成因が、対流によって歪められた平均流の順圧不安定によるものであることを明らかにした。

次に、回転軸が鉛直方向から傾いた場合について非線形時間発展および線形安定性解析を行い、時間発展において出現する杉綾模様状の構造をもつロール状対流が、初期場の持つ不安定固有モードのうちで最も発達率が大きいモードが発達したものであることを示した。この杉綾模様状の構造をもつロール状対流が出現すると平均流が加速される。不安定固有モードの二次効果を解析することにより、不安定固有モードによる平均流加速は、直接的な運動量輸送による効果よりむしろ二次的に生成される鉛直流にはたらくコリオリ力の効果によって引き起されていることを明らかにした。さらに、不安定固有モードの構造を詳細に解析することにより、この二次的な鉛直流は、杉綾模様状の構造をもつロール状対流のロールの軸が傾いていることと、水平シア流によって対流の強度が空間依存することとによって、熱輸送による浮力偏差が鉛直平均成分をもつことによって生成されることを示した。

さらに、回転軸の鉛直方向からの傾きと、テイラー数（系の回転角速度に対応）およびレイリー数（上下の温度差に対応）の 3 つの実験パラメータの設定を広範に変えることにより、熱対流と平均流の相互作用のこれらのパラメータに対する依存性を調べた。非線形時間発展により、平均流加速が顕著に見られるパラメータレジームとして、杉綾模様状のロール状対流が平均流を加速するレジームだけでなく、大規模な東西ロール状対流が平均流を強く加速するレジームも存在することを見い出した。次に、平均流の方向に対称性を課した 2 次元計算および線形安定性解析を行うことにより、安定定常な 2 次元ロール状対流の解が存在するパラメータ範囲を求めた。これにより、平均流を強く加速する大規模な東西ロール状対流は、安定定常な 2 次元ロール状対流の解または定常解まわりの準周期解への遷移によって現れることを明らかにした。さらに、この大規模な東西ロール状対流による平均流加速のメカニズムに関して考察し、ロール状対流に伴う鉛直流にはたらくコリオリ力が平均流を加速することによって平均流のシアが増し、それによって対流が存在している領域の不安定性が増大して対流がさらに強化される、という正のフィードバック効果が重要であることを示した。

(論文審査の結果の要旨)

熱対流は、惑星大気の運動形態の主要な構成要素の一つである。惑星大気中の熱対流を考える場合、惑星の自転の効果だけでなく、背景の流れ（平均流）の影響を無視することができない。回転系において熱対流に対する平均流の影響を調べた研究は過去に数多くなされているが、その多くは平均流が鉛直方向に速度差をもつ鉛直シア流の場合についてのものである。これは、現実の地球大気においては平均流の鉛直シアの影響が大きいためである。一方、木星等の外惑星を考える場合、平均流が水平方向に強い速度差を持つため、水平シア流中の熱対流の研究が必要となる。ところが、回転系において水平シア流中の熱対流を扱った研究は過去に多くはなされておらず、かつ実験パラメータの設定等も限定されたものであった。本研究は、このような背景に基づき、惑星大気の運動を理解するための地球流体力学の基礎研究として、回転系における熱対流と水平シア流との相互作用について体系的に調べた研究である。木星等の外惑星を念頭において、扱う水平シア流として $\sin$ 型の流速分布をもつ流れを扱うなど、基本的な研究の枠組自体は過去の研究を踏襲している。しかし、非線形時間発展を行うだけでなく、線形安定性解析、エネルギー解析を組み合わせることで現象のメカニズムを詳細に明らかにすること、および広範なパラメータ範囲を調べていることに本研究の特色がある。

本研究は、まず、過去の研究で見い出されてはいたが十分に解析されていなかった 2 つの現象について、詳細な解析を行うことによりそれらのメカニズムを初めて明らかにした。その 1 つは、回転軸が鉛直方向を向いている場合に波数 1 の渦構造が自発的に出現してくるというものであるが、それが対流によって歪められた平均流の不安定によって励起されたものであることを示した。2 つ目は、回転軸が鉛直方向から傾いている場合に生じる杉綾状ロール対流による平均流加速のメカニズムである。本研究により、この平均流加速が主に鉛直流にはたらくコリオリ力によっているということが明らかになった。これらの成果は、過去の研究を発展させたという意味だけでなく、これまで示されていなかったメカニズムを明らかにしたという点で、新たな知見を与えるものである。

本研究はさらに、広範なパラメータ領域を調べることにより、大規模な東西ロール状対流が出現し、それに伴って非常に強い平均流加速が生じるパラメータ領域が存在することを初めて発見した。このような強い加速現象の発見は、木星等の外惑星大気に見られる強いジェットの成因について、新たな候補を与えうるものである。また、本研究は、この加速現象が、対流に伴う鉛直流にはたらくコリオリ力によって平均流のシアが強化され、それによってより対流が強化されるという正のフィードバックがはたらいて生じていることも明らかにした。これは、回転軸が鉛直方向から傾いていることと、平均流の水平シアが存在することとが必須のメカニズムであり、このようなフィードバックメカニズムの発見は、地球流体力学の理論的研究として価値のあるものである。

以上のように、本研究は、申請者の地球流体力学および数値実験に関する力量の高さを立証するものである。また、地球流体力学および惑星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、平成 24 年 1 月 23 日に論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った。その結果合格と認めた。