

学位審査報告書

（ふりがな） 氏 名	（やまもと ひろき） 山本 博基
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 24 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） 惑星大気スーパーローテーションの力学に関する研究 — 自転軸対称な理論モデルの構築と数値実験 —	
論 文 調 査 委 員	（主査） 余田 成男 教授 町田 忍 教授 石岡 圭一 准教授

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山本 博基
論文題目	惑星大気スーパーローテーションの力学に関する研究 — 自転軸対称な理論モデルの構築と数値実験 —		
(論文内容の要旨)			
<p>金星や土星の衛星タイタンでは、自転を何倍もの速さで追い越す高速の東西風が観測されており、それはスーパーローテーションと呼ばれている。スーパーローテーションは惑星大気の大循環を特徴づける運動形態のひとつであり、その基本的形成メカニズムの説明として、夜昼間対流に着目した仮説、重力波に着目した仮説、あるいは子午面循環に着目した仮説などが提唱されてきた。しかし、金星やタイタンの大気の観測データが限られていることもあり、未だに形成メカニズムは解明されていない。近年、スーパーコンピュータの飛躍的な性能向上にとともに、金星の大気大循環モデルを開発してスーパーローテーションを再現する研究も盛んになってきたが、十分に現実的な物理的設定で再現できる段階には至っていない。また、そのような複雑な数値モデルを用いて得られた結果を理解し解釈するには、理想化された単純な大気モデルなど階層的なモデル群を用いてバランス良く研究を進める必要がある。</p> <p>本研究は、惑星大気大循環の一形態であるスーパーローテーションの力学について、理想化された自転軸対称な大気の基礎方程式系をもとに理論的・数値的に研究したものである。本研究で構築した理論モデルによってスーパーローテーションの強度の見積もりと力学的平衡状態の分類を行い、広いパラメータ範囲で、理論モデルの妥当性・有効性を数値実験により確かめた。</p> <p>基礎方程式系として、自転軸対称な2次元ブシネスク流体のプリミティブ方程式系を用いた。放射による加熱・冷却は赤道対称なニュートン加熱・冷却で与え、非軸対称な擾乱による運動量輸送の帯状平均効果は強い水平渦拡散として与えている。このような系では、子午面循環と水平拡散により自転方向の角運動量が赤道上空に供給されるため、スーパーローテーションが生成・維持されることが可能である。この力学メカニズムは、仮説の提唱者の名にちなんでギェーラシメカニズムと呼ばれている。</p> <p>この基礎方程式系において定常性を仮定し、風速と温位の空間分布を仮定することで、惑星大気大循環を特徴づける次の4つの無次元数を未知数とした連立4元代数方程式で記述される理論モデルを構築した。すなわち、スーパーローテーション強度、地表付近の南北風速にもとづくロスビー数、大気上端の南北風速にもとづくロスビー数、および、鉛直平均した極・赤道間温位差の放射対流平衡温位場のそれに対する割合、の4つである。この連立方程式からスーパーローテーション強度に関する5次方程式を導出し、その唯一の正の解を、スーパーローテーション強度の理論の見積もりとした。そして、得られるスーパーローテーション強度が3つの外部無次元パラメータだけで決まっていることを示すとともに、残りの無次元数の見積もりも得た。</p>			

次に、基礎方程式系を十分な解像度で離散化した数値モデルを作成して、時間発展計算を行い、広いパラメータ範囲で、定常状態あるいは統計的平衡状態にある数値解を得た。数値解の定常場あるいは時間平均場から計算したスーパーローテーション強度を理論値と比較したところ、その相対誤差は50%未満であった。これは外部パラメータの値によってスーパーローテーション強度が5桁も変化していることに比べて非常に小さく、理論値がよい見積もりであることを示している。

さらに、理論モデルを調べることで、解の典型的な力学的平衡状態は、旋衡風平衡、地衡風平衡、あるいは水平拡散平衡のそれぞれに対して、子午面循環による熱の移流が無視できる状態と無視できない状態の組合せがあり、6種類に分類できることを明らかにした。これらにギアラシメカニズムが働いていない直接循環の解を加えた7種類の解について、パラメータ空間における存在領域を見積もり、再び数値実験でその理論的見積もりの妥当性を確認した。

最後に、水平拡散が弱い場合の大気大循環について理論的考察と数値実験を行った。まず、本研究で用いた基礎方程式系において、水平拡散がなければ、地球型ハドレー循環の理論モデルとして知られているヘルド・ハウモデルが成り立つことを指摘した。そして、数値実験により、定常解の水平拡散の強さに対する依存性を明らかにした。水平拡散が弱くなるにつれて、東西風の子午面分布は、スーパーローテーション型で剛体回転に近く赤道上空にジェットをもつ分布から、中緯度にジェットをもつ分布に変わり、さらに水平拡散が無視できるほど弱くなると、ヘルド・ハウモデルの解に近い分布に変化していくことが分かった。

(論文審査の結果の要旨)

金星やタイタンで観測されている惑星大気のスーパーローテーションと呼ばれる現象は、惑星大気大循環を特徴づけるひとつの基本的な運動形態であるが、その形成メカニズムは未だに解明されていない。申請者は、有力な学説のひとつである、子午面循環と水平拡散による角運動量輸送に着目したギーラシメカニズムに焦点をあて、その枠組みのもとに理論モデルを構築し、数値実験を行って、スーパーローテーションの力学を研究した。

自転軸対称な2次元ブシネスク流体のプリミティブ方程式系を基礎方程式系として、定常性と従属変数の空間分布を仮定することにより、無限自由度の非線型偏微分方程式系から低自由度代数方程式系を導くという独自の手法を考案して、理論モデルを構築した。そして、スーパーローテーション強度が3つの外部無次元パラメータだけで決まっていることを初めて示すことができた。また、基礎方程式系の時間発展計算を行うための数値モデルを独力で構築し、数値実験を行うことにより、パラメータ空間の広い範囲にわたってこの理論見積もりが有効であり、理論モデルの構築に用いた仮定も妥当であることを検証している。理想化した状況ではあるが、この理論モデルは惑星大気における角運動量の移流拡散問題に対して先験的な見通しを与えるものであり、惑星大気大循環の普遍的理解に寄与すると評価できる。

この理論モデルはさらに、解の力学的平衡状態を分類し、パラメータ空間内でそれらの存在領域を同定するのにも有効である。また申請者は、理論モデルと基礎方程式系の解の水平拡散に対する依存性を考察することで、水平拡散を弱くした場合には、地球型ハドレー循環解に近づいていくことを明らかにした。このように本研究で得られた知見は、スーパーローテーションの力学の大枠を理解するうえで有用であり、惑星大気大循環モデルのような複雑な数値モデルで得られるシミュレーション結果の解釈にも役立つと考えられる。

この研究は、申請者の地球流体力学および大気力学に関する力量の高さを立証するものである。また、惑星大気力学の発展にも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。