

強い圧縮性と深度依存物性をもつ流体中の温度成層の安定性: スーパー地球のマン トル対流に関する考察

On the stability of thermal stratification of highly compressible fluids with depth-dependent physical properties

亀山 真典^{1*}

Masanori Kameyama^{1*}

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

¹ Geodynamics Research Center, Ehime University

近年の天文学的観測手法の進歩により、太陽系以外の惑星系の存在が数多く知られるようになってくると、そこには地球より大きな地球型惑星がいくつか含まれているらしいことも分かってきた。これらは最大で地球の10倍程度の質量を持っており、「スーパー地球」(super Earth) などと呼ばれている。「スーパー地球」の発見により、地球より大きな地球型惑星のマンタルダイナミクスが新たな研究テーマの1つになってきた。しかしながら過去の研究のほとんど全てにおいて、「スーパー地球のマンタル対流」が地球用モデルからの単なる「外挿」として取り扱われており、惑星の大きさの違いに起因するさまざまな効果が十分に反映されているとはいえない。そこで本研究では、スーパー地球のマンタル内部に存在する大きな圧力(～TPa)条件下で重要になると期待される、マンタル物質の(i)断熱的圧力変化、および(ii)熱膨張率と熱伝導率の深さ変化、の2つに注目し、これらがスーパー地球のマンタル内の鉛直方向の流れに与える基本的な影響を考察した。

モデルとして、静止状態にある圧縮性流体の層を考える。流体中の重力加速度と定圧比熱は一定とするが、熱膨張率と熱伝導率は深さとともに指数関数的に変化(前者は減少、後者は増加)するものとした。流体層の上面と下面での温度は一定とし、流体層内部の温度分布は鉛直方向の定常1次元熱伝導状態によって与えられるものとする。本研究では、この流体中の温度成層構造の安定性を「パーセル法」により検討する。具体的には、ある深さにある流体塊(パーセル)を鉛直方向に断熱的に(微小)変位させたときに、流体塊がそのまま動き続ける(静力学的不安定)か、あるいは元の位置に戻ろうとする(静力学的安定)かのどちらかを調べる。特にここでは、流体の熱膨張率・熱伝導率の深度依存性、及び流体の圧縮性の効果の強さをさまざまに変化させたときに、流体層中で静力学的不安定となる深度の範囲がどう変化するかを調べた。

本研究の結果、圧縮性の効果を取り入れた場合には、熱膨張率の深度依存性が大きいほど流体層全体が不安定になりやすいことが分かった。これは深部の熱膨張率が小さいほど断熱温度勾配が小さく、鉛直方向の変位によって熱的な浮力を失いにくいことに起因している。また地球質量10倍の「スーパー地球」に相当する条件では、静力学的に不安定となる深さ範囲が、流体層の置かれた条件によって大きく変わることも分かった。例えば流体層全体が静力学的に不安定となるのは、熱膨張率の深さ依存性が十分強く、かつ表面温度が十分低い場合に限られる。特にこれらの条件を満足しない「スーパー地球」のマンタルの内部は、静力学的に不安定な「対流圏(troposphere)」と安定な「成層圏(stratosphere)」の2つの層に分離している可能性が示唆される。なおこれらの結果は圧縮性の効果を無視した場合とは極めて対照的であり、「スーパー地球」のマンタル対流の描像や進化の過程を理解する上で、圧縮性の効果が決定的に重要であることを意味している。

さらに極端な例として、表面温度が極めて高い条件で解析を行ったところ、流体層全体が静力学に安定になる場合が検出された。これより、主星に近い軌道を公転するスーパー地球の中には、マンタルが全く対流しない惑星が存在する可能性すら考えられる。

キーワード: スーパー地球, マンタル対流, 断熱圧縮, 温度成層

Keywords: super-Earths, mantle convection, compressibility, thermal stratification