

MIS021-P01

会場: コンベンションホール

時間: 5月22日 14:00-16:30

## 惑星大気におけるエントロピー生成率の研究: 地球, 火星, タイタン Entropy Production in Planetary Atmospheres: Earth, Mars, Titan

福村 洋介<sup>1\*</sup>, 小澤 久<sup>1</sup>

Yosuke Fukumura<sup>1\*</sup>, Hisashi Ozawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院総合科学研究科

<sup>1</sup>Hiroshima University

今日、宇宙科学の進歩により惑星を含めた天体の様々な状況(温度、大気の成分、地形など)を知ることができるようになった。例えば2010年には惑星探査機「はやぶさ」が小惑星「イトカワ」から微粒子を採取し帰還、そして金星の探査機「あかつき」が打ち上げられるなど、日々惑星の研究・調査が行われている。

惑星大気の温度や放射の状態を知るためには、大気中の熱輸送分布を把握する必要がある。しかしながら惑星大気は乱流状態であるため、大気中の熱輸送を正確に把握することは非常に困難である。そこで惑星大気の平均的な状態が熱輸送に伴うエントロピー生成率が最大の状態に対応するという仮説 [Sawada, 1981] に着目する。そしてその仮説が地球、火星、タイタンの大気で成り立つかを検証する。このような惑星大気の研究としては、Lorenz et al. [2001] があるが、それは惑星を南北2つの領域だけを考えた定性的な検証である。本研究ではそれよりも詳しい定量的な検証を行う。

研究方法として、惑星を緯度方向に等面積になるように  $n$  個の領域に分割した南北1次元の熱輸送モデルを作成する。次に南北方向の熱輸送に伴うエントロピー生成率を計算し、エントロピー生成率が最大の条件から推定される熱輸送分布、温度分布、そして放射量分布を惑星大気の観測値と比較する。このモデルの利点は少ない限られた変数(情報)で結果を得ることができる点にある。図1に地球、火星、タイタンについて、エントロピー生成率が最大になる条件から推定した地表温度、長波放射の放出率、そして短波放射の吸収率の緯度分布の推定値(実線)と観測値(点線)を示す。火星の短波放射(f)、タイタンの長波放射(h)と短波放射(i)は観測値が揃わなかったため示していない。

地球では地表温度(a)、長波放射(b)、短波放射(c)について推定値と観測値が比較的よく合っている。地球の長波放射(b)では赤道域と高緯度帯で推定値と観測値でずれがあるが、それはモデルの反射率(アルビード)を全体で平均値を使っているため、そして雲の効果をモデルに入れていないためだと考えている。火星では地表温度(d)、長波放射(e)は比較的よく合っている。タイタンの地表温度(g)は推定値と観測値に約+5Kから-10Kのずれがある。この原因は現段階では未解明であり、火星とタイタンの観測値データの収集とともに今後の検討課題である。

### 【参考文献】

Lorenz, R.D. et al., Geophysical Research Letters, Vol 28, 415-418, 2001.

Sawada, Y., Progress of Theoretical Physics, Vol 66, No. 1, 68-76, 1981.

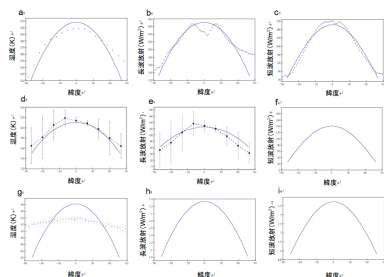


図1. 地球: a) 地表温度 (K), b) 長波放射 ( $W/m^2$ ), c) 短波放射 ( $W/m^2$ ).  
火星: d) 地表温度 (K), e) 長波放射 ( $W/m^2$ ), f) 短波放射 ( $W/m^2$ ).  
タイタン: g) 地表温度 (K), h) 長波放射 ( $W/m^2$ ), i) 短波放射 ( $W/m^2$ ).  
実線: エントロピー生成率が最大の条件から示される推定値.  
点線: 観測値.  
誤差範囲(d, e)は季節変化によるもの。

キーワード: エントロピー生成, 惑星大気, 放射

Keywords: Entropy Production, Planetary Atmosphere, Radiation

## 熱フラックス固定境界条件下での回転球殻熱対流の線形安定性 Liner stability of thermal convection in rotating spherical shells with fixed heat flux boundaries

佐々木 洋平<sup>1\*</sup>, 竹広 真一<sup>2</sup>

Youhei SASAKI<sup>1\*</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 大学院理学研究科 数学教室, <sup>2</sup> 京都大学 数理解析研究所

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Kyoto Univ., <sup>2</sup>Research Inst. Math. Sci., Kyoto Univ.

回転球および球殻内のブシネスク熱対流問題は天体内部流体運動を考察するための基本的な問題としてさかんに研究されてきている。そのほとんどの研究において熱的境界条件に温度固定境界条件が用いられている。しかしながら、熱フラックス固定境界条件は地球物理学的観点から重要であるかもしれない。たとえば、地球流体核内の対流はマントル対流により引き起こされる核-マントル境界での熱流束に支配されているであろうと議論されている。実際、地球流体核を模した回転球殻ダイナモ計算においては、熱フラックス固定境界条件を適用した研究がいくつか行われている(たとえば [1],[2])。しかしながら、それらは解の振舞いに対する熱境界条件の影響には注目しておらず、断片的な知見しか得られていない。

非回転系の平板間の熱対流の場合には、熱的境界条件を変えると対流の構造が変わってしまうことが知られている。温度固定境界条件での熱対流(いわゆるレイリー=ベナール対流)の場合、縦横比が1程度の対流セルが臨界モードとなるのに対して熱フラックス固定条件の下では水平に伸びた横長のセルが臨界モードとなることが示されている [3]。回転系の場合では、回転球殻中の柱状対流のモデルである上下境界面の傾きを伴う円筒モデルを用いた研究が行なわれており [4]、地形性ベータ効果が存在する場合でもやはり東西波数の小さい横長の対流セルが臨界モードとなることが予想されている。しかしながら、完全な球殻の場合はいまだ詳細に調べられていない。

そこで本研究では、熱フラックス固定境界条件下での回転球殻熱対流の線形安定性解析を系統的に行った。プランドル数を1、エクマン数を $10^{-3}$ に固定し、球殻の厚さ、力学的境界条件、一様内部熱源の有無を系統的に変えて計算を行った。補足的実験として、いくつかの場合についてエクマン数を $10^{-4}$ に小さくした計算も行った。

結果は以下の通りである:

### (1) 内部熱源が存在する場合

力学的境界条件が自由すべり条件の場合には、球殻の厚さによって臨界モードが変わり、球殻が厚い場合には東西波数3-4が臨界モードとなるのに対して、球殻が薄くなると東西波数1のモードが臨界モードとなる。中立曲線は単調ではなく高波数側に極小点を伴っているのが特徴的である。これは回転軸に沿った円筒モデルを用いた記述 [4] と整合的である。

一方、球殻両端が滑り無し条件の場合には、球殻の厚さによらず東西波数1のモードが臨界モードとなり、中立曲線は東西波数とともに単調に増加している。しかしながら、エクマン数を小さくすると、自由すべり条件の場合と同様、中立曲線に極小点が出現するようになる。

### (2) 内部熱源が無い場合

力学的境界条件によらず東西波数1のモードが臨界モードとなる。

両端が自由すべり条件の場合には、球殻が厚い場合には中立曲線は波数とともに単調増加するものの、球殻が薄い場合もしくはエクマン数が小さい場合には極小点が出現する。一方、両端が滑り無し条件の場合には球殻の厚さによらず中立曲線は単調増加している。

[1] Sakuraba and Roberts, Nature Geoscience, 2, 802-805 (2010)

[2] Hori et al., Phys. Earth Planet. Inter., 182, 85-97 (2010)

[3] Ishiwatari et al., J. Fluid Mech., 281, 33-50 (1994)

[4] Takehiro et al., Geophys Astrophys. Fluid Dyn., 96, 439-459 (2002)

キーワード: 回転球殻熱対流, 熱境界条件, 熱フラックス固定

Keywords: Thermal convection in a rotating spherical shells, Thermal boundary condition, Fixed heat flux condition

MIS021-P03

会場: コンベンションホール

時間: 5月22日 14:00-16:30

## Hydroelectric coupling in a porous medium heated from below Hydroelectric coupling in a porous medium heated from below

Raphael Antoine<sup>1\*</sup>, Kei Kurita<sup>1</sup>

Raphael Antoine<sup>1\*</sup>, Kei Kurita<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., University of Tokyo

<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., University of Tokyo

The mechanism of convection and electric phenomena around an isolated heat source in a fluid saturated porous media is of interest in geothermal processes and volcanology. Laboratory and numerical experiments (2D-3D) of transient convective flows and induced electric potentials in a porous layer with a local bottom heat source are reported. Axisymmetric laminar plumes are experimentally generated by a small electric heater in a tank filled with water-saturated glass beads. The flow pattern is investigated for Rayleigh numbers up to 8000. Plumes ascent in two different regimes. For  $Ra < 1600$ , the velocity of the plume head slowly decreases during the ascension in the porous medium (consistent with Elder, 1967). For  $Ra > 1600$ , the velocity increases owing to the development of the thermal boundary layer, remains nearly constant during the rise, before decreasing at the top of the tank. Finally, the electric potentials induced by the development of the plume are analyzed. It is shown that the signal systematically decreases when the plume is detaching itself from the bottom, before increasing during the ascension of the water. This study is the first step to further experimental and numerical works on convective cells generation and induced electrokinetic potentials in a high permeability porous medium.

Elder J.W., Transient convection in a porous medium, *J. Fluid Mech* (1967), vol. 27, part 3, pp. 609-623

キーワード: Analog Experiment, Convection, Self-Potentials, Hydroelectric Coupling, Porous medium, Numerical modeling  
Keywords: Analog Experiment, Convection, Self-Potentials, Hydroelectric Coupling, Porous medium, Numerical modeling

MIS021-P04

会場: コンベンションホール

時間: 5月22日 14:00-16:30

## 非粘性・磁気地衡流ダイナモの非線形解 Nonlinear solutions of inviscid magnetostrophic dynamo

櫻庭 中<sup>1\*</sup>

Ataru Sakuraba<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup> School of Science, University of Tokyo

地球の液体コアの対流は、(1) 粘性が流れにほとんど影響をおよぼさず、(2) 磁気エネルギー密度が運動エネルギー密度にくらべて大きい、という動力学的状態にあると考えられている。これまでのコア対流の数値シミュレーションでは、なるべく粘性率を小さくおさえることで、相対的に地球回転の効果が強くあらわれるような状態を再現し、強い磁場の解を得る、というアプローチがとられてきた。この場合、解くべき方程式は、粘性流体のナビエ・ストークス方程式であり、その時間発展を計算することは、技術的にそれほどむずかしくはない。問題はただ、発生する渦の時間・空間スケールが、粘性の低下とともに小さくなるために、必要な空間グリッド幅や、時間積分のステップ幅が小さくなって、計算時間がかかるだけのことである。このアプローチは、いわば地球ダイナモ問題に対する正攻法であり、とくにコアの電磁流体力学的乱流状態や、地磁気短周期変動の起源をあきらかにするためには必須である。

いっぽう、地球のコア対流がもつ2つの特徴を再現するために、粘性ゼロ、磁気エネルギー密度無限大の極限をとるのが、磁気地衡流近似のアプローチである。運動方程式の粘性項と慣性項(移流項)がともに無視されるために、うすい粘性境界層や短周期の電磁流体力学的波動などはすべてカットされる。したがって、大規模な流れと磁場の構造がどのように組織化されるか、またそれらがどのような長時間変動を示すか、というコア対流の基本的問題をあきらかにする上では、重要なアプローチであると考えられる。

この後者の研究テーマについて、わたくしは2年前にこのセッションで発表をおこなったが、当時はまだ、磁気地衡流ダイナモの解を得るにはいたらなかった。今回の発表では、磁気地衡流ダイナモの数理と計算上の技術的問題に言及しつつ、その後の進展を報告する。

キーワード: 地磁気, 惑星磁場, 電磁流体力学

Keywords: geomagnetic field, planetary magnetic field, magnetohydrodynamics