

太陽内部熱対流の非局所性に関する考察

政田洋平

愛知教育大学 教育学部理科教育講座

INTRODUCTION

太陽対流層の底と表面には6桁以上に及ぶ密度差が存在するため、対流層には100Mmのジャイアントセルから、1000Kmサイズの粒状斑まで、様々なスケール（マルチスケール）の対流渦が混在していると考えられている。これは対流セルのサイズが、局所的な圧力スケール長に依存して決まるとする「混合距離理論」に基づく描像である（図1）。

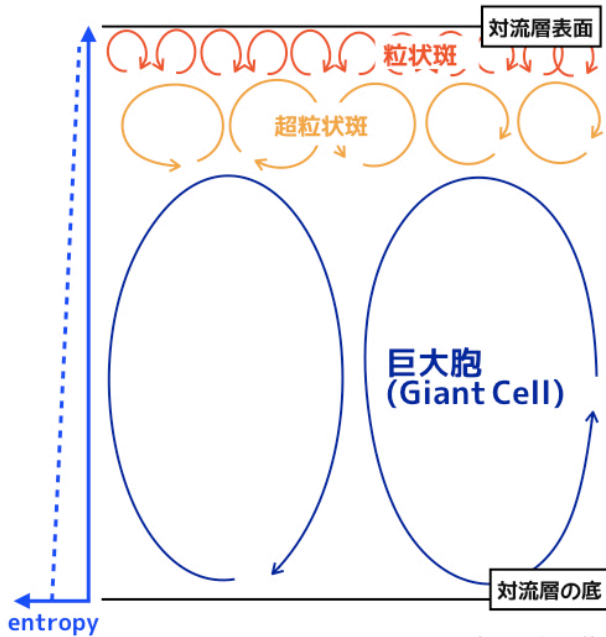


図1. 太陽のマルチスケール熱対流描像

このような太陽熱対流のマルチスケール描像や、その根拠を与える混合距離理論の正しさは、光球や対流層浅部での対流スペクトルを調べることで、観測的に検証できると信じられている（Hathaway et al. 2010）。しかし実は、理論的に期待されるような対流スペクトルは、観測では見つけられていないのが現状である。

太陽熱対流における観測と理論の間の不整合の中で、現在特に問題になっているのは、ジャイアントセルの存在が期待される空間スケール [O(100)Mmの波長域近傍] に、その証拠を見つけない点である（eg., Hathaway et al. 2015）。混合距離理論は光球直下で約100m/secの速度を持つジャイアントセル

の存在を予言するが、実際にはそれより2桁小さな対流速度しか観測できないと主張する研究結果も存在する（Hanasoge et al. 2012）。

これらの観測結果は、対流層深部に対流の駆動スケールが存在しないこと、つまり太陽熱対流が局所的な super-adiabaticity ではなく、非局所的な太陽表面での冷却によって駆動されている可能性を示唆する（e.g., Spruit 1997; Cosette & Rast 2016; Nelson et al. 2018）。冷却によって駆動される熱対流は図2のようにブルーム状の形態をとり、断熱的な大気を「慣性」に従って落ちていく（Brandenburg et al. 2016）。

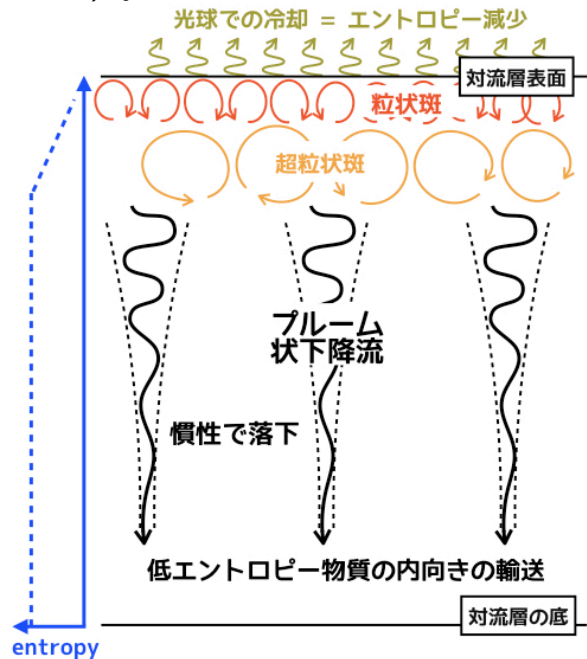


図2. 冷却駆動のブルーム熱対流

SETUP & RESULT

対流層のエントロピー分布の違いが表層スペクトルに及ぼす影響を定量的に理解するために、MHD熱対流シミュレーションを使って、局所駆動型と非局所駆動型（冷却駆動型）の熱対流モデルの違いを調べた。

図1と2の左側の青線は、両モデルのエントロピー分布の概略図である。局所駆動型のモデルは、対流層全域が対流不安定（エントロピー

勾配が全域で負：polytrope 指数 $m=1.4995$) である一方、冷却駆動型のモデルは、表層冷却を模擬し、対流層上部のみが対流不安定（断熱領域は $m=1.5$ 、冷却層は $m=1.4995$ ）になるよう設定している。

図3は計算の結果得られた、対流層表面[(a)と(b)]と垂直断面[(c)と(d)]でのエントロピー擾乱の分布である。冷却駆動型のモデルは、小さな対流セルが支配的であるのに対し、局所駆動型のモデルは対流層底部の圧力スケール長で特徴づけられるような大きな対流セルが顕著に成長していることがわかる。

垂直断面からは、対流層全体のプラズマの動きが見てとれる。冷却駆動型のモデルの場合、表面でエントロピーを失った冷却ブルームが対流層深部を貫いて落ちていく。一方、局所駆動型のモデルでは対流層全域が不安定になり、対流混合が起きていることがわかる。

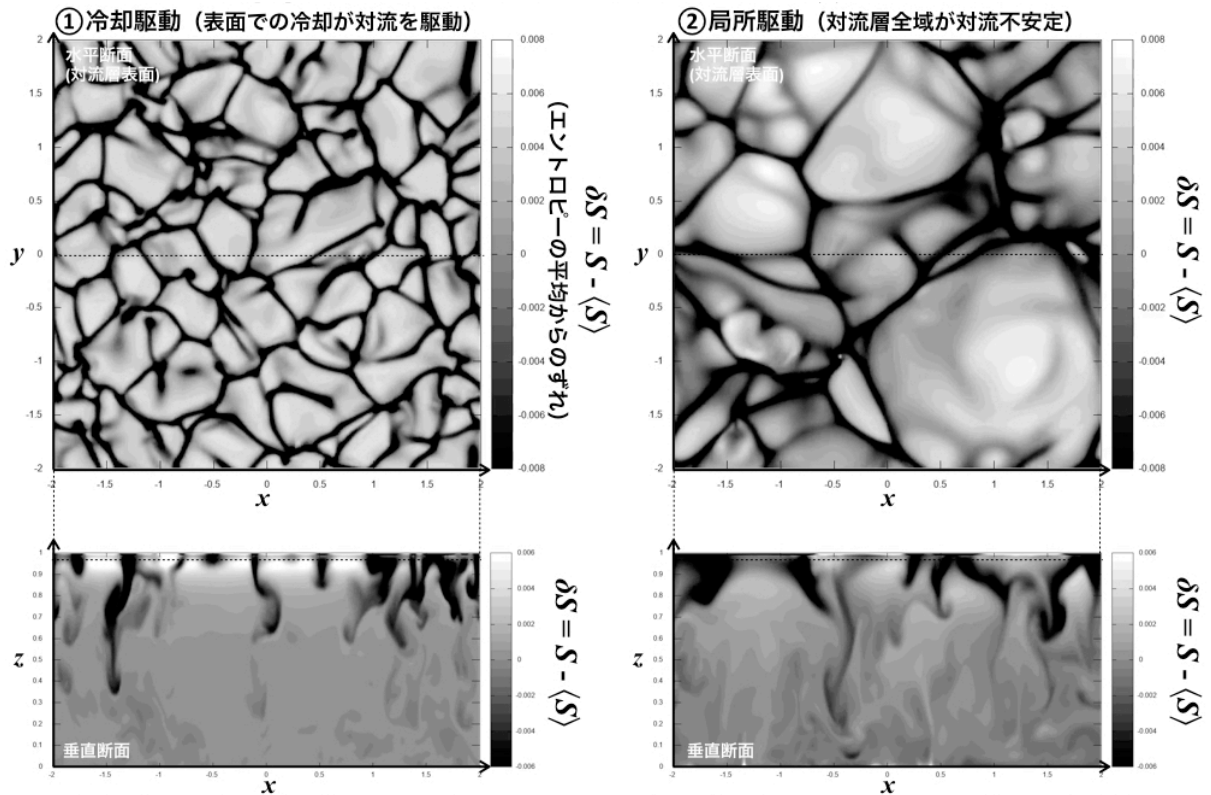


図3. シミュレーション結果（左が冷却駆動モデル、右が局所駆動モデル）

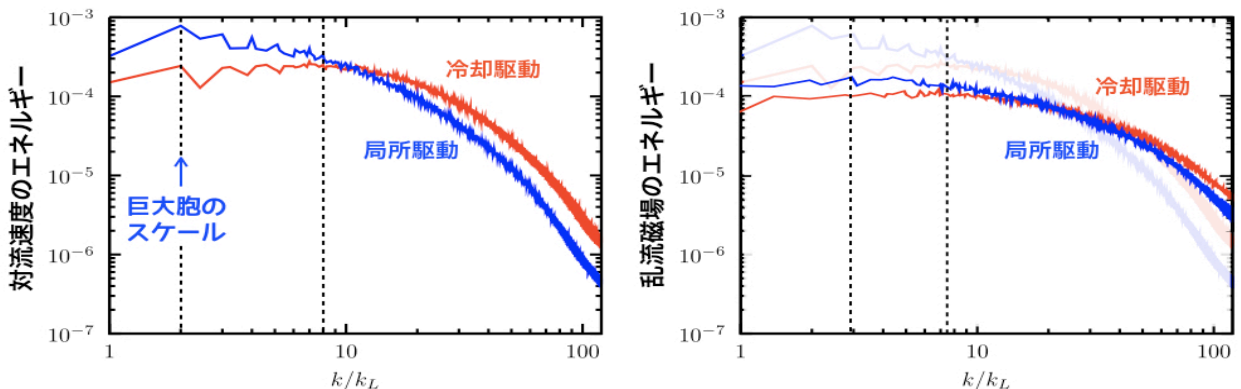


図4. 対流のエネルギースペクトル（左）と磁気エネルギースペクトル（右）

両モデルの、運動エネルギーと磁気エネルギーのスペクトルを図4に示した。冷却駆動のモデルの場合、確かにジャイアントセル付近にスペクトルの盛り上がりは現れず、観測と整合的になることがわかった。

本研究ではMHD計算を行っており、図4のように表面磁場のエネルギースペクトルの情報も得られている。両モデルの磁気エネルギースペクトルの間の顕著な違いを見出し、太陽表面観測へフィードバックすることで、太陽内部熱対流の駆動メカニズムを理解するため足がかりを得ることが次の目標である。

REFERENCE(S)

- [1] Spruit (1997), MmSAI, 68, 397
- [2] Hathaway et al. (2015), ApJ, 811, 105
- [3] Cossette & Rast (2016), ApJL, 829, L17
- [4] Nelson et al. (2018), ApJ, 859, 117