

太陽内部熱対流の非局所性に関する考察 Non-Locality of Thermal Convection in the Solar Interior

政田洋平
Youhei MASADA

愛知教育大学 教育学部理科教育講座
Aichi University of Education, Faculty of Education, Department of Science Education

1. Basic Picture of Solar Convection

太陽熱対流は、熱や運動量、角運動量の輸送、そしてダイナモ機構など、太陽内部ダイナミクスの鍵を握る重要な物理過程である。太陽の対流層は光球以下の半径約30%の領域（約200 Mm）を占めており、表面と底で密度が6桁以上も異なる点に特徴がある。動径方向に密度スケールハイトの大きな変化があるため、太陽熱対流は、光球で見られる粒状斑（~1Mm）から超粒状斑（~10Mm）、巨大胞（~100Mm）に至る様々な時空間スケールの渦から成るマルチスケール性を有していると信じられている。

太陽における "マルチスケール熱対流" 描像の物理的背景には、対流の局所理論が存在する（Schwartzschild 1906）。動径方向に成層化された大気を考える。大気中のある流体素片に微小変位 δr を加えた時、大気のエントロピー分布に断熱からのずれが存在すると、断熱変化する流体素片と周囲の媒質との間に密度差

$$D\rho = -\rho(\nabla_s - \nabla_{ad})\delta r/H_\rho \quad (1)$$

が生じる。 $D\rho$ が負、即ち $\nabla_s - \nabla_{ad}$ (adiabaticity) が正の時、正の変位 ($\delta r > 0$) を受けた流体素片は浮力を得て不安定になる。式(1)の中に現れる H_ρ は密度のスケールハイトであり、対流の典型的なスケールを特徴づける。太陽対流層の場合、その密度成層の強さが、 H_ρ に大きな動径変化を与え、対流セルにマルチスケール性を生じさせる。混合距離理論（MLT）も、対流の局所性に立脚して構築されており、太陽の場合、太陽光度 $L_\odot$ を対流によって輸送するためには 10^6 程度の極めて小さな super-adiabaticity が存在すれば十分であることが導かれる。

2. Conflict with Observation

太陽熱対流のマルチスケール描像や混合距離理論との整合性は光球面や対流層浅部での対流スペクトルを調べることで検証できるが、近年熱対流に関する理論と観測の様々な点での不一致が見つかってきた。特に問題になって

いるのが、巨大胞の存在が期待されるスケールにその証拠を見つけない点である（c.f., Hathaway et al. 2015）。MLTは表面直下において巨大胞のスケールに約100m/secの対流を予言するが、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、太陽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、本質的に太陽表面の cooling によって駆動されるものである可能性（太陽対流の non-locality : Spruit 1997; Cosette & Rast 2016）を示唆するものである。

3. Our study : Non-local v.s., Local Convections

現在我々は太陽熱対流の非局所性をMHD熱対流シミュレーションで検証している。local駆動の対流モデルとnon-local駆動モデル（表面の冷却が駆動源）で、速度スペクトルや生成される磁場構造にどのような違いが生じるのかを知ることが目的である。図1はnon-local modelとlocal modelの対流構造の違い、図2は両モデルのスペクトルの比較である。non-local modelの場合、巨大胞スケールの構造が存在せず観測と整合的であることがわかる。本講演では、シミュレーションの詳細とともに、乱流ダイナモに対するnon-localityの影響についても議論する。

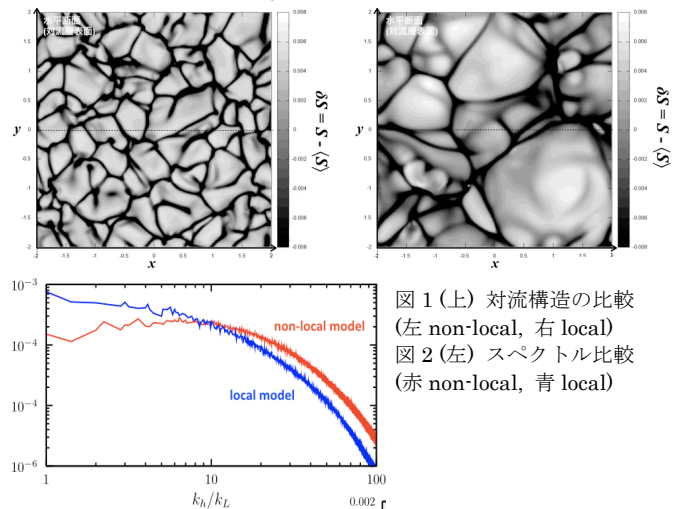


図1 (上) 対流構造の比較
(左 non-local, 右 local)
図2 (下) スペクトル比較
(赤 non-local, 青 local)