

太陽における対流と磁場の相互作用：観測と理論の現在と展望 Interplay between Turbulent Convection and Magnetic Fields on the Sun

勝川行雄,¹ 政田洋平,² 石川遼太郎,^{3,1} 鳥海森,¹ 大場崇義,⁴ 永岡賢一⁵ 他
Y. Katsukawa,¹ Y. Masada,² R. Ishikawa,^{3,1} S. Toriumi,¹ T. Oba,⁴ K. Nagaoka,⁵ et al.

¹ 国立天文台, ² 愛知教育大, ³ 東北大地物, ⁴ ISAS/JAXA, ⁵ 核融合科学研究所
¹ NAOJ, ² Aichi Univ. of Education, ³ Tohoku Univ., ⁴ ISAS/JAXA, ⁵ NIFS

太陽の表面から約30%は対流層であり、すなわち、熱対流が内部から太陽表面へ熱を輸送する役割を担っている。活発な対流は角運動量を輸送することで差動回転を生み出すとともに、ダイナモ機構により磁気活動の源泉となっている。表面と対流層の底では密度が6桁も異なるため、様々な空間・時間スケールの対流が発生し、対流と磁場の相互作用が多様な磁場構造を形作る。太陽は宇宙にあるごくありふれた恒星の1つであるが、時間・空間分解した詳細な観測が可能であるため、対流と磁場の複雑な相互作用を詳しく調べることができる極めてユニークな研究対象である。

太陽表面に見られる代表的な対流構造は約1000kmの空間スケールの粒状斑である(図1)。

「ひので」衛星に代表される高解像度かつ高精度な偏光観測によって、理解が飛躍的に進展したスケールでもある。黒点の存在しない静穏領域でも、粒状斑スケールで強く局在化した磁場が太陽全面にわたって存在すること、その磁場構造が対流運動によって形成されていることが定量的に明らかとなった(図2)。乱流ダイナモによる磁場増幅が強く示唆されるようになったのも「ひので」の観測からである。

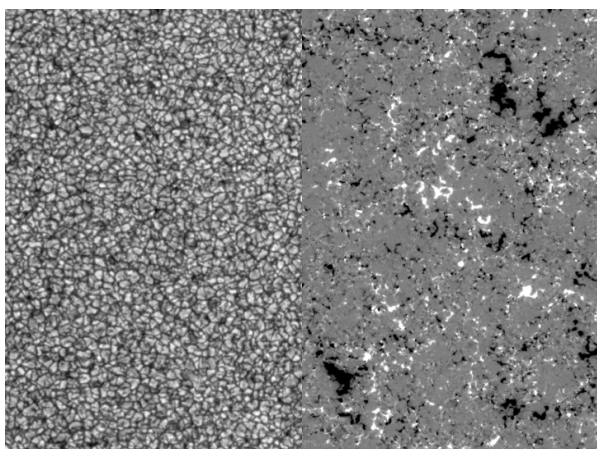


図1: 「ひので」衛星が観測した太陽静穏領域の磁場。左は明るさ、右は磁場の視線方向成分。白がN極、黒がS極を表す。

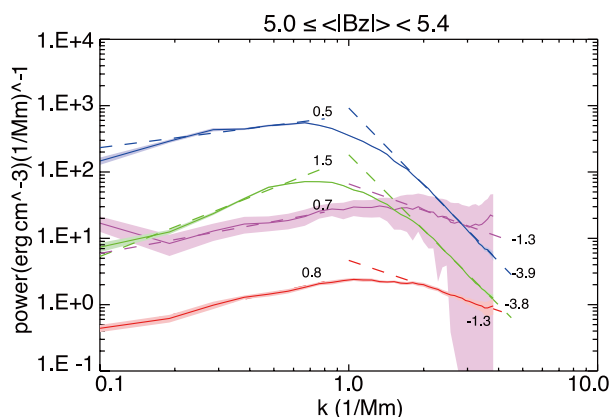


図2: 「ひので」で得られた磁場構造(赤, 紫)と運動構造(緑, 青)のパワースペクトル (Katsukawa et al. 2012)。1000 kmの空間スケールにあるピークが粒状斑に対応する。

一方、真に乱流的になっているのは粒状斑セル境界で強く下降流が発生する領域だと考えられている。太陽表面の高解像度数値シミュレーションでは、粒状斑より1桁小さい、すなわち100km以下のスケールに大きな磁気エネルギーが隠れているとも言われており、検証が必要とされている。また、表面の磁場構造から外層大気である彩層やコロナへどのようにどれだけの磁気エネルギーが輸送されているかも重要な課題となっている。2020年代には、次世代の観測装置である口径1mのSUNRISE気球望遠鏡や口径4mの超大型望遠鏡DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope)が革新的な太陽観測データをもたらすと期待されている。これらの計画について以下に紹介する。

SUNRISE気球実験

SUNRISEはドイツ・スペインの太陽研究グループが中心となって推進してきた国際共同太陽観測プロジェクトである。口径1m、すなわち「ひので」衛星の2倍の光学太陽望遠鏡を搭載し、スウェーデン・キルナから放球され大西洋を越えてカナダまで、高度約35 kmを約1週間飛翔する。地上望遠鏡の観測では到達できない波

長250-400 nmの紫外線帯の観測や大気ゆらぎの影響を受けない高解像度かつ高精度な偏光観測を連続して行うことができる。これまで2009年と2013年の2度飛翔観測を行い、太陽表面の撮像観測で成果をあげた。2021年に計画する3度目の飛翔観測では、国立天文台を中心とした日本のグループが参加し、近赤外線の偏光分光装置 SCIP (SUNRISE Chromospheric Infrared spectro-Polarimeter)を開発している。太陽表面から彩層までを連続的にカバーできる2波長帯を同時に観測することが特徴であり、磁場構造を「ひので」を上回る解像度で3次元的に測定する(図3)。これにより、表面の乱流と上空へつながる磁場との相互作用による磁気流体的なエネルギー発生、彩層における伝播と散逸を、観測により定量的に決定することを目指す。

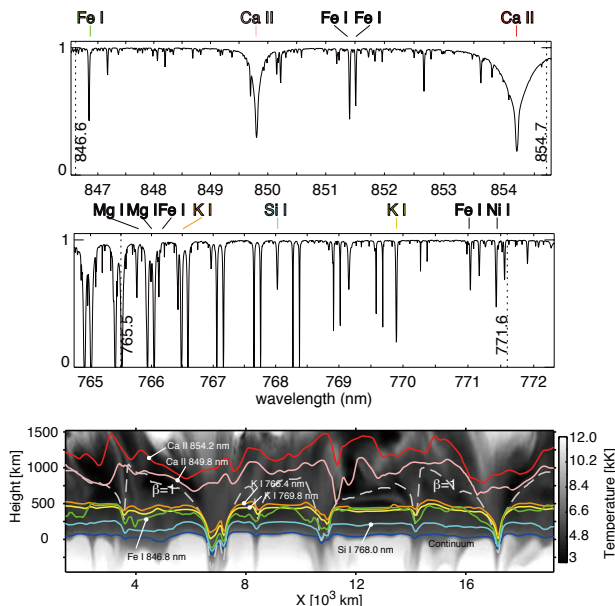


図3: (上図)SUNRISE気球望遠鏡でSCIPが観測する近赤外線の波長帯。多数のスペクトル線が太陽大気の様々な高度から放射されるため、組み合わせることで太陽大気の3次元的な診断が可能となる(下図)。

DKIST超大口径太陽望遠鏡

現在ハワイに建設中の口径4mの太陽望遠鏡DKISTは2020年から観測を開始する。DKISTの大口径は「ひので」よりもさらに1桁高い解像度を達成する。すなわち、1000kmの粒状斑スケールから、50kmを切る空間スケールまで解像することが可能になり、粒状斑セル境界で乱流が発達する過程とともに、乱流ダイナモによる磁場増幅を直接観測的に実証できる可能性がある。従来の「ひので」の解像度では近接する逆

極性の磁場がキャンセルして見えていなかったものが、DKISTでは分解されて見えてくると期待されており(図4)、そのような場所では、磁気リコネクションにより上層大気の加熱にも甚大な影響を及ぼしている可能性が出てくる。

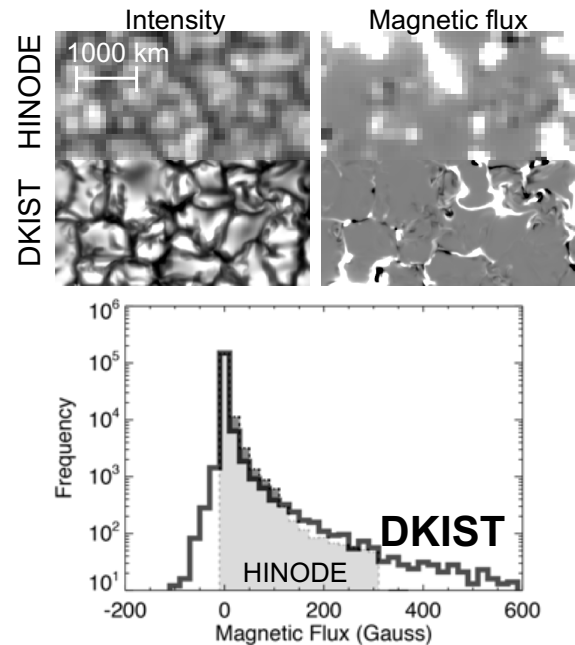


図4: (上図) 太陽表面における対流の数値シミュレーションで「ひので」(top)とDKIST(bottom)の解像度を比較。(下図) 観測される磁気要素(Bz)のヒストグラム。DKIST では解像度が1桁近く高くなることで、「ひので」では見落とされていた「高磁束密度の磁気要素」や「逆極性の磁気要素」が観測されると期待される。

一方、太陽内部は光学的に観測することが不可能であるが、日震学による観測的アプローチと、大規模な数値シミュレーションを使った理論的アプローチを組み合わせることで、太陽内部の流れ場についても知識が蓄積されつつある。しかし、未だに多くの課題が残されていることも確かである。超粒状斑対流はなぜ約30,000kmの空間スケールに現れるのか、太陽周期活動を駆動するダイナモ機構を担うグローバル対流は太陽内部に存在するのか、未だによく分かっていない。磁気周期活動はおよそ400年前から黒点数の変遷として記録があるものの、速度と磁場を定量的に測定できるようになったのはせいぜい約40年前からで、すなわち4周期分をカバーしている。太陽内部の速度・磁場構造を理解するために、観測データを総合的に精査する必要がある。