

太陽表面における磁気ネットワークの生成過程

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

飯島陽久

2011 年 8 月 31 日

1 序論・目的

太陽表面には磁気ネットワークと呼ばれるネットワーク状の磁場構造がいたる所に存在する。このような構造は、上層の磁場構造を変化させるため、磁気流体波動や磁場のトポロジーに影響を与え、上層大気加熱やスピキュールなどの磁場現象に重要な役割を果たすと考えられている。しかしながら、磁気ネットワークの起源は未だ明らかになっていない。

磁気ネットワークは鉛直磁場の水平フリエエネルギー Spektrum を用いて定義することができる。磁気ネットワークは典型的には数十 Mm 程度の構造で、磁気エネルギー Spektrum ではその付近の波長における Spektrum ピークとして現れる。このような構造を作る要因として、まず考えられるものが対流である。太陽表面における速度場のエネルギー Spektrum をとると、数 Mm と数十 Mm 程度の場所に 2 つの異なるピークを持つ。これらは、それぞれ粒状斑、超粒状斑とよばれ、とくに超粒状斑は磁気ネットワークと大きさが近く、またある程度両者に相関があることが確かめられているため、超粒状斑が磁気ネットワークという構造を作ると考えられている。

しかし、実は超粒状斑の起源そのものが解明されていない。古典的にはヘリウムの部分電離 [1] に伴う熱力学的効果が考えられて来たが、近年の大規模なシミュレーション [2] により否定的な結果が出ている。本研究では、Crouch ら [3] が提唱したシナリオに注目した。これは、粒状斑のランダムな水平流によって小さな鉛直磁場構造が移流され、互いに合体することでより大きな磁場構造、磁気ネットワークを作るという説である。このシナリオでは超粒状斑は磁気ネットワークから対流へのフィードバックによって形成されるとしている。しかし、この研究は磁場の運動を N 体運動によってモデル化した現象論的なシミュレーションであり、定量的な議論や、物理的なメカニズムは明らかではない。

本研究では、磁気ネットワークがどのように形成されるのか、磁気ネットワークは対流にどのような影響を与えるのかということ、現実的な輻射磁気流体シミュレーションを用いて定量的に確かめた。

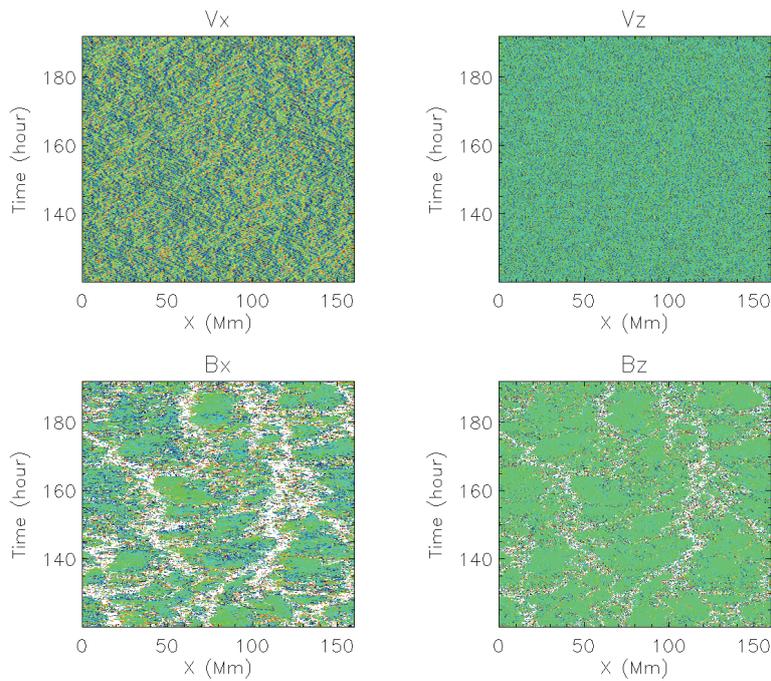


図 1 表面における物理量の時間発展。

2 モデル

新たに輻射による熱輸送や部分電離の熱力学的効果を含む、輻射磁気流体コードを開発した。Nordlund らの先駆的な研究 [4] 以降、この設定は太陽表面对流、特に粒状斑の性質をよく表すことが確かめられている。本研究では、この設定を用いてより大きい磁気ネットワークや超粒状斑の性質を調べた。

基礎方程式は、重力、輻射加熱項を含む圧縮性 MHD 方程式、及び輻射輸送方程式である。MHD 方程式は 4 次の中央差分と 4 次のルンゲクッタで積分される。流束制限関数を用いた人工粘性 [5] を使用した。輻射加熱項は、Short Characteristic 法を用いて輻射輸送方程式を直接計算して求めた。状態方程式及び不透明度は、OPAL コード [6, 7] を用いてあらかじめ生成した数表を数値的に内挿することで計算した。磁場の拘束条件を数値的に保つため、Hyperbolic Divergence Cleaning [8] を使用した。

計算コストを下げるため領域を水平、鉛直の 2 次元とした。領域サイズは、水平方向に 160 Mm とし、上部境界を太陽表面から高度 1 Mm の場所に置き、下部境界の位置 Z_{bot} をパラメータとして変化させた。グリッドサイズは水平 83.3 km、鉛直 31.3 km とした。水平境界は周期境界とした。上部境界は閉じた固定境界で磁場は鉛直、下部境界では下降流が自由に流出し、上昇流は質量フラックスがゼロで水平一様な流れに近づくように時間発展する。磁場は下部境界で初期状態に固定されているものとした。計算は、太陽対流層のモデルから静水圧の成層から始めて、磁場なし対流を作り統計的平衡に達したあと、一様な鉛直磁場を挿入した。挿入する鉛直磁場の強度 B_0 はパラメータとして変化させた。

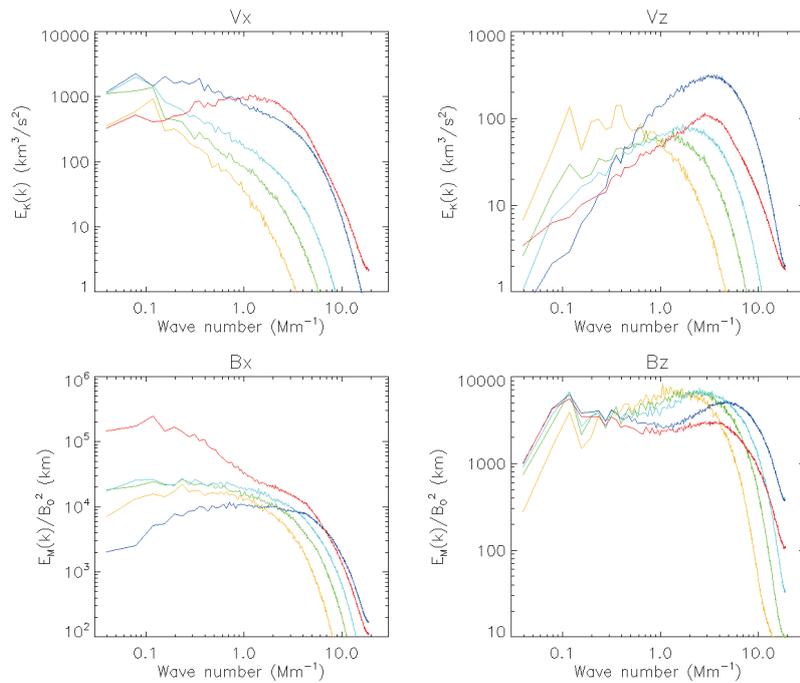


図 2 典型例のエネルギースペクトル。

3 結果

典型例 ($B_0 = 1 \text{ G}$, $Z_{\text{bot}} = -20 \text{ Mm}$) における太陽表面 (光学的深さが 1 の高度) での速度場、磁場の時間発展は図 1 のようになる。表面においては、速度場には大規模な構造はほとんど見られない。一方、磁場には磁気ネットワークのような数十 Mm 程度の構造が存在している。この構造は寿命も 1 日程度であり、観測される磁気ネットワークの性質に一致する。

これは、エネルギースペクトルから見ても明らかである。図 2 は異なる高度 (赤:表面、青:深さ 1 Mm、水:深さ 3 Mm、緑:深さ 5 Mm、橙:深さ 10 Mm) におけるエネルギースペクトルである。表面におけるスペクトルをみると、運動エネルギーには長波長側のピーク、つまり超流状斑は存在しない。しかし、磁気エネルギーには長波長側に明らかなピークが現れている。これは、超流状斑が表面に現れない場合でも、磁気ネットワークは存在できることを示している。水平磁場は深さ 1 Mm 付近 (青線) において、かなりエネルギーが小さくなっており、対流層内部では磁場は鉛直向きの磁束管のような構造を持つことが分かる。鉛直磁場の深さ依存性は小さい。対流層内部では、水平速度場は表面における磁気ネットワーク程度のスケールが卓越しており、これが対流層内部で鉛直磁場の構造を作り、鉛直磁場が表面にその情報を伝えていると考えることが出来る。磁気エネルギースペクトルの短波長におけるピークは鉛直流、特に細く強い下降流に伴うものとして容易に理解することが出来る。

磁場から対流へのフィードバックを調べるため、典型例において、平均鉛直磁場強度を $B_0 = 0.1, 1, 10 \text{ G}$ のように変化させた。それぞれのパラメータで、太陽表面におけるエネルギースペクトルを求めると図 3 のようになる。 $B_0 = 1 \text{ G}$ (青、典型例) および $B_0 = 0.1 \text{ G}$ (緑) 場

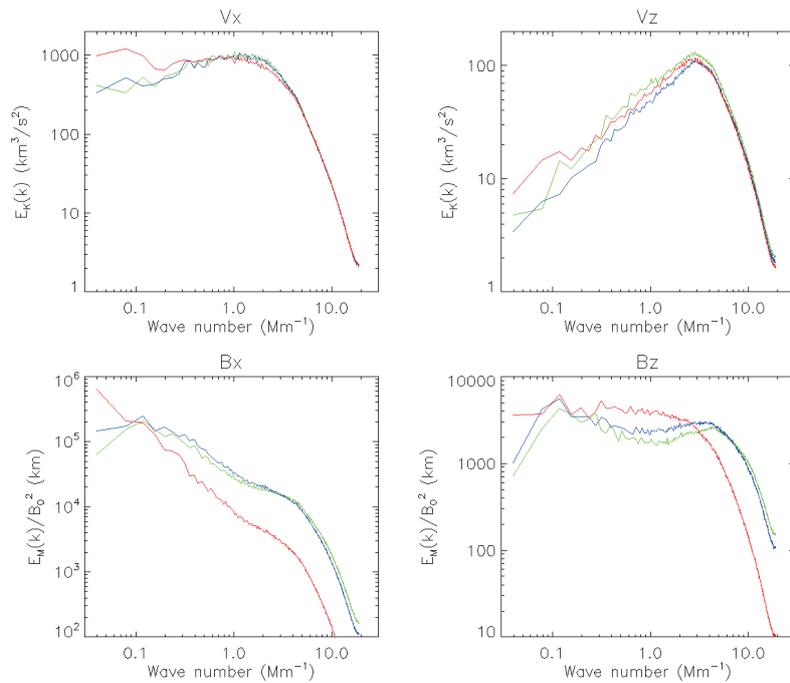


図3 平均磁場強度を変化させた場合のエネルギースペクトル。

合では、ほとんど違いは見られず、磁場からのフィードバックはほとんど存在しないと考えられる。しかし、 $B_0 = 10 \text{ G}$ （赤線）では、水平速度場の長波長側にスペクトルピークが現れている。これは、超粒状斑が磁気ネットワークからのフィードバックによって作られたということであり、Crouchらのシナリオを部分的に支持する結果である。

4 まとめ

太陽表面における磁気ネットワークと対流の関係を定量的に明らかにするため、輻射磁気流体シミュレーションを行った。結果太陽表面では磁気エネルギーの長波長成分は対流層の比較的浅い場所の水平速度場の情報が、鉛直磁場によって伝わったものであることが分かった。さらに、太陽表面における超粒状斑という対流スケールは磁気ネットワークからのフィードバックによって表面に現れたものであることが明らかになった。今回の結果は2次元という非常に強い制限がかかっており、流れや磁場がすれ違えないために観測より長波長側にシフトしている。3次元での大規模な計算を行うことで、観測される磁気ネットワークや超粒状斑のサイズをより正確に再現できることが期待される。また、これらのスケールの長波長側のカットオフがどのように生まれるのかも今後の課題である。

参考文献

- [1] Simon, G. W. and Leighton, R. B., “ Velocity fields in the solar atmosphere. III. Large-scale motions, the chromospheric network, and magnetic fields ”, ApJ, 140 (1964), pp.

- 1120-1147.
- [2] Georgobiani, J. Z. et al., “ Local helioseismology and correlation tracking analysis of surface structures in realistic simulations of solar convection ”, *ApJ*, 657 (2007), pp. 1157-1161.
 - [3] Crouch, A. D. et al., “ Supergranulation as an emergent length scale ”, *ApJ*, 662 (2007), pp. 715-729.
 - [4] Nordlund, Å., “ Numerical simulations of the solar granulation ”, *Astron. Astrophys.*, 107 (1982), pp. 1-10.
 - [5] Rempel, M. , Schüssler, M. and Knölker, M., “ Radiative magnetohydrodynamic simulation of sunspot structure ”, *ApJ*, 691 (2009), pp. 640-649.
 - [6] Rogers, F. J., Swenson, F. J. and Iglesias, C. A., “ OPAL equation-of-state tables for astrophysical applications ”, *ApJ*, 456 (1996), pp. 902-908.
 - [7] Iglesias, C. A. and Rogers, F. J., “ Updated OPAL opacities ”, *ApJ*, 464 (1996), pp. 943-953.
 - [8] Dedner, A. et al., “ Hyperbolic Divergence Cleaning for the MHD Equations ”, *J. Comp. Phys.*, 195 (2002), pp. 645-675.