

大規模シミュレーションプロジェクト成果報告書

研究課題

太陽浮上磁場及び関連活動現象の磁気流体シミュレーション (mhi25b)

磯部洋明¹ 塩田大幸^{1,2}

1. 京都大学大学院理学研究科附属天文台 (isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp)

2. 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室

1. 導入

対流層下部のダイナモ機構で作られた磁場は、磁気浮力により光球、コロナへ浮上し、太陽フレア、コロナ質量放出(CME)等の様々な活動現象を引き起こす。浮上磁場はフレア、CME のエネルギー蓄積とトリガーの両方に密接に関係していると考えられており、その物理過程の理解はフレア、CME 研究の重要な要素である。また、太陽面の浮上磁場領域には多波長で詳細な観測データがあり、観測と理論モデルの詳細な比較が可能である。従って、太陽浮上磁場は磁場とプラズマの非線形ダイナミクスの基礎物理過程を明らかにする格好の実験上でもある。

近年浮上磁場の3次元 MHD シミュレーションはいくつか行われている(e.g., Matsumoto et al. 1998, Magara and Loncope 2001, Fan 2001)が、多くが光球面の放射冷却や photon による熱輸送を考慮しておらず、初期に対流不安定でも対流が1、2回転した後では温度勾配が対流安定になり止まってしまっていた。H α 像などでアーチフィラメントシステム(AFS)として見られる浮上磁場は、光球面に対流のパターンに相当する粒状斑よりも長いタイムスケールで観測されており、磁場は浮上の過程で光球下の対流運動の影響を強く受けると考えられるが、その相互作用の詳細はよく分かっていない。本研究では特に対流と磁場の相互作用を調べるため、最も簡単なケースとして光球面の冷却と計算領域下部の加熱を仮定し、対流が継続して起こる条件下での磁場の浮上を3次元 MHD シミュレーションにより調べた。

2. 数値モデル

2.1 基礎方程式

3次元圧縮性理想 MHD 方程式。熱伝導、粘性、電気抵抗は含まない。ガスは比熱比 $\gamma=5/3$ の理想気体とする。方程式は光球面($z=0$)における温度 T_0 、密度 ρ_0 、スケールハイト $H=kT_0/mg$ 、

音速 C_s で無次元化する。3次元デカルト座標系で、鉛直方向に z 軸、水平方向に x 、 y 軸をとる。対流を継続させるため、光球 ($-0.5 < z < 0.5$) で冷却時間が約 $5 (H/C_s)$ の冷却、計算領域下部 ($-7 < z < -6$) で同程度の加熱を仮定する。スキームは修正 Lax-Wendroff で、CANS (Coordinated astronomical Numerical Software)を用いた。

2.2 初期条件、境界条件

対流層、光球・彩層、コロナの3層からなる大気を考える。光球・彩層 ($0 < z < 8$) は温度一定 ($T=1$) とし、コロナ ($8 < z$) の温度は 25、対流層 ($-7 < z < 0$) 中の温度勾配は断熱の 2 倍とする。初期は静水圧平衡で、 $-4 < z < -2$ に水平方向の磁気シートをおき、磁場の方向に x 軸をとる。磁気シート中のプラズマ β は 4 で、シア、ねじれはない。図 1 に鉛直方向の物理量分布を示す。

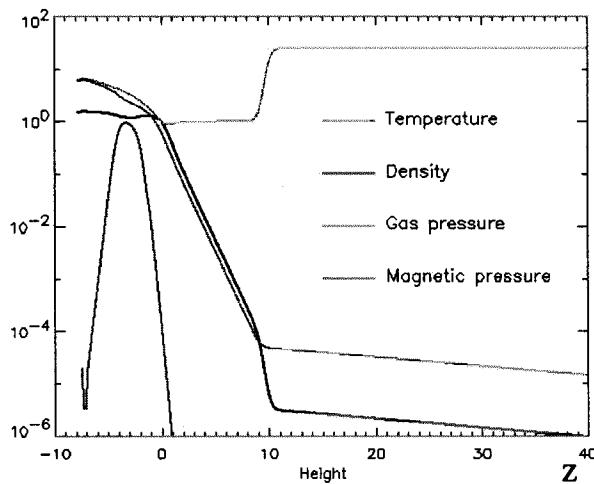


図 1 初期条件

温度 (緑)、密度 (黒)、ガス圧 (赤)、磁気圧 (青) の鉛直方向分布を示す。 $z=0$ が光球。単位はすべて無次元量。

3. 2次元の結果

まず y 方向の変化を無いものとした 2次元シミュレーションの結果を示す。計算領域は $0 < x < 40$ 、 $-7 < z < 40$ でメッシュ数は 203×203 。初期の磁気シートに摂動として $V_z = 0.01 \cos(2\pi \times x/14.4)$ を $0 < x < 7.2$ の範囲に与える。比較の為に、光球面の冷却、領域下部の加熱があるケースと無いケースの両方の結果を計算した。

図 2 は対流層中の平均速度の時間変化を示す。実線が冷却／加熱有、点線が冷却／加熱無のケースである。初期は静水圧平衡のため速度は 0 であるが、どちらのケースも対流不安定なため、摂動が成長して対流層中の平均速度は上昇する。 $t=30$ 付近まではどちらもほぼ同じ様に成長するが、冷却／加熱無のケースでは対流が 1、2 回転すると温度勾配が対流に対して安定になり、速度は $t=60$ 付近から徐々に減少する。それに対し冷却／加熱有のケースでは準定常的に対流が継続

していることが分かる。準定常状態における対流層の平均速度は光球面の音速の 30%程度で、下降流は上昇流より速度が大きい。

図3に $t=30, 60, 145$ における密度（カラー）、磁力線（実線）、速度場（矢印）を示す。左側が冷却／加熱有、右側が冷却／加熱無。どちらも初期に Convective-Parker 不安定'(Nozawa et al. 1992)により Ω 型のループが光球を通してコロナに浮上し、自己相似的に発展する ($t=30, 60$)。 $t=145$ においては、加熱／冷却有無のケースでは浮上磁場が Ω 型のコヒーレントな構造を保っているのに対し、加熱／冷却有のケースでは継続して起こる対流によって光球下は乱流的になり、それに伴ってコロナの磁場構造も変化していることが分かる。コロナに浮上する磁束、浮上磁場の高さともに、加熱／冷却有のケースの方が小さい。また、磁束の一部は数値抵抗により磁気リコネクションを起こし、その結果計算領域下部に磁気島として留まっている。

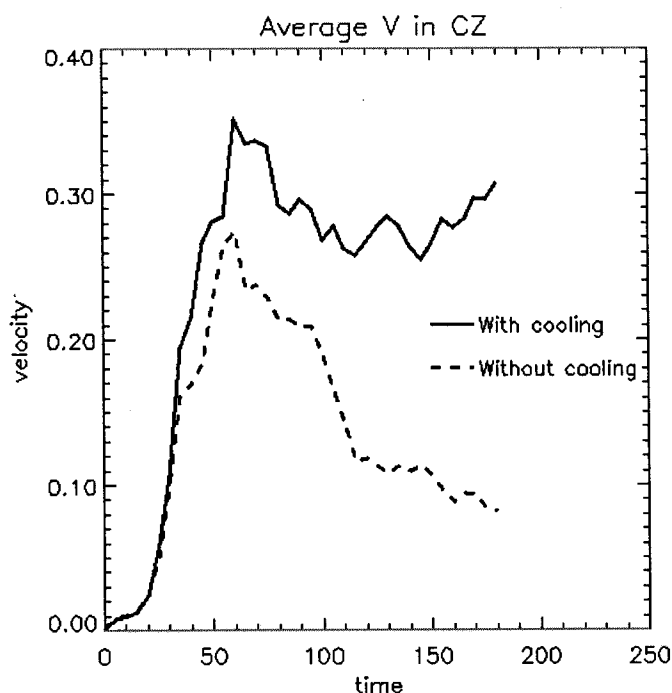


図2 対流層中の平均速度

実線が加熱／冷却有、点線が加熱／冷却無のケース

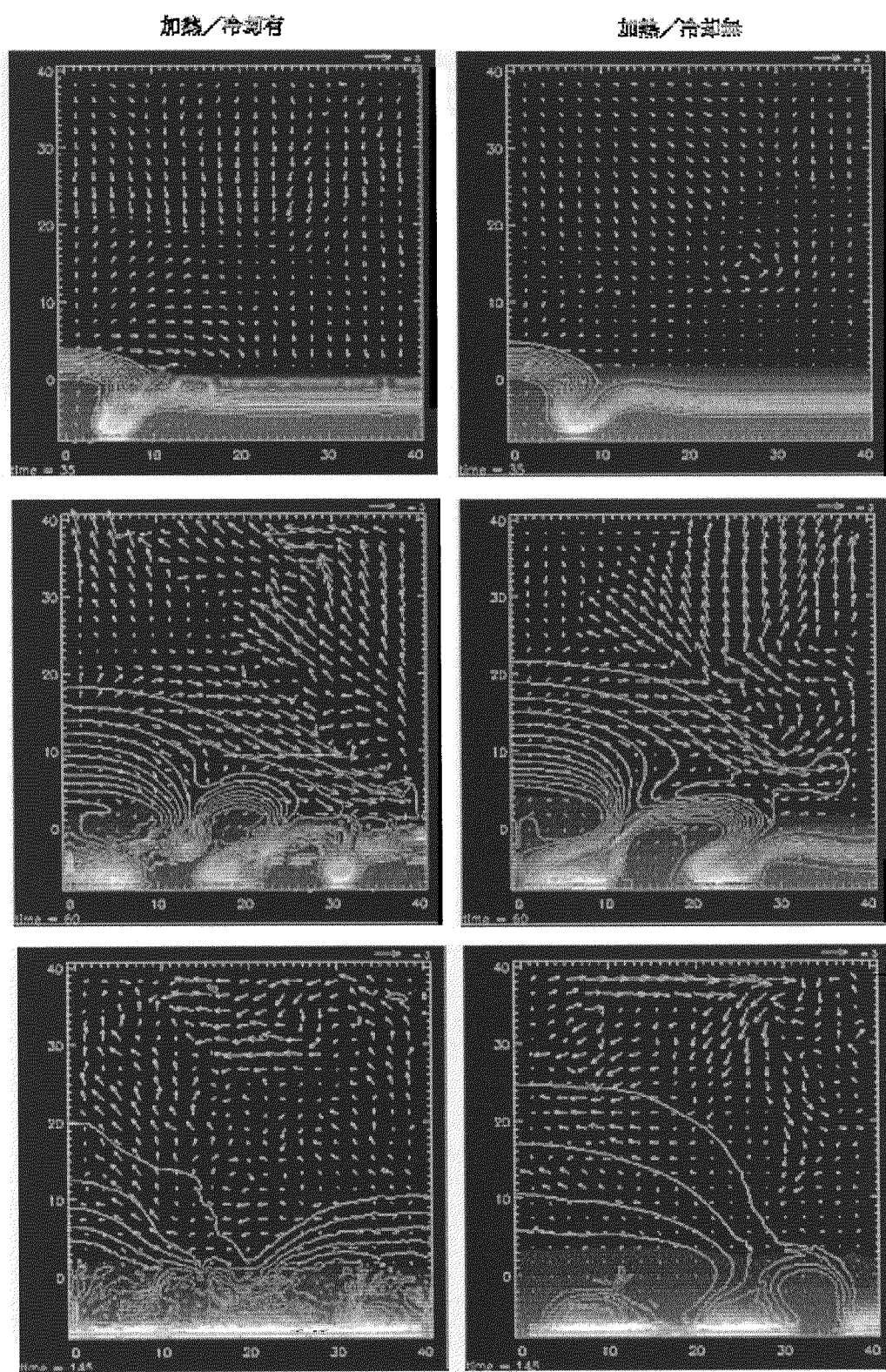


図3 $t=35, 60, 145$ における密度 (カラー)、磁力線 (実線)、速度場 (矢印)。左側が加熱/冷却有、右側が加熱/冷却無のケース。

4. 3次元の結果

4.1 磁場の3次元構造

次に3次元の結果を示す。計算領域は $0 < x < 100$ 、 $0 < y < 40$ 、 $-7 < z < 40$ でメッシュ数は $203 \times 83 \times 247$ 。初期に磁気シート中に3次元的な摂動 $V_z = 0.01 \cos(2\pi \times x/14.4) \sin(2\pi \times y/8)$ を $92.8 < x < 100$ 、 $0 < y < 40$ の範囲に与える。図4に $t=50$ 、 70 、 125 における磁場の等値面（左側）と磁力線（右側）を示す。半透明の平面は光球($z=0$)面の磁場の垂直方向成分を表している。3次元的な摂動を与えたことにより、 y 方向の構造ができている。 $t=50$ においては、 y 方向の摂動に対応して Ω 型のループ構造が y 方向に4つ並び、 $H\alpha$ 像で観測されるアーチフィラメントシステム (AFS) に似た構造を示している。しかし、時間が進むと2次元の結果と同じように継続する対流により対流層内部の磁場は乱流的になり、AFS 的なコヒーレントな構造は壊されてしまう($t=70$, 125)。また、コロナへ浮上する磁束も小さい。

4.2 光球面の構造

図5に $t=50$ 、 70 、 100 、 145 における光球面($z=0$)の垂直方向速度（白黒）と垂直方向磁場（コントラ）を示す。垂直方向速度は明るい部分が上昇流、暗い部分が下降流を表し、磁場のコントラは赤が正、青が負の磁束を表す。コントラレベルは、太陽光球面の典型的な値を代入すれば -1500 、 -1000 、 -500 、 500 、 1000 、 -1500 。垂直方向速度は対流運動によるもので、上昇流に相当する部分は高温、低密で、下降流に相当する部分は低温、高密になっている。対流が準定常状態に達している $t=145$ では、対流の構造が広がった上昇流のセルとその間の狭く速い下降流領域としてはっきりと見えている。この上下非対称性は圧縮性の対流に特徴的なものである。速度場の模様は光球面で観測される粒状斑と非常に似ているが、実際粒状斑の観測によく使われる G-band の intensity は温度に sensitive であり、図5の上昇流部分は高温部、下降流部分は低温部に対応していることから、まさに観測される粒状斑の様子が再現されているといえる。

磁場に関しては、 $t=50$ では AFS の足下に対応する正負の磁束が y 方向に並んでいるが、対流が発達するにつれ、対流運動により磁束が下降流領域にはき集められている様子が見られる。上昇流領域の磁場が弱く、下降流領域に磁束が集中しているのは、これまでの観測ともコンシステントである。

図6（上）に $t=145$ における光球面の垂直方向速度（白黒）、水平速度場（矢印）、磁気圧（コントラ）を示し、赤い実線に沿った熱エネルギー、運動エネルギー、磁気エネルギーの分布を下側に示す。黒が熱エネルギー、ピンクが運動エネルギー、緑が磁気エネルギー。平均すると、運動エネルギーと磁気エネルギーはそれぞれ熱エネルギーの10%、数%程度であるが、磁束が集中している領域では、磁気エネルギーと熱エネルギーは同程度になっているところもある。

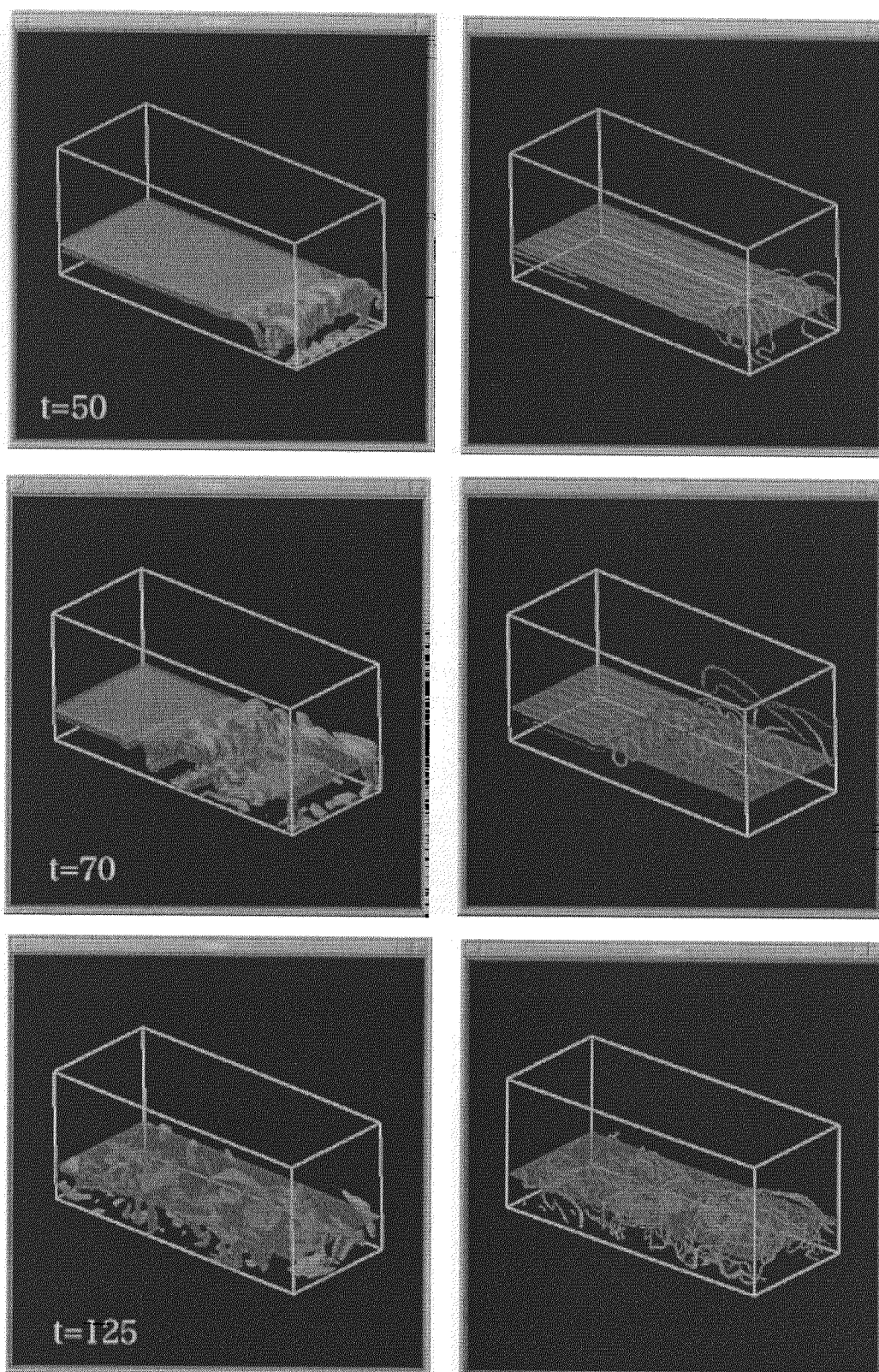


図4 $t=50$ 、 70 、 125 における磁場の等値面（左）と磁力線（右）
半透明の平面は光球面の垂直磁場を示す

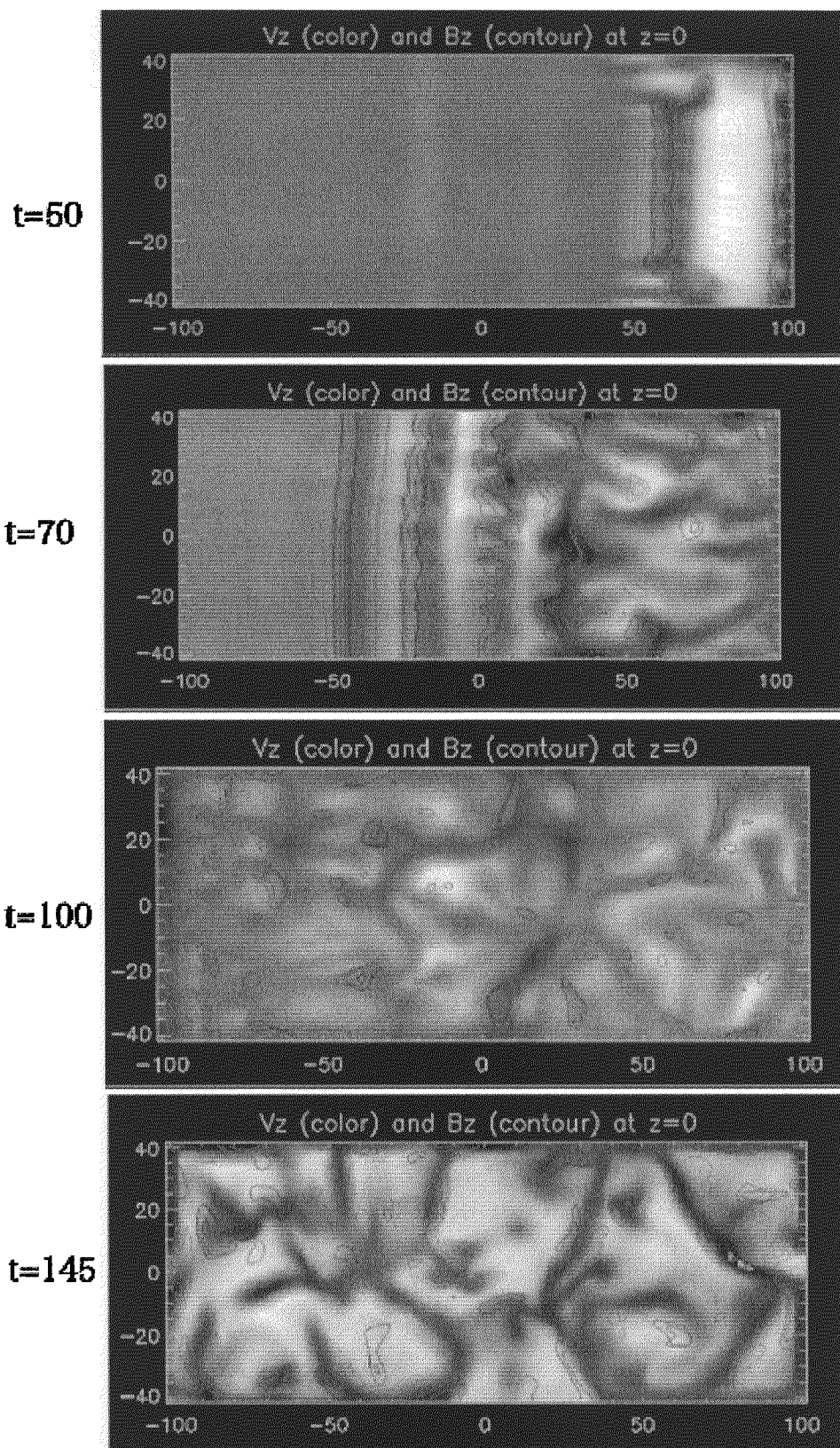


図5 $t=50, 70, 100, 145$ における光球面の垂直速度（白黒）と垂直磁場（コントア）

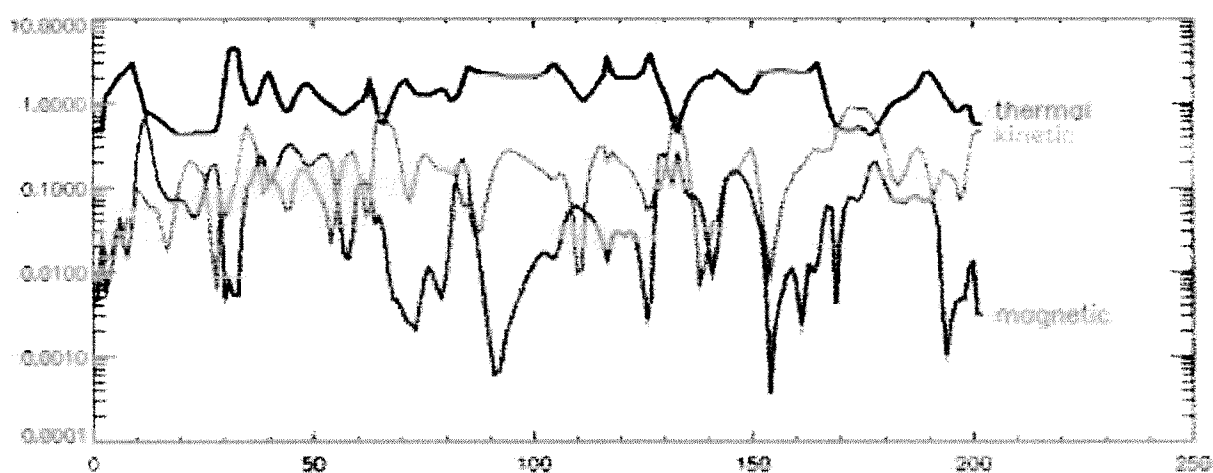
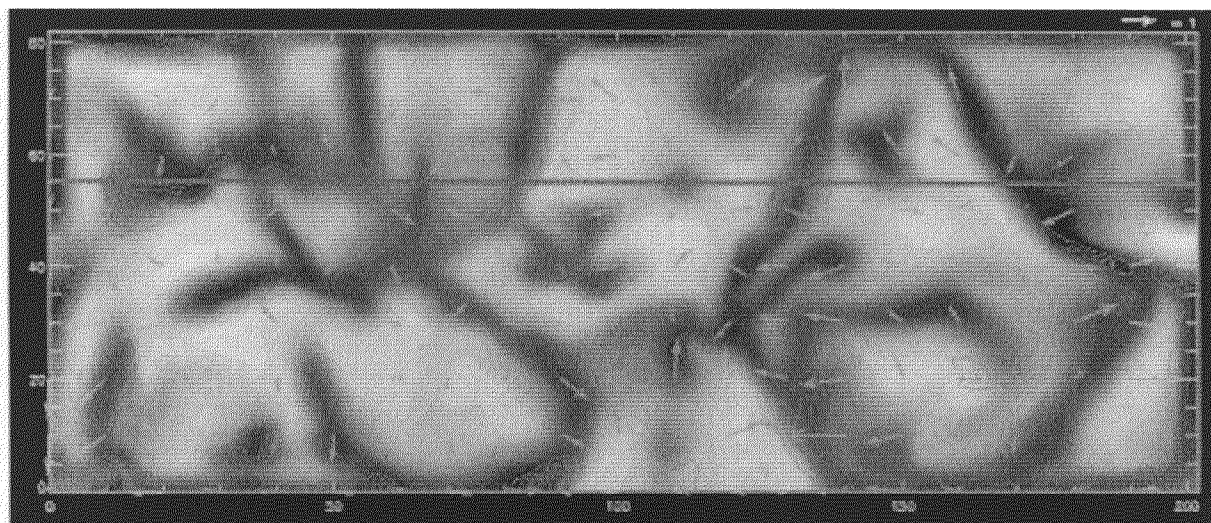


図6 上: $t=145$ における光球面の垂直速度場 (白黒)、水平速度場 (矢印)、磁気エネルギー (コントラ)。下: 赤い実線にそった熱エネルギー (黒)、運動エネルギー (ピンク)、磁気エネルギー (緑) の分布。

5. 結論

光球面の放射冷却と計算領域下部での加熱を仮定し、対流が継続する条件下での磁気シートの浮上の様子を3次元 MHD シミュレーションで調べた。対流層中の磁気シートは磁気浮力により光球、コロナに浮上し、初期によく知られた Ω 型のループを形成するが、光球下の乱流的な対流運動により壊され、コヒーレントな構造を保てないことが分かった。ただし、この計算では初期の温度勾配が断熱の2倍と大きく、対流運動が実際の太陽よりは強いと考えられる。今後は対流の強さ、磁場の強さ、シア、ねじれなどのパラメータを変えた計算をして、観測されるようなコヒーレントな構造を保ったまま磁場が浮上する条件を調べる必要がある。

今回の計算では photon による熱輸送や、粘性、磁気拡散を考慮しない、非常にシンプルな対流モデルを用いたが、広がった上昇流と狭く速い下降流、及び光球面での粒状斑に似た構造をよく再現することができた。光球上に浮上した磁場は対流運動によりはき集められ、下降流領域に小さく強い磁束管を形成することが分かった。これは観測されている粒状斑と微細磁束管の振る舞いとよく一致する。本研究では、対流層の磁場がコロナに浮上して、その後微細磁束管を形成する過程を初めてセルフコンシステントにシミュレーションすることができた。

尚、この成果は2003年日本天文学会春季年会にて発表している。

参考文献

磯部洋明、柴田一成 日本天文学会 2003 年春季年会 M21a

Fan 2001, ApJ, 554, L111

Matsumoto et al. 1998, ApJ, 493, L43

Magara & Longcope 2001, ApJ, 559, L55

Nozawa et al. 1992, ApJS, 78, 267