

太陽大気中の浮上磁場と それに伴う爆発現象の理論的研究

宮 腰 剛 広

〈京都大学大学院理学研究科附属花山天文台 〒607-8471 京都市山科区北花山高峰町〉
e-mail: miyagoshi@kwasan.kyoto-u.ac.jp

浮上磁場は、太陽コロナにおける磁氣的活動現象の源泉と言えるものであり、次期太陽観測衛星「Solar-B」においても重要な観測ターゲットの一つとなっている。我々は、浮上磁場の発展過程とそれに伴う爆発現象について、理論的及び数値シミュレーションにより研究を進めてきた。数値シミュレーションの結果、磁束管の状態の違いにより、コロナ中で見つかっている種々の特徴的な磁場構造が形成されること、また浮上磁場に伴い生ずるエネルギー解放によって、彩層蒸発によるジェット流が形成され、観測されているジェットの質量を理論的に説明できることが分かった。

1. はじめに

太陽観測衛星「ようこう」は、太陽コロナが激しくダイナミックに変動していることを明らかにした。この活動性の主役は、磁場である。太陽コロナ中にはガスのエネルギーよりも100倍から1000倍以上ものエネルギーを持つ磁場が存在し、その磁気エネルギーの一部が解放されて、フレアやジェットのような爆発現象を起こす。太陽フレアによりごく短い時間(数分-数十分)の間に解放されるエネルギーの総量は、現在地球上に存在する全核兵器を合わせたエネルギーのさらに千倍から百万倍にも達する。このような磁氣的活動性の起源となっているのが、磁束浮上現象である。対流層で増幅された磁束が太陽表面を通り抜けてコロナ上空へと浮上し、黒点群やその上空の活動領域コロナを形成したり、爆発現象の引き金となったりする。従って磁束浮上の過程を明らかにすることは、コロナにおける磁氣的活動性を理解するうえで極めて重要である。また磁束浮上のもととなっている「パーカー不安定性」

は、もとは銀河円盤における星間ガス雲の形成機構としてパーカーによって提唱されたものであり、その振舞いや関係する活動現象を調べることは太陽だけでなく降着円盤コロナなど他の天体の現象を理解するためのプロトタイプとしても重要であるといえる。本稿では浮上磁束管やそのエネルギー解放によるジェット現象に焦点を当て、我々の研究成果を述べたいと思う。

2. 磁束浮上の理論

太陽黒点に代表される強い磁場を持つ活動領域と呼ばれる部分は、どのようにして形成されるのだろうか？それを模式的に表したのが、図1である。

黒点とは、太陽内部にある磁束管が太陽表面に顔を出したところの切り口である。太陽黒点のよ

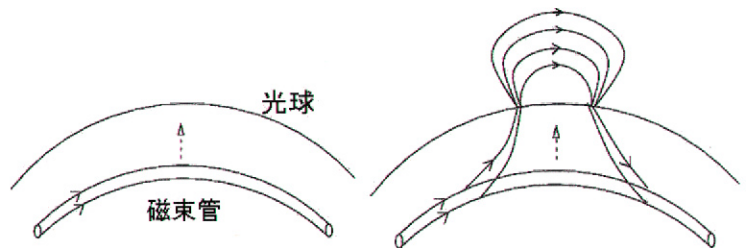


図1：磁束管浮上の模式図。

うな強い磁場（数千 G 以上）とフレアのような激しい活動現象との間に関係があることは昔から知られていたが、具体的な描像が明らかになってきたのは、ごく最近のことと言ってよく、ここ 20～30 年の X 線天文学や電波天文学の発展によって確立された。「ようこう」衛星の活躍などにより、太陽大気プラズマは磁場に強くコントロールされた状態であり、数百万度に及ぶコロナプラズマは磁気ループにトラップされていること、太陽面上の爆発現象は磁気エネルギーの解放によっていること、などが明らかになったのである。

では、なぜ強い磁場領域（黒点）があると、活動現象が発生するのだろうか？ また、黒点やコロナの磁場構造が形成される過程は、どのようになっているのだろうか？ 太陽大気は、対流層上部からコロナにかけて、密度や圧力が 7 桁以上も変化する複雑な構造をしており、これらの問題を理論的に調べるには、非線形非定常の多次元磁気流体（MHD）方程式を解く必要があるが、これを解析的に実行するのはほとんど不可能である。ところが近年のスーパーコンピュータの大きな進歩により、このような複雑な方程式の数値解を得ることが可能となり、これらの問題に対する我々の理解は飛躍的に高まりつつある。

さて、パーカー¹⁾は 1955 年に、黒点の形成について、以下のようなアイデアを提出した。まず太陽磁場は対流層内部におけるダイナモ機構（対流と差動回転によって電流が生成される過程）によって生みだされると考える。ダイナモ機構の具体的な描像はまだよく分かっていないが、観測から、黒点以外の太陽磁場は平均的に非常に弱い（10 G 以下）ということが分かっており、このことから推測すると、光球下では黒点を形成するもととなるような孤立した磁束管ができていてと考えられる。このような磁束管の内部と外部プラズマの温度が等しく、管の内外が圧力平衡状態になっているとすると（管内のガス圧 + 管内の磁気圧 = 管外のガス圧）、状態方程式により管内の密度は管外より小さ

くなり、その結果浮力が働いて磁束管が上昇することになる（パーカーはこれを磁気浮力と呼んだ）。

こうして孤立磁束管は平衡状態になく浮上することとなることが分かったが、磁束管ではなく磁束シートにすれば内外が等温でも平衡状態が存在する。しかしこの平衡状態は不安定であり結局は磁束シート（の一部）は浮上することになる。この不安定性を磁気浮力不安定性という。再び図 1 を見てもらいたい。今磁気シートを真横から見ていると考え、磁場に平行な摂動が加わったとする（専門的には「うねりモード」と呼ばれる）。すると磁束管内のガスは重力に引かれて落下し、管内の山の部分は周囲より軽くなる。軽くなった部分に働く浮力が磁束管の曲がりやを元に戻そうとする張力よりも大きいと磁束管はさらに持ち上げられ、浮上し続けることになる。浮力と張力の大小の比較から、おおざっぱに言ってスケールハイト（特徴の高さ）より十分長い大規模摂動に対してのみ不安定となることが分かる²⁾。

黒点形成の大筋に関してはこのパーカーの磁気浮力モデルが広く受け入れられているが、ここまで述べてきた磁気浮力不安定の性質は全て、線形安定解析に基づいた話である。実際に磁束が浮上しはじめたのち、太陽内部からコロナにかけて外部プラズマの状態が大きく変化する環境において、その発展過程はどうなっているのか、具体的に磁束にどのような変形が起こるのか、などの非線形過程については、近年のスーパーコンピュータの発達に伴った数値シミュレーションにより徐々に明らかになってきた。非定常の MHD 数値シミュレーションにより、コロナ中での浮上磁気ループの膨張過程や、浮上に伴う落下流による衝撃波生成などの様子が明らかになってきた^{3), 4)}。近年では計算機能力の向上により空間 3 次元を解く計算が可能となり^{5), 6), 7)}、理論面での理解が大きく進みつつある。

我々は、これまでの研究に対し、表面付近よりもコロナ上空で浮上した磁場がどういう構造を取

るか、状況の違いにより最終的にコロナ上空でどのような磁場構造の違いが生じるのか、ということ を明らかにすることに力点を置き、研究を行ってきた。そのため、なるべくコロナ上方までの時間発展を解いて、コロナ中での磁場構造を調べることに重点を置き、研究を行った。

3. 磁束管浮上の MHD 数値シミュレーション

図2に、我々が行なった磁束管浮上の数値計算結果を示す。初期に緩く捻れた磁束管が太陽表面下に埋め込まれており、時間とともにコロナへ向かって浮上していく。光球下から、彩層、コロナへと向かっていくにつれて、外部プラズマの圧力や密度が大きく変化し、それに伴って磁束管も複雑な変形を示すようになる。初期にはプラズマ β (\equiv ガス圧 / 磁気圧) ~ 20 程度の磁束管だったが、コロナに達すると ~ 0.01 程度になり、外部ガス圧の大きな低下のため磁束管は急激な膨張を見せるようになる。シミュレーション結果を見ると、初期には磁束管が緩く捻れていただけだったが、コロナ上空ではヘリカルな磁場構造が現れている。この構造は、光球下での磁気再結合（注：次節参照）によるものであることが分かった。光球下では高プラズマ β のため、プラズマの運動によって磁場が容易に変形され、この場合は浮上に伴う対流運動により磁束が両極から押し付けられ磁気再結合を起こす。磁束管の浮上に伴って周辺のプラズマは持ち上げられるが、やがて重力により落下する。この繰り返しにより、渦運動が出来る。それが磁束を変形させ、押し付ける原因となっている。このケースでは磁束管の捻りが緩い（浮上領域で10分の1回転位）なので、プラズマ運動により両極からの磁場の反平行成分が接触しやすい。この結果、2次元では磁気島に相当するものが、3次元では磁場がループに垂直な成分も持っているため前後の磁気島同士がつながりヘリカルな構造になる。実際の太陽では、プロミネンス（図2、

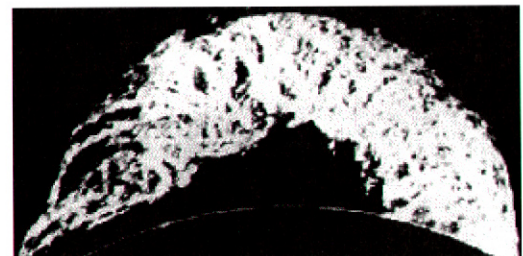
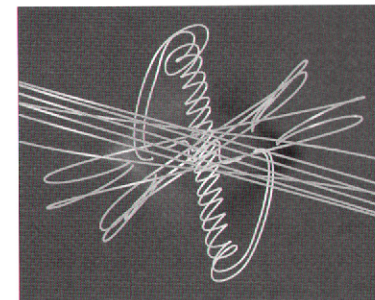
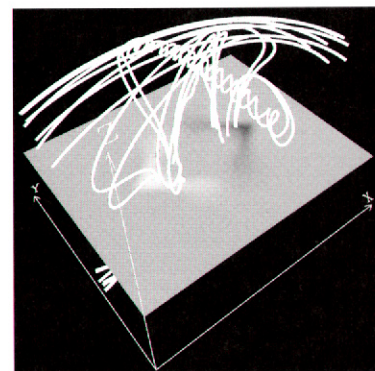
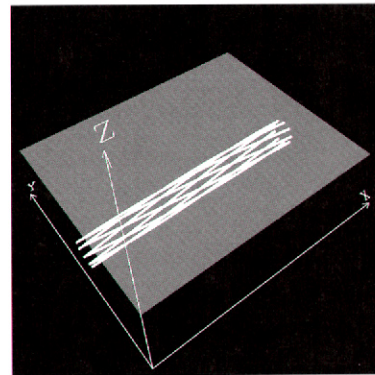


図2：シミュレーション結果。一番上が初期条件、二番目が浮上後のコロナ中での磁束管構造。面は太陽表面を表す。三番目は、二番目の結果を真上から見たもの。四番目は、プロミネンス放出現象 (HAO/NCAR)、プラズマが螺旋状の構造を持っていることが分かる。

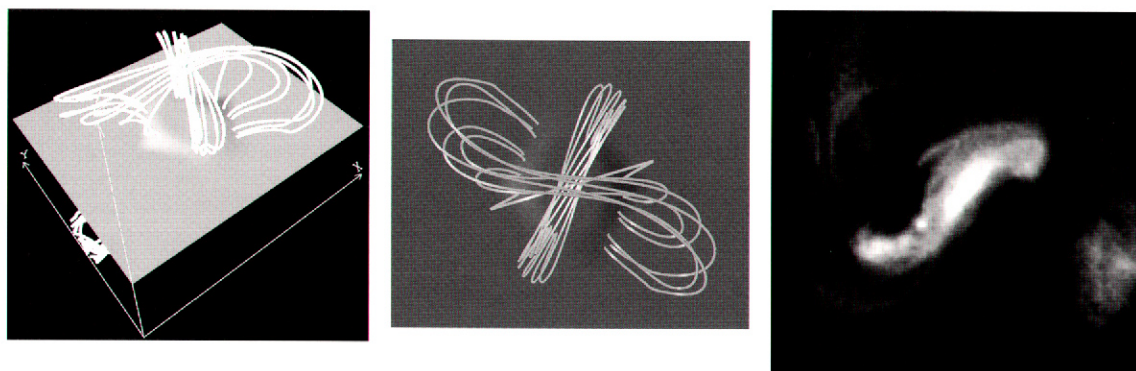


図3：(左, 中) 図2よりも, 初期に磁束管が5倍強く捻れているときの計算結果.
(右)「ようこう」により観測されたコロナ中のS字型構造⁸⁾.

一番下)が, 放出される前, 太陽表面付近にへばりついているときに, このようなヘリカルな磁場構造に支えられていることが分かっている. 現段階の浮上磁場のステージのシミュレーションからこの大スケールのプロミネンス放出過程に繋げるにはまだ何段階ものステップが必要だが, 我々のシミュレーション結果は, 初期の磁束管がそれほど捻れていなくてもコロナ中ではプロミネンスの種となるようなヘリカルな磁場構造が形成される可能性を示したといえる.

磁束管に捻れを図2の場合より5倍強く与えた場合の結果を図3に示す. この場合は浮上領域で半回転以上の捻りを持っているため, 対流運動による磁束管の変形が起こっても両極からの磁束管はすれ違うような形となる. そのため, 反平行成分の接触がなくその結果再結合が起こらず, 代わりにその強い捻れのため芯に近い磁束がS字型の構造を形成しているのが分かる. これは, コロナ中に実際に観測されている⁹⁾, S字型に捻れた磁場構造の形成に関わるものと考えられる.

4. 浮上磁束によるエネルギー解放：ジェットの数値シミュレーション

さて前節までの話は, 浮上する磁束管のみにつ

いてその発展過程を扱ったものだった. だが浮上磁束は, さらにコロナ中でのエネルギー蓄積や解放過程にも大きな役割を果たしている. 有力だと考えられているものの一つに, 浮上磁場とコロナ磁場の相互作用によるエネルギー解放がある. 「ようこう」は, 太陽コロナではひっきりなしに「ジェット現象」(細く絞られたプラズマ流)が発生していることを明らかにした^{10), 11)}. 図4の左図は, 「ようこう」により観測されたジェットの1例である. ジェット構造が右斜め下に向かって伸びているのが分かる. 典型的なジェットでは, 小さめのフレア(マイクロフレア)と同程度のエネルギー($10^{26} \sim 10^{28}$ erg程度)を持っており, 発生頻度は通常のフレアよりもはるかに大きい. このようなジェット現象は, 浮上磁場によりトリガーされたエネルギー解放により説明できるのではないかと考えられている. 再び図4(右図)を見てもらいたい. 下から上がって来ているのは, 浮上磁気ループである. ここでコロナ中に, 浮上磁場と反対方向の磁場成分を持つ磁束があれば, 互いの中で相互作用(磁気再結合)を起こし, 磁気エネルギー解放が生じると考えられる¹²⁾.

ここで, 磁気再結合とは, 電気抵抗により電流(従って磁場)が一瞬喪失し, 別の磁力線とつなぎ変わるといふ現象である. その際, 大量の磁気エ

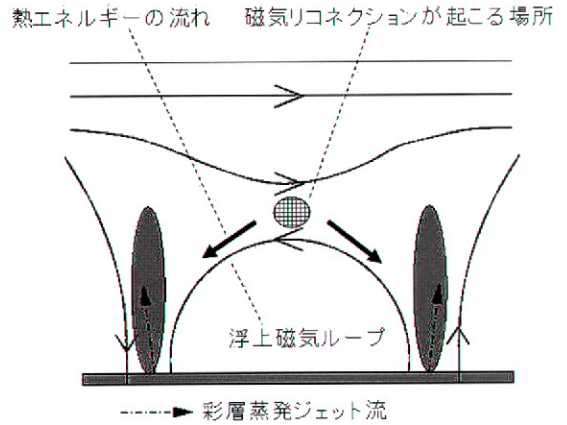
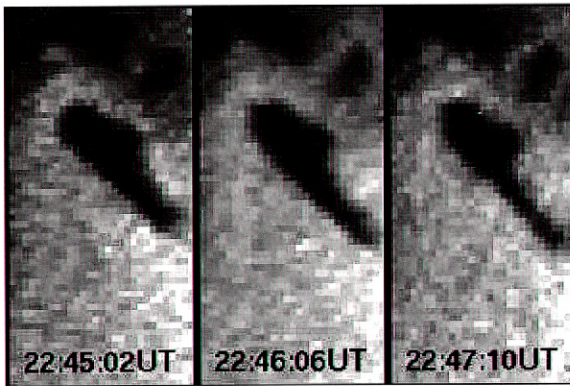


図4：(左)「ようこう」軟X線で観測されたコロナジェット¹¹⁾。右下に向かってジェットが発生しているのが見える。(右) 浮上磁場とコロナ磁場との相互作用(磁気再結合)によるジェット発生モデル。

エネルギーがプラズマの熱エネルギーに変換される(さらに詳しい解説は、例えば田島及び柴田¹³⁾などを参照してもらいたい)。さて、再結合により高温プラズマが発生すると熱伝導によるエネルギー輸送率が著しく増大し、解放された熱エネルギーは磁力線に沿って彩層下まで運ばれる(コロナプラズマの密度は約 $10^9/cc$ 、温度は約 2 MK で、このパラメータでは磁力線に垂直な熱伝導は平行なそれに比べてほとんど無視してよい。そのため熱伝導は非等方になる)。コロナから彩層にかけて、密度は数桁も上昇しており、熱伝導により熱エネルギーが彩層まで輸送されると彩層のガス圧が著しく増大し、そこからコロナに向けて高密プラズマの上昇流が起こる。この上昇流のことを、「彩層蒸発¹⁴⁾」と呼び、軟X線で明るく輝く構造はほとんどすべてこのような彩層蒸発によって形成された高密構造であると考えられている。図4(右図)のモデル¹²⁾によって、「ようこう」で観測されているジェット現象(図4、左図)を説明できるのではないかと考えられている。我々は、このモデルに基づき、彩層蒸発ジェットの発生過程を調べた。本研究は横山及び柴田¹⁵⁾、¹⁶⁾と下条ら¹⁷⁾の発展で、磁気ループ浮上と磁気再結合過程に加え熱伝導及び彩層

蒸発過程を考慮に入れることにより彩層物質がジェットとして飛び出す過程を調べたものである。図5がその結果である。再結合した磁力線に沿って、彩層プラズマが飛び出している様子が分かる(四角枠で囲った部分)。図6と比較すると、ジェットが発生している様子が分かりやすい。図6は、熱伝導、彩層蒸発過程を考慮に入れなかった場合の計算結果である。この場合は磁気再結合は起きているがジェットは発生していない事が分かる。

我々は、ジェットとしてコロナへ飛ばされる彩層物質の質量がどれだけになるかをシミュレーションにより調べた。その結果、ジェットの質量は、 $M = 6.8 \times 10^{12} \text{g} (B/10 \text{G})^{15/7} (T_{\text{cor}}/10^6 \text{K})^{5/14} (l/5000 \text{km})^{12/7} (t/400 \text{s})$ のように表されることが分かった。ここで、 B は磁場強度、 T_{cor} はコロナ温度、 l は浮上磁気ループの高さ、 t はジェットが発生してから時間を表している。さらに、このジェットの質量は以下のようにして説明できる事が分かった。磁気再結合によるエネルギー解放率は、磁場強度とアルフベン速度により求められる。磁気再結合の結果発生した1000万度以上の高温プラズマは、熱伝導により温度が下がる。この加熱と冷却のバランスによりループ頂上の温度を求めることができる。

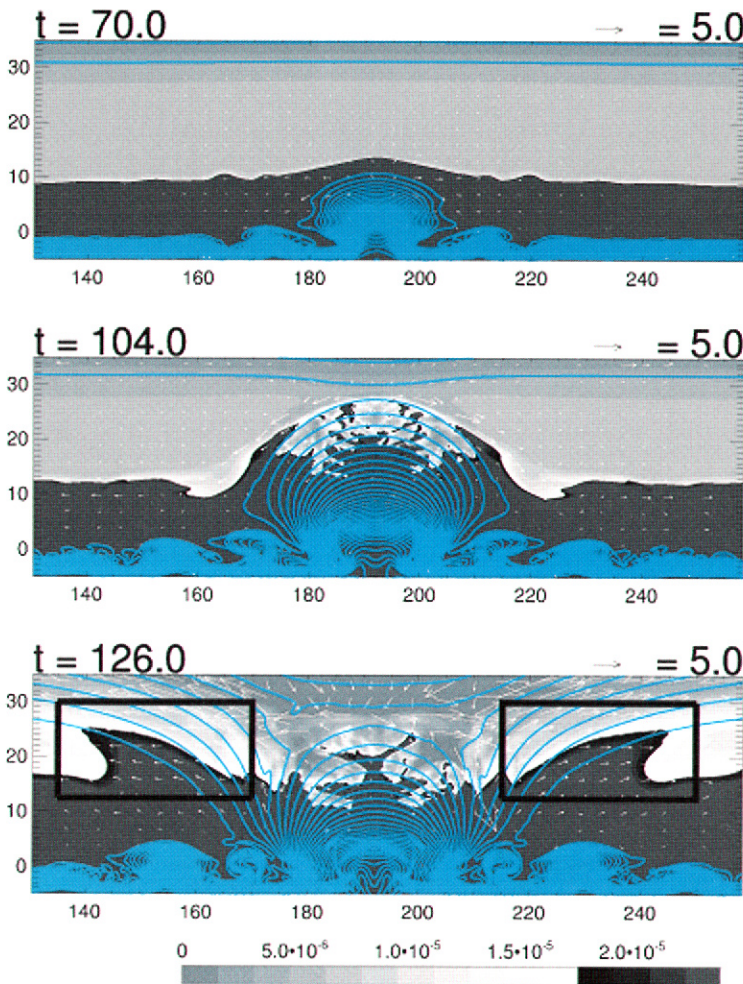


図5：浮上磁場によるジェット発生シミュレーション結果。色は密度分布、青い線は磁力線、矢印は速度ベクトルを表す。浮上してきた磁場が磁気再結合を起こし、彩層蒸発によりジェット流が発生している（四角枠の部分）。

さらに熱伝導で彩層下に伝わった熱エネルギーのフラックスは、ジェットのエンタルピーフラックスとほぼつりあっていると考えられる。以上の要素を考えると、まさにシミュレーションから求められたジェット質量のパラメータ依存性が理論的に解釈でき¹⁸⁾、観測から得られているジェットの密度¹¹⁾についてもうまく説明できた。

ところでこの場合、再結合した磁力線の根本か

ら発生している「彩層蒸発ジェット」のほかに、磁気再結合による直接のアウトフローである「リコネクションジェット」も発生している（図5で、ループ頂上から左右に発生している流れ）。彩層蒸発ジェットの速さは音速（数百 km/s）程度だが、リコネクションジェットはアルフベン速度程度（千～三千 km/s）の速度を持つ。彩層蒸発ジェットは密度が大きく、これが「ようこう」などで観測されているジェット構造だと考えられるが、リコネクションジェットは密度の小さい、高速な流れであり、非常に観測が難しい。これを発見できれば磁気再結合が発生している証拠を直接つかまえたことになるが、未だにリコネクションジェットを発見したという観測例はない。これは、日本の次期太陽観測衛星 (Solar-B) での重要な観測テーマの一つとなっている。彩層蒸発ジェットとともに、リコネクションジェットを直接検出することができれば本モデルの検証にもなる。

「Solar-B」はこれが可能な観測衛星として大いに期待がなされている。

5. 終わりに

最近ますます重要性を増している研究分野の一つに、「宇宙天気」研究がある。これは、太陽面でのエネルギー蓄積、それに続く爆発現象からコロナ質量放出 (CME)、そしてそれが地球磁気圏・電

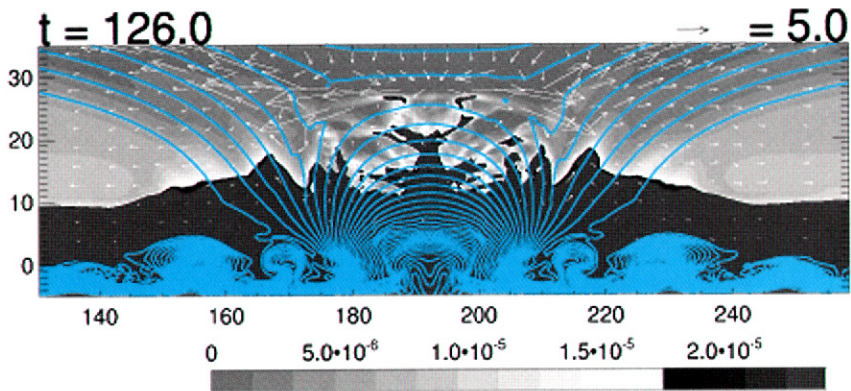


図6：熱伝導効果を含まない場合の計算結果。この場合は、磁気再結合は発生しているが彩層蒸発によるジェット流は発生していない事が分かる。

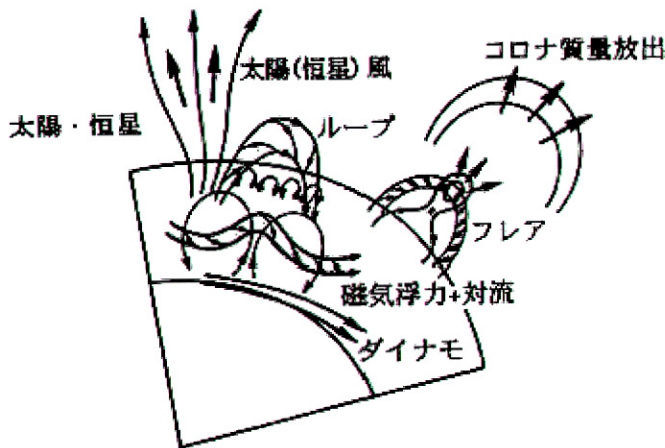


図7：太陽における磁氣的活動の全体像。ダイナモ過程により磁束管が増幅され、対流運動により変形を受けながらコロナへ浮上し、黒点や活動域磁場構造を形成し、フレアやジェットを起こす。それが大規模構造に影響を与えコロナ質量放出を引き起こし、惑星間空間や地球磁気圏に影響をおよぼす（図は、柴田¹⁹⁾より）。

離圏・大気圏に及ぼす影響までをトータルに研究しようというものである。

大きな太陽面爆発が起こると、それに伴う高エネルギー粒子や電磁波が大量に地球に降り注ぎ、地球磁気圏に大きな影響を及ぼし、身近なところでは発電所などが大きな影響を受ける。事実、か

つて「ようこう」により観測された巨大フレアが地球での非常に激しい磁気嵐の予報につながり、アメリカの電力会社の数億～数十億円にのぼるであろう被害が未然に防げたことがあった¹⁹⁾。これらの現象を事前に正確に予報出来ればこれらの施設が被るであろう被害を抑えることが出来るばかりで

なく、今後宇宙ステーションなどが建造されればまさに死活問題とも言うべきものとなってくる。浮上磁場とそれに続く太陽面爆発、磁気エネルギー解放を理解することはこの最初の一步となるものである(図7)。浮上磁場から磁気エネルギー解放、太陽面爆発、コロナ質量放出までの過程を統一的に理解することが出来れば、観測データを元にいつどのようにして太陽面爆発が生じ、それが最終的に地球圏環境にどのような影響を及ぼすかについて、理論的に予言できるようになるだろう。今後は、活動領域(黒点)の生成から消滅までの全貌はどうなっているのか、浮上磁場がどうエネルギーを蓄積しどう解放するか、それがCMEなどどのようにつながり、そして地球圏にどのような影響を及ぼすのか、等についての研究がますます重要になってくるであろう。

本研究は総合研究大学院大学・国立天文台で行った学位論文研究であり、指導教官であった国立天文台(現東京大)の横山央明助教授に深く感謝します。また研究過程を通じてさまざまな助言や暖かい励ましを頂いた京都大学の柴田一成教授、国立天文台の桜井 隆教授、下条圭美博士に感謝します。その他研究面やその他さまざまな面で議論して下さい助けて頂いた、国立天文台電波天文学研究系、太陽物理学研究系、京都大学大学院理学研究科附属天文台のスタッフ・研究者の方々、東京理科大学の故内田 豊教授に感謝します。

参考文献

- 1) Parker E.N., 1955, ApJ 121, 491
- 2) 柴田一成, 福江 純, 松元亮治, 嶺重 慎, 1999, 「活動する宇宙」裳華房
- 3) Shibata K., Tajima T., Steinolfson R.S., Matsumoto R., 1989, ApJ 345, 584
- 4) Nozawa S., et al., 1992, ApJ Suppl. 78, 267
- 5) Matsumoto R., et al., 1998, ApJ 493, L43
- 6) Magara T., Longcope D.W., 2001, ApJ 559, L55
- 7) Fan Y., 2001, ApJ 554, L111
- 8) Sakurai T., Shibata K., Ichimoto K., 1992, PASJ 44, L123
- 9) Sterling A.C., Hudson H.S., Zarro D.M., 2000, ApJ 532, 628
- 10) Shimojo M., et al., 1996, PASJ 48, 123
- 11) Shimojo M., Shibata K., 2000, ApJ 542, 1100
- 12) Shibata K. et al., 1994, in Proc. Int. Symp. on the Yohkoh Scientific Results, X-ray Solar Physics from Yohkoh, ed Y.Uchida, T.Watanabe, K.Shibata, H.S.Hudson (Tokyo: Universal Academy Press) p.29
- 13) Tajima T., Shibata K., 1997, Plasma Astrophysics, ADDISON-WESLEY
- 14) Hirayama T., 1974, Sol.Phys. 34, 323
- 15) Yokoyama T., Shibata K., 1995, Nature 375, 42
- 16) Yokoyama T., Shibata K., 1996, PASJ 48, 353
- 17) Shimojo M., Shibata K., Yokoyama T., Hori K., 2001, ApJ 550, 1051
- 18) Miyagoshi T., Yokoyama T., 2003, ApJL, in press.
- 19) 柴田一成, 1996, 天文月報 89 卷, 第 2 号

Theoretical Studies on Physical Processes of Emerging Flux in the Solar Atmosphere

Takehiro MIYAGOSHI

Kwasan Observatory, Kyoto University, Yamashina, Kyoto 607-8471, Japan

Abstract: We have studied physical processes of emerging flux in the solar atmosphere by using MHD numerical simulations. It is found that; (1) Depending on the initial state of the emerging flux, several characteristic magnetic structures, (e.g., the helical structure as a seed of prominence, and the sigmoid structure observed in soft X-rays,) are formed in the corona; (2) Coronal jets are produced by chromospheric evaporation as the result of magnetic reconnection between emerging flux and pre-existing overlying magnetic fields; and (3) Our scaling-law on mass of such coronal jets explains their density very well.