

太陽コロナ加熱と光球の微細な磁場構造

勝川 行雄

〈自然科学研究機構国立天文台 Sola-B 推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yukio.katsukawa@nao.ac.jp

太陽コロナの加熱メカニズムを観測的に解明するには、光球とコロナの磁場を介したつながりを明らかにすることが必要である。筆者らは、特に、コロナのもつ多温度性に着目し、多温度性を生み出すものは光球におけるどのような磁場構造かを調べた。その結果、光球における微細な磁気要素の密集度（磁気 filling factor）とコロナ加熱率が密接にかかわっていることを明らかにした。この結果は、光球における微細な磁気要素の運動がコロナ加熱に重要な役割を果たしていることを示唆している。2006年打ち上げ予定の太陽観測衛星「Solar-B」が有する高い空間分解能によって、微細な磁気要素の運動とコロナ加熱の関係を直接的に調べることが可能になると期待される。

1. はじめに

6,000度の光球の上空になぜ100万度のコロナがあるのか？何が加熱しているのか？というコロナ加熱問題はいまだに太陽物理学の未解決問題である*1。「ようこう」*2など人工衛星からのX線観測によって太陽コロナの性質の理解は大きく進歩した。コロナはきれいに球状に太陽を包んでいるわけではなく、極めて非一様であることが太陽のX線像を見ると即座に分かる。X線で特に明るく光っている場所は活動領域と呼ばれ、光球においては黒点を中心として強い磁場が存在する場所である（図1＝表紙参照）。コロナ加熱には磁場が必要不可欠であると考えられるゆえんである。しかし、その加熱メカニズムの理解はいまだ十分ではない。

加熱メカニズムとして大きく分けて2種類考えられている。一つはマイクロフレア、ナノフレアと呼ばれる微小フレアで加熱するものである。このような微小フレアは磁気リコネクション（磁力

線のつながり替え²⁾で引き起こされ、磁場のエネルギーが熱エネルギーに変換される過程である。もう一つは波（音波、Alfvén波）が光球からコロナへと伝播し、何らかの過程でコロナにおいて散逸することでコロナを加熱する過程³⁾である。観測からコロナ加熱メカニズムの素過程を検証するためには、直接、ナノフレアや波の散逸が起きている現場をとらえるのが最短ルートではあるが、これらは極めて微小な現象であると考えられており^{4),5)}、直接検出は困難であった。コロナ加熱問題が永らく未解明である原因の一つがここにある。

コロナ加熱を観測から解明していくためのもう一つのアプローチは、加熱エネルギーの生成場所の性質を調べることである。加熱エネルギーのおもとは光球での磁場と対流運動の相互作用で生成される。太陽コロナは極めて非一様であるので、コロナ加熱の活発な場所とそうではない場所で、光球における磁場の性質を調べることができれば、どのような過程がコロナ加熱に効いている

*1 恒星のほとんどすべてが太陽と同じように高温のコロナをもっていることが分かっている¹⁾。したがって、コロナ加熱問題は太陽に限らず、天体物理学における重大問題の一つであると言える。

*2 詳細は <http://www.solar.isas.jaxa.jp> を参照。

のかを知ることができると期待される。ただし、磁場が強ければ強いほどコロナは加熱されるといってもいいこと分かっている。確かに活動領域は X 線で明るく輝いているが、よく見ると明るいのは黒点の周囲であり、最も磁場の強い (2~3 キロガウス) 黒点の暗部の真上は X 線では暗い⁶⁾ (図 1=表紙参照)。単に強い磁場が存在するのみではコロナを加熱することはできないのである。したがって、強い磁場に加えてどのような付加的な条件が加わるとコロナ加熱がより活発に起こるのかを調べることが必要である。

2. コロナの多温度ループ構造

前節で述べたように太陽コロナは非一様である。活動領域上空には磁力線に沿って高温なプラズマが閉じ込められた「ループ構造」が多数観測される (図 1=表紙参照)。重要なことはこれらループの 1 本 1 本が異なる温度をもっていることである。「ようこう」などの軟 X 線望遠鏡は 200 万度以上の高温^{*3}な成分に感度をもつものに対して、「TRACE」衛星^{*4}といった極端紫外線の観測では 100 万度程度の低温なコロナプラズマに感度をもつ。(図 1=表紙参照)を見ると分かるよう

に、二つの観測装置で観測された異なる温度のプラズマの空間分布は、活動領域の中で異なる構造をもつ。高温なループは空間的にぼやけた広がった構造をもち、活動領域の中ほどで明るく光っている。一方、低温なループは細くくっきりとした構造をもち、足元付近が明るく光っている。二つの観測装置で観測された高温・低温ループの位置関係を詳細に調べた研究⁷⁾から、高温・低温ループは異なる位置に存在することも明らかになっている。つまり、個々のループは異なる温度をもっており、あるループは高温になり、あるループは低温になるということになる。コロナの温度の違いは何で生じているのか？ 高温・低温ループそれぞれの足元において、光球面ではどのような磁場構造になっているのか？ を明らかにすることが本研究の目的である。

コロナと光球は磁力線を介してつながっており、光球からコロナへと磁力線に沿ってエネルギーは供給されているはずである。よって、磁力線を代表するコロナループ構造を抜き出し、その足元の磁場構造とコロナを比較することが本質的である。これまではコロナループの足元の位置を同定し、その光球における磁場構造を調べる研

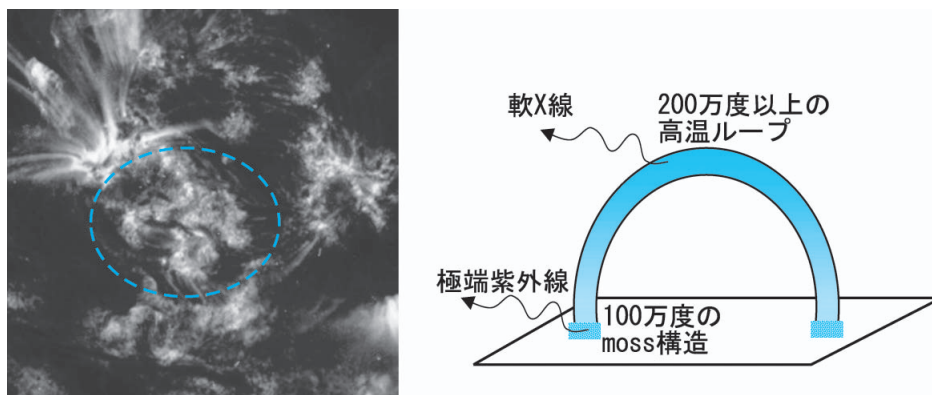


図 2 (左) TRACE 衛星で観測される moss 構造。コロナ下部が苔状に光っている構造である。(右) 高温ループと moss 構造の関係を示す模式図。

*3 太陽フレアが起こると 1,000 万度以上の超高温プラズマが突発的に生成される。ここでいう高温とは定常なプラズマの中の高温な成分を指す。

*4 詳細は <http://vestige.lmsal.com/TRACE/> を参照。

究は行われていない。これは一つにはループの足元の位置を決めるのが困難であったためである。特に「ようこう」軟 X 線望遠鏡で観測される高温ループは、足元近傍にいくと暗くなってしまう⁸⁾。ではどうしたらよいのか。本研究では軟 X 線像から高温ループの足元の位置を決めるのではなく、TRACE 衛星で観測される「moss」と呼ばれる構造を使うことを考えた。「moss」とは日本語で「苔」という意味であり、文字どおり、TRACE でコロナ下部が苔のように光って見える不思議な構造である⁹⁾ (図 2)。高温ループの上空は 200 万度以上の高温になっており軟 X 線を放射するが、足元へいくにつれ温度が下がり、軟 X 線では見えなくなる。一方、100 万度に感度のある TRACE 衛星では上空の 200 万度の部分は見えないが、コロナ下部で 100 万度を横切るあたりの構造を観測することができ、それが moss 構造として観測されていると考えられている¹⁰⁾。実際に軟 X 線像で見える高温ループ構造と moss 構造の位置関係を比較すると、ループの足元付近に対応していることが分かる。この特徴から、従来はあいまいであった高温ループ足元の位置について、moss 構造を用いることで系統的に決定することが可能となる。

3. 光球磁場の観測

太陽表面の磁場を高い精度で測定するのに広く用いられている方法は、Zeeman 効果によって生じる偏光を測定するものである¹¹⁾。円偏光成分から磁場の視線方向成分を、直線偏光成分から磁場の視線に対する接線方向成分を測定することができる。図 3 のように太陽表面上の各点で吸収線プロファイルを全偏光状態 (ストークスベクトルの I, Q, U, V) について測定することで、吸収線が形成される層における磁場のベクトル 3 成分を求めることが可能である。観測される吸収線プロファイルは、磁場の存在する大気 (磁気大気) のみでは説明することが難しく、磁場のない大気 (非磁気大気) を導入することでよく再現できることが知られている (図 4)。つまり、磁場は観測の空間分解能要素の中で一様に分布するのではなく、分解できない小さな領域に局在しているということである。この磁気大気の占める割合を磁気 filling factor と呼ばれる量で表す。磁場ベクトルの空間分布を求めるために、太陽表面上の各点で測定された吸収線プロファイルに対して、モデル大気を仮定したプロファイルと比較することで、磁場ベクトルや磁気 filling factor といった光球磁場の物

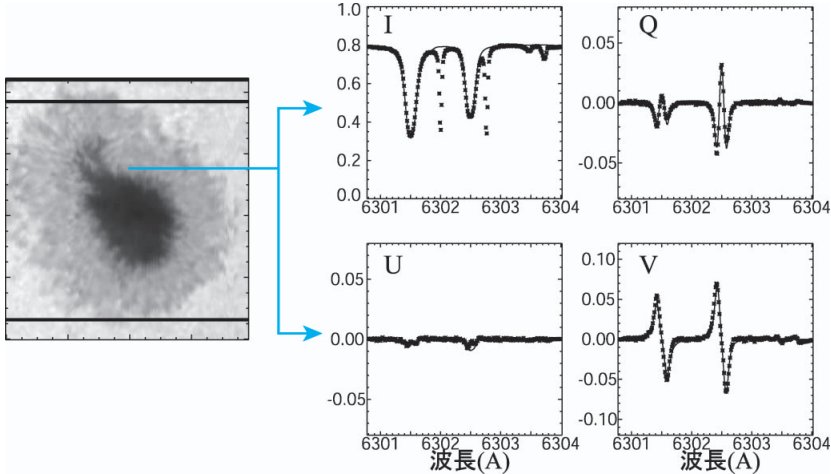


図 3 太陽光球面で観測される吸収線プロファイルの例。このような Zeeman 効果によって偏光した吸収線プロファイルを太陽表面の各点で測定し、磁場ベクトルの分布を求める。

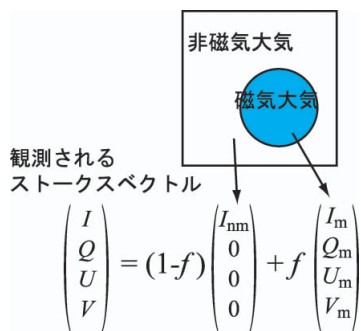


図 4 光球大気を磁場の存在する大気（磁気大気）と磁場の存在しない大気（非磁気大気）の 2 成分からなっていると考える。磁気大気からは偏光した光がくるのに対して、非磁気大気からは無偏光な光がくる。磁気大気の占める割合を磁気 filling factor と呼ぶ。

理量を導出する¹²⁾。

ただし、上述のような偏光の吸収線プロファイルを高精度で観測できる装置は世界に数えるほどしか存在しない。これは高い偏光測定精度（偏光度で 0.1% 程度）が要求されるためである。さらに、コロナループとの対応関係を調べるためには、少なくともコロナループの太さ (1,000~2,000 km) より良い空間分解能であることが必要である。そこで筆者らは National Solar Observatory (NSO)・High Altitude Observatory (HAO) が開発した Advanced Stokes Polarimeter (ASP)¹³⁾ を用いた。ASP は、現在のところ、世界で最も優れた磁場観測装置であり、太陽表面上で約 1,000 km の構造を分解することが可能である（空間分解能は 1 秒角程度）。筆者らのグループでは、「ようこう」や「TRACE」（コロナ観測）、「ASP」（光球磁場観測）による同時同領域観測を 3 度にわたり行い、光球磁場とコロナの関係を探るうえで貴重なデータセットを取得することに成功した。

4. コロナ加熱率は何が決められているのか？

TRACE 衛星で観測されたコロナ像から、moss 領域（つまり高温ループの足元）と低温ループの

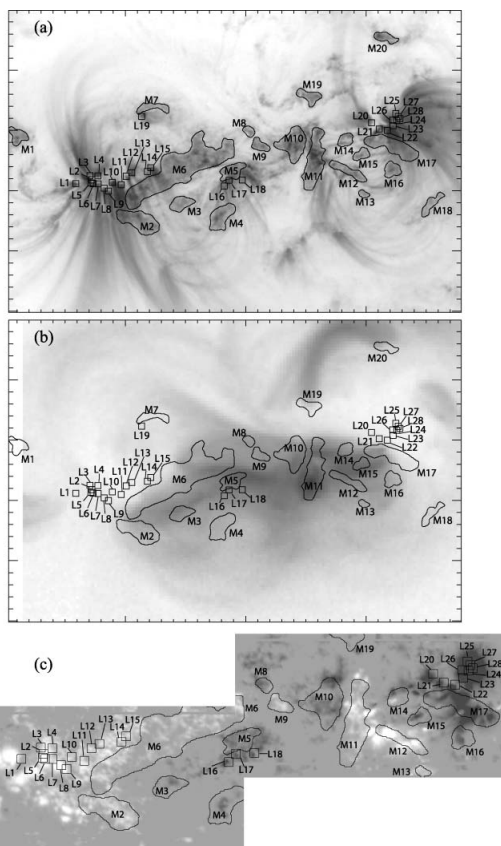


図 5 (a) TRACE, (b) ようこう軟 X 線望遠鏡で観測した活動領域 NOAA9231 のコロナの構造。moss 領域（つまり、高温ループの足元）と低温ループの足元の位置を同定し、その磁場を調べる。(c) は ASP で観測した光球視線方向磁場分布。

足元領域を抜き出し（図 5）、それぞれの領域で磁場の特徴を調べた¹⁴⁾。ここでは磁場強度（Zeeman 分離の大きさに対応）、光球に対する磁場の傾き角（0 度は光球面に垂直、90 度は光球面に平行）、磁気 filling factor の三つに着目する。その結果が図 6 である。いずれの領域でも磁場強度は 1~1.5 キロガウス程度であり、また光球面に対してほぼ垂直（傾き角 < 30 度）である。高温ループと低温ループの間で、磁場強度・傾き角のヒストグラムについてはあまり差が見られないことが分かる。大きく異なるのは磁気 filling factor のヒストグラムである。高温ループの足元では、磁気 filling fac-

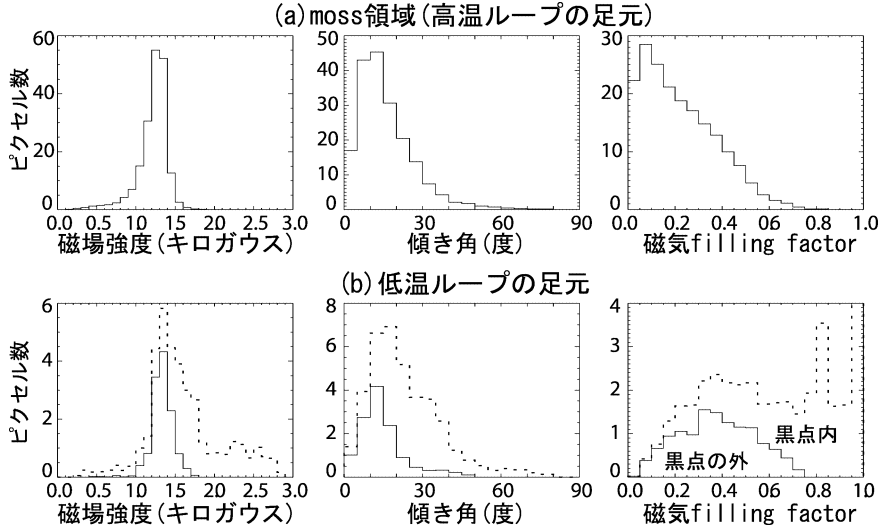


図 6 (a) moss 領域 (高温ループの足元), (b) 低温ループの足元領域における光球磁場の特徴を表すヒストグラム. 磁場強度, 磁場の傾き角 (0度は光球面に対して垂直, 90度は光球面に平行) のヒストグラムは高温ループと低温ループの間で似ているのに対して, 磁気 filling factor のヒストグラムは大きく異なっているのが分かる.

tor が 0.3 より小さい点がほとんどであるのに対して, 低温ループの足元では 0.2 よりも大きくなっている. また, 低温ループのほとんどは黒点あるいは pore (小黒点) の上に足元が存在していることも明らかとなった. そのような可視光で暗い場所はほとんどが磁気大気で占められており, 磁気 filling factor が大きくなっているのである.

この観測結果が意味するものは何なのか. 光球において磁場は微細な構成要素 (磁気要素) の集合であると考えられている. 光球磁場の観測に用いた ASP の空間分解能は約 1,000 km であり, 100~200 km の空間スケールである微細な磁気要素¹⁵⁾を空間的に分解することはできていない. 1 キロガウス強の磁場強度, 光球面に対して垂直な傾きという共通した性質から, この磁気要素は高温ループと低温ループで変わらないものであると言える. 磁気 filling factor を微細な磁気要素の数密度に比例した量であると考えれば, 高温ループと低温ループの違いは磁気要素の密集度の違いであると解釈することが可能である. つまり, 高温ループの足元では磁気要素がまばらに

存在しているのに対して, 低温ループの足元では磁気要素が密に詰まっている (図 7) ということである.

では, なぜ, 磁気要素の数密度が小さい方が, 高温なプラズマを形成しやすいのか. もちろん, 磁気要素の数密度が大きい方が総磁束量は大きくなる. 単純に考えると, 磁気要素の密度が大きい方が加熱が活発になると思われるが, 実際は逆の結果になっている. つまり, 磁気要素の密度が小さい方が, 加熱が活発なように見えるのである. この観測結果に関する解釈は以下のとおりである. 磁気要素の密度が小さい場合, 磁気要素が互いに自由に運動することが可能である (気体分子の運動のようなイメージ)¹⁶⁾. この光球における運動は上空の磁力線を大きく曲げる, あるいはねじるように働く (図 7). こうして, 光球からコロナへとより大きなエネルギーが供給され, 最終的には磁気リコネクションを引き起こして周囲のプラズマを加熱し, 高温ループになっている, と筆者らは考えている. 一方, 磁気要素の密度が大きい場合, 光球における磁気要素の運動が強く抑え

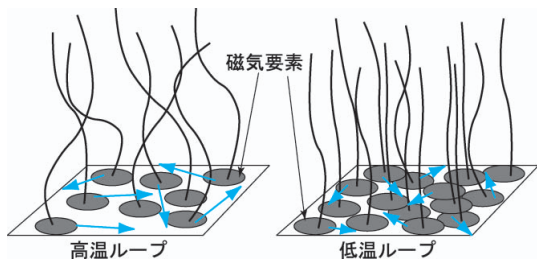


図7 筆者らが考える高温・低温ループ足元における磁場構造の模式図。高温ループの足元では磁気要素の密度が小さく、光球における活発な運動によって、ねじ曲げられた磁力線が生成される。一方、低温ループの足元では磁気要素が密に存在し、光球における運動も抑制され、まっすぐな磁力線のままとなる。

られ(固体のようなイメージ)¹⁷⁾、上空の磁力線は比較的まっすぐなままとなっているであろう(図7)。このとき、コロナ加熱率は小さくなり、低温ループになっていると考えられる。

ここまで、磁気 filling factor が小さい(磁気要素の数密度が小さい)方がコロナ加熱には有利に働いていることを述べた。では、小さければ小さいほどいいかというところでもない。活動領域の外、静穏領域では、磁場がよりまばらに存在しており、そこでの磁気 filling factor は典型的には0.01程度である¹⁸⁾。静穏領域と呼ばれることから分かるようにX線ではもちろん暗く、コロナ加熱率は活動領域に比べるとはるかに小さい¹⁹⁾。このことから、静穏領域では、光球での運動よりも、磁気要素の数密度が小さい方が勝り、コロナ加熱率は小さくなっていると考えられる。つまり、磁気要素が適度に存在すると(磁気 filling factor で0.1~0.4程度)、光球における磁気要素の数も運動もコロナを加熱するのに効率的に働くのではないかと推測される。

5. Solar-B へ

本研究から得られた観測結果、すなわち磁気

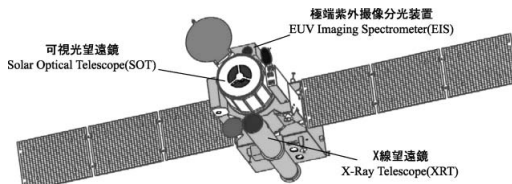


図8 2006年打ち上げ予定「Solar-B」衛星の模式図。可視光、極端紫外線、軟X線の三つの望遠鏡を搭載し、コロナの構造・活動が光球の磁場とどのようにかかわりあっているかを詳しく調べる。

filling factor がコロナ加熱と密接に関わっているという事実は、とりも直さず次の二つを意味していることになる。

- (1) 既存の磁場観測装置では空間的に分解できていない1,000 km以下の磁場構造がコロナ加熱に強く寄与していること。
- (2) 磁場のみでなく、その運動が極めて重要であること。

よって、コロナループの足元の位置を同定し、高い空間分解能(1,000 km~1秒角以下)で、光球上における磁場と速度場の二つを直接同時に測定することが次のステップとなる。現在のところ、このレベルの性能を兼ねそろえた観測装置は存在しない。

現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と国立天文台では2006年打ち上げ予定の太陽観測衛星「Solar-B」を開発している*⁵⁾。Solar-Bは可視、極端紫外(EUV)、軟X線の三つの望遠鏡を搭載する(図8)。Solar-Bの目玉はSOT(Solar Optical Telescope、可視光望遠鏡)である。これは口径50 cmの日本初本格的な可視光宇宙望遠鏡である。地球大気の影響を受けない宇宙空間において、太陽光球面上のおよそ200 kmの微細な構造(0.2秒角に相当)を分解することが可能であり、かつ、長時間にわたって連続的に微細な構造の運動や時間発展を追跡する能力を有する。加えて、磁場観

*⁵⁾ 詳細は <http://solar.nro.nao.ac.jp/solar-b/> を参照。

測に必要な不可欠な高い偏光測定能力をもち、ASPと同様の偏光分光測定装置も搭載する。従来の磁場観測装置では不可能であった微細な磁気要素の磁場構造を詳細に分解して測定することが可能になると期待される。SOTによって、上述の微細な磁場・速度場観測が現実のものとなるのである。

また、Solar-Bに搭載される極端紫外線やX線の望遠鏡も従来よりも高い空間分解能と感度をもつ。コロナの温度・密度診断やダイナミクスの観測において従来以上の成果が得られると期待されている。Solar-Bに搭載される三つの望遠鏡によって、常時、光球における微細な磁場構造(コロナ加熱エネルギーの生成現場、いわば原因)と、上空のコロナ(コロナ加熱エネルギーの散逸現場、いわば結果)を同時に観測できるわけである。そういった点から、Solar-Bはコロナ加熱解明のための究極の観測装置であるといっても過言ではない。2006年の打ち上げが待ち遠しい限りである。

謝 辞

本記事は東京大学大学院で行った学位論文研究に基づいており、指導教官であった国立天文台の常田佐久教授に深く感謝しています。清水敏文助手(国立天文台)や永田伸一助手(京都大学)、国立天文台太陽グループの皆様にはデータ解析やその解釈でいろいろと助言をいただきたいへん感謝しています。本研究はアメリカ国立太陽観測所ASPによる光球磁場観測、「ようこう」や「TRACE」といった人工衛星によるコロナ観測を組み合わせることで初めて可能となったものです。この共同観測を行うにあたり、サポートしていただいたアメリカ国立太陽観測所のスタッフの方々、「TRACE」の観測をサポートしていただいたT. Tarbell氏にはたいへん感謝しております。磁場データの解析ではB. W. Lites氏にたいへんお世話になりました。

参 考 文 献

- 1) Rosner R., et al., 1985, ARA&A 23, 413
- 2) 新田伸也, 2004, 天文月報 97, 107
- 3) 鈴木 建, 2004, 天文月報 97, 276
- 4) Katsukawa Y., Tsuneta S., 2001, ApJ 557, 343
- 5) Katsukawa Y., 2003, PASJ 55, 1025
- 6) Pallavicini R., et al., 1979, ApJ 229, 375
- 7) Nagata S., et al., 2003, ApJ 590, 1095
- 8) Kano R., Tsuneta S., 1996, PASJ 48, 535
- 9) Berger T. E., et al., 1999, Sol. Phys. 190, 409
- 10) Martens P. C. J., et al., 2000, ApJ 537, 471
- 11) Ichimoto K., 2002, J. Plasma Fusion Res. 78, 752
- 12) Skumanich, A., Lites B. W., 1987, ApJ 323, 473
- 13) Elmore D. F., et al., 1992, Proc. SPIE 1746, 22
- 14) 勝川行雄, 2004, 東京大学学位論文
- 15) Solanki S. K., 1993, Space Sci. Rev. 63, 1
- 16) Nisenson P., et al., 2003, ApJ 587, 458
- 17) Sobotka M., et al., 1997, A&A 328, 689
- 18) Socas-Navarro H., Sanchez Almeida J., 2002, ApJ 565, 1323
- 19) Withbroe G. L., Noyes R. W., 1977, ARA&A 15, 363

Heating of the Solar Corona and Fine Magnetic Structure in the Photosphere

Yukio KATSUKAWA

Solar-B Project Office, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: It is important to investigate magnetic connection between the photosphere and the corona for understanding the heating mechanism of the solar corona. We investigate what magnetic signature in the photosphere is responsible for the difference in the coronal temperature, and find that number density of fine magnetic elements (magnetic filling factor) is significantly correlated with the heating rate of the corona. This result suggests that motion of the magnetic elements in the photosphere plays an important role in the heating of the corona. The Solar-B satellite, which will be launched in 2006, will provide an opportunity to perform direct investigation of the correlation between the photospheric motion of fine magnetic elements and the coronal heating.