

太陽黒点崩壊の担い手

久保 雅 仁

〈High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000,
Boulder, CO 80307-3000, USA〉
e-mail: kubo@ucar.edu



崩壊期の太陽黒点周辺には、黒点から離れていく多数の小さな磁気要素が観測されます。このような小さな磁気要素が黒点から磁束を運び去ることが、黒点崩壊の主な要因であると考えられてきました。私たちは、太陽光球面のベクトル磁場観測を用いて、今まで一括りにされていたこのような黒点周辺の磁気要素には、太陽面に対して垂直な磁場をもつものと水平な磁場をもつものが存在するを見つけました。また、黒点半暗部の磁場との比較により、黒点周辺に存在する磁気要素がもつ磁場構造の違いは、内側に位置する黒点半暗部の磁場構造に起因することがわかりました。さらに、黒点から離れていくすべての磁気要素が黒点崩壊に寄与しているわけではなく、太陽面に対して垂直で黒点と同じ極性の磁場をもつ磁気要素だけが、黒点から磁束をはぎ取る役割を果たすことを示唆する結果を得ました。

1. はじめに

太陽を見たときに最初に目につくのは黒点ではないでしょうか。太陽黒点の大きさは直径数千 km から大きなものでは数万 km に達します。黒点の寿命は長いもので 1~2 カ月程度ですが、最終的にはどの黒点も消えてなくなります。黒点の内側に亀裂が入って粉々になったり、黒点の外縁から無数の小さな磁気要素が離れていくことが、黒点崩壊の主な要因と考えられています。しかし、何が引き金になって、いったん形成された黒点が再び消えていくかは、太陽黒点の磁場観測が開始されて 100 年以上経った今でも大きな謎のままです。私は黒点磁場の形成・消失に特に興味をもち、光球磁場の時間発展について研究を行っています。その中で、今回は黒点崩壊に関する研究を紹介します¹⁾。

2. 黒点崩壊と黒点周辺の微細磁場構造

黒点は、図 1(a) に示したように目玉焼きに似た構造をしていて、中心の暗い部分である暗部とその周囲のやや暗い部分に当たる半暗部から構成されます。また、黒点を城にたとえると堀の部分に対応する「moat 領域」に囲まれています。moat 領域は黒点から外に向かう流れをもつことが特徴です。図 1(a) の連続光強度マップでは moat 領域とそれより外側の静穏領域との区別がつきません。しかし、図 1(b) の視線方向磁場マップを見ると、moat 領域には静穏領域と比べて多数の小さな磁気要素が存在し、moat 領域の外端付近には比較的サイズが大きな磁場の塊があることがわかります。

崩壊期の黒点周辺の moat 領域に多数観測される小さな磁気要素は、ほぼすべて黒点から外向きに移動しており、“moving magnetic feature

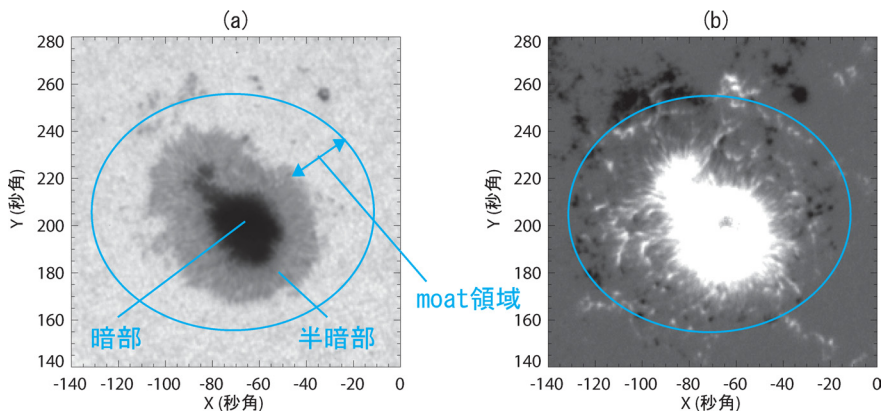


図1 太陽黒点の (a) 連続光強度および (b) 視線方向磁場のマップ. 図1(b) で白がN極 (正極), 黒がS極 (負極) を表している. 横軸・縦軸は太陽面中心からの距離を示していて, 1秒角は太陽面上で約700 km.

(MMF)²” と呼ばれています. MMF の平均移動速度は, 秒速 0.5 km 程度で, 数分で消滅してしまうものから, 数時間かけて moat 領域の外端まで移動するものまでさまざまです. 典型的な MMF の大きさは 1,500 km 以下で黒点と比べると非常に小さいですが, 数が多いために, すべて数え上げると黒点の磁束の減少率の 3~8 倍程度の磁束を運び去るという観測結果があります³⁾. ほとんどの崩壊期黒点の周囲で MMF が観測され, 黒点から磁場を運び去るのに重要な役割を果たしていると考えられています.

MMF の寿命, 移動速度, 出現位置などに関しては統計的な研究がなされていますが^{2), 4)-6)}, 光球磁場の視線方向成分のみを用いたものばかりで

す. 当然, 磁場の視線方向成分だけでは, 正確に磁場構造を理解することはできません. そこで, 今回の研究では光球磁場の 3 成分 (ベクトル磁場) の高精度観測を用い, MMF, moat 領域, 黒点半暗部の磁場構造を詳細に調べました.

3. 偏光分光観測による光球磁場の測定

太陽光球面のベクトル磁場を取得するには, 図2に示した吸収線のゼーマン効果によって生じる偏光を観測する必要があります⁷⁾. 磁場が完全に視線方向に沿っている場合は円偏光 (V 信号) のみが観測され, 逆に磁場が視線方向と直交している場合は直線偏光 (Q, U 信号) のみが観測されま

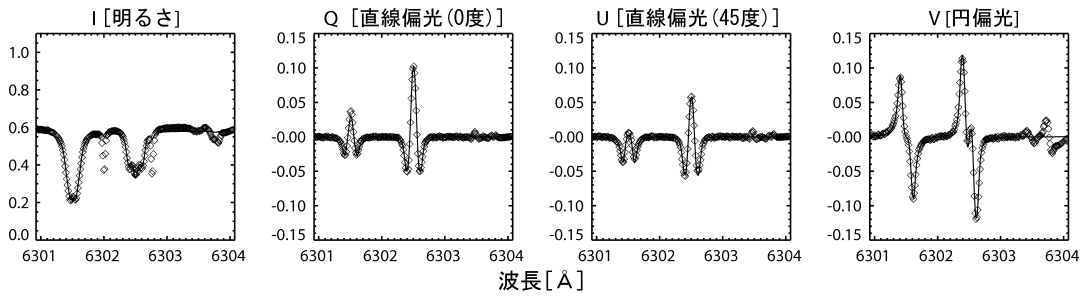


図2 偏光した2本の吸収線プロファイルの観測例. 点が観測データを示し, 線が最小2乗法によるフィッティング結果を示している.

す。つまり、視線方向に対する磁場の傾きは、円偏光と直線偏光の比からわかります。また、磁場の方位角は直線偏光の Q 信号と U 信号の比から、磁場強度はゼーマン分裂幅から求めることができます。実際には、観測で得た吸収線プロファイルを最も良く再現するように、非線形最小 2 乗法を用いて磁場ベクトルを求めています⁸⁾。

太陽光球面の磁場はいつも 3 成分をもっていますので、「常にベクトル磁場を観測すべきでは？」というのは当然の疑問だと思います。太陽面上の磁場によって生じた偏光を正確に得るためには、望遠鏡や観測装置で生じる偏光を取り除かなければならず、精度の良い偏光観測を行える装置が必

要になります。ところが、このような観測装置は、世界中を探しても非常に数が限られています。また、より正確な磁場測定を行うためには分光観測が必要になります。しかし、磁場の空間情報を得るためには、スリット位置を動かしながら測定を繰り返さねばならず、1 枚のマップを得るのに時間がかかってしまいます。MMF のような顕著な運動を示す小さな磁場要素の「時間発展」と「ベクトル磁場」の情報を同時に得ることは、大気の影響のある地上観測では困難です。

そこで、今回の観測では米国太陽観測所と高度研究所が開発した Advanced Stokes Polarimeter (ASP)⁹⁾ と SOHO 衛星に搭載された Michelson

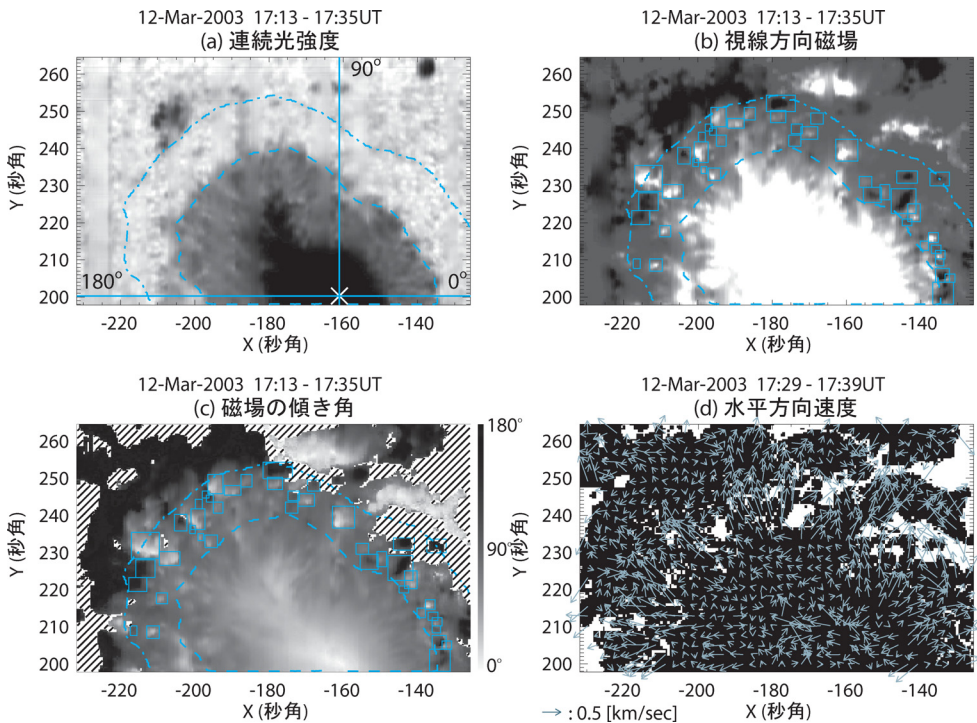


図 3 ASP 観測から作成した (a) 連続光強度, (b) 視線方向磁場, (c) 磁場の傾き角のマップ. (d) は MDI 観測から作成した水平方向の移動速度のマップ. すべて同じ視野で、黒点の北側半分領域に一致する。青色の点線が黒点半暗部の外端を、一点鎖線が moat 領域外端を、四角は筆者が選んだ moat 領域中の MMF を示している。図 3(a) の角度は太陽黒点中心 (×印: 磁場の湧き出し口) 周りの方位角を表す。図 3(b) で白が N 極 (正極), 黒が S 極 (負極) を示す。図 3(c) で、磁場の傾き角の定義は 90 度が太陽面に対して水平で、0 度 (正極), 180 度 (負極) が太陽面に対して垂直向きとなっている。斜線の部分は偏光度が低いために磁場が導出できない領域。図 3(d) の白色領域は相関係数が低く有意な水平速度が求まらなかった領域。

Doppler Imager (MDI)¹⁰ による同時観測結果を用いました。現在はその地位を 2006 年 9 月に打ち上げられた「ひので」衛星¹¹搭載の可視光磁場望遠鏡¹²に譲ってしまいましたが、私たちが観測に行った当時は ASP が最も高精度かつ高空間分解能な観測を実現した偏光分光装置でした。一方、SOHO/MDI では光球磁場の視線方向成分のみですが、1 分ごとに磁場の時間発展を大気の影響を受けずに観測できます。MDI で取得した異なる時刻の 2 枚の視線方向磁場のデータに対して相互相関を取ることで、各画素における磁気要素の移動速度を見積もることができます¹³。ASP 観測と MDI 観測を相補的に組み合わせることで、約 1 秒角（太陽面上の距離で約 700 km）という比較的高い分解能で「光球面のベクトル磁場」と「光球磁場の時間発展・移動速度」の両者を調べている点が本研究の特徴です。

4. 新種の MMF

従来の研究で MMF は、視線方向磁場マップを見て黒点から外向きに移動するパッチ状のものと認識されてきました。判断に多少の個人差はあるでしょうが、同様の定義で私が MMF と判断したものを図 3 の青色の四角で示しました。しかし、図 3(c) に示した磁場の傾き角のマップを見ると、四角で囲まれた従来の MMF 以外の moat 領域でも十分な偏光信号があります。このような遍在する磁場も、従来の MMF と似たように外向きに流れていることが図 3(d) の MMF の移動速度マップからわかります。今回、初めて明らかになった太陽黒点周辺に遍在する外向きの移動速度をもつ磁場構造を「新種の MMF」と呼ぶことにします。

図 4 に示した磁場の傾きの頻度分布を見ると、moat 領域全体では太陽面に対して水平に近い角度（磁場の傾きが 60°-90° の範囲）にピークがあります。これは、新種の MMF が太陽面に対して水平に近い磁場をもっていることを意味します。実はこのために、新種の MMF が今までの視線方

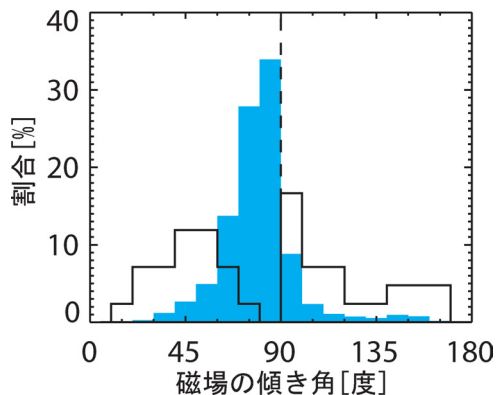


図 4 磁場の傾き角の頻度分布。青色が moat 領域全体を表し、実線が図 3 の四角で囲まれた従来の MMF（合計 42 個）を表す。磁場の傾き角の定義は図 3 を参照。

向磁場の観測では認識されていなかったのです。一方、従来の MMF として認識されてきたものは、太陽面に対して水平に近い磁場をもつものもありますが、垂直に立った磁場をもつものもあり、全体の MMF の頻度分布のピーク位置付近がすっぱりと抜け落ちています。新種の MMF と従来の MMF の境界は明瞭ではありませんが、新種の MMF に対して 10-15 度程度の磁場の傾きをもてば、従来の MMF と判断できるようです。

5. 黒点半暗部磁場と MMF 磁場との対応関係

MMF には垂直な磁場をもつものと水平な磁場をもつものがあることがわかりましたが、両者の違いはどこからきているのでしょうか？ その答えを探るために、MMF の磁場構造を moat 領域の始点である黒点半暗部の磁場構造と比べてみました。まず、黒点半暗部の外端（図 3 の点線）に沿った磁場の傾きの変化を図 5(a) に示しました。半暗部外端は、基本的には太陽面から 10°-20° の傾きをもつ磁場が占めていますが、図 5(a) の点線の位置では周囲と比べて垂直に立った磁場が局所的に存在しており、これらは図 6 でそれぞれ青

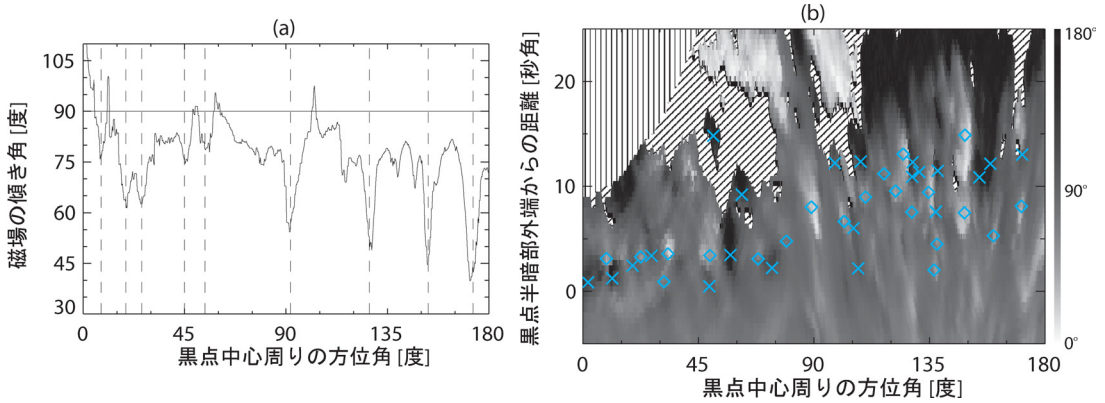


図5 磁場の傾き角の (a) 黒点半暗部外端に沿った変化および (b) 黒点中心周りの方位角と黒点半暗部外端からの距離の関係。黒点中心周りの方位角と磁場の傾き角の定義は図3を参照。図3の四角で囲まれたMMFのうち、正極のMMFの位置を◇印で、負極のMMFの位置を×印で表している。

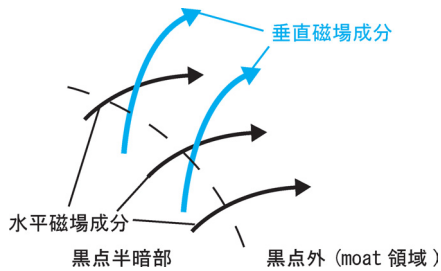


図6 黒点半暗部外端付近の磁場構造のモデル図。

と黒の線で表されるような磁場構造をしていると考えられます¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。また、図6のような半暗部の磁場構造と比較を行いやすくするために、黒点中心周りの磁場の傾き角の変化を動径方向に並べたものを図5(b)に示しました。図5(b)で黒点半暗部外端付近に着目すると、半暗部の垂直な磁場をもつ領域の延長線上に位置するMMFは垂直な磁場をもち、水平な領域の延長線上に位置するMMFは水平な磁場をもっています。つまり、MMF磁場と半暗部磁場との間に対応関係があります。これは、MMFの起源が黒点であることを示す証拠です。

MMFの極性と半暗部磁場の関係をさらに着目すると、半暗部で水平磁場をもつ領域の延長線上には正負両方の極性をもったMMFが存在しま

すが、垂直成分の延長線上では黒点と同極のMMFのみです。これらの観測結果から、MMFおよび黒点半暗部は図7に示した磁場構造をもっていると解釈できます。半暗部磁場の垂直成分が黒点からはぎ取られた結果、垂直磁場をもつMMFが形成され、水平磁場をもつMMFは黒点外へと伸びた半暗部の水平磁場の凹凸に対応します。

6. 黒点崩壊に寄与するMMF

今回の研究では各データ点での磁束量と磁場の移動速度を求めているので、黒点半暗部外端からある距離を単位時間当たりには通過する全磁束量(MMFの磁束輸送率)を見積もることができます。これを、黒点をもつ磁束の減少率と比べてみます。黒点半暗部付近では、黒点と同極(正極)のMMFの磁束輸送率が、反対極(負極)の輸送率に比べて1桁近く大きく、また、黒点の磁束減少率の7倍程度大きいという結果を得ました。この結果は、MMFが黒点崩壊を担うのに十分な磁束量を黒点から運びうるという過去の研究^{2), 3)}に一致します。

ここで、MMFの磁束輸送率が大き過ぎることは、一部のMMFのみが黒点崩壊に寄与している

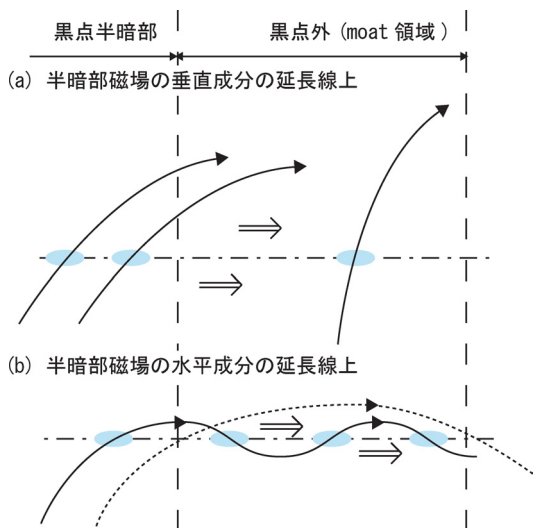


図7 (a) 黒点半暗部磁場の垂直成分の延長線上および (b) 水平成分の延長線上に位置する MMF のモデル図。実線が磁力線を、点線が moat 領域に遍在する水平磁場を示す。一点鎖線は太陽光球面を表している。

ことを意味します。ではこういった MMF が、黒点崩壊に寄与しているのでしょうか？ まず、太陽面に対して 45 度以上の磁場の傾き（つまり図 7(a) のような垂直な磁場）をもつ MMF に注目し、その磁束輸送率を見積もると、半暗部外端付近で黒点の磁束減少率の 3 倍程度になります。依然として MMF の磁束輸送率のほうが黒点の磁束減少率より大きいですが、図 3 を見ると、このタイプの MMF は黒点周辺を埋め尽くしているわけではありません。今回は 1 枚のベクトル磁場マップを使用しているので、偶然このタイプの MMF が半暗部外端付近に多かったのかもしれませんが、そこで、moat 領域全体で平均すると、垂直な磁場をもつ MMF の磁束輸送率は黒点の磁束減少率とほぼ同じ値になりました。これは驚くべき一致です。

今回得られた結果は、黒点半暗部磁場の垂直成分からはぎ取られた MMF、つまり、垂直でかつ黒点と同極の磁場をもつ MMF だけが黒点崩壊

に寄与していることを示唆します。この場合、水平な磁場をもつ MMF は、黒点外へと伸びた半暗部の水平磁場の凹凸部分（図 7(b) 参照）が外に移動しているだけで、実際には黒点の磁束を運び去っていないことになります。このようなアイデアはすでに提案されていましたが^{3), 17)-19)}、観測的な証拠を得たのはこの研究が初めてです。

7. そして、「ひので」の時代へ

今回の研究で得られた MMF の磁場構造および磁束輸送率から、太陽面に対して垂直でかつ黒点と同極の磁場をもつ MMF のみが黒点崩壊に寄与していることがわかりました。黒点の崩壊メカニズムをさらに理解するためには、この MMF の形成過程や MMF 磁場の起源である黒点半暗部の複雑な磁場構造の形成過程を知る必要があります。しかし、MMF や黒点半暗部といった微細な磁場構造の時間変化を詳細にとらえることは、地上の望遠鏡では現在のところ非常に困難です。今回の研究でも、大気状態が非常に良かった 1 枚のベクトル磁場マップのみを使用しました。この状況を打破してくれるのが、「ひので」衛星に搭載された可視光磁場望遠鏡です。この望遠鏡に搭載された偏光分光装置は、約 200 km という非常に高い空間分解能で光球のベクトル磁場の時間発展をいつでも連続的に取得することができます。

私は幸いにも「ひので」衛星の打ち上げおよび初期観測に立ち会うことができました。まさに寝る暇もない忙しさでしたが、「今まで誰も見たことない新たな太陽の姿を世界の誰よりも先に見られる」という非常に貴重な体験をすることができました。黒点崩壊に関しても、MMF が形成される瞬間のベクトル磁場の時間変化という一番欲しかったデータを取得することに成功しました²⁰⁾。現在は、ASP を開発した偏光分光観測の老舗である米国の高高度研究所に席を移し、太陽黒点の形成・崩壊過程の全容解明を目指して、日々「ひので」のデータを堪能しています。

謝 辞

本研究は東京大学大学院における筆者の学位論文研究の一部です。指導教官であった国立天文台の常田佐久教授、宇宙科学研究本部の清水敏文准教授には心より感謝しております。また、国立天文台の勝川行雄助教、一本 潔准教授、当時東京大学の学生だった阪本康史博士には有意義なコメントをいただきありがとうございました。最後に、ASP という素晴らしい装置を長年にわたって開発してきた高高度研究所のスタッフの方々および共同観測のサポートをしていただいた米国太陽観測所のスタッフの方々にお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Kubo M., Shimizu T., Tsuneta S., 2007, ApJ 659, 812
- 2) Harvey K., Harvey J., 1973, Sol. Phys. 28, 61
- 3) Martinez Pillet V., 2002, Astronomische Nachrichten 323, 342
- 4) Brickhouse N. S., Labonte B. J., 1988, Sol. Phys. 115, 43
- 5) Zhang J., Solanki S. K., Wang J., 2003, A&A 399, 755
- 6) Hagenaar H. J., Shine R. A., 2005, ApJ 635, 659
- 7) del Toro Iniesta J. C., 2003, Introduction to Spectropolarimetry, Cambridge
- 8) Skumanich A., Lites B. W., 1987, ApJ 322, 473
- 9) Elmore D. F., et al., 1992, Proc. SPIE 1746, 22
- 10) Scherrer P. H., et al., 1995, Sol. Phys. 162, 129
- 11) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys., in press
- 12) Tsuneta S., et al., 2007, Sol. Phys., submitted
- 13) 阪本康史, 2003, 東京大学修士論文
- 14) Title A. M., et al., 1993, ApJ 403, 780
- 15) Lites B. W., et al., 1993, ApJ 418, 928
- 16) Solanki S. K., Montavon C. A. P., 1993, A&A 275, 283

- 17) Shine R., Title A., 2001, Encyclopedia of Astron. Astrophys. Vol. 4, 3209
- 18) Thomas J. H., et al., 2002, Nature 420, 390
- 19) Weiss N. O., et al., 2004, ApJ 600, 1073
- 20) Kubo M., et al., 2007, PASJ, in press (astro-ph/0709.1853)

Magnetic Activity Responsible for Sunspot Decay

Masahito KUBO

High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000, USA

Abstract: Small magnetic elements moving outward are generally observed in the zone surrounding mature sunspots. Such small magnetic elements were thought to carry away magnetic flux from sunspots. We investigate a relationship between the small magnetic elements and sunspot decay using vector magnetic fields in the photosphere. We have found that there are the small magnetic elements with magnetic fields horizontal and relatively vertical to the solar surface. The small magnetic elements with horizontal and relatively vertical fields are located on the lines extrapolated from the horizontal and vertical components of the penumbral fields, respectively. This means that magnetic fields of the small magnetic elements are originated from the penumbral magnetic fields. In addition, we have obtained observational results suggesting that the magnetic elements having vertical fields with polarity same as the sunspot are alone responsible for the disintegration of the sunspot.