

論文内容の要旨

Observational Studies on Formation and Decay of Solar Active Regions (太陽活動領域の形成と崩壊に関する観測的研究)

氏名 久保 雅仁

太陽面上の磁場は、対流層で作られた磁場が磁気浮力により光球面上に浮上してきたものである。磁場が活発に浮上してくる領域は磁気浮上領域と呼ばれ、連続的な磁場の浮上に伴い黒点等を含む活動領域が形成されていく。形成された活動領域は、その後崩壊し最終的には消滅してしまう。活動領域や黒点といった特定の領域になぜ磁場が集まり、その後再度拡散し消失するのか、そのプロセスは未だわかっていない。そこで、本論文では活動領域中の磁場のライフサイクルに着目した。特に、(1)光球面への磁場の浮上と活動領域の形成、(2)反対極性の磁場の衝突に伴う光球面磁場の消失、(3)黒点崩壊期の周囲に多数存在する小さな磁気要素と黒点崩壊の関係、という活動領域の形成や崩壊と密接に関係している3つの現象について観測的な研究を行った。

活動領域の形成や崩壊に伴う光球磁場の発展を調べた研究の多くは、磁場の視線方向成分のみを観測したものであった。さらに詳しく磁場構造やその発展を理解するためには、磁場のベクトル3成分を知ることが必須である。そこで、我々は米国高高度観測所で開発され、米国国立太陽観測所に設置された Advanced Stokes Polarimeter (ASP)を使用した。ASPは、磁場に感度のある吸収線の偏光プロファイルを精度良く測定することが可能で、得られたプロファイルから光球面磁場の3成分を導出することができる。活動領域の上空コロナでは、フレア等の突発的なエネルギー解放現象が起きやすく、定常的な加熱も行な

われている。我々は光球面の磁気活動に伴う上空コロナの加熱にも着目しており、ASP と「ようこう」衛星搭載の軟 X 線望遠鏡、TRACE 衛星、SOHO 衛星搭載の MDI による共同観測を組織した。「ようこう」軟 X 線望遠鏡と TRACE は、それぞれ X 線、極端紫外線の波長域でコロナ画像を取得し、コロナ中での加熱や活動を捉えることができる。SOHO/MDI は、視線方向成分のみではあるが、光球面磁場の時間発展を高い時間分解能で連続的に捉えることが可能で、相関追跡法を用いることで光球磁場の水平方向の速度場を調べることができる。これらの観測機器で 5 個の活動領域に対して 5~9 日に渡る発展を捉えることに成功した。この観測を元に下記のような結果を得た。

対流層で形成された磁場がどのような特徴を持って光球に浮上してくるかは、活動領域の形成やそれに伴うコロナ活動を考える上で重要である。しかし、浮上直後の磁場のベクトル情報を得た観測結果は未だに少ない。我々は、2 例ではあるが、ASP で浮上直後の磁場を捉えることに成功した。さらに、黒点形成の物理過程を知るために、黒点を形成していく過程で浮上磁場がどのように変化していくかを詳細に追った。太陽面に出現した直後の浮上磁場は、太陽面に対して水平向きで弱い磁場強度(400-700 ガウス)を持つ。今回の研究で、浮上磁場が非常に高い(>80%)フィリングファクターを持って出現してくることを発見した。フィリングファクターは、1 ピクセル当たりの磁気大気の占める割合を示している。水平磁場領域の両端には浮上活動に伴い正負の小さな磁極領域が形成される。磁気浮上による磁場の供給により、この磁極領域は、サイズ及び磁気フラックス量が増加していく。磁極領域内では太陽面に対して垂直でかつ 1500 ガウス程度の強い強度を持つ磁場が増えていく。一方、磁極領内のフィリングファクターは 20~60%程度で浮上直後の水平磁場に比べると小さい。その後さらに 2 日かけて磁極領域が小型の黒点に成長すると、磁場の向きと強度はほとんど変わらないが、フィリングファクターだけが 80%に再び増加するという結果も得た。磁場強度の増加に伴うフィリングファクターの減少は、弱い磁場強度を持った磁束管が強く絞られ、断面積が小さく強い磁場強度を持つ磁束管になったことに対応する。この結果は、強い磁場強度を持つ磁束管を形成するメカニズムとして Parker (1978)が提案した convective collapse が起きている可能性を指摘する。また、黒点形成時のフィリングファクターの再増加は、強い磁場強度と小さなフィリングファクターを持つ個々の磁束管が集合して黒点を形成したためではないかと考えられる。

反対極性を持つ磁極が互いに衝突し、その後消えてしまう現象が視線方向の磁場観測でしばしば捉えられ、磁気キャンセレーションと呼ばれている。この現象は、光球面に浮上してきた磁場がどのような物理過程で消失するかを考える上で非常に重要である。我々は、反対極性を持つ磁極の衝突現象を ASP 観測から 12 個見つけ出し、衝突する磁極間に光球及びコロナで新たなつながりが形成されることを発見した。衝突を起こす磁極の時間履歴を元にたどった時に、衝突する磁場が光球面に浮上してくる場所・時間が異なる場合、つまり衝突前には光球面より上空で衝突する磁極間につながりが無いと考えられる場合でも、

衝突する磁極間をつなぐ水平磁場が新たに形成された。上空コロナでも衝突する磁極間をつなぐ明るい短寿命のループ構造が頻繁に観測された。これらの観測結果は、光球の水平磁場及びコロナの明るいループ構造が、衝突する磁力線間の磁気リコネクションにより形成されたことを示唆する。このような衝突する磁力線間の磁気リコネクションは、高さが異なる様々な場所で起きているのではないかと考えられる。光球面に新たに形成された磁場が、光球面下で形成され浮上したものか、それとも上空で形成され下降したものは、光球磁場の消失メカニズムを考える上で重要な問題である。そこで、ドップラー速度の観測から衝突領域の水平磁場の速度を調べた結果、この領域では水平な磁力線に沿ったガスの流れが顕著であることがわかり、有意な上下動は検出されなかった。衝突領域の水平磁場がどこで形成されるかは今後の課題である。また、衝突領域上空のダークフィラメント（プロミネンス）の形成・消失に伴い、衝突する磁極間に形成された水平磁場の向きが 90 度近く変化した。これは、コロナに位置するダークフィラメントの形成・消失が光球磁場と関係しているという興味深い結果である。

崩壊期の黒点を囲む moat 領域には、moving magnetic features (MMFs) と呼ばれる小さな磁気要素が多数観測される。MMFs の多くは、黒点半暗部の外端付近に出現し、その後外側へ移動して行く。MMFs が黒点の磁束を運び去る役割を担っているという考えがあるが、未だに MMFs の形成と黒点崩壊との関係を示す観測的な証拠は得られていない。今までの研究では、周囲から孤立している MMFs (isolated MMFs) の寿命、移動速度、発生場所といった特徴が調べられてきたが、今回初めて磁場ベクトルの特徴を捉えることができた。さらに、磁気信号と水平速度を持つが周囲から孤立していない MMFs (non-isolated MMFs) が moat 領域に広く分布していることを見つけ、それらについても同様にベクトル磁場と水平速度の特徴を調べた。その結果、non-isolated MMFs は太陽面に対して水平に近い磁場を持ち、黒点と同極・異極の両方が存在することがわかった。過去の研究から黒点半暗部の外端には、水平な磁場とそれに対してやや垂直に立った磁場が交互に並んだ構造があることが知られている。今回の研究で、半暗部外端の水平磁場領域の延長線上に存在する isolated MMFs も non-isolated MMFs と同様の特性を持つことを得た。このような水平磁場を持つ MMFs は、黒点反暗部から moat 領域に伸びてきた水平な磁力線の一部であると考えられる。一方、半暗部外端の垂直磁場領域の延長線上に位置する isolated MMFs は、黒点と同じ極性でかつ垂直な磁場を持つことを発見した。このような MMFs の磁場と半暗部磁場との対応関係は、半暗部外端の垂直磁場領域の延長線上に位置する isolated MMFs が黒点から分離したものであることを示す観測的な証拠である。また、黒点と同極で垂直な磁場を持つ isolated MMFs の運ぶ磁束量を見積もると、黒点の磁束減少率の 1-3 倍程度になり、この MMFs のみで黒点崩壊を担うだけの磁束を黒点外に運ぶことが可能であることがわかった。以上の観測結果は、黒点と同極でかつ垂直な磁場を持つ MMFs が、黒点崩壊を担っていることを示している。