

# Fundamental Magnetohydrodynamic Processes of Solar Flares: Formation of Flare-productive Regions and Evolution of Flare Loops (博士論文)

## $\delta$ 型黒点の形成過程

長年の太陽観測から、 $\delta$  型黒点と呼ばれる複雑な構造を持つ活動領域は最も活動性が高いことが知られている。 $\delta$  型黒点は逆極性の黒点が密接する構造を持つが、そのようなものの中には強くねじれた磁束管が軸を振った形で浮上してきたと解釈できる例が見受けられる。この異常な磁束管構造は太陽内部の強くねじれた磁束管がキンク不安定化したのちに浮上してできた可能性が観測的に指摘され、過去に3次元シミュレーションが行われてきた。しかし太陽内部からコロナまでを含み十分な計算領域をもったシミュレーションは過去になかった。そのため、 $\delta$  型黒点が多重極構造を取りやすい原因や、活動領域の形成からコロナでのフレア発生へと至る過程といった基本的な部分が未解明であった。

強くねじれキンク不安定な磁束管の浮上によって、本当に観測と整合的な活動領域が形成されるのだろうか。我々は太陽内部からコロナまでを含み十分大きな計算領域を確保した高解像度3次元シミュレーションを用い、そのような磁束管の浮上過程を考察した。シミュレーションの結果、強くねじれた磁束管がキンク不安定化を経て浮上するとフレアを発生しやすい光球・コロナ磁場構造が自然に形成されることを初めて示すことに成功した。さらに我々は、そのような磁場構造は一度光球上に浮上した磁場が重たいガスにより沈降することによって形成されることを突き止めた。磁場の沈降はキンク不安定化によって磁場のねじれが弱まった部分で起きており、これはキンク不安定性が多重極構造を生じる原因となっていることを意味している。光球磁場の時間発展をみるとまずねじれの強い磁極ペアが出現し、しばらくしたのちに磁場の沈降によって真ん中に新たな磁極ペアが出現する。我々はこの振る舞いとよく一致する観測例も見つけた。活動領域の形成からフレア発生へとつながる過程を見るべくシミュレーションでコロナ磁場の時間発展を調べた結果、フレアにつながるであろうリコネクションが磁場の沈降によって形成された電流シートで起きていることがわかった。以上のことから、キンク不安定化するほどねじれの強い磁束管は確かにフレア活動性の高い活動領域を作りやすいことがわかり、観測的にも支持されることがわかった。

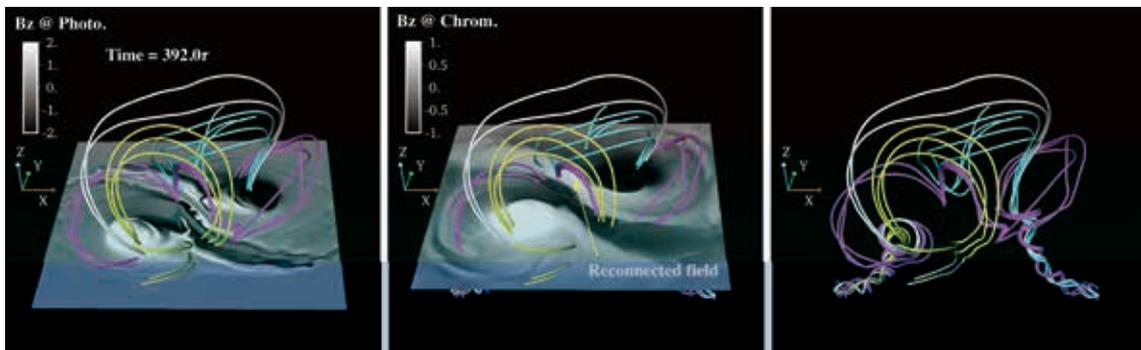


図: 光球・彩層磁場分布と3次元磁場構造。

## フレアループで形成される衝撃波と振動

フレアの駆動機構である磁気リコネクションは超音速流を生じるため、フレア領域には衝撃波が形成される。衝撃波はプラズマの急速な加熱や非熱的粒子の加速を行う重要な役割を担っている可能性がある。衝撃波加熱・圧縮は観測される構造の解釈に重要であり、さらに粒子加速に関しても衝撃波構造の詳細に加速効率などが依存してしまうため、衝撃波構造の詳細な理解が必要である。

そこで我々は過去よりも高解像度なフレアの2次元シミュレーションを行い、フレアループ内・上空に形成される衝撃波の構造や動的な振る舞いを調べた。その結果、これまで知られていなかった無数の衝撃波を発見した。リコネクションアウトフローがフレアループと衝突する場所がこれまで考えられていたよりも衝撃波や波動で満ち満ちていることがわかった。さらに、フレアループ内に形成される衝撃波を捉えることのできる、リコネクションの物理を考慮した1次元フレアループモデルも構築した。

多くのフレアは光度曲線の準周期変動を示すことが知られている。さらにフレア領域から準周期的な磁気音波が生じている例も見つかってきた。これらはフレア領域にサイクリックな擾乱源があることを示唆している。波動や振動はプラズマ診断を行う上で重要な情報を持つため、波動・振動の理解は直接観測が困難なフレア領域の詳細に迫る上で重要である。しかし過去のモデルはリコネクションの物理を含まないものばかりであった。

そこで我々のフレアモデルを用い、振動の物理解明に迫った。シミュレーションはフレア領域から磁気音波が準周期的に出ていることを示し、さらにその波源がループトップ上空であることがわかった。そこはリコネクションアウトフローの終端衝撃波が期待される場所である。終端衝撃波はこれまで1枚の準定在水平衝撃波だと思われていたが、実際は複数枚の衝撃波であり、かつ構造が激しく時間的に周期変動することがわかった。我々はこの振動の物理を解明し、観測される準周期変動との関係を指摘した。

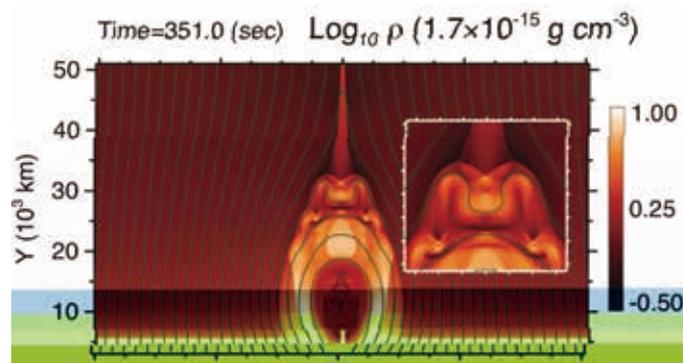


図: シミュレーション結果の密度分布

### Reference:

- S. Takasao, T. Matsumoto, N. Nakamura, and K. Shibata, 2015, ApJ, 805, 135
- S. Takasao, Y. Fan, M.C.M. Cheung, and K. Shibata, 2015, ApJ, 813, 112
- S. Takasao & K. Shibata, 2016, ApJ, 823, 150

(高棹 真介 記)