

彩層衝撃波のスペクトル観測から迫る太陽フレアのエネルギー解放過程

鄭 祥子 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

太陽で全波長域にわたり数分から数時間程度増光する現象を太陽フレアといい、これは磁気リコネクションによって駆動されていると考えられている。磁気リコネクションとは、磁場の散逸により磁場のトポロジーが変化することで磁気張力が生じ、磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに急速に変換される現象である。フレアの際、彩層は $H\alpha$ 線や $Ca II H \& K$ 線などで強く輝き、ラインは輝線となる。これらラインはレッドシフトしていることから、次のことが示唆される (Ichimoto & Kurokawa 1984)(Shoji & Kurokawa 1995)：コロナで磁気リコネクションが駆動され高エネルギー電子が生じるとその一部は磁力線に沿って高密度な彩層に突入し彩層上部を急激に加熱する。その結果彩層ガスは急膨張し、上方への噴出流と下方に向かう衝撃波を形成する。この下降流が彩層ラインのレッドシフトの起源だと解釈されている。つまり、彩層スペクトルの観測からフレアのエネルギー解放の時間発展を推測できると期待できる。またフレアのエネルギー解放領域で微細構造が発見され (Takasao et al. 2012)、間欠的なエネルギー解放が示唆されたが、これが彩層への間欠的なエネルギー注入として見える可能性がある。もしこれを彩層のスペクトルで観測できれば、未だ理解されていないコロナ中のエネルギー解放過程に迫ることができるはずである。

我々は多波長同時高空間時間分解能データを取得し、スペクトルの形と時間空間発展から彩層衝撃波とフレアのエネルギー解放過程について調べようと考えた。観測した太陽フレアは 2014 年 11 月 10 日 23 時 55 分 UT に発生した。IRIS 衛星による $Mg II h\&k$ 線などの彩層ラインを使用した。その結果、同じ場所で時間スケールが 9.5 sec 以下の間欠的なレッドシフトが確認され、これにより間欠的なエネルギー解放が実際に起きている可能性を示すことに成功した。本講演では、彩層衝撃波とフレアのエネルギー解放過程の関係について議論する。

1 太陽フレアの未解決問題

太陽フレアとは、太陽大気中で発生する爆発的な増光現象である。太陽フレアが発生すると、電波からガンマ線まであらゆる波長域の電磁波で増光が見られる。太陽フレアの典型的なタイムスケールは数分から数時間程度である。

これまでの研究で、太陽フレアは磁気リコネクションという磁場のエネルギー解放機構によって生じる現象であることが分かってきた。ここで磁気リコネクションとは、磁場の散逸により磁場のトポロジーが変化することで磁気張力が生じ、磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに急速に変換される現象である。そして太陽フレアについての観測的事実を矛盾なく説明できる基本的なフレアの描像として、次のようなモデルが確立してきた。(図 1 (a),(b))。まず(図 1 (a))、上空のコロナで磁気リコネクション

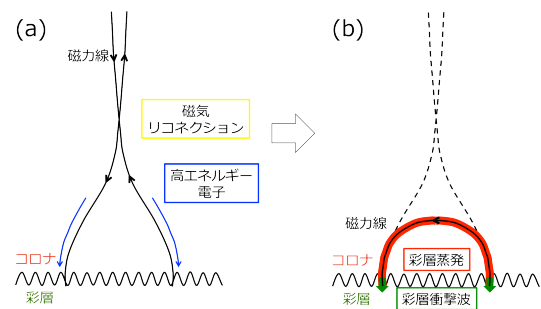


図 1: フレアの基本的な描像

が発生し、高エネルギー電子が生成される (この過程は未解明である)。その一部は磁力線に沿って彩層のある下方向に突っ込んでくる。彩層上部はコロナに対して密度が 2 桁程度高いので、ここで高エネルギー電子は衝突により熱化し、この彩層上部の領域は加熱で圧力が上がる。従ってプラズマは磁力線方向

に膨張しようとする。その際(図 1 (b)), 低密なコロナのある上方向には、プラズマは簡単に膨張し、いわゆる彩層蒸発が起こる。即ちコロナのループは高温なプラズマで満たされ、これが軟 X 線で観測される。一方、彩層下部へ向かう方向には圧縮により衝撃波が生じる。なぜなら、局所的に加熱された彩層上部の温度に対して彩層の温度はかなり低く、加熱で生じる流体の速さが音速を超えるからである。衝撃波が通過すると下降流が生じて彩層の温度程度となり、これが H α 線など、彩層に由来するスペクトル線のレッドシフトとして観測される (Ichimoto & Kurokawa 1984)(Shoji & Kurokawa 1995) のである。

以上が太陽フレアの基本的な描像である。しかし、この一連の現象のエンジンともいえる磁気リコネクションについては、リコネクション領域の密度が低く、領域が小さいため、直接的な観測がなく、未解明である。本研究ではこの未解明問題について別の方法で観測的に迫ろうと考えた。そこで、コロナにあるリコネクション領域ではなく、上述した彩層の下降流に着目する。フレアで生じる下降流の時間変化は、高エネルギー電子がコロナから彩層に突っ込んでくる際の時間変化を反映すると考えられる。そして、この高エネルギー電子は上空での磁気リコネクションによるエネルギー解放の結果生成されるのであった。即ち、彩層の下降流の時間変化は、磁気リコネクションによるエネルギー解放によって高エネルギー電子が生成される際の時間発展を反映しているといえるのである。今回はこの点に着目し、高時間空間分解能分光観測によって、彩層由来のスペクトル線のドップラーシフト (レッドシフト) から下降流の時間変化をみることで、上空でのエネルギー解放過程に迫ろうと考えた。

2 観測

今回のフレアは、2014 年 11 月 10 日 23 時 55 分頃 (UT) に太陽の中心付近 (N13W07) にある活動領域 (NOAA 12205) で発生し、フレアの規模は C5.4 であった。

今回は、Hinode Operation Plan(HOP) 275 による共同観測で得られたデータのうち、Interface Region

Imaging Spectrograph (IRIS 衛星) で得られた、Mg II h/k、Mg II triplet、C II、Si IV のスペクトルデータを主に用いる。IRIS 衛星での観測は sit-n-stare モード、即ち分光スリットは固定されていた。スペクトルデータの 1 ピクセルの空間スケールは 0.166 arcsec であり、スペクトルデータの時間間隔は 9.5 sec であった。

3 解析と結果

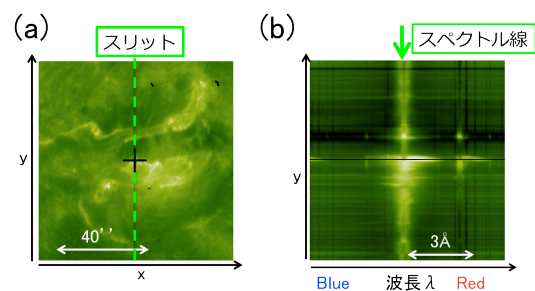


図 2: (a) スリットジョーイメージ (Mg II k) と (b) そのスリットでのスペクトル (Mg II h)。 (a) での ' + ' 印は解析に用いた場所。そこでのスペクトルは (b) で黒線となっている。

今回のフレアは太陽の中心付近 (N13W07) で発生し、ほとんど真上から観測されたといえる。よって、スペクトル線のレッドシフトを見ることで、下降流の運動を追うことができる。IRIS 衛星の分光スリットは、彩層のリボンの上ののっており (図 2 (a))、今回は図 2 (a) のスリット上の ' + ' 印の場所の 1 ピクセルに注目する。図 2 (b) はこの場所のスペクトルに相当する部分に黒線がのせてある。そこでのスペクトルの時間発展を見るため、この部分のスペクトルを時間順に並べたものが図 3 である。また、各時刻のプロファイルにおいて、スペクトル線の輝線の長波長側と短波長側のウイングが、ある与えたいきい値を超えたところの波長を求め、その 2 つの波長の平均をドップラーシフトした波長中心として、各時刻について求めた (図 3 の実線)。図 3 より、レッドシフトが繰り返し発生していることが分かった。また下降流のドップラー速度は最大で $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$ であった。スペクトル線の中心波長は、今回のデータ

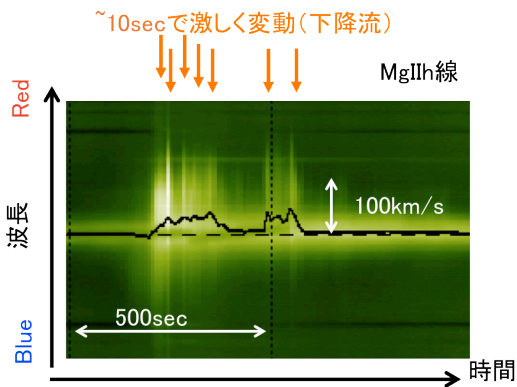


図 3: 図 2 の '+' 印の場所の Mg II h 線のスペクトルの時間変化。点線はもとの波長中心。実線は解析で求めた、ドップラーシフトした波長中心。

の時間間隔 ~ 10 sec 程度で激しく時間変化していることが分かった。

4 議論

結果より、太陽フレアでは彩層で下降流が繰り返して生じることが分かった。その速さは最大で ~ 50 km s^{-1} 程度であり、この下降流は ~ 10 sec 程度で激しく時間変化することが示唆された。また、(Takasao et al. 2012) では、フレアのエネルギー解放領域で微細構造が発見され、これより間欠的なエネルギー解放が示唆される。さらに近年の数値計算では、磁気リコネクションにより間欠的な構造が形成されるという研究 (Bhattacharjee et al. 2009) もある。今回の結果は、間欠的なエネルギー解放が実際に起きている可能性を示すことに成功したといえる。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

Ichimoto, K., & Kurokawa, H. 1984, Solar Physics, 93, 105

Shoji, M., & Kurokawa, H. 1995, Publications of the Astronomical Society of Japan, 47, 239

Takasao, S., Asai, A., Isobe, H., & Shibata, K. 2012, The Astrophysical Journal Letters, 745, L6

Bhattacharjee, A., Huang, Y.-M., Yang, H., & Rogers, B. 2009, Physics of Plasmas, 16, 112102