

論文の内容の要旨

論文題目

Coronal upflows from edges of an active region observed with
EUV Imaging Spectrometer onboard *Hinode*

(太陽観測衛星「ひので」搭載極端紫外線撮像分光装置によって観測された
太陽コロナにおける活動領域周縁部からの上昇流)

北川直優

可視光で放射する 6,000 K の光球外層には、 10^6 K を超える温度をもつ太陽コロナが存在し、極端紫外線や X 線で観測されてきた。光球表面より高温の大気が外層において存在するということは、光球表面から何らかのメカニズムによるエネルギー輸送・解放が起きていなければならないが、コロナの生成・加熱機構は現在でも完全には解明されていない。コロナには、フレアやコロナ質量放出、MHD 波動などのさまざまなエネルギー輸送・解放現象が発生する活動領域と呼ばれる構造が存在する。活動領域は、強磁場領域である黒点の上空に位置して、他の領域に比べて極めて明るい極端紫外線・X 線を放射する。基本的には、太陽内部の磁束管構造の一部が浮上して太陽コロナにおいてアーチ型の構造（活動領域コロナループ）を形成していると考えられているが、活動領域コロナループ中のプラズマが供給される、もしくは消失するプロセスは詳細に明らかにはなっていない。

活動領域におけるプラズマの供給・消失に寄与しているかもしれない現象として、活動領域の周縁部から発生する継続的な上昇流（アウトフロー）が太陽観測衛星「ひので」搭載極端紫外線撮像分光装置（EUV Imaging Spectrometer: EIS）によって発見された（Sakao et al. 2007; Harra et al. 2008; Baker et al. 2009）。このアウトフローの温度は 1–2 MK、速度は 100 km s^{-1} 、コロナ磁場が大きく開いた領域の近傍に多く発生することがわかっている。活動領域におけるコロナプラズマの供給・消失に関連付けて、これまでにさまざまな分光・撮像観測がおこなわれてきたが、大別すると次のような描像がもたれている。(1) 活動領域コロナループと周辺領域の大きく開いた磁場との間で起こる磁気リコネクションにより、活動領域コロナループに閉じ込められたプラズマが、つなぎ変わった後の開いた磁場のほうへ流出したものが、アウトフローとして観測されている（Baker et al. 2009; Del Zanna et al. 2011）。(2) コロナ、もしくは遷移層が加熱されたことにより、圧力が増大したプラズマがコロナ上空へと膨張していくものが、アウトフローとして観測されてい

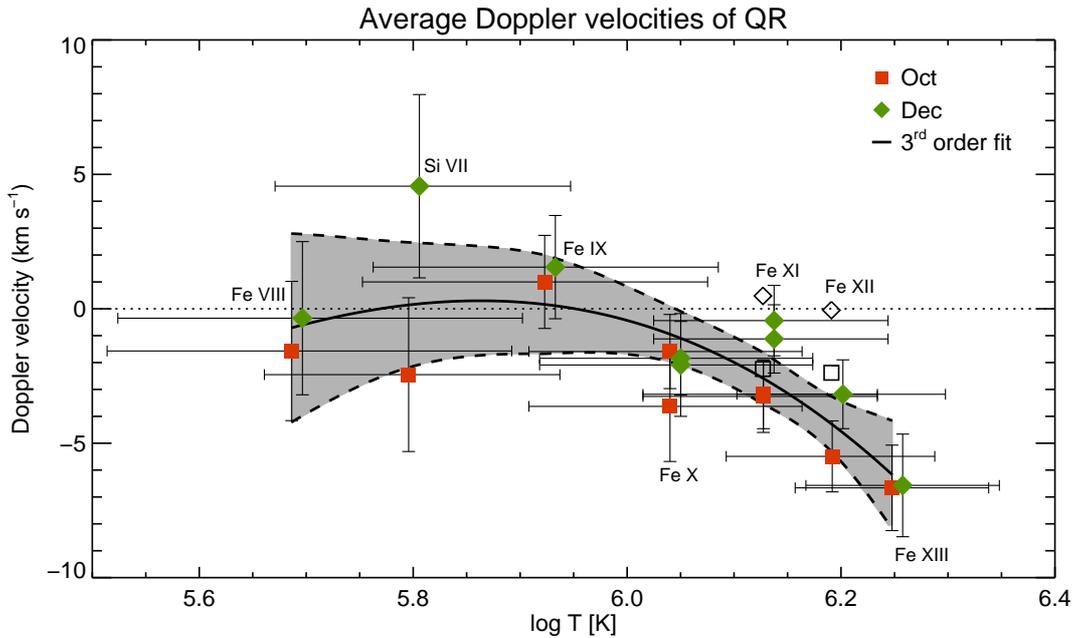


図 1 静穏領域のドップラー速度の温度依存性。黒の曲線は 3 次多項式によるフィッティング結果、灰色の領域は誤差を表している。

る (Del Zanna 2008; Peter 2010)。一つ目の描像は活動領域プラズマの消失に関わるもの、二つ目の描像はコロナ加熱に関わるもので、活動領域におけるプラズマ輸送過程を明らかにする上でアウトフローは重要な現象だと言える。

本論文では、活動領域周縁部からの上昇流について、これまでには明らかにされていなかった遷移層におけるドップラー速度と電子密度に着目して、太陽観測衛星「ひので」搭載 EIS によって取得された太陽活動領域 NOAA AR10978 の分光スキャンを解析した。

EIS には絶対標準光源が搭載されていないことや、軌道周回時の温度変化による CCD 上でのスペクトルの準周期的変動が起きることにより、EIS の分光データを単独で用いて 10 km s^{-1} で速度を決定することは一般的に難しい。本論文第 3 章において太陽リム (外縁部) のドップラー速度がゼロであると仮定して太陽子午線上をカバーする分光データを解析し、リムから太陽面中心部にかけての輝線中心の空間変化を調べることで、静穏領域のドップラー速度を求め、 3 km s^{-1} の確度を達成した (図 1)。本論文第 4 章において活動領域の構造についてドップラー速度を決定する際に、活動領域周辺の静穏領域をドップラー速度のゼロ点の参照として用いることを念頭に置いたものである。

前述 (2) のシナリオに関連して、加熱が起こってから次の加熱までの時間間隔がコロナの冷却時間よりも長い場合、下がる温度に伴って小さくなるスケールハイトに対応して、コロナループ中に上昇したプラズマは 10^6 K においては下降流を形成すると予想されている (Patsourakos & Klimchuk 2006)。そのため、そのような時間間隔の長い急激な加熱が起きているかを知る手掛かりとして、遷移層のドップラー速度が重要になる。そこで、本論文第 4 章においてスキャン視野内に含まれる静穏領域のドップラー速度を参照して、活動領域周縁部のアウトフローについて $\log T [\text{K}] = 5.7\text{--}6.3$ の温度範囲でドップラー速度を決定した。その結果、調べた温度範囲で $v = 20 \text{ km s}^{-1}$ 程度の速さの上昇流を示すことが

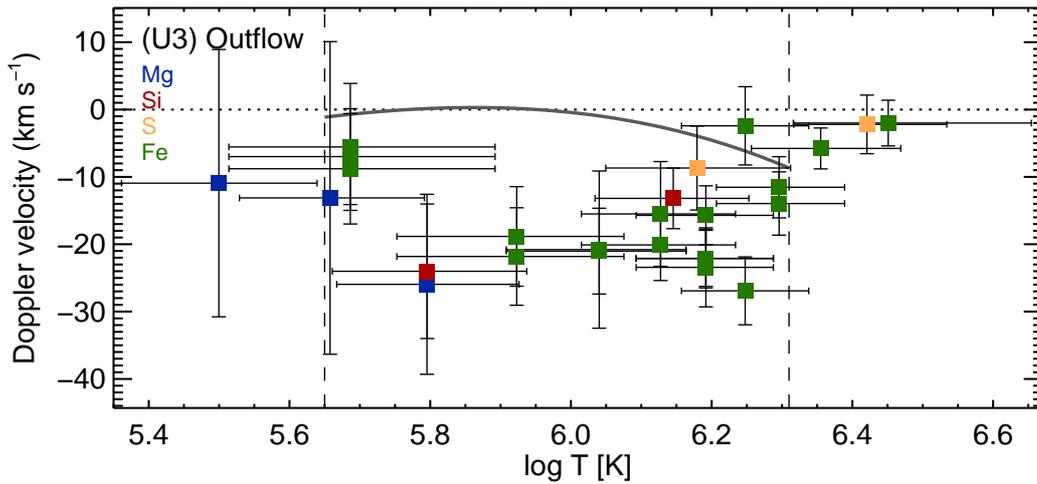


図2 活動領域 NOAA AR10978 の西側のアウトフロー領域におけるドップラー速度の温度依存性。灰色の曲線は静穏領域のドップラー速度である。

明らかになった(図2)。また、アウトフロー領域の近傍にはファンループと呼ばれる扇状の低温ループ ($\log T [\text{K}] \leq 6.0$) が存在することが多いが、両者の関係性は未だ明らかになっていない。ファンループにおいては遷移層の輝線が下降流を示すことが知られていたが、本論文の解析によりファンループに隣接するアウトフロー領域では遷移層の輝線が明確な上昇流を示すことが明らかになった。

本論文第5章において、二つ目の着眼点として $\text{Fe xiv } 264\text{\AA}/274\text{\AA}$ の輝線ペアを用いてアウトフローの電子密度を測定した。 $\text{Fe xiv } 264\text{\AA}$ と $\text{Fe xiv } 274\text{\AA}$ の輝線強度比は電子密度に強い依存性を示し、一価の関数となっている。そのため、二つの輝線の強度比がわかれば電子密度が求まるという原理に基づいている。アウトフロー領域における輝線プロファイルは、ほぼ静止した主成分と 100 km s^{-1} 程度の小さな青方偏移成分(上昇流成分)から構成されているため、アウトフローそのものの電子密度を求めるためには上昇流成分を主成分から分離する必要がある。二つの輝線は同種のイオンから放射されるため、同じドップラーシフト・ドップラー幅をもつはずであるという条件を課して、二つの輝線プロファイルに対して各々2成分ガウス関数によるフィッティングをおこなった。そして主成分と上昇流成分それぞれについて求めた輝線強度比から各成分の電子密度を導出した結果、東西のアウトフロー領域で違う挙動が見られた。東側の領域では上昇流の電子密度 ($10^{9.06 \pm 0.14} \text{ cm}^{-3}$) が主成分 ($10^{9.01 \pm 0.11} \text{ cm}^{-3}$) に比べてやや高く、いっぽう西側では上昇流の電子密度 ($10^{8.60 \pm 0.22} \text{ cm}^{-3}$) が主成分 ($10^{9.22 \pm 0.15} \text{ cm}^{-3}$) に比べて低いという結果を得た(図3)。得られた電子密度を用いて各成分のコラム長さを算出したところ、東側の領域では上昇流が主成分の0.1程度の体積しか占めていなかったのに対し、西側の領域では逆の傾向が見られ上昇流が主成分の5倍程度の体積になっていることが示された。

本論文の結果から示唆されるアウトフローの性質として、その描像は図4のようにまとめることができた。(1) ファンループとアウトフロー領域では、遷移層の輝線が示すドップラー速度の符号が逆であり、両者が違う構造である可能性を示唆する。(2) 質量フラッ

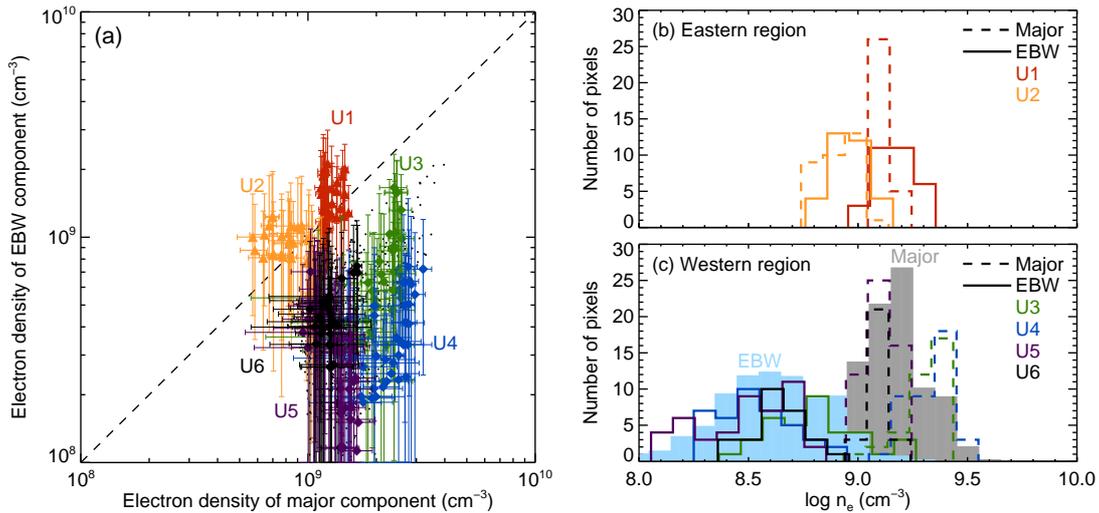


図3 (a) Fe XIV の輝線強度比から導出した主成分と上昇流成分の電子密度。U1–U6 は抽出されたアウトフロー領域を示す。(b) 東側のアウトフロー領域における主成分（破線）と上昇流成分（実線）のヒストグラム。(c) 西側のアウトフロー領域における同様のヒストグラム。背景の灰色と水色のヒストグラム（0.1 倍に規格化されている）は西側のアウトフロー領域全体を表している。

クス、圧力勾配から考えるとコロナループ中の定常流では説明できない。(3) コロナの典型的冷却時間よりも長い時間間隔で発生する急激な加熱によって発生する速度の温度依存とは合致しない。(4) 典型的なナノフレアを考えた場合、500 s 程度の継続的な加熱でエネルギー解放が起こっている。(5) 西側のアウトフロー領域では、上昇流が活動領域からのプラズマ消失に寄与していると考えられる。(6) 本論文第7章で得られたコロナの磁場構造から考えると、東側のアウトフロー領域では活動領域コロナループへのプラズマ供給が起こっている可能性がある。

本論文により、活動領域におけるプラズマの供給・消失両方のプロセスにアウトフローが寄与している可能性が大きいことが結論付けられた。

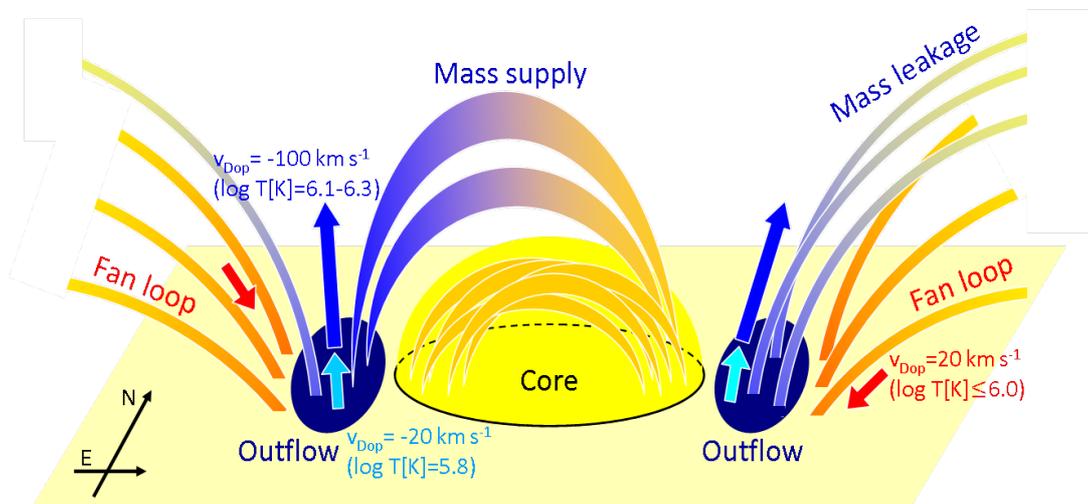


図4 本論文によって得られた活動領域アウトフローの概念図。