

11. 研究トピックス

11.1. 博士論文概要

恒星磁気活動の理解に向けた太陽活動現象の観測的研究(博士論文)

太陽フレアは太陽大気中で発生する突発的な増光現象であり、多様な活動現象を伴うことが撮像観測から知られている。太陽以外の恒星においても、恒星フレアと呼ばれる突発的な増光現象が観測されている。近年の分光観測などから、恒星フレアにも多様な活動現象が伴うことが示唆されている。しかし、表面の様子を空間分解可能な太陽とは異なり、空間分解できない遠方の恒星に関して、その表面でどのような現象が発生しているのかを特定することは容易ではない。そこで本博士論文では、太陽を星として捉える(Sun-as-a-star)視点から詳細な太陽観測データを解析し、恒星観測で得られるような空間積分データからどのような情報を引き出すことが可能であるかを明らかにすることを目的とした。特に、フレアに伴う多様な現象を捉えることができ、かつ太陽・恒星の双方でデータアクセス性が高い $H\alpha$ 線観測データを主軸として解析を行った。以下では、本博士論文(全7章構成)のうち、序章(第1章)および結論(第7章)を除いた本体部分について簡単に紹介する。

第2章では、フレアやフィラメント/プロミネンス噴出などの多様な現象が空間積分された $H\alpha$ 線データでどのように観測されるかを調査した。結果として、空間積分された $H\alpha$ 線スペクトルには、現象ごとに異なる特徴が現れることが明らかとなった。この結果は、空間積分された恒星 $H\alpha$ 線スペクトルから、恒星表面で発生した現象を特定するうえでの基礎となる。本章は[1] Otsu et al. 2022 に基づく。

第3章および第4章では、フィラメント/プロミネンス噴出に注目してさらなる解析を行った。第3章では、プロミネンス噴出の速度場に関して詳細な解析を行った。恒星フレアの $H\alpha$ 線などの分光観測ではドップラー偏移した輝線成分がしばしば観測され、恒星プロミネンス噴出と解釈されることがある。このようなシグナルの解析には、現象論的なガウス関数フィッティングが用いられる。本章では、そのガウス関数のパラメータが物理的に何を表すのかを、太陽プロミネンス噴出の観測データを用いて検証した。その結果、ガウス関数の中心速度およびドップラー幅が、それぞれプロミネンスの平均的な速度および速度場の広がりに関連付けられることを明らかにした。この結果は、空間積分された $H\alpha$ 線スペクトルから、恒星プロミネンス噴出の平均的な運動に加えて、その内部運動(回転や膨張)も検出可能であることを示唆している。第4章では、 $H\alpha$ 線($\sim 10^4$ K)に加えて、極端紫外線(EUV; $\sim 10^5$ K)を用いることで、フィラメント噴出の多温度構造が空間積分されたデータでどのように観測されるかを調査した。結果として、空間積分されたスペクトルにおいて、 $H\alpha$ 線でフィラメント噴出のシグナルがほぼ消失した後も、EUV 線ではフィラメント噴出のシグナルが明瞭に見え続けることがわかった。この結果は、恒星観測においても $H\alpha$ 線と EUV 線の組み合わせによって、フィラメント噴出の多温度構造を追跡できる可能性を示している。第3章、第4章はそれぞれ[2] Otsu & Asai 2024, Otsu & Asai in prep. に基づく。

第5章および第6章では、ポストフレアループに注目してさらなる解析を行った。第5章では、ポストフレアループを伴う典型的な太陽フレアの観測データを用いて、その特徴が空間積分された $H\alpha$ 線データにどのように現れるかを精査した。その結果、ループの冷却、ループに沿った下降流、ループ高度の上昇というポストフレアループに特有の3つの主要ダイナミクスが、空間積分データにおいていずれも検出可能であることを明らかにした。特筆すべき点として、 $H\alpha$ 線ポストフレアループの出現に対応して、 $H\alpha$ 線光度曲線が軟 X 線ピークに対して遅れた2段階目のピークを示す場合があることを見いだした。第6章では

このポストフレアループに対応する $H\alpha$ 線光度曲線のピークに注目し、軟 X 線ピークに対する $H\alpha$ 線ポストフレアループの出現タイミングを統計的に調査した。結果として、軟 X 線ピーク時刻と $H\alpha$ 線ポストフレアループの出現タイミングの時間差 (Δt) と軟 X ピークフラックス (F_X) の観測的關係は、放射冷却時間 (τ_{rad}) と F_X 、およびフレアの空間スケール (L) の間に成り立つ理論的なスケーリング則: $\tau_{rad} \propto (F_X)^{-1/2} (L)^{3/2}$ によって説明可能であることを明らかにした。このスケーリング則に基づいて、観測された恒星 $H\alpha$ 線光度曲線のピークがポストフレアループに起因するかを判別できるのみならず、空間積分データから Δt および F_X を測定し、 $\Delta t = \tau_{rad}$ を仮定することで、空間分解できない恒星フレアの空間スケール (L) を推定することが可能である (図 1)。第 5 章、第 6 章はそれぞれ [3] Otsu et al. 2024、[4] Otsu et al. 2026 に基づく。

以上のように、本博士論文は、太陽の観測データを Sun-as-a-star という視点で捉え直して解析することにより、空間分解できない恒星フレアを解釈する上での基盤を与えた。

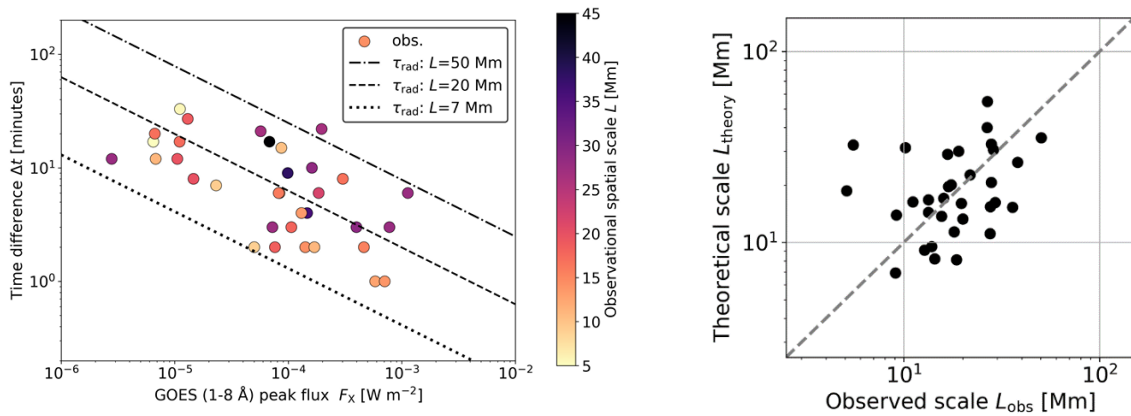


図 1. (左) GOES 軟 X 線 ($1-8 \text{ \AA}$) フラックス (F_X) と軟 X 線ピーク時刻と $H\alpha$ 線ポストフレアループの出現タイミングの時間差 (Δt) の間の関係。データ点の色は観測されたフレア空間スケールを示す。黒の一点鎖線、破線、点線はそれぞれ、スケーリング則: $\tau_{rad} \propto (F_X)^{-1/2} (L)^{3/2}$ の $L = 50, 20, 7 \text{ Mm}$ の場合を示す。(右) 観測されたフレア空間スケールとスケーリング則から求めた空間スケールの関係。灰色の破線は $y=x$ の関係を示す (博士論文 第 6 章、[4] Otsu et al. 2026 より引用)。

参考文献

- [1] Otsu et al. 2022, ApJ, 939, 98
- [2] Otsu & Asai, 2024, ApJ, 964, 75
- [3] Otsu et al. 2024, ApJL, 974, L13
- [4] Otsu et al. 2026, ApJ, 997, 286

(大津天斗 記)