

2010 から 2014 年の大規模フレアにおける太陽 X 線と EUV に対する地磁気応答

#大窪 遼介¹⁾, 渡邊 恭子¹⁾, 北島 慎之典¹⁾, 増田 智²⁾, 家田 章正²⁾, 陣 英克³⁾, 埜 千尋³⁾, 西岡 未知³⁾

(¹⁾ 防衛大, (²⁾ 宇宙地球環境研究所/名古屋大学, (³⁾ 国立研究開発法人 情報通信研究機構

Geomagnetic Response to Solar X-ray and EUV Emissions during Major Flares from 2010 to 2014

#Ryosuke OKUBO¹⁾, Kyoko WATANABE¹⁾, Sinnosuke KITAJIMA¹⁾, Satoshi MASUDA²⁾, Akimasa IEDA²⁾, Hidekatsu JIN³⁾, Chihiro TAO³⁾, Michi NISHIOKA³⁾

(¹⁾National Defense Academy of Japan, (²⁾ISEE/Nagoya university, (³⁾NICT

Ionization of the ionosphere by solar flare emission rapidly modulates the solar quiet (Sq) current in the ionospheric E-region (90-150 km). This is known as the geomagnetic Solar Flare Effect (SFE) and is observed as a sudden disturbance induced in the Earth's geomagnetic field. This phenomenon is thought to be primarily caused by X-ray and extreme ultraviolet (EUV) emissions from solar flares (Owolabi et al., 2020). The SFE is a key geomagnetic signature of these rapid ionospheric disturbances, which in turn can degrade satellite navigation signals and disrupt radio communications. Therefore, understanding the physical processes of SFEs is a critical issue in space weather research. Previous studies have reported both SFEs that enhance the Sq variation and counter-Sq SFEs (SFE*) that act in the opposite direction (Yamasaki et al., 2009). However, many aspects—such as their occurrence conditions, regional dependence, and effects on geomagnetic components other than the horizontal (H) component—remain unresolved.

In this study, we statistically analyze 13 SFE events associated with major solar flares from 2010 to 2014 to investigate their properties. We use solar soft X-ray and EUV data from GOES/EUVS and SDO/EVE, and geomagnetic data from the INTERMAGNET network. An investigation of the peak times of solar flare emissions and SFEs from these data revealed that EUV lines from chromosphere and transition region, such as Lyman-alpha (Ly α ; 121.6 nm), showed a much faster response than the SFE, while coronal-origin EUV lines showed a response slower than the time variation of soft X-rays and also lagged the SFE. Both soft X-rays and EUV likely contribute to SFE, but a detailed analysis of the occurrence time of SFE revealed that in some events, SFE began after the onset time of EUV enhancement but before the onset time of soft X-ray enhancement. This suggests that the initial SFE response may be driven mainly by EUV lines originating from the chromosphere and transition region, such as Ly α and He II (30.4 nm).

Furthermore, a detailed investigation of the SFE response in each geomagnetic component revealed that events similar to SFE and its counter-effect, SFE*, were observed not only in the H-component but also in the Y (eastward) and Z (vertical) components. This fact suggests that the ionospheric current during a flare is more complex than a simple enhancement of the Sq current, involving rotations of the current system or changes in its three-dimensional structure. In addition, SFEs were observed at some stations during evening hours. This is critical evidence showing that SFEs can occur despite the lack of daytime photoionization, and necessitates a reconsideration of the role of the background ionosphere in flare response. We analyzed the causes and occurrence conditions of these variations, taking into account local time and ionospheric conditions. In this presentation, we will report these results in detail. The characteristics and distribution of these local SFEs will be discussed using Sq current models.

太陽フレア放射による電離圏の電離は、電離圏 E 領域（高度 90-150 km）の地磁気静穏日変化（Sq）電流を急激に変調させる。これは地磁気太陽フレア効果（SFE）として知られ、地球磁場に誘起される突発的な擾乱として観測される。この現象は、主に太陽フレアから放射される X 線および極端紫外線（EUV）によって引き起こされると考えられている（Owolabi et al., 2020）。SFE はこれらの急激な電離圏擾乱の主要な地磁氣的兆候であり、この電離圏擾乱は衛星測位信号を劣化させ、無線通信を妨害するものである。したがって、SFE の物理過程を理解することは宇宙天気研究における重要な課題である。先行研究では、Sq 変化を増強させる SFE と、逆方向に作用する反 Sq 方向の SFE（SFE*）の両方が報告されている（Yamasaki et al., 2009）。しかし、その発生条件、地域依存性、水平（H）成分以外の地磁気成分への影響など、多くの側面が未解決のままである。

本研究では、2010 年から 2014 年にかけて発生した大規模太陽フレアに伴う 13 個の SFE イベントを統計的に解析し、その特性を調査する。解析には、GOES/EUVS および SDO/EVE による太陽軟 X 線・EUV データ、ならびに INTERMAGNET ネットワークの地磁気データを使用する。これらのデータから太陽フレア放射と SFE のピーク時刻を調査した結果、ライマン α 線（Ly α ; 121.6 nm）のような彩層起源の EUV 輝線は SFE よりも非常に速い応答を示し、一方、コロナ起源の EUV 輝線は軟 X 線の時間変化よりも遅く、SFE にも遅れて応答することが明らかになった。軟 X 線と EUV の両方が SFE に寄与していると考えられるが、SFE の発生時刻を詳細に解析した結果、いくつかのイベントでは、SFE は EUV 増光の開始時刻の後、かつ軟 X 線増光の開始時刻の前に始まっていたことが明らかになった。このことは、SFE の初期応答が、主に Ly α や He II (30.4 nm) のような彩層および遷移層起源の EUV 輝線によって駆動されている可能性があることを示唆している。

さらに、各地磁気成分における SFE 応答を詳細に調査した結果、SFE およびその反対作用である SFE* に類似した現

象が、H 成分だけでなく Y（東向き）成分や Z（鉛直下向き）成分でも観測された。この結果は、フレア時の電離圏電流が、Sq 電流の単純な増強だけではなく、電流系の回転や三次元構造の変化を伴う、より複雑なものであることを示唆する。加えて、いくつかの観測点では夕方時間帯に SFE が観測された。これは、日中の光電離がないにもかかわらず SFE が発生し得ることを示す重要な証拠であり、フレア応答における背景となる電離圏の状態を再考察する必要がある。我々は、現地時間や電離圏の状態を考慮し、これらの変化の原因と発生条件を解析した。本発表では、これらの結果について詳細に報告する。これらの局所的な SFE の特性と分布については、Sq 電流モデルの結果を用いて議論する。