

3.2.2 フレア放射

渡邊 恭子 (防衛大学校)

(2020年3月30日受付、2021年5月31日公開)

1. フレア放射の宇宙天気への影響

a. 太陽フレア放射

太陽フレアが発生すると、電波からガンマ線までのあらゆる波長の電磁波や大量の高エネルギー粒子などが太陽-地球圏に放出され、これらは急激な時間変動を見せる。図1に色々な太陽フレア放射の典型的な時間変動を示す (Kane, 1974)。フレア初期 (インパルス期) には電波や硬 X 線放射の急激な時間変動が見られ、メインフェーズには H α 線や軟 X 線の放射が緩やかな時間変動をしていることがわかる。

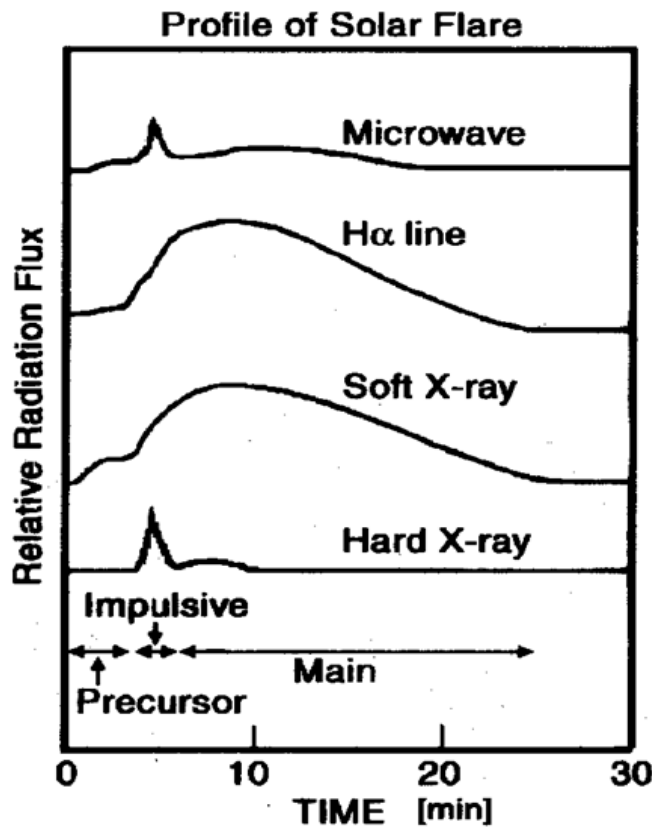


図1. 太陽フレア放射の典型的な時間変動 (Kane, 1974)

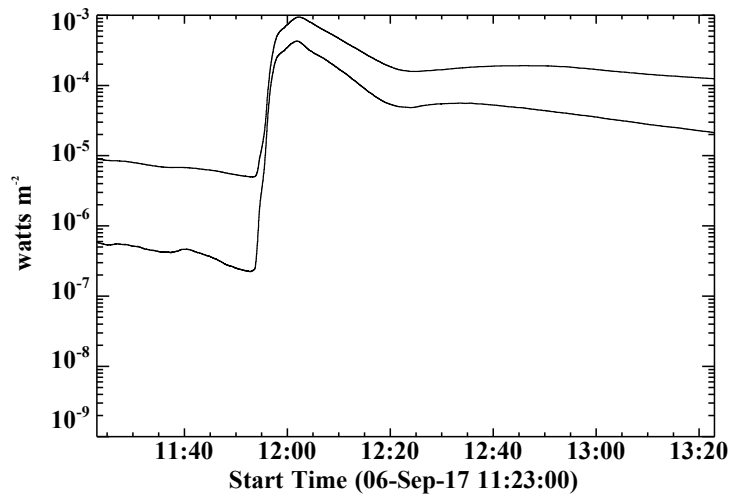


図2. GOES 衛星によって観測された軟 X 線放射の強度変動の例 (2017 年 9 月 6 日に発生した X9.3 クラスフレア)。上方の線が 1-8Å の、下方の線が 0.5-4Å の X 線の時間変動を表している。

太陽フレアの規模は、GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite; Bornmann et al., 1996) によって観測されている 1-8Å の軟 X 線強度のピーク値で表されており、規模の小さい方から A, B, C, M, X と分類されている。X クラスが最大で、その強度は $>10^4 \text{ W/m}^2$ 、規模が 1 つ小さくなるごとに強度は一桁小さくなる。図 2 に 2017 年 9 月 6 日に発生した X9.3 クラスフレアの軟 X 線放射の強度変動を示す。このフレアでは、1-8Å の軟 X 線強度のピーク値は $9.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ であったことが分かる。このように太陽フレアが発生すると軟 X 線放射の強度は急激に数桁変わる。

b. 地球電離圏に影響するフレア放射

太陽フレア放射のうち紫外線や X 線などのフレア放射の強度が強いと、地球電離圏の電子密度の異常な増大を引き起こすことがある。図 3 に紫外線放射の地球大気における吸収高度を示す。特に低層の地球大気に影響するのは 100nm 以上の長波長の紫外線であるが、10nm 以下の短波長の紫外線・X 線も中間圏に影響していると考えられる。実際にこれらの短波長の紫外線放射は地球の高度 60-90km の電離層 D 領域まで到達し、この領域の電子密度の増大を引き起こす。この電子密度の変化によって HF 帯電波が吸収されることにより、デリンジャー現象という通信障害が発生する (Dellinger, 1937)。HF 帯電波は短波ラジオ放送だけでなく、洋上航空無線や船舶無線などに日常的に用いられているため、デリンジャー現象が発生するという予報や、その影響が何時間続くのかという予測は、日常生活に影響するとても重要な情報となっている。

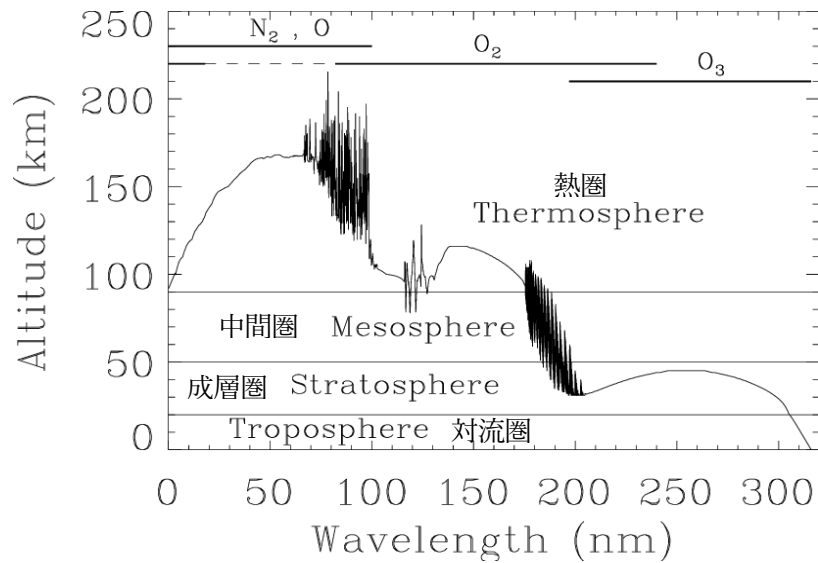


図 3. 紫外線放射の地球大気における吸収高度 (Woods et al. (2000) に加筆)。上方の線は、それぞれの分子が紫外線吸収に影響している波長範囲を示す。

一般的にデリンジャー現象は、Mクラス以上 ($1\text{-}8\text{\AA}$ の軟 X 線強度のピーク値が $>10^5 \text{ W/m}^2$) の太陽フレアの発生により引き起こされていると考えられており、現在では発生した太陽フレアの規模を用いて予報が行われている。しかし、実際の観測ではCクラスフレアでもデリンジャー現象が発生したり、また、Xクラスフレアであっても発生しなかったりという現象も報告されている (Tao et al., 2020)。これらの観測から、デリンジャー現象の発生に寄与しているフレア放射は、X線強度とは比例していない放射も影響しているのではないかと考えられる。

c. フレア放射の観測

太陽フレア放射のうち、どの波長の放射がデリンジャー現象の発生に影響しているかを検証するためには、まず、太陽フレア放射の全波長スペクトルの観測データが必要である。しかし、デリンジャー現象に大きく寄与していると考えられている紫外線や X 線のスペクトル観測データは、観測波長や観測衛星が運用されていた時期など、データが限られている。

まず、X線の放射は GOES 衛星によって 1975 年から連続的に観測されている。ただし、観測波長は $0.5\text{-}4\text{\AA}$ と $1\text{-}8\text{\AA}$ の二つの波長帯のみである (Bornmann et al., 1996)。一方、EUV (極紫外線: extreme ultraviolet) 放射は、宇宙天気予報の観点から色々な観測衛星が打ち上げられている。近年では、Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) 衛星に搭載された Solar EUV Monitor (SEM) (Judge et al. 1998)、Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) 衛星に搭載された Solar EUV Experiment (SEE) (Woods et al., 2005)、そして Solar Dynamics Observatory (SDO) 衛星に搭載された Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) (Woods et al., 2012) などによって観測が行

われている。SOHO/SEM は、1996 年 1 月以降、15 秒の時間分解能で紫外線を継続的に観測している。しかし、観測波長域は 260-340Å と 1-500Å のみで波長分解能はないため、これらの EUV 放射を波長積分した強度の時間変動しか分からない。TIMED/SEE は、2002 年 1 月から 1-1940Å の波長域を 4Å の分解能で観測を行っており、SOHO/SEM にはないスペクトル情報を持っているが、時間分解能が 1 日程度であるため、フレアの時間変動など短時間の変動は追えない。SDO/EVE は 2010 年 5 月から 1-1060Å の放射を 1Å の波長分解能および 10 秒の時間分解能で観測しており、太陽フレア EUV 放射スペクトルの時間変動を調べるのに十分な能力を持っている。しかし、SDO/EVE の中で 50-370Å の波長域を観測している MEGS-A という機器は、故障により 2014 年 5 月以降観測ができていない。以上のように、現在でも利用可能な太陽 EUV 放射データは存在しているが、十分な波長および時間分解能を持っているものは SDO/EVE しかなく、それも観測時間が限られているのが現状である。

d. フレア放射の再現モデル

以上のように、太陽フレア放射の観測は限られているため、観測がなくても太陽フレア放射スペクトルを補完・予測するモデルが構築されている。現在、最も広く使用されているモデルは Flare Irradiance Spectral Model (FISM; Chamberlin et al., 2006, 2007, 2008) である。FISM は 1 分毎に 1-1900Å の波長領域における太陽フレア放射スペクトルを 10Å の波長分解能で求めることができ、その計算結果は Web 上で公開されている (<https://lasp.colorado.edu/lisird/>)。2020 年 10 月からは波長分解能が 1Å の FISM2 のデータが公開されている (Chamberlin et al., 2020)。しかしながら、FISM はフレア放射の時間発展が GOES の軟 X 線放射に比例すると仮定されているため、軟 X 線放射とは起源が異なる EUV ライン放射の時間発展の違いは再現できない。フレア放射を理解し再現するためには太陽フレアの物理的プロセスを考慮する必要があるが (Klimchuk et al., 2008; Cargill et al., 2012)、FISM は経験則に基づいたモデルであるため、この物理過程を理解することはできない。これより、物理過程が明確なフレア放射モデルの構築が待たれている。

2. フレア放射の統計的性質 (Nishimoto et al., 2020)

フレア放射がどのようなスペクトルを持ち、どのような時間変化をするのか、その統計的な性質を調べ、太陽フレアのどのような様相がこれらの性質に影響しているのかについて探るために、フレア放射観測データの統計研究を行なった。解析には SDO/EVE MEGS-A で軟 X 線強度が M3 クラス以上のイベントを用いた。この条件に当てはまるフレアイベントは 50 例あった。

また、これらのフレアの幾何学的構造がフレア放射スペクトルにどのような影響を与えているのかについて調べるために、SDO/AIA 1600Å の画像を用いて、太陽表面付近におけるフレアの発光領域 (フレアリボン) の長さとりボン間距離を求め、これらの統計研究も行なった。この解析を行うために十分な強度のフレアリボンが SDO/AIA で観測された例は 32 例あった。

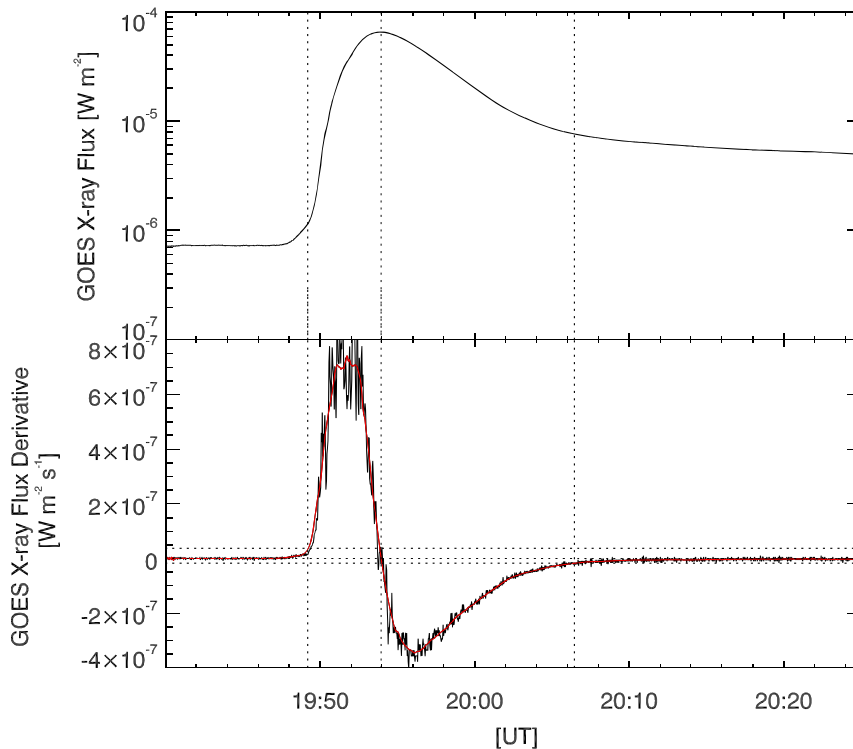


図4. (上) GOES 衛星で2013年11月1日に観測されたM6.3クラスフレアの軟X線放射の光度曲線。(下) 上図の時間微分値の時間変動(黒実線)とその30秒移動平均値(赤実線)。縦の点線は、左からフレアの開始時間(19:49 UT)、ピーク時間(19:54 UT)、終了時間(20:06 UT)をそれぞれ示している。水平の点線は、上からそれぞれ、軟X線放射時間微分の30秒移動平均値のピークの5%、0、およびマイナスピークの5%を示している。

a. フレア放射の観測例

まず、統計解析に用いるデータの導出方法を、2013年11月1日に発生したM6.3クラスフレアを例として説明する。

太陽軟X線放射強度はGOES衛星により常時観測されており、そのフレア時におけるピーク強度はフレアの規模の指標でもあるため、この軟X線データから得られる値をフレアの様相を表す基本的なパラメータとして扱うこととした。本研究で用いた基本パラメータは、フレアの規模と立ち上がり時間、立ち下がり時間である。立ち上がり時間はフレアの開始時刻からピークに達するまでの時間、立ち下がり時間はピークからフレア終了時刻とした。フレアの開始時刻と終了時刻については、軟X線放射強度の時間微分データより導出した。図4に軟X線放射の光度曲線(上)とその時間微分値の時間変動(下)を示しているが、時間微分値は短時間の時間変動が大きいことから、30秒間の移動平均値(図4下図赤線)を用いてフレア開始・終了時刻を決定した。フレアピーク時刻より以前で、軟X線放射時間微分の30秒移動平均値(赤線)のピークの5%を最後に下回る時刻をフレア開始時刻、フレアピーク後に赤線がマイナスピークの5%を初めて上回る時刻をフレア終了時刻とした。

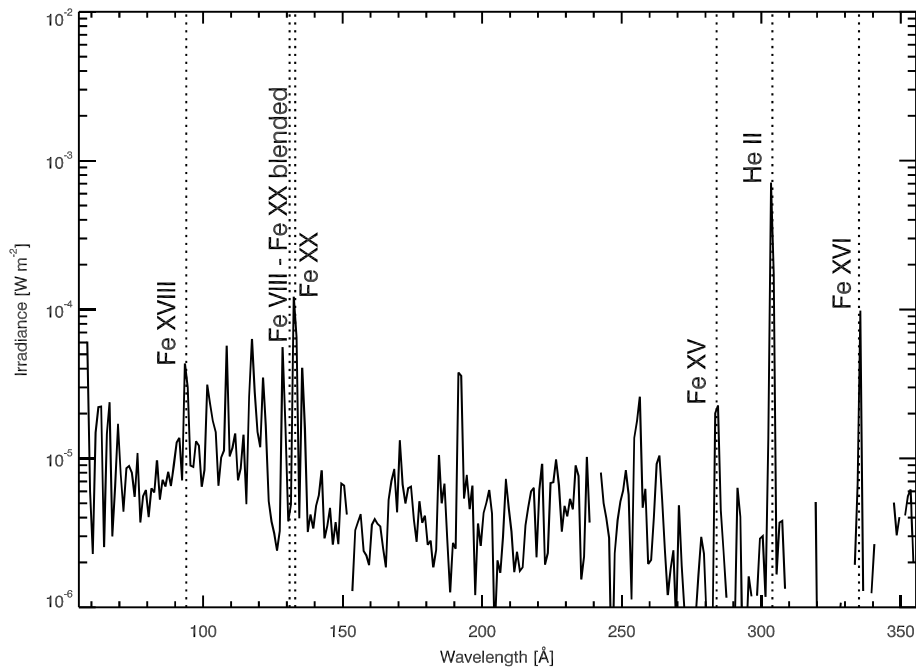


図5. 2013年11月1日に発生したM6.3クラスフレアのピーク時間（19:54UT）にSDO/EVEにより観測された極紫外線放射のスペクトル。解析に用いた6つのEUVラインを点線で示す。

次に、基本フレアパラメータとの比較対象として、SDO/EVEで観測されたEUVライン放射を用いることとした。図5にSDO/EVEにより観測されたEUV放射のスペクトルを示しているが、紫外線放射はほとんどライン放射で構成されていることがわかる。この中でもフレア時の変動が大きいと考えられている6つのEUVライン（Fe VIII-Fe XX 131Å、Fe XV 284Å、Fe XVI 335Å、Fe XVIII 94Å、Fe XX 133Å、He II 304Å）を解析対象として選んだ。EUVラインは電離したイオンから放射しており、これらのイオンの形成温度を反映している。例えばFe XXは20階電離した鉄イオンからの放射であることを表しており、主に9-13MK程度の太陽フレアプラズマの放射である。鉄イオンの電離はプラズマの温度が高いほど進み、Fe XVは2MK、Fe XVIは3MK、そしてFe XVIIIは6MKのプラズマに由来している。131ÅにあるラインにはFe VIIIとFe XXの成分が両方とも影響しており、形成温度としては0.4-13MKであるが、フレアが発生していないときは低温の様相を、フレア中は高温の様相を呈す。He IIは形成温度が低く、0.05MKプラズマからの放射である。

上記で選んだ6つのEUVラインの光度曲線を描き、各放射のピーク放射強度と立ち上がり時間を調べた。図6にも見られるように、EUVラインの光度曲線（黒線）では短時間の時間変動が見られるため、大まかなフレアによる変動値を取り出すために、110秒平均値（赤線）を解析に用いた。EUVラインの立ち上がり時間は、軟X線放射の開始時刻からEUVライン強度がピークに達するまでの時間とした。

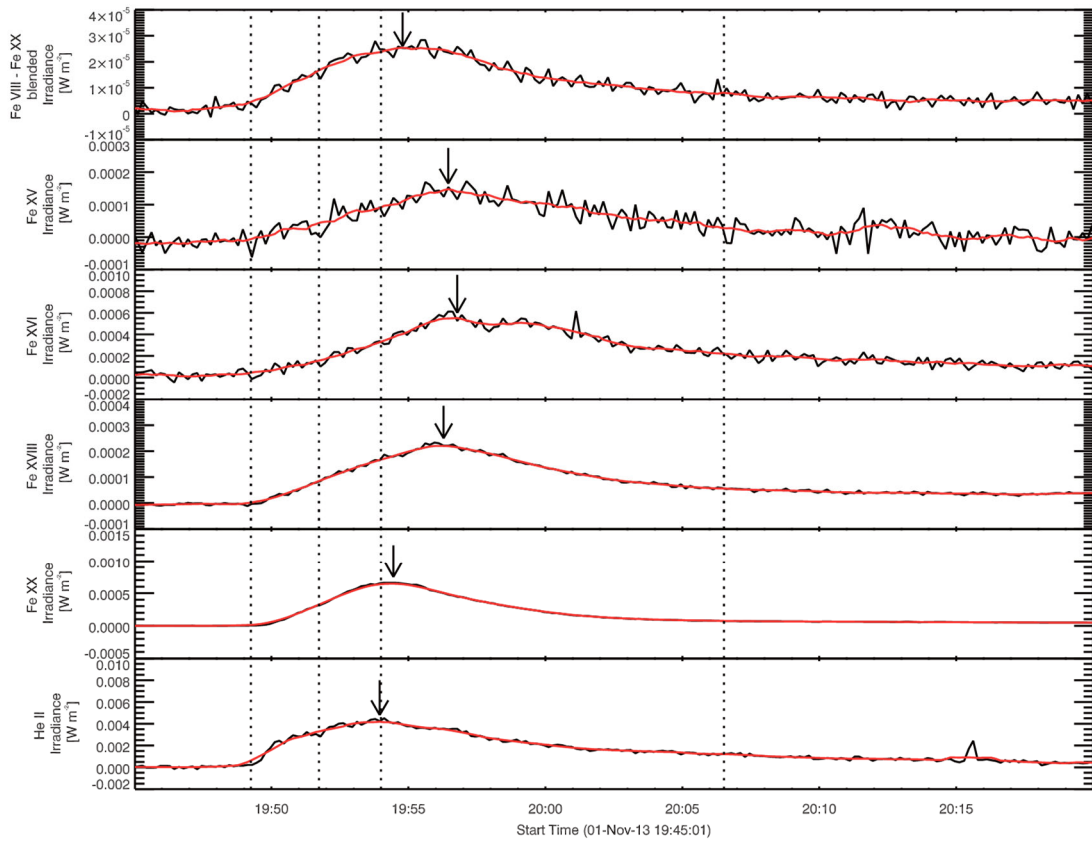


図 6. 2013 年 11 月 1 日に発生した M6.3 クラスフレアにおいて SDO/EVE により観測された各 EUV ライン放射の光度曲線。赤線は 110 秒移動平均である。

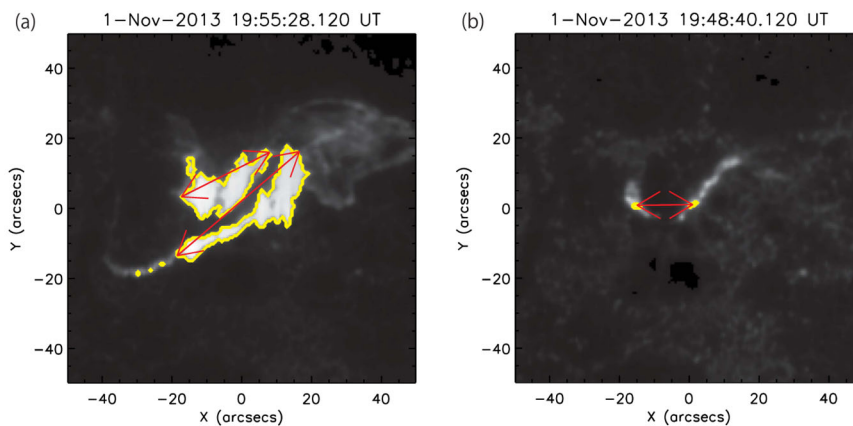


図 7. (a) SDO/AIA 1600Å で観測されたフレアリボン (等高線領域) とフレアリボンの長さ (赤矢印)。(b) フレア開始時におけるフレアリボンの様相 (等高線領域) とリボン間距離 (赤矢印)

フレアリボンの長さとリボン間距離をフレアループの幾何学的構造の特徴値とした。これらの値は SDO/AIA 1600Å の画像より導出した。図 7 (a) にフレアリボンの長さ (b) にリボン間距離の導出例を示す。フレアピーク時刻付近でバックグラウンドからの強度が 40σ 以上の領域をフレアリボン領域

とし、その中からリボンと見られる連続した二つの領域の最長の長さ（2本の赤矢印）の合計をフレアリボンの長さとした。また、フレア開始時刻前後で強度がバックグラウンドから 40σ 以上となった領域で最も輝度の高い2点の最短距離（赤矢印）をリボン間距離とした。

b. フレア放射の統計的性質（特に EUV 放射について）

フレア放射の統計的性質を求めるため、前章で導出した EUV データとフレアの基本パラメータとの比較を行なった。各 EUV ラインのピーク強度と軟 X 線ピーク強度との関係を図8に示している。これらの結果より、Fe XX、Fe VIII-Fe XX および Fe XVIII は軟 X 線と良い相関があることが分かったが、Fe XV と Fe XVI は他の鉄のラインと比べて相関が悪く、He II については相関がないことが分かった。これらの EUV ラインでは、短波長 ($\lambda < 140\text{\AA}$) の EUV ラインで軟 X 線強度と良い相関があり、長波長 ($\lambda > 280\text{\AA}$) で相関が悪いという関係性が見られた。

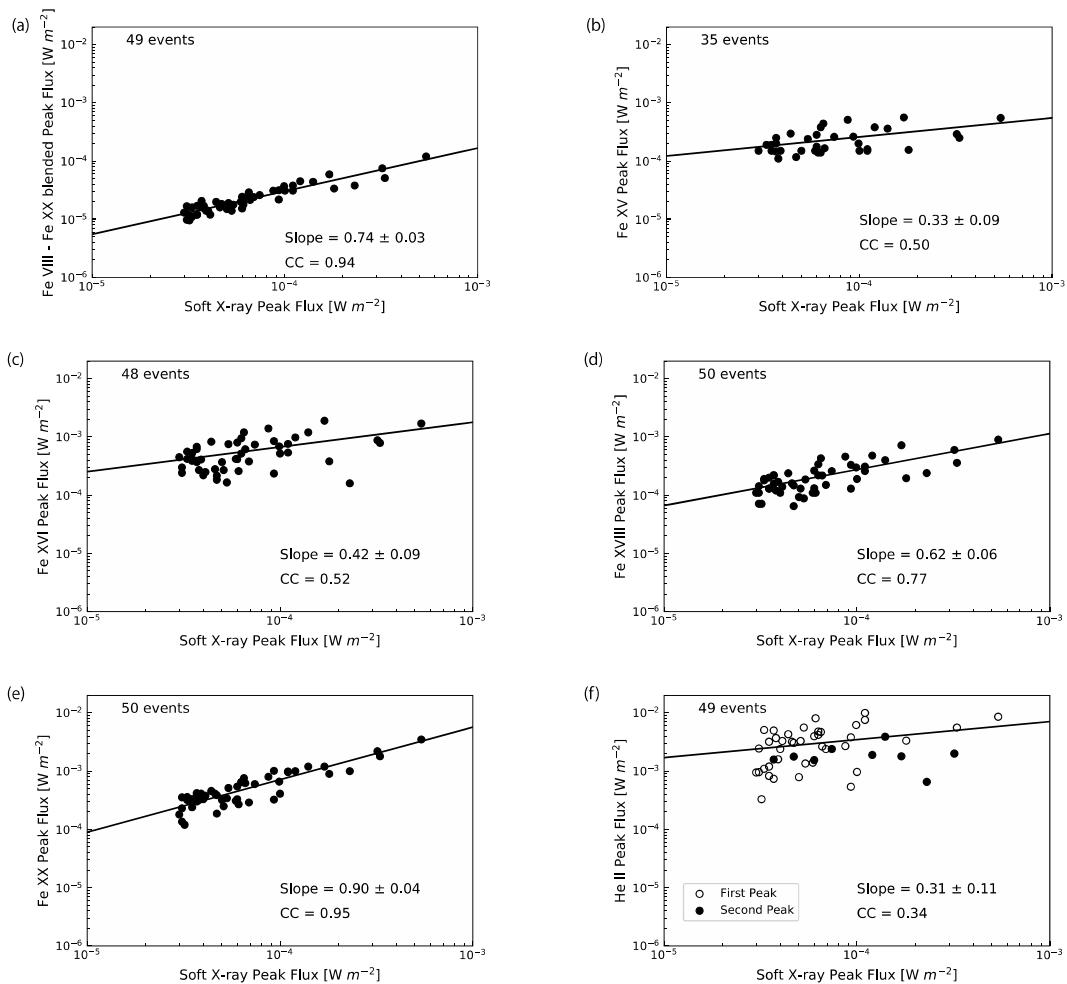


図8. 各 EUV ラインと軟 X 線放射のピーク強度の関係。直線は近似線である。(f) He II の光度曲線はピークを2つ持つことがあるため、軟 X 線放射ピークよりも前の時間にピークが見られた場合は白丸、軟 X 線放射ピーク後にピークが見られた場合は黒丸で表した。

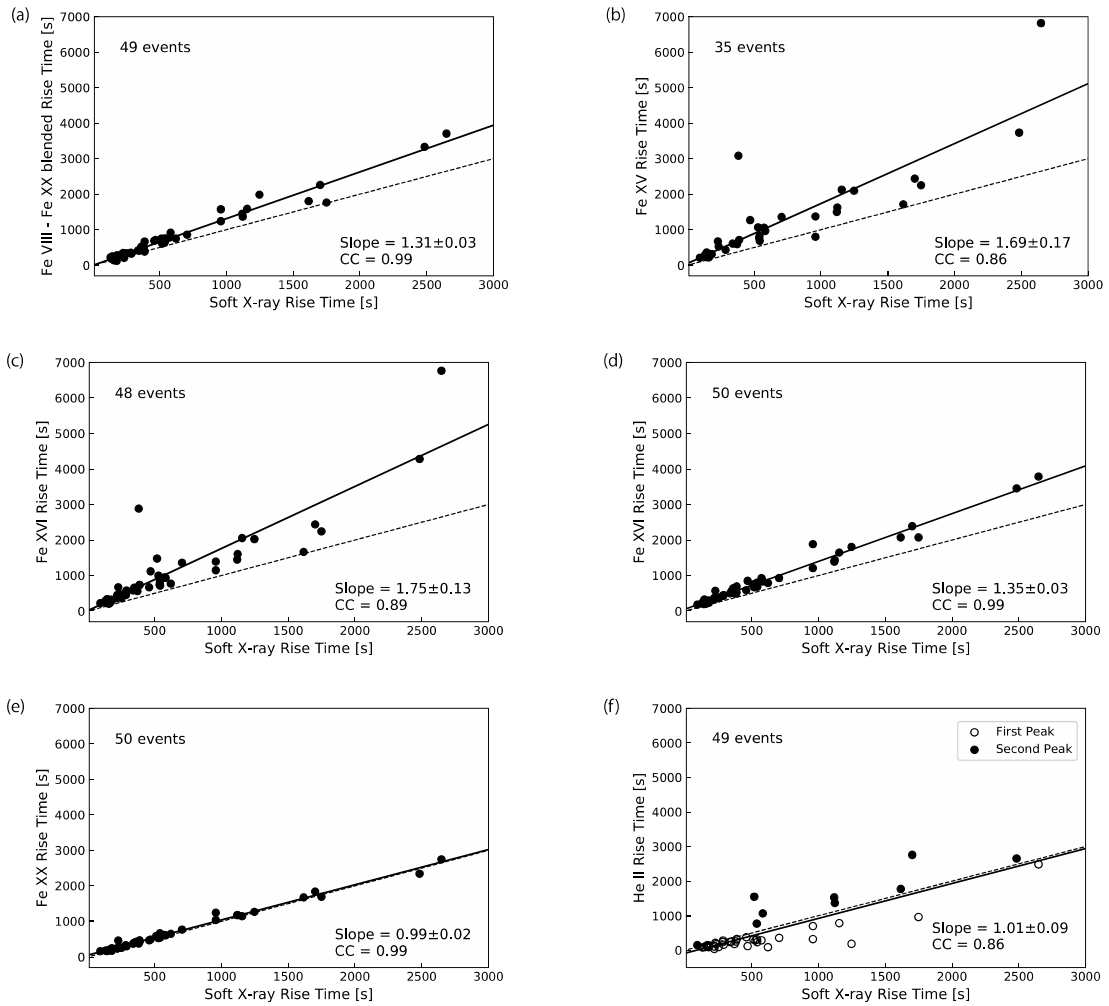


図9. 各 EUV ラインと軟 X 線放射の立ち上がり時間の関係。実線は近似線、点線は傾き 1 の線である。(f) 白丸と黒丸は図8と同様。

次に、EUV ラインと軟 X 線放射の立ち上がり時間の比較を行った。結果は図9のようになり、どの EUV ラインの立ち上がり時間も軟 X 線放射のそれと良い相関を示した。これらの傾きが 1 (点線) より大きい場合、EUV ラインの立ち上がり時間が軟 X 線の立ち上がり時間より長いことを示し、傾きが 1 より小さい場合は EUV ラインの立ち上がり時間は軟 X 線の立ち上がり時間よりも短いことを示している。図6からも確認できるが、各 EUV ラインがピークに達する時刻は、鉄の電離度が高いほど (ライン形成温度が高いほど) 早い傾向が見られ、実際、Fe XVI から Fe XX ではライン形成温度が高いほど立ち上がり時間が早い傾向が見られる。しかし、Fe XVI の立ち上がり時間は Fe XV よりも遅く、一概にこのような傾向が見られるわけではない。また、He II は形成温度が低い、立ち上がり時間は軟 X 線と同程度に早かった。このようになった理由としては、他の温度の EUV ラインのブレンドが考えられる。CHIANTI データベース (Dere et al., 1997, 2019) によると、Fe XV は Ni XIX

($\sim 10\text{MK}$) ラインとのブレンド、Fe XVI は Fe XXI ($\sim 13\text{MK}$) とのブレンド、また Fe XVIII は Fe XX ($\sim 13\text{MK}$) とのブレンドが考えられる。He II ラインは遷移層起源のラインであり非熱的な様相を示すことが知られている (Woods et al., 2011) ため、形成温度が低くても立ち上がり時間が短いと考えられる。このように EUV ラインは、色々なブレンドラインの影響などが考えられるため、ライン形成温度が高いほど立ち上がり時間が早い傾向は、統計的には明確に出てこないことが分かった。

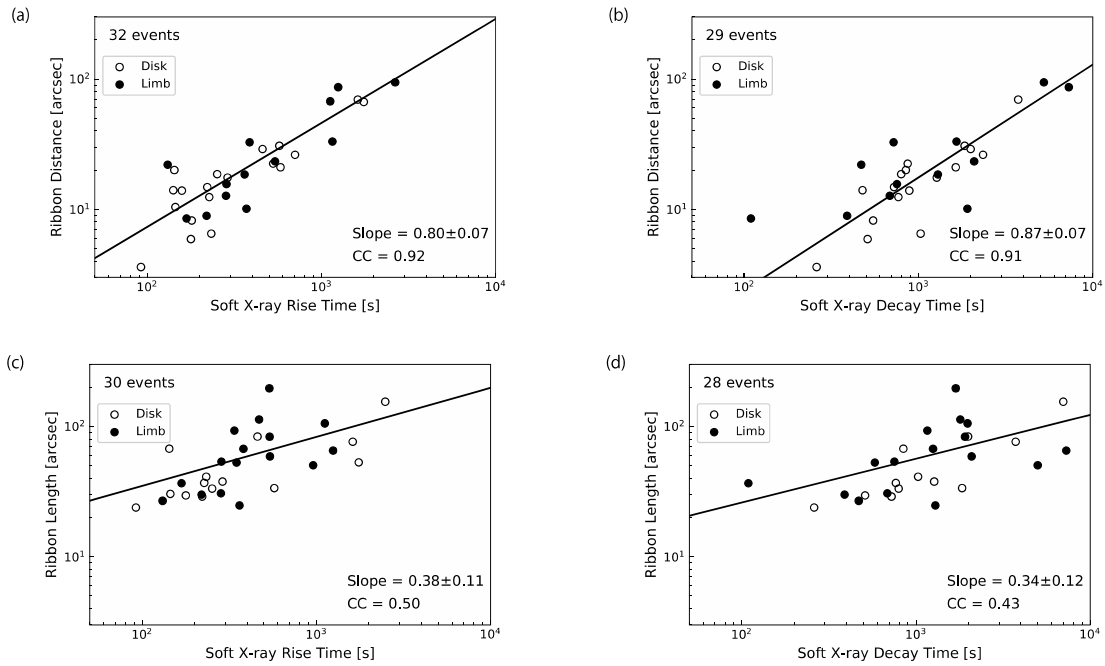


図 10. SDO/AIA 1600\AA で観測されたフレアリボン間距離 (a) (b)・リボン長 (c) (d) と、軟 X 線放射の立ち上がり時間 (a) (c)・立ち下がり時間 (b) (d) との関係

c. フレアループの幾何学的形状とフレア放射の関係

フレアループの幾何学的特徴 (リボン間距離・リボン長) とフレアの基本パラメータ (軟 X 線立ち上がり時間・立ち下がり時間) との関係を統計的に調べたところ、図 10 のような結果が得られた。リボン間距離については、軟 X 線の立ち上がり時間 (a)・立ち下がり時間 (b)、両方とよく相関していた。一方、リボン長は軟 X 線立ち上がり時間 (c)・立ち下がり時間 (d)、どちらも相関していないことが分かった。リボン間距離はループ長と、リボン長はフレアループの奥行きと比例していると考えられる。これらの結果より、フレアの立ち上がり時間はリボン間距離 (ループ長) より予測することができると言える。

3. フレア放射モデル計算

a. フレア放射モデルの構築

観測されたフレア放射を再現するために、物理過程が明確なフレア放射モデルの構築を行った。我々のモデルでは、CANS (Coordinated Astronomical Numerical Software) 1D パッケージ (<http://www-space.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/etc/cans/index-e.html>) を用いた 1 次元流体力学計算と CHIANTI 原子データベース (Dere et al., 2019) を組み合わせることにより、フレアループ内のプラズマの物理過程を再現して太陽フレア EUV・X 線放射を求めた (Imada et al., 2015; Kawai et al., 2020)。今後、このモデルを 1 次元流体モデルと呼ぶ。

上記の 1 次元流体モデルの中で用いている CANS 1D には、フレアループ内のプラズマの物理プロセスを考慮した 1 次元流体力学モデルがある。このパッケージでは、フレアループへのエネルギー注入後のループ内でのプラズマのふるまいを計算することができ、磁気ループに沿った 1 次元の流体運動とエネルギー伝達をシミュレートする。磁気ループの断面積は時間とともに変化しないことを前提としており、流体は非粘性で圧縮性であると見なしている。また、熱伝導と放射冷却が含まれ、重力も考慮されている。このモデル計算への入力値は、フレアループの長さとしてループに注入するエネルギー量である。

また、上記の 1 次元流体モデルの中で CANS 1D とともに用いている CHIANTI 原子データベースは、CANS 1D の計算結果から X 線および EUV 放射を再現するために用いている。CHIANTI には原子エネルギーレベルや波長、放射遷移確率、イオン化の速度係数、さまざまな放射を計算するためのデータなど、天体物理スペクトルを分析するための大量の原子データが含まれている (Dere et al., 1997)。1 次元流体モデルでは太陽コロナ中のプラズマのみを扱うため、CHIANTI の太陽コロナ組成モデルを用いた。CANS 1D で得られたフレアループ内のプラズマ分布に CHIANTI を適応することにより、観測と比較可能なフレア放射データを得ることができる。

b. フレア放射モデル計算と観測との比較

まず、SDO/EVE MEGS-A によって観測された M3 クラス以上の太陽フレア 21 イベントについて、この 1 次元流体モデルを用いて太陽フレア放射スペクトルを求めた。1 次元流体モデルの中の CANS 1D への入力値であるループの長さについては、それぞれのフレアイベントにおいて、フレア開始時刻あたりのフレアリボンの様相 (SDO/AIA 1600Å) からリボン間距離を導出し、そのリボン間距離を直径とする半円を用いた。フレアの加熱量については、GOES 衛星で観測された 1-8Å と 0.5-4Å の流量を再現できる加熱量を用いた。コロナ中のフレア放射を取り扱うため、このようにして計算したフレアループ内の太陽フレア放射のうち、10 万度以下の温度となった高度以下の放射は彩層からの放射として、本研究では用いないこととした。これは Kawai et al. (2020) と同様の扱いである。

次に、上記で得られたモデル計算結果と観測値との比較を行った。まずスペクトルの比較を行ったところ、1 次元流体モデルの計算結果は EVE で観測された太陽フレア発生時の EUV 放射の時間積分

スペクトルをよく再現していることが分かった。これらの比較の一例を図 11 に示す。これより、1次元流体モデルは特に EUV ライン一本一本をよく再現していることがわかる。一方 FISM は、EUV ラインを分解できる分解能を有してないため各ラインの再現はできていないが、大まかなスペクトルの様相は再現していることがわかる。

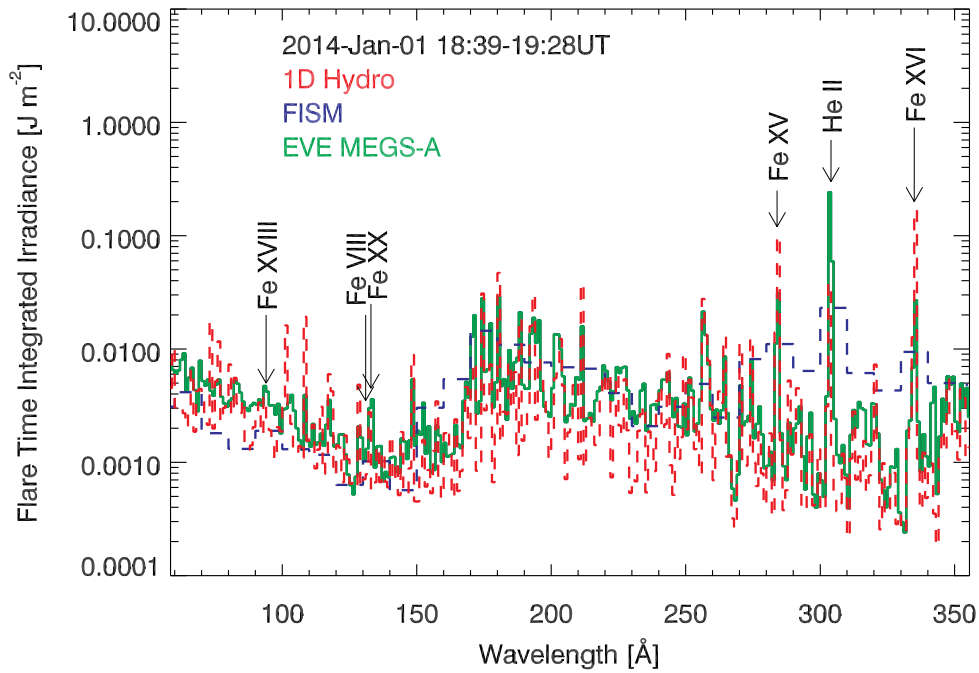


図 11. 2014 年 1 月 1 日に発生した M9.9 クラスフレアの積算スペクトル。積算時間はフレア開始から終了時間。

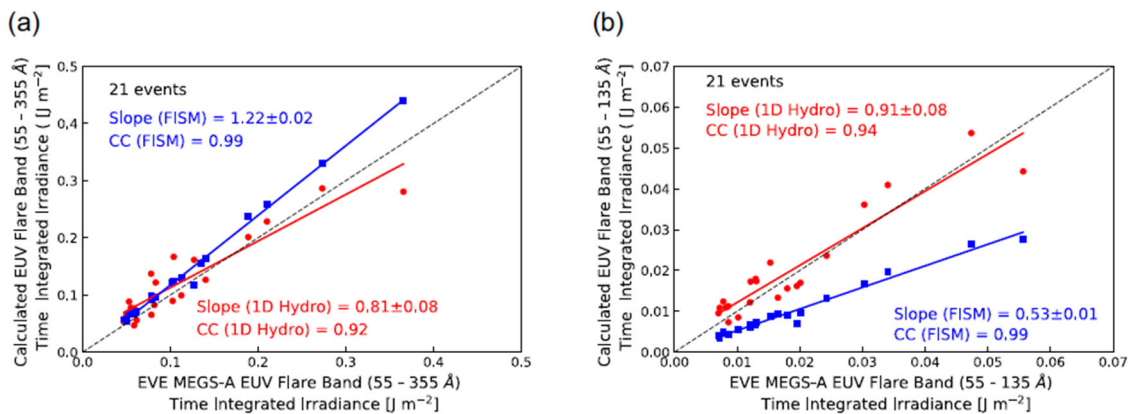


図 12. EUV 放射エネルギーのモデル計算値（1次元流体モデル：赤、FISM：青）と観測値（SDO/EVE）との比較。(a) EVE MEGS-A の観測波長における EUV 放射エネルギー、(b) 140Å 以下の波長の EUV 放射エネルギー。

次に1次元流体モデルとFISMで求めたEUV放射エネルギーをEVEの観測値と比較したところ(図12a)、どちらのモデルも観測値に近い値が得られていた。しかし、FISMで予測精度が低いことが知られている140Å以下の波長のEUV放射エネルギーについて観測値と比較したところ(図12b)、1次元流体モデルは観測値をよく再現しているが、FISMは観測値の半分程度のエネルギー量であり、観測値とはかけ離れた値になっていることが分かった。

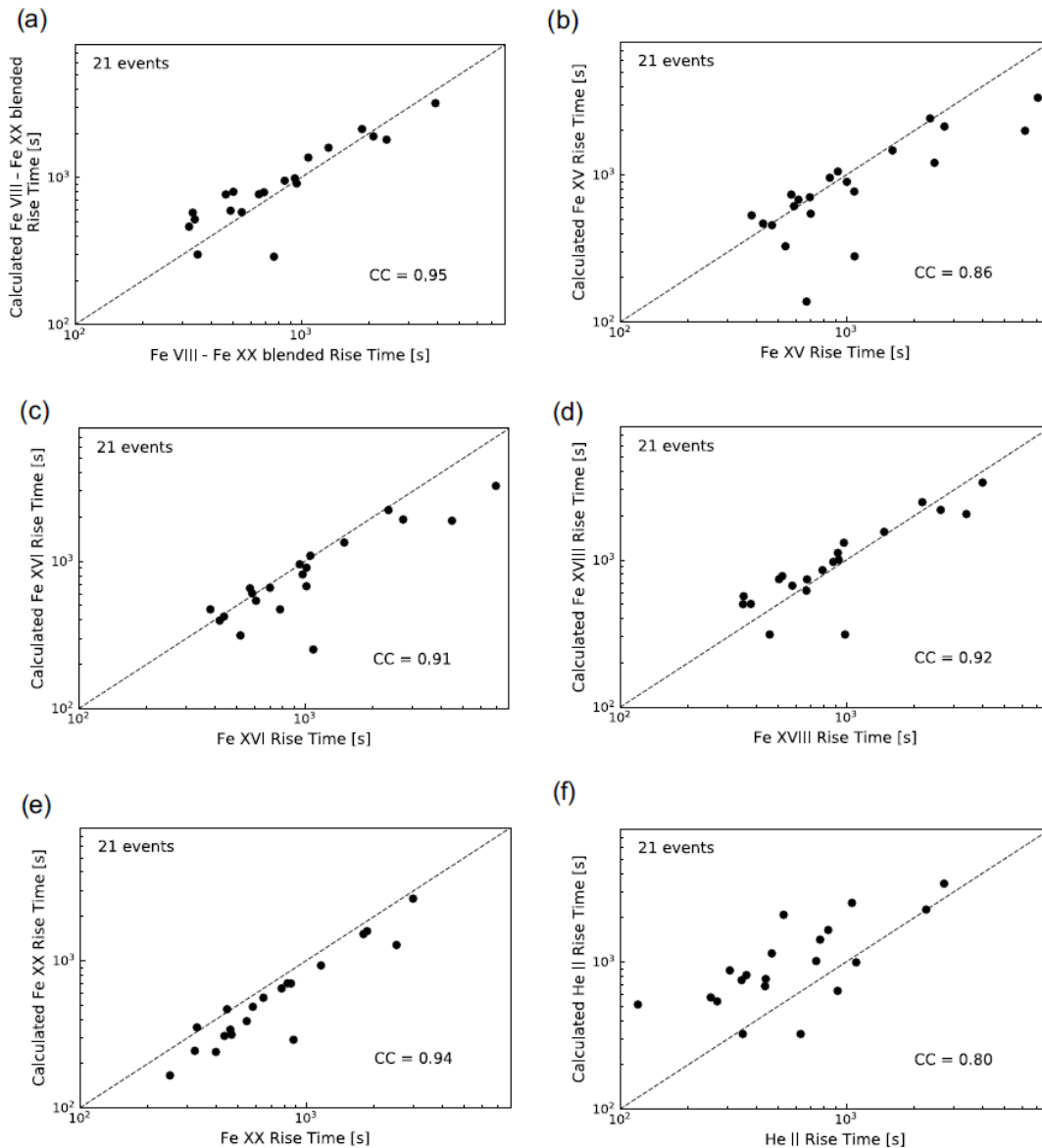


図13. 各EUVラインの立ち上がり時間のモデル計算値(1次元流体モデル)と観測値(SDO/EVE)との比較。点線は傾き1の線を表しており、点線よりも上の点は観測の方の立ち上がり時間が、点線よりも下の点ではモデル計算の方の立ち上がり時間が短いことを示している。

また、6つの EUV ラインの立ち上がり時間について、1次元流体モデルで得られた値と観測値とを比較したところ、図13のような結果が得られた。He II のデータ点は傾き1の点線から離れている点が多いが、他はどの EUV ラインでも傾き1の点線周りにデータ点があり、良い相関が得られていた。

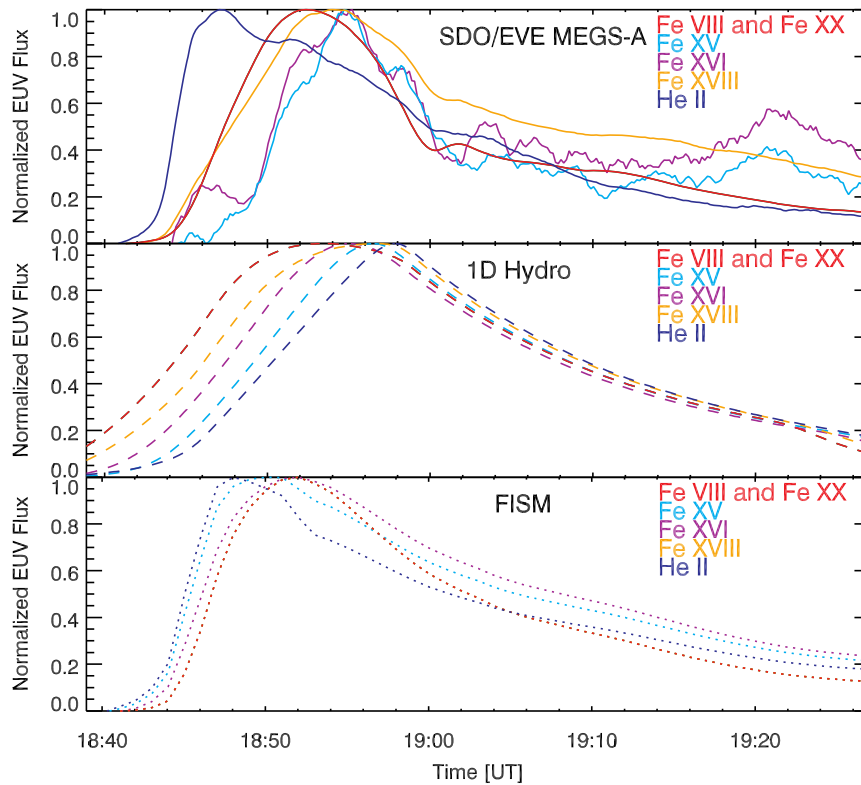


図14. 2014年1月1日に発生したM9.9クラスフレアにおける各EUVラインの光度曲線。FISMはそれぞれのEUVラインを含む波長バンドの光度曲線を表示。

以上の1次元流体モデルの計算値と観測値の比較により、フレア期間中の積算スペクトルの一致とEUV放射エネルギーの一致、そしてEUVラインの立ち上がり時間の比例関係が確認された。これより、我々が構築した1次元流体モデルは各EUVラインの時間変動まで再現できたと考えられるが、個々の観測値と比較すると、まだ観測値を完全には再現できていない。計算値と観測値の比較の一例として、図14に2014年1月1日に発生したM9.9クラスフレアにおける各EUVラインの光度曲線を示す。1次元流体モデルは観測されているEUVラインのピーク時間の違い(遅れ)を再現しているが、ラインによっては大きくかけ離れた時間変動となっていることが分かる。以上の結果より、我々の1次元流体モデルは、観測されたEUV放射スペクトルとその時間変化を比較的良く再現しているが、ループ内のプラズマの温度・密度分布とその時間変動を正確には再現はできておらず、改善の余地があることが分かった。

4. まとめと今後の課題

これまでデリンジャー現象に影響する太陽フレアスペクトルを導出するために、観測データの統計研究とフレア放射モデルの構築を行ってきた。まず、太陽フレアから観測された紫外線スペクトルデータの統計解析を進めた結果、フレアからの主だった紫外線ライン放射は GOES の X 線強度変化と良く相関していることが分かったが、時間発展についてはピーク時間などにズレがあり、この時間のズレはフレアループ中のプラズマの温度分布と関係していることが分かった。次に、フレア放射モデルとして 1 次元流体モデルを構築し、フレア放射スペクトルの再現を行った。この計算結果と実際に観測された軟 X 線・紫外線スペクトルの強度変化との比較を行ったところ、いくつかの紫外線ライン放射については強度・時間変化ともに再現に成功したが、強度が再現できない紫外線ライン放射もあった。これは実際の放射プラズマのループ内での様相が正確には再現できていないことを表しているが、全エネルギー量はほぼ再現できており、そのスペクトル分布も FISM より良い結果を得た。

以上より 1 次元流体モデルによってフレア放射スペクトルの再現精度を高めることが可能となった。この 1 次元流体モデルより得られた太陽フレア放射スペクトルの変動を、情報通信研究機構で開発されている地球電離圏のモデル (Ground-to-topside atmosphere and ionosphere model for aeronomy (GAIA) ; Jin et al., 2011) へ入力値として与えることによって、太陽フレア放射の電離圏への影響の再現を行うことが今後の課題として考えられる。太陽紫外線放射に対する地球電離圏の応答は、フレア時に限らず未だ確立していない。そこで 1 次元流体モデルで得られた太陽フレア放射スペクトルを導入し、観測されている全電子数の分布や地上で発生したデリンジャー現象と比較することにより、電離圏密度構造の予測精度改善と、太陽フレアに応じた応答の評価が可能となると考えられる。

また今後、以上の二つの数値計算モデルをつないだシステムを構築することにより、地球に降り注ぐ太陽フレア放射スペクトルを X 線やフレアリボンの観測から推定でき、地球電離圏への影響まで予測できるモデルを構築することができる。最終的には、太陽フレア放射による通信障害に関する宇宙天気予報の運用が可能となるであろう。

参考文献

- Kane S. R.: Impulsive (flash) Phase of Solar Flares: Hard X-Ray, Microwave, EUV and Optical Observations. *Coronal Disturbances: Proc. 57th IAU Symp.*, 105 (1974).
- Bornmann, P.L., Speich, D., Hirman, J., et al.: GOES X-ray sensor and its use in predicting solar-terrestrial disturbances. *Proceedings of the SPIE*. 2812, 291-298 (1996). <https://doi.org/10.1117/12.254076>
- Dellinger, J. H.: Sudden disturbances of the ionosphere. *J. Appl. Phys.* 8, 732 (1937). <https://doi.org/10.1063/1.1710251>
- Tao, C., Nishioka, M., Saito, S. et al.: Statistical analysis of short-wave fadeout for extreme space weather event estimation. *Earth*,

- Planets and Space. 72, 1, 173 (2020).
- Judge, D.L., McMullin, D.R., Ogawa, H.S. et al.: First Solar EUV Irradiances Obtained from SOHO by the CELIAS/SEM. *Solar Physics*. 177, 161-173 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1004929011427>
- Woods, T.N., Eparvier, F.G., Bailey, S.M., et al.: Solar EUV Experiment (SEE): Mission overview and first results. *J. Geophys. Res.* 110, A01312 (2005). <https://doi.org/10.1029/2004JA010765>
- Woods, T.N., Eparvier, F.G., Hock, R., et al.: Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments. *Solar Physics*. 275, 115–143 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11207-009-9487-6>
- Chamberlin, P.C., Woods, T.N., Eparvier, F.G.: Flare Irradiance Spectral Model (FISM) use for space weather applications. *Proceedings of the ILWS Workshop*. 153 (2006)
- Chamberlin, P.C., Woods, T.N., Eparvier, F.G.: Flare Irradiance Spectral Model (FISM): Daily component algorithms and results. *Space Weather*. 5, 7, S07005 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007SW000316>
- Chamberlin, P.C., Woods, T.N., Eparvier, F.G.: Flare Irradiance Spectral Model (FISM): Flare component algorithms and results. *Space Weather*. 6, 5, S05001 (2008). <https://doi.org/10.1029/2007SW000372>
- Chamberlin, P.C., Eparvier, F.G., Knoer, V.: The Flare Irradiance Spectral Model-Version 2 (FISM2). *Space Weather*. 18, 12, e2020SW002588 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020SW002588>
- Klimchuk, J.A., Patsourakos, S., Cargill, P.J.: Highly Efficient Modeling of Dynamic Coronal Loops. *The Astrophysical Journal*. 682, 2, 1351-1362 (2008). <https://doi.org/10.1086/589426>
- Cargill, P.J., Bradshaw, S.J., Klimchuk, J.A.: Enthalpy-based Thermal Evolution of Loops. III. Comparison of Zero-dimensional Models. *The Astrophysical Journal*. 785, 1, 5 (2012). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/1/5>
- Nishimoto, S., Watanabe, K., Imada, S. et al., Statistical and observational research on solar flare EUV spectra and geometrical features. *Astrophysical Journal*. 904, 1, 31 (2020).
- Dere, K.P., Landi, E., Mason, H.E., et al.: CHIANTI - an atomic database for emission lines. *Astronomy & Astrophysics Supplement series*, 125, 149-173 (1997). <https://doi.org/10.1051/aas:1997368>
- Dere, K.P., Del Zanna, G., Young, P.R., et al.: CHIANTI—An Atomic Database for Emission Lines. XV. Version 9, Improvements for the X-Ray Satellite Lines. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 241, 2, 22 (2019). <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab05cf>
- Woods, T.N., Hock, R., Eparvier, F.G., et al.: New Solar Extreme-ultraviolet Irradiance Observations during Flares. *The Astrophysical Journal*. 739, 59 (2011) <https://doi.org/10.1088/0004-637X/739/2/59>
- Imada, S., Murakami, I., Watanabe, T.: Observation and numerical modeling of chromospheric evaporation during the impulsive phase of a solar flare. *Physics of Plasmas*. 22, 101206 (2015) <https://doi.org/10.1063/1.4932335>
- Kawai, T., Imada, S., Nishimoto, S., et al.: Nowcast of an EUV dynamic spectrum during solar flares. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 205, 105302 (2020)
- Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H. et al.: Vertical Connection from the Tropospheric Activities to the Ionospheric Longitudinal Structure Simulated by a New Earth's Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model. *J. Geophys. Res.* 116, A01316 (2011) <https://doi.org/10.1029/2010JA015925>