

論文内容の要旨

論文題目: X-ray and Gamma-ray Study of Solar Flares

(太陽フレアのX線およびガンマ線による研究)

氏名 松本 縁

太陽フレアは、磁場エネルギーを爆発的に解放し、粒子を加速し、コロナプラズマを加熱して宇宙空間に噴出させる現象である。加速された電子はプラズマと衝突し、非熱的制動放射する一方で、加速された陽子や重元素はイオンと衝突して、 γ 線ライン、中性子、 π メソン等を生成する。このように、太陽フレアは、同時に電子やハドロンの加速が見られる、宇宙の中で稀な舞台である。

1980年代、SMM衛星によって150以上もの γ 線太陽フレアが観測され、粒子加速や γ 線放射の理解が深まった。そして1990年代、「ようこう」衛星による高空間分解能の軟X線、硬X線撮像が可能になり、磁気リコネクションの描像が明らかになってきた。本論文では、「ようこう」に搭載される硬X線望遠鏡(HXT)と γ 線分光計(GRS)を用い、硬X線像と γ 線スペクトルのデータを同時に扱うことにより、 γ 線の放射のメカニズムを、世界で初めて空間的に研究する。

GRSは、立教大学によって開発された装置で、2組のBGOシンチレータを用い、0.3–100 MeVの γ 線が検出可能である。我々は、1997年以降に1年ごとに行なわれている軌道上キャリブレーションデータを解析し、同時に γ 線ラインの顕著な大フレアを用いることで、10年でエネルギーゲインが低下したGRS 2台の新しいChannel-Energyの関係を決定した。これは、1997年以降から現在まで起こった太陽フレア解析のサポートとなる。またHXTは、14–23–53–93 keVの4エネルギーバンドそれぞれで、すだれコリメータを用いたフーリエ合成法によりイメージングを行なう。100 keVまでの硬X線の領域で、5秒角という高い空間分解能は世界初である。

我々は、「ようこう」打ち上げ後から現在まで過去10年間に起こったX線フレアの中をサーチし、38個の γ 線フレアを見つけ、これらの統計的解析を行なった。軟X線から γ 線までの7つのエネルギーバンド毎のピークカウントの相関図から、HXT-M2およびHXT-Hバンドつまり、30 keV以上の硬X線は、 γ 線と比較的よく相関していることがわかった。このことから、30 keV以上の硬X線と γ 線はほぼ同じ放射起源を持ち、空間的にも同じ場所から放射されると考えるのが自然である。したがって、HXTのM2およびHバンドで得られる画像を、 γ 線放射の画像と考えることができる。

上記の38個の γ 線フレアの中で一つ、X線と γ 線強度の時間変動が大きく異なる1998-August-18フレアに我々は注目した。フレア時間の前半ではX線のみが放射されており、途中で γ 線が鋭く強く放射される。 γ 線放射時に、硬X線イメージでどの領域が明るくなるかを調べることで、そこがまさに γ 線放射領域であり、 γ 線放射メカニズムにせまることが可能となる。

HXT画像から、 γ 線ピークとともに光るループトップF領域が見つかった(図1)。そこで硬X線画像で定義した領域ごとの明るさの時間変動を求めたところ、図2のようになり、ループトップF領域の時間変動が γ 線の鋭いピークをもっともよく反映しており、画像合成の際の洩れ込みに対しても有意な増光を示した。F以外にも増光を示すD、Gすべてを含めたループトップ領域、そして、A、B、Cを含むフットポイント領域に大きく分け(図5)、2領域のHXT Hバンドのライトカーブを求めた結果、図3のようになった。フットポイント領域ではgradual成分が卓越するのに対し、ループトップ領域ではimpulsive成分が有意に見られる。

γ 線time profileから分離したimpulsive成分とgradual成分(図4)についてスペクトルを調べたところ、前者は光子指数1.4とハードな、後者は指数2.2とわりとソフトな放射とわかった。そこで先のHXT画像から分離した、ループトップからのimpulsive成分とフットポイントからのgradual成分を、2つの γ 線成分とともにwide-bandスペクトルの形で表示したところ、図6のようになった。このように硬X線での2つの成分は γ 線の2成分とよく対応しているので、ループトップ領域からはimpulsiveな硬い放射(index \sim 1.4)が、フットポイント領域からはgradualな軟らかい放射(index \sim 2.2)が起こっていると示唆される。

1998-Aug-18フレアの中で、 γ 線放射が起きていない時でも、硬X線だけが強く増光する時があり、このときの硬X線は、光子指数3.5のsteepなスペクトルを示す。これを上の2成分に加えた、次のような3成分の解釈を提唱する。ループトップで衝撃加速された電子は、エネルギーの一部をループトップで放射し、これがimpulsiveな硬い

放射 (index \sim 1.4) に対応する。残りのエネルギーはフットポイントで放射されるが、制動放射の非等方性と光球での多数回のコンプトン散乱の結果、gradual な軟らかい放射 (index \sim 2.2) として観測される。また、ループトップでの2次加速を受けずに、リコネクションポイントから直接落ちてきた電子が、フットポイントから硬X線のみの光子指数3.5の steep な放射を起こす。このように考えると、他の多くのフレアの硬X線から γ 線にかけての挙動を、統一的に説明できる。

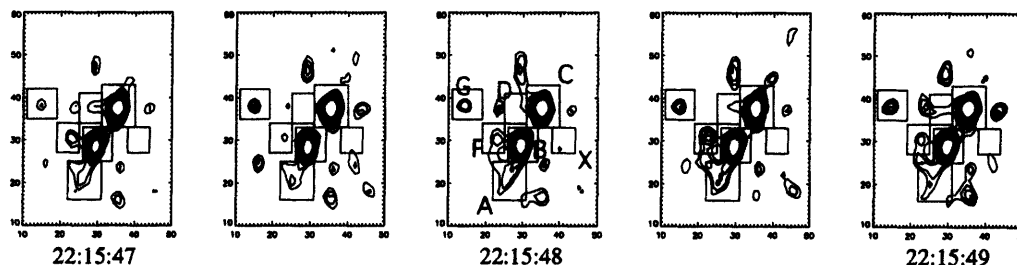


図 1: HXT Hバンドでのフーリエ合成画像。ガンマ線ピーク (\sim 22:15:48.5) 付近の0.5秒毎のイメージ。A, B, C: フットポイント。D, F, G: ループトップ。

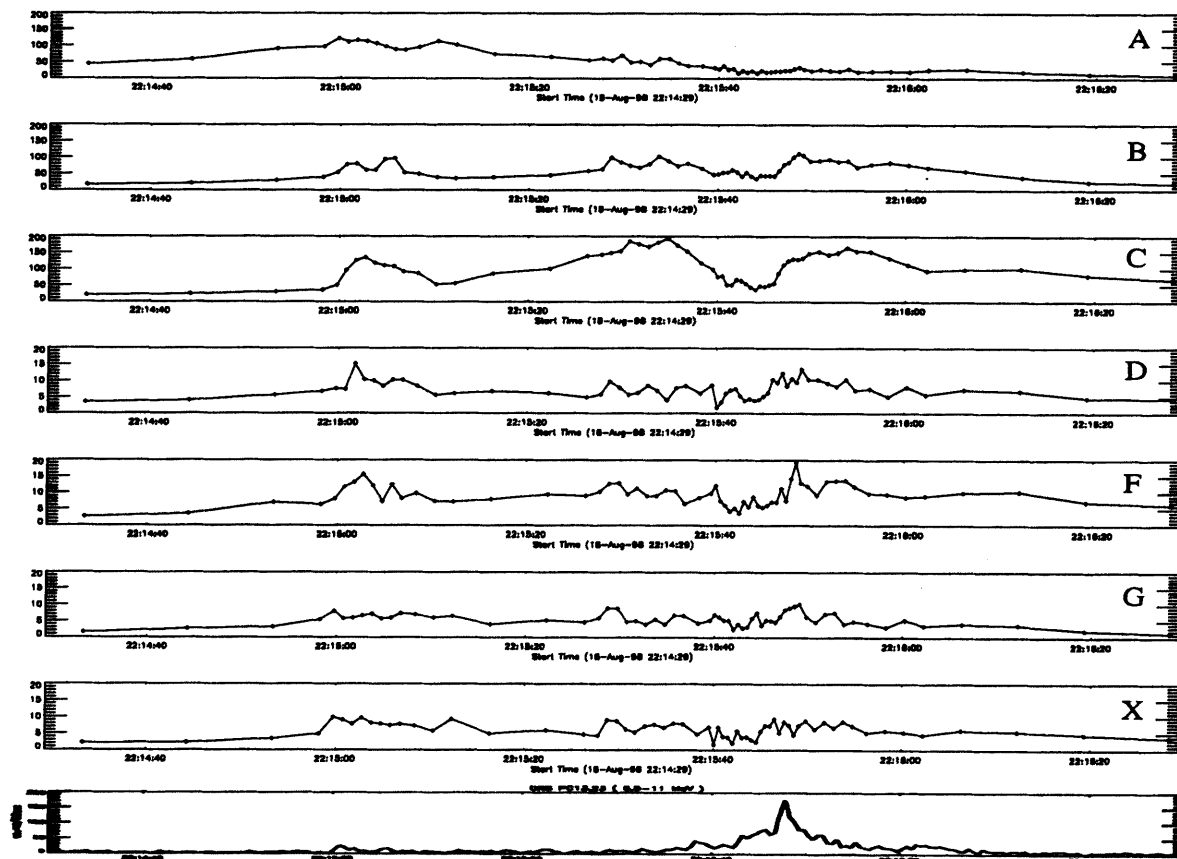


図 2: 図 1 の 7 領域の HXT H バンドのライトカーブと、GRS 6.5-11 MeV time profile.

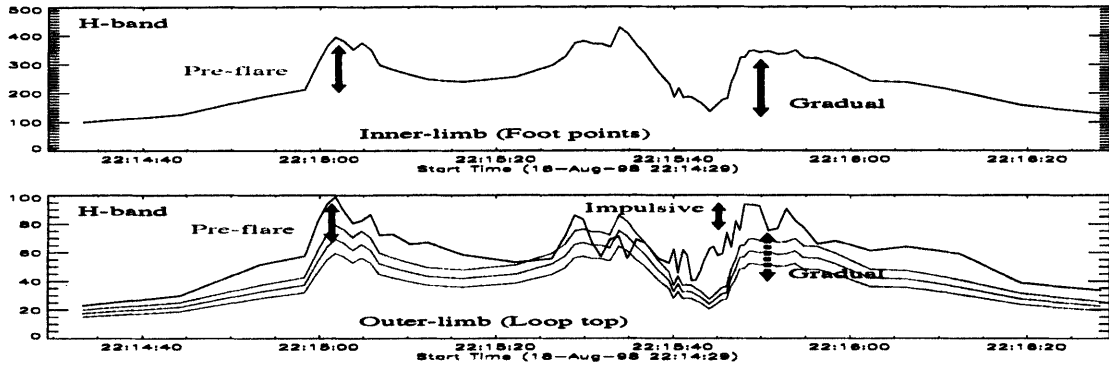


図 3: 図5の2領域の、フットポイント領域（上）とループトップ領域（下）の、HXT Hバンドでの明るさの時間変化。フットポイント領域からの洩れ込む見積もりとして、15, 17.5, 20%の量を示す（青カーブ）。縦軸の単位 cts/sec/SC。

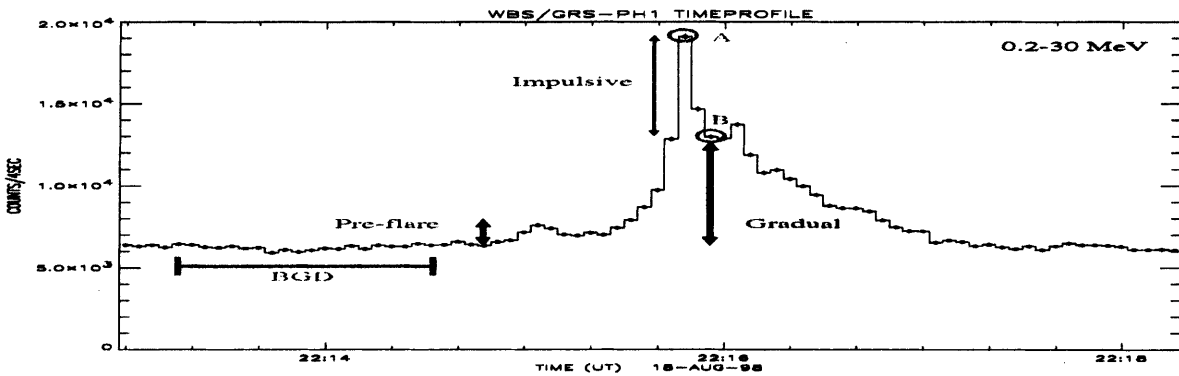


図 4: GRS PH で得られたガンマ線のライトカーブ。A-B が impulsive 成分、B-BGD が gradual 成分を表す。

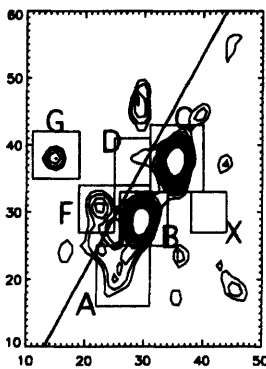


図 5: limb（青直線）を用いて、ループトップ領域（左上）とフットポイント領域（右下）に二分割する様子。

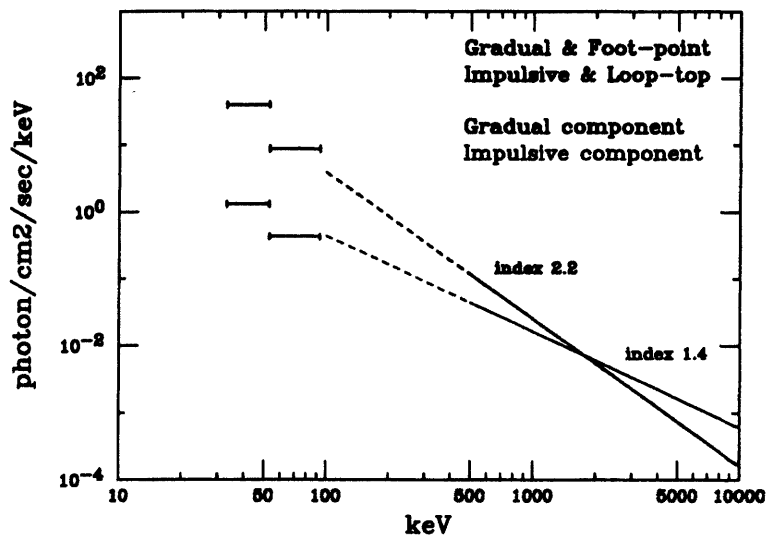


図 6: 硬X線からガンマ線への wide-band スペクトル。