

## 論文内容の要旨

論文題目:       Development of the Balloon-borne Solar  
                          Hard X-ray Spectrometer and  
                          Observation of a Superhot Thermal Flare

                          気球搭載太陽硬X線スペクトル観測装置の開発と  
                          熱的超高温フレアの観測

氏名:   小林 研

太陽フレアの硬X線放射の観測はフレアに伴う粒子加速の解明に不可欠である。硬X線のべき乗(非熱的)スペクトルはフレアにより加速された非熱的電子による制動放射とされており、その他にも 30 MK に及ぶ超高温プラズマ、20 MK に及ぶ軟X線ループなどが観測されている。特に非熱電子は太陽フレア全体とほぼ同等のエネルギーを持つ事が観測されており、フレアの中心的な役割を担うと思われているが、この加速メカニズムは現在未だに解明されていない。これまで「ようこう」硬X線望遠鏡などで空間的構造は詳しく知られているが今までの衛星観測装置はシンチレーターを使用しており、60 keV 付近のエネルギーでは 15keV 程度の分解能が普通である。気球観測でも 1keV 分解能でフレアが一回観測されたのみで、新たな高分解能の硬X線スペクトルは重要な課題である。これまで硬X線での高分解能を達成する唯一の方法はゲルマニウム半導体検出器であったが、液体窒素冷却の必要性などの理由で気球・衛星実験は難しかった。しかし最近実用化した CdTe 半導体検出器は室温動作と高密度という特徴を兼ね揃え、気球や衛星を使った硬X線スペクトル観測には最適な検出器である。本研究ではこの CdTe を使用した新たな気球搭載硬X線スペクトル観測装置の開発と観測結果について報告する。

この装置は 10x10x0.5mm の CdTe 検出器を 16 台搭載している。検出器サイズは分解能との兼ね合いであり、3.0 keV 分解能を達成できるサイズとして選択された。検出器は 200V のバイアス電源による放電を防ぐため気密容器内に取り付けられ、内部は飛行中1気圧を保つ設計となっている。検出器窓には CFRP と Rohacell のサンドイッチ式パネルを使用し、0.1 g/cm<sup>2</sup> の密度で-40℃、相対圧力1気圧まで耐えられることが確認された。容器内には検出器、プリアンプ、バイアス用電池のほか鉛 2mm の後シールドが在り、容器外には鉛 2mm の横シールドが付けられている。検出器窓の前には視野角 10×60 度のコリメーター(タングステン)が取り付けられている。

この検出器は目標の分解能を達成するためには検出器の温度を0℃以下に保つ必要がある。軽量化、簡素化のため冷却装置は使わず、放射冷却のみで達成している。検出器容器の表面がラジエーターとして機能するよう検出器はゴンドラ上部、空に露出した位置に設置されている。検出器の前(太陽側)の大型遮光板により直射日光を遮断し、側面と背面の小型遮光版により地上からの赤外線を防ぐ設計となっている。遮光板にはアルミ蒸着ポリイミドフィルムを使用している。検出器容器表面には銀蒸着テフロンを使用している。これは高い赤外線放射性能と可視光の高反射率を兼ね揃えた素材であり、水平飛行中の冷却を最大限にする一方上昇中の直射日光による加熱も最小限に押さえている。

16 台の検出器の出力はゴンドラ内の回路に送られ、16 チャンネル増幅器を通った後パルス検出/パルス計測装置によって読み取られる。この装置ではイベント単位データとして取得せず、機上でスペクトルを蓄積して送信する構造となっている。これは大フレア時にもデータ量が増えないよう考慮したもので、これによって大容量のバッファを必要とせずリアルタイムでXクラスフレアまで観測可能となる。各チャンネルは独立した分解能7ビット(1 keV/channel)のスペクトルとして取得され、スペクトルは 0.54 秒間隔で読み出されテレメーターで送られる。別に各チャンネルの総カウントレートを記録するカウンターが 0.13 秒間隔で読み出され、デッドタイム補正とライトカーブ記録に使われる。

検出器の試験は Am-241, Cd-109, Co-57 の放射線源を使用し、恒温槽内で行われた。バイアス電圧は 200V が最適と判明、また 0℃ 以下では 16 個中 15 個の検出器で目標 3 keV 分解能(@60 keV)が確認された。量子効率も検出器の物理的サイズから予測された値とほぼ同じ値が確認された。

装置は 2001 年 8 月 29 日に三陸気球観測所から打ち上げに成功した。6:30 に放球され 9:00 に 41km 高度に到達、指向制御が開始された。9:45 に電源系のトラブルで観測が中断され、装置は 11:10 に切り離され日本海で無事回収された。検出器容器の温度は水平飛行中-15℃で安定し、目標、予想を上回る冷却性能を示した。電源トラブルはバッテリーの過

熱によるものと判定され、バッテリー数を増やし1個あたりの電流を下げ、発熱を抑えることで対処された。第二回の飛行は2002年5月24日に行われ、日本時間9時から18時まで 41km での水平飛行を行った。この間検出器は正常に動作し、日本時間 15:41 (2002/5/24 06:41 UT) には M1.1 クラスのフレア観測に成功した。検出器温度は -20度を維持することに成功した。

このフレアは野辺山偏波計 (NORP) が同時観測に成功した。また RHESSI 衛星が最初の数分のみ硬 X 線観測に成功しているほか、SOHO 衛星の極紫外望遠鏡 (EIT) によりポストフレアループが接像されている。RHESSI データの画像合成および EIT 画像により、フレアはディスク上の活動領域 9963 で起きたものと確認された。

我々の観測した X 線スペクトルは 35keV 以上の放射がほとんど見られないソフトなスペクトルであり、カウント数が少ないため熱的放射と非熱的放射の区別はスペクトル解析だけでは難しい。しかし非熱放射と仮定するとこれまで報告されたフレア硬 X 線観測より格段にソフトなスペクトルという結果になり、熱モデルのほうが信憑性は高い。また RHESSI スペクトルは非熱スペクトルとしてフィットできず、熱的放射としてはフィットできる。これらの理由から、硬 X 線放射はほぼ全て熱的放射である可能性が高いと言える。RHESSI と気球データはスペクトル形状 (フィット温度) は非常に良く一致しており、すべてフィットパラメーター  $1\sigma$  以内で合致している。フラックス (emission measure) では RHESSI のほうが数倍から1オーダー多い結果となっている。気球の装置校正およびデータ解析は RHESSI に比べ単純であり、問題のある可能性は低いと思われるが、現在 RHESSI グループと共同で原因を調べている。この超高温成分は42MK以上になることが両装置によって確認されたが、これは過去に例の無い高温熱現象である。唯一「ようこう」衛星硬 X 線望遠鏡 (HXT) でループ上空に 100MK の熱成分が見られたという報告があるが、これは HXT の4エネルギーバンドを比較して推定した結果である。本研究で開発した装置は熱的スペクトルと非熱スペクトルが明らかに判別でき、 $>40\text{MK}$  熱プラズマと断定できる観測例としては以前に例の無いものである。

NORP 電波データでは時間変化の違う2個の成分が確認された。9.4 GHz, 17GHz では GOES 軟 X 線ライトカーブとよく似た成分が見られ、3.8 GHz では更に時間変化が早く、フレア前半でピークに達する成分が見られる。後者は硬 X 線ライトカーブとほぼ完全に一致し、超高温成分による熱的放射 (ジャイロシンクロトロン放射) と考えられる。この可能性を検証するため、硬 X 線と GOES 軟 X 線データから電波放射を再現することを試みた。その結果、軟 X 線成分 (高温熱的成分) のサイズ 20Mm を仮定すると 9.4GHz, 17GHz の放射が制動放射として説明できることが判明、また超高温熱的成分 (硬 X 線成分) のサイズ 5Mm を仮定、磁場 275G を仮定すると 3.8 GHz のライトカーブを再現できることが判明した。これにより観測された全ての放射は熱的放射として説明できることになり、このフレアについては非熱的電子の存在を示

す観測的証拠は一切無いと結論できる。

観測数値以下に非熱成分の在る可能性を探るため、硬X線スペクトルから非熱的電子分布の上限を計算し、熱的成分のエネルギーとの比較を行った。上記のサイズを仮定すると非熱電子のエネルギーは熱成分の半分以下という結果となり、このフレアに関しては非熱電子が過熱の中心的な役割を持っていないことが示された。通常フレアではエネルギー開放の場所から非熱的電子によりエネルギーが運ばれ、彩層蒸発を引き起こすというモデルが一般的だが、本研究で観測したフレアでは加速電子以外のメカニズムによって彩層蒸発が起きていることが確認された。