国際宇宙ステーションに
搭載されているＳＥＤＡ－ＦＩＢ
データの解析

宇宙粒子研究室

１０７６１０７５　　平井　彰

目次

１　はじめに

２　目的
２．１　実験の目的
２．２　ＳＥＤＡ‐ＡＰ装置の観測目的
２．３　中性子計測の目的

３　観測場所について
３．１　国際宇宙ステーション（ＩＳＳ）
３．２　ＩＳＳの周回軌道

４　観測装置について
４．１．１　ＳＥＤＡ‐ＡＰ装置について
４．１．２　中性子モニタ以外の各装置の説明
４．２　中性子モニタ（ＮＥＭ）の各部位と機能
４．２．１　電気回路部（ＮＥＭ‐Ｅ）
４．２．２　検出部（ＮＥＭ‐Ｓ）
４．２．２．１　電源部
４．２．２．２　ボナボール型検出器（ＢＢＤ）
４．２．２．３　シンチレーションファイバー型検出器（ＦＩＢ）

５　観測環境について
５．１　宇宙放射線の種類
５．１．１　バンアレン帯
５．１．２　銀河宇宙線
５．１．３　太陽宇宙線
５．１．４　二次宇宙線

６　粒子観測の原理について
６．１　粒子観測の原理
６．２　中性子の観測原理
６．３　シンチレーションファイバー型検出器における中性子の観測原理

７　解析手順について
７．１　ＡＤＣ分布の解析手順
７．２　中性子の各到来方向に対するエネルギー分布の解析手順

８　解析結果
８．１　ＡＤＣ分布より得られた結果
８．２　Ｂａｃｋｇｒｏｕｎｄ中性子の各到来方向に対するエネルギー分布
８．３　太陽中性子の観測結果

９　考察

１０　参考文献
１０．１　書物
１０．２　電子情報

１１　謝辞

１　はじめに

太陽フレアが起こった際、磁場の再結合によってエネルギーを得た粒子は太陽大気と相互作用することにより二次粒子を放出する。電波やＸ線などの電磁波は加速された電子と太陽磁場との相互作用によるシンクトロン放射によって発生していることが分かっている。また、高エネルギーＸ線、核γ線、太陽中性子は加速イオンと太陽大気との相互作用によって発生する。こうして発生した電磁波や粒子は地球近傍に達し衛星に搭載されたＸ線、γ線、粒子線検出器によって観測される。

これらの現象を引き起こしているイオンなどの粒子がどのような機構によって加速されているのかは完全には分かっていない。イオンの加速機構を理解するためには加速イオンそのものを観測することが望ましいのだが、イオンは電荷をもっているために太陽磁場や惑星空間磁場との相互作用によって進路を曲げられるので観測するときにはイオンの発生時間やエネルギーなどの情報は失われている。一方、イオン加速の結果作られる核γ線や太陽中性子は電荷をもたないため進路を曲げられることなくまっすぐに到達する。よってこれらの核γ線や太陽中性子を観測することにより、イオンの加速機構を解明できると考えられている。しかし、中性子は質量を有しているので光速度では走れずエネルギーにより到来時間に差が出る。すなわち、エネルギーが測れる中性子検出器を使用して観測する必要がある。

そこで、アメリカの気象衛星ＧＯＥＳによる以下のＸ線の観測結果でＭクラスに強度のピークを持ち中規模程度の太陽フレアが起こったと考えられる２０１０年２月６日から２０１０年２月８日までの３日間の中で一番強度の強いＸ線（Ｍ６．４）が観測された世界標準時で２０１０年２月７日２時３４分頃にファイバー型シンチレータ（ＦＩＢ）で観測された中性子の到来方向やエネルギー分布などを調べ太陽表面からの中性子の有無を観測したのでここに報告する。

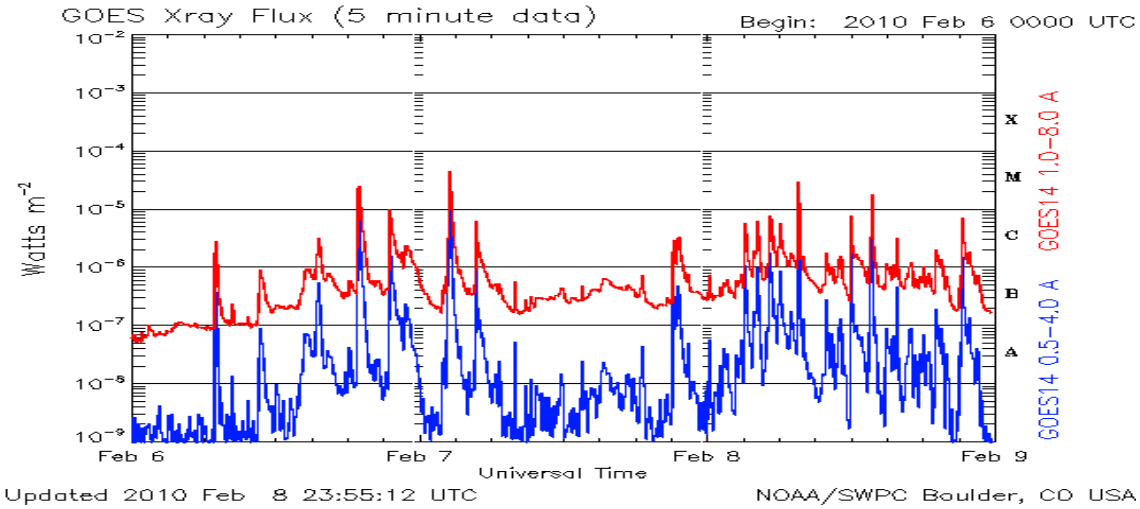

図１．ＧＯＥＳによる２０１０年２月６～８日のＸ線観測結果

２　目的

２．１　実験の目的

国際宇宙ステーション（ＩＳＳ）に搭載されている中性子モニタ（Ｎｅｕｔｒｏｎ　ｍｏｎｉｔｏｒ：NEM）から得られたデータのうちシンチレーションファイバー型検出器（ＦＩＢ）で観測されたデータを解析して太陽からの中性子を探した。まず、２つの２５６チャンネルを有するマルチアノード光電子増倍管のＡＤＣ分布を求め、中性子モニタが正常に稼働しているかを確認した。次に２０１０年２月６～８日のMクラスのフレアに伴う中性子到来の有無を調べた。そしてＢａｃｋｇｒｏｕｎｄ中性子のエネルギー分布を求めた。

２．２　ＳＥＤＡ－ＡＰ装置の観測目的

ＳＥＤＡ－ＡＰ装置における観測目的は、ＩＳＳの周回軌道における中性子や重イオン、プラズマ、高エネルギー軽粒子、原子状酸素、スペースデブリなどの宇宙環境の計測を行うとともに電子部品や材料を宇宙空間に直接さらすことにより宇宙環境の影響を調べることである。

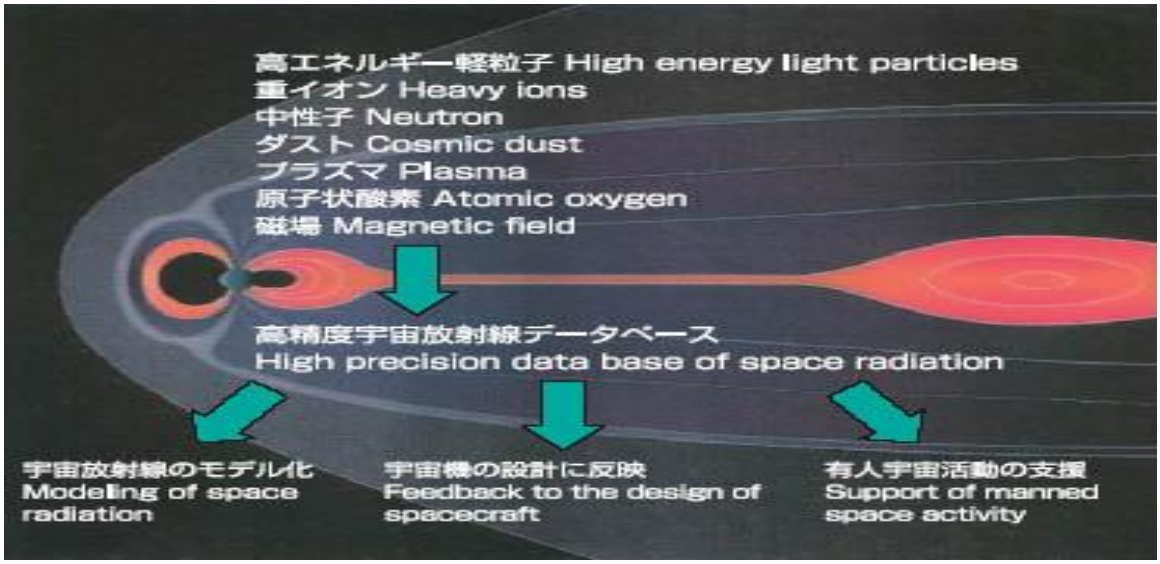

図２．観測粒子の使用目的

２．３　中性子計測の目的

中性子をＩＳＳで観測する目的は、ＩＳＳにおける中性子放射環境の計測や被爆線量の

導出、太陽フレアに伴う大量放射線を事前に予測することによる宇宙の天気予報、太陽フレアに伴う太陽からの中性子の検出と粒子加速機構を実証的に解明することである。

３　観測場所について

３．１　国際宇宙ステーション（ＩＳＳ）

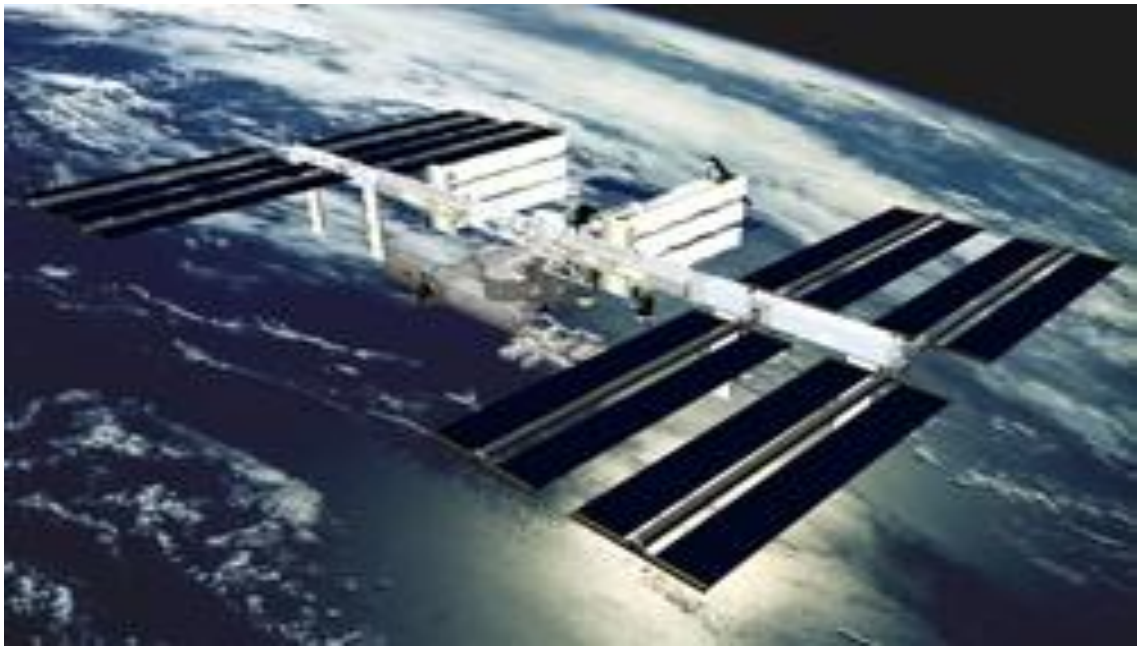

図３．国際宇宙ステーション（ＩＳＳ）

国際宇宙ステーション（Ｉｎｔｅｒｎａｔｉｏｎａｌ　Ｓｐａｃｅ　Ｓｔａｔｉｏｎ：ＩＳＳ）は、地上から約４００ｋｍ上空に建設された巨大な有人実験施設であり、一周約９０分というスピードで地球の周りを回りながら、宇宙という特殊な環境を利用した実験や研究、地球や天体の観測などが長期にわたり行われている。また、人類にとって「初めての国境がない場所」とされ、アメリカ合衆国、日本、カナダ、欧州各国（イギリス、フランス、ドイツ、イタリア、スイス、スペイン、オランダ、ベルギー、デンマーク、ノルウェー、スウェーデン）、ロシアの計１５カ国の人々によって計画的に利用されている。さらに、一つのものを作り上げるために、これほど多くの国々の最新の技術を集結するというプロジェクトは今までには全くなかったことなのでＩＳＳは世界の宇宙開発を大きく前進させるための重要な施設であるとともに、国際協力と平和のシンボルとされている。

様々な機能を持つＩＳＳは構成パーツ（部分）を４０数回に分けてロケットやスペー

スシャトルによって打ち上げられ、宇宙空間で段階的にロボットアームの操作や飛行士の船外活動により組み立てられている。最初の構成要素「ザーリャ」（基本機能モジュール）は１９９８年１１月２０日にカザフタン共和国のバイコヌール宇宙基地から打ち上げられた。運用は２０１６年までと予定されているがＪＡＸＡなどのＩＳＳを利用している国々は２０１６年以降も延長して運用しようと計画している。

３．２　ＩＳＳの周回軌道

ＩＳＳの周回軌道は、地球周回軌道のうち低軌道（最も地表に近い軌道）を通っている。その軌道は、高度３５０ｋｍであり、地球大気の電離圏（８０ｋｍ～５００ｋｍ）に位置している。つまり、検出される粒子の中には電離層の中にあるイオンの可能性も含まれている。しかし、そこで検出される電子や陽子のエネルギーは太陽磁場や地球磁場の影響を受けた核子やイオンのエネルギーよりも低いと考えられる。

一方で外気層に近いため高エネルギーを持った銀河宇宙線がＩＳＳを構成する物質や地球の大気に衝突することにより生成したと考えられる二次宇宙線やアルベド中性子も観測されている可能性がある。そのため、細心の注意を払ってデータの解析を行わなくてはいけない領域である。

４　観測装置について

４．１．１　ＳＥＤＡ－ＡＰ装置について

宇宙環境計測ミッション装置であるＳＥＤＡ‐ＡＰ（Ｓｐａｃｅ　Ｅｎｖｉｒｏｎｍｅｎｔ　Ｄａｔａ　Ａｃｑｕｉｓｉｔｉｏｎ　ｅｑｕｉｐｍｅｎｔ　－　Ａｔｔａｃｈｅｄ　Ｐａｙｌｏａｄ）装置は１９９１年にＩＳＳの放射能レベルを測定するという目的でまず提案されたのである。この装置は、日本の曝露部であるＪＥＭ‐ＩＳＳに搭載される計測装置の一つとして設計されたのである。この曝露部の装置に搭載されているのは中性子モニタ（ＮＥＭ）だけではなく重イオン計測装置（Ｈｅａｖｙ　ｉｏｎ　Ｔｅｌｅｓｃｏｐｅ：ＨＩＴ）や高エネルギー軽粒子モニタ（Ｓｔａｎｄａｒｄ　Ｄｏｓｅ　Ｍｏｎｉｔｏｒ：ＳＤＯＭ），プラズマ計測装置（Ｐｌａｓｍａ　Ｍｏｎｉｔｏｒ：ＰＬＡＭ），原子状酸素モニタ（Ａｔｏｍｉｃ　Ｏｘｙｇｅｎ　Ｍｏｎｉｔｏｒ：ＡＯＭ）、電子部品評価装置（Ｅｌｅｃｔｒｏｎｉｃ　Ｄｅｖｉｃｅ　Ｅｖａｌｕａｔｉｏｎ　Ｅｑｕｉｐｍｅｎｔ：ＥＤＥＥ）や材料曝露実験装置（Ｓｐａｃｅ　Ｅｎｖｉｒｏｎｍｅｎｔ　Ｅｘｐｏｓｕｒｅ　Ｄｅｖｉｃｅ：ＳＥＥＤ）、微小粒子捕獲実験装置（Ｍｉｃｒｏ－Ｐａｒｔｉｃｌｅｓ

Ｃａｐｔｕｒｅｒ：ＭＰＡＣ）の８つの計測装置が搭載されている。ＭＰＡＣやＳＥＥＤで宇宙空間に曝露された材料などは将来、宇宙飛行士によって地上へ回収されるのである。（実際にこの部品は回収され現在日本で解析中である。）

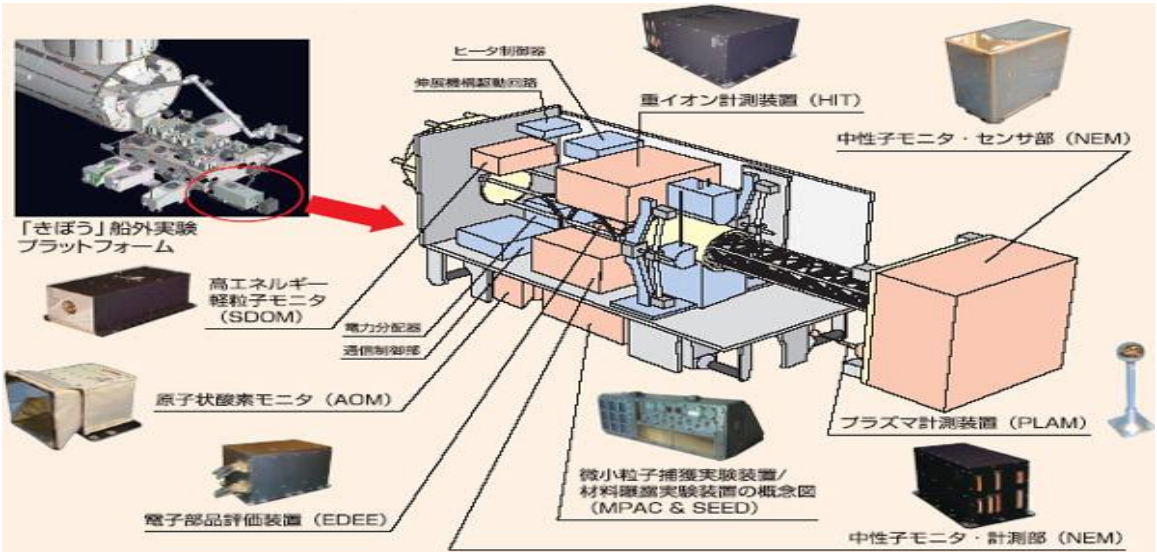

図４．ＳＥＤＡ-ＡＰ装置

４．１．２　中性子モニタ以外の各装置の説明

（1） 重イオン計測装置（ＨＩＴ）

重イオンであるリチウム、炭素、酸素、シリコン、鉄の粒子別エネルギー分布をシリコン半導体検出器で計測する。２枚の位置検出器、及び１６枚の半導体検出器に入射した荷電粒子は、入射粒子のエネルギー損失に比例した信号を生成する。ＨＩＴはこれを利用して、各々の検出器での損失エネルギー、及び検出器内で停止した粒子については全エネルギーを計測する。ΔＥ×Ｅ法により各種重イオンの粒子分別を行う。

（2）高エネルギー軽粒子モニタ（ＳＤＯＭ）

宇宙機器のための宇宙放射線モデルの作成・更新・有人被爆管理支援及び宇宙天気予報の基礎データとして電子、陽子、α線などの高エネルギー軽粒子の粒子別のエネルギー分布を、３枚の半導体検出器とシンチレータを組み合わせて計測する。入射粒子のエネルギーは３枚の半導体検出器及びこれを突き抜けたものは後ろにあるプラスチックシンチレータにより計測される。粒子弁別は、各検出器の波高の組み合わせによるΔＥ×Ｅ法により行う。

（3）プラズマ計測装置（ＰＬＡＭ）

宇宙空間プラズマの密度と電子温度を、ラングミュアプローブ方式で計測する。ＰＬ

ＡＭセンサ部のプローブに金属球を用い、プローブに可変電位を印加し得られる電流 - 電圧特性を解析することにより電子密度や電子温度を計測する。またフローティング・ブロー部によりプラズマ電位を計測する。サッカー場のサイズの宇宙ステーションは、太陽光の日照中や日陰中にプラズマの中を飛翔する中で様々な電位に帯電するし、ＩＳＳの場所によって異なる。宇宙ステーションの太陽パドルは１６０Ｖの電圧を発生し、マイナス側を接地しているので宇宙ステーションの本体は、日照中はおよそ－１６０Ｖから日陰中は＋２０Ｖまで地球周回ごとに変動するが、宇宙飛行士の船外活動中と、ＨＴＶなどが宇宙ステーションにドッキング中のみは－４０Ｖから＋４０Ｖの範囲に帯電電位を人為的にコントロールされている。これがうまく作動しないと、放電が起きて、宇宙服のピンホール損傷、ドッキング用の電気コネクタの損傷を招くのでプラズマや電位計測は非常に重要である。

（４）原子状酸素モニタ（ＡＯＭ）

原子状酸素は、非常に活性度が高いために熱制御材や塗料を劣化させ熱制御に影響を与えるため、宇宙環境モデルの基礎として計測を行う。カーボンフィルムが原子状酸素によるエロージョンによりその厚さが薄くなる。このカーボンフィルムの厚さの変化を抵抗値変化とすること（アクチノメータ方式）を用いて計測する。

（５）電子部品評価装置（ＥＤＥＥ）

「きぼう」で使用される電子部品の中でシステム上重要であると考えられるもので且つ放電線の感受線がある電子部品に対して宇宙放射線によるシングルイベントや劣化を計測する。この計測結果は、ＪＥＭシステムに異常があった場合の原因究明に使用される。それとともに、地上評価実験結果より予測される発生確率との比較を行い、放射特性の予報方法の向上に役立てる。シングルイベントの発生は、記憶データの一時的な反復及び電源電流の急増をモニタすることにより検出する。

（６）材料曝露実験装置（ＳＥＥＤ）

宇宙用材料の対宇宙環境評価の一環として、実宇宙環境曝露による特性変化を調査し、耐宇宙環境性評価技術の向上に用いるとともに、実宇宙環境曝露データの蓄積、人工衛星のプロジェクトへの反映を行う。熱制御材料や個体潤滑剤など宇宙用の材料を、宇宙環境に直接さらした後、地上へ回収し宇宙放射線や原子状酸素など宇宙環境の影響による宇宙用材料の劣化状況を調べる。

（７）微小粒子捕獲実験装置（ＭＰＡＣ）

ＪＥＭに飛来する、ミクロンサイズからミリサイズのメテオロイドおよびスペースデブリのサイズ、材質、飛来速度、飛来方向、衝突頻度などの分布を調査し宇宙環境モデ

ルの最新化に利用されるとともに、有人宇宙システムや人工衛星に使用する部品、材質の対ダスト性評価技術などの向上に利用される。ＩＳＳの軌道に存在する微小な粒子を、シリカエアロジェル及びポリイミドフォームによる捕獲材料を用いて捕獲する。宇宙環境にさらされた後、宇宙飛行士が詮議活動により実験サンプル部分を取り外して地上へ回収し、捕獲粒子の速度起源などを解析する。また、金属性のプレートを用いて衝突回数を解析する。

４．２中性子モニタ（ＮＥＭ）の各部位と機能

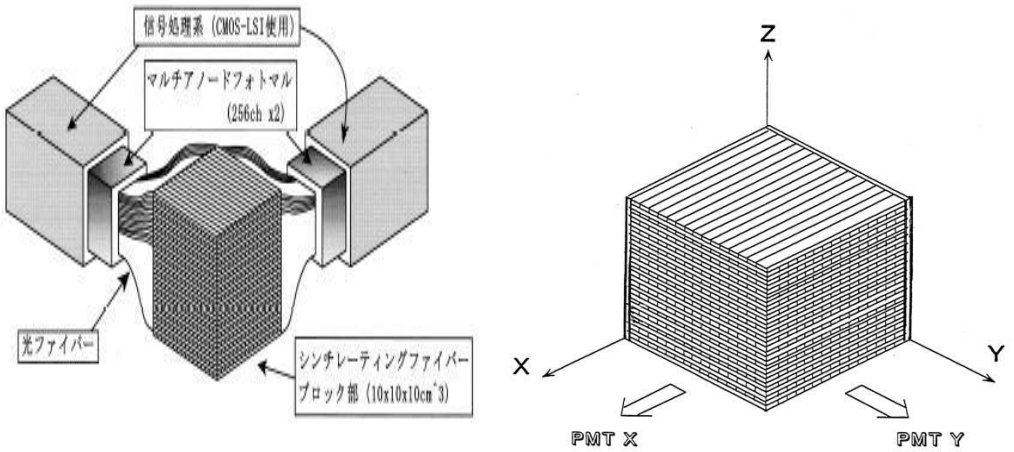

図５．シンチレーションファイバー型検出器

中性子モニタ（ＮＥＭ）を構成しているユニットは、検出部（ＮＥＭ－Ｓ）と電気回路部（ＮＥＭ－Ｅ）の二つのユニットである。また、シンチレーションファイバー型検出器は縦、横、長さが３ｍｍ×６ｍｍ×９６ｍｍのシンチレータで構成されている。検出部は二次宇宙線の影響を避けるためにＳＥＤＡ‐ＡＰから１ｍ進展されている。それぞれのシンチレータは積層されており、シンチレータ内で発光した光子は２５６（１６×１６）チャンネルのマルチアノードホトマル（浜松　Ｈ４１４０－２０）の表面に光ファイバーを通って達する。マルチアノードホトマルによってそれぞれの位置からの反跳陽子の飛程距離（ｒａｎｇｅ）を測り、飛程距離測定法によりエネルギーを求める。それは、この中性子モニタが反跳陽子の飛程距離により陽子の走行距離を明らかにすることができるからである。陽子と中性子を区別することは、ＦＩＢのセンサの６面を覆っている６つのアンチコインシデンスにより効率的に行われている。荷電粒子に対するアンチコインシデンスの効果は、理研の加速器をもちいて事前に１６０ＭｅＶのエネルギーをもつ毎秒１００万個の荷電粒子のビームを打ち上げられた装置に照射して計測されている。アルミニウムターゲットをこの装置の前に置かないときは全くセンサから信号がなかったのに対してターゲットを置いた時に直ちに中性子の信号を問題なく計測できていたということが確認されて

いる。

中性子の飛程距離を測定するために使われているセンサは、一辺が１０ｃｍの立方体である。この装置の最大計測運動量は約１２０ＭｅＶ／ｃである。このセンサは、二つのマルチアノードホトマルによって二方向から計測されていて、飛程の到来方向を明らかにできるかもしれないのである。中性子の到来方向を確定するためには、陽子は最低でも３本のそれぞれ３ｍｍの厚さのシンチレータの層を通過する必要がある。それゆえに、測定できる中性子の最小計測運動量は約３０ＭｅＶ／ｃである。

ここで、私たちは解析においてこのセンサによる中性子の観測効率について注意しなければいけないのである。計測装置は１辺が１０ｃｍなので、１２０ＭｅＶよりも高いエネルギーを持っている中性子が装置の頂上のほうで崩壊したとき、飛程は捉える事が出来かもしれないが、ｎｐ荷電交換反応が装置の低い部分で起こった時、反跳陽子はアンチカウウンタの一つを貫通しながら外側へ逃げていくのである。それゆえに、アンチカウウンタが働いて中性子のイベントが記録されないのである。

上述のような装置であるＮＥＭの電気回路部や検出部の機能について以下に述べる。

４．２．１　電気回路部（ＮＥＭ－Ｅ）

電力分配機（ＰＤＡＰ）とインタフェースし、ＮＥＭ各部へ電力を供給する機能を有する電源部、通信制御部（ＡＰＲＴ）からのコマンドを受信しＮＥＭ各部へ制御信号を配信するほか、ＮＥＭ－Ｓからの計測データを編集しＡＰＲＴへ出力する機能を有するＡＰＲＴインタフェース、ＦＩＢ部の計測データを一時蓄積、出力する機能を有するＦＩＢメモリＡ／Ｂ部、ＮＥＭ－Ｓへの電源供給および制御信号、時刻信号を送信するほかＮＥＭ－Ｓからのデータを受信し、ＡＰＲＴインタフェース部へ出力する機能を有するＮＥＭインタフェース部から構成されている。

４．２．２　検出部（ＮＥＭ－Ｓ）

４．２．２．１　電源部

ＮＥＭ－Ｅとのインタフェースを行い、ＮＥＭ－Ｓ各部へ電力を供給する機能を有する。電源部はＦＩＢ　ＰＯＷＥＲ　ＵＮＩＴ部によって構成される。

４．２．２．２　ボナボール型検出器（ＢＢＤ）

軌道上の低エネルギー中性子（１５ｋｅＶ～１０ＭｅＶ）のエネルギースペクトルを

計測、データ編集を行いＮＥＭ－Ｅへ出力する機能を有する。また、ＢＢＤはＥインタフェース部、ＢＢＤ回路部、ＢＢＤ検出部及びバイアス回路部により構成される。本装置は代表的な中性子の検出器で中央のＨｅ３比例係数管を囲むように減速材のパラフィンで覆われている。

４．２．２．３　シンチレーションファイバー型検出器（ＦＩＢ）

軌道上の高エネルギー中性子（３０ＭｅＶ～１００ＭｅＶ）のエネルギースペクトルを計測、データ転送を行い、ＮＥＭ－Ｅへ出力する機能を有する。また、ＦＩＢはＮＥＭ－Ｅインタフェース部とインタフェースする部分を有し、ＦＩＢの制御信号、時刻信号を受信し、ＦＩＢ回路部へ配信する回路を有している。また、ＢＢＤの各信号およびＦＩＢ計測データをＮＥＭ－Ｅへ送信する機能を有するＥインタフェース部、ＦＩＢ検出部において電気信号に変換された高エネルギー中性子測定信号をＡ／Ｄ変換器によりデジタル化し、時刻データを加えて編集処理を行いＦＩＢ　Ｅインタフェースへ出力する機能を有する。ＦＩＢは５１２本の積層シンチレータ及び２５６チャンネルのマルチアノードホトマルを主構成とするセンサにより高エネルギー中性子計測データを電気信号に変換しＦＩＢ回路部へ出力する機能を有する。ＦＩＢは、マルチアノードホトマル及びアンチシンチレータ用ホトマルにバイアス電圧を供給する機能を有する。

５．観測環境について

５．１　宇宙放射線の種類

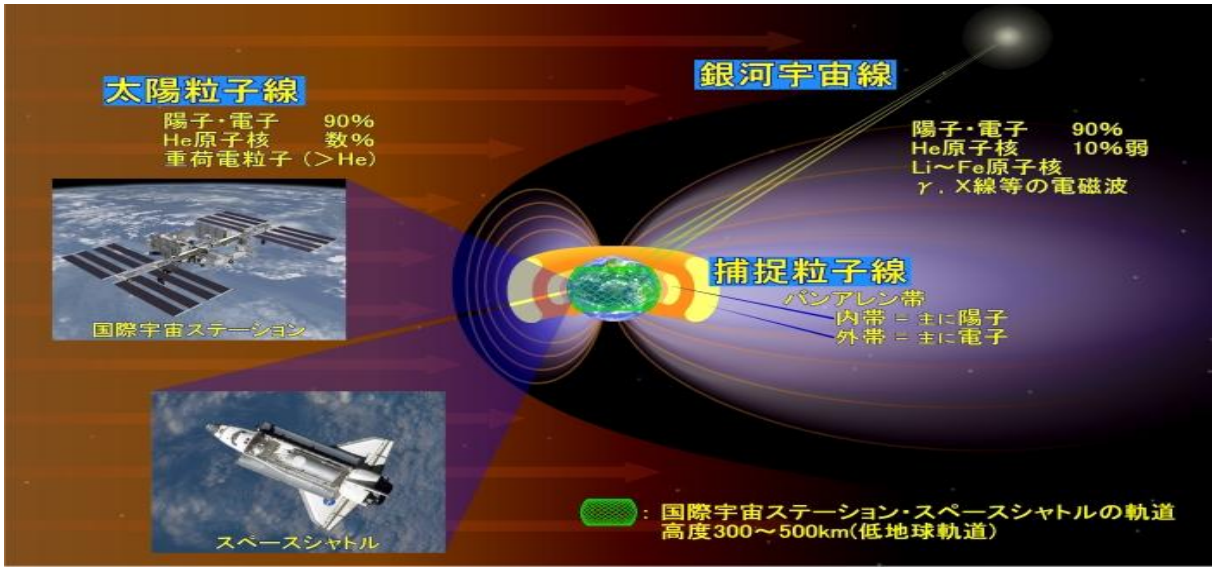

図６．宇宙放射線の種類

５．１．１　バンアレン帯

バンアレン帯とは、地球磁場に細くされた高エネルギー荷電粒子が定常的に存在する領域で、内帯と外帯の二重構造の帯状構造で構成されている。内帯には５ＭｅＶ以下の電子と４００ＭｅＶ以下の陽子があり、外帯には存在しない高エネルギーの陽子があることから内帯を陽子帯と呼ぶことがある。放射線内帯の粒子は磁気圏深部の強い磁場に捕らえられて放射線帯に留まっている。ある程度以上のエネルギーを持った粒子は、磁場によって曲げられる曲率が小さいため、磁気圏外に飛び出してしまって、放射線帯に留まっていることはできない。これには次のようなやや複雑な過程が関与していると考えられている。すなわち極めてエネルギーの高い銀河宇宙線が地球大気に飛び込み大気原子との相互作用によって２次中性子を発生させる。これをアルベド中性子という。その中性子が崩壊して陽子と電子になり地磁気に捕捉されてバンアレン帯（ＣＯＳＲＡＤ）を形成すると考えられている。

ブラジル上空を見ると放射線帯が局所的に低空まで下降した領域がある。これは、南大西洋異常（SAA）と呼ばれ、地磁気双極子が約４５０ｋｍ日本に近づく、つまりブラジルから遠ざかる方向に偏心していると考えられている。ＳＡＡは地磁気の永年変化で経度０．２度／年（平均値）で西に移動し約２０００年で地球を一周する。したがって、ＩＳＳは少なくともＳＡＡ通過中には放射線帯粒子に対する防護対策をとる必要がある。しかし、ＳＥＤＡはＳＡＡにおける放射線強度を測定するのも目的のひとつなので電源はＯＦＦにしない。通常の衛星はＳＡＡ通過時には電源をＯＦＦにする。

５．１．２　銀河宇宙線

超新星爆発の残骸（Ｓｕｐｅｒ　Ｎｏｖａ－Ｒｅｍｎａｎｔｓ）などによって加速され太陽系に飛び込んできた放射線は銀河宇宙線と呼ばれている。銀河宇宙線はプラスの電荷を持ち、銀河磁場で加速されて高速に近い速度を持っている。ほかの成因による宇宙線（たとえば太陽宇宙線）に比べてエネルギーは大きく、その範囲は約10^{8}～10^{20}ｅＶである。元素組成は８３％が陽子、１３％がα線、３％が電子、残りの１％が重イオンである。銀河宇宙線は太陽活動の１１年周期変動による地場変動の影響を受け、極大期には太陽磁場擾乱などによる遮蔽効果のために、地球周辺に侵入する宇宙線の量が最小になる。極小期には逆に宇宙線量が最大になる。銀河宇宙線はＩＣなどのシングルイベントの原因となると同時に人工衛星壁面などの原子と反応して中性子を含む大量の二次宇宙線を生成する可能性がある。

５．１．３　太陽宇宙線

太陽宇宙線は太陽フレアやＣＭＥの発生に伴って突発的に飛来する放射線である。組成やエネルギースペクトルは太陽フレアごとに異なるが平均構成は銀河宇宙線とほぼ同じである。太陽フレアは太陽活動の１１年周期のうち極大期の７年間に多く、特に大型のフレアは極大期のピークおよびピークから３～４年後までの黒点減少期に多く発生する。フレア発生時には、太陽フレアの宇宙線が増加し通常の十数倍から数十万倍程度の線量を被爆する。太陽宇宙線の大部分を占める成分である陽子の放射線荷重係数は電子の約５倍である。したがって、太陽宇宙線による放射線被爆は人体に大きな影響を与える可能性がある。

５．１．４　二次宇宙線

前述、１から３の宇宙線を一次宇宙線と呼ぶのに対し、一次宇宙線が宇宙船の船壁や大気原子の原子核と相互作用して、新たに生成する中性子ならびに荷電粒子を二次宇宙線と言う。中性子は、電気的に中性であるために人体の奥深くまで侵入し生物学的影響度を表す放射線荷重係数が電子の２０倍と大きい。そのため二次中性子による被爆は宇宙飛行士の全被爆量の５～３０％を占める。なお、ＩＳＳの高度では、宇宙船内部で発生する二次宇宙線の総量は大気による二次宇宙線の総量よりも約１桁大きい。

６　粒子観測の原理について

６．１　粒子観測の原理

観測しようとしている粒子は素粒子であり直接目で見ることができないので、粒子と物質の相互作用を通じて電気信号を発生させ、その信号の大きさや発生頻度、発生場所を記録して粒子の物理量を導き出す。荷電粒子は物質中を通過するとき、経路上に少しずつエネルギーを与えながら進んでいく。このとき、電離損失$-\frac{de}{dx}$に比例した量の電気信号や蛍光発光を起こす物体を良い検出器として使うことができる。蛍光発光を起こすシンチレータ、電離したガス中の電子を増幅するガス検出器、電子‐正孔対を電気信号として読みだす半導体検出器などが用いられる。発光型の検出器では、光電子増倍管を用いられて光が電気信号に変換される。十分に厚い装置を用意すると、粒子は装置の中で全エネルギーを失い止まってしまう。このとき、装置の信号の大きさを測定することで、粒子が持っていた全エネルギーを知ることができる。

６．２　中性子の観測原理

中性子は荷電を持たないため測定は難しい。しかし物質中においてエネルギーを失わずに通過していくが、確率的に原子核と衝突しその中の粒子をはじき出す。このとき、荷電粒子がはじき出されるならば上記の粒子検出原理で測定可能である。原子核反応を起こすまでの平均的な距離は分かっているので、中性子を効率的に検出するためには装置をある程度の厚さにしておく必要がある。また、中性子は原子核反応を起こすまでは痕跡を残さないため、装置全体を荷電粒子検出器でつつんでおき、ここに信号がないことを確認することで選択的に中性粒子を選び出すことができる。この方法は反同時計測法（アンチコインシデンス）と呼ばれている。中性子が何度も原子核反応をおこすだけの物質を用意しておくと、最終的に熱中性子と呼ばれる非常に低いエネルギーの中性子が作られる。この中性子がホウ素原子核に吸収される反応

$$B + n = Li + \alpha$$

にともなうα粒子を観測することで高い効率で中性子を検出することができる。これが中性子モニタと呼ばれる装置で用いられる原理である。ただしこの場合は、中性子のエネルギーや運動方向を測ることはできない。ＳＥＤＡの場合はBF_3ではなくＨｅ３が使われているが、原理はほぼ同じである。

６．３　シンチレーションファイバー型検出器における中性子の観測原理

ファイバー型シンチレータに入射した中性子自身はシンチレーション光を放出しないのでアンチカウンタにより検出されることなくＳＣＩＦＩブロック部に入射する。しかし、中性子はＳＣＩＦＩ中の水素原子核と弾性散乱または炭素原子核と非弾性散乱を起こすことにより荷電交換反応で反跳陽子を叩き出す。この反跳陽子の飛跡をマルチアノードホトマルで検出し、得られた飛跡の長さから入射中性子のエネルギーを導出する。つまり、ＳＣＩＦＩブロック部はコンバータかつセンタとしての役割を果たしている。中性子が水素原子核と弾性散乱あるいはｎｐ荷電交換反応を起こした場合には反跳陽子のエネルギーは散乱角から一義的に決まるが、反跳陽子は中性子が炭素原子核と非弾性散乱を起こすことによっても生成されるためこの場合は入射中性子のエネルギーを一義的に決める事は困難で最低エネルギーのみ決めることができる。

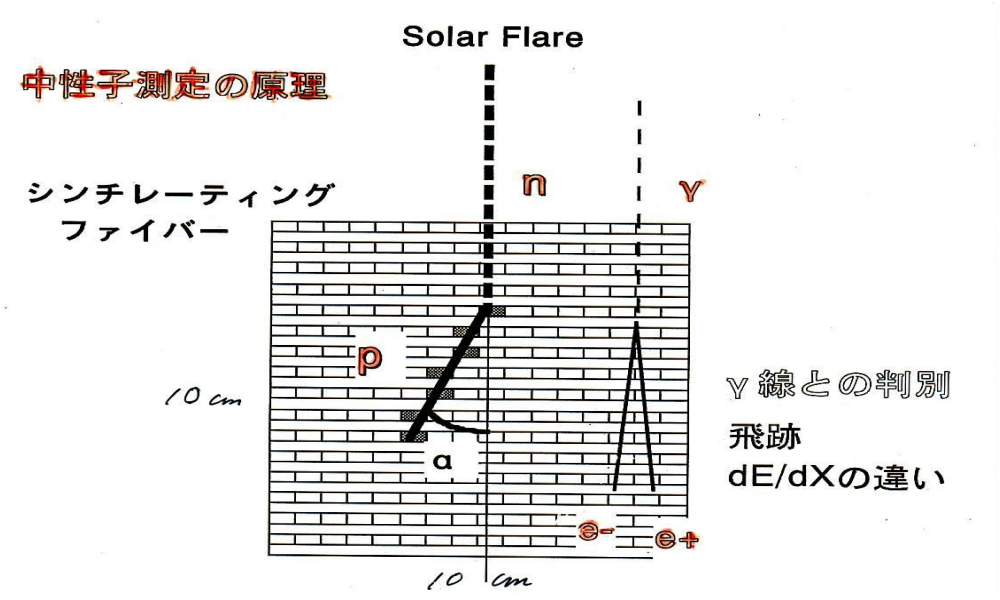

図７．中性子測定の原理

７　解析手順について

７．１　ＡＤＣ分布の解析手順

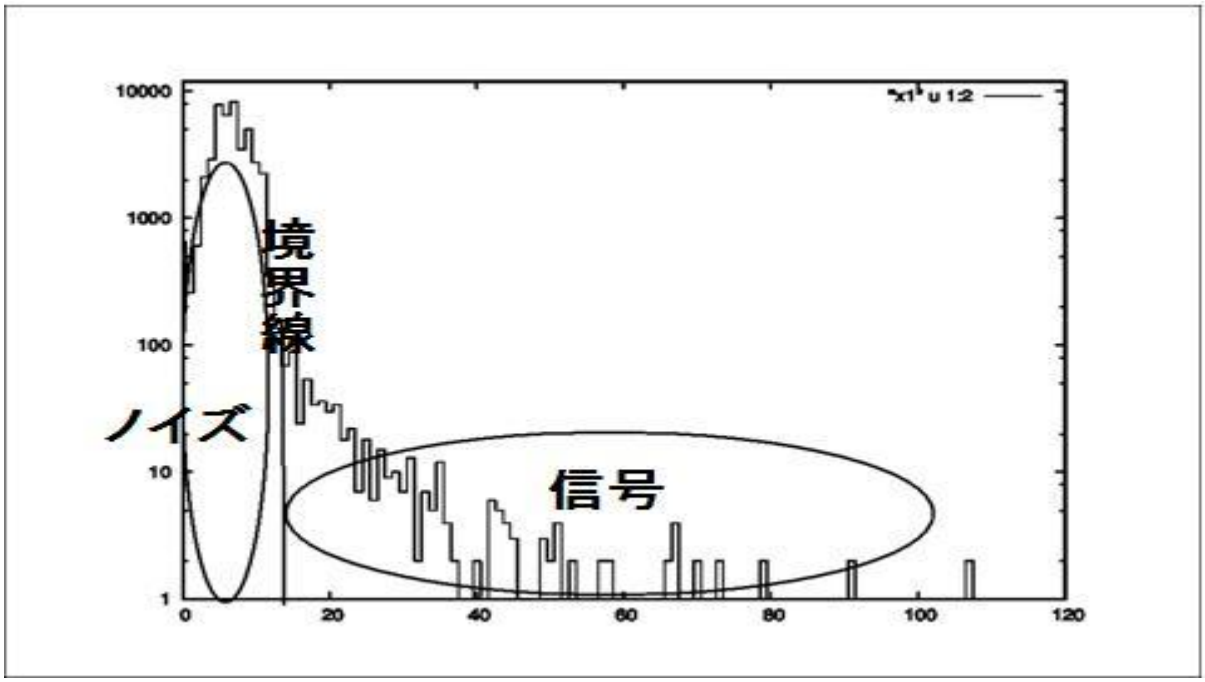

図８．ＡＤＣ分布の例

ＦＩＢ検出装置内に入射する粒子のエネルギーは装置内で吸収されるエネルギーに相当すると考えられる。これより、吸収されたエネルギーは装置内でアナログデジタルコンバータ値（ＡＤＣ値）として変換されるが装置内ではほかの信号も変換されている。そこでほか粒子などの信号による影響を取り除き中性子によって散乱した陽子の飛跡をはっきりとさせるため、そして、打ち上げ前のノイズレベルと比較しどのくらいの変化があるかをみるために、５１２本のシンチレータの１つ１つのチャンネルで観測されたＡＤＣ値の分布を調べる。

その際、各５１２本のシンチレータのチャンネルで観測された結果により得られた上図のような分布の表を目視することにより信号とホトマルの熱雑音またはＡＤＣの電気ノイズと考えられる雑音の境界線であるＡＤＣの値を定めて、それぞれの表から境界線を引いた残りの信号部分（境界線より右側）の平均値を算出して信号のピークとみなす。また、ノイズの部分（境界線より左側）の平均値を算出する。また、算出した各５１２チャンネルの信号のピーク値を境界のＡＤＣの値で割ったものをｇａｉｎ比とみなす。そして、ｘ軸層、ｙ軸層ごとに現在のｇａｉｎ 比の分布と宇宙に打ちあがる前に測定されたｇａｉｎ比の分布と比べる。

７．２　中性子の各到来方向に対するエネルギー分布の解析手順

解析で使うソフトはＦＩＢ_ＢＢＤ．ｅｘｅという５１２本の積層されたファイバー型シンチンレータを地球側から見ている１６ブロック×１６ブロックの図（ｓｕｒｆａｃｅ　ｙ－ｚ）と国際宇宙ステーションの進行方向から見ている１６ブロック×１６ブロックの図（ｓｕｒｆａｃｅ　ｘ－ｚ）の２つの２次元の図により３次元の飛程距離を測定する以下のようなソフトである。

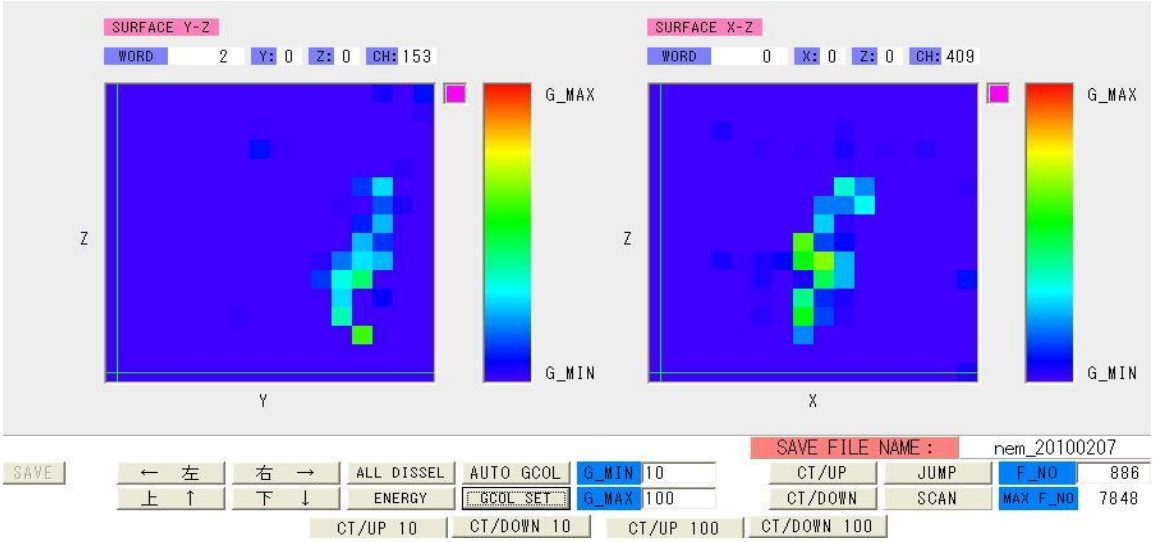

図９．解析ソフトの画面の例

まず、ＦＩＢ_ＢＢＤ．ｅｘｅに２０１０年２月７日にＦＩＢで観測されたデータファイル（ｎｅｍ２０１００２０７．ｎｅｍ）を読み込ませ、Ｆ_ＮＯ８３０などのＦ_ＮＯを打ち込みＪＵＭＰボタンを押したりＣＴ/ＵＰやＣＴ/ＤＯＷＮを押したりすることによってイベントを移動させ、１６×１６マスの二つの画面の中でカーソルを動かして各イベントの陽子の到来方向や飛程距離ｘ、ｙ、ｚの長さを目で見て測り、ピタゴラスの定理を使い３次元での飛程距離ｌを求める。また、１画面のうちの１マスを通過するというのは積層された約０．３ｃｍのシンチレータを２本通過したことに同等であるのでユニットとしてはＬ＝０．６[ｃｍ]×１通過したことになる。その測定された飛程距離Ｌの長さにより期待される中性子の運動エネルギー[ＭｅＶ]を下図の陽子の運動エネルギーのグラフの曲線を近似した直線より求めた式で算出する。ただし、シンチレータの比重は１．０ｇ／㎤とした。

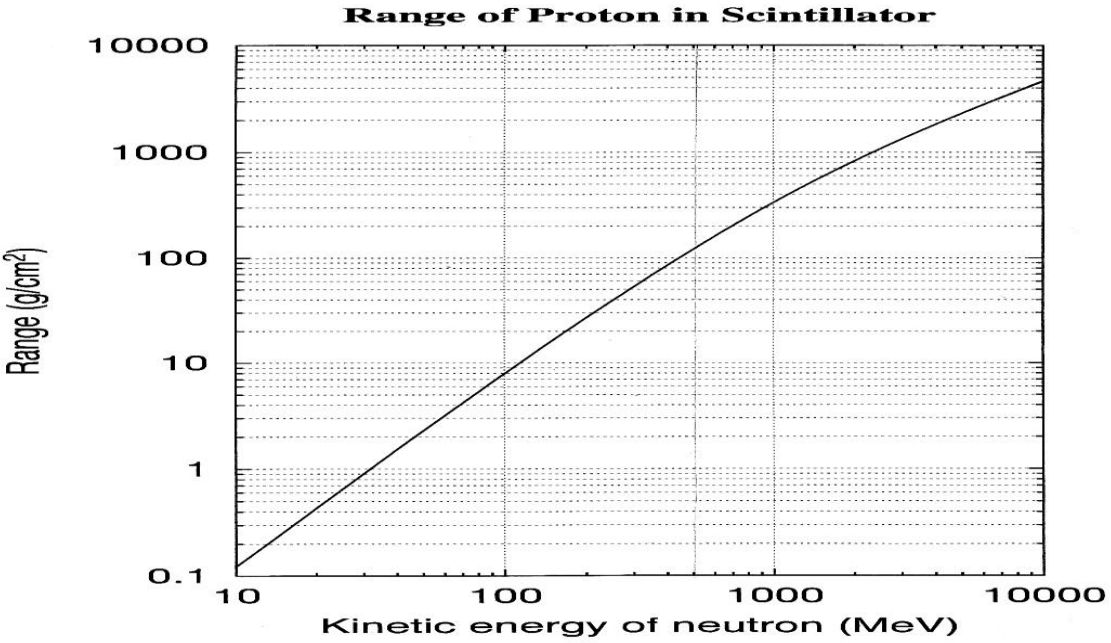

図１０．中性子の運動エネルギーに対するシンチレータ内の陽子の飛程距離

陽子の運動エネルギーのグラフの曲線を近似した直線より求めた式は以下の式になった。

$$E_n = 28.7 \times L^{0.62} \ [\mathrm{MeV}]$$

８　　解析結果

８．１　ＡＤＣ分布より得られた結果

まず、ＬＩＮＡＸ上で２０１０年１月１日のデータをＳｅｄａ５．ｃで解析することによって５１２チャンネルのチャンネルごとの０～２５６の各ＡＤＣ値に対する個数を求めたファイルを作成した。次に、ｇｎｕｐｌｏｔでｘ軸の範囲を０～１２０、ｙ軸の範囲を１から１５０００、ｙ軸をｌｏｇｓｃａｌｅに設定した。その条件で５１２本の各チャンネルのＡＤＣ値のヒストグラムを描いた。次に、各５１２本のシンチレータのチャンネルで観測された結果により得られた分布の表を目視することにより信号と雑音の境界線であるＡＤＣの値を定めて、それぞれの表から境界線を引いた残りの信号部分の平均値を算出して信号のピークとみなした。また、ノイズの部分の平均値を算出した。

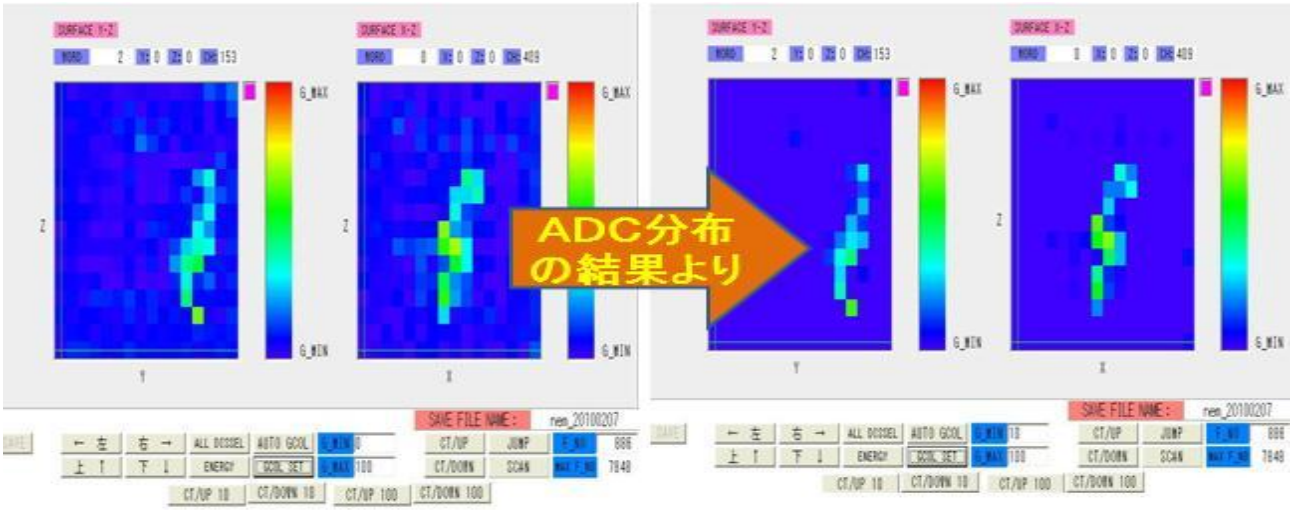

図１１．ＡＤＣ分布を利用したノイズの取り除き

また、算出した各５１２チャンネルの信号のピーク値を境界値としたＡＤＣの値で割ったものをｇａｉｎ比とみなした。そして、ｘ軸層、ｙ軸層ごとに現在のｇａｉｎ比（電圧は－１９５０Ｖ）の分布と宇宙に打ちあがる前に測定されたｇａｉｎ比（電圧は－２０００Ｖ）の分布と比べた。すると、打ち上げ後のｘ軸層のｇａｉｎ比の平均は２．１であり打ち上げ後のｇａｉｎ比の平均は１．３という結果が得られた。また同様に、打ち上げ後のｙ軸層のｇａｉｎ比の平均は２．２であり打ち上げ後のｇａｉｎ比の平均は１．４という結果が得られた。比較した結果が分かりやすいようにｘ軸層、ｙ軸層ともに打ち上げ前の各ｇａｉｎ比の時の個数を打ち上げ前の各ｇａｉｎ比の値を１．６倍した値の時の個数とした。そして、ｘ軸層とｙ軸層の打ち上げ後のｇａｉｎ比のグラフと重ねて比較した。

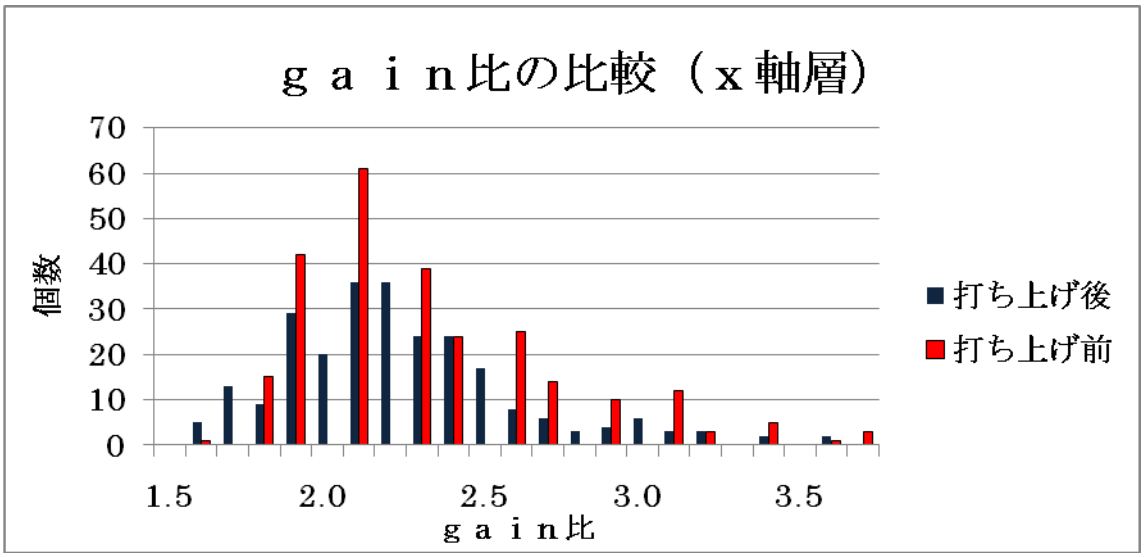

図１２．打ち上げ前後のｇａｉｎ比の比較（ｘ軸層）

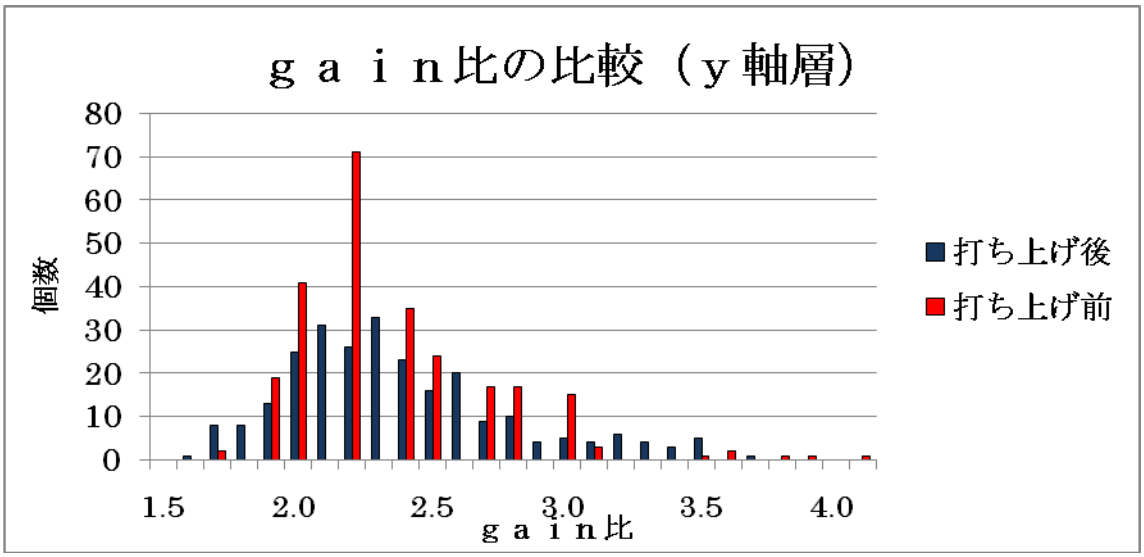

図１３．打ち上げ前後のｇａｉｎ比の比較（ｙ軸層）

８．２　Ｂａｃｋｇｒｏｕｎｄ中性子の各到来方向に対するエネルギー分布

まず、解析ソフトに２０１０年２月７日に中性子モニタのファイバー型シンチレータによって観測された高エネルギー中性子のデータ（ｎｅｍ_２０１００２０７．ｎｅｍ）を読み込ませ、気象衛星ＧＯＥＳがＸ線の一番強いピーク（Ｍ６．４）を観測した世界標準時で２０１０年２月７日２時３４分のあたりであるＮＯ．８３０～ＮＯ．１０３０の２００イベント（２時２１分５秒～３時３１分５１秒）のうち国際宇宙ステーションの居住区側から到来した中性子であると思われるもの、また、ブラジル南部に位置する非常に地磁気の影響が強い地域である南大西洋異常（Ｓｏｕｔｈ　Ａｔｌａｎｔｉｃ

Ａｎｏｍａｌｙ：ＳＡＡ）のあたりで中性子が観測されたＮＯ．５００～ＮＯ．８００の３００イベント（２時５分５８秒～２時９分１２秒）のうち地球の上空で跳ね返ってきた中性子であると思われるものを測定した。

同様に、ＭクラスにＸ線のピークがあった２０１０年２月６日の世界標準時１８時５９分（Ｍ２．９）を含む６０５イベント（１８時２４分～１９時３４分）と２０１０年２月８日の世界標準時７時５３分（Ｍ４．３）を含む４６５イベント（７時２３分～８時２３分）と２０１０年２月８日の世界標準時１３時４７分（Ｍ２．０）を含む２２９イベント（１３時１７分～１４時１７分）のうち国際宇宙ステーションの居住区側から到来した中性子であると思われるものを測定した。それらの測定結果を以下に示す。

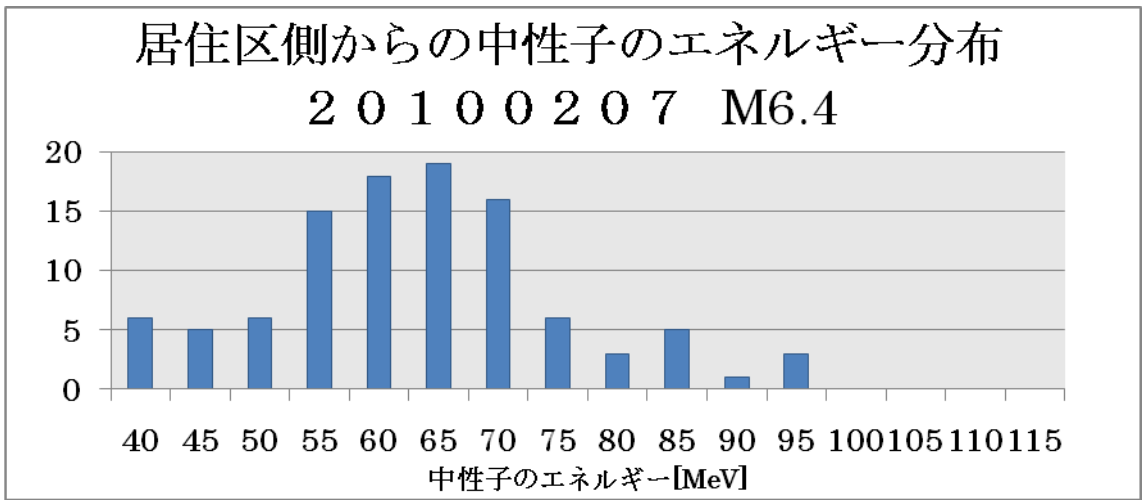

図１４．居住区側からの中性子のエネルギー分布２０１０年２月７日　2:34ＵＴ頃

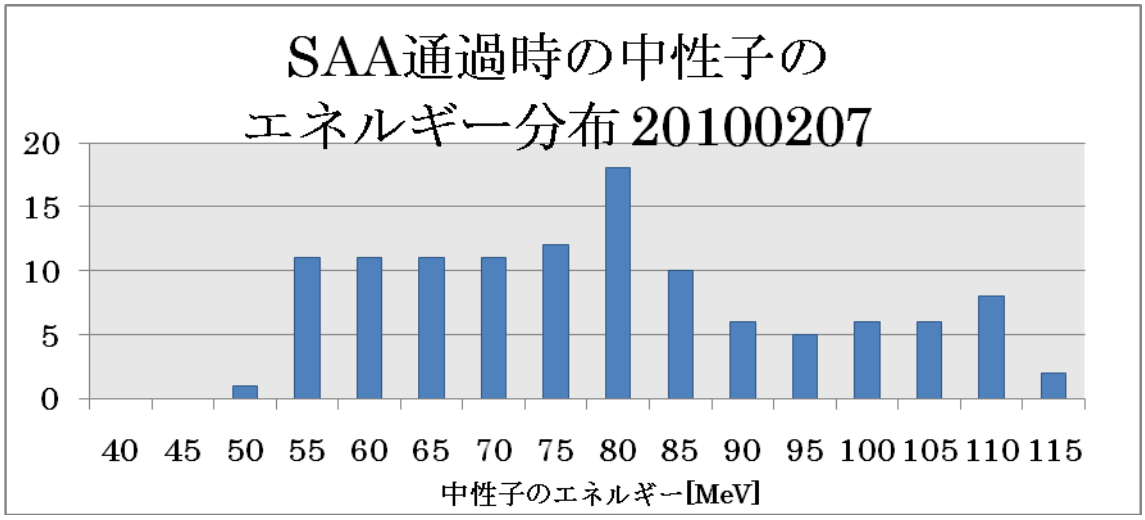

図１５．ＳＡＡ通過時の中性子のエネルギー分布２０１０年２月７日

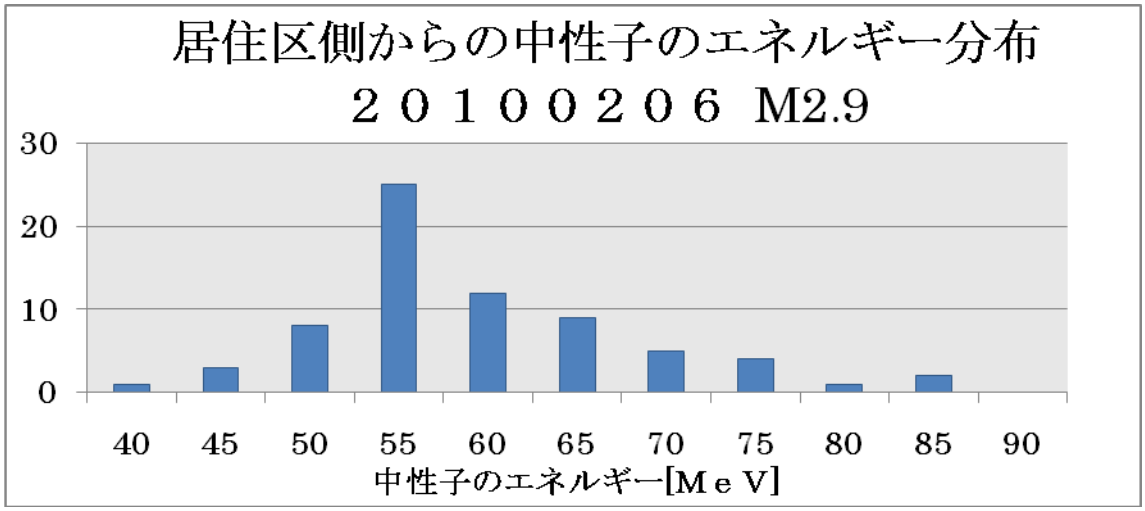

図１６．居住区側からの中性子のエネルギー分布２０１０年２月６日　18:59ＵＴ頃

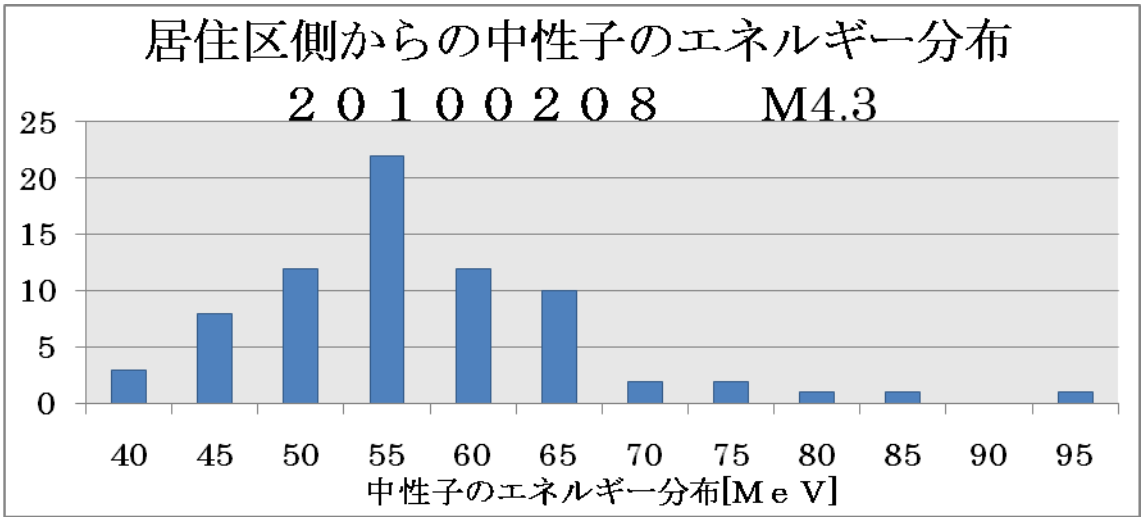

図１７．居住区側からの中性子のエネルギー分布２０１０年２月８日　7:53ＵＴ頃

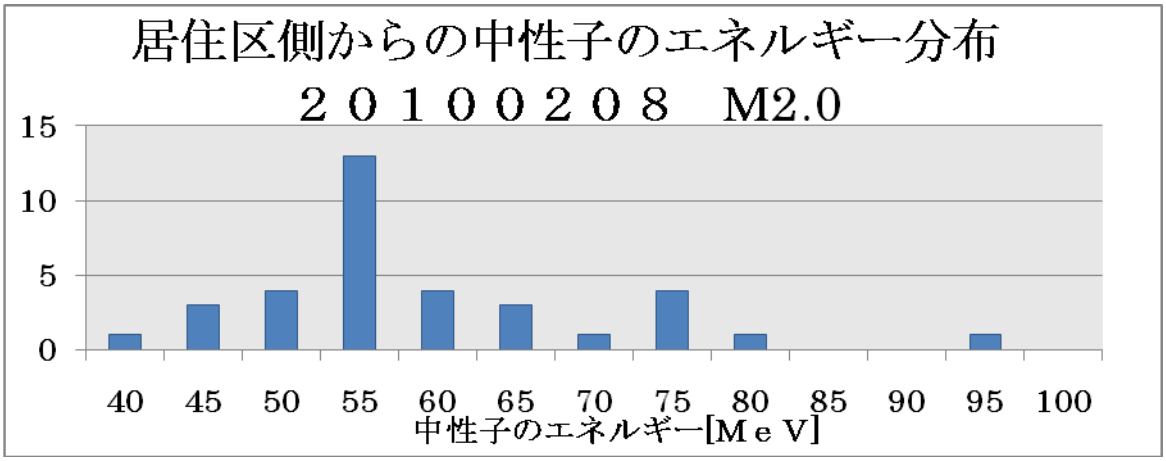

図１８．居住区側からの中性子のエネルギー分布２０１０年２月８日　13:47ＵＴ頃

８．３　太陽中性子の観測結果

２０１０年２月６日～８日に発生した４回のMクラスのフレアに対する太陽中性子の観測結果のグラフを以下に示す。

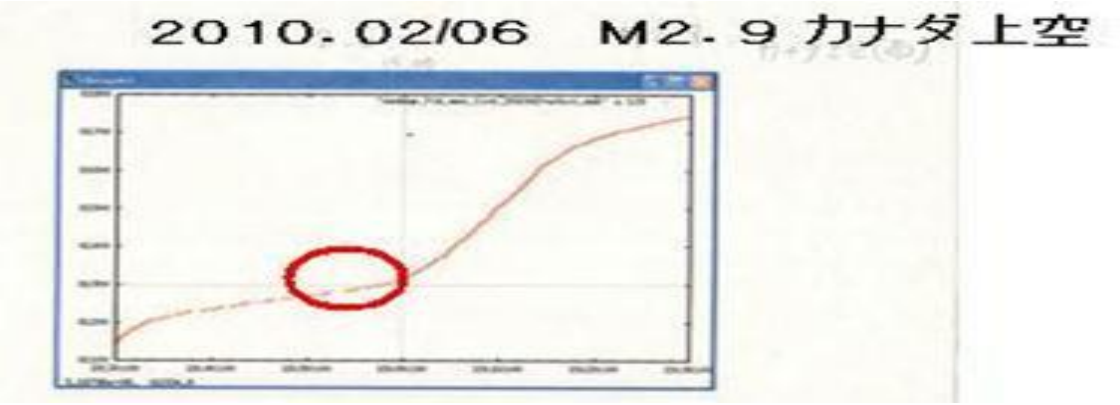

図１９．２０１０年２月６日　太陽フレア（Ｍ２．９）の時の太陽中性子の観測結果

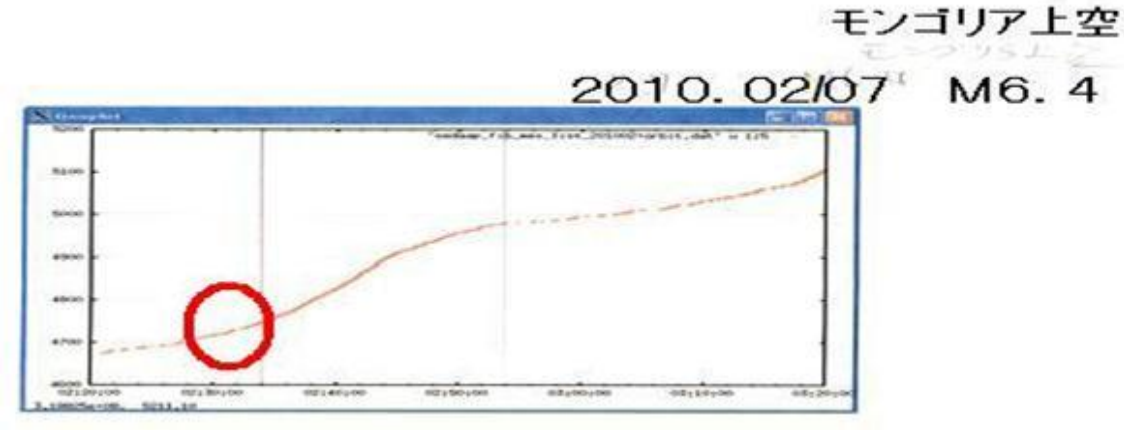

図２０．　２０１０年２月７日　太陽フレア（Ｍ６．４）の時の太陽中性子の観測結果

図２１．　２０１０年２月７日　ＳＡＡ通過時を含む０時ＵＴ～６時ＵＴの太陽中性子の観測結果

図２２．　２０１０年２月８日　太陽フレア（Ｍ４．３）の時の太陽中性子の観測結果

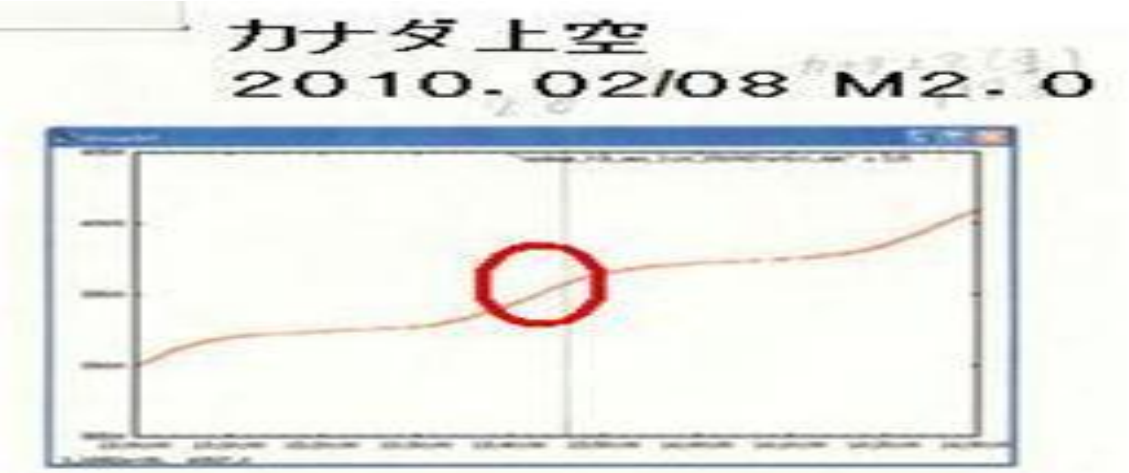

図２３．　２０１０年２月８日　太陽フレア（Ｍ２．０）の時の太陽中性子の観測結果

９　考察

私が、解析して得られたＡＤＣ分布により算出したｘ軸層とｙ軸層のｇａｉｎ比と打ち上げ前に測定されたｇａｉｎ比とを比較したところ、打ち上げ前（赤色）と打ち上げ後（青色）の ２本の各ホトマルの各チャンネルの光量分布がよく似ているので計測機は打ち上げ後も正常に作動していることがわかった。

また、国際宇宙ステーションの居住区側から到来した中性子は、国際宇宙ステーションを構成する物質などに一次宇宙線（銀河宇宙線）が衝突して作りだした二次宇宙線であると考えられる。

また、ＳＡＡを通過時に観測された極めてエネルギーの高い銀河宇宙線が地球大気に飛び込み大気原子との相互作用することにより発生した二次中性子であるアルベド中

性子のエネルギー分布は居住区側から到来した中性子のエネルギー分布よりもハードである。そのため、地磁気の影響が強いＳＡＡを通過する時には衛星等は放射線を帯びた粒子に対する防護対策をとる必要があると考えられる。

また、私が解析を行った２０１０年２月６日～８日の４回のMクラスの太陽フレア（M２．９、M６．４、M４．３、M２．０）に伴う太陽中性子の到来は見られなかった。そのため、太陽フレアに伴う太陽中性子が観測できるのは今回のフレアより規模が大きいフレア（Xクラス以上）が起こった時であると考えられる。

１０　参考文献

１０．１　書物

・現代の天文学シリーズ　１０　太陽　　日本評論社

・太陽地球科学　　京都大学出版会

・渡邉恭子，２００２，修士論文，名大宇宙線研究室記事，４３，４

・その他

１０．２　電子情報

・宇宙天気ニュース　　http://swnews.jp/

・ＪＡＸＡ　ホームページ　http://www.jaxa.jp/

・その他

１１　謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方にご指導と協力を賜わりました。この場を借りて深く感謝いたします。

本テーマを与えて下さり、ご指導していただいた村木綏先生、山本常夏先生、梶野文義先生に深く感謝いたします。村木綏先生には、実際の解析や論文作成、発表のためのパワーポイント制作などの場で様々なことを教えていただきました。山本常夏先生には、解析のためのプログラムを作っていただくだけではなく多岐にわたるご指導をいただきました。

甲南大学の大学院生の和田氏には、Ｃ言語で分からないこと等についていろいろ教えていただきました。また４年生の皆様にも作業に協力していただきました。

皆様の協力により本研究が遂行できましたことを、この場を借りて御礼申し上げます。ありがとうございました。

最後に、私事ではありますが私生活・学費など様々な面において研究を援助してくれた両親に感謝します。