

氏 名 田 中 勲

学位（専攻分野） 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第581号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 素粒子原子核専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 国際宇宙ステーションに搭載する全天X線監視装置の開発

論文審査委員 主査教授 岩田 正義
教授 高田 耕治
教授 高嶋 史彦
助教授 池田 博一
助教授 住吉 孝行
招聘研究員 松岡 勝（宇宙開発事業団）

論文内容の要旨

本論文は、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール(JEM : Japan Experiment Module)の暴露部に搭載される全天X線監視装置(MAXI : Monitor of All-sky X-ray Image)の検出器開発について述べるものである。

1960年代から始まった人工衛星を用いたX線天体観測は、数多くの実りをもたらしてきたが、現在は、より高感度、高分解能の人工衛星搭載用X線カメラが開発され、常時観測が行われている。X線カメラ開発の方向性としては、天体の非常に狭い範囲を詳しく観測する目的のカメラと、その様なカメラが観測すべき天体を全天の中から見つけだし、速報することを目的とするカメラ(全天監視装置)の2種類に分類される。全天監視装置には、短時間で全天をサーベイすること、高感度であること、得られたデータの速報が可能であることなどが求められる。

一方、国際宇宙ステーション(ISS : International Space Station)は、2000年から組立が開始され、今後長期間に渡って宇宙実験基地の中核となり得る国際協力ミッションである。ISSには、各種の実験モジュールが搭載される予定であるが、約90分で地球を一周し、高緯度から低緯度まで軌道を変えることから、暴露部の実験モジュールに全天監視装置を搭載するのに適している。また、ISSはイーサネットを用いて大量のデータをダウンロードすることが可能であり、速報性という意味でも向いている。この様な経緯から、ISS JEMに全天監視装置を搭載することとなり、MAXIの開発が始まった。

MAXIで用いられるX線検出器は2種類ある。ひとつは位置検出型比例計数管を用いたものであり、もう一方はX線CCDを用いたものである。

いずれの検出器も、その視野方向を決める為に、金属の角棒で作った細長いスリット及び金属製の薄いシートを一定間隔で多数重ね合わせたものを直角に組み合わせた構造を用いているので、スリットカメラと呼んでいる。比例計数管を用いたカメラをGSC(Gas Slit Camera)、CCDを用いたカメラをSSC(Solid state Slit Camera)と呼ぶ。

開発された各カメラの特徴は以下の様にまとめられる。

GSCは、広いX線受光面積を持ち、今までの全天監視装置と比較すると一桁程度高感度に設計されており、非常に暗い天体の突発現象等を短時間で検出することが可能となっている。

SSCは、今までの全天監視装置と比較すると、GSCの観測エネルギー範囲より低エネルギー側での感度が非常に高くなっており、エネルギー分解能はポインティング衛星の最高感度のものと比較しても見劣りしない。

両方のカメラに共通に用いられているX線コリメータは、衛星に搭載するために、その構造は非常に軽量化が計られている。

GSC と SSC は、その観測エネルギー範囲において、互いに相補的な検出器として働く。

GSC は、X線検出器として位置感応型比例計数管(PSPC : Position Sensitive Proportional Counter)を用いており、これは過去の衛星搭載実績のある同種の検出器を発展させ、MAXI に合うように改良したものである。観測エネルギー範囲は 2~30keV であり、主な改良点としては、MAXI の制約条件を満足しつつ、X線受光有効面積を最大(5350cm²/12PSPC)にするための外形とし、芯線上の位置分解能を上げる(~1.5mm)ために芯線(カーボンワイヤー)の抵抗値を大きくし、また、最適の位置分解能を達成するために、Mカーブ(本論文で後述)及び紫外線によるクロストークを考慮してガス混合比を決定していることが挙げられる。このPSPCを合計12台搭載して、合計168の芯線からの電気信号を同時処理するためのアナログ信号処理回路が必要であったが、MAXI に与えられた限られたスペース及び質量の中でこれを実現する為に、アナログ処理系にはハイブリッドIC(HIC : Hybrid Integrated Circuit)を新たに開発し、部品実装密度を上げている。これにより、MAXI への搭載が可能となると同時に、低消費電力化、高性能化を実現している。また、各処理部毎の個別調整箇所が減り、コストの削減につながっている。デジタル処理系には、やはり部品実装面積を小さくするために、FPGA(Field Programable Gate Array)を用いている。FPGA の内部回路の開発には、VHDL (VHSIC (Very High Speed Integrated Circuit) Hardware Description Language) を用いることにより、開発ツールやデバイスに依存しない論理回路設計が可能となり、デバッグ、回路検証及び今後開発される同種機器への応用が容易となっている。GSC は、試作品を用いて、最終的にその全系を通した性能確認を行い、その性能がMAXI の要求を満足していることを確認した。

SSC は、X線検出器として CCD を用いており、これは、MAXI 用に低ノイズ、高エネルギー分解能を目指して、従来の X線 CCD に改良を加えて新たに開発されたものである。観測エネルギー範囲は 0.5keV~10keV であり、構造上の特徴としては、冷却用のペルチェモジュール($\Delta t \sim 40^{\circ}\text{C}$)が CCD 直下にあらかじめ付けられていることが挙げられる。また、多数(16個/camera×2camera)の CCD を最小限の隙間で隣り合わせて並べることにより、大きな受光面積(100cm²/camera×2camera)を持つカメラを実現している。CCD は、暗電流、検出効率、エネルギー分解能等を、ウェハ、不純物濃度等が異なる何種類かの CCD に対して測定し、MAXI に最適なものを選定している。CCD の性能だけでなく、CCD からのデータ読み出し回路が十分低ノイズである必要があるが、MAXI では何種類かの読み出し方式の中から、最も性能が良く、柔軟性があり、消費電力、部品実装面積的にも MAXI に搭載可能な方式である積分読み出し方式を採用した。この読み出し回路を用いた場合の読み出しノイズと読み出し速度の関係が調べられ、MAXI で用いる読み出し速度(125kHz)で十分低ノイズであることが確認されている。これらを組み合わせた総合特性として、高エネルギー分解能(140eV at 5.9keV, -60°C)が達成された。なお、デジタル処理系は、GSC

と同様に FPGA を使用し、VHDL により開発された。

GSC、SSC 共、視野角を決める為に、スリットカメラと呼ぶコリメータを持つ。このコリメータは MAXI の為に新たに開発されたものである。互いに直行するふたつのスリットを組み合わせることで X 線に対する視野(GSC : $1.5^\circ \times 160^\circ$, SSC : $1.5^\circ \times 90^\circ$)を確保している。この種のスリットカメラとしては今までになく大型(GSC : 190cm^2 , SSC : $? \text{cm}^2$)のものであり、X 線検出素子の有効受光面積を可能な限り減らさないように考慮している。特徴的な部分は、薄い($100 \mu\text{m}$)金属シートを狭いピッチ(GSC : 3.1mm , SSC : 2.4mm)で平面度($\sim 50 \mu\text{m}$)を保ちながら多数(GSC : 128 枚/PSPC, SSC : 24 枚/16CCD Unit)並べている点である。コリメータシートの材質は、X 線阻止能、2 次放出 X 線の種類等の原理的な制約と、要求の平面度を満足するための組立上の制約から検討し、磷青銅を用いている。その構造の検討に当たっては、耐震性、温度変動による歪み等を考慮しつつ、MAXI に搭載可能なように非常に軽量化が計られている。また、コリメータシートには、非常に浅い角度(1.5° 以下)で X 線が入射するが、その場合のシート表面における反射の効果を考慮し、実験を行った。スリットカメラは、最終的に X 線照射試験を行い、その性能が MAXI の要求を満足していることを確認した。

本論文では、これらの観測機器の原理、構造、機能及び性能について、実験データを含めて議論し、MAXI が十分な性能を実現していることを述べる。

論文の審査結果の要旨

X線による天体観測は、多くのX線源の存在とそれらの躍動する姿を明らかにしつつある。このような研究を大幅に進展させるため、我が国では宇宙開発事業団を中心に、国際宇宙ステーション上での長期にわたる系統的な観測計画を進めている。田中氏の研究は、そこに搭載すべき、全天X線監視装置(MAXI)の主要部である、X線検出器システムの開発に関するものである。

MAXIは従来の装置の10倍以上の検出感度を目指し、位置感応型比例計数管を用いた大面積ガス・スリットカメラと、低エネルギーX線を高いエネルギー精度で捉えるための、CCDを用いた半導体・スリットカメラの2種類のX線カメラを使用する。

田中氏は、これらX線カメラの設計及び信号読み出しシステムの構築に中心的に携わってきた。比例計数管部の大面積化のためには、信号数の増加に対処した読み出し回路の小型化・低消費電力化が大きな課題だったが、綿密な回路設計によって低電力でも検出器の特性を損なわない専用ハイブリッドICを開発し、従来程度の消費電力でこれまでの約10倍の面積を覆うことを可能にした。またFPGAを導入することにより、計数管からの多数の信号に対し、高速でありながらバックグラウンドを効率よく排除するなどの様々な機能を持つ論理システムを作り上げ、必要なデータのみを圧縮された形で効率よく地上に送ることを可能にした。

一方CCDに関しては、その特長である高いエネルギー分解能を損なわないように、ドライブ回路や読みだし回路の低ノイズ化が重要課題であった。これに対しては小型で低消費電力の積分回路を設計・製作し、125kHzの読み出し速度でも十分高い分解能が得られることを実証した。またペルチェ素子をCCDに直接取り付け、低温(-60℃)に制御することによってノイズの低減化を計っているが、これも新しい考案である。

スリットカメラの性能は、視野を限定してX線源を特定するためのコリメーターと、比例計数管やCCDなどのX線検出器の総合的な性能で決まる。田中氏は衛星打ち上げ時の振動にも耐え、且つ軽量化のための材料選択など、細心の機械設計を行い、1.5° x 1.5°の角度分解能を持つコリメーターを開発した。最終的にはコリメーターと検出器を組み合わせ、X線ビームによる総合試験を行い、システム全体としての性能を評価した。その結果、コリメーター表面でのX線反射が角度分解能を悪くすることが判明したが、表面に機械的、若しくは化学的な処理を施すことにより大きく改善できることを実証した。これらの評価試験及びそのデータ解析は全て田中氏が中心となって行ったものであり、その結果はMAXIに要求される性能を全て満足するものであった。

このように本論文述べられた研究によりいくつかの重大な課題が解決され、世界最高感度の全天X線監視装置としてのMAXIを実現できる見通しが得られたことは、大きな成果である。

論文にはこれらの検出器の概念、設計、性能試験の内容とそこで判明した問題点の解決法、評価試験の方法と解析結果などが詳細に記されており、学位論文(理学)として相応しいものであると審査委員会は全員一致で判定した。