



X線天文衛星「すざく」で探る宇宙

鳥居 研一

皆さんは「X線天文学」という天文学の一分野をご存じでしょうか？ X線天文学は、1960年代に始まった比較的新しい分野で、X線を使って様々な天体を観測、研究する学問です。X線は光と同様の電磁波の一種ですが、光と比べて1000倍以上エネルギーが高く（波長が短く）、透過力が高いためにレントゲン撮影で医療の診断に使われていることはご存知だと思います。

宇宙には極端に温度が高い場所が存在します。例えば、ブラックホールの近くや、銀河の集団である銀河団をとりまく高温のガスは数1000万度を超えており、強いX線を放射しています。あるいは、超新星の爆発によって電子が高いエネルギーまで加速されてX線を放射することもあります。これらのX線を観測することで、その天体で生じている物理現象を明らかにしようとするのがX線天文学です。X線は地球の大気に吸収されて地上に届かないので、観測には人工衛星を使います。人工衛星にX線専用の望遠鏡やX線専用のカメラを搭載し、

ロケットで打ち上げて観測するのです。わが国は、1979年に打上げた「はくちょう衛星」以降、X線天文学の分野で世界の第一線をリードしてきました。

「すざく衛星」は、このような最新のX線天文衛星でJAXA宇宙科学研究本部や国内外の機関の協力で開発され、2005年7月、鹿児島県内之浦宇宙空間観



図1 すざく衛星の打ち上げ

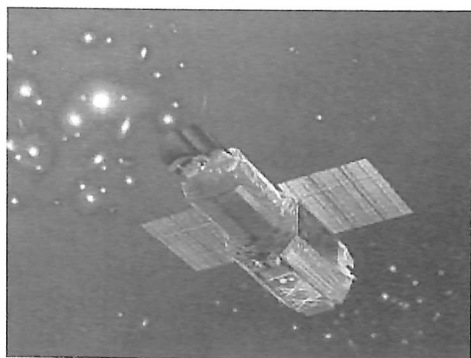


図2 すざく衛星（想像図）

測所からM5ロケットにより打上げられました。図1はロケット打上げの様子、図2は観測中のすざく衛星の想像図を示します。筆者が所属する大阪大学では、米国のマサチューセッツ工科大学、京都大学、JAXA等とともに、すざく衛星に搭載したX線CCDカメラ、XIS (X-ray Imaging Spectrometer) を開発しました。ここでは、XISの開発や打上げに至る試験や準備、そして、打上げ後の観測成果について紹介したいと思います。

すざく衛星の概要

人工衛星の開発は数年間を越える長丁場になることが珍しくありません。目的とする科学的成果を狙って基本設計を行った後、実際に打上げる装置を製作する前に同等の装置を組み上げて試験や性能の確認を行います。宇宙空間は真空であり、放射線が絶え間なく降り注いでいます。地上約500kmを周回する人工衛星は100分ほどの間に直射日光を浴びる日向と日陰を交互に行き来します。このような過酷な環境で、何年間も確実に動作する機器を開発しなければならないのです。また、ロケットで打ち上げ可能な重量や、太陽電池の電力が許す範囲で、少しでも高性能の装置を打ち上げたい、という研究者の要求から、観測装置は様々な工夫が凝らされたものとなっています。それでは、装置の概要を眺めてみましょう。

すざく衛星は、重量1.6トン、全長6.5mで鳥が羽を広げたような外観をしています。羽の部分に相当するのが太陽電池パネルで、500Wの電力を供給します。くちばしの部分に5台のX線望遠鏡 (XRT: X-Ray Telescope) (図3) が搭載されており、それぞれの焦点にX線CCDカメラ (XIS) (図4) と、高分解能X線分光器 (XRS) が搭載されています。X線望遠鏡は、地上で見かける可視光用の望遠鏡とは異なる形状です。X線を反射させて集光しますが、X線を反射させるには鏡の面に対して1度に満たないすれすれの角度で入射させねばなりません。このため、X線望遠鏡は一見すると円筒のように見えます。遠くの暗い天体を見ようと思うと、大きな望遠鏡が必要ですが、斜めからの入射では有効面積が小さくなります。このため、すざくの望遠鏡では薄い反射鏡を100枚も、バウムクーヘンのように重ねて製作してあります。



図3 X線望遠鏡 (XRT)



この望遠鏡の4台の焦点に、X線CCDカメラXISを搭載しています。残りの1台の焦点には、X線微小熱量計（XRS: X-Ray Spectrometer）を搭載していましたが、残念ながら冷却用の液体ヘリウムの損失により、観測を行えない状態になりました。以上の装置は比較的エネルギーが低い（波長が長い）X線を観測するものですが、エネルギーが高い（波長が短い）X線を観測する装置として、硬X線検出器（HXD: Hard X-ray Detector）も搭載しています。

X線CCDカメラとXISの開発

CCD（Charge Coupled Device）は、Si半導体で製造された画像センサで、家庭用のデジタルカメラやビデオカメラに広く使われています。光やX線がCCDに入射すると半導体中の電子が励起されます。エネルギーが低い可視光では光子1個に対してせいぜい電子が1個励起されますが、X線の場合にはそのエネルギーに比例して、光子1個に対して100個以上の電子が励起されます。CCDは基盤の目の格子状になっており、光やX線の結像で生じる電子をバケツリレーの要領で転送し、電気信号として増幅し読み出します。図5はXISに使われているフレーム転送方式のCCDの仕組みを示したものです。

可視光の場合には1個の光子に対して1個の電子が励起されるので、入射した光子の総数（光量）が測定されますが、X線の場合には1個の光子に対してエネルギーに比例した数の電子が励起されるので、X線のエネルギーを測定できます。つまり、撮像と同時に分光（可視光では光の色を分析することに対応する）を行うことができます。分光の性能は、励起された電子の数をどれだけ正確に数えられるかに依存します。XISでは、X線の入射で生じた数100～数1000個の電子をわずか2～3個の精度で数えることができます。

大阪大学のX線グループでは、1990年代前半からXISの設計、開発を行い、製作したカメラの試験、較正を行い搭載用機器として送り出しました。世界最高の性能を実現するため、XISには色々な工夫が施されています。4台のCCDのうちの1台は裏面照射型の構造です。通常X線を入射させるのとは反対側の、電

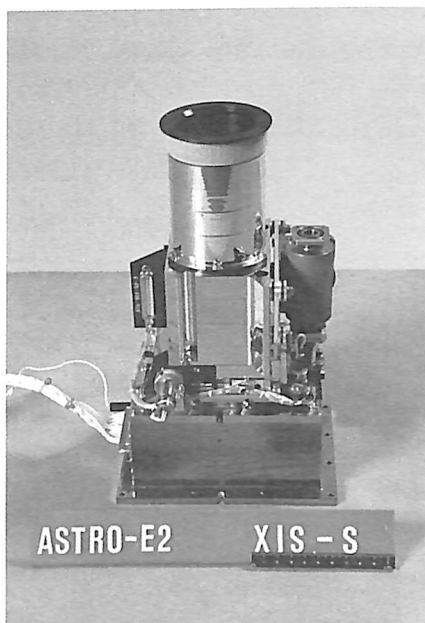


図4 X線CCDカメラ（XIS）

子を運ぶための電極構造が存在しない面からX線を入射させるように工夫して低エネルギー領域での感度を高めています。これまで、裏面照射のCCDでは励起された電子を効率よく収集することができませんでした。XISでは半導体表面に化学処理を施すことで収集効率を高め、エネルギー分解能を損なうことなく高い感度を実現しています。

CCDは、可視光に対して感度が高いため、前面には光を遮断してX線だけを透過させる薄膜のフィルタが配置されています。アルミニウムでプラスチックを挟んだわずか0.2ミクロンほどの厚みですが、可視光の透過率はわずか100万分の1ほどです。ロケット打上げの振動や、地上の大気圧から打上げ後の真空状態への周辺圧力の変化に対してフィルタを保護するために、カメラ内部を地上で真空状態に保って打ち上げ、上空でドアを開いて観測を開始します。

ドアを開ける日は2005年8月12日で、私は人工衛星と通信を行う鹿児島県の内之浦宇宙センターに居合わせました。すざく衛星は小マゼラン雲の超新星残骸、E0102-723を向いており、すべてが実験室で試験した通りに動作しました。受信したデータには期待通りの最初のX線像が得られました(図6)。図7は、裏面照射型のCCDで得られたX線のスペクトルで、数100万度をを超える高温で希薄なガスに特有のイオン化し

フレームトランスファ型 CCDイメージセンサの構造

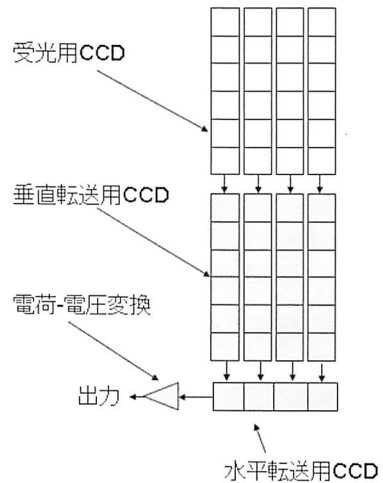


図5 CCDの仕組み

出典: フリー百科事典
『ウィキペディア (Wikipedia)』

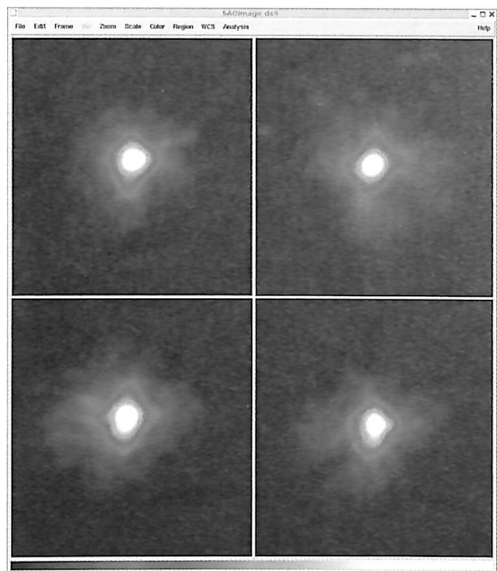


図6 4台のXISによる超新星残骸
E0102-723のX線画像



た窒素や酸素の輝線が鋭く分離されています。

話を戻して、地上での較正試験について説明しましょう。検出器から出力される信号の強度や波形から、X線の発生源の温度や元素の種類を推定するには、本来どれだけのエネルギーのX線が入射するとどのような信号波形が出力されるか、ということを地道に調査する必要があります。較正の仕事を例えていうと、ガラスに封入した水銀柱に目盛を振って正しい温度計にすることに対応します。本来高性能の検出器でも、正しい目盛が振られていないと、間違った結果をもたらしてしまいます。検出器の潜在能力を最大限に活用できるように、私達は0.2%ほどのエネルギー測定精度を目指して較正を行いました。

このために、色々なエネルギーのX線を当てて出力信号を調査します。ところが、順番にエネルギーを変えて試験するのでは時間がかかり過ぎます。そこで、大阪大学のX線グループでは、分光器を用いてX線を分散させ、一度に異なる色のX線をCCDに照射する装置を開発しました。光に例えると、プリズムを使って虹を作るのと同様の原理です。図8はこの較正装置の全体像（全長2mほど）、図9は真空容器の中にXISを設置した状態を示しています。XISの全長は30cmほどです。この装置を活用し、0.2keVから2.2keVの広範囲にわたって連続した特性を得ることに成功し、現在進展している科学的な観測に活かされています。以下では、XISによって得られた2つの成果を紹介しましょう。

我々の銀河系の中心

我々の銀河系の中心は約3万光年の距離にあり、巨大ブラック

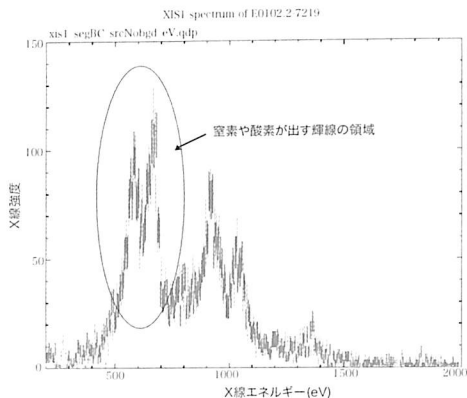


図7 超新星残骸E0102-723のX線スペクトル

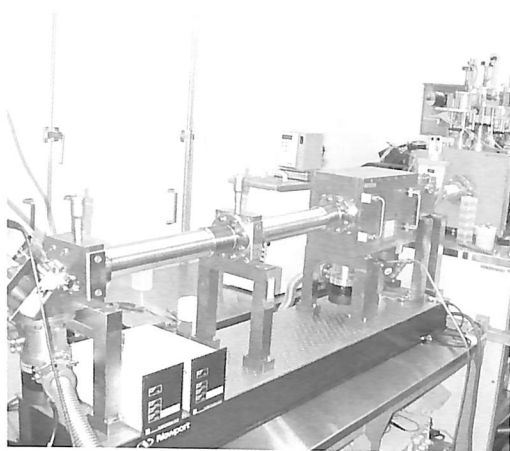


図8 X線分光装置

ホールが存在する証拠が見つかっています。図10は、すざくのXISがとらえた銀河系（天の川）の中心部、約0.4度×2.0度の様子を示します。この図は、XISの分光能力を活用し、電離していない鉄の元素が放射する輝線だけで描いたものです。銀河系の中心から放射されたX線が天の川に沿って点在する低温の雲で反射されて輝く様子を示しています。図11はXISで得られた銀河系中心部のスペクトルで、単一温度の高温ガスだけでは表すことができず、複雑な電離ガスの存在を示しています。XISの精密な観測により、銀河中心の巨大ブラックホールから放射されるX線の激しい時間変動や、それにより加熱されたガス、照らし出された冷たい雲の物理状態が明らかになりつつあります。

白鳥座ループ

白鳥座ループは約2500光年の距離にあり、10000年ほど前に重い星が超新星爆発を起こした痕跡（超新星残骸）です。

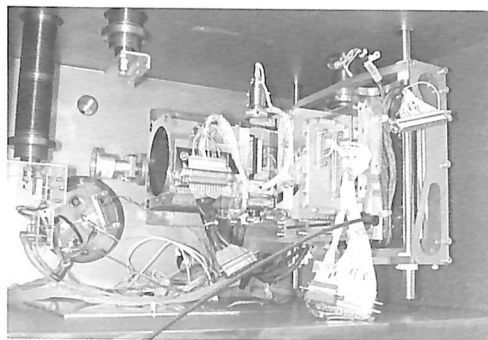


図9 真空容器中のXIS

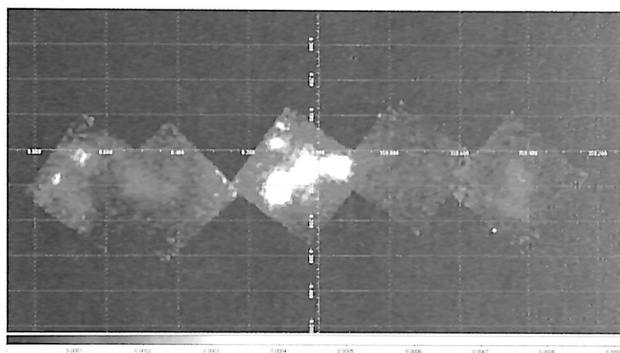


図10 XISで観測した銀河系中心部

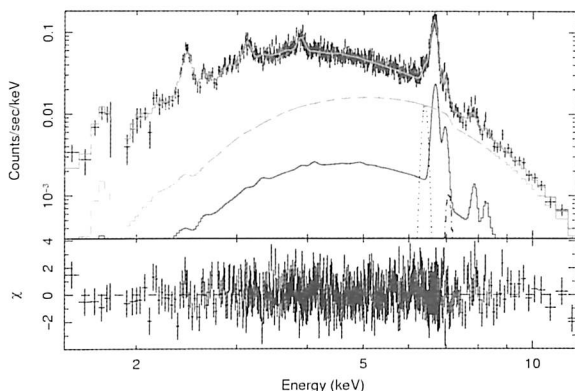


図11 銀河系中心部のX線スペクトル



可視光では網状星雲として親しまれています。図12は、欧州のROSAT衛星が取得したX線画像で、すざく衛星が初期に観測した4か所の位置を左上の四角で示します。図13はこの領域から得られたスペクトルで、裏面照射型CCDの威力により、世界で初めて電離した炭素の輝線を検出しました。従来から検出されていた酸素、窒素と合わせ、我々のような生命の元となる元素の分布を明らかにしているのです。

以上、私達が開発したすざく衛星のXISの活躍の一端を紹介しました。他の多くの成果や最新情報がすざくのホームページ

(<http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/>) に掲載されていますので、興味のある方はご覧下さい。

図1, 2, 3, 5, 6, 7はJAXAに提供して頂きました。銀河中心のデータ(図10, 11)と白鳥座ループのデータ(図12, 13)は、それぞれ大阪大学大学院の田和憲明氏、勝田哲氏の解析により提供して頂きました。感謝致します。

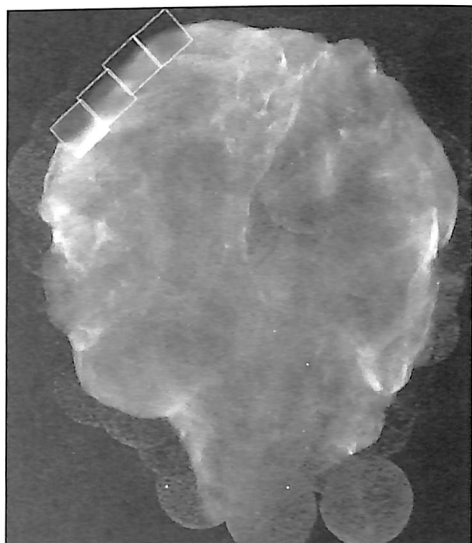


図12 白鳥座ループのX線画像
(欧州のROSAT衛星による)

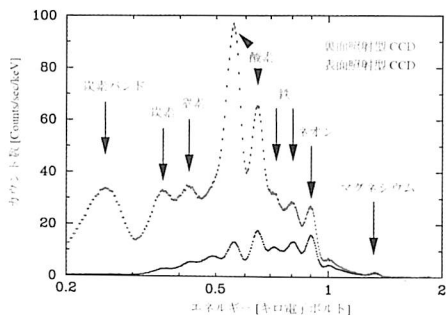


図13 白鳥座ループのX線スペクトル



著者紹介

鳥居研一 (とりい・けんいち)

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻特任助手。
博士(理学)。2003年より現職。

主な研究分野は、天文学、高エネルギー天体物理学。
趣味は料理。