

X線天文衛星「すざく」

—打ち上げから現在までの経緯

石田 学 (すざくプロジェクトマネージャー)

〈宇宙科学研究所 (JAXA) 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

e-mail: ishida@astro.isas.jaxa.jp



X線天文衛星「すざく」は2005年7月10日に宇宙科学研究所のM-Vロケット6号機で内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。当初から主検出器のX線分光器を喪失するなど、現在に至る道のりは決して平坦ではありませんでしたが、ほかの検出器がほぼ予定どおりに働き、数々のユニークな結果を生み出し続けてきました。本稿では、打上げから現在に至る経緯をまとめます。

1. 「すざく」誕生

「すざく」¹⁾は、「はくちょう」(1979-1985)、「てんま」(1983-1985)、「ぎんが」(1987-1991)、「あすか」(1993-2000)に続くわが国5番目のX線天文衛星として、2005年7月10日に、内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。日本のX線天文学は、常にそのときどきの最先端の観測機器を開発し、これを衛星に搭載することでフロンティアを切り開いてきました。「すざく」にも、盛りだくさんの最先端の観測機器が搭載されています。しかしながら、打上げ後の「すざく」の歩んだ道のりは決して平坦なものではありませんでした。

「すざく」は、打上げ翌日の7月11日には、スピン状態から3軸制御に移行し、太陽電池パドルを展開して電力を確保した後、翌12日には伸展式光学ベンチを展開して、X線観測のできる最終形態を達成しました。図1に「すざく」の外観を示します。「すざく」にはX線望遠鏡²⁾(X-ray Telescope; XRT)が5台搭載されており、そのうちの1台XRT-SはX線分光器³⁾(X-ray Spectrometer; XRS)に、残りの4台XRT-IがX線撮像分光器⁴⁾(X-ray Imaging Spectrometer; XIS)に使用

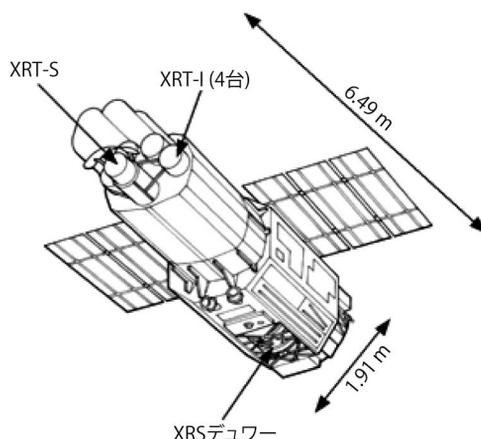


図1 X線天文衛星「すざく」の外観。

されます。そのほか、非撮像型の硬X線検出器^{5), 6)}(Hard X-ray Detector; HXD)を搭載しています。「すざく」とその観測機器についての論文は2007年1月に発行されたPASJの「すざく」特集号にまとめて掲載されていますので、興味のある方はご覧ください。

その後、7月21日にはスラスターを噴射し、地上約250 kmだった近地点高度を上昇させ、高度568 km、離心率0.0002の最終的な略円軌道に到達しました。この間、「すざく」の主検出器であるXRSでは、検出器を冷却するために、7月11

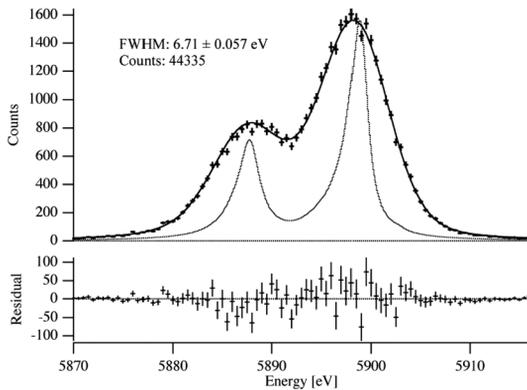


図2 ^{55}Mn の特性 $K\alpha$ 線のスペクトル³⁾。エネルギー分解能 <7 電子ボルトを達成している。

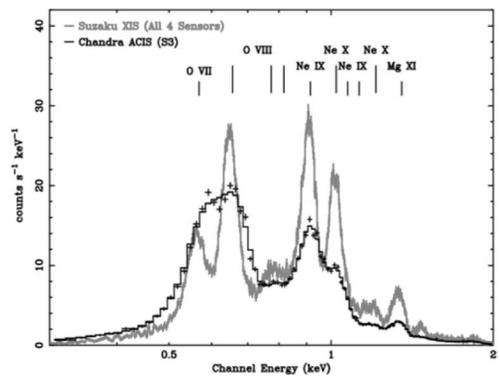


図3 超新星残骸E0102-72のXISによるスペクトル。4台のXISのスペクトルを足し合わせてある。黒はチャンドラ衛星のACIS S3のスペクトル。

日の太陽電池パドル展開直後から機械式冷凍機を動作させ、7月26日に断熱消磁冷凍機の運転を開始したところ、翌27日未明には、検出器の温度が60 mKに達したことが確認されました。これは今もって人類が宇宙空間で達成した最低温度の世界記録となっています。XRSには、エネルギー較正用に ^{55}Mn 線源が搭載されています。このときに得られた ^{55}Mn の特性 $K\alpha$ 線のスペクトルが図2です³⁾。残念ながら天体からのX線ではありませんが、エネルギー分解能として7電子ボルト以下という、ハードウェアとしての目標は達成できたこととなります。しかし残念なことに、その後、8月8日に検出器の冷媒の一つである液体ヘリウムがすべて気化してしまうという事故に見舞われ、XRSは天体からのX線を観測する前にその寿命を終えることとなってしまいました。

2. 「すざく」の特長

XRSを失ったとは言え、「すざく」にはチャンドラ衛星(1999-)、XMM-ニュートン衛星(2000-)に比べて勝るとも劣らない優れた特長がいくつもあります。最新鋭のX線CCDを用いたXISは、4台のXRTの焦点面に1台ずつ置かれており、そのうちの1台は、低エネルギー側に高い感度を有する背面照射型CCDです。このXIS

でマゼラン雲にある超新星残骸E0102-72を観測した場合のスペクトルを図3に示します。CCD素子の高い電荷転送効率のお蔭で、「すざく」のXISがエネルギー分解能の点で非常に優れていることが一目瞭然です。またXISには、CCDの一部の領域だけを読み出したり、1回の読み出し時間あたりの実効的な露出時間の割合を小さくすることで、かに星雲のような明るい天体でも観測できるように工夫されています。

XRTは先代「あすか」と同じWolter-I型光学系を円錐面で近似した多重薄板型X線望遠鏡で、「あすか」よりも大型、かつ長い焦点距離で有効面積を稼いでいます。図4に、他衛星と比較しつつ「すざく」XRTの有効面積を示します。XRTの有効面積に検出器の検出効率を掛けたものです。「すざく」の4台のXISを合わせた有効面積はチャンドラ衛星のそれをはるかにしのぎ、1キロ電子ボルト以上ではXMM-ニュートンに匹敵することがわかります。

チャンドラ衛星やXMM-ニュートン衛星にはない特長として、10キロ電子ボルト以上のエネルギー帯をカバーするHXDの存在が挙げられます。HXDの検出器部は、PINダイオードとGSO結晶を、井戸型のコリメーターであるBGO結晶

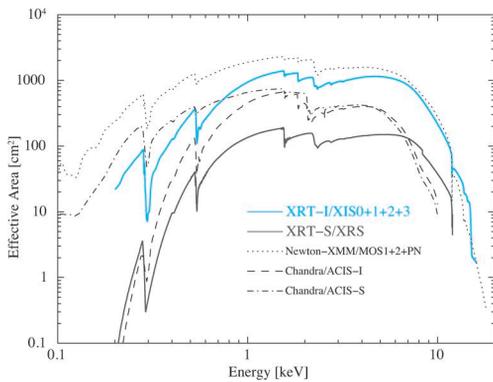


図4 XISとXRSの有効面積。XRTの有効面積に、検出器の検出効率を掛け合わせたもの。チャンドラ衛星、XMM-ニュートン衛星の検出器と比較して示す。

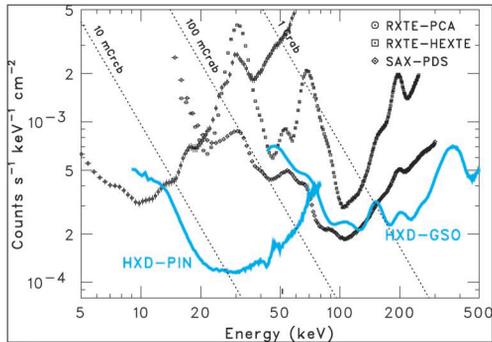


図5 HXDのバックグラウンド曲線。「すざく」の打ち上げ当時に軌道上にあった他の衛星の検出器と比較して示してある。

で取り囲んだ形をしており、検出部のPINまたはGSOと、BGOとの間で非同時計数を行うことにより、従来の検出器よりも飛躍的にバックグラウンドを落とすことに成功しました。HXDのバックグラウンド曲線を図5に示します。現在では10–80キロ電子ボルト帯で集光・撮像できるNuSTAR衛星⁷⁾がHXDの感度を2桁ほど上回っていますが、NuSTARが打ち上がった2012年までのほぼ7年間、「すざく」は、特にバックグラウンドの低い20–50キロ電子ボルト帯で他の衛星に比べて圧倒的に高い検出感度を誇っていました。このHXDとXISを併せて、「すざく」は0.2–

600キロ電子ボルトという、3桁以上にわたるエネルギーバンドで、高感度の観測を実現しています。

バックグラウンドに関しては、チャンドラ衛星やXMMニュートン衛星が長楕円軌道を採用しているのに対し、「すざく」は近地球衛星軌道を周回しているため、地磁気による宇宙線遮蔽効果が効いて、HXDのみならず、XISでも、特に表面輝度の低い広がった天体（超新星残骸や銀河団外縁部）の観測で「すざく」に有利な状況を作り出しています。

3. 「すざく」の成果

このように、「すざく」はXRSを失っても、他のX線天文衛星にはない高いエネルギー分解能、広いエネルギー帯域、低いバックグラウンドとそれによる高い感度という特長をもっており、これらを適切に活かすことで、最先端の成果を上げられることが十分期待できました。そこでプロジェクトチームでは、XRSありきですでに決まっていた第一期観測期間（AO-1）の観測計画をいったんご破算にし、XISとHXDによるミッションとして公募をやり直すことにしました。日米欧それぞれで観測公募をかけ、審査の結果、2006年3月に、4月から1年間に観測するターゲットが決まりました。これ以降、「すざく」の観測公募はAO-10まで回を重ねることになります。その結果のハイライトは今月から3カ月かけて本誌上に展開されるレビュー記事に譲るとして、ここでは「すざく」の特長が活かされた観測例を二つ紹介することとします。いずれもNature誌に掲載されたものです。

3.1 宇宙線の起源を探る

宇宙線は、宇宙空間をほぼ光速で飛び交う高エネルギーの荷電粒子のことで、1912年にVictor Hessによって発見されました。主成分は陽子と核子で、これに2%ほどの電子が加わっています。そのスペクトルはおおむねべき関数的です

が、よく見ると 10^{15} 電子ボルト付近と 10^{18} 電子ボルト付近に、いわゆるkneeとankleと呼ばれる二つの特徴的な折れ曲がりがあります⁸⁾。このような高エネルギーの粒子が宇宙空間でどのように生成されるのかは長いあいだ謎とされてきましたが、近年では、その大部分は超新星残骸の衝撃波で加速されるという説が有力となっています。

内山ら⁹⁾は、この粒子加速が行われている有力な候補天体として、さそり座にある超新星残骸RX J1713.7-3946をチャンドラ衛星と「すぎく」で観測しました。まず、チャンドラ衛星の高い空間分解能のデータから、数分角程度の空間的広がりをもつ領域のX線強度が、わずか1年という短い時間スケールで明滅しているということが明らかになりました。宇宙線が1年という短期間でエネルギーを得る（「加速」される）過程が、初めて直接的に捉えられたこととなります。

こうしたコンパクトなX線放射領域の急激な発生と消滅は、そのもととなる粒子の加速と消失に対応します。超新星残骸の環境（ガスの密度や放射、磁場環境など）を考えると、超新星残骸の衝撃波で加速された超相対論的な電子のシンクロトロン放射しか候補が残りません。こうした速い変動こそが、RX J1713.7-3946からのX線放射がシンクロトロン起源であることの動かぬ証拠、というわけです。電子の加速と、シンクロトロン冷却の時間スケールがともに1年程度ということから、磁場の強度と、その空間的な乱れ（いわゆるボーム因子 $=B/\Delta B$ ）に制限がつけられます。それによると、磁場は1ミリガウス程度、ボーム因子は1の程度であることがわかりました。星間空間の平均的な磁場強度は1マイクロガウス程度なので、超新星残骸は星間空間の磁場を、自分で1,000倍にも増幅していることとなります。

ボーム因子の見積もりは「すぎく」の広帯域スペクトル観測からも得られています。「すぎく」のXISとHXDの観測から、RX J1713.7-3946のX線スペクトルには10キロ電子ボルト付近に折

れ曲がりがあることがわかりました。チャンドラ衛星では、感度の関係で上限7キロ電子ボルト程度までのスペクトルしか得られていません。高エネルギーまで高い感度で観測できる「すぎく」の特長が活かされたこととなります。このスペクトルの折れ曲がりから、やはりボーム因子が1の程度であることが導かれました。宇宙線加速の標準理論である衝撃波加速理論によれば、このような環境では、宇宙線の主成分である陽子や核子が100テラ電子ボルト以上にまで加速されることが可能です。これは宇宙線スペクトルの最初の折れ曲がりに対応しており、少なくともこの折れ曲がりまでのエネルギーをもつ宇宙線は、超新星残骸の衝撃波面で加速されている可能性が極めて高くなったと言えます。超新星残骸での粒子加速については、本特集の内山泰伸さんの記事をご覧ください。

3.2 ペルセウス座銀河団のビリアル半径までの観測

2節でも述べたとおり、「すぎく」は、低軌道を周回していて非X線バックグラウンドが低いいため、表面輝度が低い広がった天体の観測に適しています。この性質を使って、近年、銀河団外縁部の観測が盛んに行われています。

銀河団は、差し渡し数百万光年の空間に数十個から1,000個もの銀河が集中している宇宙最大規模の天体で、X線で見ると、ダークマターの重力ポテンシャルに捉えられた温度数千万度の高温ガスの姿が見えてきます。ガスの総質量は可視光で見える銀河の質量の5倍以上にも達します。銀河団は、その周辺部にある宇宙の初源ガスを飲み込みながら今も成長を続けていることが観測や宇宙規模の数値シミュレーションで明らかになっています。成長の現場は、銀河団の縁に当たる、いわゆるビリアル半径近傍なので、是非ともその辺りまで観測したいところです。ところがこの領域はX線の表面輝度が極めて低いため、チャンドラ衛星やXMM-ニュートン衛星では観測することが

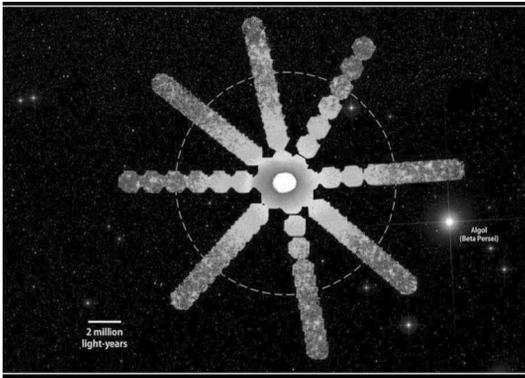


図6 ペルセウス座銀河団の「すざく」によるイメージ¹⁰⁾。破線の円がビリアル半径。

できませんでした。銀河団外縁部の観測は、「すざく」の独壇場となっています。その成果は本特集号の松下恭子さんの記事にまとめられています。

ここでは、代表例の一つとしてペルセウス座銀河団の観測結果¹⁰⁾を紹介しましょう。図6に、「すざく」が行ったペルセウス座銀河団の一連のポインティング観測で得られたXISの画像を示します。このデータを使って銀河団全体にわたって鉄の組成比を調べたところ、驚くことに、場所ごとのばらつきが非常に小さく、太陽組成の30%程度でほとんど一様であることがわかりました。重元素の発生源である銀河の分布とは関連していません。このことから、鉄のほとんどは、銀河団が形成された時代よりも前に個々の銀河から放出され、宇宙に大きく広がっていったものと考えられます。銀河団の誕生は宇宙誕生から約40億年後（いまから約100億年前）だと考えられているので、いまから100億年以上前に、鉄などの重元素が星々から大量にまき散らされ、宇宙中に拡散した時代があったこととなります。数多の星が生まれ、超新星爆発でまき散らされた鉄をはじめとする重元素は、同じ頃に急成長を遂げていた銀河中心の超巨大ブラックホールによる銀河風に乗って、宇宙中に拡散していったと考えられます。

4. 「すざく」のたどった道

ほぼ10年の長きにわたって軌道上で観測を続けてきた「すざく」ですが、その間にたびたび、厳しい宇宙環境の洗礼を受けてきました。その中でも最も深刻なダメージをもたらした事象として、宇宙デブリのXISへの衝突が挙げられます。特に、2006年11月9日の事象では、XIS2の視野中心を含む全体の2/3の領域が多量の電荷で埋もれてしまい、XIS2停止のやむなきに至りました。同様の事象は2009年6月23日にXIS0でも発生しましたが、このときは幸い、視野の端の1/12程度のエリアの喪失でとどまりました。XISではこのほか、データ処理部の主系CPUボードの損傷（以降は冗長系でデータ処理）、筐体開口部の可視光遮蔽用フィルタへの衛星内残留物質の蓄積による低エネルギー側の感度低下、放射線損傷によるエネルギー分解能の低下（電荷注入により一時回復）などが挙げられます。一方のHXDでも、打ち上げ直後のヒートパイプ（片系）の機能喪失、一部のPIN検出器のリーク電流の増加がありました。「すざく」の観測性能は、内之浦宇宙空間観測所に常駐している「すざく」の追跡担当者の速やかな異常事態の通報と、それをうけての各検出器チームの応急処置、引き続いて行われたキャリブレーションという不断的努力によって維持されてきました。

一方の共通系においても、ジャイロ스코ープのノイズの増加、データレコーダーの一部メモリ領域の損傷など、いくつかの軽微な故障に見舞われてきました。しかしそれよりもはるかに深刻だったのは、太陽電池パドル（SAP）経年劣化です。図7に、SAP発生電力の履歴を年ごとに示します。

SAPの発生電力は打ち上げ後6年間は、太陽電池セルの経年劣化による年率マイナス20W程度の低下で踏みとどまっていたましたが、7年目に入った辺りで急激な低下が起き、9年目に入って

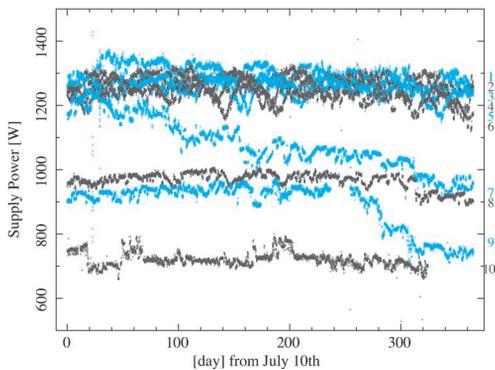


図7 太陽電池パドル (SAP) の発生電力の経年変化. 打上げ日の2005年7月10日を基点として, SAPの発生電力を1年ごとに表示している.

半年ほど経った2014年1月9日に、電力不足により、共通系と必要最小限の姿勢制御機能だけを残して他の機器の電源を自動的に切る節電モード (Under Voltage Control mode; UVC mode) に落ちてしまいました。このとき、もう一つの悲劇が同時に起こります。それはUVCで負荷の減った蓄電池が衛星日照中に過充電になるという事象でした。1月22日に、充電途中で電流を強制的に絞るという決断 (実は打ち上げ後一度も試したことがないオペレーションでした) を下すことでようやく過充電状態から脱却しましたが、このときに蓄電池にかなりのダメージがあったと推定されています。

その後、衛星の電力収支をにらみながら慎重に機器の再立上げが行われ、1月29日にXIS, 2月15日にHXDが立ち上がり、いったんは観測機能を完全に回復しました。しかし、ほっと胸をなで下ろしたのも束の間、2014年4月から7月にかけて、またしてもSAPの発生電力が900 Wから700 Wに急降下してしまいました (図7)。追い討ちをかけるように8月末には片系の蓄電池の一部のセルがショート故障しました。総発生電力の不足と、夜間電力の不足に陥った「すざく」は、9月半ば以降、基本的にXISのみでの観測を行い、HXDは日照条件の良い時期に限って電源を

入れるという運用に切り替えざるをえなくなりました。

それから9カ月の間、運用チームによる必死の運用が続けられてきましたが、欲張って立ち上げる観測装置の数を増やし過ぎるとUVCに落ち、さりとて電力を使わないと蓄電池の過充電、という板挟み状態で9カ月も人力運転を続けられたのは、奇跡と言ってもよいと思います。しかし遂に今年の6月1日、完全に衛星電源が落ちた状態で内之浦上空に帰ってきました。UVCモードよりも、さらにひどい状況です。さまざまな復帰の可能性を探り続けましたが、7月24日に、ついに2系統ある蓄電池の片系が、充電も放電もできない状態になりました。残りの片系の蓄電池では、ポインティング観測を行う電力を賄うことができません。ここに至って、プロジェクトチームは、2015年8月20日をもって、「すざく」の観測運用終了を宣言することとしました。「すざく」満10歳1カ月と10日 (実働は9年10カ月あまり)。これは、過去、X線天文衛星として最も長生きだった先代の「あすか」 (実働期間7年5カ月) をしのぐ最長記録となりました。

5. そしてASTRO-Hへ

X線は大気で吸収されてしまいますので、地上での観測はできません。観測衛星を上げ続けることは、X線天文学の生命線です。日本のX線グループは「すざく」による観測と並行して、2008年10月から、次世代X線天文衛星ASTRO-Hの開発を続けてきました。間もなく、2015年度内に打ち上げる予定です。ここには、XRSの再挑戦として、さらに進化を遂げたX線カロリメーター (Soft X-ray Spectrometer; SXS) が搭載されます。チャンドラ衛星やXMM-ニュートン衛星にも、CCDカメラより高いエネルギー分解能をもつ観測システム (HETG/LETGとRGS) が搭載されていますが、それらは回折格子 (grating) を利用しているため、基本的に、空間的に広がった天

体を観測することはできません。これに対してSXSは非分散型の検出器なので、点源でも拡散光源でもOK、相手は選びません。しかも数キロ電子ボルトより高いエネルギーでは集光面積もエネルギー分解能もSXSのほうがはるかに優れています。ASTRO-HのSXSによって、宇宙X線プラズマの分光学にブレークスルーがもたらされることは間違いありません。ASTRO-Hについては、本特集の高橋忠幸さんの記事をご覧ください。私も、ASTRO-Hでは一兵卒に戻ったつもりで、筑波宇宙センターのクリーンルームでせっせと働いています。冒頭の肖像写真はその証です（銀行強盗でも給食のおじさんでもありません）。今度こそカロリメーターによる観測を実現したいというのは、世界中のX線天文学者の熱い思いです。「すざく」の見果てぬ夢をASTRO-Hで実現できるよう、チーム一丸となって奮闘中です。

謝 辞

「すざく」の製作、打ち上げ、運用にかかわったすべての方々に感謝いたします。

「すざく」の観測天体は、国際公募に基づく競争によって選ばれました。その際、X線観測をご専門としない天文学会員の皆様にも、観測・理論を問わず、広く応募書類の審査をお願いしました。毎年12月から1月の最も忙しい時期の審査であったにもかかわらず、お願いしたほとんどの皆様が快くお引き受けくださいました。「すざく」チームを代表し、この場をお借りして、皆様方に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 2) Serlemitsos P. J. S., et al., 2007, PASJ 59, S9
- 3) Kelley R. L., et al., 2007, PASJ 59, S77
- 4) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, 23
- 5) Takahashi T., et al., 2007, PASJ 59, 35
- 6) Kokubun M., et al., 2007, PASJ 59, 53
- 7) Harrison F. A., et al., 2013, ApJ 770, 103
- 8) Cronin J. W., 1999, Rev. Mod. Phys. 71, S165
- 9) Uchiyama Y., et al., 2007, Nature 449, 576
- 10) Werner N., et al. 2013, Nature 502, 656

The X-ray Astronomy Satellite *Suzaku*— Status since the Launch

Manabu ISHIDA

*Institute of Space and Astronautical Science,
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara
252-5210, Japan*

Abstract: The X-ray astronomy satellite *Suzaku* was launched on 2005 July 10th from Uchinoura Space Center with the 6th M-V rocket developed by the Institute of Space and Astronautical Science. Although *Suzaku* has been faced with some difficulties, such as the loss of the main instrument X-ray spectrometer at a very initial phase, the other scientific instruments have been functioning as expected and producing a number of unique results. This article summarizes history and current status of *Suzaku*.