

受賞者の研究歴と研究業績

2011 年度 第 4 回宇宙科学奨励賞授賞者

◎ 宇宙理学関係

理化学研究所 基礎科学特別研究員
勝田 哲 氏 (1980年生)

研究題目：X線による超新星残骸の観測的研究

X線天文学は、主に現在軌道上で稼働中のアメリカのX線天文衛星「チャンドラ」、ヨーロッパの「XMM-ニュートン」、日本の「すざく」を用いた分光・撮像観測によって大きく進展している。「チャンドラ」は角分解能が最も優れており(0.5秒角)、「XMM-ニュートン」は有効面積が最も大きく、「すざく」は低エネルギー側の感度が優れていることが特長である。焦点面検出器は何れもX線CCDであり、エネルギー分解能は同等である。勝田哲氏は、分光・撮像観測に最も適した超新星残骸(SNR)を対象として、膨大な観測データを緻密な解析によってその観測的研究を進め、大きな業績をあげた。SNRは、距離と年齢の違いによって数分角〜数度の広がりを持ち、超新星爆発の衝撃波によって加熱された数百万〜数千万度の高温プラズマからの熱放射であり、連続成分と各種元素の輝線からなるX線スペクトルを示している。その周辺部では、非熱的放射(シンクロトロン放射)も観測され、宇宙線の加速機構を解く鍵を握っている。X線の分光・撮像観測はSNRの物理を解明する上で重要である。

SNRはX線望遠鏡の視野に比べて広がっているものが多く、その全体像を観測するためには、複数回のポインティング観測が必要になる。勝田氏は、これらのデータを合成し、スペクトル解析と撮像解析を軸に、以下に示す多岐にわたる顕著な研究成果をあげた。

1. 「チャンドラ」、「XMM-ニュートン」両衛星の高い空間分解能を活かし、近傍のSNRの膨張率を世界に先駆けて測定し、SNRのダイナミクスを明らかにした。

初めに手がけたのはベラジュニア(RXJ0852.0-4622)である。このSNRは1998年にドイツのX線天文衛星「ローサット」によって発見され、同時にガンマ線衛星「コンプトン」による観測で⁴⁴Tiの崩壊に伴うガンマ線(半減期60年)の検出が報告された。SNRからのガンマ線の検出はカシオペアAに続いて2例目であり、多くの研究者から高い関心を集めた。観測されたガンマ線強度から⁴⁴Ti量が見積もられ、元素合成モデルから予測される爆発時の量を比較することによって、SNRの年齢が680年と推定された。ところが、このSNRに付随すると考えられるコンパクト星の年齢は数千年と見積もられており、その差が疑問として残されていた。勝田氏は、「XMM-ニュートン」によってベラジュニアの北西端が6.5年間に4回(2001, 2003, 2005, 2007)観測された画像データを解析することによりその膨張率が 0.84 ± 0.23 秒角/年であることを明らかにした。SNRの膨張率は年齢とともに低下することを利用して、その年齢が1700-4300年であると推定し

た。この年齢とすると、 ^{44}Ti の爆発時の生成量が桁違いに大きくなるにもかかわらず、それによる X 線の輝線が「すざく」で観測されなかったことからガンマ線の検出が見誤りであったという重要な結論を導いた。実際に、ガンマ線データの再解析では有意な検出が得られていない。さらに、この手法を用いて年齢の判っているケプラーやティコ SNR の膨張率を「チャンドラ」の画像データの精密解析により導出し、X 線と他の波長との観測値に矛盾のないことを明らかにした。また、SNR からの非熱的放射の代表格である SN1006 について、膨張率を精度よく測定するとともに、周辺部のガス密度を初めて導出した。これは TeV ガンマ線の起源を探る上で重要なパラメーターである。

2. SNR における爆発破片（エジェクタ）の詳細な分布を測定し、それらが非対称に飛散していることを観測的に見いだした。

重力崩壊型超新星の爆発のメカニズムは、長年にわたる数値計算の多大な努力にも関わらず、未だ解決されていない天文学上の大問題である。このような状況の中で、超新星 SN1987A でエジェクタが非対称に分布することが明らかになり、注目を浴びている。数値計算では、非対称分布は爆発を促すセンスに働くことが判り、爆発メカニズムを解く鍵と考えられている。多くの研究者が超新星に注目する中で、勝田氏は、SNR に着目し、大きく広がった SNR、ベラ、白鳥座ループ、パピス A の大規模な解析を行った。ベラでは、「XMM-ニュートン」で観測されたその周辺に見える広がった X 線構造を詳細に解析した。この構造は超新星の爆発時に弾丸のように飛び散った星の破片ではないかと推測されていたが、スペクトル解析によってその証拠を明らかにした。また、白鳥座ループを「すざく」で観測し、ループ内部に広がるエジェクタの分布が非一様であることを見いだした。「チャンドラ」と「XMM-ニュートン」で観測されたパピス A では、スペクトル解析によりエジェクタが偏って分布していることを示すと同時に、そこからの輝線がドップラーシフトしていることを発見した。この SNR においては、コンパクト星の固有運動が測定されており、その運動が反対方向であることが判明した。このことは、爆発時に反跳したことを示しており、爆発のメカニズムの解明に重要である。この事実は今後の研究の大きなテーマである。

3. SNR から電荷交換反応 (CX) による X 線が放射されていることを世界で初めて示した。

白鳥座ループ（大きさ 2.8 度）の外縁の衝撃波領域を「すざく」によって全域にわたって 28 回の分光・撮像観測を行い、X 線構造とスペクトルを導出した。その中で、外縁部の衝撃波領域に熱放射では説明のつかない輝線構造を見いだした。その起源が水素様酸素と中性水素電荷交換反応 (CX) に伴う放射であるとの新しい放射過程を提唱した。この成果は、勝田氏が膨大な観測データの解析をする中で培った経験と知識、深い洞察力、さらに CX の放射過程の深い考察によるものであり、衝撃波物理及び宇宙線加速機構への理解が深められると期待される。

以上のように、勝田氏は、観測データに対する鋭い着眼点と優れた解析能力により、SNR 研究の最前線を切り拓いてきた。今後、X 線天文学の観測的研究をリードする研究者になると期待される。これらの優れた業績により、勝田哲氏に、第 4 回（2011 年度）宇宙科学奨励賞を授与されることとなりました。

◎ 宇宙工学関係

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙探査工学研究系 助教
小林 大輔 氏 (1976年生)

研究題目：宇宙機用LSIの動作を阻害する放射線パルスノイズの解明とモデル化

宇宙機の情報処理を担う半導体集積回路 LSI においては、宇宙空間に飛び交う放射線の影響に対処することが従来から重要な課題であるが、小林大輔氏は、近年新しい放射線障害として出現した SET (Single Event Transient) と呼ばれるパルスノイズに関して、その解明とモデル化の研究に取り組み、大きな業績を挙げた。

年々複雑化し高度なものとなる宇宙機において、そのミッション達成のために LSI の高性能化は欠かせない。また、その際、高い信頼性の確保は必須のことである。LSI における放射線の問題（信頼性低下要因）として古くから知られているものは、トータルドーズ効果、シングルイベント・アップセット、シングルイベント・ラッチアップ等であるが、2000 年頃から、新しい異常メカニズムが問題となってきた。LSI の高性能化の目標は動作速度を上昇させることと言えるが、速度の上昇に伴って、論理演算素子に、放射線により 1 ナノ秒を切るような短いパルスノイズが発生し、それが LSI の動作を阻害することが分かってきた。この短いパルスノイズは SET パルスと呼ばれる。

小林大輔氏は 2005 年に宇宙科学研究所宇宙探査工学研究系助教に着任し、当時、宇宙科学研究所において進められていた絶縁膜上シリコン基板（SOI 基板、SOI は Silicon-on-Insulator の略）を用いた宇宙機用高性能 LSI の開発との関わりから、SET パルスの問題に取り組むこととなった。その頃、国内はもとより、世界的にみても、パルスの性質や発生の機構等は未知で、SET パルスの幅を示すいくつかの実験結果が報告されていた程度であった。SET パルスに関する理解は LSI システムの信頼性を議論できるレベルには遠く及ばない状況にあった。小林氏は、同氏が既に持っていた LSI の構造や動作メカニズムの本質に関する深い理解をもとに、SET パルスの実態を明らかにすることに取り組み、その結果、SOI 基板を対象に、SET パルスの波形の全貌を明らかにするとともに、パルスの特性を決める物理機構を解明した。また、素子の応答を高速・高精度で推定する、実用性の高い方法を確立した。

物理機構の解明に関しては、推薦業績関連論文の 1 編に詳述されているものであるが、SET パルスの時間幅に関する解析的モデルを作ることが重要、との考えのもとに、SOI CMOS (Silicon-on-Insulator Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor) を対象として、デバイスシミュレータを用い、そこに数々の物理モデルを取り込んで、波形の導出を行った。その波形において、ピーク（論文では負極性パルスとして扱われている）に平坦部分があることが特徴であることが分かり、その平坦部の時間幅を、トランジスタの理論をもとに定式化し、特に、その時間幅が放射線エネルギー付与量の対数に比例することを示した。モデルの検証は、シミュレータとともにパルスレーザ照射実験（放射線照射と等価の実験が可能）を用いてなされた。パルス幅が放射線エネルギー付与量の対数に比例する、すなわち放射線エネルギー量の増大に対して飽和傾向を示すというこの理論的定式化は、宇宙環境における素子の使用を評価する上での重要な知見となっている。

SET パルスの波形の推定、さらには全波形の観測には多くの工夫が凝らされ、それらの成果は、別の関連論文および氏本人によるレビュー論文の中に見ることができる。前者では MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) を対象として電圧波形を推定 (測定) する方法を提案し、事例として、CMOS インバータおよび nMOSFET に重粒子線が当たった際に発生する SET パルスの電圧波形を、デバイスシミュレータを用いて、具体的、詳細に推定している。さらに後者の中では、全波形観測について論じ、”Monitoring transistor technique” と名付けた方法の紹介を行うとともに、その方法により、SOI CMOS インバータにパルスレーザ光を照射 (前記同様放射線照射と等価) して得られた SET パルスの全波形 (この全波形を載せたオリジナルの論文は D. Kobayashi, et. al., *IEEE Trans. Nuclear Science*, 2008) を記載している。これらをもとに確立された SET パルスの大きさ、幅などを高精度、高速で推定する方法は、LSI の設計技術上、大きな工学的価値をもつものと見なされる。

小林氏の業績は多くの国内外学会での発表に見ることができるが、特に *IEEE Transactions on Nuclear Science* に SET パルスに係わる 13 篇の査読付き論文の発表 (内 5 篇で筆頭著者) があること、しかもそれらの出版が 2006 年から 2010 年の間という短期間であることから、筆者の研究者としての資質・実力の卓越さ、研究を展開発展させる能力の大きさ、などを知ることができる。小林氏の研究内容は内外の研究者が広く認めるところとなっており、例えば、当該分野の二つの主要な国際会議である IEEE NSREC (IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference) 及び RADECS (Conference on Radiation Effects on Components and Systems) のそれぞれにおいて、表彰選考委員に選ばれ、従事している。また、SET パルスによる障害は地上で使われる民生用 LSI でも問題となってきたことから、同氏は国内大学研究者等から相談を受けることが多く、それらの研究者との共同研究も行われている。

このように、小林大輔氏は、宇宙機用 LSI において新たな課題として登場した放射線パルスノイズに関して独創的で優れた研究を行い、高く評価できる成果を挙げた。同氏は、今後、宇宙用デバイス技術等の分野でさらなる研究業績を積み、わが国の宇宙工学の発展にリーダーシップをもって貢献していく研究者となると期待される。以上のことから、小林大輔氏に、宇宙工学関係として第 4 回 (2011 年度) 宇宙科学奨励賞を授与されることとなりました。