

## X 線天文衛星「すざく」による 超新星残骸 RCW86 での宇宙線加速の系統的研究

坪根義雄、馬場彩、澤田真理（青山学院大学大学院 理工学研究科）

### Abstract

超新星残骸の衝撃波は宇宙線の加速源の候補として重要である。しかし、どのような環境で粒子が加速しやすいかは解明されていない。その鍵になるのが X 線である。残骸の衝撃波面で加速された粒子は、磁場の周りを回転し、シンクロトロン X 線を放射する。一方、衝撃波周囲のガスは加熱され高温プラズマとなり、熱的 X 線を放射する。これらを観測すれば、加速粒子とその周辺環境を調べることができる。

超新星残骸 RCW86 は、衝撃波面でのシンクロトロン X 線放射から高エネルギー電子の存在が知られる若い残骸である。我々は、X 線天文衛星「すざく」による合計 6 観測のデータを用いて、残骸全面を 44 の小さな領域に分割し、領域ごとにスペクトル解析を行った。その結果、残骸全域にわたり熱的放射とシンクロトロン X 線放射の強度分布を得た。

### 1 Introduction

宇宙線とは、宇宙から地球に降り注いでくる高エネルギー粒子のことである (Hess 1912)。そのエネルギースペクトルは図 1 のように折れ曲がりのある単純なべき関数で表される。ASCA によるシンクロトロン X 線放射の発見で、数 10 TeV までの電子については銀河系内の超新星残骸の衝撃波面で加速していることが明らかになった (Koyama et al. (1995))。さらに、Chandra を用いた衝撃波面の詳細イメージは、非常にコンパクトな領域で加速が起こっていることを示した (Bamba et al. (2003))。

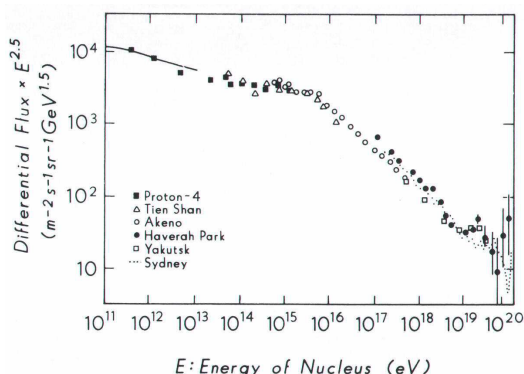


図 1: 宇宙線エネルギースペクトル [Sokolsky (1989)]

宇宙線の加速メカニズムは Diffusive Shock Accel-

eration (DSA: Bell (1978)) で記述され、スペクトルをよく再現している。しかしどれくらいの割合の粒子が DSA に注入されるのかは未だ分かっていない。その割合（加速効率）は周辺環境によって変わる可能性があるが、これまで加速効率と周辺環境との関連を調べた研究はあまりなかった。

RCW86 は銀経 315.4 度、銀緯  $-2.5$  度に位置する系内の超新星残骸である (Stephenson & Green (2002))。視直径は約  $1^\circ$ 、距離は約 1 kpc と見積もられている。Naranan et al. (1977) により、はじめて X 線放射が発見され、比較的低いプラズマ温度 (約 0.5 keV) から古い残骸だと考えられていた。しかし、Chandra/XMM-Newton の観測で約 3.0 keV のより高温なプラズマが検出され、現在では歴史的超新星 SN185 の残骸 (年齢約 2000 年) であると考えられている (Vink et al. (2006))。

この残骸の X 線スペクトルは高温プラズマからの熱的 X 線と加速電子からのシンクロトロン X 線の両方を示している (Yamaguchi et al. (2008))。シンクロトロン放射強度は加速電子の密度に比例し、熱的 X 線強度は加熱された周囲のガスの密度の 2 乗に比例する。したがってこれらを比較することで、どのような場所で効率よい加速が行われているかを明らかにできる可能性がある。

本発表の目的は、RCW86 における加速効率と周

辺環境の関係を検証することである。そのため、すざく衛星 (Mitsuda et al. (2007)) 搭載の X-ray Imaging Spectrometer (XIS: Koyama et al. (2007)) で取得した RCW86 全域のデータを系統的に解析した。

## 2 Observations

本研究では「すざく」衛星の XIS により観測された合計 6 領域の観測データを使用した。表 1 は使用データについて簡単にまとめたものである。また、各観測の視野を図 2 の白線に示した。

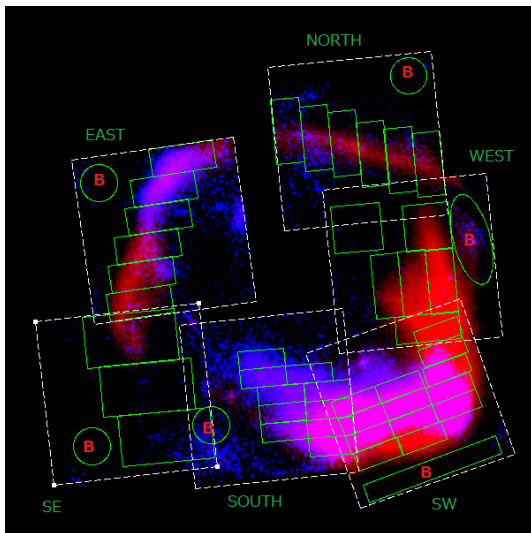


図 2: すざくによる各観測の位置 (白の破線)。赤で示したものは 0.5–2.0 keV のバンドイメージで、青で示したものは 3.0–5.0 keV のバンドイメージである。スペクトル解析において用いる領域わけを緑の実線で示した。その中に B とあるものは background としてとった領域である。

表 1: 「すざく」衛星による RCW86 の観測データ

領域	観測日	有効時間 [ks]	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	XIS の台数
SW	2006-02-12	100.8	220.28	-62.68	4
EAST	2006-08-12	59.8	221.26	-62.36	4
NORTH	2009-01-29	55.4	220.50	-62.21	3
SOUTH	2009-01-31	54.8	220.83	-62.67	3
SE	2009-02-01	53.5	221.39	-62.67	3
WEST	2009-02-02	53.6	220.28	-62.43	3

XIS は X 線 CCD であり、X-ray Telescope (XRT: Serlemitsos et al. (2007)) と組み合わせて 0.2–12.0 keV での撮像分光を行う。すざくには 4 組の XIS-XRT が搭載されていて、4 台の XIS のうち 3 台 (XIS0,2,3) は表面照射型素子 (FI) を、残る 1 台 (XIS1) は裏面照射型素子 (BI) を用いている。BI は低エネルギー X 線に対して、FI は 2 keV 以上の高エネルギー X 線に対して検出効率が高い。この特性と、優れたエネルギー分解能 ( $\sim 130$  eV at 6 keV (FWHM))、XRT の大きな有効面積 ( $440$  cm<sup>2</sup> at 1.5 keV) のおかげで、熱的放射と比熱的放射の両方に対して高い感度を持ち、本研究に最適である。

## 3 Analysis

解析には HEAsoft version 6.12 を用いた。スペクトル解析には XSPEC version 12.7.1 を使い、xismfgen および xissimarfgen (Ishisaki et al. (2007)) で作成した応答関数 (rmf および arf ファイル) を使用した。非 X 線バックグラウンドは xisnxbgen (Tawa et al. (2008)) を用いて見積もった

### 3.1 Image

熱的放射と非熱的放射の空間分布を捉える目的でバンドイメージを作成した。まず、0.5–2.0 keV および 3.0–5.5 keV で各観測ごとにイメージを抽出した。このエネルギーバンドで分けるのは、過去の観測で得られたスペクトルにおいて、2 keV 以下では熱的成分が、これより上では非熱的成分が卓越しているからである (Vink et al. (2006))。次に、X 線の輝度分布を正確に得るため、それぞれ NXB を差し引き、全観測をあわせた上で、xissim でシミュレートした flat field で規格化した。これにより用いた XIS の台数の違い、exposure の違い、および望遠鏡の vignetting 効果を補正した。以上のように補正した RCW86 全域のイメージが図 2 である (0.5–2.0 keV : 赤色・3.0–5.0 keV : 青色)。これを見ると熱的放射と非熱的放射の分布が異なり、おおよそ反相関していることが分かる。

### 3.2 Spectra

イメージが示唆する 2 つの成分の反相関をより定量的に検証するため、図 2 のように残骸全域を 44 の小さな領域に分割してスペクトル解析を行った。バックグラウンドスペクトルは、その空間変動や観測性能の時間変化による系統誤差を最小化するため、観測ごとと同じ視野内から抽出した。スペクトル例として EAST の 1 領域のスペクトルを図 3 に示す。

バックグラウンドを差し引いたスペクトルを用いて放射強度を測定した。熱的放射強度は He 状 Si の  $K\alpha$  輝線 (1.86 keV) を用いて評価した。1.75–2.0 keV の範囲で、連続成分 (主に制動放射) を現象論的に表現したべき型関数及び輝線放射を表すガウス関数でフィッティングを行った。一方シンクロトロン X 線放射強度は、3.0–5.0 keV の積分強度で評価した。この範囲でべき型関数を用いてスペクトルをフィットし、flux を求めた。

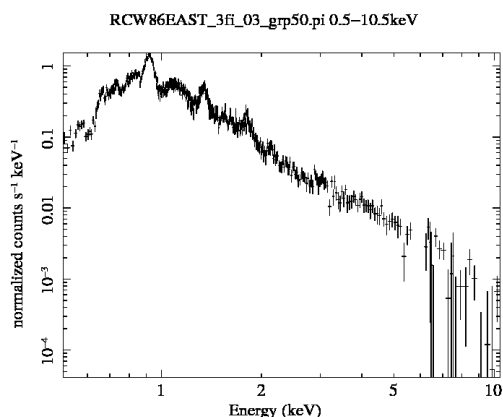


図 3: EAST のスペクトル例 (0.5–10.5 keV)

## 4 Results and Discussion

スペクトル解析で、RCW86 の全域にわたって熱的放射と非熱的放射の強度分布を得た。しかし、この領域分けでは大きさの違う領域を取っている。その影響をなくすために熱的放射強度と非熱的放射強度を各領域の大きさに規格化した表面輝度 (Surface Brightness) を考える。

図 6 に領域毎の非熱的放射と熱的放射の輝度の比較を示す。ここで、横軸に熱的放射表面輝度を、縦

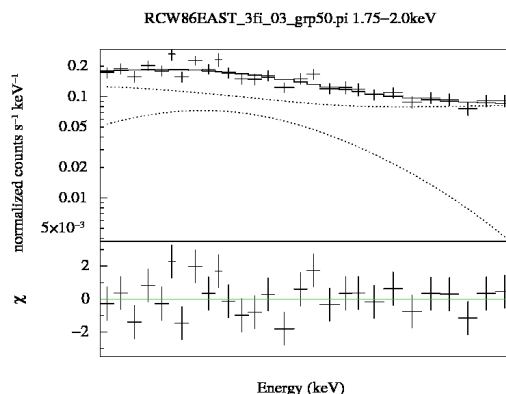


図 4: EAST のスペクトルフィット例 (1.75–2.0 keV)

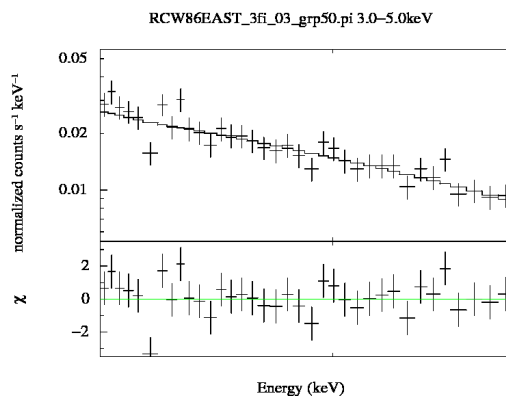
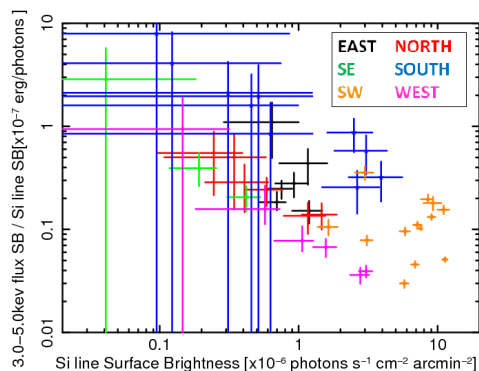


図 5: EAST のスペクトルフィット例 (3.0–5.0 keV)

軸には熱的放射輝度で規格化した非熱的放射表面輝度を取り、ともに対数軸でプロットしている。熱的放射が暗い場所ほど、非熱的放射が卓越している傾向がある。対数変換したうえで相関係数を計算したところ  $-0.72$  となり、熱的放射と、熱的放射で規格化した非熱的放射の間には有意な反相関があることが分かる。今後、この反相関の物理的な背景を検討していく。

## Acknowledgement

本研究において用いている、すざく衛星の素晴らしいデータを提供してくださいました、すざくチームの皆様には感謝いたします。その他にもさまざまな観測データ、解析ソフトによって本研究は成り立っています。JAXA、NASA をはじめとする、X 線天文学



Yamaguchi, H., Koyama, K., Nakajima, H., et al. 2008, PASJ, 60, 123

Tawa, N., Hayashida, K., Nagai, M., et al. 2008, PASJ, 60, 11

図 6: RCW86 全域における立体角の違いを補正したプロット

関係者の皆様にお礼を申し上げます。

## Reference

Hess V.F. 1912, Phys. Zeits 13, 1084

Naranan, S., Shulman, S., Yentis, D., Fritz, G., & Friedman, H. 1977, ApJL, 213, L53

Bell, A. R. 1978, MNRAS, 182, 147

Sokolosky, P. 1989, Frontiers in Physics, Vol. 76.,

Koyama, K., Petre, R., Gotthelf, E. V., et al. 1995, Natur, 378, 255

Stephenson, F. R., & Green, D. A. 2002, Historical supernovae and their remnants, by F. Richard Stephenson and David A. Green. International series in astronomy and astrophysics, vol. 5. Oxford: Clarendon Press, 2002, ISBN 0198507666, 5,

Bamba, A., Yamazaki, R., Ueno, M., & Koyama, K. 2003, ApJ, 589, 827

Vink, J., Bleeker, J., van der Heyden, K., et al. 2006, ApJL, 648, L33

Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, PASJ, 59, 1

Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. 2007, PASJ, 59, 23

Serlemitsos, P. J., Soong, Y., Chan, K.-W., et al. 2007, PASJ, 59, 9

Ishisaki, Y., Maeda, Y., Fujimoto, R., et al. 2007, PASJ, 59, 113