

# 「あかり」がとらえた超新星と 超新星残骸

左 近 樹<sup>1</sup>・具 本 哲<sup>2</sup>

〈<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: isakon@astron.s.u-tokyo.ac.jp

〈<sup>2</sup> Astronomy Program, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea〉



左近



具

大質量星の終焉である超新星爆発によって、恒星内部で合成された重元素を含む豊かな物質が宇宙空間に放出されます。爆発に伴う衝撃波は宇宙空間のダストを破壊する一方、ある程度の高密度環境で冷えたガスによって新たなダストが生み出されると考えられています。本稿では現在も活躍を続ける「あかり」衛星の観測に基づく超新星爆発そして超新星残骸におけるダストの形成と破壊のバランスを観測的に明らかにする試みについて紹介します。

## 1. はじめに

宇宙の星間空間には原子ガスや分子ガスのほかに、数ナノメートルから数マイクロメートルあるいはそれ以上の大きさの固体微小粒子が漂っています。それらは星間ダストと呼ばれ、宇宙空間のさまざまな固体物質の始原体であると同時に、その表面での有機物分子の合成などを通じて現在の化学的に豊かな宇宙を形作るために重要な役割を担っていると考えられています。星間ダストは、主として星の放つ紫外線光子を吸収し、数十度  $K$  から場合によっては一時的に数百度  $K$  以上にまで温められ、その結果、赤外線波長域に放射を担うようになります。星間ダストの種類には、炭素質のアモルファスカーボンや、ケイ素質のシリケートをはじめ、さまざまな組成のものが報告されており、それらは同じ温度でも、組成によって、また結晶状態やサイズによって、異なる赤外線スペクトルの放射を示します。そのため、赤外線の分光観測は、ある天体の環境にどのような種類のダストがどのような物理環境のもとで存在してい

るのか探るために必要不可欠な情報を与えてくれると言えます。

それでは、星間ダストは、宇宙空間において、どのように誕生し、どのような一生を経るのでしょうか？ 一般的には、星間ダストの形成場所として、進化した星の周囲における質量放出ガス中のダストの凝縮や、冷たい分子雲中での粒子成長などが考えられていますが、これらのダストの形成、成長過程の詳細についてはまだ観測的に十分には理解されていません。

なかでも最終的に重力崩壊型超新星に至るような 8 太陽質量より重い星は、主系列寿命は低金属量環境下においても数千万年と短く<sup>1)</sup>、恒星進化の過程で合成した重元素を含む物質を最も早く宇宙空間に供給できる源として重要な役目を担っています。実際に赤方偏移  $z \sim 6$  の遠方のクエーサーにおいてダストの熱放射が観測されて以来<sup>2)</sup>、大質量星によるダスト形成の過程は宇宙初期のダストの起源を探るために注目されるようになりました。

大質量星によるダスト形成の主要な過程の一つ

に、超新星爆発による放出ガス中でのダスト凝縮が挙げられます<sup>3)~5)</sup>。実際に、これまでの観測に基づく研究から、いくつかの重力崩壊型超新星に対して、その爆発からおおよそ1年後を境に、放出ガスがダストの凝縮温度にまで冷えてダストが形成されることが報告されています。したがって、爆発直後から数年以内の超新星の継続的な赤外線観測によって、可視光の減光の情報と併せて、時々刻々とダスト形成の様子を調べることが可能になります。特に、こうした早期段階では放出ガス中で凝縮したダストがまだ高い温度を維持しているため、既存のダストと区別しながらそれらの素性を調べることができるため、ダストが形成される詳細な過程を観測的に理解できると期待されます。

一方、系内あるいはマゼラン雲などごく近傍銀河の超新星残骸からは、爆発的な質量放出現象から数百年から数千年経過した状態を調べることができ、質量放出時の大気外層の元素組成の情報だけでなく、星周空間で形成されたダストが星間空間中へ還元されていく初期の過程を知るために極めて重要な対象となります。多くの場合、数百年の経過の末には超新星爆発時に形成されたダストは十分に冷めてしまうため、温度の差異をもとに既存のダストと新たに放出ガス中で凝縮したダストを分離することが容易でなくなり、ダスト放射の空間構造の情報から、比較的長い時間スケールでのダストの形成と変性の過程に迫ることが可能になります。

筆者らは、赤外線天文衛星「あかり」を用いて、これまでに近傍銀河に起こったいくつかの爆発後1年以内の超新星や系内あるいはマゼラン雲中の超新星残骸の近赤外から中間赤外線観測を行い、現在も近赤外観測によってこれらのテーマに取り組んでいます。本稿では、これらの取り組みの中から最近得られたいくつかの観測成果を紹介します。

## 2. 超新星爆発で放出されたガス中におけるダストの誕生

超新星 2006jc は 25.8 Mpc<sup>6)</sup> の距離にある銀河 UGC4904 で起こった Ib 型超新星で、2006 年 10 月 9.75 日 (UT) にアマチュア天文家の板垣公一さんによって発見されました。爆発後約 50 日後において、近赤外放射の増光が報告され<sup>7)</sup>、ほぼ時期を同じくしてドップラーシフトによる長波長側の成分が欠けて非対称になった He I 再結合線が観測されるようになりました<sup>8)</sup>。このことから、超新星 2006jc の放出物質中で新たにダストが形成され、放出ガスの遠ざかる成分を遮蔽するようになった、ということが示唆されるようになりました。実際に、国立天文台のすばる望遠鏡や広島大学のかなた望遠鏡によって超新星爆発以降継続的に行われた可視光の観測からも、超新星が爆発後 2 カ月を境に急速に暗くなり、半年後の時点ではすばる望遠鏡でやっととらえられる程度にまで暗くなる様子が報告され、超新星爆発に伴う放出ガス中でのダスト形成をサポートする結果が得られました。そこで、筆者らは赤外線放射の性質をより詳しく調べるために、「あかり」衛星搭載の近・中間赤外線カメラ (IRC) を用いて、爆発後約 220 日に当たる 2007 年 4 月 28 日にプロジェクトマネージャー裁量時間の枠組みの中で、近・中間赤外測光および分光観測を行いました。その結果、図 1(a) のように、赤外線でも明るく光を放つ超新星 2006jc の姿が確認され、超新星周囲で熱放射を行うダストをとらえることに成功しました<sup>9)</sup>。

「あかり」衛星による近・中間赤外線測光データ、近赤外線分光データに加えて、同時期に東京大学の MAGNUM 望遠鏡によって取得した近赤外線測光データを用いて、より詳細に赤外線放射の性質を調べ、その担い手としてアモルファスカarbonやアストロノミカルシリケート、シリカなどを含むいくつかの候補物質の可能性を吟味しました。その結果、図 1(b) に示すように、近赤外

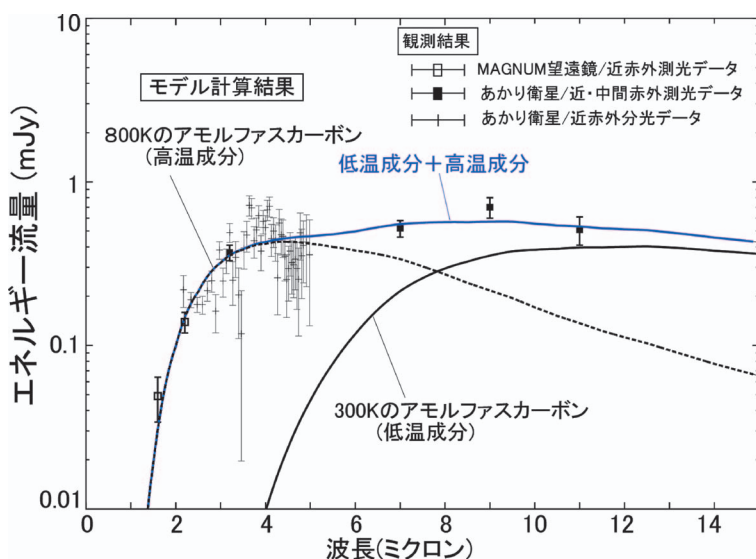
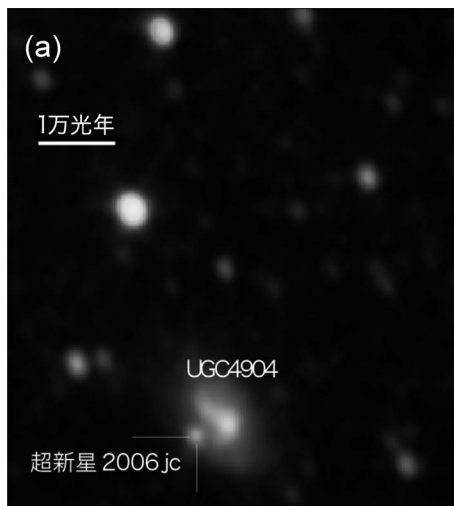


図1 (a): 「あかり」衛星搭載の近・中間赤外線カメラ (IRC) がとらえた爆発から約 220 日後の超新星 2006jc および母銀河 UGC4904 の姿。赤外線でも明るく輝く超新星 2006jc の姿がとらえられており、終焉を迎えた超新星周囲で誕生した塵の熱放射がとらえられている。  
 (b): 「あかり」衛星と MAGNUM 望遠鏡による観測で得られた、超新星爆発から約 220 日後の超新星 2006jc の近・中間赤外線測光・分光データ。図中の青色実線は、観測データを最もよく再現する塵の熱放射のモデル計算の結果を表す。約 800 K の高温のアモルファスカーボンの塵 (黒色破線) に加えて、約 300 K の比較的低温のアモルファスカーボンの塵 (黒色実線) の存在が明らかになった。

波長域の放射は約 800 K のアモルファスカーボン (以下、高温成分) で説明されると結論できました。同時に、中間赤外域にはその成分だけでは説明しきれない超過放射が存在し、こちらを説明するためには約 300 K のアモルファスカーボン

(以下、低温成分) が必要となることがわかりました。さらに、放出ガス中での塵の凝縮にかかわる理論計算との比較研究から、高温成分は超新星爆発に伴う放出ガスをもとに新たに誕生した塵であり、低温成分は超新星爆発以前に放出された物質

によってすでに形成され超新星を遠巻きに覆っていた既存の塵だろうという結論に至りました。超新星放出ガス中で新たに凝縮したアモルファスカarbonの総質量は $7 \times 10^{-3} M_{\odot}$ で、過去に報告されたいくつかのダスト形成を伴う超新星の場合と同様に小さいものでした。初期宇宙のダスト量を説明するために、典型的な重力崩壊型超新星1個当たりが供給しなければならないダスト量とは、依然として3~5桁の大きなギャップがあります。一方で、今回の観測からは少なくとも $3 \times 10^{-3} M_{\odot}$ に上るアモルファスカarbonが超新星爆発前の星周空間に存在していたという結果が得られました<sup>9)</sup>。これらの結果と最新の恒星進化モデルとの比較から、超新星 2006jc の親星は誕生当初太陽の40倍程度の質量をもった大質量星で、進化の途上において激しい質量放出を経たのちに超新星爆発に至り、超新星爆発時点では太陽の7倍程度の質量になっていたことがわかりました<sup>10)</sup>。こうした描像が大質量星の進化に普遍的なものであるのかどうかは、現時点ではまだ定かではありませんが、少なくとも本研究の結果から

は、太陽の数十倍の質量をもつ大質量星が、超新星爆発の際だけでなく、それ以前の進化過程においても、塵の形成に寄与するという重要な示唆が得られました<sup>9)</sup>。

### 3. 超新星爆発前における星周ダストの存在

「あかり」衛星は液体ヘリウムを使いきった2007年8月以降もN2(2マイクロメートル)、N3(3マイクロメートル)、およびN4(4マイクロメートル)バンドによる近赤外撮像観測と、2-5マイクロメートルの分光機能で活躍を続けています。そのなかで、筆者らは比較的近傍の銀河に起きた超新星の爆発後半年以内の近赤外観測を観測するプロジェクトを進めており、そのうちのいくつかの超新星において超新星爆発前の星周ダストによる赤外超過を検出することに成功しています。例えば、超新星 2008ax はIIb型超新星で<sup>11)</sup>、2008年3月3.45日(UT)に9.8 Mpcの距離にある母銀河NGC4490に発見されました。筆者らは、「あかり」衛星搭載の近・中間赤外線カメラ

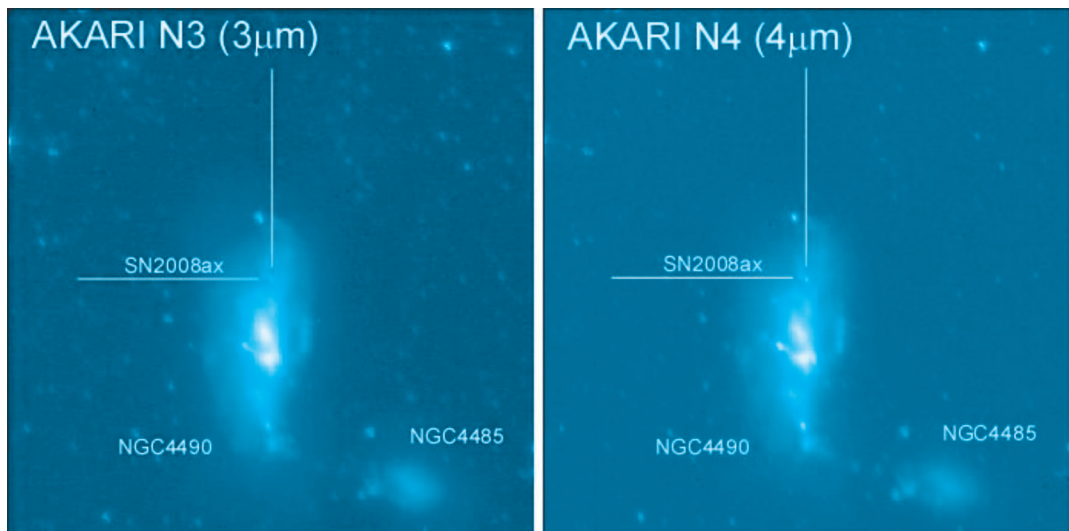


図2 「あかり」衛星搭載の近・中間赤外線カメラ(IRC)がとらえた爆発から約98日後の超新星2008axのN3(3マイクロメートル)バンドによる画像(左)とN4(4マイクロメートル)バンドによる画像。測光の結果、N3 band強度は $0.33 \pm 0.03$  mJy、N4 band強度は $0.41 \pm 0.03$  mJyと得られ、星周ダストの熱放射に由来する赤外線超過が示唆される。

(IRC) を用いて、爆発後約 98 日に当たる 2008 年 6 月 9 日に、プロジェクトマネージャー裁量時間の枠組みの中で、この超新星 2008ax の近赤外測光および分光観測を行いました。その結果、赤外線では明るく輝く超新星 2008ax の姿をとらえ、顕著な赤外線超過を検出しました(図 2 参照)。超新星 2008ax の可視の光度曲線は、He-rich IIb 型超新星 1996cd や 1993J と類似しており、OB 型星との連星系をなす主系列質量が  $10\text{--}14 M_{\odot}$  の Wolf-Rayet (WR) 星であると考えられています<sup>11)</sup>。こうした WR 連星系の多くは、両恒星風の衝突によって密度が濃くなり星からのエネルギーが遮蔽された場所でのダスト形成が示唆されており、超新星爆発前の段階で豊かな星周ダスト環境を有することが期待されます。ひとたび超新星爆発が起こると、それらの一部は蒸発してしましますが、生き残ったダストは暖められて赤外線では明るく光るようになります。今回「あかり」衛星がとらえた赤外線では明るく光る超新星 2008ax の姿も、こうした既存の星周ダストの赤外線再放射をとらえたものと解釈できますが、同時に取得した近赤外分光データの詳細な解析や今後の継続的なデータ取得によって、既存のダストの組成の解明や総質量に対する制限、超新星爆発に伴うダスト形成のプロセスについての理解が得られることが期待されます。

#### 4. 「あかり」によって解き明かされる大マゼラン雲中の超新星残骸の素顔

前節までは超新星爆発直後の星周環境を扱ってきましたが、本節では超新星爆発からもう少し長い時間が経過した環境を扱います。超新星爆発は、近傍にある比較的頻度の高い銀河の場合、通常 100 年間に数回程度起こっていますが、われわれに最も近い銀河である大マゼラン雲においても、40 個以上の超新星爆発の痕跡が電波や X 線の観測を基に報告されています。こうした天体は超新星残骸と呼ばれ、爆発後数十年程度のもことから、数千年以上経過したもので、さまざまなものがあります。

大マゼラン雲はわれわれの銀河から 51.4 kpc という極めて近傍の距離にあるため、「あかり」衛星の高い空間分解能をもってすれば、大マゼラン雲中のこれらの超新星残骸の詳細な構造を赤外線でも調べることが可能になります。「あかり」衛星は南黄極付近にある大マゼラン雲について、近中間赤外線カメラ (IRC) による広域撮像サーベイ観測を行い、N3 (3 マイクロメートル)、S7 (7 マイクロメートル)、S11 (11 マイクロメートル)、L15 (15 マイクロメートル)、L24 (24 マイクロメートル) の五つの赤外線撮像バンドで 10 平方度に及

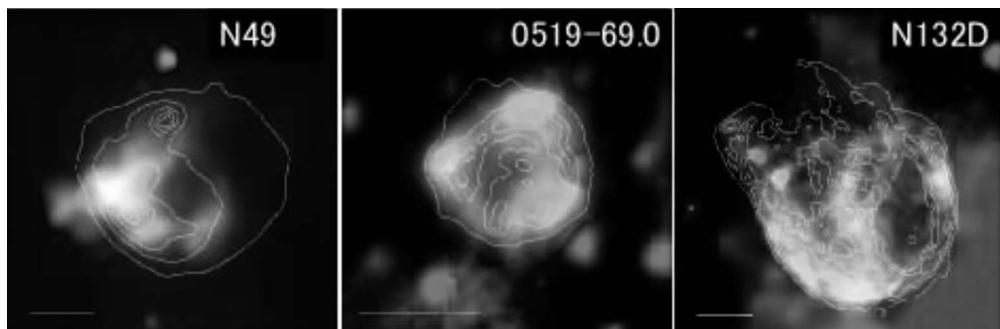


図 3 「あかり」衛星搭載の近・中間赤外線カメラ (IRC) がとらえた大マゼラン雲中の超新星残骸 0519-69.0, N49, N132D の中間赤外線での姿。白色の等高線は NASA の X 線衛星 Chandra によって観測された X 線の強度を示す。各画像のスケールバーはそれぞれ 20 光年の投影距離に対応する。

ぶ領域の詳細な構造をとらえました。この領域の中には21個の超新星残骸が含まれており、そのうち八つの天体から中間赤外線の放射を検出することに成功しました<sup>12)</sup>。例えば、図3はこのうちN49, 0519-69.0, N132Dという三つの超新星残骸について、「あかり」衛星がとらえた中間赤外線での姿です。画像では、超新星爆発の衝撃波によって掃き寄せられた星周物質が球殻状の構造をなしている様子がしっかりと確認できます。また、赤外線の放射を放つ球殻状の構造が、Chandra衛星によって観測された0.3から2.1 keVのエネルギー範囲の軟X線強度の分布と極めて良い相関を示すことがわかり、そのうちいくつかのターゲットについては赤外線放射の正体がX線を放つプラズマによって加熱されたダストからの熱放射によって説明されることがわかりました<sup>12)</sup>。

超新星爆発によって大量のエネルギーと星の内部の核融合反応でできた新しい元素が宇宙空間にまき散らされ、同時に星からはるか離れたところにまでその爆発に伴う衝撃波が伝搬し周囲の物質をかき乱すため、超新星残骸は星間空間中の物質にとって最も躍動的な天体現象の一つであり、ダストの破壊過程を含めて星間物質の進化に非常に大きな影響を及ぼすイベントであると考えられます。一方で、本研究で検出された超新星残骸に付随する温ダストの存在から、超新星爆発の衝撃波で破壊されるダストの量は、これまでの観測から見積もられていた量より少ない可能性が示唆されました。さらなる研究により、宇宙進化のタイムスケールで大質量星が結果としてどのように星間塵の供給に寄与するかを明らかにすることが期待されます。

## 5. おわりに

このように、「あかり」衛星は、超新星爆発そして超新星残骸におけるダストの形成と破壊のバランスを観測的に明らかにする試みに対して、重要な貢献を果たしており、現在もなお、新たに起き

る超新星爆発の近赤外観測データをわれわれに届けてくれています。特に、こうして得られる2-5マイクロメートルにかけての連続した近赤外分光データは、当面「あかり」衛星のみが取得能力を有する極めて重要な財産であるといえます。大質量星の壮絶な最期に際して、1マイクロメートルにも満たないダストに新たな命が吹きこまれ、一方でその衝撃波によって一部は再びガスに戻り、また一部は星間ダストとして豊かな宇宙を形作っていくシナリオを理解することは、いつの日かわれわれが宇宙に存在するゆえんを知るための一つのヒントになるかもしれません。

## 謝辞

本稿で取り扱った内容は、ESAおよび韓国との協調の下にJAXAのプロジェクトである赤外線天文衛星「あかり」の観測に基づく研究成果です。本稿は、筆者らのほか、Ji Yeon Seok氏らによって進められた研究の成果を含みます。筆者らは、「あかり」プロジェクトの全メンバー、特に超新星という不定期なターゲットにもかかわらず観測計画の調整に尽力してくださった臼井文彦氏、本研究の観測のうち「あかり」プロジェクトマネージャー裁量時間の観測の実行に際して特にお世話になったプロジェクトマネージャーの村上浩教授、松原英雄教授、超新星残骸の観測を含む星間物質のミッションプログラムの取りまとめをしてくださった金田英宏准教授、本研究の解析や議論に際してお世話になった尾中敬教授、山村一誠准教授、和田武彦氏、大山陽一氏、大藪進喜氏、石原大助氏そして現在も日々の運用を支えてくださっている多くの方々に心より感謝いたします。また、特に本共同研究に際して有益なコメントなどを下さった野本憲一教授、富永望氏、田中雅臣氏、鈴木知治氏、梅田秀之准教授をはじめとする超新星の理論グループの方々、ダスト形成の理論計算の結果を中心に重要な助言をくださった野沢貴也氏、小笹隆司教授に感謝いたします。

また、あかりの観測と同期して地上観測によるデータの取得に尽力して下さった峰崎岳夫氏、吉井 讓教授ら MAGNUM 望遠鏡グループの方々、川端弘治准教授らをはじめとする広島大学かなた望遠鏡のグループの方々に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Portinari L., Chiosi C., Bressan A., 1998, A&A 334, 505
- 2) Bertoldi F., et al., 2003, A&A 406, L55
- 3) Kozasa T., Hasegawa H., Nomoto K., 1991, A& A 249, 474
- 4) Todini P., Ferrara A., 2001, MNRAS 325, 726
- 5) Nozawa T., et al., 2003, ApJ 598, 785
- 6) Pastorello A., et al., 2007, Nature 447, 829
- 7) Arkharov A., et al., 2006, The Astronomer's Telegram 961, 1
- 8) Smith N., Foley R. J., Filippenko, A. V., 2008, ApJ 680, 568
- 9) Sakon I., et al., 2009, ApJ 692, 546
- 10) Tominaga N., et al., 2008, ApJ 687, 1208
- 11) Chornock R., et al., 2008, central Bureau Electronic Telegrams 1298, 1
- 12) Seok J. Y., et al., 2008, PASJ 60, S453

### Infrared Observations of Supernovae and Supernova Remnants with AKARI

Itsuki SAKON<sup>1</sup> and Bon-chul KOO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

<sup>2</sup> *Astronomy Program, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea*

Abstract: Chemically-rich materials synthesized in the interior of progenitors are ejected into the interstellar space by supernova explosions. Shock waves associated with the supernova explosions are supposed to destroy the interstellar dust and, there again, the cooled ejecta gas may condense into fresh dust in somewhat high density environment. In this article, we plan to introduce the latest results on our attempts to demonstrate the dust formation and destruction scenario by supernovae and supernova remnants based on AKARI observations.