

## 超新星 2009kr の親星探索

佐藤匡史<sup>1</sup>、島ノ江純<sup>1</sup>、山岡均<sup>1</sup>、鳴沢真也<sup>2</sup>、圓谷文明<sup>2</sup>、石田俊人<sup>2</sup>

1)九州大学理学部

2)兵庫県立西はりま天文台

## Search of the progenitor of Supernova 2009kr

Tadafumi SATO<sup>1</sup>, Jun SHIMANOE<sup>1</sup>, Hitoshi YAMAOKA<sup>1</sup>, Shin-ya NARUSAWA<sup>2</sup>,  
Fumiaki TSUMURAYA<sup>2</sup>, Toshihito ISHIDA<sup>2</sup>

1)Faculty of Sciences, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

2)Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan

E-mail: sato@phys.kyushu-u.ac.jp

(Received 2010 September 13)

### Abstract

We observed supernova(SN) 2009kr in a barred-spiral galaxy NGC 1832 through an Ic filter with the MINT imager of the NAYUTA telescope, and compared the data with the archival images taken by the Hubble Space Telescope(HST) to search for the progenitor of SN 2009kr. Although it couldn't be found determinably on the archival data, a somewhat spread source was marginally seen just under the detection limit. We discussed the nature of this source, and of the referred object by Li et al. (2009), Elias-Rosa et al. (2009), and Fraser et al. (2010).

**Key words:** photometry – supernova: individual (SN 2009kr) – supernova: progenitor – astrometry – relative

### 1. はじめに

超新星とは、恒星がその進化の最終段階に引き起こす大規模な爆発現象である。超新星はスペクトルなどの観測情報により分類でき、大まかにはスペクトルに水素線が顕著に見られない I 型と、水素線が特徴的な II 型に分けられる。さらに I 型のうち、スペクトルにケイ素の吸収線が最も目立つものは Ia 型、ケイ素線は弱くヘリウム線が強いものは Ib 型、ケイ素もヘリウムも弱いものは Ic 型に分類される。また、超新星爆発の仕組みは大きく 2 種類あると考えられている。近接連星系をなす白色矮星に伴星からのガスが降着し、中心密度が大きくなり核反応が暴走して爆発する核爆発型と、恒星の進化の最後に星の中心が重力崩壊を起こし、星全体が爆発する重力崩壊型である。前者は Ia 型超新星、後者は II 型、Ib 型、Ic 型等として観測される。

超新星爆発のメカニズムは完全には解明されていないため、親星の検出によって爆発前の星の情報を直接得ることは、超新星理解のための重要な手段となる。例えば Maund et al. (2009) は、II 型超新星 SN 1993J、SN 2003gd に関して、出現前の画像と爆発後数年して撮影された画像を比較することで、位置的に超新星の

親星と考えられる赤色超巨星が爆発後の画像では検出されなかったことを確認し、II型超新星が通説通り赤色超巨星から誕生することを明らかにした。

親星の検出法として、超新星の爆発前後の画像に天体位置カタログを用いて座標を与えて親星を特定する絶対位置測定法と、両方の画像を比較することで爆発前の画像から親星を見いだす相対位置測定法が挙げられる。近年は望遠鏡の大型化、高性能化や観測データのデジタル化に加え、世界各地の天文台が保存、公開している膨大な量のアーカイブデータへのアクセスを容易にするバーチャル天文台 (VO) の開発が進められており、親星探索のための環境が整いつつある<sup>1</sup>。親星が特定されれば、見かけの明るさや色が分かり、距離などと組み合わせることで親星の質量等を推定することができる。また、親星が検出限界以下であっても、質量等の上限が得られる。これらにより超新星についての理解を深めることができる。

今回観測を行った超新星 2009kr は、2009 年 11 月 6.73 日 (世界時刻、以下同様) に板垣公一氏により発見された (Nakano et al. 2009)。同氏による発見時のフィルターなし CCD 等級は 16.0 等で、その位置は、赤経: 5 時 12 分 3.30 秒、赤緯:  $-15$  度 41 分 52.2 秒 (2000 年分点、以下同様)、母銀河はうさぎ座にある棒渦巻銀河 NGC 1832 であり、Koribalski et al. (2009) の報告では  $cz=1939(\text{km s}^{-1})$ 、redshift independent distance については Tully et al. (2009) が距離指数  $m - M=32.0\pm 0.40$  と報告している。銀河の腕の部分で観測されたことから、この超新星は星生成が盛んな領域で爆発したことが分かる。また Steele et al. (2009)、Tendulkar et al. (2009) により、この超新星が非常に青い連続スペクトルと狭い水素輝線を示す IIn 型超新星であることが報告された。よって超新星 2009kr の親星は若い大質量星であったと推定される。

以下 2、3 章では本研究に用いた画像について紹介する。また 4 章では親星の検出方法、5 章では明るさの測定について述べる。そして 6 章で解析結果を記し、7 章でそれを用いて議論を行う。

## 2. 撮像観測

西はりま天文台の 2 メートルなゆた望遠鏡を用いて、2009 年 12 月 6.63 日に撮像観測を行った。可視光撮像装置 (MINT) を用いて露光時間 60 秒でオブジェクトフレーム 1 枚を撮像した。当日は曇が出ており、可視光と比較して散乱されにくい赤外線では撮像するために Ic フィルターを用いた。ピクセルスケールは  $0''.28/\text{pix}$  であった。

## 3. アーカイブ画像

撮像画像との比較には、NASA のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2) で 2008 年 1 月 11 日に異なるバンドで撮像された 2 枚のアーカイブ画像を用いた。各画像は STScI (Space Telescope Science Institute) サイト内の MAST (Multimission Archive at STScI) から入手した<sup>2</sup>。波長帯はそれぞれ F555W (中心波長 5439 nm)、F814W (中心波長 8012 nm) で、露光時間は 230 秒 (F555W)、350 秒 (F814W)、ピクセルスケールはともに  $0''.1/\text{pix}$  であった。

<sup>1</sup> 例えば日本では Japanese Virtual Observatory (JVO) が稼働している (<http://jvo.nao.ac.jp/>)。

<sup>2</sup> Based on observations made with the NASA/ESA Hubble Space Telescope, obtained from the data archive at the Space Telescope Science Institute. STScI is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. under NASA contract NAS 5-26555.

## 4. 検出の方法

### 4-1. 絶対位置測定と相対位置測定

画像解析ソフト IRAF(Image Reduction and Analysis Facility)<sup>3</sup> を用いて、なゆた望遠鏡での撮像画像に bias、flat の一次処理を施し、アーカイブ画像と比較した。この際、天体位置カタログから画像中の星の赤道座標を特定し、画像内の星のピクセル座標  $(x, y)$  と組み合わせて画像の WCS(World Coordinate System) を求め、撮像画像での超新星の赤道座標を測定した上でアーカイブ画像での当該位置を求める絶対位置測定と、画像間に共通して写る星を手がかりに片方の画像を回転、拡大縮小し、新天体の位置におけるアーカイブ画像上の像を調べる相対位置測定の 2 種類がある。今回は両方の位置測定を行い、検出位置、精度にどれだけ差が出るかを確認した。

### 4-2. 絶対位置測定

絶対位置測定で WCS を撮像画像に与えるための星表として、アメリカ海軍天文台 (USNO) が作成した USNO-B1.0<sup>4</sup> を用いた。まず撮像画像に写っている点源の中から 25 個の恒星を選択してそれぞれの  $(x, y)$  を調べ、さらに USNO-B1.0 で対応天体の赤道座標  $(\alpha, \delta)$  を特定し、対応表を作成した。この対応表をもとに、IRAF の ccmmap タスクにより変換パラメータを作成し、ccsetwcs タスクによって撮像画像に WCS を与えた。アーカイブ画像については、WFPC2 ではあらかじめ画像中に WCS がセットされており、これをそのまま用いた。絶対位置測定における誤差の要因として、例えばカタログそのものの精度や変換式 (行列) の残差が挙げられる。例えば Monet et al. (2003) は USNO-B1.0 カタログ自体に  $0''.2$  の誤差が含まれていると報告している。

### 4-3. 相対位置測定

相対位置測定には IRAF の PSF(Point Spread Function) 測光用パッケージ DAOPHOT を用いた。具体的には画像上の光子分布の測定および PSF フィッティングによる光源の  $(x, y)$  の特定を行う imexam タスク、2 枚の画像に共通して写る天体の  $(x, y)$  から回転などの変換式を求める geomap タスク、その変換式を画像に対して実行する geotran タスクを実行した。相対位置測定を行う上で考慮すべき誤差として、 $(x, y)$  の測定における誤差、変換式の残差などが考えられる。これを推定するには、座標変換の関数を DAOPHOT の geomap タスクで求める際に計算される、撮像画像の  $(x, y)$  方向それぞれの測定値と変換値の二乗平均平方根 (RMS) を誤差とする。これは  $(x, y)$  スケールでの誤差に相当するため、RMS に画像のピクセルスケール ( $0''.28/\text{pix}$ ) をかけて、重ね合わせの誤差とした。

### 4-4. 検出

絶対位置測定、相対位置測定によってアーカイブ画像上での超新星の位置を求めた後、IRAF の imexam タスクを用いて親星探索を行った。親星の位置での光子カウント数の分布を imexam タスクで求め、そこに点源からのものと有意に認められるようなガウス分布があるかどうかを、ピクセルの広がり、FWHMなどを他の点源のものと比較して考察した。

<sup>3</sup> IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

<sup>4</sup> This research has made use of the USNOFS Image and Catalogue Archive operated by the United States Naval Observatory, Flagstaff Station (<http://www.nofs.navy.mil/data/fchpix/>).

## 5. 親星から得られる情報

### 5-1. 明るさ

アーカイブ画像から超新星の親星が検出された場合、その見かけの明るさを求めることができる。そのためには画像から光子カウント数を調べる必要があり、今回は IRAF の APPHOT パッケージから phot タスクを用いた。このタスクは光源と同時にその周囲 (スカイ領域) のカウント数も読み取り、光源から差し引いた値を得ることができる。これにより光源からの純粋な光子カウント数に近い数値が求められるので、正確な等級を計算することができる。あるカメラシステムで 1 秒間の露出で 1 カウントの信号を生じさせる天体の等級を等級原点 ( $m_{zp}$ ) とすると、露光時間  $T$ (s) の画像において、光子カウントが  $X$  である観測天体の見かけの等級  $m$  は

$$m = m_{zp} - 2.5 \log \frac{X}{T} \quad (1)$$

の関係式で与えられる。ここで  $m_{zp}$  は、既に等級が分かっている恒星 (標準星) を用いて求められる。すなわち、アーカイブ画像に写る標準星の光子カウント数と、同じバンドでの天体カタログ中での標準星の見かけの等級をそれぞれ上式の  $m$ 、 $X$  に代入することで、その標準星についての  $m_{zp}$  が計算できる。今回は標準星の等級として、絶対位置測定でも使用した USNO-B1.0 を用いて、アーカイブ画像に写る複数の標準星の  $m_{zp}$  を導出し、その平均を  $m_{zp}$  として用いた。なお、F555W に対応する V 等級はカタログから直接得ることはできなかったため、B1、R1 等級から

$$V = 0.444B1 + 0.556R1 \pm 0.5 \quad (2)$$

と変換した<sup>5</sup>。さらに観測天体までの距離が  $d$ (pc) のときの絶対等級  $M$  は、減光量  $A_\lambda$  を考慮して

$$m - M = 5 \log d - 5 + A_\lambda \quad (3)$$

となる。 $A_\lambda$  について、V および B バンドでの減光量をそれぞれ  $A(V)$ 、 $A(B)$  としたとき

$$E(B - V) = A(V) - A(B) \quad (4)$$

$$R_V = \frac{A(V)}{A(V) - A(B)} = \frac{A(V)}{E(B - V)} \quad (5)$$

が成り立つ。 $R_V$  は 2.6~5.5 までの幅をとるが、平均的には  $R_V=3.1$  が採用されており (Cardelli et al. 1989)、 $R_V=3.1$  での  $A_\lambda$  と  $E(B - V)$  の比が Schlegel et al.(1998) により推定されている。Schlegel et al.(1998) が求めた我々の銀河による超新星の母銀河方向の  $E(B - V)$  は NED(NASA-IPAC Extragalactic Database)<sup>6</sup> から入手することができる。NGC 1832 では  $E(B - V)=0.073$ (mag) である。

アーカイブ画像から親星が特定できなかった場合、親星の明るさが画像から検出することができる最も暗い等級 (限界等級) 以下であると考えられる。ここで限界等級は、画像全体の光子カウント数の平均 (imstat タスクより求めた) から  $3\sigma$  だけ大きな値を持つような光源の等級である。限界等級を用いることで、親星の明るさに上限をつけ、考察を進めることができる。上記の式を用いた結果、アーカイブ画像での限界等級は、F555W バンドでは 24.4mag、F814W バンドでは 25.1mag であった。

<sup>5</sup> John Greaves の結果より。吉田誠一氏の HP(<http://www.aerith.net/>) から引用。

<sup>6</sup> The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

## 5-2. 色

複数のバンドで撮像されたアーカイブ画像から親星が検出されると、その天体の色について情報が得られる。本解析では F555W、F814W の二種類のバンドのアーカイブ画像が入手できたため、色の指標である色指数は

$$E(F555W - F814W) = m_{F555W} - m_{F814W} \quad (6)$$

によって与えられる。短い波長での等級から長い波長でのそれを引いており、色指数が小さい天体は青く、大きくなるにつれ赤くなる事が分かる。

## 6. 結果

Fig. 1 に絶対位置測定、相対位置測定での解析結果を示す。(1) は撮像画像、(2) はアーカイブ画像 (F814W)、(3) はアーカイブ画像での検出位置の拡大図である。(3) を見ての通り、2 種類の位置測定における検出位置、誤差には違いが生じている。前項での解析の結果、親星の検出には至らなかった。詳細は以下の考察で論じる。

## 7. 考察

### 7-1. 絶対位置測定と相対位置測定の精度の差

Nakano et al. (2009) による超新星出現後の画像による測定と絶対位置測定で求めた赤道座標との比較を Table 1 に示す。Fig. 1(3) を見ると、絶対位置測定と相対位置測定で検出位置が異なっていることが分かる。どちらの検出法が高い精度を持っているかを比較すると、前者が天体位置カタログという媒介を通して撮像画像とアーカイブ画像を比較しているのに対して、後者では画像同士を直接比較している。このため相対位置測定の方が重ね合わせが正確に行われていると推定される。またアーカイブ画像に最初からセットされている赤道座標には、1'' 程度のずれがあることがしばしばある。Table 1 より、絶対位置測定による赤道座標位置は、十分な精度があったことがわかる。よって今回の差異は、アーカイブ画像における WCS の精度が悪かったことに起因するものと考えられる。以上から本研究では相対位置測定での検出位置を親星の位置であると判断し、以下に示すような解析を行った。

### 7-2. 推定位置付近のピクセル値の高まりについて

Fig. 1(c) から、相対位置測定による検出位置が周囲と比較して明るくなっていることを読み取ることができ。これが超新星 2009kr の爆発前の姿であるかどうかを考察する。Fig. 2 は Fig. 1(c) の範囲を imexam タスクにより光子カウント数の分布で表したものである。また Fig. 3(1)、(2) はこれを  $x$  方向、 $y$  方向から見た断面図である。それぞれをガウス分布にフィットさせたときの  $\sigma$ 、FWHM は順番に (1) で 2.83、6.66pixel、(2) で 1.08、2.54pixel である。よって  $\sigma$ 、FWHM の平均をとるとそれぞれ 2.14、5.04pixel となり、検出位置での光子カウント分布が約 10pixel の範囲にまたがって広がっていることを意味する。この広がり、アーカイブ画像上の光子カウント数が飽和していない点状の星の FWHM の平均である 3.34pixel と比較して、約 1.51 倍大きな値となっている。よってこの像は、もし真の天体であったとしても、点光源、つまり単独の親星ではなく、広がりを持つ星団もしくは HII 領域である可能性が高い。PSF の  $\sigma$  を 3.34pixel と仮定して解析すると、天体の広がり、すなわち 50pc 程度となる (距離については 1 章参照)。これは典型的な若い散開星団の大きさ (10pc 程度) より大きく、HII 領域 (直径 1~100pc) であると考えたと話が合う。

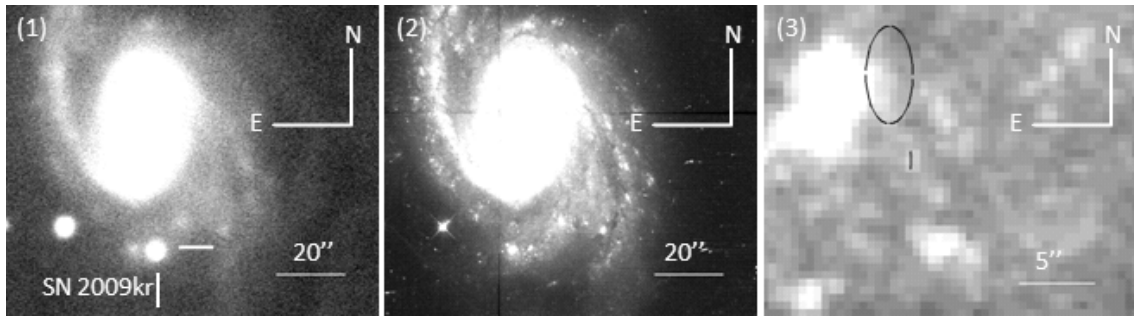


Fig. 1. (1) なゆた望遠鏡撮像画像 (Ic フィルター) 中の SN 2009kr。 (2)HST アーカイブ画像 (F814W) での SN 2009kr の位置。 (3) アーカイブ画像での SN 2009kr の位置の拡大図。大きい楕円は絶対位置測定についての検出位置の  $\sigma$  エラーサークル ( $0''.3 \times 0''.6$ )。小さい方の楕円は相対位置測定における  $3\sigma$  エラーサークル ( $0''.003 \times 0''.04$ )。

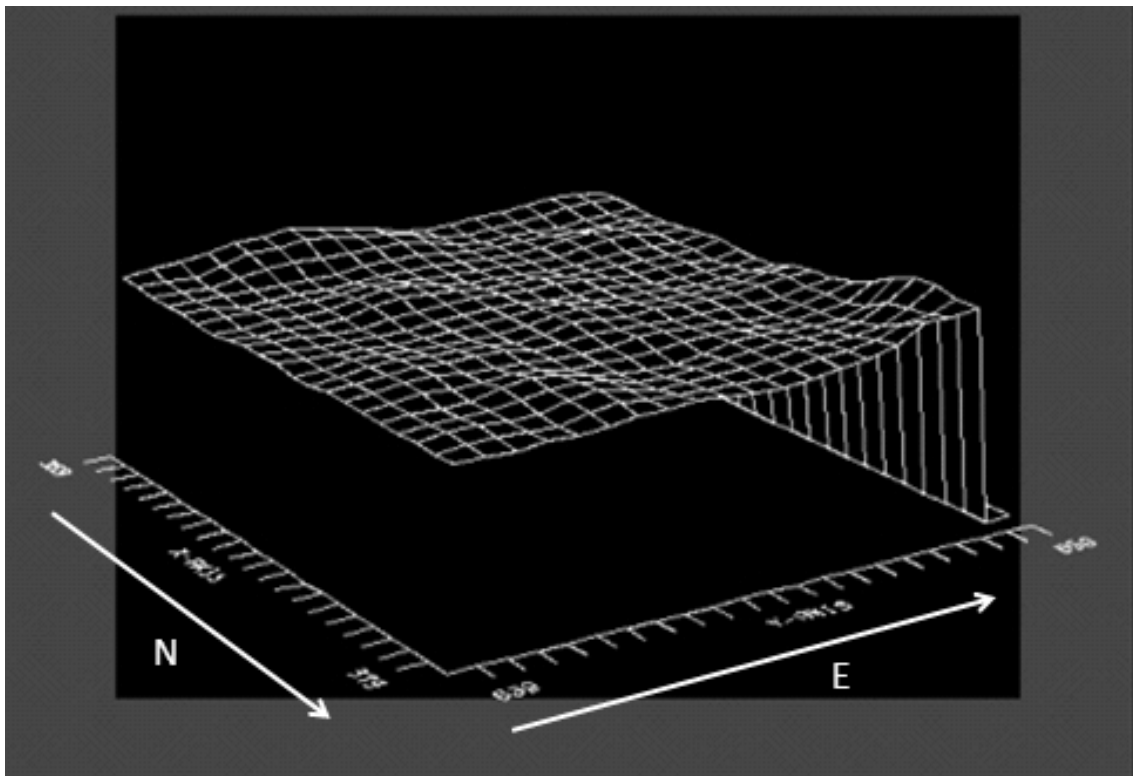


Fig. 2. 相対位置測定によるアーカイブ画像上での親星周辺の光子分布。中心が親星があると思われる位置。1目盛が  $0''.1$ 。

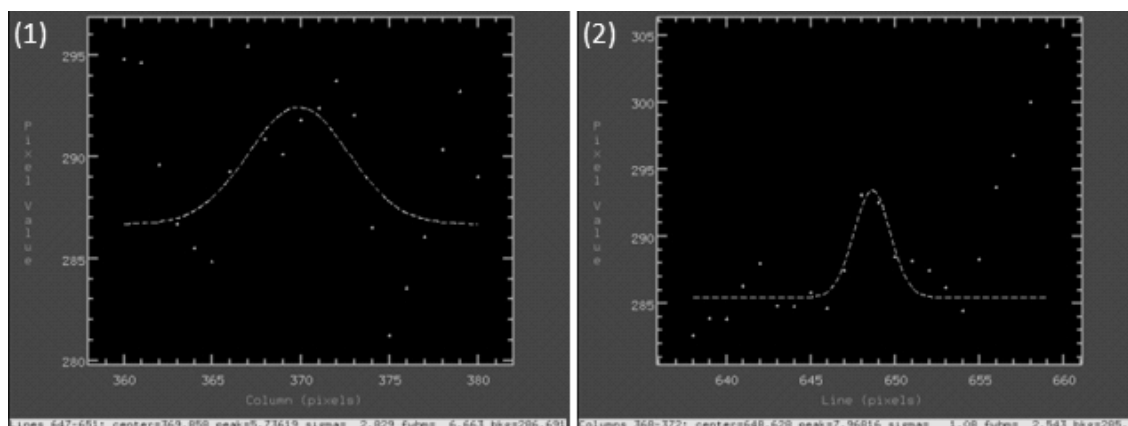


Fig. 3. (1)Fig. 2を親星を通るように  $x$  方向に切断した光子分布。 $\sigma=1.98$ 、FWHM=4.67。(2)Fig. 2を親星を通るように  $y$  方向に切断した光子分布  $\sigma=1.58$ 、FWHM=3.71。(a)(b) 共に横軸 1 目盛が  $0''.1$  で、縦軸が光子カウント数。

### 7-3. 等級、色指数

上記の親星推定位置付近の光源の見かけの等級は、UNSO-B1.0 自体の等級誤差 (Monet et al. (2003)) および光子カウント数の誤差を考慮すると F555W: $23.3 \pm 0.6$ (mag)、F814W: $21.9 \pm 0.3$ (mag) となる。1章で述べたように NGC 1832 の  $m - M$  は  $32.0 \pm 0.40$  と推定されており、我々の銀河の  $E(B - V)$  は 0.073 なので (5章)、絶対等級は F555W: $-9.0 \pm 0.7$ (mag)、F814W: $-10.2 \pm 0.5$ (mag) と求められる。この光度は、単独星と考えるのは困難であり、色指数は  $E(F555W-F814W)=1.4 \pm 0.5$  で、この拡がりを持つ領域は赤みがかかっていると考えられ、このことから、この光源は若く青い星団ではなく HII 領域であるという可能性が高い。

### 7-4. 他の研究との比較

Li et al. (2009)、Elias-Rosaet al. (2010)、Fraser et al. (2010) は、我々が使用したのと同じアーカイブ画像から親星検出を試みている。いずれの報告も、上述の光源を親星候補としているが、その測光値は我々の測定よりも 1 等級以上暗い (Table 2 を参照)。この不一致については原因不明である。一方、彼らは光源の広がりについては議論しておらず、更なる調査が望まれる。

## 8. まとめ

西はりま天文台での撮像観測により得られた画像から、超新星 2009kr について絶対位置測定、相対位置測定を用いて爆発前の姿の探索を行った。親星の特定には至らなかったが、それが含まれている HII 領域らしき天体を相対位置測定により推定することができた。

本研究のような解析に用いるアーカイブデータは本来は他の研究のために得られたものであるが、一度本来の目的に使用されたらそのまま使われなくなる場合が多い。また世界中の観測装置により日々得られるデータは膨大な量であるため、利用されないデータは溜まっていく一方である。アーカイブデータはもう二度と観測することができない過去の天体情報が含まれた貴重なものである。これを死蔵させることなく活用することで、天体現象への理解をより深めることができるであろう。

Table 1. 超新星 2009kr の位置を、本解析の結果と比較したもの。ただし相対位置測定では赤道座標は求めないため、絶対位置測定での検出位置を載せた。Nakano et al. (2009) は超新星出現後の画像による測定、Li et al. (2009) はアーカイブ画像上の光源の位置である。

	赤経	赤緯
Nakano et al. 2009	5 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 3 <sup>s</sup> .30	-15°41'52".2
Li et al. 2009	5 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 3 <sup>s</sup> .247	-15°41'53".10
this work	5 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 3 <sup>s</sup> .275	-15°41'51".84

Table 2. 報告された明るさを、本解析の結果と比較したもの。

	見かけの等級 (mag)		絶対等級 (mag)		色指数 (mag)
	F555W	F814W	F555W	F814W	
Li et al. 2009	—	23.6	—	-8.5	0.9
Elias-Rosa et al. 2010	—	—	-7.80±0.33	-8.75±0.32	0.95±0.21
Fraser et al. 2010	24.71±0.23	23.48±0.10	-7.62±0.55	-8.75±0.51	1.13±0.25
this work	23.3±0.6	21.9±0.3	-9.0±0.7	-10.2±0.5	1.4±0.5

## 《参考文献》

- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., Mathis, J. S., 1989, *ApJ*, **345**, 245
- Elias-Rosa, N., Van Dyk, S. D., Li, W., Miller, A. A., Silverman, J. M., Ganeshalingam, M., Boden, A. F., Kasliwal, M. M., Vinko, J., Cuillandre, J. C., Filippenko, A. V., Steele, T. N., Bloom, J. S., Griffith, C. V., Kleiser, I. K. W., Foley, R. J., 2010, *ApJ*, **714**, 254
- Fraser, M., Takats, K., Pastorello, A., Smartt, S. J., Mattila, S., M-T. Botticella, Valenti, S., Ergon, M., Sollerman, J., Arcavi, I., Benetti, S., Bufano, F., Crockett, R. M., Danziger, I. J., Gal-Yam, A., Maund, J. R., Taubenberger, S., Turatto, M., 2010, *ApJ*, **714**, 280
- Koribalski, B. S., Staveley-Smith, L., Kilborn, V. A., Ryder, S. D., Kraan-Korteweg, R. C., Ryan-Weber, E. V., Ekers, R. D., Jerjen, H., Henning, P. A., Putman, M.E., Zwaan, M. A., de Blok, W. J. G., Calabretta, M. R., Disney, M. J., Minchin, R. F., Bhathal, R., Boyce, P. J., Drinkwater, M. J., Freeman, K. C., Gibson, B. K., Green, A. J., Haynes, R. F., Juraszek, S., Kesteven, M. J., Knezek, P. M., Mader, S., Marquarding, M., Meyer, M., Mould, J. R., Oosterloo, T., O'Brien, J., Price, R. M., Sadler, E. M., Schroder, A., Stewart, I. M., Stootman, F., Waugh, M., Warren, B. E., Webster, R. L., Wright, A. E., 2004, *AJ*, **128**, 16
- Li, W., Filippenko, A. V., Miller, A. A., Cuillandre, J. C., Elias-Rosa, N., Van Dyk, S. D., 2009, *ATEL* **2312**
- Maund, J. R., Smartt, S. J., 2009, *Science*, **324**, 486
- Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B., Ables, H. D., Bird, A. R., Dahn, C. C., Guetter, H. H., Harris, H. C., Henden, A. A., Leggett, S. K., Levison, H. F., Luginbuhl, C. B., Martini, J., Monet, A. K. B.,



Search of the progenitor of Supernova 2009kr

Munn, J. A., Pier, J. R., Rhodes, A. R., Riepe, B., Sell, S., Stone, R. C., Vrba, F. J., Walker, R. L., Westerhout, G., 2003, *AJ*, **125**, 984

Nakano, S., Itagaki, K., Yusa, T., 2009, *CBET* **2006**

Schlegel, D. J., Finkbeiner, D., Davis, M., 1998, *ApJ*, **500**, 525

Steele, T. N., Cobb, B., Filippenko, A. V., 2009, *CBET* **2011**

Tendulkar, S. P., Kasliwal, M. M., Quimby, R., Kulkarni, S. R., 2009, *ATEL* **2291**

Tully, R. B., Rizzi, L., Shaya, E. J., Courtois, H. M., Makarov, D. I., Jacobs, B. A., 2009, *AJ*, **138**, 323