

## 超新星 2006jc: 高密度な星周物質をまとった大質量星の爆発

島田雅史<sup>1</sup>、高木俊邦<sup>1</sup>、山岡 均<sup>1</sup>、高妻真次郎<sup>1</sup>、内藤博之<sup>2</sup>

1)九州大学理学部

2)兵庫県立西はりま天文台

## Supernova 2006jc: Explosion of the massive star surrounded by dense circumstellar medium

Masafumi SHIMADA<sup>1</sup>, Toshikuni TAKAKI<sup>1</sup>, Hitoshi YAMAOKA<sup>1</sup>, Shinjiro KOUZUMA<sup>1</sup>,  
Hiroyuki NAITO<sup>2</sup>

1)Facility of Science, Kyushu University, Chuo-ku, Fukuoka, 810-8560, Japan

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

E-mail: shimada@gemini.rc.kyushu-u.ac.jp

(Received 2007 August 3)

### Abstract

We studied the progenitor of supernova (SN) 2006jc by photometry, spectroscopy and using the archival data such as Digitized Sky Survey (DSS). As a result, the progenitor possibly passed a Luminous Blue Variable (LBV) phase during its evolution. Moreover, the SN luminosity declined very quickly and strong X-ray emission was detected by *Swift* and it Chandra, both of which suggest that the progenitor had a lost almost all of its envelope. We discuss the property of SN 2006jc and its progenitor.

**Key words:** photometry – spectroscopy – supernova: individual (SN 2006jc) – supernova: progenitor

### 1. はじめに

超新星とは、恒星がその一生を終える際に起こす、大規模な爆発現象である。これらは極大期のスペクトルや光度曲線の特徴からいくつかの型に分類されており、大きく分けるとスペクトルに H が含まれない I 型と H が含まれる II 型とに分類される。さらに I 型の中で Si の吸収線が見られるものは Ia 型、Si が見えず、He の吸収線が見られるものは Ib 型、Si も He も見えないものは Ic 型とされている。II 型では、減光時の光度曲線に平坦な部分が見られる IIP 型や直線的に減光していく IIL 型、H の線幅が狭く、膨張速度が小さい II<sub>n</sub> 型などに分けられる。

Ia 型超新星は、連星系をなす白色矮星に伴星からガスが降着し、チャンドラセカール限界に達して中心部の核反応が暴走することで爆発が起きるものである。その他の型の超新星では、進化の最終段階で星の中心核が重力崩壊を起こし、星全体が爆発する。前者を核爆発型超新星、後者を重力崩壊型超新星と呼んでいる。

今回、観測を行った超新星 2006jc は 2006 年 10 月 9.752 日 (世界時、以下同様) に板垣公一氏によって発見された (Nakano et al. 2006)。発見等級はフィルターなしで 13.8 等、その位置は、赤経: 9 時 17 分 20.78 秒、赤緯: +41 度 54 分 32.7 秒 (2000 年分点)、母銀河はやまねこ座にある UGC 4904 (後退速度 = 1,640 km/s) であった。この超新星は線幅が狭い He 輝線が見えるなど特異なスペクトルや、非常に速い光度変化を示した。また、X 線による観測が *Swift*、*Chandra* によってなされ (Brown et al. 2006, Immler et al. 2006)、さらには爆発の 2 年前にも板垣氏によって増光が確認されていたというこれまでにない超新星である。これらの特徴について、我々の分光観測、測光観測の結果及び、アーカイブデータを用いて議論していく。

## 2. 観測

### 2-1. 分光観測

2006 年 10 月 13.80 日に西はりま天文台なゆた望遠鏡で分光観測を行った。観測機器は MALLS (可視光分光器)、スリット幅は 5"、グレーティングは 300gr/mm (低分散モード) である。分解能は  $16.5 \text{ \AA}$  ( $R = 400 @ \text{H}\alpha$ )、露光時間は 3600 秒で行った。

### 2-2. 測光観測

2006 年 11 月 29 日に西はりま天文台 60cm 望遠鏡に冷却 CCD カメラ (ST9)、reducer を装着して撮像観測を行った。CCD カメラの温度は  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、B、V、R、I フィルターを用い、露出時間は B フィルターで 300 秒、その他のフィルターで 180 秒とした。

## 3. 結果

### 3-1. 分光観測

図 1 に分光観測の結果を示す。細い He 輝線 ( $\text{FWHM} = 2,000\text{-}4,000 \text{ km/s}$ ) が目立つが (Benetti et al. 2006, Crots et al. 2006, Fesen et al. 2006)、青側に幅が広い吸収線と見られる構造もあり、輝線と吸収線が入り混じっているものと考えられる。 $\text{H}\alpha$  線をはじめとする H の輝線については全く見ることはできない。また、一般的な超新星に比べて blue continuum が非常に強いことも特徴として挙げられる。

He 輝線は超新星 2006jc からの ejecta と爆発前から親星の周りに存在していた星周物質の相互作用によって生じたものと考えられる (Matheson et al. 2000, Foley et al. 2007)。輝線の強度が強いことから、星周物質は高密度で大量のヘリウムを含んでいた可能性が高い。これは、ejecta と衝突した星周物質が非常に高温になったことで放射された X 線が、*Swift* や *Chandra* によって観測されたことから示唆されている。

輝線と吸収線の入り混じりについては、超新星の光度がたいへん明るかったことから、継続時間が長いガンマ線バーストに見られるような、非等方なジェットの爆発が起きたと推測される。

H の線が全く見えないことから、親星の外層や星周物質には水素が含まれていなかったことがわかる。非常に強い blue continuum の原因は、この超新星の色進化がたいへん特異なものであるため、色が必ずしも有効温度を反映したものとは考えにくい。その理解には、詳細なモデル計算が必要である。

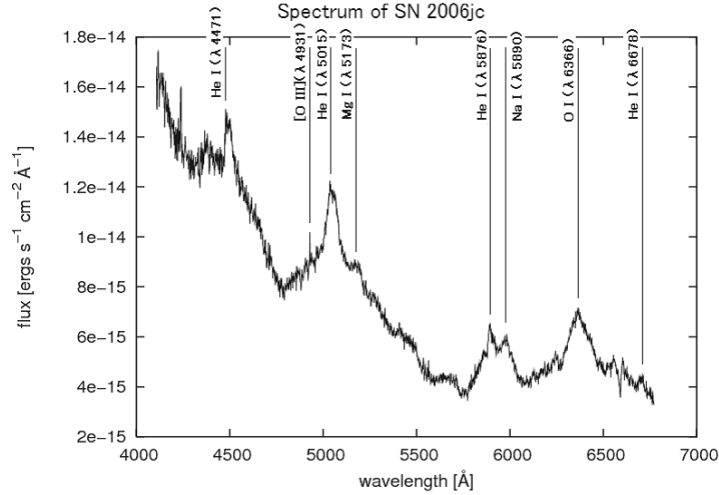


Fig. 1. Spectrum of SN 2006jc

### 3-2. 測光観測

得られたデータは画像解析ソフト IRAF<sup>1</sup> (Image Reduction and Analysis Facility) を用いて一次処理した後、IRAFに含まれる APPHOT パッケージを用いて測光を行った。APPHOT では指定した半径内のカウント数から等級を求めるため、星像がきちんと収まり、かつ母銀河からの contamination を受けないような適切な半径を指定する必要がある。そこで、半径を少しずつ変えながら測光を繰り返した結果、上述の条件を満たす半径として星像の FWHM の 1.5 倍の値を採用することが望ましいとわかった。さらに、APPHOT で求めた機械等級は観測装置や空の状況によって実際の等級とずれが生じるため、超新星周辺の比較星の等級を USNO-B1.0 カタログの等級に合わせることで補正した。今回用いた比較星は図 2 に示す 8 個の中から、各バンドごとに星像がガウス分布に近いものを選んだ。また、V 等級は USNO-B1.0 カタログには掲載されていないため、近似式

$$B - V = 0.556(B1 - R1) \quad (1)$$

を用いた (Greaves<sup>2</sup> 2003)。ただし、 $B$  は補正後の B 等級、 $B1$ 、 $R1$  は USNO-B1.0 カタログに掲載されている等級である。結果を表 1 にまとめる。

我々が求めた等級と、SNWeb に報告された等級から描いた光度曲線を図 3 に示す。横軸は発見日からの日数である。V 等級ではほぼ一致していたが、R 等級では 1 等ほどのずれが生じた。この原因として、観測当日の天候が安定していなかったことや、観測で用いた機器やカタログなどの違いが考えられる。

<sup>1</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>2</sup> [http://www.aerith.net/astro/color\\_conversion/JG/USNO-B1.0.html](http://www.aerith.net/astro/color_conversion/JG/USNO-B1.0.html)

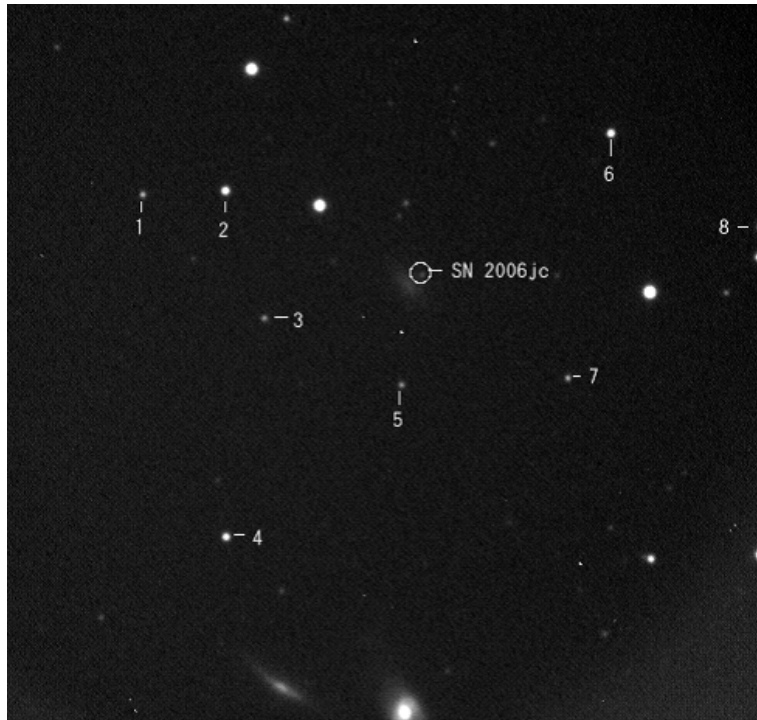


Fig. 2. Image of SN 2006jc and comparison stars

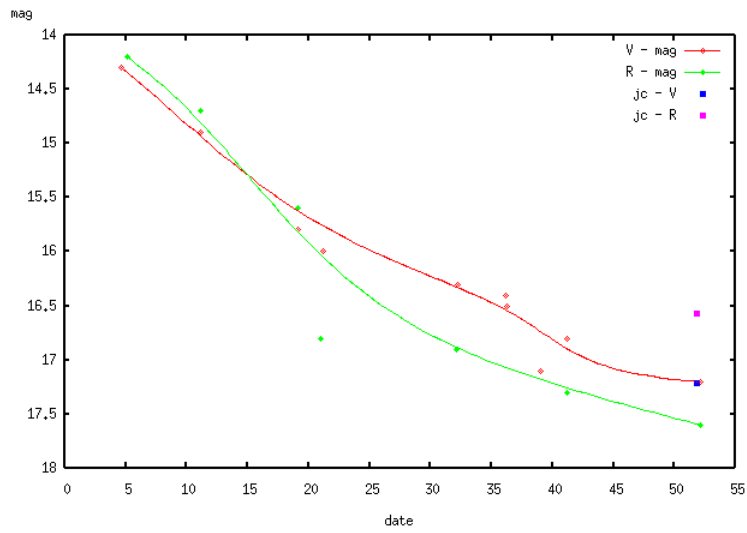


Fig. 3. Light curve from SNWeb and our observation  
(<http://www.astrosurf.com/snweb2/2006/06jc/06jcMeas.htm>)

Table 1. Photometry of SN 2006jc

B フィルター			
	機械等級 [mag]	カタログ等級 [mag]	カタログとの差
SN 2006jc	23.604	–	–
星 2	21.629	15.59	6.039
星 4	22.243	16.21	6.033
星 6	22.186	15.56	6.620
星 8	21.975	15.84	6.135
差の平均			6.128
超新星の等級 [mag]		17.47	

V フィルター			
	機械等級 [mag]	カタログ等級 [mag]	カタログとの差
SN 2006jc	23.734	–	–
星 1	22.843	16.30	6.543
星 3	23.149	16.57	6.579
星 4	21.618	15.22	6.398
差の平均			6.507
超新星の等級 [mag]		17.22	

R フィルター			
	機械等級 [mag]	カタログ等級 [mag]	カタログとの差
SN 2006jc	23.381	–	–
星 3	22.441	15.71	6.731
星 5	22.339	15.53	6.809
星 7	22.202	15.37	6.832
差の平均			6.811
超新星の等級 [mag]		16.57	

I フィルター			
	機械等級 [mag]	カタログ等級 [mag]	カタログとの差
SN 2006jc	23.096	–	–
星 1	22.010	15.52	6.490
星 3	22.275	15.75	6.525
星 4	20.879	14.63	6.259
星 6	20.517	14.34	6.177
差の平均			6.420
超新星の等級 [mag]		16.68	

## 4. アーカイブデータ

2004年10月に増光が確認された際、同じ領域のDSS画像で0.5秒角以内に星と考えられる像が映っていることが確認された(Yamaoka and Itagaki 2006)。大規模なサーベイのデータなどはweb上で一般に公開されていることが多く、様々なアーカイブデータを取得することが可能である。そこで我々は、DSS画像以外のアーカイブデータで超新星2006jcの親星が確認できるかどうかを調査した。その結果を表2にまとめる。データは各サーベイごとに設けられているwebページやvirtual observatoryなどを用いて集めた。

1990年1月の2枚のDSS画像については5日しか間があいていないにもかかわらず、親星が見えたり見えなかったりした。この原因については、親星の色が非常に青いためにBバンドのフィルターでのみ撮影することができたということと、撮影されたタイミングが偶然にも増光の前後となっていたということが考えられる。今回の場合、情報が少ないためその原因については断定することができなかったが、数ヶ月や数年のスパンでデータを見ると、親星が増光と減光を繰り返していたのは間違いないと言えるだろう。

## 5. 議論

分光観測の結果やX線による観測から、超新星2006jcの親星は比較的高密度でHeに富む星周物質をまとった炭素・酸素コア星(WC星)であったことは間違いない(Pastorello et al. 2007)。また、この星周物質は親星自身の質量放出により形成されたものであるため、超新星爆発時の親星の質量は数太陽質量程度と小さかったと考えられる。そのために早い段階で低密度になり、放射性元素からの核ガンマ線が熱化されなくなることで速い光度変化を示したのであろう。

では、親星は通常の超新星となる星とは違う進化の経路を辿ったのだろうか。我々は、多くの星周物質をまとっていたことや、過去に何度も増光を繰り返していたことを踏まえ、親星が進化の過程でLuminous Blue Variable (LBV)の段階を経たのではないかと考えた。そこで、LBVについて少し触れるとともに、Supernova impostorと呼ばれる”偽物の超新星”について議論していく。

### 5-1. LBVの特徴

LBVは大質量星が進化の過程で主系列段階からWolf-Rayet (WR)星へとなる途中の段階と考えられている(Humphreys & Davidson 1994)。現在わかっている特徴として、LBVの段階では $10^{-5}$ - $10^{-4}M_{\odot}$ の割合で定常的な質量放出をしているという点が挙げられる。またこれとは別に、1-2等程度の増光を伴うeruptionと呼ばれる表面爆発や、さらに規模の大きな2等以上の増光を伴うgiant eruptionと呼ばれる表面爆発を起こすことがあり、大量の質量放出を行うことがわかっている。

LBVの例としてよく挙げられるりゅうこつ座 $\eta$ も、過去にこのgiant eruptionを起こしたと考えられている。りゅうこつ座 $\eta$ は昔から4等から6等の間で変光することが知られていたが、1837年からgiant eruptionに伴って急激に増光を始め、1843年には全天で2番目に明るい天体となった。その過程で、 $10^{49}$ ergものエネルギーを放出し、少なくとも $10M_{\odot}$ の質量放出を行ったことがわかっている。超新星爆発とわずかに2桁しか変わらないほどの莫大なエネルギーを放出したにも関わらず、りゅうこつ座 $\eta$ は爆発後も消滅せずに残っており、1890年にも規模は少し小さいが再びgiant eruptionを起こした。もちろん現在でも星として存在しており、依然 $100M_{\odot}$ 近い質量を持つとされている。

Table 2. Magnitudes of the progenitor which appeared in the archive data

アーカイブデータ	観測日	見かけの等級 [mag]
DSS(4448Å)	1953/04/15	20.1
DSS(6930Å)	1989/12/08	–
DSS(6930Å)	1990/01/24	–
DSS(4448Å)	1990/01/29	20.1
4850MHz	1990/02/22	–
WENSS(92cm)	1991/02/17	–
IRAS(12,25,60,100μm)	1992/03/09	–
IRAS(12,25,60,100μm)	1992/04/11	–
VLA(5-20GHz)	1994/09/04	–
DSS(4448Å)	1995/11/23	20.0
2MASS(1.25μm)	1998/04/11	16.8
2MASS(1.65μm)	1998/04/11	16.2
2MASS(2.17μm)	1998/04/11	15.7
2MASS(1.25μm)	1998/05/01	16.4
2MASS(1.65μm)	1998/05/01	16.6
2MASS(2.17μm)	1998/05/01	15.9
DSS(8785Å)	1998/12/30	–
SFD 100micron(100μm)	1999/05/09	–
IRTS	2000/12/14	–
SDSS(4686Å)	2001/12/20	21.3
SDSS(6165Å)	2001/12/20	21.2
SDSS(3551,7481,8931Å)	2001/12/20	–
KISO	2002/08/18	–
Itagaki(no filter)	2004/10/15	18.2
Itagaki(no filter)	2004/10/17	18.2
Itagaki(no filter)	2004/10/23	18.5

## 5-2. Supernova impostor

LBV の giant eruption は、その過程で超新星より 2 桁ほど小さくはあるが、大規模なエネルギーの放出をすることと、スペクトルの型が II<sub>n</sub> 型超新星のものに似ていることから超新星と間違えられることがある。そうした天体は supernova impostor と呼ばれる。超新星と間違えられはするが、その絶対等級は一般的な超新星より 5 等程度暗い  $-10$  から  $-14$  等で、膨張速度も 1,000-4,000 km/s 程度で超新星と比べると遅いという特徴を持つ。超新星ではないという最も確実な証拠として、爆発後にハッブル宇宙望遠鏡によって親星の生き残りが確認された例もある。そうした supernova impostor の例としては SN 1954J (Van Dyk et al. 2005)、SN 1961V (Filippenko et al. 1995)、SN 1997bs (Van Dyk et al. 2000)、SN 2000ch (Wanger et al. 2004)、SN 2002kg (Van Dyk et al. 2006)、SN 2005gl (Gal-Yam et al. 2007) などがある。親星の生き残りが確認されているのは、これらのうち SNe 1954J、1961V、1997bs で、爆発から数年以上経ったものだけである。その理由は爆発後に星周物質によって親星からの光が遮られ、ある程度時間が経って星周物質の密度が下がるまでその存在が確認できないためと考えられる。

さて、supernova impostor のスペクトルが II<sub>n</sub> 型超新星に似ていること、絶対等級が暗いことについてはすでに述べたが、そうであるならば II<sub>n</sub> 型超新星の絶対等級の分布は他の型の超新星とは違うものになるのではないかと考えた。そこで II<sub>n</sub>、II、Ib、Ic 型それぞれについて絶対等級の分布を調べた。絶対等級  $M$ [mag] は、まず超新星までの距離  $d$ [pc] を母銀河の後退速度  $v$  [km/s] とハッブル定数  $H(=71)$ [km/s/Mpc] を用いて次式から求め、

$$d = \frac{v}{H} \quad (2)$$

発見等級を見かけの等級  $m$ [mag] として次式に代入して求めた。

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

求めた絶対等級の分布は図 4~7 のようになった。図は横軸を絶対等級、縦軸を個数としてある。星間吸収やフィルターの違いによるものと思われる絶対等級の分布の幅がどの型でも見られるが、特に II<sub>n</sub> 型については  $-12$  から  $-14$  等の暗い等級にかけて、わずかではあるが他の型よりもテールが広がっているという特徴が見られた。この暗い部分に含まれる超新星について詳しく見てみると、先程 supernova impostor の例に挙げたものが多くを占めていた。したがって、II<sub>n</sub> 型の絶対等級の分布において暗い等級まで分布が広がっているのは supernova impostor の寄与が大きく、この特徴は II<sub>n</sub> 型超新星にのみ見られるものだとわかった。

2 年前 (2004 年) の増光の際には分光観測が行われなまま減光していったため、増光の原因など詳しいことはわからなかったが、その増光した星の位置から超新星 2006jc の親星であることはほぼ間違いない。当時板垣氏によって撮影された画像を用いて絶対等級を求めたところ、最も明るい時点で  $-13.6$  等であった。これは超新星としては暗いが、supernova impostor としては一般的な明るさである。また、3 章で見たように、アーカイブデータから親星が過去に増光を繰り返していることから、親星が WC 星であったとすると 2 年前の増光は LBV 的な giant eruption であったと考えられる。

## 6. まとめ、展望

親星は進化の過程で LBV 的な eruption を繰り返す段階を経ていて、自らの質量放出によって高密度な星周物質を形成した。その星周物質には大量の He が含まれていたが、H はほとんど含まれておらず、He 層が剥き出



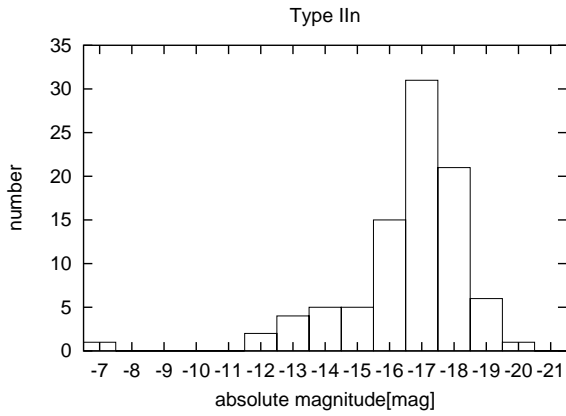


Fig. 4. Distribution of the absolute magnitude of type IIIn SNe

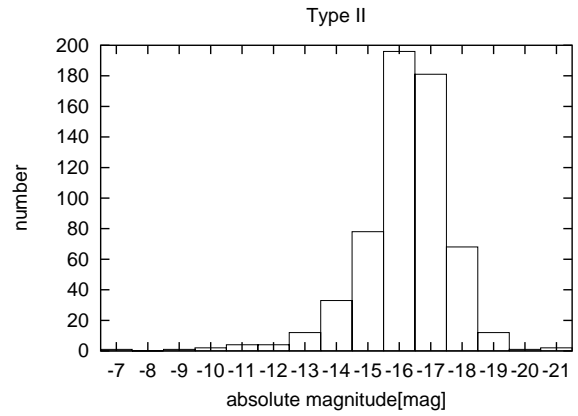


Fig. 5. Distribution of the absolute magnitude of type II SNe

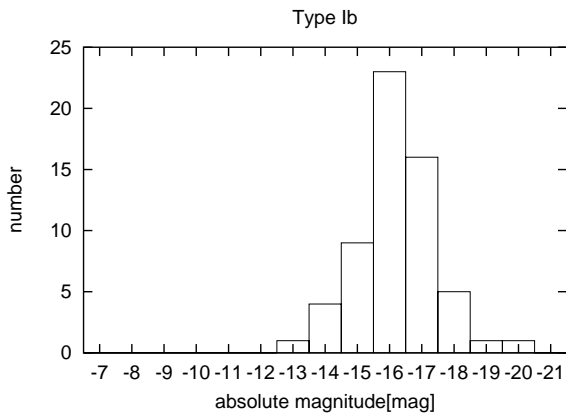


Fig. 6. Distribution of the absolute magnitude of type Ib SNe

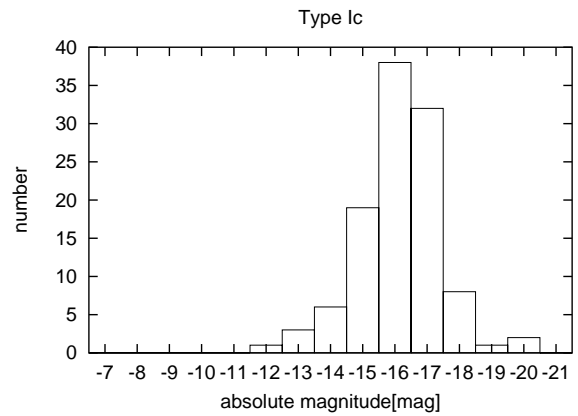


Fig. 7. Distribution of the absolute magnitude of type Ic SNe

の状態で giant eruption などの質量放出が起こったと推測される。そして He 層までもほとんど失い、C,O 層がほとんど剥き出しになった状態で超新星爆発に至ったため、今回のような特異な特徴を示すこととなったと考えられる。超新星 2006jc はこれまでにほとんど発見されていないタイプの超新星であることから、大質量星の進化を探る材料として非常に有効な例となることは間違いない。

今後の展望として、超新星 2006jc の観測を続けることはもちろんのこと、現時点で LBV として知られているりゅうこつ座  $\eta$  などの天体を注意深く観測し続けることで、超新星 2006jc の理解につなげられると考えられる。

### 《参考文献》

- Benetti, S., Cappellaro, E., Elias-Rosa, N. et al. 2006, *CBET* **674**
- Brown, P. J., Immler, S. & Modjaz, M. 2006, *Atel* **916**
- Crotts, A., Eastman, J., Depoy, D. et al. 2006, *CBET* **672**

- Fesen, R., Milisavljevic, D & Rudie, G. 2006, *CBET* **672**
- Filippenko, A. V., Barth, A. J., Bower, G. C. et al. 1995, *AJ*, **110**, 2261
- Foley, R. J., Smith, N., Ganeshalingam, M. et al. 2007, *ApJ*, **657**, L105
- Gal-Yam, A., Leonard, D. C., Fox, D. B. et al. 2007, *ApJ*, **656**, 372
- Humphreys, R. M. & Davidson, K. 1994, *PASP*, **106**, 1025
- Immler, S., Modjaz, M. & Brown, P. J. 2006, *ATel* **934**
- Matheson, T., Filippenko, A. V., Chornock, R. et al. 2000, *AJ*, **119**, 2303
- Nakano, S., Itagaki, K., Puckett, T., & Gorelli, R. 2006, *CBET* **666**
- Pastorello, A., Smartt, S. J., Mattila, S. et al. 2007, *Nature*, **447**, 829
- Van Dyk, S. V., Peng, C. Y., King, J. Y. et al. 2000, *PASP*, **112**, 1532
- Van Dyk, S. V., Filippenko, A. V., Chornock, R. et al. 2005, *PASP*, **117**, 553
- Van Dyk, S. V., Li, W., Filippenko, A. V. et al. 2006, *PASP* (in submitted) (*arXiv* astro-ph/0603025)
- Wanger, R. M., Vrba, F. J., Henden, A. A. et al. 2004, *PASP*, **116**, 326
- Yamaoka, H., Nakano, S. & Itagaki, K. 2006, *CBET* **666**