

古典新星 V1280 Sco のシェル構造解析

内藤博之（なよろ市立天文台）

共同研究者

田実晃人（国立天文台ハワイ観測所）、新井彰（京都産業大学）、
定金晃三（大阪教育大学）、渡辺文健（なよろ市立天文台）、

Valeiro A. R. M. Ribeiro（Radboud University）

概要

新星爆発は近接連星系をなす白色矮星表面で水素の核融合反応が暴走的に起こり、明るく輝く現象である。爆発すると大量のガスが宇宙空間に放出され、時間をかけて広がった放出物は新星シェル・新星残骸として観測される。人類が追跡観測可能なタイムスケールで進化する新星は、低質量星の質量放出や銀河の化学進化への寄与などをリアルタイムで研究できる実験室となっている。

V1280 Sco は 2007 年 2 月に爆発した古典新星で、その進化は極めて遅く、多くの高分散スペクトルや高解像度画像が取得されている絶好の対象である。今回、V1280 Sco の爆発機構の解明を目指し、3次元モデリングソフトウェア（Shape）を使ってシェル構造解析を行なった。2階電離した酸素の禁制線 [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ を用いた解析からは V1280 Sco のシェル構造 ([O III] の放射領域) が high-inclination ($i > 45$ [deg]) であることを示唆する結果が得られた。

1 新星シェルと惑星状星雲 —低質量星からの質量放出—

新星の中には爆発後十分な時間が経って広がり、新星残骸として観測されるものがある。その見かけの形状は惑星状星雲と同様、球対称のものがあつたり、双極流的なものがあつたりと多様性に富んでいる（図 1）。惑星状星雲は（重力崩壊型超新星として爆発しない）数 M_{\odot} 程度の恒星がその寿命を迎え大量に質量放出をしている姿であるが、その形状は単独星として進化したものか、連星系として進化したものか、が重要なファクターとなっているようである。一方、新星残骸の場合、その起源は連星系であることは明らかであるため、新星シェルの形状の違いは別の要因が関係していると考えられる。人類が観測可能な時間尺度で進化する新星は、惑星状星雲や超新星残骸など質量放出に関連する諸天体の物理の検証の場として重要な役割を担っており、新星シェルの多様性は爆発モデルの解明に直結する重要かつ未解明の問題となっている。

今回、3次元モデリングソフトウェア（Shape）を用いて、シェル構造解析のアプローチから古典新星 V1280 Sco の研究を行なった。

2 Shape: A 3D Modeling Tool for Astrophysics

Shape* は活動銀河核（AGN）の複雑な構造をモデリングするために開発されたソフトウェアで [2]、惑星状星雲をはじめとする諸天体の 3次元の幾何学的構造および運動学的構造を解析するために使用されている [3]。輻射流体シミュレーションを行なうことはできないが、星雲ガスの密度分布や速度場を与えることでスペクトルを再構成することが可能である。最近は新星分野にも有用なツールとなってきており、RS Oph [4] や KT Eri [5] などにおいて新星シェルの構造解析が行なわれ、実績をあげている。

図 2 は Shape のユーザーインターフェースである。基本的な使い方として（密度分布が一様の場合）、3D

* <http://www.astrosen.unam.mx/shape/> から入手可能

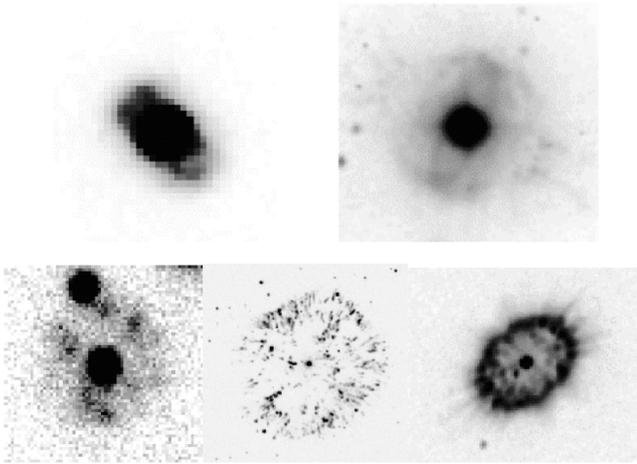


図 1: 様々な形状の新星残骸 [1]。左上から時計回りに HR Del ([O III])、RR Pic (Hα/[N II])、DQ Her (Hα)、GK Per ([N II])、V1500 Cyg (Hα)。カッコ内は観測バンド。

描画モジュールで天体の幾何学的構造を設定し (図 2-c)、速度場を与えて (図 2-d) レンダリングすることで、スリット幅に応じたモデルスペクトルを再構成する (図 2-f)。密度や速度の他にも、position angle や inclination などのパラメータを設定することができる。本研究では、膨張速度と inclination をパラメータとしたモデルスペクトルを多数作成し、実際に観測されたスペクトルと比較することで、確からしい (or 確からしくない) パラメータ値を推測した。

3 V1280 Sco のシェル構造解析

3.1 V1280 Sco の概要

V1280 Sco は 2007 年 2 月 4 日 (世界時) に中村祐二・櫻井幸夫両氏によって発見された古典新星である (極大等級は $V = 3.78$ で肉眼新星となった)。我々は長期に渡って測光観測を継続し、(a) V1280 Sco が極めて長い時間をかけて減光すること、(b) 光度曲線に 1500 日以上に及ぶ停滞期間があることを明らかにした (図 3)。さらに長期に渡る分光観測から (c) 酸素の 2 階電離輝線 [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$ の出現時期で定義される星雲期への移行におよそ 50 ヶ月かかったこと (以前の最長記録は V723 Cas の約 18 ヶ月)、

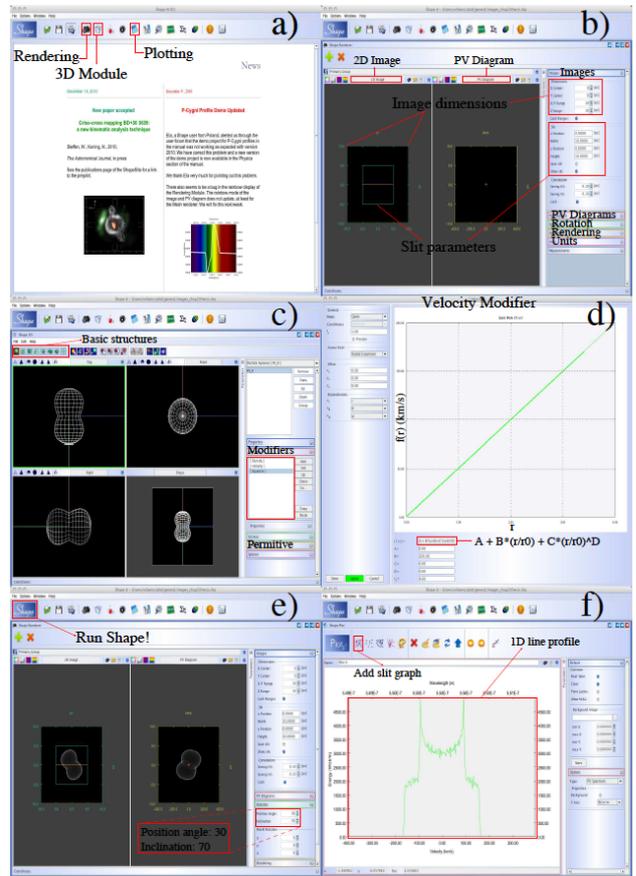


図 2: Shape のユーザーインターフェース ([6] より)。

(d) 極大後 1500 日以上に渡って星風が吹き続けていること、(e) 過去の新星観測では数日から数週間消失する Na I D 線や Ca II HK 線の低励起ガス雲を起源とする吸収線が、V1280 Sco においては数年以上観測されたことを明らかにした。これらの観測結果により、V1280 Sco が極めて進化の遅い新星であると結論づけた [8]。

このような進化の遅い新星は明るいうちに観測できる機会が増えるため、良質なデータの取得が期待される。V1280 Sco はすばる望遠鏡などの大型望遠鏡によって高分散分光観測が行なわれ、超大型望遠鏡干渉計 (VLTI) によって高解像度画像が取得されている [9]。我々は高分散スペクトルに -650 km/s から -900 km/s の速度をもった複数の吸収線群を検出し (視線方向の情報を得て)、VLTI の高解像度画像 (投影面の情報) と組み合わせることで、V1280 Sco のシェル構造は low-inclination (公転面が face-on に

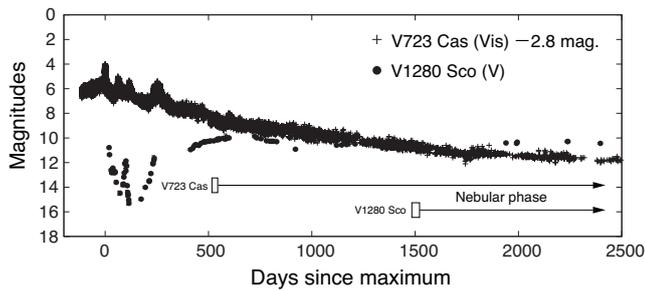


図 3: 遅い新星 V1280 Sco と V723 Cas における光度曲線と星雲期の比較。V1280 Sco は V723 Cas に比べて、ゆっくりとした減光を示し、星雲期に入るのも遅かった [7]。

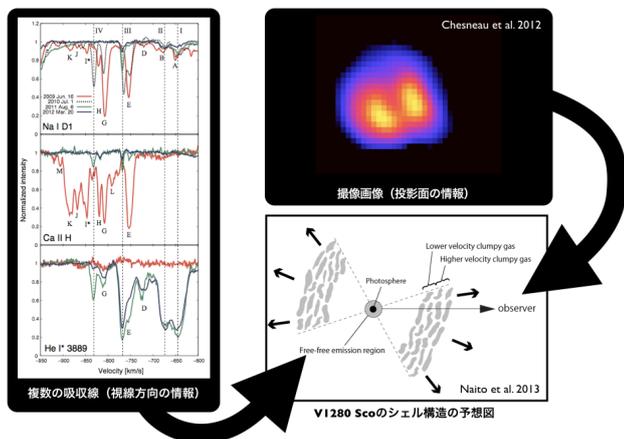


図 4: V1280 Sco の新星シェル予想図 (右下) [10]。

近い) であると予想した (図 4)。今回、輝線による解析でも同じ結果が得られるかを調べるため、Shape を用いた解析を試みた。

3.2 モデリング

Shape でモデルスペクトルを再構成するにあたり、*squeeze* (以下、*squ*)、 V_{\max} [km/s]、 i [deg] の 3 つをパラメーターとした (ガス密度は一樣と仮定)。*squ* は $squ = 1 - a/b$ で定義される無次元の変数で、新星シェルの形状を決めるものである (図 5 参照)。 $squ = 0$ の場合、球対称となる。 V_{\max} は最大の膨張速度で、速度場はハッブル膨張を仮定した (中心からの距離に比例して、膨張速度が速くなる)。 i は連星系の公

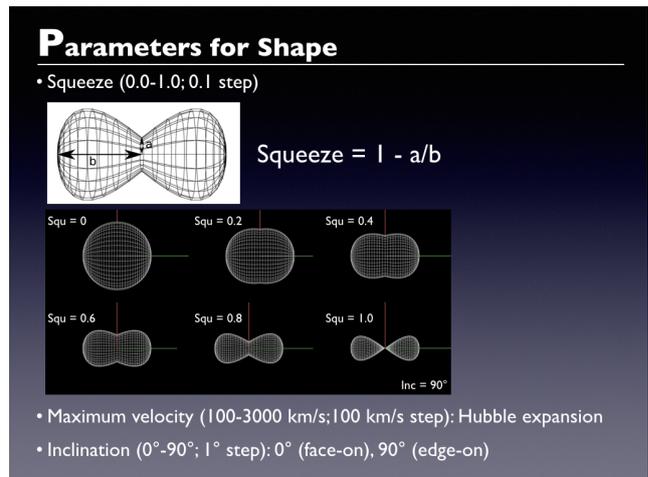


図 5: Shape に使用したパラメーター (発表スライドより)。

転面の傾斜角である。*squ* を 0.1 刻み (0.0-1.0: 11 パターン)、 V_{\max} を 100 km/s 刻み (100-3,000 km/s: 30 パターン)、 i を 1 deg 刻み (0-90 deg: 91 パターン) で変えながら、合計 30,030 個のモデルスペクトルを作成した。

3.3 観測とモデルの比較

観測スペクトルは 2011 年 7 月 23 日にすばる望遠鏡で観測された [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007 の禁制線を使用し、モデルスペクトルとの比較は χ^2 検定を用いて評価した。 $squ=1.0$ 、 $V_{\max} = 2,000$ [km/s]、 $i = 80$ [deg] の時にベストフィットとなり、reduced χ^2 (自由度は 494) は 0.45 であった。図 6 と図 7 はそれぞれベストフィットした reduced χ^2 map 上での位置とモデルスペクトルを示している。ベストフィット ($\chi^2 = 0.45$) のパラメーター値で再構成されたスペクトルは、モデルとしてはほぼ棄却されないが、誤差を評価することは難しい (reduced $\chi^2 < \sim 1$ を満たすようなモデルが多数存在)。一方、 i が 45 deg 以下のモデルスペクトルの reduced χ^2 はどれも 1 よりもかなり大きく、観測スペクトルを再現できない (モデルとしては棄却される) ことが分かった。

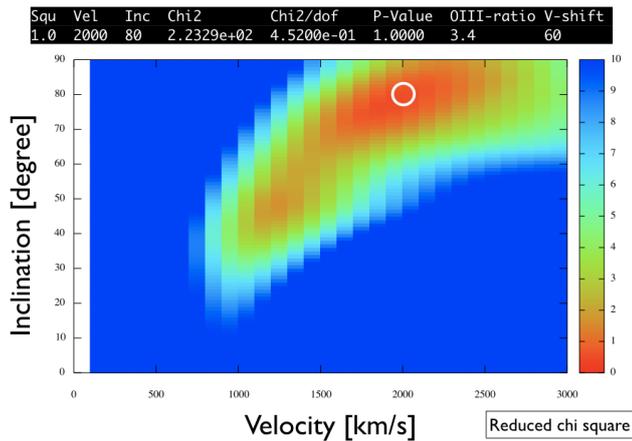


図 6: Reduced χ^2 map ($squ = 1.0$ の場合)。丸印がベストフィットの位置。

4 議論と展望

今回 [O III] 輝線を用いた解析から、V1280 Sco のシェル構造 ([O III] の放射領域) が high-inclination ($i > 45$ [deg]) であることを示唆する結果が得られた。これは高速吸収線成分を検出した観測事実をもとに予想していた low-inclination とは異なる結果である。新星スペクトルはその電離状態の変化によって進化するため、それぞれのラインに対しての時間変化や放射領域を詳細に吟味する必要がある。今後、[Fe II] 禁制線や Fe II の許容線など feature の異なるラインにおいても解析を進め、V1280 Sco の包括的なシェル構造の解明に取り組む予定である。

参考文献

- [1] Bode, M. F. 2002, Proceedings of the Conference "Classical Nova Explosions", 497
- [2] Holloway, A. J., Steffen, W., Pedlar, A., et al. 1996, *MNRAS*, **279**, 17
- [3] Steffen, W. & López, J. A. 2006, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, **42**, 99
- [4] Ribeiro, V. A. R. M., Bode, M. F., Darnley, M. J., et al. 2009, *ApJ*, **703**, 1955
- [5] Ribeiro, V. A. R. M., Bode, M. F., Darnley, M. J., et al. 2013, *MNRAS*, **433**, 1991

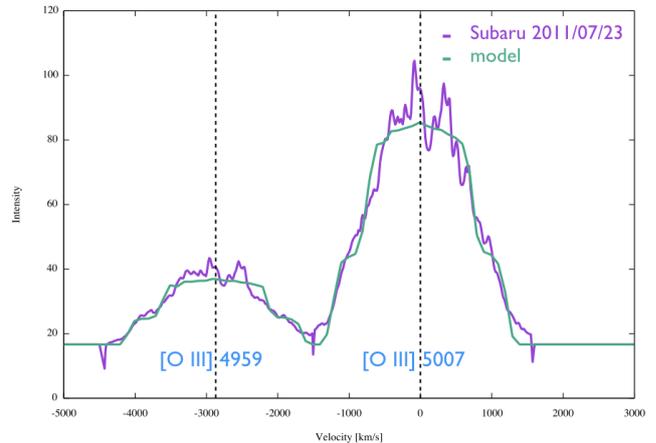


図 7: 観測スペクトルとモデルスペクトル (ベストフィット)。

- [6] Ribeiro, V. A. R. M. 2011, "Investigation of the Nebular Remnants of Novae" (Doctoral dissertation)
- [7] Naito, H., Proceedings of the Conference "The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects - II", 217
- [8] Naito, H., Mizoguchi, S., Arai, A., et al. 2012, *A&A*, **543**, A86
- [9] Chesneau, O., Lagadec, E., Otulakowska-Hypka, M., et al. 2012, *A&A*, **545**, A63
- [10] Naito, H., Tajitsu, A., Arai, A., & Sadakane, K. 2013, *PASJ*, **65**, 37