

# 超新星残骸へのジーナス統計の適用 —Ia型超新星はボコボコしている？

佐藤 寿 紀

〈NASA ゴダード宇宙飛行センター Greenbelt, MD 20771, USA〉  
 〈理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉  
 e-mail: toshiki.sato@riken.jp



白色矮星はチャンドラセカール質量限界に近づくと、中心部で核暴走が起こり、Ia型超新星として様々な元素を合成しながら木っ端微塵に弾け飛ぶ。この爆発の瞬間に、Ia型超新星はどのような姿をしているだろうか？ この疑問に、点源として観測される超新星の観測から答えを出すのは難しい。我々は、爆発後数百年経った超新星残骸の画像に「ジーナス統計」を初めて適用し、この爆発時の構造情報を引き出す研究を行った。三次元流体シミュレーションと実観測のジーナス曲線の比較によって、爆発直後のIa型超新星にボコボコした塊構造が多数存在していた事がわかり始めた。

## 1. 白色矮星の核暴走爆発とその残骸

超新星と聞くと、多くの人は太陽よりもずいぶん重い星が進化の最後に起こす大爆発「重力崩壊型超新星」を想像するかもしれない。しかし、今回は「Ia型超新星」と呼ばれる、比較的軽い星「白色矮星」の爆発に関する研究について紹介する。

西暦1572年、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエは、突如カシオペア座に現れた極めて明るい星を観測した。ティコは、この星を自らの目で一年以上に渡り記録し、新しい星「新星 (nova)」と呼んだ。それから数百年経った1945年、この記録をドイツの天文学者ウォルター・バーデが掘り起こし、現代の天文学の知識をもって、このイベントが星の大爆発「超新星 (supernova)」だった事を明らかにする [1]。この数百年に渡る天文学者間のやりとりに、胸を熱くする研究者は少なくないであろうし、筆者もその一人である。ティコによって観測された超新星は、今でも数千 km/s にも及ぶ速度で膨張を続け [2-4]、「超新星残骸」と呼ばれる天体現象として観測できる (図1)。

現在では、ティコの超新星は典型的なIa型超新星であった事が観測的に確認されており [5]、白色矮星の核暴走爆発を隈なく調査できる数少ないターゲットとして重宝されている。

白色矮星は、電子の縮退圧で自らを支えている高密度星であり、その最大質量はチャンドラセ

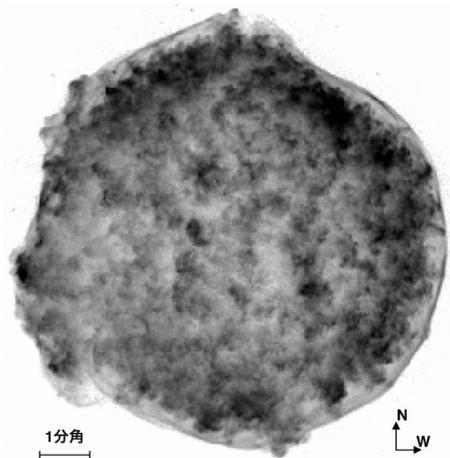


図1 ティコ・ブラーエが1572年に観測した超新星 (SN 1572) の残骸の現在のX線画像 (チャンドラ衛星による2009年の観測)。

カール臨界質量（約1.4太陽質量）で決まっている\*1。白色矮星がこのチャンドラセカール臨界質量に近づくと、その高温・高密度な中心核で核暴走が起これ、星全体が木っ端微塵に吹き飛ばされる。この核暴走爆発がIa型超新星である。本研究では、この白色矮星が吹き飛ばされた瞬間に、Ia型超新星はどのような形をしているか？という問題を考える。

実際のところ、上のような爆発機構には未だに謎が多い。例えば、チャンドラセカール臨界質量に十分近づく前に爆発してしまうモデルがあったり、爆発中に核燃焼が燃え進む速度にも不定性があり、それによって元素合成量も大きく変化する。様々な爆発の多様性は、物質の飛び散り方にも影響を与えるため、爆発構造の調査が新たな爆発機構への制限に繋がるはずである。

### 1.1 超新星残骸の構造研究

本研究では、Ia型超新星の爆発構造を調べ、それによって新たな爆発機構への制限を目指す。この時、超新星自体ではなく、その「残骸」に着目する。超新星残骸の場合、広がった天体として観測できるため、構造情報を引き出しやすい。そしてこれは、超新星残骸を観測する上での大きな利点である。例えば、超新星を観測しようと思うと、点源としてしか観測できず、一次元情報しか得られない。多くの超新星観測を束ねて、統計的に構造を議論する研究も存在するが [7-9]、個々の超新星の形状を隈なく調査する事は不可能である。つまり、個体の超新星の二次元もしくは三次元構造を調査するためには、超新星残骸を観測するほかない。

超新星残骸内の物質は、爆発時に形成された衝撃波によって加熱され、高温プラズマとなりX線で明るく輝く。しかし、X線はほとんどの物質に対し屈折率が1よりもわずかに小さいため、集光・イメージングが非常に難しい。そのため、超

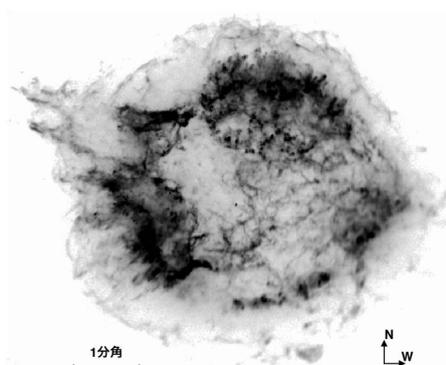


図2 チャンドラ衛星による重力崩壊型超新星残骸カシオペア座AのX線画像。Ia型超新星と比べると、非対称に物質が飛び散っている。

新星残骸の構造研究は、X線望遠鏡の登場・発展と共に、ここ数十年でようやく詳細な議論が可能になった分野である。そして1999年には、世界最高の空間分解能（0.5秒角）を誇るチャンドラ衛星が打ち上がり、20年間経った今でも素晴らしい観測データを提供し続けている。図2には、ティコの超新星との比較のため重力崩壊型超新星残骸カシオペア座AのX線画像を示す。ティコのIa型超新星はフーセンを膨らませたような綺麗な球形状をしているのに対して、この重力崩壊型超新星は非対称に飛び散った花火のような姿をしている事がわかる。この二枚の画像には、爆発機構の違いが非常に良く現れており、超新星残骸の構造調査が、爆発機構を議論する上でいかに強力なツールであるかを物語っている。

### 1.2 Ia型超新星残骸と塊構造

X線による高空間分解能観測が可能になると、Ia型超新星残骸の内側には、特徴的なポコポコとした塊状の構造が確認され始めた [10]。その形成過程について観測・理論の両面から議論されているものの、未だに起源は謎のままである。もう一度、図1のティコの超新星残骸のX線画像に戻ってもらいたい。この天体にも、いくつもポコ

\*1 ランダウ量子化により電子の縮退が解け、内部磁場の強度によってはチャンドラセカール質量を超えた白色矮星も存在し得るという研究もある [6]。

ポコとした小さい構造が確認できるはずである。

この塊構造の形成モデルとして、主に二つのモデルが提唱されている。一つは、爆発直後から多数の塊状構造を保持しているモデルで、もう一つは、爆発直後の構造は一様だが、進化過程の流体的不安定性で塊構造を形成するモデルである [11]。特に前者の場合、何かしらの爆発時のパラメータが塊構造の形成を担っているはずであり、観測からその制限を与えられる可能性を示唆している。この形成過程解明には、実際にこのポコポコした構造を観測的に評価してあげるのが手っ取り早い。しかしながら、この塊構造をこれまで定量的に評価する手法がなかった。そこで、我々が着目したのが「ジーンズ統計」と呼ばれる統計手法である。

## 2. ジーンズ統計とは？

恥ずかしながら筆者は、このジーンズ統計というものを今回の研究を開始するまで知らなかった。2018年の夏の終わり、共同研究者である森井幹雄氏（当時統計数理研究所）が、現在筆者が研究を行っているNASA/ゴダード宇宙飛行センター（GSFC）を訪問するとの事で、ワシントン・ダレス空港（IAD）に車で迎えに行った。そこから研究所への道中で、せっかく一週間あるので何か新しい事でも始めませんか？という流れになった。「ティコの超新星の画像に見えるモコモコしている構造を定量的に評価出来ませんか？」と問いかけたところ「Topological Data Analysis, 中でも Persistent Homology などは有効かもしれませんが」と言われ、無知な筆者は恥ずかしくなり研究所に到着後直ぐさまインターネットの検索サイトを開いたのがこの研究のきっかけである。結局は、Persistent Homology ではなくジーンズ統計に行き着いたのだが、両者共超新星やその残骸研

究では全く出会った事の無い手法だったため、手探りで情報をかき集める所から始まった。これらの手法は宇宙物理の分野内では、宇宙マイクロ波背景放射における非ガウス性や宇宙の大規模構造などといった、宇宙論研究で主に用いられている\*2 [13-16]。それ以外には、 $H_{II}$  領域の構造を議論するため用いられている例もある [17]。

簡単に言うと、今回行った二次元面でのジーンズ統計\*3では、画像上の様々な表面輝度で等高線を引き、そこにできるひと繋がり構造の数を「ジーンズ数」として統計的に扱う。例えば、図3(a)のような一次元の輝度分布を考える。この時、ある任意の閾値を横に引くと、そこには孤立した「山」または「穴」の構造を確認できる。ここでは、一つの山と穴を、それぞれジーンズ数  $G=+1$ ,  $G=-1$  と定義して数えていく。画像内に山構造は7個、穴構造が4個あった場合は、 $G=7-4=3$  と数える。図3(a)を見てもわかるように、低輝度側では穴構造の数が多く、高輝度側では山構造の数が多くなるため、低輝度側から高輝度側へ順に閾値を変えながらジーンズ数を求めていくと図3(b)のような波形状の曲線が得られる。この曲線によって、その画像内のトポロジカルな情報を定量的に議論できる。図3(a)の破線上 ( $v=0$ ) では山構造が二つ、穴構造が二つあるため、ジーンズ数  $G=0$  と数える。

ジーンズ統計の大きな特徴として、その画像内の密度ムラがランダムガウス場の場合には、ジーンズ曲線は次式に従うという性質がある [14]。

$$G(v) = \frac{A}{(2\pi)^{3/2} \theta_c} v \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) \quad (1)$$

ここで、 $A$  は場の面積、 $\theta_c$  はコヒーレンス角である。また、 $v$  は閾値（表面輝度）に対応する変数で、輝度のゆらぎ  $\delta$  がその標準偏差  $\sigma = \sqrt{\langle \delta^2 \rangle}$

\*2 ジーンズ統計の宇宙論への適応は、松原隆彦氏の天文月報 [12] に日本語の詳細な解説がある。

\*3 厳密に言うところ二次元面上でのジーンズは、Euler Characteristic と呼ぶが [14]、本研究ではそのままジーンズという言葉を用いる。

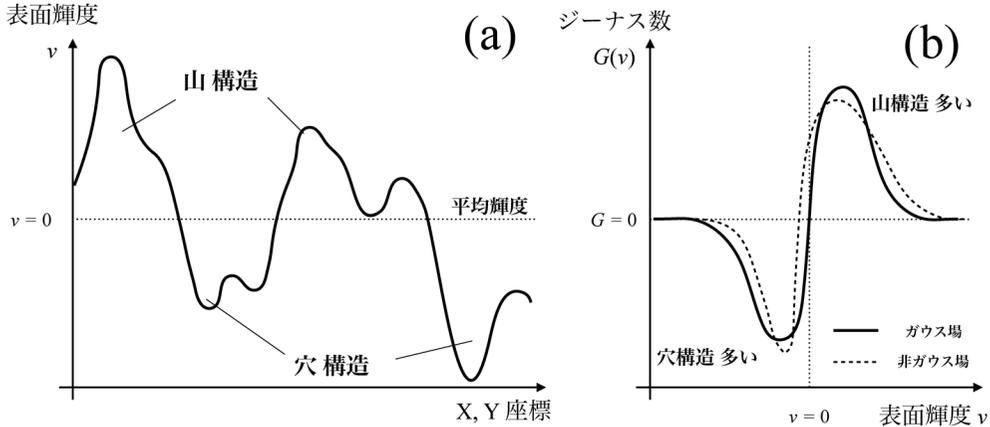


図3 (a) 表面輝度がランダムにばらつく画像を横から見たプロフィールと (b) 画像から得られるジーナス曲線.

の何倍であるかを示す. ジーナス曲線の振幅は  $A/\theta_c^2$  によって決まっており, これが唯一観測から得られる変数である. 例えば, 評価する場の面積に対して構造のサイズが大きい場合, コヒーレンス角 ( $\approx$  構造間の間隔) も大きくなるため, ジーナス曲線の振幅は小さくなる. つまり, 曲線の振幅は構造のスケールに感度がある.

画像の輝度ムラがランダムガウス場を満たさない場合は, 原点を中心に対称だったジーナス曲線は歪んでしまい, 対称性が崩れる (図3bの破線). そのため, 曲線の形状を評価する事で, 場の非ガウス性を議論できる.

基本的にはX線輝度はプラズマの密度の二乗に比例するため, 輝度の平方根は密度場に対応する. つまり, ジーナス統計によって, 超新星残骸画像の輝度ムラから, 構造の密度ムラを定量的に評価できるようになる. そのため, 超新星残骸内の塊構造を特徴づけるためにぴったりの手法と言える.

### 2.1 ティコの超新星画像のジーナス曲線

前章の知識をもとに, 実際にティコの超新星画像のジーナス曲線について考察する. 図4に, 図1の画像から取得したジーナス曲線を示す. まず, 最初にわかるのはティコの超新星の構造は, ランダムガウス場 (図4破線) から大きく逸脱し

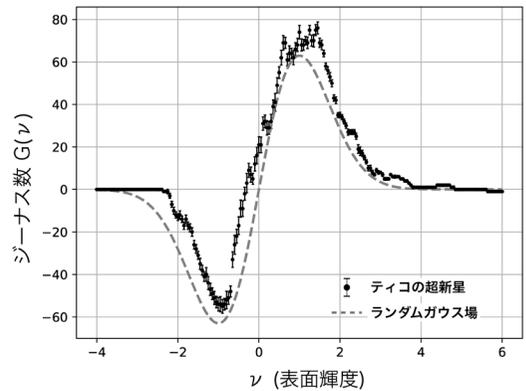


図4 ティコの超新星残骸画像から算出したジーナス曲線. 破線はランダムガウス場を仮定したジーナス曲線.

ているという事である. 例えば, 低輝度の領域 ( $v < 0$ ) では, 曲線の谷構造がランダムガウス場を仮定したモデルよりも幅が狭く, 谷底も浅い. 一方で, 高輝度側 ( $v > 0$ ) では, モデルよりも幅が広く, 最大値も大きな曲線になっている.

ジーナス曲線の最大値・最小値の非対称性の原因は, ティコの画像内で「穴」よりも「山」の構造が支配的になっているためと解釈できる. これは, 単純にジーナス数の絶対値はそれぞれの構造の数として考えられるため, 「穴」の数が少なく, 「山」の数が多いためと言えるからである. 曲線の山谷形状の幅に見られる非対称性は, 構造の輝度

ムラからきていると考えられる。例えば、図3(a)の左端にあるような、周囲の構造よりも明るい構造を考える。このような明るい構造がいくつかある場合、閾値 $\nu$ を上げていっても、それらは長い間「山」構造として生き残り続けるため、なかなか曲線が $G=0$ に近づかない。これによって、高輝度側( $\nu>0$ )で幅の広い曲線になる。反対に、低輝度側( $\nu<0$ )で構造同士が同程度の輝度分布をしている場合、その輝度周辺で急激に「穴」構造が増減するため、ティコのジーナス曲線のような、よりシャープな谷形状が得られる。このような条件を満たす場としては、輝度ムラの少ないバックグラウンド上に明るさの異なる構造がいくつも乗っているような状況が考えられる。

上では触れなかったが、ジーナス数は画像のスミージングにとっても感度の高い統計量である。特に、X線観測のように統計的に限られている場合、画像には統計ノイズが乗っている。スミージング無しでは、その統計ノイズを構造として認識してしまい、正味の値よりも大きなジーナス数を得てしまう。スミージングを用いる事で、それらのノイズを避ける事ができるが、そのサイズによっては抽出したい構造を潰してしまう。そのため、適切なスミージングサイズを選ばなければ、結果を間違えて解釈してしまう可能性がある。本研究では、いくつかの異なる光子統計数の観測間で結果を比べながら注意深くスミージングのサイズを決定しており<sup>\*4</sup>、これ以降の章の結果にそれらの影響が無い事は調査済みである。

### 3. 流体シミュレーションとの比較

2.1節では、観測されたティコの超新星画像のジーナス曲線とランダムガウス場の解析解とを比較する事で、この残骸内の構造がランダムガウス場のような均一な分布ではなく、偏ったものである事がわかってきた。しかし、このような複雑な

分布をいくらシンプルな解析解と比較したとしても、これ以上の情報を引き出すのは難しい。そこで、いくつかの超新星モデルに対して、コンピュータシミュレーションを用いて三次元流体方程式を時間発展(=流体発展)させてできた超新星残骸モデルからもジーナス曲線を算出し、ティコの曲線との比較を試みる。超新星の初期条件(初期構造)が、数百年後の超新星残骸の姿を変えるのであれば、それらのモデルと実測の比較から、どの初期条件が観測に近いかを議論できる。

図5に、今回ティコの超新星残骸と比較した二つの理論モデルを示す。左図が爆発時に構造を持たない滑らかなIa型超新星を流体発展させたもので、右図が爆発時に多数の塊構造を持つIa型超新星を流体発展させたものである。簡単に言うと、これは「どちらの画像がティコの超新星残骸の画像に似ていますか?」という問題であり、パッと見た目で判断すると、筆者は右のモデルの方がティコに似ていると感じた。

左図の滑らかな超新星を進化させたモデルでは、流体的不安定性(主にはレイリー・テイラー不安定性)が超新星残骸内にもやもやとした小さな構造を作っている。この時にできる構造は、比較的小さく、その数も多い。一方、右図では、流体進化前の超新星表面にランダムな密度ノイズをあらかじめ設置し、同じ条件下で流体発展させている。この場合は、初期構造が数百年後の超新星残骸の構造内に生き残り続け、より大きいひしゃげた構造ができていく事がわかる。

今回の研究がスムーズに進んだ理由の一つに、この二つの理論モデルを持っている研究者が近場にいたという事が挙げられる。現在、筆者と同じ研究所(NASA/GSFC)で研究を行っているブライアン・ウィリアムズ氏などは、ティコの超新星残骸内の孤立した塊構造の膨張進化を測定し、異なる二つの流体力学シミュレーション(図5)と

<sup>\*4</sup> これらの詳細な内容は、原論文 [18] の第3章にまとめられている。

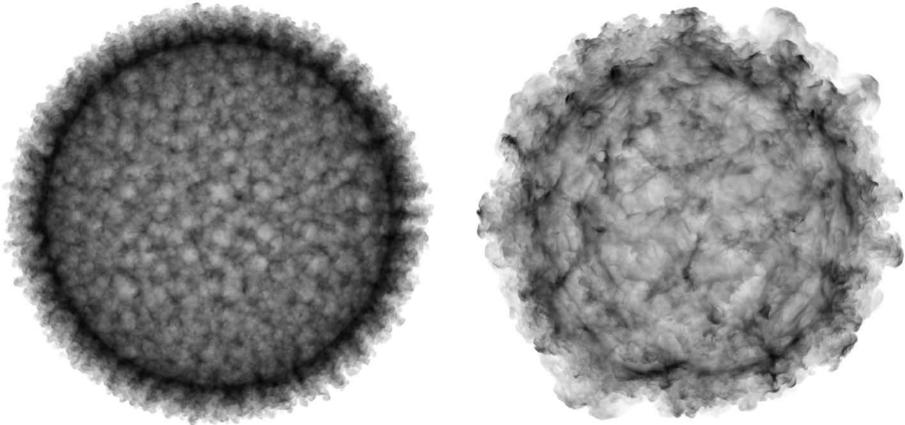


図5 滑らかな超新星から成長した超新星残骸（左）と塊構造を多数持った超新星から成長した超新星残骸（右）のシミュレーション画像。

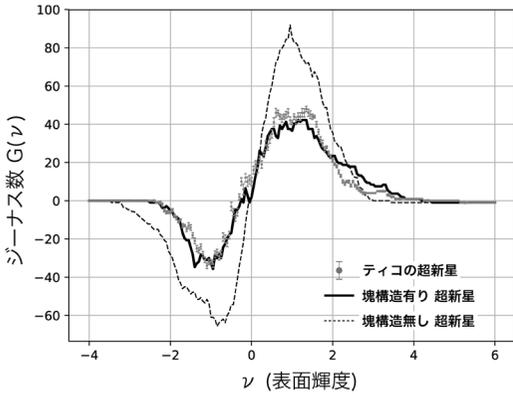


図6 ティコの超新星と流体シミュレーションのジーナス曲線の比較。塊構造を多数持った超新星（太線）がティコの超新星と類似している。

比較した論文を2017年に発表した [4]。そして彼らの結果は、塊構造の運動学的性質（膨張速度や減速度）のみでは、両者の違いは区別できないという物だった。この結果を既に読んでいた筆者は、森井氏と共に彼の居室に半ば強引に押しかけ、「このジーナス統計であれば、違いを区別できるはずだ」とまだ解析の環境すら整っていない状態で売り込み、画像を提供してもらう事になった。

図6に最終的なジーナス曲線の比較を示す。結果は一目瞭然であり、図5右の爆発時から塊構造

を所有する超新星の方（黒太線）が、ティコの超新星の構造を良く説明する事がわかる。特に、図5左のモデルの場合、画像内に沢山の小さな構造が形成されている事から、ジーナス曲線が大きな振幅を持ち（大きい  $A/\theta_c$ ）、ティコの超新星残骸から大きく逸脱している。このように、画像内の構造のスケールにジーナス統計は特に感度が高く、図6程度の構造の違いを区別する際には非常に強力なツールである。

#### 4. 爆発時の塊構造の形成過程

ジーナス統計を用いて画像間の塊構造を比較する事で、どうやら Ia 型超新星は爆発時に既に塊構造を持っている事がわかってきたが、それではどのようにして、それらの塊構造が爆発時に形成されるのであろうか？ 実際のところ、Ia 型超新星の理論研究において、今回のような塊構造を予言しているものは多くない。そして、観測を完璧に説明できるものは今の所存在しないかもしれないが、爆発中の核燃焼過程は塊構造形成の重要な役割を担っていそうである。ここでは、それらの理論予測をもとに、Ia 型超新星内での塊構造の形成過程を議論する。

白色矮星の中心領域で核燃焼が着火すると、燃

焼波が元素合成をしながら内側から外側へ向かって徐々に伝搬し、最終的には星表面に達する。この焼波は大きく分けて二つ考えられており、一つは亜音速の「爆燃波 (deflagration) [19]」と、もう一つは超音速の「爆轟波 (detonation) [20]」である。前者の場合、星自体が膨張・冷却しながら核焼波が進むが、後者の場合は、膨張をほぼ感じないまま星全体が燃え尽きる。基本的に、爆轟波で1.4太陽質量の白色矮星全体を燃やしてしまうと、星のほぼ全てが鉄になってしまい [20]、観測をうまく説明できない。一方で、チャンドラセカール質量に満たない白色矮星 (sub- $M_{\text{Ch}}$ 爆発) であれば、純粋な爆轟波でも適度な量の鉄と他のシリコンなどの軽い元素も生成できることから、sub- $M_{\text{Ch}}$ 爆発モデルにおいて良く用いられている [21–23]。他にも、爆発中に爆燃波から爆轟波へと遷移する「遅延爆轟 (delayed detonation) [24]」も提案されており、これも観測を良くモデリングできることから、現在では最もポピュラーなモデルの一つとして知られる。

これらの焼波過程の中でも、我々は爆燃波が塊構造形成における有力候補であると考え、複数の着火点を持つ純粋な爆燃波の三次元シミュレーションにおいては、超新星の最大輝度時に4–5個の鉄 ( $^{56}\text{Ni}$ 崩壊後の $^{56}\text{Fe}$ ) の大きな塊構造を形成する事が知られている [25]。この大きな鉄の塊構造の形成は、三次元爆燃モデルで共通の性質と考えられている。形成過程としては、まず爆燃波伝搬時にレイリー・テイラー不安定で小さな構造が形成される。これらの構造は熱い低密度の燃えカスであるため、浮力を得て、重力に逆らいながら白色矮星表面へ向かって成長していく (反対に、冷たく高密度のまだ燃えていない物質は降下していく)。そして、速度の遅い爆燃波が星全体を加熱する頃には、数個の大きな燃えカスが超新星表面に達しているというシナリオである [25–27]。これとは対照的に、純粋な爆轟波の場合は、構造が成長する前に焼波が星表面に達して

しまうため、多次元のシミュレーションを行ったとしても塊状の構造を作るのは難しい [22, 28]。

爆燃波伝搬過程の構造形成シナリオであれば、Ia型超新星内の共通の性質から、超新星表面のポコポコした構造を説明できそうであるが、Ia型超新星やその残骸の観測と比べると、その構造が大きすぎる事がわかる。例えば、Ia型超新星観測では、様々なサンプルのスペクトル内のシリコン吸収線の深さのばらつきから、超新星表面に存在する構造の調査が行われた [7]。超新星の可視光観測の場合、光球よりも前方にある爆発噴出物の吸収線がスペクトルに見られる。もし、爆発噴出物が塊構造として存在するならば、見る方向によっては、光球面がその構造に隠されたり隠されなかったりする。そして、塊構造が大きければ、この爆発噴出物の影 (=吸収線) は観測ごとに、大きくばらつくはずである。しかしながら、現状はそのばらつきは非常に小さく、構造のサイズとしては光球面の約1%程度であろうと見積もられている。これは、爆燃波モデルに見られるような構造よりも遥かに小さい。そして、実際に超新星残骸を見る限りでも、理論モデルに存在する大きな構造を支持するのは難しい。こうして、純粋な爆燃波の塊構造では、観測されているものに対して、構造が大きすぎるという問題があるようだ。

より小さな構造は、遅延爆轟モデルによって実現できる可能性がある。遅延爆轟モデルでは、爆燃波伝搬中に形成された塊構造が、その後の爆轟波が衝突した時に破壊される事によって、この問題を潜在的に軽減する可能性がある。実際、三次元爆燃モデルで見られるような大きな鉄の塊は、三次元遅延爆轟波モデルには確認できない [29, 30]。こうして、遅延爆轟波モデルは、今の所超新星残骸内の塊構造を説明する上では、一番都合が良いモデルである。

本研究では、一様な密度プロファイルにノイズを乗せたような擬似的な超新星モデルと比較する事で、ティコの超新星残骸内の構造形成を議論し

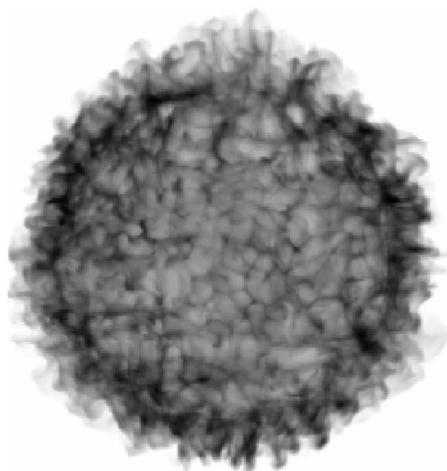


図7 三次元遅延爆轟モデル (N100) を流体発展させた超新星残骸イメージ [31]. 理化学研究所ジル・フェラン氏, 長瀧重博氏からの提供.

てきたが, 将来は, さらに現実的な三次元シミュレーションとの比較にもジーナス統計が有効であろう. 実は, 我々の研究とほぼ同じタイミングで理化学研究所ジル・フェラン氏が率いる研究チームが, 三次元遅延爆轟波モデルの流体発展を世界で初めて可能にし, その二次元画像も公開された(図7). 本研究と同様に, 彼らの使用した三次元遅延爆轟モデルも, 初期状態で密度ムラが存在しており, 流体発展後もその構造が生き残り続けている. まさに, 我々が求めてきた塊構造の起源が, これらのシミュレーションに詰まっている可能性がある. そして, これらのシミュレーションと観測のジーナス統計を使った比較は, 今後, Ia型超新星の爆発機構に新たな制限を与えると期待する.

## 5. 最後 に

本研究では, 超新星残骸の構造研究に対して, 世界で初めてジーナス統計を適応し, Ia型超新星残骸内に見られる塊構造の特徴をうまく抽出できる事を示した. 実際のところ, 今回の結果をもとに, Ia型超新星の初期構造がボコボコしていると

結論づけるのは少し早いかもしれない. 例えば, 超新星残骸内の構造進化には, 今回考えられていない磁場構造なども大きく影響を与える事もわかっている [32]. 一方で, 今回の研究で示したように, ジーナス統計はこの超新星残骸の塊構造を評価する上で, 非常に強力なツールである事自体は揺るがないだろう.

加えて, 今回触れなかったが, ジーナス統計の一般化であるミンコフスキー汎関数 (Minkowski functionals [33]) という統計量も今後の研究で有用であると考えられる. 例えば, 図5や図7内に見える構造は「塊状」というよりも, 「フィラメント状」に近い. しかしながら, “ジーナス数”にはこれらの形の情報は全く含まれていない. 今後, 他の統計量も使う事で, これらの特徴づけも可能になれば, さらに実測とモデルとの比較の信頼度も増し, モデリング内での新たな課題が見えてくると期待する.

ティコによる星の観測が現代の研究に役立ったように, 現在の我々の日々の研究も, また数百年後の発見に繋がったら良いと考えている. 今回の研究も, 百年後の天文学を変えるような派手な内容では無いかもしれない. ただ, 今後10年の間に訪れるであろう, 超新星とその残骸を繋ぐ研究の急発展の際に, 重要な役割を果たすに違いないと筆者は信じている.

## 謝 辞

本稿は, 筆者の最近の投稿論文 [18] をもとにしたものです. 共同研究者である森井幹雄氏, ブライアン・ウィリアムズ氏, ジョンP・ヒューズ氏に感謝します. そして, 図7を提供くださったジル・フェラン氏, 長瀧重博氏に感謝します. また, 本稿を執筆する機会を与えていただいた山田真也氏, 小高裕和氏, 岩井一正氏に感謝いたします. 本研究内容をもとに2019年11月に *Chandra* 衛星のウェブサイトにて, 我々の結果をもとにティコの超新星残骸の新しいX線画像がリリース

スされました (<https://chandra.harvard.edu/photo/2019/tycho/>). この記事を担当して下さったピーター・エドモンズ氏, ミーガン・ヴァック氏に感謝いたします.

参考文献

[1] Baade, W., 1945, ApJ, 102, 309  
 [2] Hayato, A., et al., 2010, ApJ, 725, 894  
 [3] Sato, T., & Hughes, J. P., 2017, ApJ, 840, 112  
 [4] Williams, B. J., et al., 2017, ApJ, 842, 28  
 [5] Krause, O., et al., 2008, Nature, 456, 617  
 [6] Das, U., & Mukhopadhyay, B., 2013, Phys. Rev. Lett., 110, 071102  
 [7] Thomas, R. C., et al., 2002, ApJ, 567, 1037  
 [8] Maeda, K., et al., 2010, Nature, 466, 82  
 [9] Black, C. S., et al., 2019, MNRAS, 483, 1114  
 [10] Seward, F., et al., 1983, ApJ, 266, 287  
 [11] Wang, C.-Y., & Chevalier, R. A., 2001, ApJ, 549, 1119  
 [12] 松原隆彦, 2013, 天文月報, 106, 707  
 [13] Gott, J. R. III, et al., 1986, ApJ, 306, 341  
 [14] Coles, P., 1988, MNRAS, 234, 509  
 [15] Kimura, Y., & Imai, K., 2017, Adv. Space Res., 60, 722  
 [16] Xu, X., et al., 2019, Astron. Comput., 27, 34  
 [17] Chepurnov, A., et al., 2008, ApJ, 688, 1021  
 [18] Sato, T., et al., 2019, ApJ, 879, 64  
 [19] Nomoto, K., et al., 1984, ApJ, 286, 644  
 [20] Arnett, W. D., 1969, Ap&SS, 5, 180  
 [21] Woosley, S. E., & Weaver, T. A., 1994, ApJ, 423, 371  
 [22] Fink, M., et al., 2010, A&A, 514, A53  
 [23] Shen, K. J., et al., 2018, ApJ, 854, 52  
 [24] Khokhlov, A. M., 1991, A&A, 245, 114  
 [25] García-Senz, D., & Bravo, E., 2005, A&A, 430, 585  
 [26] Reinecke, M., et al., 2002, A&A, 391, 1167  
 [27] Gamezo, V. N., et al., 2003, Science, 299, 77  
 [28] Tanikawa, A., et al., 2018, ApJ, 868, 90

[29] Bravo, E., & García-Senz, D., 2008, A&A, 478, 843  
 [30] Seitzzahl, I. R., et al., 2013, MNRAS, 429, 1156  
 [31] Ferrand, G., et al., 2019, ApJ, 877, 136  
 [32] Warren, D. C., & Blondin, J. M., 2013, MNRAS, 429, 3099  
 [33] Winitzki, S., & Kosowsky, A., 1998, New Astronomy, 3, 75

**Genus Statistic Applied to Supernova Remnants: Clues to the Clumpy Ejecta in Type Ia Supernovae?**

**Toshiki SATO**

*NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA*

*RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

Abstract: The genus statistic, for the first time, has been applied to Tycho's supernova remnant in order to understand the origin of the clumpy structures by comparing high angular resolution X-ray observation with hydrodynamical models. We found that the genus curve extracted from Tycho's supernova remnant strongly indicates a skewed non-Gaussian distribution of the ejecta clumps. This implies that the supernova ejecta intrinsically had clumpy structure soon after the explosion.