

## 惑星状星雲の2次元高分散分光観測

大塚 雅 昭

〈国立天文台岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口郡鴨方町大字本庄 3037-5〉  
e-mail: masaaki@oao.nao.ac.jp

田 実 晃 人

〈Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii 96720, U.S.A.〉  
e-mail: tajitsu@subaru.naoj.org

磯 貝 瑞 希

〈東京大学木曾観測所 〒397-0101 長野県木曾郡三岳村 10762-30〉  
e-mail: iso@kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

惑星状星雲（Planetary Nebulae, PN または PNe）は比較的軽い星の最終段階の天体で、その形状が非常に多岐に及んでいることで知られています。PN の形状認識は主に撮像観測による天球上に投影された2次元の像によってなされていますが、奥行き（3次元）の広がりを知ることができないため、3次元構造としてのPNを正しく認識できない場合があります。PNに関する研究では、形状に関する課題がほとんどを占めます。そのため、形状を正しく認識することは重要です。本稿では空間情報を保持している2次元高分散分光観測によって得られた、膨張速度場によるPNの形状認識の手法と、その手法を適用した具体例を最近の観測結果をもとに紹介します。

### 1. はじめに

1～8倍程度の太陽質量をもつ中小質量星はHR図上、主系列星から巨星になり、AGB（Asymptotic Giant Branch, 漸近巨星枝）段階を経た後、恒星風などにより外層の一部を周囲に放出します。残りの星（中心星と呼ばれ、太陽程度の質量をもつと推測される）は十数万度に及ぶ高温の白色矮星に進化し、その紫外域輻射により進化途中で放出した星間ガスは電離され、電離度の異なる多様な元素の輝線を放っています。私たちの研究対象とする惑星状星雲（Planetary Nebulae 以下、PN または PNe）とは、中心星とその周りを

取り囲む電離ガスからなる恒星進化の最終段階の天体のことです。図1にHR図<sup>1)</sup>におけるPNeの中心星の位置を示しています。

PNeの存在は1782年にウィリアム・ハーシェルにより初めて確認されました。そのときに観測された天体は有名な Saturn Nebula（土星状星雲）、NGC 7009 でした。Ackerら<sup>2)</sup>のカタログにある画像を図2に示しました。この画像を見ると、円盤状の土星のように見えます\*1。

PN という名は NGC 7009 が土星、つまり惑星のように見えたことに由来しており、実際には惑星とは何ら関係がありません。ハーシェルによる発見から約220年経った今、銀河系内においては

\*1 ハーシェルには緑がかかった色に見えたらしい。

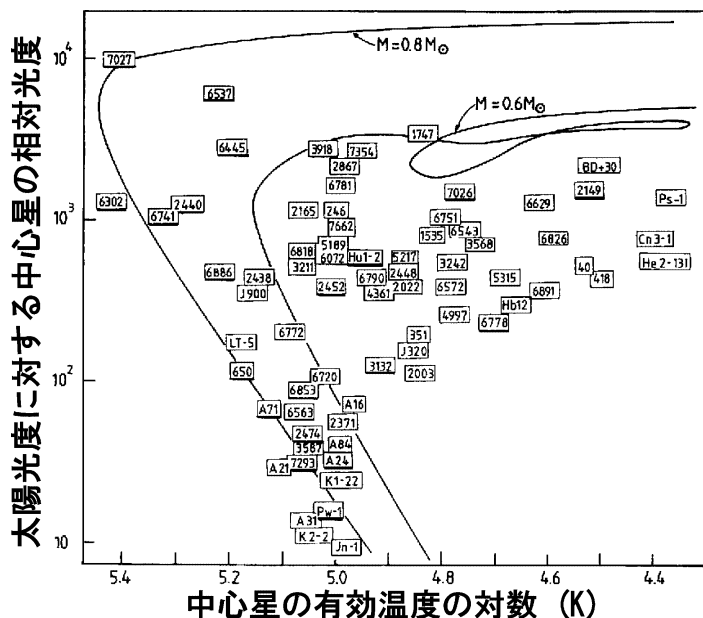


図1 HR図上におけるPNの中心星の位置。横軸は中心星の有効温度の対数、縦軸は太陽光度に対する中心星の相対光度 (Pottasch, 1984, p. 214)。0.6太陽質量, 0.8太陽質量の中心星の進化トラックが示されている。カタログの種類を表す NGC, IC は省略されている。四角で囲まれた数値は各カタログに記載されている天体の名前を示している。

1,000 個以上の PNe が確認されています。また、観測技術の向上により、アンドロメダ星雲<sup>3)</sup>やマゼラン星雲<sup>4)</sup>などの系外銀河、そして銀河間<sup>5)</sup>にまでその存在を見いだせるようになりました。主に輝線で光っている PN は遠くまで見通すことのできる天体であることから、銀河における化学組成の空間分布や回転速度の決定などに用いられ、さ



図2 NGC 7009 の画像 (Acker, et al., 1992)。視野は 3'×3'。

らには光度関数を指標とした距離尺度決定を通して宇宙論にまで登場することもあります。

## 2. PN の星雲殻の形状について

### 2.1 PN の星雲殻の形状分類

PN の星雲殻 (中心星を取り囲む電離ガスのこと) の形状 (以下, 形状と略す) は Kwok ら<sup>6)</sup> が提唱している Interacting Stellar Wind (ISW) モデルが広く支持されています。このモデルでは PN の形状は、速度の遅い AGB 段階での恒星風 (数十 km/s) と、高速度の Post-AGB 段階における恒星風 (数百 km/s~数千 km/s) 間の相互作用により決定されると提案されています。このモデルによると、基本的に PN の形状は球対称であるはずなのですが、実際に見られる PN の形状は、非常に多岐に及んでいます。それが多くの人々を魅了して止まないのは HST (Hubble Space Telescope, ハッブル宇宙望遠鏡) で PNe の高分解撮像観測が進められていることから明らかです。

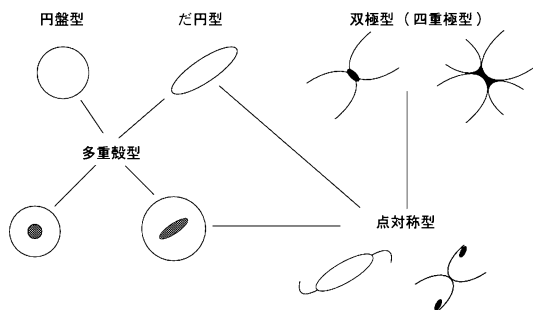


図3 Manchado (2003) らによるPNの形状分類。多重殻型は円盤型、楕円型のサブクラスであり、点対称型は楕円型、双極型（四重極型）のサブクラスである。

PNの形状は図3<sup>1)</sup>に示すように分類されています。まず、すべてのPNは円盤型(例、IC 418)として分類され、その中で、ある方向に長く伸びた形状をなしているものについては楕円型(例、NGC 3242)として分類されます。楕円型の中で、細く、くびれた部分(ウエストバンドと呼ばれています)があるものについては双極型(例、M 2-9)として分類されます。これら三つがPNの主な形状ですが、これ以外に、多重殻型、点対称型(例、NGC 6543)などがあります。上に挙げた形状のいずれにも当てはまらないものは不定形型(例、IC 2149)として分類されます。

表1 北天にあるPNの形状分布。円盤型と楕円型とで70%を超えている。双極型は10% 足らずだが、実際にはこれよりずっと多い割合で存在する可能性がある。

形状	個数(割合)
円盤型	65 (23.2%)
楕円型	149 (53.2%)
双極型	36 (12.8%)
点対象型	8 (2.9%)
四重極型	7 (2.5%)
不定形型	15 (5.4%)

## 2.2 形状分類の問題点

PNの形状分類は主に撮像観測により天球に投影された2次元の像によってなされています。しかし、このような分類法では3次元構造としてのPN本来の形状を認識することができない場合があります。図4に示すような双極型のPNを例にとって考えてみます。この場合、極軸<sup>\*2</sup>と視線方向が垂直な観測者Aはこの天体を双極型PNとして正しく認識することができます。しかし、極軸と視線方向とが平行な観測者Bはこれを双極型として認識できず、円盤型(または楕円型)として分類してしまう可能性があります。このような視点の違いによる形状認識の違いは撮像観測では奥行き(の広がり)を区別できないことに原因があ

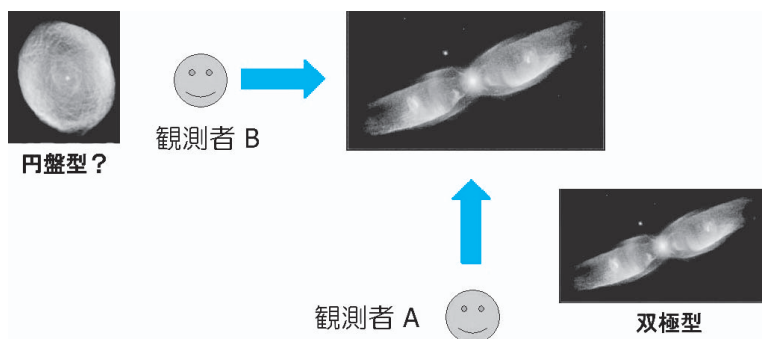


図4 視点の違いによる形状認識の違い。観測者A(双極型のPNの極軸と視線が垂直)からは双極型のPNを正しく認識できるが、観測者B(極軸と視線が平行)からは円盤型や楕円型として認識してしまう可能性がある。

\*2 ウェストバンドに対して垂直な方向の軸。

ります。Manchadoら<sup>8)</sup>は撮像観測によって北天にある280個のPNeの形状を分類し、およそ7割が円盤型または楕円型である(表1)と述べていますが、奥行きを考慮することができれば、実際の形状分布の割合はおそらく違った結果になると思われます。PNに関する研究では多くの場合、その形状に関する課題がほとんどを占めます。例えば、形状別の化学組成分布、中心星の温度・質量分布、銀河面からの空間分布・速度、星雲殻の電子温度・電子密度・膨張速度分布、各々の星雲殻形成過程などです。そのため、形状を正しく認識することはPNの研究において重要な問題なのです。

### 2.3 膨張速度場を利用した形状分類

PNeの形状認識に関する問題を解決するためには、これまで行われてきた撮像観測では得ることができない、奥行きを得る必要があります。この問題を解決する方法としては、数十km/s、数十秒というPNの膨張速度と空間的な広がりが十分に分解されている、空間情報を保持した膨張速度場によって奥行きを補うことが最適である、と私たちは考えました。膨張速度場を利用した形状認識の例としてはOtsukaら<sup>9)</sup>、Tajitsu

とOtsuka<sup>10)</sup>によるHalo PN(ハロー部に位置しているのでこう呼ばれている)、H 4-1における双極型構造の発見や、Bachillerら<sup>11)</sup>、Bryceら<sup>12)</sup>による、Ring Nebula, NGC 6720 (M 57)における双極型構造の発見などがあります。「撮像では形状について不十分な理解しか得られない。膨張速度場の情報を加えることによって初めて本当の形状を理解できる」。そのような考えから、PNにおける膨張速度場についての研究を本格的に進めようと考えました。2001年、大塚が大学院修士2年のときでした。ちょうどその年の1月からHIDESが共同利用観測装置として稼動し始めたこともあり<sup>\*3</sup>、意図した研究をする環境が徐々に整いつつありました。

## 3. HIDESによるPNの分光観測

HIDESは岡山1.88-m鏡のクーデ焦点に設置・固定された分光器であるため、スリット位置角(Position Angle, 以下P.A.)は天体の日周運動により、時角と赤緯に依存し、積分開始・終了時刻によって決まってしまう。このままだと、意図したP.A.にスリットを置くことができませんし、暗いPNを長時間積分すると(日周運動に

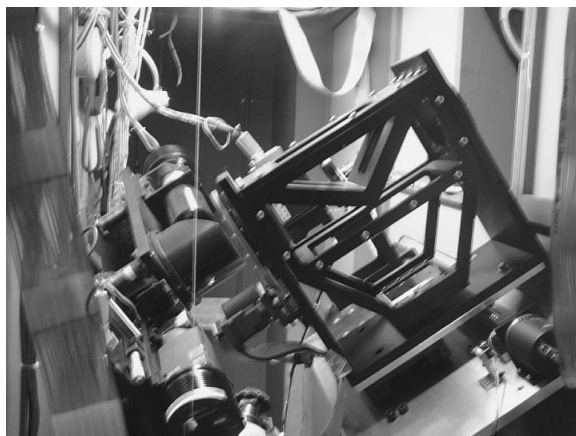


図5 スリット前におかれたイメージローテーター。右側からきた星像を3枚の鏡で意図するP.A.に回転させ、左側にあるスリットに向ける。

\*3 2000年から稼働開始(ただしPIタイプ)。2001年から完全共同利用。

よって像が回転してしまうため), 得られるスペクトルの空間情報は正確なものではなくなります. このような問題を解決するためには, 任意の P.A. にスリットを置き, 天体の日周運動を追尾することができる, イメージローテーター (図5) というスリット前置光学系が必要となります. 田村眞一先生を中心とする, 我々東北大学 PN 観測グループは HIDES が立ち上がる前から, イメージローテーターの作製に取り組んできました. 基本設計は当時大学院生だった田実, 磯貝 (大塚は当時学部4年生) を中心になされ, 岡山観測所の渡邊悦二さん, 増田盛治さんのご協力のもと, わりと短期間のうちに完成しました. このイメージローテーターは 10~15 cm 四方 (配置によりそれぞれ大きさが異なる) の3枚の平面鏡からなる光学系で, 4'×4' の視野を確保しつつ, スリットに対し天体の像を意図した任意の P.A. に回転し, 固定することができます.

PN のような広がりをもつ天体にとってはスペクトルの空間情報も重要です. しかし, HIDES は

エッセル分光器であるため, 隣接する回折次数のスペクトルが重ならずには広げられるスリット長は赤側 (6,000~6,800 Å 付近) で 16'', 青側 (4,300~5,100 Å 付近) では 5'' 程度しかありません. 筆者の観測経験から, 赤側, 青側において空間情報を完全に保てる程度の広がり (つまり 5'') をもつ PN は, かなり少ないということが分かっていました. このことは Tylanda ら<sup>13)</sup>による仕事からも明らかです. このままだと, スペクトルの空間情報は完全に保持できません. このような機器的な観測制限を取り除くために, 広い波長域を一度に取得できるという HIDES の特長を捨て, 広い空間情報を保持した輝線を取り出すために, 狭帯域干渉フィルター\*4を導入することにしました. これらのフィルターを用いることにより, スリットを最大 90'' にまで広げることが可能になりました. イメージローテーターとロングスリットという組み合わせによって空間情報を完全に保持した高分散分光観測も可能になり\*5, 研究の体制が完全に整いました.

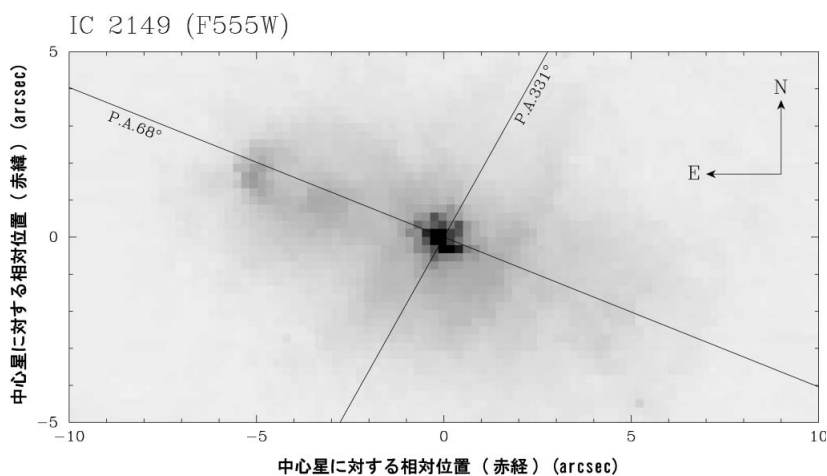


図 6 IC 2149 の HST による連続光での画像. スリットの位置も示してある. 横軸, 縦軸はそれぞれ中心星に対する相対的な赤経, 赤緯方向の位置を示している. HST アーカイブを解析したもの.

\*4 現在, [O III]λ5007, [O I]λ6300, Hα, [N II]λ6583 の各種線用フィルターがある. 各フィルターの半値幅は 11~20Å 程度.

\*5 天体のサイズによっては通常の観測モード (狭帯域フィルターは使わない観測) で行うこともある.

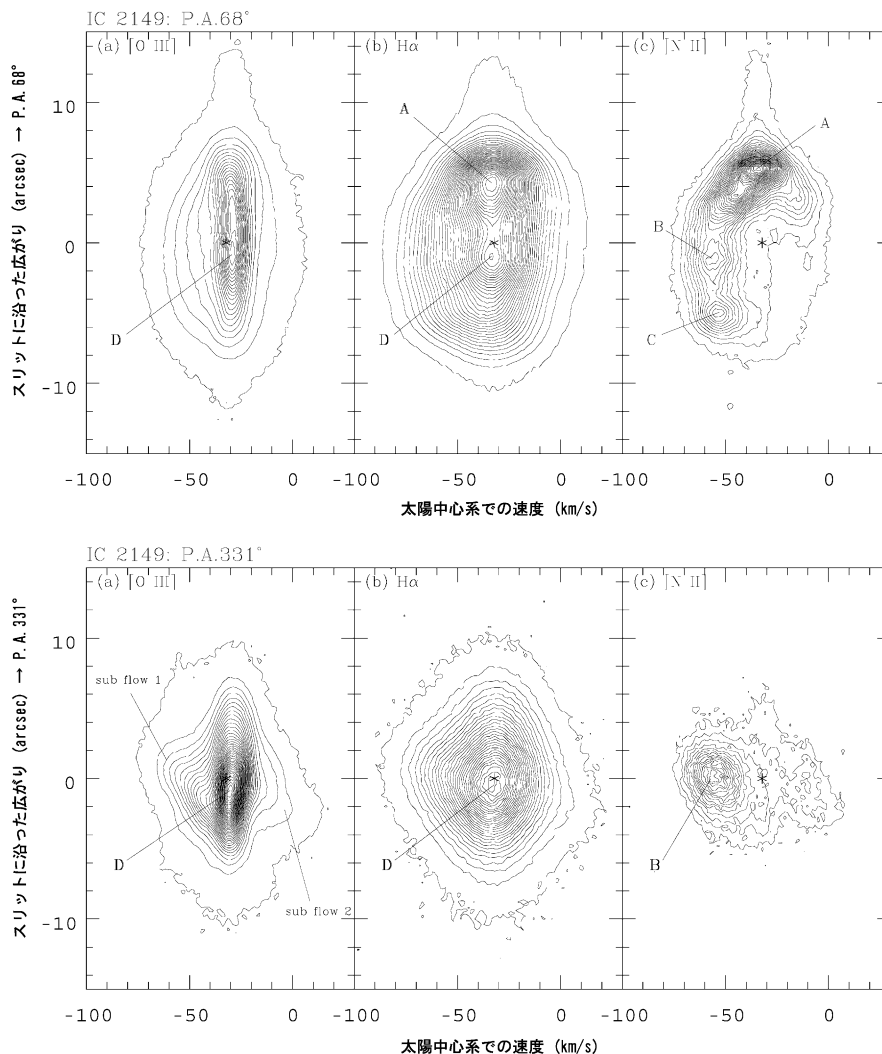


図 7 IC 2149 の PV Map. 上段は P.A. = 68° での、下段は P.A. = 331° での PV Map である (左から [O III], H $\alpha$ , [N II]). 連続光は差し引いてある. 等高線の本数は P.A. = 331° の [N II] 以外はノイズレベルの 3 倍の強度から最大の強度までを 30 等分している. P.A. = 331° の [N II] (下段 (c)) は 15 等分している. 横軸は太陽中心系での視線速度 (km/s) を示し, 縦軸は中心星 (図上 “\*” で示された位置) を中心とした, スリットに沿った空間的な広がり (arcsec) を示している. A および C はノットである. 問題としている双極型構造を示唆していると思われる速度成分は P.A. = 331° における [O III] (下段 (a)) において矢印で示されている, sub flow 1 と sub flow 2 がそれぞれにあたる.

#### 4. HIDES によるロングスリットモード観測

HIDES によるロングスリットモードでの初観測は 2003 年 1 月の観測所時間に行われました.

図 6 には観測対象天体である IC 2149 の HST で得られた連続光での画像とスリットを当てた位置を示しておきます. IC 2149 の形状は不定形型として分類され<sup>14)</sup>, P.A. = 68° に沿った方向に中心星に対して  $\pm 5''$  の位置にノット (雲片) が存在

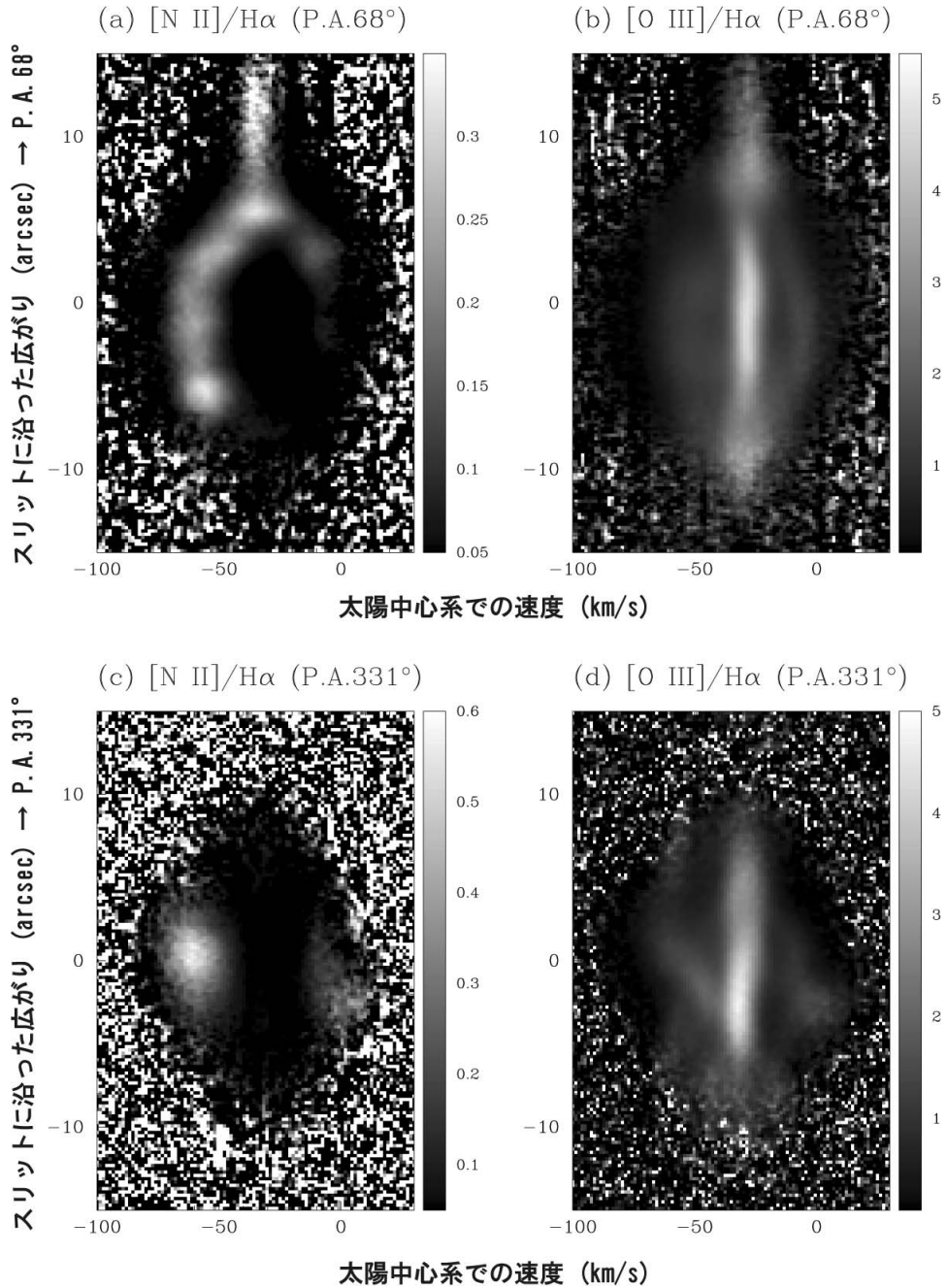


図 8 IC 2149 の輝線強度比の PV Map. 上段は P.A. =  $68^\circ$  での、下段は P.A. =  $331^\circ$  での輝線強度比の PV Map である (左から  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ ,  $[\text{O III}]/\text{H}\alpha$ ). 明るいほど  $\text{H}\alpha$  に対する強度が大きいことを示す. P.A. =  $331^\circ$  における  $[\text{O III}]/\text{H}\alpha$  Map (下段右側 (d)) を見ると, sub flow (明るく, 中心星を挟んで斜めに広がっている部分) の存在が強調されている.

していることが確認されています。この観測が行われる前年、2002年2月の共同利用観測時間（狭帯域干渉フィルターはまだ導入されていない）に通常の観測モードで得られた  $P.A.=331^\circ$  における [O III] $\lambda 5007$ （以下、[O III]）の位置-速度関係図（Position-Velocity Map, 以下、PV Map）から、この方向に双極型構造を示唆していると思われる速度成分が存在していることがわかっていました<sup>15)</sup>。しかし、前節で書いたとおり、[O III] 付近ではスリットを  $5''$  程度しか広げられないため、それよりも外側の空間分布しだいではこの速度成分が双極型構造を示唆していない、という可能性があり、それを確かめるためにもどうしてもロングスリットモードによる観測が必要だったのです。

図7に  $P.A.=68^\circ$ （上段）、 $P.A.=331^\circ$ （下段）における PV Map を示しておきます。[O III] は中心星近傍にある、 $H\alpha$  は全体の、そして [N II] $\lambda 6583$ （以下、[N II]）は外側に存在する電離ガスのふるまいを示しています。これらの図を見ていただければ分かるように  $P.A.$  と電離ポテンシャルが異なれば、空間分布も異なっていることが分かります。 $P.A.=331^\circ$  における [O III]（図7、下段左端）を見ると、 $-30 \text{ km/s}$  にある濃いガス（中心星の周りのガスを示唆している）を挟んで、速度方向と空間方向に対称に広がっているフェイントな二つの速度成分、sub flow 1 と sub flow 2（矢印で示された部分）が存在していることが分かります。このガスは（微弱ではあるが） $H\alpha$  においても存在しています。これら二つの sub flows の存在は [O III]/ $H\alpha$  の比を取ることでより強調されています（図8、下段右端）。また、密度に敏感な [N II] は二つの  $P.A.$  における PV Map（図7、上段右端 ( $P.A. 68^\circ$ )、下段右端 ( $P.A. 331^\circ$ )）を見ると  $P.A.=68^\circ$  に沿った面に Ring 状に集中して分布していることが分かります。密度が高い所よりも、低い所の方に物質の流れはしやすい、ということを見ると、二つの sub flows によって、

IC 2149 の形状は双極型構造をなしている、と私たちは結論づけました。つまり、IC 2149 は不定形型ではなく、 $P.A.=68^\circ$  方向にウェストバンドをなし、それとほぼ垂直な方向 ( $P.A.=331^\circ$ ) にガスが広がっている双極型 PN であるということです。

私たちは IC 2149 の形状について膨張速度場からこのように推測しましたが、一抹の不安も残っていました。この観測結果を投稿論文としてまとめた後、何気なく Web で検索すると 2003 年の 11 月にスミソニアン協会とアリゾナ大学が運営している Multiple Mirror Telescope Observatory 所有の 6.5-m 鏡に波面補償光学装置を取り付けて観測した近赤外線画像が目に入りました。この画像は IC 2149 が  $P.A.=331^\circ$  に沿った方向に広がった双極構造をなしていることを示していました。私たちが検出した二つの sub flows は双極構造を示している速度成分だったのです。この画像によって私たちの解釈は適切であることがわかり、不安を取り除くことができました。IC 2149 の元素組成は金属量が少ない星が進化したとされる Halo PN のそれと同程度であるということが Vazquez ら<sup>16)</sup>により明らかにされています。また、中心星の温度と輝度を Bloeker<sup>17)</sup> の理論進化トラックにプロットすると、中心星の質量は 0.5 太陽質量程度と PN の中でも軽いことが分かっています<sup>18)</sup>。双極型 PN の中心星、そして、ZAMS (Zero Age Main Sequence, ゼロ歳主系列星) での質量は円盤型、楕円型などの、双極型以外の形状をなす PN のそれらと比べ重いということが長い間支持されています<sup>19)</sup>。また、Phillips<sup>20)</sup> による中心星の質量と形状との関係についての理論的な研究においても上述の傾向があることが確かめられています。IC 2149 についての観測結果は、距離の見積もりが正しく光度推定があてれば、元素組成の面と合わせて、今まで考えられていたよりも ZAMS での質量の軽い星が双極型 PN に進化した、ということとなります。このことは中心



星の質量と形状との間に関係はない、ということの意味することになります。私たちは、軽い星から進化したとされる Halo PN, H 4-1 においても双極型構造をなしている、ということを確認しています。IC 2149 の双極型構造の発見は PN の中心星の進化と星雲殻の形状に関する議論においても重要になったと考えられます。

## 5. 最後 に

今回の観測結果は IC 2149 が「空間情報を保持した膨張速度場に立脚すると」双極型構造をなしている、ということを示唆するものです。そして、この観測が行われた後に公開された画像は私たちの考えを支持するものでした。今回の研究成果を通じて皆さんに主張したいことは、天球に投影された2次元の「見かけの」像は必ずしも PN 本来の形状を示していないということです。私たちの観測チームが今までに取得してきたデータや、膨張速度場と形状に関する研究をしている他の人の研究結果を知るにつれ、その思いは強くなりつつあります。また、膨張速度場の研究を進めているうち、球対称な形状をなしている PN が例外で、大部分は双極型を代表とする、非球対称な形状をなしているのでは、と考えるようになりました。しかし、PN の非球対称性を決めている本質は、今までさまざまな理論モデルが提唱され、説明が試みられていますが、決定的なものはまだ見つかっていません。PN の形状に関する研究の最終目標は、AGB 段階では球対称な質量放出をしていたのにもかかわらず、なぜ非球対称な PN が形

成されるのか、ということを理解することだと思います。

この問題を解決する一歩として、私たちは PN の形状は視線に対し平行な方向と垂直な方向の膨張速度場により決定されると仮定し、運動学的年齢 (Kinematical Age, 星雲殻の半径の大きさを観測によって得られた膨張速度で割った値。単位: 年) と、それら二つの膨張速度成分の関係について解析をしています。この解析によって形状別の膨張速度場の相違や、形状の進化史なるものが理解できると考えています。今後は他波長域における膨張速度場の解析を通じて、PN の形状についての本質を見極めることができれば、と考えています。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、共同研究者、特に指導教官である東北大学の田村眞一元教授から貴重なコメントをいただきました。また、Illinois 大学の James. B. Kaler 教授には本研究を投稿論文としてまとめるにあたり、Critical Reading してくださったとともに貴重なコメントをいただきました。両先生に深く感謝いたします。

また、本研究を進めるにあたり、国立天文台特別共同利用研究員として籍をおいていた国立天文台岡山天体物理観測所の次に掲げる皆様に深く感謝いたします。泉浦秀行、増田盛治、渡邊悦二、乗本祐慈、沖田喜一、岡田隆史、清水康広、小矢野 久、稲田素子、柳澤顕史、吉田道利 (敬称略)

## 参考文献

- 1) Pottasch S. R., 1984, Planetary Nebulae, Astrophysics and Space Science Library
- 2) Acker A., et al., 1992, Strasbourg-ESO catalogue of Galactic Planetary Nebulae, ESO publication
- 3) Ford H. C., Jacoby G. H., 1978, ApJS 38, 351
- 4) Jacoby G. H., 1983, IAUS 103, 427
- 5) Feldmeier J. J., et al., 1998, ApJ 503, 109
- 6) Kwok S., et al., 1978, ApJL 219, L125
- 7) Manchado A., et al., 2000, A.S.P. Conf. Ser. Vol. 199, 17
- 8) Manchado A., et al., 1996, The IAC Morphological Catalog of Northern Galactic Planetary Nebulae
- 9) Otsuka M., et al., 2003, PASP 115, 67
- 10) Tajitsu A., Otsuka M., 2004, in preparation
- 11) Bachiller R., et al., 1989, A&A 218, 252
- 12) Bryce M., et al., 1994, MNRAS 266, 721
- 13) Tylenda R., et al., 2003, A&A 405, 627
- 14) Balick B., 1987, AJ 94, 671
- 15) Otsuka M., et al., 2002, 日本天文学会秋季年会
- 16) Vázquez R., et al., 2002, ApJ 576, 860
- 17) Bloeker T., 1995, A&A 299, 755
- 18) Otsuka M., 2004, 博士論文
- 19) Calvet N., Peimbert M., 1983, RMxAA 5, 319
- 20) Phillips J. P., 2001, MNRAS 326, 1041

## High Dispersion Two-Dimensional Spectroscopy of Planetary Nebulae

Masaaki OTSUKA

*Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory, Kamogata, Okayama 719-0232*

Akito TAJITSU

*Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii 96720*

Mizuki ISOGAI

*Kiso Observatory, Institute of Astronomy, The University of Tokyo, Tarusawa, Mitake-mura, Kiso-gun, Nagano 397-0101*

Abstract: Planetary Nebulae (PNe) are known as objects which are situated in the final evolutionary stage of the relatively less massive stars, and show various shapes. Classification of PN structure has been strongly dependent on direct two-dimensional images projected onto the sky. Such images are often insufficient to fully understand the real three-dimensional structure of PNe. Since most of studies on PNe are involved in the morphology, it is important to recognize precisely their structure. It is essential to examine the velocity fields as the information along the line of sight in addition to the projected spatial information by images. Here, we show our recent results on a peculiar PN obtained by the high-dispersion two-dimensional spectroscopy, which allowed a precise determination of its morphology as bipolar.