

氏 名 楠野 こず枝

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1659 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Distance and Proper Motion Measurement of The Red
Supergiant, PZ Cas, in Very Long Baseline Interferometry H₂O
Maser Astrometry

論文審査委員 主 査 教 授 川口 則幸
准教授 村田 泰宏
教 授 阪本 成一
准教授 山村 一誠
助 教 朝木 義晴

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

タイトル

Distance and Proper Motion Measurement of The Red Supergiant, PZ Cas, in Very Long Baseline Interferometry H₂O Maser Astrometry

天の川銀河をはじめとする渦巻銀河での渦状構造の生成やその持続メカニズムの理解は銀河のダイナミクスにおいて重要なテーマである。これらを説明するために密度波仮説が提唱された。この仮説では、渦巻銀河の渦状腕は恒星系円盤を伝わる定常密度波によって形成される。渦状腕の重力ポテンシャルによりガスの運動が乱され、衝撃波が形成される。その下流において星間ガスが圧縮されて分子雲が形成され、渦状腕構造に沿った星形成を励起し、渦状腕に沿った天体はお互いによく揃った運動になることがこの仮説では示唆される。

一方、最近の位相補償位置天文 VLBI 観測では、大質量星形成領域において 10– 20km/s の特異運動が観測されている (e.g. Reid et al.2009, Baba et al. 2009)。このような大きな特異運動は密度波仮説では説明できず(<10km/s)、その起源が理解されていない。大きな特異運動を説明する仮説の一つは、超新星爆発によって生成されたスーパーバブルの膨張運動に起因しているというアイデアである。Sato et al.(2008)によれば、星形成領域 NGC281 West はスーパーバブルに付随した場所にあり、その特異運動はスーパーバブルの膨張が反映されていると示唆されている。しかし、この仮説では特異運動が観測されている全ての天体について、その起源を説明できない。

本研究では、銀河系内の天体の特異運動の起源について理解するため、赤色超巨星に着目し、VLBI 位置天文観測による系内天体の観測的研究を推進した。赤色超巨星は、(1) 水メーザーが観測され、VLBI 観測に適していること、(2) 年齢が数千万年程度と比較的若く、ペルセウス腕上の天体であると推測されること、(3) OB アソシエーションのメンバーであることから、その星団の運動との比較により、その天体だけがたまたま特異な運動をしているのかどうか検証しやすいこと、という理由から着目した。本研究では特に赤色超巨星 PZ Cas に着目し、VLBI 位置天文観測の解析から固有運動および特異運動を求めた。さらに、PZ Cas で得られた年周視差により、PZ Cas の所属する Cas OB5 のメンバー恒星に対して *Hipparcos* によって得られた固有運動と、その中で視線速度が計測されている天体についても特異運動を評価し、PZ Cas および Cas OB5 アソシエーションの運動について詳細な調査を行った。

PZ Cas の VLBI 観測は、国立天文台 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) の4局を使い、22GHz 水メーザーに対して 2006 年から 2008 年の約 2 年間で全 12 回行われた。我々はこの観測データにおいて、Direct Phase Transfer(DPT)を取り入れた新たな位相補償 VLBI データ解析手法を試みた。既存解析手法では基線ベースでのフリッジ信号対雑音比が低い場合、位相較正に用いる解が得られずにデータ欠損を引き起こし、メーザー天体の最終的なイメージオリティを下げる原因となる。この問題を解決するため、DPT では観測で得られた生データの位相を直接に位相較正に使用してデータ欠損を発生

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

させず、イメージオリティの低下を回避することができる。DPT 手法をすべてのエポックの観測に適用して解析を行い、PZ Cas の水メーザーマップを得たところ、星周ガスが星からの質量放出によって膨張して行く様子が捉えられた。また、メーザーの運動の解析から年周視差 0.356 ± 0.026 mas ($2.81^{+0.22}_{-0.19}$ kpc) と星の固有運動 $\mu_{\alpha} \cos \delta = -3.7 \pm 0.2$ 、 $\mu_{\delta} = -2.0 \pm 0.3$ mas/yr が得られた。また、我々は VLBI 位置天文観測において精度 8% で距離の更新を行い、PZ Cas がペルセウス腕に乗っていることも確かめた。Cas OB5 メンバーの恒星の *Hipparcos* で測定された年周視差から求めた距離の平均値は 2.0 kpc であるが、*Hipparcos* の年周視差精度は約 1 mas と大きな誤差を持つため、今回得られた PZ Cas の年周視差との単純な比較は難しい。一方、Cas OB5 の測光視差から求めた距離は 2.5 kpc である (Humphreys 1978)。他の赤色超巨星の VLBI 位置天文観測の結果とそれを含む OB アソシエーションの測光視差は 10-20% の範囲で一致している。測光視差に関しては星間減光の見積もりは 0.16 mag の誤差があるため、本研究の結果はこれまでの測距結果と整合している。また、恒星の光度は距離の 2 乗に比例することから、今回の年周視差を使うことで、光度を補正し HR 図の理論進化トラック上の位置を修正することにより、PZ Cas の初期質量はおよそ 25 M_{\odot} であることがわかった。

次に、得られた年周視差、固有運動、および視線速度から PZ Cas の特異運動、(Us, Vs, Ws) = (22.8 ± 4.3, 7.1 ± 2.2, - 5.7 ± 4.0) km/s (U, V, W はそれぞれ銀河中心方向、銀河回転方向、銀河北極方向の速度成分)を導出した。この結果、PZ Cas では星形成領域などの若い天体の VLBI 位置天文観測で得られるような大きな特異運動を持つことがわかった。ただし、PZ Cas のあるペルセウス腕の天体は V 成分が負の傾向を持つ (Sakai et al. 2012) が、PZ Cas の V 成分は正の値を持ち、この傾向と異なる。そこで我々は PZ Cas の大きな特異運動の起源を 3 つの仮説を立てて議論した。

はじめに、PZ Cas が Runaway Star (Fuji & Zwart 2011) である可能性を考える。まず、PZ Cas が所属する Cas OB5 アソシエーションのメンバー星 (Garmany & Stencel 1992) と固有運動の比較を行った。メンバーの固有運動は *Hipparcos* で計測されている 15 天体を使用し、固有運動の平均値として $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (-2.8 \pm 1.2, -1.9 \pm 0.8)$ mas/yr を得た。これは PZ Cas の固有運動と誤差の範囲内で一致している。次に、PZ Cas と Cas OB5 メンバーの特異運動を比較した。固有運動および視線速度が得られるメンバーの 14 天体について算出した特異運動の平均は $(U_{OB5}, V_{OB5}, W_{OB5}) = (18 \pm 14, 5 \pm 9, -11 \pm 11)$ km/s である。14 天体の特異運動の各成分のヒストグラムを PZ Cas と比較すると、PZ Cas の特異運動は各ヒストグラムの中央値付近に位置する。よって、PZ Cas の特異運動は Cas OB5 の中で典型的な運動であると判断され、Runaway Star 仮説は棄却された。一方で、このことは Cas OB5 がアソシエーションとして大きな特異運動を持つことを示唆する。

次に、Cas OB5 メンバー星の運動がスーパーシェルの膨張運動に起因する可能性を考える。Cas OB5 領域にはスーパーシェルがあり (Moór & Kiss 2003)、Cas OB5 はこのシェルの西側のエッジ部分に位置する。まず、Cas OB5 の東側にある Cas OB4 を含めた固有運動の比較では、これらが南西方向へ並進運動している結果を得た。これら天体間で見かけ上、際立った膨張運動がないことを確認した。ただし、固有運動は天体の運動を天球面に射影したものであり、さらに詳細な比較を行うため、OB アソシエーションのメンバー星のうち固有運動および視線速度の得られた天体について特異運動を算出し、3次元運動

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

での比較を行った。Cas OB4 の特異運動の平均値は $(U_{OB4}, V_{OB4}, W_{OB4}) = (-11 \pm 10, -4 \pm 14, -15 \pm 8)$ km/s となり、Cas OB5 と Cas OB4 は東西に離れたアソシエーションであるが、特異運動の各成分を比較すると、U 成分で互いに逆向きの運動を検出(約 15km/s)、V 成分で約 5km/s の膨張運動を検出、W 成分で Cas OB5、Cas OB4 とともに $-10 \sim -15$ km/s の銀河面から離れていく方向の運動を検出した。Cas OB5 と Cas OB4 がスーパーシェルに付随している場合、膨張運動の可能性を示唆する結果であるが、ただし分散も大きいことに注意が必要である。

最後に、Cas OB5 と Cas OB4 がスーパーシェルに付随しておらず、別々の大きな特異運動を持っていた場合を考える。本研究で得られた PZ Cas の特異運動は密度波理論では説明の付かない大きな運動であり、かつ V 成分が正の方向の運動を持つ結果は、ペルセウス腕の天体とは傾向が異なる。この結果は最近の、N-body/SPH シミュレーション(Baba et al. 2009, Wada et al. 2010)による密度波を必要としない渦状腕構造の形成結果をサポートする。これらのシミュレーション研究では、回転運動の中で自己重力によって非定常腕が形成され、若い天体で方向の揃っていない大きな特異運動(20-30km/s)が観測されている。これにより、腕上では密度波で説明しにくい大きな特異運動を再現できる。ただし、観測的研究から銀河全体を調査し比較する必要があるため、今後さらなる VLBI 位置天文観測は必要かつ重要となる。

本研究では VLBI 位置天文観測により高精度に求めた PZ Cas の距離と 3次元運動について OB アソシエーションとの比較を初めて行い、その運動の起源について議論した。Runaway Star でない限り、VLBI 観測により得られた赤色超巨星の特異運動は OB アソシエーションまでの距離と運動に関する情報を更新することができる。しかし一方で、OB アソシエーションの特異運動の検証は、現在の *Hipparcos* の固有運動の結果を利用している限りにおいて、VLBI 位置天文観測結果との間で比較研究を行うことは難しい。VLBI 位置天文観測を行った天体は精度よく特異運動が計測できるものの、OB アソシエーション全体の分散を小さくするためには固有運動の精度も上がる必要があるため、個々の星の位置精度の向上が求められる。VLBI 位置天文観測でメーザー天体に関して得られた高精度位置天文観測成果と知見を GAIA や JASMINE などの可視光による次世代位置天文プロジェクトにおいて、さらに研究の展開を行っていくことが期待される。

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

タイトル

Distance and Proper Motion Measurement of The Red Supergiant, PZ Cas, in Very Long Baseline Interferometry H₂O Maser Astrometry

審査委員会はまず、論文について審査を行った。本論文は、位置天文観測専用のVLBI観測網、VERAで取得された赤色超巨星PZ Casの水メーザー観測データを用いてPZ Casの年周視差と固有運動の精密な測定を行いその動力学に関する研究を行ったものである。年周視差計測という最も信頼性の高い距離計測結果からPZ Casがペルセウス腕に存在すること、固有運動の計測からは大きな特異運動（非円運動）が存在することを明らかにした。PZ Cas周辺に散在するOB星の集団（Cas OB5アソシエーション）の固有運動をヒッパルコス観測データを用いて求めたところ、VERAの観測精度よりも良くないものの統計的にPZ Casの固有運動に代表される大きな特異運動が存在することを明らかにした。200pcという大きな広がりを持ったCas OB5アソシエーションの特異運動の起源についての検討を行い、超新星爆発に起因するスーパーシェル膨張仮説や最新の銀河回転運動のシミュレーション結果などとの比較を試みている。また密度波理論に基づくモデルで説明されてきたこれまでの観測結果との比較も行っている。

第一章（Introduction）では、我々の銀河（天の川銀河）のスパイラル構造やその成因として提唱されている密度波仮説について紹介し、本論文の観測結果は先行研究結果を含め密度波理論だけでは説明できないことを述べている。また、我々の銀河のダイナミクスを明らかにするうえで重要な位置天文観測手法の現状をレビューし、力学的な距離計測法では銀径によっては2倍以上異なる大きな誤差が生じること、測光法では20-30%の誤差が生じること、VLBIによって高精度な距離計測（年周視差）と固有運動の計測が可能であることを示している。

第二章では、赤色超巨星PZ CasのVLBI観測について詳細に述べている。2年間12エポックにわたるVERAの観測結果を解析し、年周視差と固有運動を導き出した。本研究で特徴的な点として、2ビーム位相補償を行うに当たってDPT (Direct Phase Transfer)という手法を新たに開発したことが挙げられる。これまでの手法では位置基準天体の像合成を行う過程で得られた位相ソリューションを用いて位相変動を補正していたが、DPT法では基準天体の観測で得られた位相揺らぎを直接補正に使用している。これにより、位置基準天体のSNが若干低く熱的な位相雑音は含まれているものの、より多くのターゲット天体の観測データを解析に使用することで天体の位置決定精度を向上できる。また、星の年周位置変動をトレースする際、メーザースポットの形状を複数のガウスコンポーネントに分離し個々のガウス成分の位置変化を求めている。単純な輝度最大点をトレースする従来の手法に比べ計測誤差が最小にできることを示したこともユニークである。計測誤差の評価に当たっては大気揺らぎによる影響を含めたシミュレーションを行うなど説得力のある論旨を展開している。

第三章では、観測結果得られた精密な距離計測結果からPZ Casの絶対光度を求め、推定される質量がこれまでの20太陽質量より重い25太陽質量であることを示した。また観

(Separate Form 3)

測の結果得られた大きな固有運動については、ランナウエイ仮説、シェル膨張仮説、非定常渦状腕形成における非円運動仮説などを当てはめて検討を進め、ランナウエイ仮説は完全に棄却できること、シェル膨張の検討では、PZ Casを含むCas OB5アソシエーションのほかにCas OB4アソシエーションの特異運動も考慮に入れ、膨張運動と思われる兆候を見出したが、シェル膨張を引き起こす要因として考えられる超新星爆発のエネルギーでは、シェルの膨張エネルギーを説明できないという指摘をしている。非定常渦状腕形成における非円運動仮説に関しては、先行研究で得られた特異運動とU成分（銀河中心方向の運動成分）は同様の観測結果であったが、V成分（回転方向の運動成分）が大きく異なる（運動方向が正負反転）ので、単純な密度波仮説（Lin & Shu, 1964）では説明が困難であるとし、N-body/SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）シミュレーションによる結果が本論文で得られた特異運動をよく説明するとしている。しかし、単純な密度波仮説でも腕ポテンシャルの谷を挟んでV成分の正負反転が起こりうるという指摘が審査委員よりなされた。N-body/SPHシミュレーションが予測する自己重力による腕状・バー構造形成を正しいとするためには、本研究で得られた局所的な特異運動だけではなく銀河面全面にわたる今後の観測結果を必要とすることなどから、決定的な結論として密度波によるスパイラルショックが励起する特異運動とする仮説を棄却はしていない。

第四章では、全体のまとめとともに、今後に残された課題や2013年末に打ち上げられたGAIA衛星や2015年に打ち上げが予定されているJASMIN衛星などの光赤外領域での高精度位置天文観測への期待が述べられている。

このように、本研究は、VLBI アstrometryを用いて、銀河系のペルセウス腕における赤色超巨星 PZ Cas の特異運動を独自の解析手法で明らかにし、銀河系の渦状構造の形成メカニズム解明に向けての数少ない観測データを提供したものであり、その成果は高く評価される。1時間にわたる公開講演、質疑応答、その後の審査委員全員との非公開質疑を通し、出願者が観測、解析、議論にいたるまで主体的に研究を進めたことが確認された。また、本論文の主要な部分は査読付き学術雑誌に出版済みであることも含め、審査委員会は全会一致で本論文が博士論文として優れたものであることを認めた。

さらに、論文審査に加え、審査委員全員出席のもとで口頭による発表の試験を行い、質疑応答も含めて約1時間の公開発表会を実施した。発表会では、この研究テーマの背景、位相補償解析手法と誤差解析の詳細、および得られた観測結果にたいする科学的な解釈が明快に述べられ、銀河系の渦状構造の研究における本研究結果の意義についても良く理解していることが明らかであった。また、公開発表会終了後にさらに非公開で審査委員より銀河回転運動における密度波理論に関する質疑があり、これらの質疑に対しても十分な回答が得られ、研究発表能力および議論の能力においても十分な力量があると認められた。また、提出論文は簡潔な英文で書かれており、英語による研究成果発表能力も十分に備わっていると判断された。

以上の結果を総合し、審査委員会は合格と判定した。