

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684005

研究課題名(和文)セファイド変光星の探査および分光観測による銀河系の構造と進化の研究

研究課題名(英文) Surveys and spectroscopic observations of Cepheid variable stars to reveal the Galactic structure and evolution

研究代表者

松永 典之 (Matsunaga, Noriyuki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80580208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円

研究成果の概要(和文)：我々の住む銀河系は、どのような姿をしているのであろうか。その正確な形状や星々の運動状態については最終的な結論が得られていない。本研究では、その構造と進化を探るために、距離や年齢などが正確に得られる脈動変光星の探査と詳細な観測を行う。例えば、銀河中心領域に対する南アフリカ天文台 IRSF 望遠鏡での観測では、世界ではじめてセファイド変光星を発見し、その領域での星形成史を調べることに成功した。また、東京大学木曾観測所シュミット望遠鏡での探査でも、北半球の銀河面領域で多くの変光星を発見している。さらに、発見した天体の分光観測も行い、それらの運動なども調査し、銀河系の進化についての研究を進めている。

研究成果の概要(英文)：The Milky Way contains our Solar system, but its spatial and kinematic structure remain to be investigated. We focus on pulsating variable stars, as a tracer of the galaxy, whose distances and ages can be accurately determined. We conducted survey observations for variable stars using IRSF telescope in South African Astronomical Observatory and Kiso Schmidt telescope in Kiso Observatory of the University of Tokyo. With the former we discovered Cepheid variables stars in the Galactic Center region for the first time, and the survey with the latter has been revealing hundreds of new variable stars in the northern Galactic disk. In addition, we also conducted spectroscopic observations of the variable stars we discovered, which give insights into the evolution of the Galaxy.

研究分野：光学赤外線天文学

キーワード：赤外線天文学 銀河系 恒星 変光星 セファイド

1. 研究開始当初の背景

銀河系円盤は、天の川銀河に存在するほとんどの星間物質とその星の多くが集まっている銀河の骨格部分である。天文学者は、長い間にわたり銀河系の構造について研究を行ってきた。渦状腕については、特に CO 分子ガスや水素原子ガスの電波観測により多くの研究がなされている。また、国立天文台の VERA などによって行われている超長基線干渉計 (VLBI) 観測では、数キロパーセクから 10 キロパーセク程度の広い範囲の天体に対して年周視差を計測できるため、近年の研究で銀河系円盤の構造を探るために大きな役割を果たすようになった。特に、大質量星形成領域のメーザ輝線に対する VLBI 観測は大きな成功を収め、銀河系渦状腕の正確な構造が得られつつある。これは、ガスや現在進行中の星生成という若い成分で観測される銀河系の姿である。

一方、銀河系の誕生から現在まで形成され続けてきた星々の分布を天の川銀河の広い範囲について調べることは、まだまだ遅れている。その原因としては、強い星間減光と各天体までの距離を求めることが難しいという 2 つが大きい。銀河面に存在するダスト (固体微粒子) によって減光が起こるために、銀河系円盤の中でも遠い天体は可視光線で観測することが出来ない。また、ガスの場合には銀河回転に沿って動いていることを利用する距離の推定法 (運動学的距離) が利用されるのに対し、星の場合は円盤中でも様々な運動をもつものが混在しているため、同じ方法で星の分布を再現するのは困難である。その運動自体が銀河系の構造や進化の研究において大きな意味を持つことを考えても、運動学的距離以外の方法で距離を見積もることが重要である。

我々は、銀河系円盤の構造を調べるトレーサとして、セファイド、RR ライリ、ミラなどの脈動変光星に注目している。それらの天体に対しては、周期光度関係を用いて個々の星の距離を測定することが可能で、近赤外線 (星間減光の影響が小さい) でも明るいことから、銀河系円盤の重要なトレーサである。恒星進化や脈動の理論に基づいて年齢・質量の情報が得られることも、天の川銀河の構造や恒星種族の性質を調べる上での利点である。ただし、強い星間減光という障壁もあり、銀河面領域の変光星の探査はいまだ不十分である。

2. 研究の目的

そこで、銀河系の構造と進化を調べるために、脈動変光星を銀河系の広い範囲で探すこと、および変光星の分光観測を行ってそれらの運動や化学組成を調べる手法を確立すること、を目標に本研究を開始した。そのために、以下に述べるような近赤外線での探査を、南ア天文台の IRSF 望遠鏡と東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡で行う。これまでの

変光星探査はほとんど可視光で行われていたので、星間減光に埋もれて発見されていなかった多くの変光星が見つかること期待できる。さらに、発見した天体に対して、国立天文台ハワイ観測所のすばる望遠鏡での分光観測を行い、それらの視線速度と化学組成を計測する。強い減光の影響によって分光観測も赤外線で行う必要があるが、これまで近赤外線の分光観測によって変光星の研究が行われた研究は皆無に等しい。スペクトルに見られる吸収線の特徴も可視光とは異なるため、ラインの同定など基礎的な作業から始める必要がある。これらの研究を通して、銀河系の広い範囲を見通すトレーサの発見と、その性質を詳しく調べるための手法の確立を行いたい。変光星やその他のトレーサによる銀河系の調査は今後ますます進むと考えられ、本研究での結果は脈動変光星をトレーサとする今後の研究において、基礎的役割を果たすと期待される。

3. 研究の方法

銀河系のトレーサとなる脈動変光星を探すため、南アフリカ天文台にある IRSF 望遠鏡 (主鏡口径 1.4 メートル) と東京大学木曾観測所の木曾シュミット望遠鏡 (補正板口径 1.05 メートル) を用いた観測を行う。変光星を探すためには、同じ領域を繰り返し観測する必要がある。

さらに、近赤外線高分散分光観測 (比波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda=20000$ 程度) を国立天文台ハワイ観測所のすばる望遠鏡で行い、強い星間減光を受ける天体の運動・化学組成も求められるように研究を開始する。近赤外線での分光によってセファイドの視線速度・化学組成を求める手法を世界に先駆けて確立するために、較正用の近傍天体や新しく発見する天体に対して系統的な観測を行い、イタリアの Giuseppe Bono 氏など理論的な専門家とも共同研究を行う。

4. 研究成果

(1) IRSF 望遠鏡での観測による銀河系中心のセファイド変光星の発見

銀河系中心は、非常に多くの星、星間物質やブラックホール、強い磁場などが混在する複雑な環境である。系外で見つかっている活動銀河核と比較すると現在の活動性がずっと低いとはいえ、銀河の中心部で起こる多様な物理現象をもっとも詳細に調べることができる貴重な観測対象である。銀河系中心から 30 パーセク程度の領域では数百万年の年齢をもつ大きな星団が見つかっており、今も星形成が起こっていると考えられている。また、現在までの星形成が連続的であったことも示唆されているが (Figer et al. 2004, ApJ, 601, 319)、その結論は光度関数との比較によるもので、間接的・暫定的である。年齢のわかる変光星 (特に古典的セファイド)

は、銀河系中心領域での星形成史に関する直接的な証拠となり得る。

本研究では、IRSF 望遠鏡と SIRIUS カメラを用いた探査のデータを用い、周期 100 日以下の変光星についての解析を行った。その結果、45 個の短周期変光星を発見した。周期や変光曲線の形状で分類したところ、古典的セファイドが 3 個、II 型セファイドが 17 個、食連星が 22 個、分類の不定性が大きいものが 3 個であった。このうち、3 個の古典的セファイドはいずれも周期が 20 日程度である (20.0 日、22.7 日、23.5 日)。太陽近傍にあるセファイドの周期が 5 日前後をピークにして 3~30 日あたりに幅広く分布しているのに対して、今回見つかった天体の周期分布は特異なものである。恒星進化理論によればそれらの年齢は 2500 万年程度であり、今から 2500 万年前に銀河系中心付近で星形成が起こっていたことの強い証拠となる。一方、周期 5~15 日前後 (3~7 千万年の年齢に対応) の古典的セファイドは見つからなかった。銀河中心の周囲で起こる星形成が数千万年のタイムスケールで突発的に起こることが示唆される。棒状構造を通して銀河円盤から中心部へガスが運ばれる過程が、同じようなタイムスケールで起こるとい研究もあり、銀河進化の一過程の痕跡を発見することができたといえる。この結果は、Nature 誌に発表した (Matsunaga et al. 2011, Nature, 477, 188)。

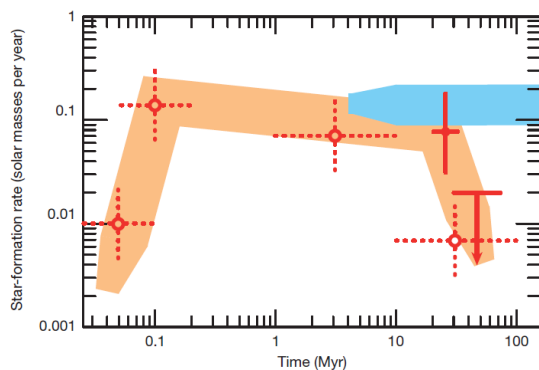


図 1 古典的セファイドおよびその他のトレーサで探る銀河系中心付近での星形成史。

若い星の代表と言える古典的セファイドに対し、II 型セファイドは 1 太陽質量程度の星が進化して生じる脈動変光星である。10 億年以下の若い古典的セファイドが薄いディスク領域に集中しているのに対し、ハローや厚いディスクなど古い恒星種族に付随している。二種類のセファイドが存在することは 1950 年代からわかっているが、古典的セファイドがその後さかんに研究されたのに対し、II 型セファイドについては未だよくわかっていない点が多い。研究の進んでいない原因のひとつは進化のタイムスケールが短く、同定されている天体の個数が限られていることである。このような天体の進化を明らかにするためには、様々な環境にある II 型セファ

イドをなるべく多く同定する必要がある。上述したように、銀河系バルジの探査では、Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) のサーベイによって、数百個の II 型セファイドが最近発見されていた。サーベイ領域の面積を考えると、IRSF 望遠鏡で見つかった II 型セファイドの密度は OGLE で発見された天体の密度よりも高く、銀河系中心へ向かって II 型セファイドを含む恒星種族の密度が赤まっていることがわかった (Matsunaga et al. 2013, MNRAS, 429, 385)。

また、上記の 2 種類のセファイドの周期光度関係から銀河中心までの距離を見積もった。その距離は約 8 キロパーセクであり、同じ探査から 2009 年に我々が調べたミラ型変光星 (Matsunaga et al. 2009, MNRAS, 399, 1709) や、その他の方法で調べられている距離とも一致している。また、これらの変光星による距離決定方に関して、銀河中心と大小マゼラン銀河の距離を比較することにより、周期光度関係が変光星の存在する環境に依存するかどうかについても研究を行った (Matsunaga, 2012, Ap&SS, 341, 93)。

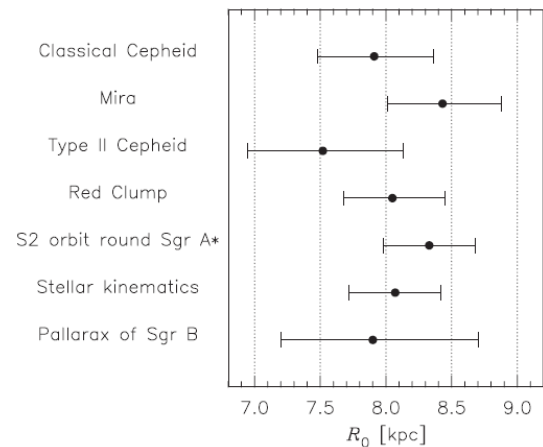


図 2 各指標による銀河系中心までの距離の測定値。上の 3 つ (Classical Cepheid=古典的セファイド、Mira=ミラ型変光星、Type II Cepheid=II 型セファイド) が我々の得た結果である。

(2) 木曾シュミットによる KISOGP 探査

KISOGP (KWFC Intensive Survey of the Galactic Plane) は、東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡および木曾超広視野カメラ (KWFC) を用いた、銀河面領域 320 平方度に対する変光天体探査である。研究代表者が PI として、観測や解析を進めている。北半球の銀河面の広い領域にある脈動変光星や新星・矮新星等の変光天体を探し、銀河系の構造を描き出すこと、および各種新天体のリストを作成して、その後の詳細な研究にターゲットを提供することが本観測の目的である。一回の観測あたりの限界等級は $I = 17$ 等級で、ミラやセファイドの変光星については太陽系から 20 キロパーセクの範囲にある天体 (すなわち銀河系の最外縁にある星) を探査できる。新星・矮新星についても、 $I=17$ 等と

いう深さの探査はほとんど行われていないので、これまで見つからなかったような天体の発見が期待できる。この探査では、2012年4月に観測を開始して、2015年3月までの3年間に各視野40~60回程度の反復観測を行った。

これまでに、Iバンドの振幅が約0.5等級以上で変光のタイムスケールが長いミラ型変光星候補天体を700個以上検出した。その半数以上は変光が報告されていない新発見の天体である。また、既知の食連星やX線連星、YSO天体(FU Ori型など)の変光も多くとらえている。今後、振幅が0.05等級程度まで小さい変光星を含めて数千個の新しい変光星が見つかるかと期待される。

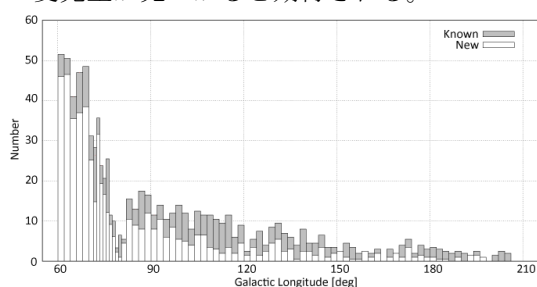


図3 KISOGP領域内に発見したミラ型変光星(候補天体を含む)の銀経分布。新発見の変光星を白いヒストグラム、既知天体を灰色のヒストグラムで示した。

(3) セファイドの変光星の赤外線分光観測

(1)で述べたように、IRSF望遠鏡での変光星探査により、銀河系中心領域に3個のセファイド変光星を発見した。周期から、それらの年齢は2~3千万年である。これまで、Central Molecular ZoneあるいはNuclear Stellar Diskと呼ばれる銀河系中心から半径200パーセク程度の範囲には、現在進行中の星形成や数百万年の若い星が見つかったが、数千万年の年齢がはっきり求められた天体はこれが初めてである。この範囲内の星やガスは、銀河系中心の周りを数百万年程度のタイムスケールで回転していることが知られている。セファイドもこのディスク内を回転していることが予想される。そこで、2010年および2012年(5月と7月)に、すばる望遠鏡の共同利用観測により、Hバンド(1.6マイクロメートルの周囲)での分光観測を行った。それにより、求めた視線速度はディスクの回転と矛盾しないものであった。また、東京工業大学の馬場淳一氏らが行っている数値シミュレーション(N体+SPH)によれば、現在ディスク中を回転している星は、それらが誕生した2500万年前にはすでにディスクを回転していた分子雲から生まれたものであることが示唆される(つまり星形成が起こった後に、星がディスクに落ちる可能性は低い)。これらの成果については、研究期間終了後に論文として出版した(Matsunaga et al. 2015, ApJ, 799, 46)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① 松永 典之、他 15 名
Kinematics of Classical Cepheids in the Nuclear Stellar Disk、Astrophysical Journal、査読有、Volume 799、article id. 46、9 pp. (2015)
DOI: 10.1088/0004-637X/799/1/46
- ② 松永 典之、他 8 名
Cepheids and other short-period variables near the Galactic Centre、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、査読有、Volume 429、pp. 385-397 (2013)
DOI: 10.1093/mnras/sts343
- ③ 松永 典之
A discussion on metallicity effects on the period-luminosity relations of Cepheids and Miras、Astrophysics and Space Science、査読有、Volume 341、pp. 93-98 (2012)
DOI: 10.1007/s10509-012-1090-x
- ④ 松永 典之、他 8 名
Three classical Cepheid variable stars in the nuclear bulge of the Milky Way、Nature、査読有、Volume 477、pp. 188-190 (2011)
DOI: 10.1038/nature10359
- ⑤ 松永 典之、他 2 名
Period-luminosity relations of type II Cepheids in the Magellanic Clouds、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、査読有、Volume 413、pp. 223-234 (2011)
DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.18126.x

[学会発表] (計 49 件)

- ① 松永 典之
"A near-infrared variable star survey in the Magellanic Clouds"、口頭講演、Conference "Fifty years of wide field studies in the Southern hemisphere: Resolved stellar populations in the Galactic bulge and the Magellanic Clouds"、2013/5/6-9、La Serena、Chile
- ② 松永 典之
"Cepheid variable stars and the distance to the Galactic Center"、招待講演、IAU Symposium 289 "Advancing the physics of cosmic distances"、

2012/8/27-31、Chinese International
Convention Center、Beijing、China

- ③ 松永 典之
"Cepheids from two stellar populations
in the Galactic bulge"、口頭講演、EWASS
2012 symposium "Stellar Populations 55
years after the Vatican conference"、
2012/07/2-4、Pontifica University
Lateranese、Rome、Italy
- ④ 松永 典之
"Search for pulsating stars in the
Galactic bulge and the disk"、口頭講
演、Conference "The Hong Kong workshop
on evolved stars and astrophysical
masers"、2011/11/7-8、Hong Kong
University、Hong Kong
- ⑤ 松永 典之
"Classical Cepheids and episodic star
formation in the Galactic Nuclear
Bulge"、口頭講演、Conference "The
Central Kiso parsec in Galactic Nuclei"、
2011/08/29-9/2、The Physikzentrum、Bad
Honnef、Germany
- ⑥ 松永 典之
"Classical Cepheids found in an IRSF
near-IR survey and their impacts"、口
頭講演、Conference "The fundamental
cosmic distance scale: State of the art
and Gaia perspective"、2011/05/3-6、
Naples、Italy

[その他]

ホームページ等

[http://stella.astron.s.u-tokyo.ac.jp/
nmatsuna/pr2011/](http://stella.astron.s.u-tokyo.ac.jp/nmatsuna/pr2011/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松永 典之 (MATSUNAGA、Noriyuki)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
(2012年8月までは同研究科・特任研究員、
2012年9月から現職)
研究者番号： 80580208