

平成30年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287028

研究課題名(和文) 近赤外線高分散分光観測による恒星組成解析の確立と銀河系研究への応用

研究課題名(英文) Stellar abundance analysis based on near-infrared high-resolution spectra and applications to studies on the Milky Way

研究代表者

松永 典之 (Matsunaga, Noriyuki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：80580208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系の構造や進化を探るためには、その中に存在する恒星の位置や運動、化学組成を調べる必要がある。銀河系の円盤領域には恒星だけでなくガスやダストも多く存在し、星間減光が強くなるために可視光での観測が難しくなる。本研究では、星間減光の影響が小さい近赤外線観測に注目した。恒星の運動と化学組成を調べるための分光観測装置の機能追加(WINERED分光器の高分散分光モード追加)や解析手法などに関わる基礎的調査を進めた。また、銀河系の有用なトレーサである脈動変光星の研究を進めて、銀河系円盤フレア領域にあるセファイド変光星や銀河系バルジにある炭素の多いミラ型変光星を世界で初めて発見するなどの成果を上げた。

研究成果の概要(英文)：Measuring the positions, kinematics, chemical abundances of stars is important in understanding the structure and evolution of the Milky Way galaxy. In its disk region, a large amount of gas and dust co-exist with stars, and the strong interstellar extinction caused by dust makes observations in the visible difficult or impossible. Our research focuses on infrared observations, both photometric and spectroscopic, which can penetrate the interstellar extinction. We installed the high-resolution mode to our near-infrared spectrograph, WINERED, and developed methods and data sets necessary for analysis of the near-infrared high-resolution spectra. We also made achievements in studies on pulsating stars, which are behind the dust veil of the Milky Way disk, including the first discoveries of Cepheids in the flared part of the disk and carbon-rich Miras in the bulge.

研究分野：光学赤外線天文学

キーワード：赤外線分光観測 恒星化学組成 天の川銀河 脈動変光星

### 1. 研究開始当初の背景

銀河系(天の川銀河)に代表される円盤銀河は、現在の銀河宇宙を構成する最も普遍的な要素であり、その構造と多様性、および進化の解明は現代天文学の主要テーマでありつつある。我々の銀河系は、その中にあるひとつひとつの恒星の運動や化学組成を詳しく観測できるので、このような問題を調べるために特に重要な研究対象である。

我々は、銀河系を調べるためのトレーサとして、セファイド脈動変光星に注目している。1~数十日の変光周期をもつこれらの星に対しては、周期光度関係を利用して距離が求められるので、銀河系の構造を調べるために応用できる。また、それらの変光周期は星の年齢に依存しているため、いろいろな周期の変光星の分布を比べれば、渦状腕で誕生した星の分布が時間の経過でどのように変化するかということも調べられる。近年の大規模プロジェクトでは多くの変光星が発見されたものの、それらは可視光での探査のため星間減光の強い領域は観測できず、銀河系円盤領域の変光星探査は不十分であった。

このような状況の中、我々がこの数年間で進めてきた近赤外線変光星探査では、銀河系中心領域などこれまで全くセファイドが見つかっていなかった範囲に新たな天体を発見し、世界の研究グループに先駆けて大きな成果を上げることができた(文献)。そのような研究を進めるために、発見された変光星の分光観測を行って運動と化学組成を調べる研究が求められていた。星間減光の強いそれらの天体に対しては、赤外線での分光観測が必要となるが、赤外線分光装置はまだ数も少なく、今後開拓すべき余地が多く残されている。特に、あまり応用が進んでいない0.95~1.30マイクロメートルでの高分散分光を可能にしたWINERED分光器を用いた研究を、本計画の軸に据えることとした。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の2点に大別できる。

(1)赤外線高分散分光器 WINERED について、波長分解能 80,000 の高分散分光モードの追加を含めて、ハードウェア・ソフトウェア両面の改良を行い、重元素量標準星などのスペクトルから組成測定を行うための基礎を確立すること。(2)銀河系円盤に埋もれたセファイドなどの変光星の探査を継続し、銀河系の構造について研究を行いながら、将来の分光観測のためのターゲットを増やすこと。

(1)の WINERED を用いた研究については、新たな回折格子を導入することによって、波長分解能の高い観測を可能にすることと、そのデータ解析の基本的な手法・情報を整備することが大きな目標の一つである。これと関連し、赤外線高分散分光の応用として、すばる望遠鏡 IRCS 分光器での赤外線スペクトルを用いた研究を進める。

(2)の変光星探査の継続については、それ

までにも行っていた南ア天文台 IRSF 望遠鏡や木曾シュミット望遠鏡での探査から、銀河系円盤領域に新しい変光星を見つけて、銀河系の構造を探る。それらの天体は、将来 WINERED などの赤外線高分散分光観測のよいターゲットとなり、運動や化学組成を含めた多次元情報に基づく銀河系研究を支える貴重なトレーサとなると期待できる。

### 3. 研究の方法

WINERED は、z バンドから J バンド (0.92~1.35  $\mu\text{m}$ ) にかけて連続的なスペクトルを取得する近赤外線高分散分光器で、同じような分光器と比べて非常に高い効率(スループット約 50%)をもつのが大きな特長である。2012年の5月に京都産業大学の神山天文台にある 1.3m 荒木望遠鏡にてファーストライトを迎え、その後も定期的に科学観測が行われていた。本研究前には比波長分解能 3 万のモードしかなかったが、本研究において新たな回折格子とそれを利用するための透過型クロスディスペルザーを導入して、約 8 万の高い分解能のモードを追加する(装置のセッティングにより、両モードを選択できるようにする)。一方で、分解能 3 万での観測を進めて、各種天体の観測を行いながら、視線速度や化学組成の導出について基本的な研究を進める。さらに、大規模なデータ取得に備えて自動的なパイプライン処理ツールの開発も行う。また、これらと並行して、銀河系のトレーサとなる変光星の探査、研究を行い、本格的に銀河系の構造・進化を解き明かす基礎を固める。

### 4. 研究成果

本研究事業は、当初の 3 年計画を 1 年間延長して 4 年間となった。WINERED の高分散分光を可能とする開発が完了してその観測を行ったほか、当初計画にはなかったチリの天文台への WINERED 移設・観測などを含めて大きな成果が得られた。以下、年度ごとにその主な成果をまとめる。

#### 【平成 26 年度】

京都産業大学・神山天文台において、WINERED 分光器での観測を継続して行い、重元素量標準星などのスペクトルを多数得た。そのスペクトルには、鉄、シリコン、チタンなどはもちろん、リンなど可視光ではほとんど観測されていない金属の吸収線が存在することを確かめられた。また、波長分解能を約 8 万に向上させるための回折格子とそれを用いるために必要な透過型クロスディスペルザーを準備し、その性能の確認と分光器への導入のための開発を進めた。また、赤外線高分散分光の応用として、すばる望遠鏡 IRCS 分光器で得た 1.48~1.78 マイクロメートルのスペクトルを用いた研究を進め、銀河系中心領域で発見したセファイド変光星の運動に関する論文を発表した(文献)。

変光星の分布に関して、南アフリカの共同研究者（ケープタウン大学・Feast 名誉教授ら）と行った銀河系円盤外縁部のフレア領域にあるセファイド変光星に関する論文を Nature 誌で発表した（文献 ）。一方、東京大学木曽観測所で行っている KISOGP 変光天体探査では数百個のミラ型変光星を発見した。それらを表面化学組成（酸素過多または炭素過多）により分類するための分光追観測も国立天文台岡山天体物理観測所および兵庫県立大学西はりま天文台で行っている。

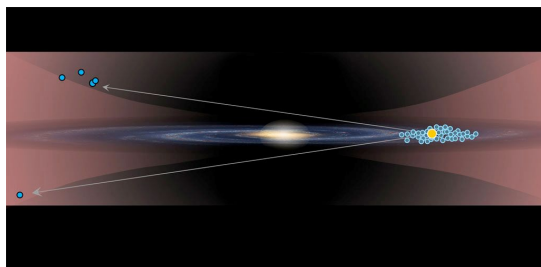


図1：文献 で発見した5つのセファイド変光星（左側）とこれまでに知られていた同種の天体の位置を比較した概念図。銀河系円盤を横から見た図で、右側のオレンジ色の点が太陽系。新しいセファイド変光星は、銀河系中心よりも向こう側で円盤から離れたフレア領域に存在している。(C) R. M. Catchpole (Cambridge) and NASA/JPL-Caltech.)

#### 【平成 27 年度】

WINERED 分光器の分解能向上のための開発を行い、8月にその試験観測に成功した。従前の比波長分解能約3万よりもはっきりと鋭い吸収線が見られ、目標とした比波長分解能（約8万）に近い高い分散が得られることを確認し、テストデータを取得した。分解能3万のWIDEモードのデータを用いた研究では、Diffuse Interstellar Band (DIB)に関する論文を発表した（文献 ）。一方、すばる望遠鏡 IRCS 分光器で得た赤外線スペクトルを用いた研究も進めた。特に、恒星の基本的なパラメータのひとつである有効温度をスペクトルだけから導出するために、吸収線の強度比を用いる指標を、この波長域では世界で初めて導出した（文献 ）。

銀河系円盤のトレーサである脈動変光星を探するための研究も順調に進んだ。KISOGP 変光天体探査では、約800個のミラ型変光星や約100個のセファイドを発見しており、前年度同様、それらの分布や運動、化学組成を明らかにするための観測も各天文台で進めた。

#### 【平成 28 年度】

チリ・ラシヤ天文台（欧州南天天文台）に WINERED 分光器を輸送し、1月と2月に NTT 望遠鏡（口径 3.58メートル）に取り付けた観測を行った。それまで観測を行っていた京都産業大学の荒木望遠鏡（口径 1.3メートル）と比べて、期待通り暗い天体の観測が可能であることを実証した。ただし、NTT 望遠鏡での観測の効率を上げるために、望遠鏡との連

動やスリットビューアの操作性などについて、ハードウェア・ソフトウェア両面で改善すべき課題が見つかった。京都産業大学で得ていた WINERED のスペクトルを用いた研究も継続し、DIB に関する論文を発表する（文献 ）などした。

変光星探査による銀河系構造の研究では、南ア天文台 IRSF 望遠鏡のデータに基づいて、銀河系中心方向のセファイド変光星を多数発見し、その分布から天の川の中心付近に若い星の間隙があることを発見した（文献 ）。

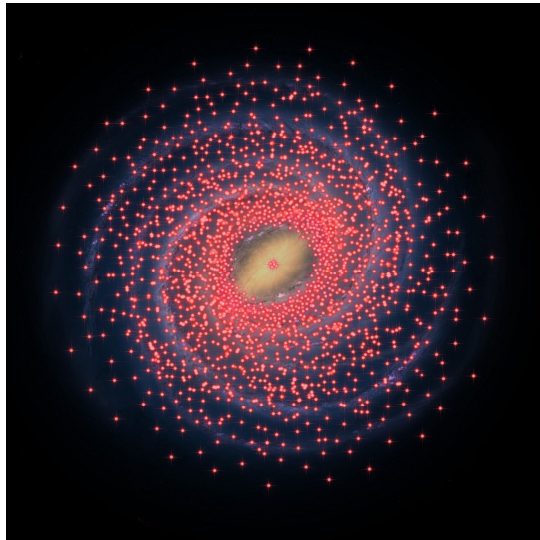


図2：文献 で明らかとなった若い星のすき間を模式的に示した図。天の川銀河の想像図の上に、セファイド変光星に代表される若い星を小さい点でプロットしている。

#### 【平成 29 年度】

7月、12月、3月にそれぞれ4夜、5夜、5夜の観測を WINERED 分光器と NTT 望遠鏡の組み合わせで行い、特に12月には本研究に関わる恒星の物理量を決める基本的な手法を確立するためのデータを得た（現在、論文準備中）。一方、昨年度までに得ていた WINERED スペクトルを用いて、恒星温度の測定方法の確立（文献 ）やミラ型変光星の化学組成測定（文献 ）などについての論文を発表した。

また、トレーサとなる脈動変光星の探査の一環として、表面に炭素を多く持つ星を同定する手法を用いた研究を行い、すずみ覆われたミラ型変光星を銀河系中心部に世界で初めて発見した（文献 ）。

#### <引用文献>

- Matsunaga et al. 2011, Nature, 477, 188
- Matsunaga et al. 2015, ApJ
- Feast et al. 2014, Nature
- Hamano et al. 2015, ApJ
- Fukue et al. 2015, ApJ,
- Hamano et al. 2016, ApJ,
- Matsunaga et al. 2016, MNRAS,
- Taniguchi et al. 2018, MNRAS, 473, 4993
- D'Orazi et al. 2018, ApJL, 855, L9
- Matsunaga et al. 2017, MNRAS, 469, 4949

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 14 件)

Sameshima, H., Matsunaga, N. (4 番目), Kobayashi, N. (10 番目), Kawakita, H. (34 番目), 他 49 名, "Correction of Near-infrared High-resolution Spectra for Telluric Absorption at 0.90– 1.35  $\mu\text{m}$ ", Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 査読有, 130 巻, ID 74502 (2018)  
DOI: 10.1088/1538-3873/aac1b4

D'Orazi, V., Matsunaga, N. (2 番目), Kobayashi, N. (3 番目), Kawakita, H. (4 番目), 他 14 名, "On the Chemical Abundances of Miras in Clusters: V1 in the Metal-rich Globular NGC 5927", Astrophysical Journal Letters, 査読有, 855 巻, ID L9 (2018)  
DOI: 10.3847/2041-8213/aab100

Taniguchi, D., Matsunaga, N. (2 番目), Kobayashi, N. (3 番目), Kawakita, H. (7 番目), 他 6 名, "Method to Estimate the Effective Temperatures of Late-Type Giants using Line-Depth Ratios in the Wavelength Range 0.97–1.32 $\mu\text{m}$ ", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 473 巻, 4993–5001 頁 (2018)  
DOI: 10.1093/mnras/stx2691

Matsunaga, N., 他 6 名, "Discovery of carbon-rich Miras in the Galactic bulge", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 469 巻, 4949–4956 頁 (2017)  
DOI: 10.1093/mnras/stx1213

Tanioka, S., Matsunaga, N. (2 番目), Kobayashi, N. (6 番目), 他 3 名, "New Classical Cepheids in the Inner Part of the Northern Galactic Disk, and Their Kinematics", Astrophysical Journal, 査読有, 842 巻, ID 104 (2017)  
DOI: 10.3847/1538-4357/aa7260

Matsunaga, N. (1 番目), Kobayashi, N. (4 番目), 他 7 名, "A lack of classical Cepheids in the inner part of the Galactic disc", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 462 巻, 414–420 頁 (2016)  
DOI: 10.1093/mnras/stw1548

Hamano, S., Kobayashi, N. (2 番目), Matsunaga, N. (9 番目), Kawakita, H. (19 番目), 他 15 名, "Near Infrared Diffuse Interstellar

Bands toward the Cygnus OB2 Association", Astrophysical Journal, 査読有, 821 巻, ID 42 (2016)  
DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/42

Shinnaka, Y., Kawakita, H. (2 番目), Kobayashi, N. (5 番目), Matsunaga, N. (9 番目), 他 14 名, "Near-infrared Spectroscopic Observations of Comet C/2013 R1 (Lovejoy) by WINERED: CN Red-system Band Emission", Astronomical Journal, 査読有, 154 巻, ID 45 (2017)  
DOI: 10.3847/1538-3881/aa7576

Ikeda, Y., Kobayashi, N. (3 番目), Matsunaga, N. (25 番目), Kawakita, H. (26 番目), 他 22 名, "High sensitivity, wide coverage, and high-resolution NIR non-cryogenic spectrograph, WINERED", Proc. SPIE, 査読無, 9908 巻, ID 99085Z (2016)  
DOI: 10.1117/12.2230886

Otsubo, S., Kobayashi, N. (3 番目), Matsunaga, N. (15 番目), Kawakita, H. (16 番目), 他 12 名, "First high-efficiency and high-resolution (R=80,000) NIR spectroscopy with high-blazed Echelle grating: WINERED HIRES modes", Proc. SPIE, 査読無, 9908 巻, ID 990879 (2016)  
DOI: 10.1117/12.2233845

Fukue, K., Matsunaga, N. (2 番目), Kobayashi, N. (5 番目), 他 9 名, "Line-depth ratios in H-band spectra to determine effective temperatures of G- and K-type giants and supergiants", Astrophysical Journal, 査読有, 812 巻, ID 64 (2015)  
DOI: 10.1088/0004-637X/812/1/64

Hamano, S., Kobayashi, N. (2 番目), Matsunaga, N. (8 番目), 他 16 名, "Near-infrared Diffuse Interstellar Bands in 0.91–1.32  $\mu\text{m}$ ", Astrophysical Journal, 査読有, 800 巻, ID 137 (2015)  
DOI: 10.1088/0004-637X/800/2/137

Matsunaga, N. (1 番目), Kobayashi, N. (4 番目), 他 14 名, "Kinematics of Classical Cepheids in the Nuclear Stellar Disk", Astrophysical Journal, 査読有, 799 巻, ID 46 (2015)  
DOI: 10.1088/0004-637X/799/1/46

Feast, M. W., Menzies, J. W., Matsunaga, N., Whitelock, P. A., "Cepheid variables in the flared outer disk of our galaxy", Nature, 査読有, 509 巻, 342–344 頁 (2014)  
DOI: 10.1038/nature13246

〔学会発表〕(計 11 件)

Matsunaga, N., "Classical pulsating stars as tracers of the Milky Way" (Invited Talk), Workshop "Asteroseismology and its impact on other branches of astronomy" (2018/3/19-20, The University of Tokyo, Japan), 2018

Matsunaga, N., "AKARI color useful for classifying chemistry of Miras and AGB stars" (Talk), Workshop AKARI2017 "The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI Archive: from galaxies and stars to planets and life" (2017/10/17-20, The University of Tokyo, Japan), 2018

Matsunaga, N., "Tracing the Milky Way with Cepheids and Mira variables" (Invited Review), "Stellar Populations and the Distance Scale — Mould Fest" (2017/09/11-15, Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Beijing, China), 2017

Matsunaga, N., "Large-Scale Infrared Surveys of Pulsating Stars for Studying Stellar Populations in the Inner Galaxy" (Invited Review), IAU Symposium 334 Matsunaga, N., "Rediscovering our Galaxy" (2017/7/10-14, Potsdam, Germany), 2017

Matsunaga, N., "Impact of the extinction law on the distribution of variable stars in the Milky Way" (Talk), Workshop on Studies on variable stars and extinction law in the Milky Way and nearby galaxies (2017/3/27-3/28, The University of Tokyo, Japan), 2017

Matsunaga, N., "Time-Series Surveys and Pulsating Stars: The Near-Infrared Perspective" (Invited Review), 22nd Los Alamos Stellar Pulsation Conference Series meeting "wide-field variability surveys: a 21st-century perspective" (2016/11/28-12/2, San Pedro de Atacama, Chile), 2016

Matsunaga, N., "Miras Found in KWFC Intensive Survey of the Galactic Plane" (Talk), Workshop "Cool Stars 19" (2016/6/6-10, Uppsala, Sweden), 2016

Matsunaga, N., "Galactic Structure Based on Cepheids" (Invited Talk), "ISSI-BJ Workshop on Astronomical Distance Determination in the Space Age" (2016/5/23-27, International Space Science Institute, Beijing, China), 2016

Matsunaga, N., "IRSF/SIRIUS survey of pulsating stars towards the bulge" (Talk), "The Infrared Survey Facility: Past and Future" (2016/3/2-4, South African Astronomical

Observatory, Cape Town, South Africa), 2016

Matsunaga, N., "Infrared survey of variable stars toward the bulge and beyond" (Talk), The Milky Way Unravelled by Gaia: GREAT Science from the Gaia Data Releases (2014/12/1-5, University of Barcelona, Spain), 2014

Matsunaga, N., "Infrared Access to hidden stellar populations of the Galactic disk and bulge" (Invited Talk), RASPUTIN: Resolved And unresolved Stellar Populations (2014/10/13-17, ESO, Garching, Germany), 2014

## 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  
研究者番号: 80580208

### (2) 研究分担者

小林 尚人 (KOBAYASHI, Naoto)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 50280566

河北 秀世 (KAWAKITA, Hideyo)  
京都産業大学・理学部・教授  
研究者番号: 70356129

### (3) 連携研究者

近藤 莊平 (KONDO, Sohei)  
京都産業大学・神山天文台・特定研究員  
研究者番号: 30583413

辻本 拓司 (TSUJIMOTO, Takuji)  
国立天文台・JASMINE 検討室・助教  
研究者番号: 10270456

### (4) 研究協力者

新井 彰 (ARAI, Akira)  
鮫島 寛明 (SAMESHIMA, Hiroaki)  
濱野 哲史 (HAMANO, Satoshi)  
福江 慧 (FUKUE, Kei)  
安井 千香子 (YASUI, Chikako)