

令和元年6月4日現在

機関番号：34304

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07323

研究課題名（和文）変光星を用いた銀河系の金属量探査

研究課題名（英文）The Metallicity Distribution of the Milky Way using Variable Stars

研究代表者

福江 慧（FUKUE, Kei）

京都産業大学・神山天文台・研究員

研究者番号：20785753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の主たる目的は「未開拓な銀河系バルジ方向のセファイドの金属量を導出し、バルジの星形成史を求めること」である。そのためには標準的な天体の観測から、セファイドの化学組成解析方法を確立することと、実際に銀河系バルジ方向に位置するセファイドの高分散分光観測を行う必要がある。研究代表者は共同研究者とともに近赤外線高分散分光器「WINERED」の観測データを主に用いて、恒星の有効温度の決定方法やモンテカルロ法を用いた金属量導出方法を確立した。WINEREDは大口径の望遠鏡への移設が予定されており、バルジ領域の天体の観測により適した環境が整う見込みである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近の近赤外線観測装置の発達により減光の強い銀河系中心領域を見通す事が可能となり、銀河系中心領域やバルジ、ディスクの広い範囲にわたって、セファイドを含む様々な恒星が同定され始めている。そのような天体に対して、本研究で構築した手法を適用させることで、天体ごとの有効温度や金属量を導出することができる。そのようにして得られた各天体の物理情報から、銀河系の進化や星形成史の解明につながる事が期待される。

研究成果の概要（英文）：For detailed analysis of stellar chemical abundances, high-resolution spectra in the optical have been mainly used, while recent development of near-infrared (near-IR) spectrometers has opened new wavelength windows. The severe foreground reddening towards the Galactic plane, especially in the direction of the Galactic Center requires observation in the IR windows. Therefore, the goals of this study are twofold: (1) to establish the method of determining stellar atmospheric parameters and (2) to estimate iron and other elemental abundances of Cepheids. We obtained high resolution and high quality spectra of well-studied stars, using WINERED. We invented new methods of determining effective temperatures, microturbulences and the iron abundances. We are going to relocate WINERED to large diameter telescope.

研究分野：天文学

キーワード：恒星 変光星 化学組成

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々の太陽系が属している銀河系では、約 130 億年の時間をかけて鉄をはじめとする様々な重元素が増加してきた。この重元素は超新星爆発をはじめとする恒星進化の現象を通じて生成され、絶えず星間空間に供給されてきたものである。重元素の増加の歴史(すなわち化学進化)は銀河系の中の位置によっても異なり、銀河系の進化を考える上で重要な情報が含まれている。ここでは、銀河系円盤にある恒星の金属量が内側ほど高くなっているという特徴(金属量勾配)に注目する[1,2,3]。このような金属量勾配について議論する際には各天体の位置精度が重要となる。星自体が周期的に脈動するセファイド型変光星(以下セファイド)は、その脈動の周期と平均的な星の明るさに関係性が見られ、宇宙空間の距離指標として用いられてきた[4]。これまでの可視光での分光サーベイによって、図 1 のように銀河系中心に向かうほど金属量が増加することが分かっている[5]。そして昨今の赤外線サーベイによって銀河系中心領域に発見された 4 つのセファイド[6,7]は、太陽とほぼ同程度の金属量である結果が得られている[8]。この銀河系中心のセファイド以外に、銀河系中心から 3kpc 内のバルジ領域のセファイドについての金属量は報告されていないが、VV (Vista Variables in the Vía Láctea)という最近の可視赤外線サーベイ[9]や、南アフリカの IRSF 望遠鏡のサーベイ[10]から、バルジ方向のセファイドが発見されてきている。これらのセファイドについて金属量を導出することができれば、銀河系円盤から銀河系中心まで連続的に金属量勾配の変化を議論することが可能となる。しかしバルジ方向は可視光観測では見通す事ができず、高分散分光を赤外線波長で行う必要がある。

研究代表者は京都産業大学神山天文台の荒木望遠鏡に設置している近赤外線高分散分光器「WINERED」(図 2)の開発に携わってきた。WINERED は極めて高い感度(光学系効率>40%)を持ち、zYJ バンド(0.9-1.4  $\mu\text{m}$ )に渡る広い波長帯かつ高い分解能( $\lambda/\Delta\lambda=28,300$ )のスペクトルを一度の露光で取得できる点が最大の特徴である[11]。本装置は京都産業大学の荒木望遠鏡で運用されてきたが、平成 28 年度末にチリのラ・シラ観測所の NTT 望遠鏡へ移設された。移送後はこれまでよりも格段に暗い天体に対しても観測が可能となり、バルジ方向のセファイドの観測も可能となる。研究代表者はハワイにある国立天文台すばる望遠鏡と赤外線高分散分光器(IRCS)による近赤外線分光観測で、H バンド(1.4-1.8  $\mu\text{m}$ )での有効温度などの恒星の物理情報の導出方法の確立と銀河系中心のセファイドの解析を行ってきた経験[8,12]から、NTT に搭載した WINERED を用いてバルジ方向のセファイドの金属量解析を着想するに至った。

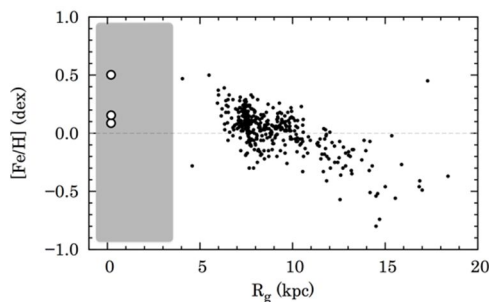


図 1 : 銀河系のセファイドの金属量勾配。黒丸はディスクの結果[5]、白丸が銀河系中心の結果[8]を示す。

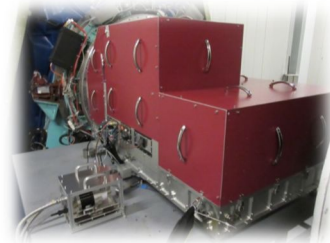


図 2 : チリの NTT 望遠鏡に搭載された WINERED

### 2. 研究の目的

銀河系の化学進化を考える上で、恒星の金属量分布の情報は重要である。セファイドは明るく、距離の決定精度も高いため、若い星の金属量トレーサーとして適している。近年までは可視光サーベイで太陽から数 kpc 以内のセファイドしか見つかっていなかったが、最近の近赤外線観測装置の発達により減光の強い銀河系中心領域を見通す事が可能となり、銀河系中心領域やバルジ・ディスクの広い範囲に存在するセファイドが同定されてきている。しかし近赤外線での化学組成解析は始まったばかりであり、本研究ではまず赤外線高分散分光器 WINERED を用いて観測された標準的な天体から WINERED 波長域(0.9-1.4  $\mu\text{m}$ )での化学組成解析方法を確立する。その後、チリへ移設された WINERED を用いてバルジ方向のセファイドの観測を行い、その金属量から銀河系全体の金属量勾配について新たな知見を得ることが最終的な目的である。

### 3. 研究の方法

セファイドの物理情報や元素の量を導出するためには、まず標準的な天体から恒星の組成解析方法の構築を行う必要がある。WINERED の京都産業大学での分光サーベイによって、校正用の天体を 100 天体以上、物理情報が既知である標準セファイドのデータを 10 天体取得し、今も観測が進んでいる。これらから変光星の組成解析方法を樹立し、バルジ方向のセファイドへの適用を行う。

- (1) WINERED での観測波長における化学組成解析方法の確立：観測スペクトルと合致する理論的なスペクトルを計算から金属量を導出する。この時、スペクトルのプロファイル形成に大きく影響する恒星大気要素は、有効温度、表面重力、金属量であり、恒星の化学組成解析においてはこれらの物理量を導出することが基本となる。有効温度と表面重力については、指標となりうるスペクトルの吸収線があることが近赤外線に置いて確認されており[12]、WINERED の観測波長帯においても同様に指標となりうる吸収線の調査を行う。振動子強度の較正も含めてセファイド変光星で見られる吸収線の情報を整理し、今後セファイドを含めた恒星の化学組成測定に使うべき zYJ 波長域でのラインリストを、世界に先駆けて発表する。組成解析方法確立後には、現在取得されている標準的なセファイドへの応用を行い、位相に応じたパラメータが導出できているかの確認も行う。
- (2) バルジ方向のセファイドの金属量の導出：ラ・シラ天文台に WINERED を移送・設置後、NTT 望遠鏡と WINERED を用いてバルジ方向のセファイドの観測を行い、導出された金属量について議論を行う。赤外線ではしか観測できないこれらのセファイドについて分光観測ははまだ報告されていないため、最近の探査で見つかり始めた未開拓領域のセファイドの化学組成をいち早く調べることになる。

#### 4. 研究成果

本研究の主たる目的は「未開拓な銀河系バルジ方向のセファイドの金属量を導出し、バルジの星形成史を求めること」である。そのためには標準的な天体の観測から、セファイドの化学組成解析方法を確立することと、実際に銀河系バルジ方向に位置するセファイドの高分散分光観測を行う必要がある。研究代表者は共同研究者とともに 2016 年 12 月に京都産業大学から南米チリの La Silla 観測所に移設された近赤外線高分散分光器「WINERED」の観測データを主に用いて、以下のような研究を行ってきた。

##### (1) WINERED での観測波長における化学組成解析方法の確立

組成解析方法について研究代表者は東京大学の松永氏、Jian 氏、谷口氏、京都産業大学の近藤氏と、近赤外線高分散データを用いた恒星の組成解析方法について議論を重ねてきた。

吸収線を用いた有効温度導出への恒星の金属量の影響(雑誌論文)

東京大学の Jian 氏他との共同研究。最も基本的な恒星の物理量である有効温度については、研究代表者も H バンド波長でのデータから導出できることは確認していたが[12]、それと同じ温度指標を用いて APOGEE のアーカイブデータから 1 万天体程を用いた検証から、恒星そのものが持っている金属量が有効温度へ影響を及ぼすことがわかった。これにより金属量のフィードバックをかけることで位相に応じて温度の変化するセファイドについてより精度を高めた温度決定を行うことができるようになった。また、詳細な検証から新たに温度指標となる吸収線も同定され、合計で 13 ペアによる温度決定も可能となった。

WINERED 波長域における吸収線強度比を用いた有効温度の決定(雑誌論文)

東京大学の谷口氏他との共同研究。研究代表者の H バンドでの温度指標となる吸収線のペアの調査方針をベースに、統計的手法を取り入れて WINERED 波長における温度指標を 81 ペア同定し、有効温度の決定誤差も良い場合で 10K ほどと高い精度で求めることができるようになった。H バンドと zYJ バンドでペアの数がこれほど異なるのは、吸収線の励起温度の分布が異なるにも、WINERED が一度の露光で広い波長範囲のスペクトルを取得できる恩恵でもある。これにより、WINERED のセファイドや各種天体のデータについても有効温度を見積もることができるようになった。

WINERED 波長域におけるモンテカルロ法を用いた恒星のマイクロ乱流と金属量の導出(雑誌論文)

京都産業大学の近藤氏他との共同研究。恒星の金属量の導出方法については、有効温度以外にも恒星におけるマイクロ乱流と呼ばれる乱流成分も影響を与える。WINERED を用いて観測した温度などが全て既知で組成解析の指標となる 2 天体(Arcturus,  $\mu$  Leo)の解析から、モンテカルロ法を用いてマイクロ乱流と金属量を同時に決定する方法を確立した。この方法を使って導出された金属量自体は過去文献とも良い合致を見せており、本研究での手法と吸収線の情報、上記の有効温度の決定方法は他の天体にも応用が可能であり、目的とするバルジのセファイド以外にも多くの天体の組成解析が進むことが期待される。

WINERED 波長における各種組成の導出(学会発表)

金属量に加えて他の元素組成を恒星から抽出することができれば、より詳細にその星の進化状態などの特性を知ることが可能となる。上記で基本的な特性を知ることができたため、現在はと同様に基準となる 2 天体のデータからチタンやケイ素などの他の元素の組成の調査を行なっている。

(2) バルジ方向のセファイドの金属量の導出

観測データのクオリティは天体のシグナルに対するノイズの比(S/N 比)によって左右され、これまでの京都での WINERED の観測等から組成解析には S/N が 100 以上必要である。また観測対象であるバルジ方向のセファイドは遠方にあるため 太陽近傍のセファイドと比べても暗い。それに加えて銀河系バルジや銀河系中心方向を観測するには南天での観測が必須となる。WINERED はこれらの要求を満たす最適な観測装置といえ、移設後の試験観測でも良好な観測データを取得することができた。WINERED は今後さらに大口径の望遠鏡への移設が検討されており、観測に最適な環境が整う見込みである。

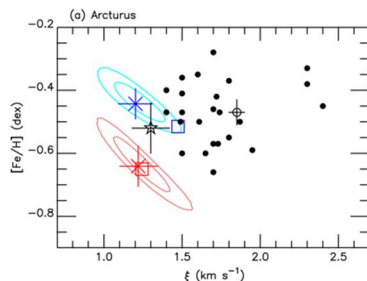


図3 :WINERED を用いて導出した Arcturus の金属量の文献値との比較(雑誌論文 )

< 引用文献 >

- [ 1] Chiappini et al, 2001, ApJ, 554, 1044
- [ 2] Pedicelli et al, 2009, A&A, 504, 81
- [ 3] Tsujimoto et al, 2010, PASJ, 62, 447
- [ 4] Sandage & Tammann, 2006, ARA&A, 44, 93
- [ 5] Genovali et al, 2014, A&A, 566, A37
- [ 6] Matsunaga et al, 2011, Nature, 477, 188
- [ 7] Matsunaga et al, 2015, ApJ, 799, 46
- [ 8] Fukue, 2016, Ph.D.Thesis
- [ 9] Dékány et al, 2015, ApJL, 812, L29
- [10] Matsunaga et al, 2014, EAS PS, 67, 279
- [11] Ikeda et al, 2016, Proc. SPIE, 9908, 99085Z
- [12] Fukue et al, 2015, ApJ, 812, 64

5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 3 件 )

Kondo Sohei, Fukue Kei, Matsunaga Noriyuki, Ikeda Yuji, Taniguchi Daisuke, Kobayashi Naoto, Sameshima Hiroaki, Hamano Satoshi, Arai Akira, Kawakita Hideyo, Yasui Chikako, Izumi Natsuko, Mizumoto Misaki, Otsubo Shogo, Takenaka Keiichi, Watase Ayaka, Asano Akira, Yoshikawa Tomohiro, Tsujimoto Takuji, Fe I Lines in 0.91-1.33  $\mu\text{m}$  Spectra of Red Giants for Measuring the Microturbulence and Metallicities, The Astrophysical Journal, 査読あり, Volume 875, 2019, 13 pp.  
DOI : 10.3847/1538-4357/ab0ec4

Jian Mingjie, Matsunaga Noriyuki, Fukue Kei, The metallicity effect on line-depth ratios in APOGEE H-band spectra, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読あり, Volume 485, 2019, 1310-1319  
DOI : 10.1093/mnras/stz237

Taniguchi Daisuke, Matsunaga Noriyuki, Kobayashi Naoto, Fukue Kei, Hamano Satoshi, Ikeda Yuji, Kawakita Hideyo, Kondo Sohei, Sameshima Hiroaki, Yasui Chikako, 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, 査読あり, Volume 473, 2017, 4993-5001  
DOI : 10.1093/mnras/stx2691

〔学会発表〕(計8件)

福江慧、近赤外線高分散分光器 WINERED : 晩期型星の近赤外線高分散スペクトルを用いた元素のアバundance導出と発展性について、日本天文学会 2019 年春季年会、2019 年

福江慧、Measuring chemical abundances of red giants using high-resolution z' YJ-band spectra of WINERED、THE LIFE AND TIMES OF THE MILKY WAY、2018 年

福江慧、近赤外線高分散分光器 WINERED を用いた、z',Y,J バンドにおける晩期型星の化学組成解析、第 23 回 天体スペクトル研究会、2018 年

福江慧、近赤外高分散分光器 WINERED を用いた変光星の分光観測と組成解析の現状、天の川銀河研究会 2017 年

福江慧、近赤外線高分散分光器 WINERED : z', Y、J バンドにおける晩期型星の元素組成解析、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年

福江慧、Abundance determination methods of variable stars with NIR high-resolution spectroscopy、「天の川銀河や近傍銀河における変光星と減光則の研究」研究会、2017 年

福江慧、近赤外線分光による変光星の解析、第 22 回天体スペクトル研究会、2017 年

福江慧、Abundance determinations of Cepheids with NIR high-resolution spectroscopy、「近赤外線高分散分光観測で探る恒星物理」研究会、2016 年

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。