

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14249

研究課題名(和文) 金属欠乏星の大規模化学組成解析に基づく銀河系恒星ハロー形成過程の解明

研究課題名(英文) Revealing the formation mechanism of the Milky Way stellar halo based on chemical abundance analyses of large datasets of metal-poor stars

研究代表者

石垣 美歩 (Ishigaki, Miho)

東北大学・理学研究科・特任助教(研究)

研究者番号：30583611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の究極目標は、天の川銀河恒星系の大規模分光サーベイに基づく元素組成測定から、宇宙初期の元素合成、天の川銀河の形成過程・化学進化を解明することである。研究の成果として(1)大規模分光サーベイで得られる恒星スペクトルデータから正確な元素組成測定を実施する上で重要となる基準星の構築を行った。明るい基準星の多くについて、アーカイブデータと最新の位置天文学データを活用し、恒星物理量・元素組成を正確に導出することができた。(2)既存の金属欠乏星元素組成データと超新星爆発元素合成モデルとの系統的な比較を行い、宇宙で最初に誕生した初代星の性質に一定の制限を得た他、今後の課題を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、2020～2030年代にかけて大きく進展が見込まれている天の川銀河の大規模恒星サーベイで最大限の成果を得るため、データ解析とデータ解釈の二つの側面で独自の貢献をすることができた。まずデータ解析では、世界最大級のすばる望遠鏡の過去のデータを最新の位置天文学データと連携させることで、大規模恒星サーベイにおいて広く有効活用できることを示した。さらにデータ解釈の面では、超新星爆発元素合成理論モデルを用いた研究を通して、天の川銀河に生き残る最古の恒星である金属欠乏星の観測から直接見ることのできない宇宙初期について観測的な証拠を得る「銀河考古学」のアプローチを具体的に示すものとなった。

研究成果の概要(英文)：The ultimate purpose of this study is to reveal nucleosynthesis in the early Universe as well as the formation and chemical evolution of the Milky Way based on planned large spectroscopic surveys. The major achievements of this study are two folds. (1) Making use of archival spectroscopic data combined with latest astrometric data, we have constructed the library of standard stars for chemical abundance analyses, which can be used in upcoming spectroscopic surveys. Based on the candidate standard star's spectra from the archival data, physical quantities such as temperature and chemical composition have been derived. (2) We compared the models of nucleosynthetic products from supernovae and observed chemical compositions of old stars in the Milky Way. As a result, we have obtained a certain constraint on physical properties of the very first stars in the Universe.

研究分野：恒星分光、銀河天文学

キーワード：銀河考古学 天の川銀河 恒星 元素組成 スペクトル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

100億年を超える年齢を持つ古い恒星は、宇宙で初めて誕生した星「初代星」による元素汚染をはじめ、宇宙初期の元素合成・化学進化を解明する上で唯一の観測的な手がかりである。古い恒星の元素組成と天の川銀河内での軌道運動を恒星の統計サンプルに基づいて調べることで、宇宙で最初の元素合成を担った「初代星」の性質をはじめ、天の川銀河の形成過程、化学進化史に制限を与えることができる。一方で古い恒星は太陽系近傍では恒星全体の0.1%未満と非常に稀少であり、大望遠鏡による広視野・大規模サーベイで多数の恒星を太陽から遠方の銀河系ハロー領域まで探査することが必要不可欠である。2020年代前半にはこうしたハロー領域の古い恒星を分光観測で探査し、元素組成を測定する大規模サーベイが国際的に注目を集めており、続々と開始が計画されている。中でも日本が主導するPrime Focus Spectrographは8m口径を持つすばる望遠鏡に搭載される最新鋭の広視野多天体分光器であり、古い恒星が豊富にあるとされる外部ハロー領域の探査に特に適した観測装置である。こうした背景から以下の課題が浮かび上がり、具体的な解決策を得ることが急務であった。

- (1) 大規模サーベイで取得されるこれまでにない数の恒星分光データをいかに制約し、元素組成を導出するか： 先行研究では主に太陽近傍で元素組成が互いに近い恒星を対象としていたため、元素組成の分かっている基準星が見つかりやすく、機械学習の手法が成功を納めている。一方で、太陽から遠く離れたハロー領域にある古い恒星の場合、金属元素組成が太陽値の100分の1以下の「金属欠乏星」を含み、元素組成がより多様であると予想される。こうした「金属欠乏星」の元素組成解析に適した基準星が現状では非常に少なく、従来の手法が適用できないことが問題であった。
- (2) 測定された元素組成からどのようにして宇宙初期の元素合成、天の川銀河形成過程に制限を与えることができるか： 観測で得られる恒星表面大気元素組成は、その星が生まれたガスの元素組成を反映していると考えられ、それらの元素組成を恒星・超新星爆発元素合成理論と比較することで、元素合成を担った宇宙初期の天体の物理的性質に制限が与えられることが期待される。一方で、恒星進化・超新星爆発のメカニズムはいまだに解明されておらず、元素合成に関する理論の不定性が大きい。こうした理論の不定性を考慮した上で、古い恒星の大規模サーベイから宇宙初期の元素汚染源に関してどのくらい制限が付けられるかが、定量的に検討されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、課題(1)、(2)それぞれについて以下の通りである。

(1) 今後計画されている10数万を超える規模の恒星を対象とする大規模分光サーベイデータを効率的に制約し、正確な物理量を導出する手法を開発する。特に従来の大規模サーベイでは未開拓の銀河系外部ハローに付随する古い恒星「金属欠乏星」で、元素組成の正確で効率的な導出方法を検討する。元素組成 検証結果を踏まえて、将来の銀河系大規模分光サーベイの戦略を明確にする。

(2) 初代星を含む様々な天体の星進化、超新星爆発元素合成モデルを整備し、既存の観測データと比較し、宇宙の化学進化についてどのくらい制限が得られているか明確にする。こうした解析を通して、今後の大規模分光サーベイを見据え、古い恒星の元素組成から元素をつくった天体の物理的性質を推定する手法を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) すばる望遠鏡のアーカイブデータから、高分散、高品質の恒星分光データを集約し、そのうちGaia衛星などによる観測から物理量がよく分かっているものを基準星候補として整備する。基準星候補について、より明るい基準星との比較解析から正確な元素組成を導出する。こうして得られた基準星のスペクトルをトレーニングサンプルとして用いることにより、低・中分散分光データから恒星物理量と元素組成を効率よく導出する手法を検討する。この手法をスローンデジタルスカイサーベイ等の既存の低・中分散分光データに適用し、特に「金属欠乏星」で測定精度を評価する。

#### (2) - 1

最近の分光サーベイで高精度の元素組成測定が行われている、金属量(鉄組成)の特に低い「超金属欠乏星」のデータを集約する。超新星爆発元素合成の理論計算をもとに、最終的に星間空間に放出される各元素の質量(イールド)の計算を様々なモデルパラメータについて実施する。元素組成観測データを理論モデルと比較し、観測を最もよく再現するモデルパラメータ(初代星質

量、爆発エネルギー等) を決定する。結果をもとに、初代星質量などのモデルパラメータの分布を得る。またモデルパラメータ決定において最も重要な元素組成比を特定し、将来大規模サーベイで測定すべき元素組成を明確化する。

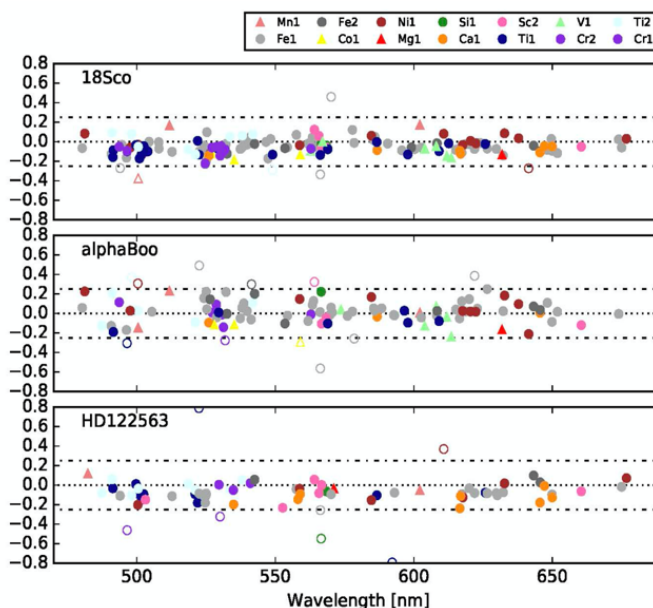
## (2) - 2

太陽近傍の星の中で年齢の比較的古い星で元素組成が測定されている天体のデータを集約する。それらの元素組成を大質量星の重力崩壊型超新星爆発、Ia 型超新星爆発の最新のイールドモデルと比較する。重力崩壊型、Ia 型による元素汚染への相対的な寄与や、親星の初期質量関数などをモデルパラメータとして、観測を最もよく再現するモデルを決定する。得られた結果をもとに、銀河系の古い恒星系の起源と化学進化について議論する。

## 4. 研究成果

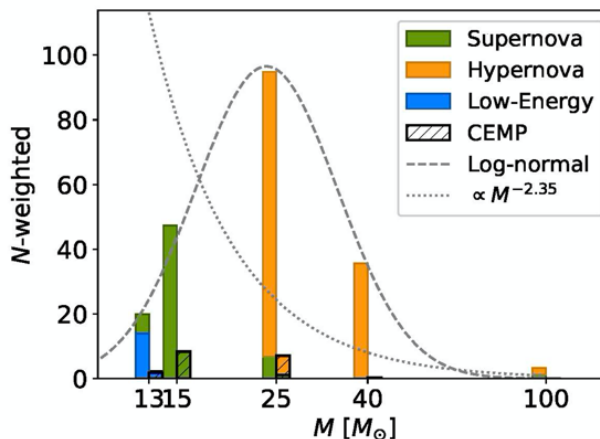
### (1)

すばる望遠鏡アーカイブデータと Gaia 衛星による位置天文データ、地上測光観測データと組み合わせることで、元素組成測定の基準星となる恒星を抽出し、正確な物理量を導出した。得られた物理量は文献値とよく一致しており、すばる望遠鏡の過去の観測データが、新しい観測データと組み合わせることで恒星物理量の正確な測定が可能になることが分かった。またその中から元素組成に有用となる吸収線を抽出し、等価幅を測定し、元素組成を求めた。得られた値と文献値とを吸収線ごとに比較したものが左図である。多くの場合、文献値と典型的な誤差の範囲で一致しており、これらの明るい恒星の元素組成測定に、アーカイブデータが極めて有用であることを示した。この成果の一部は、2018年に上海で開催された国際研究会においてポスター講演で発表した。また結果は現在共同研究者と論文にまとめている最中である。



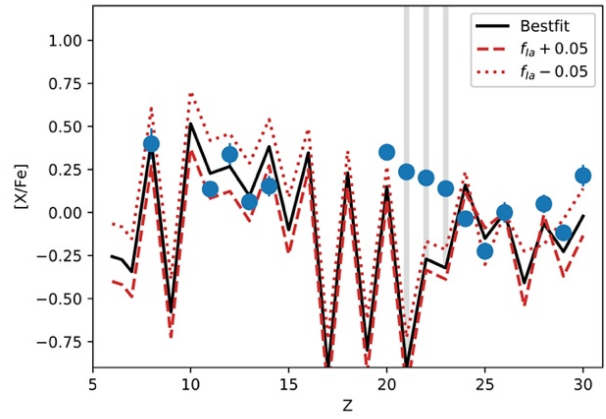
### (2) - 1

文献から抽出した200天体の超金属欠乏星の観測データに初代星超新星爆発イールドモデルを適用して得られた初代星の質量分布を下図に示す。本研究の結果、多くの超金属欠乏星が、1.5-2.5太陽質量の初代星超新星爆発元素合成で最もよく説明できることがわかった。このことは、初代星の典型的な初期質量として、1.5-2.5太陽質量のものが存在したことを示唆し、先行研究を裏付ける結果となった。この結果は、初代星形成理論にたいし、これまでで最も多数の超金属欠乏星元素組成測定に基づいて観測的根拠を与えるものである。また上記の解析から、初代星超新星爆発後に残るコンパクト天体(ブラックホールまたは中性子星)の質量分布を調べた。解析の結果、大部分は2-5太陽質量であることがわかった。こうした質量のブラックホールは近年ブラックホール連星系からの重力波検出で得られている質量とも重なり、そのうちいくつかは初代星起源である可能性を示唆する。さらに、どの元素の組成がモデルパラメータの決定に重要か調べたところ、 $[(C+N)/O]$  および  $[Na/Al]$  の組成比が初代星質量、爆発エネルギー等と相関があり、これらの元素の測定が特に重要であることを示した。この結果により、今後計画されている大規模サーベイでこれらの元素組成を正確に測定できるようにデザインするのが望ましいことを明確にした。これらの結果成果は投稿論文として出版した他、2つの国際研究会の招待講演で発表を行った。



(2) - 2

左図は、本研究で選択した年齢の古い天の川銀河ハロー星の元素組成パターン（青丸）をイールドモデルでフィットした例を示す。この結果、金属量が太陽値の10分の1以上であるような古い星は、大質量星の重力崩壊型超新星爆発と低・中質量星のIa型超新星爆発の両方の寄与があることにより最もよく説明できることが分かった。このことは、こうした銀河系の古い恒星が高い星形成率のもとで形成されたこと、そのもとでIa型超新星爆発による鉄汚染がすでに活発であったことを示しており、銀河系初期の形成過程、星形成環境に示唆を与えるものである。研究の成果の一部は国際研究会で口頭公園で発表した。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Hartwig, T., Ishigaki, M. N., Klessen, R. S., Yoshida, N.	4. 巻 482
2. 論文標題 Fingerprint of the first stars: multi-enriched extremely metal-poor stars in the TOPoS survey	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1204, 1210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Aoki, W., Matsuno, T., Honda, S., Ishigaki, M. N., Li, H., Suda, T., Kumar, Y. B.	4. 巻 70
2. 論文標題 LAMOST J221750.59+210437.2: A new member of carbon-enhanced extremely metal-poor stars with excesses of Mg and Si	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 94-1, 94-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishigaki, Miho N.; Tominaga, Nozomu; Kobayashi, Chiaki; Nomoto, Ken'ichi	4. 巻 857
2. 論文標題 The Initial Mass Function of the First Stars Inferred from Extremely Metal-poor Stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 46-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab3de	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ishigaki Miho N.	4. 巻 14
2. 論文標題 Chemical abundances of field halo stars - Implications for the building blocks of the Milky Way	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 24 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921319007865	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ezzeddine Rana, Frebel Anna, Roederer Ian U., Tominaga Nozomu, Tumlinson Jason, Ishigaki Miho, Nomoto Ken'ichi, Placco Vinicius M., Aoki Wako	4. 巻 876
2. 論文標題 Evidence for an Aspherical Population III Supernova Explosion Inferred from the Hyper-metal-poor Star HE 1327?2326	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 97 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab14e7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計12件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Chemical abundance patterns in the Milky Way halo stars as constraints on the element production in the early Universe
3. 学会等名 EAO Subaru Science Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 The initial mass function of the first stars inferred from elemental abundances in extremely metal-poor stars
3. 学会等名 Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 A stellar high-resolution spectroscopic library based on the archival data of Subaru/HDS
3. 学会等名 The Life and Time of the Milky Way, The symbiosis between Gaia and ground-based spectroscopic surveys (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Galactic Archaeology with Prime Focus Spectrograph
3. 学会等名 The Life and Time of the Milky Way, The symbiosis between Gaia and ground-based spectroscopic surveys (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Element production by supernovae across the cosmic time probed by metal-poor stars
3. 学会等名 FoE19 Fifty-one-Erg, an international workshop on the physics and observations of supernovae and supernova remnants (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Link between chemistry of field stars (also streams) and clusters
3. 学会等名 Star Clusters: from the Milky Way to the Early Universe, IAU Symposium 351 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 (I nterpreting spectroscopic survey data for metal-poor stars with supernova yield models
3. 学会等名 First Stars VI in Concepcion, 01-06 March 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Implications of Extremely Metal-Poor stars on the Masses of the First Stars
3. 学会等名 A Celebration of CEMP & Gala of GALAH workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Interpreting spectroscopic survey data for metal-poor stars with supernova yield models
3. 学会等名 Wide-field surveys of the Local Group and nearby galaxies, Subaru 20th Anniversary conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 The effects of contamination on the estimation of dark matter annihilation profile of the Milky Way's dwarf spheroidal galaxies
3. 学会等名 43rd Johns Hopkins Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miho N. Ishigaki
2. 発表標題 Galactic Archaeology with PFS
3. 学会等名 Galaxy Evolution Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 石垣美歩
2. 発表標題 古い恒星の化学動力学から探る天の川銀河の起源
3. 学会等名 (研究会) 我が国の(近) 赤外線広視野観測サイエンスの戦略と展望(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap <a href="https://researchmap.jp/miho-n-ishigaki/">https://researchmap.jp/miho-n-ishigaki/</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考