

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82675

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20388

研究課題名（和文）惑星探査データの応用による近傍M型星の元素組成の統一的調査

研究課題名（英文）Comprehensive Survey of Elemental Abundances of Nearby M Dwarfs with Planet Search Data

研究代表者

石川 裕之（ISHIKAWA, Hiroyuki）

大学共同利用機関法人自然科学研究機構（新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・アストロバイオロジーセンター・特任研究員）

研究者番号：00910902

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、M型矮星を周回する惑星の特徴づけに不可欠な、M型矮星自体の化学的特徴についての統一的な理解を目指し、(1)これまで比較的高温のM型矮星（有効温度 > 3000 K）の解析にのみ利用されてきた解析法の低温天体（晩期M型矮星）への拡張および検証、(2)惑星探査プロジェクトIRD-SSPにて観測された70天体ものM型矮星に対する上述の解析法の適用、(3)分子吸収線を含めた合成スペクトルを効率的に観測データと比較するための計算コードExoJAXの拡張開発、の3つを実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人は誰も、地球生命とは異なる生物について思いを馳せたことがあるだろう。その存在の確認が、近年急速な発展を見せる系外惑星科学の大目標の1つである。晩期M型矮星については、その周りの惑星の検出や特徴づけが現代の技術で可能であることから特に研究が進んでいる。一方でその惑星の正確な特徴づけのためにはM型星自体の化学組成の理解が重要であるが、天体の暗さや、低温ゆえにスペクトルが複雑になる等の問題に阻まれその研究は遅れていた。本研究は、これまでより高温の恒星に対してしか有効でなかった手法を拡張開発し、実際に70天体ものデータに適用したという点で、晩期M型矮星およびその惑星の理解に資する意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：Aiming for a unified understanding of the chemical characteristics of M dwarfs, which is essential for the characterization of planets orbiting M dwarfs, we have conducted the following three steps: (1) to extend and validate the analysis method that has been used only for relatively hot M dwarfs (effective temperature >3000 K) so that they can be applied to cooler M dwarfs, (2) to apply the above methods to 70 M dwarfs observed in the framework of a planet search project IRD-SSP, and (3) to develop an open-source code ExoJAX for calculating and fitting the model spectra taking into account the huge amount of molecular lines.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：光赤外線天文学 高分散分光 化学組成 低質量星 系外惑星

1. 研究開始当初の背景

低温で低光度という M 型矮星の特徴は、その周りを公転する地球類似惑星の検出や特徴づけを有利にする。そのため太陽系近傍の M 型矮星は、2020 年代後半の 30m 級望遠鏡による生命探査観測の有望な対象である。実際に M 型矮星周りの惑星発見数は順調に伸びている一方で、M 型矮星自体の理解には問題が残る。特に主星の化学組成（各原子種の含有量）は、惑星の形成環境ひいては大気や内部の組成に影響するため (e. g., Bitsch & Battistini, 2020, A&A, 633, A10, Unterborn & Panero, 2017, ApJ, 845, 61) 重要だが、M 型矮星の組成決定は解析上の問題に阻まれてきた。主な原因は、低温である故に複雑な分子吸収線が卓越し、個々の原子吸収線の解析が困難なことである。

この問題が比較的緩和される近赤外線での高分散分光観測が可能になってきた近年、M 型矮星の組成決定の展望が開けつつある。しかし本研究の開始時点で、個々の元素吸収線から 3 種以上の化学組成を決めた例は、Souto et al. (2017, ApJ, 835, 239; 2018, ApJ, 860, L15) および我々の先行研究 (Ishikawa et al, 2020, PASJ, 72, 102; 以下 Ish20) のみで、サンプル数は合計しても 8 天体のみで、特に有効温度 (T_{eff}) が約 3000 K 以下の星（晩期 M 型矮星）については前例がなかった。低温になるほど暗い上に、分子吸収線が強くなることが解析をより困難にし、確立した解析手法が未だ無いことが主な問題であった。

2. 研究の目的

上記の背景を受けて、本研究では、晩期 M 型矮星を含むあらゆる M 型矮星に対して有効な組成決定法を開発し、統計的議論が可能な数の近傍 M 型矮星のまとまったサンプルに対して、化学組成の決定を実施することを目的とした。

3. 研究の方法

M 型矮星の化学組成など恒星パラメータを決定する方法として、我々は 2 つのアプローチを取り扱っている。1 つ目は等価幅解析と呼ぶもので、注目する各吸収線の吸収強度を測定し、その強度をモデルと比較することで、化学組成や温度など物理パラメータが抽出できる（等価幅とは、連続光成分で規格化したスペクトルにおける連続光レベルと吸収線輪郭に挟まれた部分の面積であり、これが吸収強度に指標となる）。観測条件などにも依存する吸収線幅の広がりの影響を受けないことや、各吸収線に紐づく問題を切り分けやすいことなどが利点である。2 つ目はスペクトルフィッティングで、自転や観測による線幅の広がりも考慮したモデルスペクトルに、観測データと同じ規格化などの処理を行い、観測スペクトルに直接フィッティングすることで、最適な物理パラメータを推定する。注目する吸収線のみならずその周りの比較的弱い波長域に吸収線が多い吸収線も同時に扱うことができるため、M 型矮星スペクトルに特徴的な、大量の分子吸収線が目立つ波長域において、等価幅解析よりも有利である。これら 2 つのアプローチの開発を並行して進めるべく、本研究では大別して 3 つの活動を実施した。

- (1) Ish20 が早期 M 型矮星 ($3200 < T_{\text{eff}} < 3800$ K) に対して行った、等価幅解析の妥当性確認を、より低温の晩期 M 型矮星にも適用した。すなわち、FGK 型星と連星をなす M 型矮星の近赤外高分散スペクトルを取得し、等価幅解析を行い、可視高分散スペクトルから高精度に決められた主星の化学組成と比較を行った。Ish20 によって培われた波長および吸収線選択の知見に加え、本研究では独自に FeH 吸収線に基づく有効温度の同時推定も行ったことで、信頼性の高い組成決定を達成した。
- (2) (1)にて確認された等価幅解析を実際に 70 個の M 型矮星に適用した。データは、すばる望遠鏡の近赤外高分散分光装置 IRD を用いて行われている惑星探索プロジェクト (IRD-SSP) で取得されたものを用いた。各天体について複数回取得されたデータをメジアンで足し合わせることで生成された、高品質なデータが高精度な解析を可能にした。これにより太陽系近傍の M 型矮星の化学組成の理解を進めた。
- (3) M 型矮星の複雑なデータにスペクトルフィッティングを行うために、惑星質量天体を対象に開発されたモデルスペクトル計算コード ExoJAX (Kawahara et al. 2022, ApJS, 258, 31) に対して、M 型矮星への適用を可能とするための拡張開発を行った。原子やイオンの吸収線の計算や、大量の分子線を取り扱う際のメモリ対策の一手法などを実装した。実際に有名な M 型矮星であるバーナード星の近赤外高分散スペクトルに対し ExoJAX を用いたモデルフィットを行った。

4. 研究成果

- (1) すばる望遠鏡の IRD と Calar Alto 天文台の分光装置 CARMENES を用いて、太陽型星と連

星系をなす M 型矮星を新しく 9 天体 ($T_{\text{eff}} = 2900\text{--}3800\text{ K}$) 観測し、組成解析を行い、主星と整合的な組成を得た (図 1)。その過程で、晩期 M 型星に最適化した吸収線の取捨選択方法がわかった。また、ターゲットの内 2 天体は G 型星を含む三重連星に含まれる 2 つの M 型矮星であり、この M 型矮星同士の組成解析結果もエラーの範囲内で合致することを示した。

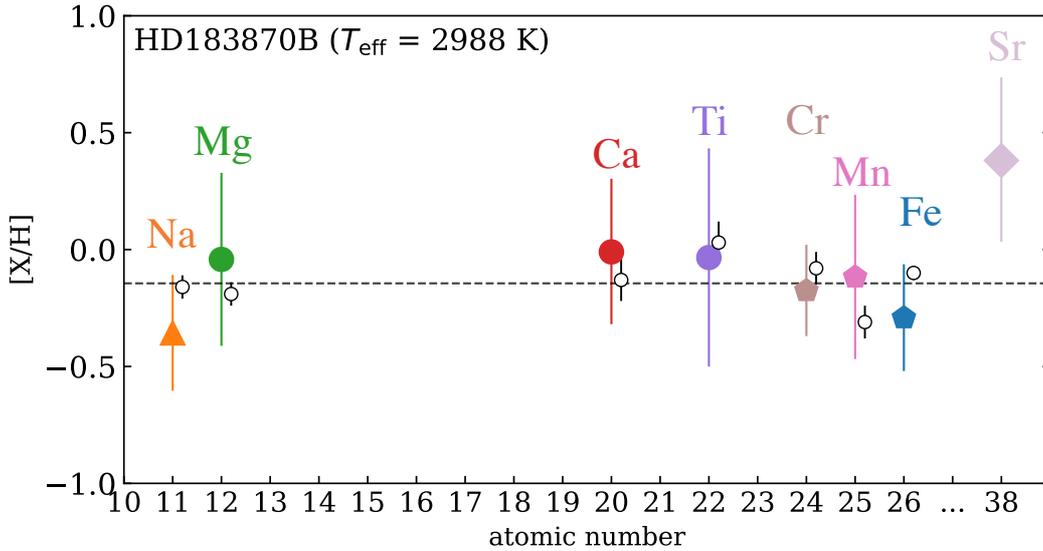


図 1: 横軸に原子番号を示す各元素について、晩期 M 型矮星とその主星における、水素に対する組成比を示す。本研究で近赤外線スペクトルから決定した M 型矮星の結果を色付き、先行研究によって可視光スペクトルから決められた主星の値を白抜き印で示す (主星の印は見やすさのため右にずらして表示)。

- (2) Ishikawa et al. (2022, AJ, 163, 72) による、IRD-SSP のターゲットの内 13 天体のスペクトルを解析した概念実証を踏まえ、本研究では IRD-SSP で 3 回以上観測が行われているすべての天体 70 個に対して組成解析を行った。これにより、70 天体もの太陽系近傍 M 型矮星の有効温度と化学組成を統一的な推定を達成した。例えば、晩期 M 型矮星を含む近傍 M 型矮星に対して等価幅解析による初めての T_{eff} と鉄組成 $[\text{Fe}/\text{H}]$ との関係を描いた (図 2)。また、鉄に対するナトリウムの組成比 $[\text{Na}/\text{Fe}]$ は、太陽型星の大型サンプルにも見られるような、低金属量星では金属量があがるにつれて小さくなる一方で $[\text{Fe}/\text{H}] > 0.25$ 程度の高金属量星では金属量があがるにつれて上昇するという興味深い傾向が見られた。IRD-SSP の方針転換により、本研究の申請当初の目標だった 100 天体以上という数には到達しなかったものの、M 型矮星の化学について新たな知見が十分に得られたといえる。

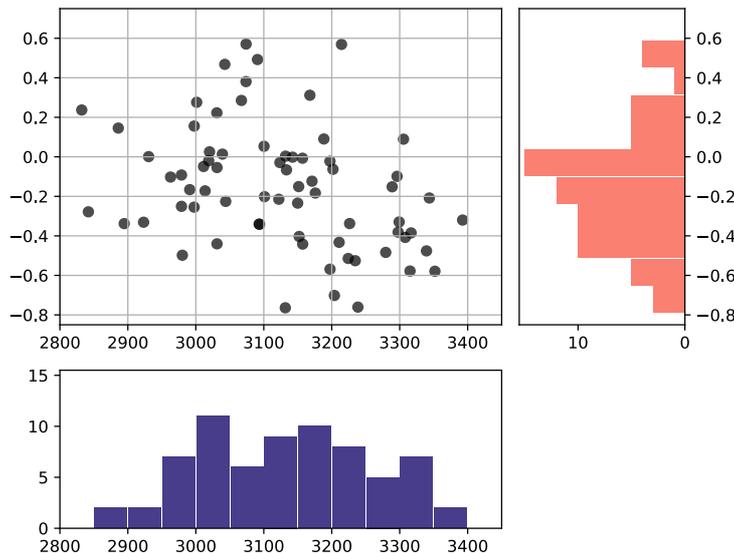


図 2: 横軸に T_{eff} (K)、縦軸に $[\text{Fe}/\text{H}]$ (dex) をとり、本研究で解析した 70 天体の結果をプロットした。各軸の外側には、各軸の値のヒストグラムを添えた。

- (3) ExoJAX の拡張開発により、M 型矮星の高分散スペクトルに対して物理仮定に極力依存しない第一原理的なモデルによるスペクトルフィッティング、ひいては大気パラメータのベイズ推定を可能にした。その結果、いくつかの波長域では分子と原子の吸収フィーチャーを同時によく再現し、温度圧力構造や各原子および分子種の存在量を推定した (図 3, 図 4)。一方で、波長域によっては同様の手順でもデータが再現できないことも確認し、最新の吸収

線データベースに不足している吸収線について議論した。

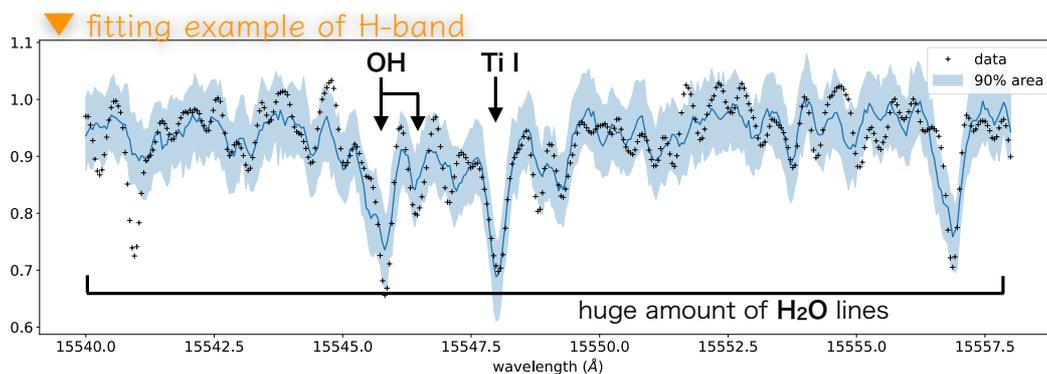


図3: IRDによるバーナード星のスペクトル(黒+印)と、ExoJAXによるベストフィットモデルとその信用区間(それぞれ青線と青影)。横軸は波長(Å)で縦軸は規格化フラックス。等価幅解析など他の手法では解析が困難だった、水の吸収線が支配的な波長域を抜粋して表示している。

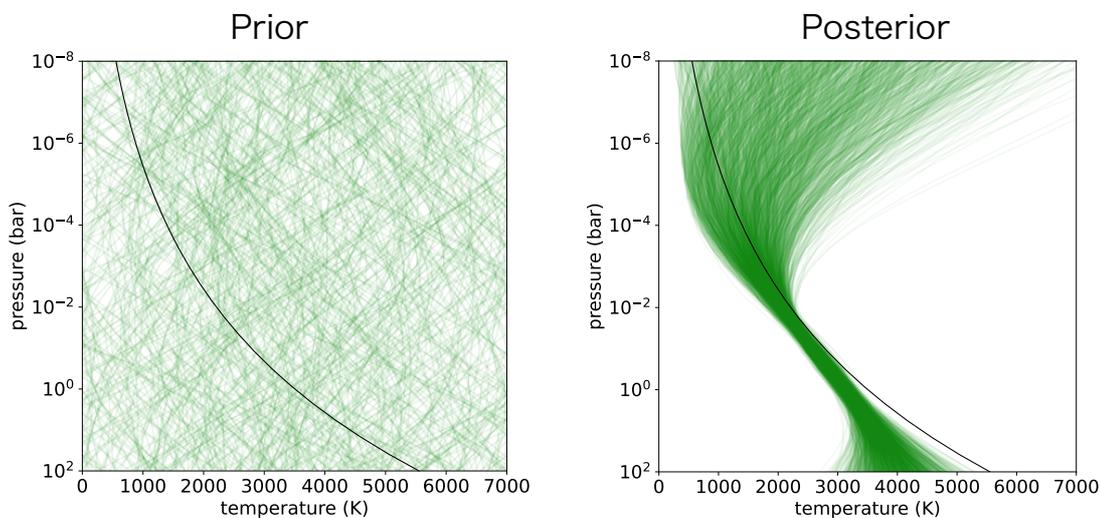


図4: バーナード星の大気温度構造(横軸が温度で縦軸が圧力)のExoJAXによる推定の様子を示す。左パネルが事前分布で、あらゆる構造が可能であることを示す。右パネルが事後分布で、上層大気はうまく制約できていない一方、観測されるスペクトルへの寄与が大きい光球(圧力が約1 bar)の周辺では大気温度がよく制限されていることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ishikawa Hiroyuki Tako, Aoki Wako, Hirano Teruyuki, Kotani Takayuki, Kuzuhara Masayuki, Omiya Masashi, et al.	4. 巻 163
2. 論文標題 Elemental Abundances of nearby M Dwarfs Based on High-resolution Near-infrared Spectra Obtained by the Subaru/IRD Survey: Proof of Concept	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 72 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac3ee0	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 Mori Mayuko, Livingston John H., Leon Jerome de, Narita Norio, Hirano Teruyuki, Fukui Akihiko, Collins Karen A., Fujita Naho, Hori Yasunori, Ishikawa Hiroyuki Tako, et al.	4. 巻 163
2. 論文標題 TOI-1696: A Nearby M4 Dwarf with a 3 R_Earth Planet in the Neptunian Desert	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 298 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac6bf8	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 Harakawa Hiroki, Takarada Takuya, Kasagi Yui, Hirano Teruyuki, Kotani Takayuki, Kuzuhara Masayuki, Omiya Masashi, Kawahara Hajime, Fukui Akihiko, Hori Yasunori, Ishikawa Hiroyuki Tako, et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 A super-Earth orbiting near the inner edge of the habitable zone around the M4.5 dwarf Ross 508	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 904 ~ 922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac044	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 Kawauchi K., Murgas F., Palte E., Narita N., Fukui A., Hirano T., Parviainen H., Ishikawa H. T., et al.	4. 巻 666
2. 論文標題 Validation and atmospheric exploration of the sub-Neptune TOI-2136b around a nearby M3 dwarf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A4 ~ A4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243381	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Hirano Teruyuki, Dai Fei, Livingston John H., Grziwa Sascha, Lam Kristine W. F., Kasagi Yui, Narita Norio, Ishikawa Hiroyuki Tako, et al.	4. 巻 165
2. 論文標題 An Earth-sized Planet around an M5 Dwarf Star at 22 pc	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 131 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/acb7e1	査読の有無 無
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 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Ishikawa Hiroyuki Tako
2. 発表標題 Abundance analysis of individual elements for nearby M dwarfs based on high-resolution near-infrared spectra of Subaru/IRD
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川裕之, 葛原昌幸, 青木和光, 小谷隆行, 大宮正士
2. 発表標題 複数の近赤外高分散分光器を用いた M 型矮星の組成決定 : 連星観測に基づく 検証温度範囲の拡張
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Tako Ishikawa, Hajime Kawahara, Yui Kawashima, Kento Masuda, Takayuki Kotani, Teruyuki Hirano, Masayuki Kuzuhara, Stevanus K. Nugroho
2. 発表標題 Auto-differentiable high-resolution spectral model for exoplanets and its application to the Barnard's Star
3. 学会等名 Thinkshop 2022: High-resolution spectroscopy for exoplanet atmospheres and biomarkers (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Tako Ishikawa, Masayuki Kuzuhara, Wako Aoki, Teruyuki Hirano, Takayuki Kotani, Masashi Omiya
2. 発表標題 Elemental abundances of M dwarfs based on high-resolution near-infrared spectra: Extension of verification by binary systems
3. 学会等名 COOL STARS 21
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川裕之、河原創、川島由依、増田賢人、小谷隆行、平野照幸、葛原昌幸、Stevanus Nugroho(ABC/NAOJ)、笠木 結
2. 発表標題 自動微分可能なスペクトルモデルによる M 型矮星の大気リトリーバル
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター 研究成果『惑星探しのデータから、未開拓の低温度星の化学組成を調査』 https://www.abc-nins.jp/310/</p>

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------