

令和 7 年 6 月 18 日現在

機関番号：32692

研究種目：若手研究

研究期間：2020 ~ 2024

課題番号：20K14512

研究課題名（和文）低温度星の内部構造を考慮した回転進化とそのハビタブルプラネット

研究課題名（英文）Spin evolution of cool stars and their habitable planets

研究代表者

藤澤 幸太郎 (Fujisawa, Kotaro)

東京工科大学・教養学環・講師

研究者番号：30732408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、太陽よりも軽くて温度が低い低温度星の周囲に存在する惑星のハビタビリティについて、主星の回転進化と主星からのウインドやフレアなどの活動に着目し、主星の活動が惑星のハビタビリティに及ぼす影響を理論および観測の両面から検討した。理論的には多次元のラグランジュ座標を用いた回転星の多次元構造と進化の計算を行つことに成功した。また、回転星からの回転や磁場を伴ったアウトフローの計算も行なった。加えて、数値計算手法の開発も行った。観測的には、観測データ解析による回転星の光度変化やフレアの特徴を分析した。以上のように、理論面と観測面の両方から、本研究課題を遂行した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、近年注目される系外惑星のハビタビリティに対して、低温度星の自転進化や磁場活動などの主星側の物理過程が及ぼす影響を、理論と観測の両面から体系的に解明するものである。特に理論面では、星の進化計算に適している一方で、これまで困難であった多次元ラグランジュ座標を用いた、主星の多次元的な内部構造と自転進化計算を行うことに成功した。今後は、この計算手法を応用することで、様々な天体の多次元的な回転進化計算を行い、回転する天体が関わる様々な天体現象の解明に取り組んでいくことが可能になったという点で、天体物理学上きわめて意義深い成果であった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the habitability of planets orbiting low-mass, low-temperature stars by focusing on the effects of stellar rotation evolution and stellar activity such as winds and flares. Theoretical approaches included successful calculations of the multidimensional structure and evolution of rotating stars using multidimensional Lagrangian coordinates and simulations of outflows influenced by stellar rotation and magnetic fields. We also developed new numerical computation methods. On the observational side, we analyzed stellar light curves and flare characteristics based on observational data. We carried out this research project through both theoretical and observational approaches.

研究分野：天体物理学

キーワード：回転星 自転進化 ウインド 低温度星 磁場 ハビタビリティ 系外惑星 地球外生命

### 1. 研究開始当初の背景

ケプラー衛星の成功をはじめとする観測およびデータ解析の飛躍的な進展により、現在では数千を超える系外惑星が発見されている。その中には、主星からの放射によって表面温度が生命の存在に適するとされるハビタブルゾーン内に位置している惑星、いわゆるハビタブルプラネットも含まれており、そこには生命が存在していると期待されている。

しかし、ハビタブルゾーンはあくまで必要条件に過ぎない。生命が誕生し、人間のような複雑な生命体に進化するためには、地球の例が示すように、数億年から数十億年の長期にわたって惑星が生命に適した環境であり続ける必要がある。主星からのウインドによる大気の剥ぎ取りや、放射による大気散逸が発生すれば、一度誕生した生命も絶滅してしまう可能性がある。このように、ハビタブルプラネットの運命は主星の天体活動による物理によって支配されている。

近年、太陽質量の半分以下の低温度星や、太陽質量の10%程度しかない超低温度星の周囲にもハビタブルプラネットが発見されている。質量が0.12太陽質量の赤色矮星プロキシマ・ケンタウリには、質量が約2地球質量のプロキシマ・ケンタウリbが、質量が0.08太陽質量の赤色矮星TRAPPIST-1には、TRAPPIST-1e、f、gが見つかっている。さらに、質量が0.08太陽質量のティーガーデン星周囲には、ティーガーデンb、cが発見されている。

これらの星は温度が低いため、ハビタブルゾーンは主星に近く、惑星は主星のフレアやウインドの影響を強く受ける。その結果、惑星環境が乱されやすく、ハビタビリティの持続性は単純ではない。これまでの研究では、太陽風に基づいたモデルを用いて低温度星周囲の惑星のハビタビリティの議論を行っているが、低温度星の物理状況は太陽型星とは異なるため、これまでの研究では不十分であった。

さらに、これらの低温度星には、年老いても自転が遅くならない種族も存在しており、その自転進化が主星の活動性や惑星のハビタビリティに強く影響を及ぼしていると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、低温度星の周囲に存在するハビタブルプラネットが、主星からのウインドやその他の活動性によって、ハビタビリティがどのように影響を受けるかを明らかにすることを目的とする。特に太陽型星とは異なる低温度星の自転進化に着目し、まずは回転している星の多次元内部構造モデルを構築する。さらに、回転および磁場を考慮した多次元的なウインドやアウトフローのモデルを計算し、内部構造を考慮した星の多次元自転進化モデルの構築を目指す。同時に、数値手法の開発や、観測データの解析も通じて、回転する天体の活動性に関する理解を深めていく。最終的には、この自転進化モデルを用いて、高速回転する低温度星の周囲における惑星のハビタビリティについて、新たな視点からの評価と議論を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、回転している星の多次元的な構造、自転進化、そして回転星からの多次元的なアウトフローなどの天体活動に関して、理論的な側面と観測的な側面の両面から研究に取り組んだ。

理論的な研究としては、まずは本研究の中核をなす(1)回転星の多次元的な構造の計算に取り組む。次に、回転する主星の活動性に関連して、(2)回転している天体からの活動性と自転進

化とその周囲の惑星のハビタビリティに関して研究を行う。(3) 観測データを用いた研究として、回転する天体の光度曲線やフレアに関する研究にも取り組む。一方で、回転星の多次元計算は非線形であり計算量が大きくなるため、さらなる研究の発展のためには新しい手法の導入も重要である。そこで、(4) 回転する天体の多次元進化計算に向けた数値計算手法の開発も行う。

#### 4. 研究成果

上記の 4 つの研究方法に基づいて得られた成果と知見について、それぞれ国内外の他の研究との位置づけやインパクト、今後の展望を以下にまとめる。

##### (1) 回転星の多次元的な構造の計算

従来の回転星の進化計算は、進化計算に適しているが多次元化が困難なラグランジュ座標による 1 次元計算、あるいは多次元化は容易だが進化計算には適していない 2 次元のオイラー座標によるものに限られており、回転星の構造計算と進化計算の両方を適切に扱うことができていなかった。そこで、2 次元のラグランジュ座標による回転星の多次元構造計算のための定式化と数値計算コードの開発を行い、2 次元のラグランジュ座標で回転星の 2 次元平衡形状を計算することに成功した(図 1)。さらにそのコードを用いて、簡略化された状況下ではあるが、冷却などの多次元進化計算に取り組み、2 次元回転星のラグランジュ座標における進化計算を行うことに成功した[1,2]。

本研究成果から、多次元ラグランジュ座標における構造計算では、従来用いられていたニュートン法などの計算手法ではうまく解を収束させることができず、我々が開発した W4 法[3]のような、より強力な数値計算手法が必要であるという知見が得られた。簡易的ではあるが、多次元ラグランジュ座標上で回転星の進化計算を行うことに成功したのは国内外を問わず我々のグループだけであり、本研究で開発した数値計算コードは非常に独自性の高いものである。今後の展望として、さらなるコードの改良を行うことで、より現実的な多次元回転進化計算を行なっていくことができるようになり、回転星に関する天文学における未解決問題に取り組むことが可能である。

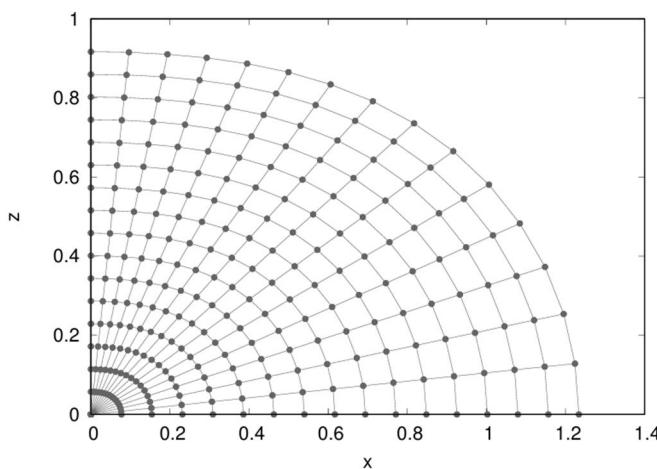


図 1 ラグランジュ座標による回転星の 2 次元平衡形状。

##### (2) 回転している天体からのアウトフローなどの活動性と自転進化とハビタビリティ

回転している天体の回転や磁場は、ウインドなどのアウトフローの活動に大きな影響を及ぼすと考えられ、自転進化と星周囲の状況を考えるために重要である。そこで、回転している星からの、自己相似的なアウトフローの解[4]や、磁場も伴った回転星の動的なアウトフローの解[5]などを系統的に調べた。その結果、これまで知られていなかった、自転を伴った新しい自己

相似解や、磁場を伴った動的な解を得ることができた。

本研究成果から、特に自己相似的な状況では、回転を含む状況では未知の解が存在しているという知見が得られた。こうした自己相似的なウインドの解は、回転がない状況では1980年代に国内外の研究者によって調べられていたが、その後の進展はあまりなく、我々が本研究で求めた新しい解が、新しい研究の第一歩になりうるものであると言える。今後の展望としては、回転に加えて磁場や天体からの輻射なども組み込み解を求めることで、回転する天体の活動性に伴う自転進化に関する議論をさらに深めることができる。

### (3) 観測データを用いた研究

観測的な研究としては、回転している天体の自転に伴う光度曲線の変化[6]や、回転する天体とそこからのフレアに関する研究[7]を行った。表面温度が不均一な星が回転している時、光度曲線には、表面温度分布に依存した特徴が現れる。そこで、そのような光度曲線に関する解析的で系統的な研究に取り組み、その依存性を明らかにした。また、回転している低温度星のデータ解析にも取り組み、低温度星の回転とフレアなどに関する議論を行った。

本研究成果から、回転している天体とその天体からのフレアや光度曲線などの天体现象に関する新しい知見を得ることができた。回転している低温度星とそこからのフレアや、光度曲線に関する研究は国内外でいくつかあるが、本研究は注目を集めており引用数が増加している。今後の展望として、回転する低温度星の周囲の環境や惑星との相互作用などといった点に関して議論を深めていくことが考えられる。

### (4) 回転する天体の多次元進化計算に向けた数値計算手法の開発

回転星の多次元進化計算は、1次元の星の進化計算に比べて計算量が膨大になるため、さらなる研究の発展のためには新しい手法の開発も重要である。そこで、非線形方程式に対する、新しい数値計算手法、W4法の開発を行った[3]。W4法は非常に強力な収束性を有しており、ニュートン法では計算が困難であった非線形方程式の解を求めるに成功した。さらに、膨大な計算を効率よく行うために、量子コンピュータの天体物理学への応用を見据え、自己重力系の方程式に対する量子アルゴリズムの開発も行った。

本研究成果から、回転する天体の多次元進化計算にはニュートン法などの従来の反復法の手法では不十分であり、反復法に加速度項を加えて収束性を高めた、我々の開発したW4法が有用であるという知見が得られた。国内外の関連する研究を見ても、我々のように非線形数値計算手法から開発を行っている研究は他になく、非常に独創的な点であると言える。今後の展望として、W4法の収束性は非常に強力だが計算コストが大きいため、長時間計算を行うのには不向きである。そこで、W4の計算コストをより抑えることで、今よりも長時間の回転星進化計算を行うことを目指していく。

## 引用文献

- [1] Ogata Misa, Okawa Hirotada, Fujisawa Kotaro, Yasutake Nobutoshi, Yamamoto Yu, Yamada Shoichi, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 521, 2561, (2023)
- [2] Okawa Hirotada, Fujisawa Kotaro, Yasutake Nobutoshi, Ogata Misa, Yamamoto Yu, Yamada Shoichi, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520, 24, (2023)
- [3] Okawa Hirotada, Fujisawa Kotaro, Yamamoto Yu, Hirai Ryosuke, Yasutake Nobutoshi,

- Nagakura Hiroki, Yamada Shoichi, *Applied Numerical Mathematics*, 183, 157, (2023)
- [4] Ko Takatoshi, Fujisawa Kotaro, Shigeyama Toshikazu, *The Astrophysical Journal*, 941, 38, (2022)
- [5] Zhong Yici, Kashiyama Kazumi, Takasao Shinsuke, Shigeyama Toshikazu, Fujisawa Kotaro, *The Astrophysical Journal*, 963, 26, (2024)
- [6] Suto Yasushi, Sasaki Shin, Aizawa Masataka, Fujisawa Kotaro, Kashiyama Kazumi, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 75, 103, (2022)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] 計10件 (うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 10件)

1. 著者名 Zhong Yici, Kashiyama Kazumi, Takasao Shinsuke, Shigeyama Toshikazu, Fujisawa Kotaro	4. 卷 963
2. 論文標題 The Optically Thick Rotating Magnetic Wind from a Massive White Dwarf Merger Product. II. Axisymmetric Magnetohydrodynamic Simulations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad1f5c	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 Miyamoto Koichi, Yamazaki Soichiro, Uchida Fumio, Fujisawa Kotaro, Yoshida Naoki	4. 卷 6
2. 論文標題 Quantum algorithm for the Vlasov simulation of the large-scale structure formation with massive neutrinos	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013200-1 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.6.013200	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 Aizawa Masataka, Kawana Kojiro, Kashiyama Kazumi (+Kotaro Fujisawa) et al.	4. 卷 74
2. 論文標題 Fast optical flares from M?dwarfs detected by a one-second-cadence survey with Tomo-e Gozen	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 1069 ~ 1094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/pzac056	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 Ogata Misa, Okawa Hirotada, Fujisawa Kotaro, Yasutake Nobutoshi, Yamamoto Yu, Yamada Shoichi	4. 卷 521
2. 論文標題 A Lagrangian construction of rotating star models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2561 ~ 2576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad647	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 Okawa Hirotada、Fujisawa Kotaro、Yasutake Nobutoshi、Ogata Misa、Yamamoto Yu、Yamada Shoichi	4.巻 520
2.論文標題 A novel Lagrangian formulation to construct relativistic rotating stars: towards its application to their evolution calculations	5.発行年 2023年
3.雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6.最初と最後の頁 24 ~ 43
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad075	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 Okawa Hirotada、Fujisawa Kotaro、Yamamoto Yu、Hirai Ryosuke、Yasutake Nobutoshi、Nagakura Hiroki、Yamada Shoichi	4.巻 183
2.論文標題 The W4 method: A new multi-dimensional root-finding scheme for nonlinear systems of equations	5.発行年 2023年
3.雑誌名 Applied Numerical Mathematics	6.最初と最後の頁 157 ~ 172
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apnum.2022.08.019	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 Ko Takatoshi、Fujisawa Kotaro、Shigeyama Toshikazu	4.巻 941
2.論文標題 Self-similar Solution of Rotating Eruptive Outflows on Its Equatorial Plane	5.発行年 2022年
3.雑誌名 The Astrophysical Journal	6.最初と最後の頁 38 ~ 38
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca095	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 Suto Yasushi、Sasaki Shin、Aizawa Masataka、Fujisawa Kotaro、Kashiyama Kazumi	4.巻 75
2.論文標題 Modeling photometric variations due to a global inhomogeneity on an obliquely rotating star: Application to light curves of white dwarfs	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 103 ~ 119
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/pzac093	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 Yamazaki Soichiro、Uchida Fumio、Fujisawa Kotaro、Miyamoto Koichi、Yoshida Naoki	4.巻 288
2.論文標題 Quantum algorithm for collisionless Boltzmann simulation of self-gravitating systems	5.発行年 2025年
3.雑誌名 Computers & Fluids	6.最初と最後の頁 106527 ~ 106527
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2024.106527	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 Ko Takatoshi、Suzuki Hiromasa、Kashiyama Kazumi、Uchida Hiroyuki、Tanaka Takaaki、Tsuna Daichi、Fujisawa Kotaro、Bamba Aya、Shigeyama Toshikazu	4.巻 969
2.論文標題 A Dynamical Model for IRAS 00500+6713: The Remnant of a Type Iax Supernova SN 1181 Hosting a Double Degenerate Merger Product WD J005311	5.発行年 2024年
3.雑誌名 The Astrophysical Journal	6.最初と最後の頁 116 ~ 116
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad4d99	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
---------	---------