

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05996

研究課題名(和文) 原始銀河における低金属量大質量星形成過程の研究

研究課題名(英文) Low-metallicity high-mass star formation in primeval galaxies

研究代表者

細川 隆史 (HOSOKAWA, Takashi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30413967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：初期宇宙に実現する金属量の低い環境で、大質量星の形成過程を理論的に明らかにすることを目的に研究を進めた。質量降着によって成長する原始星が光度を増すにつれ、降着してくるガスにフィードバック過程を及ぼすが、その金属量依存性を初めて明らかにした。その結果、太陽組成の1/100程度の金属量でのフィードバック過程は宇宙初代星形成の場合と同様に光電離効果が重要で、これは重元素量がゼロの初代星形成の場合と同様であることが分かった。初期宇宙で起こる初代星の形成過程を直接観測することは到底できないが、この程度の低金属量環境であれば近傍宇宙でも存在するため、将来観測の興味深いターゲットとなることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビッグバン後、宇宙で初めて起こった星の誕生はその後の宇宙の進化を色々な点で決定づけた。例えば、宇宙に生命が誕生するためには星内部で酸素や炭素の重元素が合成される必要があるが、こういうものは宇宙初期で星が生まれることによって、その一歩を踏み出したと言える。今回の研究は、そういう宇宙初期の星形成と、銀河系で我々の近傍で起きている星形成を繋ぐ位置づけになっている。宇宙最初の星形成は我々からあまりにも遠いので直接観測できない。しかし、銀河系よりは初期宇宙の環境に近いが、それほど遠くない環境というものも存在する。そこで星形成を調べることで、広い意味で我々の起源に迫る研究ができた。

研究成果の概要(英文)：We have performed theoretical studies to elucidate the formation process of high-mass star formation in low-metallicity environments, which should have occurred in the early universe. Mainly we have studied the protostellar radiative feedback effects against the gas accreting on high-mass protostars. Our results show that, even at the metallicity of 0.01% of the solar value, the photoionization is the dominant feedback, and the resulting evolution is similar to that of the primordial star formation. Although the primordial environments are not directly accessible even by upcoming observational facilities, such low-metallicity star-forming regions exist in the nearby universe. Therefore, we suggest that the high-mass star formation in the low-metallicity environments is an essential target for future observations to glimpse the star formation process in the early universe.

研究分野：天体物理学

キーワード：大質量星 宇宙初期天体 宇宙初代星 銀河形成 金属欠乏星 原始星 電離領域 数値シミュレーション

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。

1. 研究開始当初の背景

本研究が開始された 2016 年当初は、金属量がゼロのいわゆる宇宙最初の星(初代星)形成と銀河系の大質量星形成が個別に研究されていた。しかし、どちらの分野でも結果として誕生する星は太陽質量の数十～百倍の巨大な星であり、明らかに両者を統一的な立場から理解する必要があった。しかも、初代星の形成現場を直接観測するには遠方すぎるので、初期宇宙の星形成と銀河系の星形成をつなぐ分野の開拓は観測的にも、星形成の環境依存性を明らかにするという観点で重要視されていた。また、2015 年には史上初めての重力波の直接観測があり、宇宙には太陽の数十倍質量のブラックホールが多く連星として存在することが分かった。恒星の死後このような質量の大きなブラックホールが残されるためには、恒星進化の途上で星風による質量損失を抑える必要があり、そのためには星が含む重元素量は小さい必要がある。このように、急速に進展する重力波天文学の見地からも、銀河系よりもずっと重元素が少ない環境において太陽の十～百倍質量の星が誕生する様子の研究が待たれていた。

2. 研究の目的

星形成の母体となるガス雲の金属量をパラメータとして、大質量の星形成過程がどのように依存するのかを明らかにすることを目的とした。特に、大質量の星が誕生する際は、未だ質量降着によって成長中の原始星段階から星光度が非常に大きくなるため、降着ガスに対するこの輻射のフィードバック過程の強度が金属量によってどのように変わるかを明らかにする必要があった。すなわち、星からの輻射の効果によって星へと降り積もろうとするガスが阻止されてしまうと、それ以上星の質量が増えることがないので、結局この過程が最終的に形成される星の質量を左右するという訳である。銀河系の星形成では降着ガス中に含まれるダスト粒子を介した輻射圧の効果が重要とされてきたが、その一方、初代星形成のときはダストが存在せずこの効果がない代わりに紫外星による光電離の効果が効くと主張されてきた。が、関連はあるものの両者は別分野として発展したので相互関係が明らかでなかった。環境依存性を考えることで両者を含む統一的な枠組みを作ることが最終的な目的である。

3. 研究の方法

数値シミュレーションを中心とする理論的な方法を取るが、シミュレーション結果の理解のために解析的な考察やモデル化も行った。我々のグループでは銀河系における大質量星の形成過程と、初期宇宙での初代星の形成過程それぞれをシミュレーションにより研究した経験があったため、これの自然な拡張としてその中間の低金属量の環境をターゲットして研究に使用した。

4. 研究成果

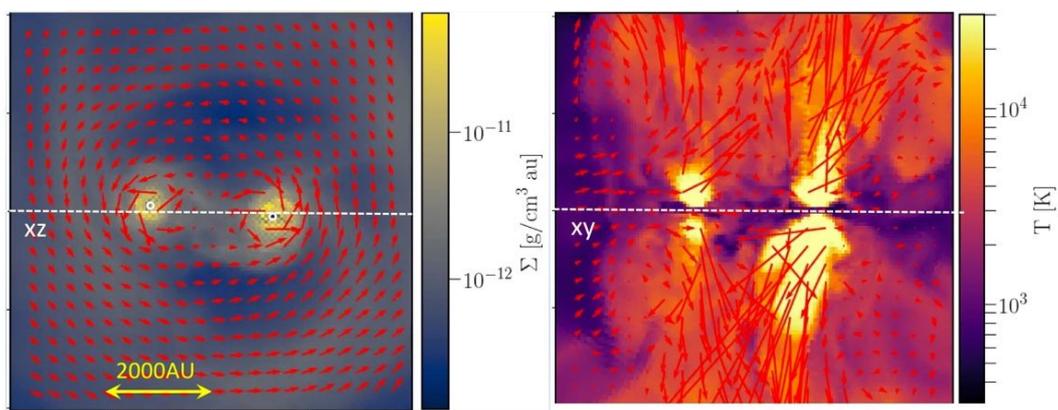


Figure 1: AMR コード SFUMATO による初代星形成の輻射流体シミュレーション(Sugimura et al. 20 より)。連星をなす大質量原始星への輻射フィードバック下での質量降着の様子。左が赤道面スライス面(face-on)での密度分布、右がそれとは垂直方向スライス面(edge-on)での温度分布。連星を成す各々の星から連星軌道面とは垂直方向に 2 つの双極的な電離領域が成長しつつある。

主目的である低金属量環境での大質量星形成に関しては球対称を仮定した最初の研究 (Fukushima et al. 18) から始め、多次元効果を準解析的モデル化と数値シミュレーションにより研究した (Tanaka et al. 18; Fukushima et al. 20a)。ここで金属量ゼロの場合に重要なフィードバック過程とされた原始星からの紫外光による光電離効果は、銀河系環境での役割について研究が限られていたので、これも調査した (Kuiper & Hosokawa 18)。これら一連の研究結果によると、金属量が太陽組成の 1/100 までは、原始星フィードバックに関してはむしろ初期宇宙での初代星形成と同様の進化が総じて起こることが分かった。観測的には、金属量が完全にゼロの初代星の形成過程を直接観測することは非常に困難なものの、この程度の低金属環境であれば近傍宇宙にも稀に存在していることが重要である。こうした領域をターゲットにすることによって、銀河系とは定性的に異なった、初期宇宙特有の星形成過程の一端を直接観測できる可能性がある。以上のさらなる拡張として、特に低金属量環境でのフィードバック過程に着目して、例えば原始惑星系円盤の散逸過程 (Nakatani et al. 18a,b)、中質量ブラックホールへの急速ガス降着過程 (Toyouchi et al. 19, 20) の研究も進めた。重力波天体の先駆体の観点からは大質量の連星過程の解明が重要であり、まず金属量ゼロの初代星形成の場合について一連の研究を進めた (Hirano et al. 17; Chon et al. 18; Chon & Hosokawa 19; Sugimura et al. 20)。特に Sugimura et al. (図 1) では鍵となる光蒸発のフィードバック効果を正確に取り入れつつ、円盤分裂からの連星形成を長期に渡り追跡した最初の計算であり、今後の一つの試金石となる成果である。金属量依存性をひとつの軸とした星団形成の研究も始まっており (Fukushima et al. 20b)、今回の成果を踏まえた上でのさらなる展開に繋げることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsushita, Yuko; Sakurai, Yuya; Hosokawa, Takashi; Machida, Masahiro N.	4. 巻 475
2. 論文標題 Massive outflows driven by magnetic effects - II. Comparison with observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 391-403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx3070	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 -
1. 著者名 Chon, Sunmyon; Hosokawa, Takashi; Yoshida, Naoki	4. 巻 475
2. 論文標題 Radiation hydrodynamics simulations of the formation of direct-collapse supermassive stellar systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4104-4124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty086	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 -
1. 著者名 Nakatani, Riuhei; Hosokawa, Takashi; Yoshida, Naoki; Nomura, Hideko; Kuiper, Rolf	4. 巻 857
2. 論文標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks by Ultraviolet Radiation: Metallicity Dependence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 57 (22pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab70b	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 -
1. 著者名 Tanaka, Kei E. I.; Tan, Jonathan C.; Zhang, Yichen; Hosokawa, Takashi	4. 巻 861
2. 論文標題 The Impact of Feedback in Massive Star Formation. II. Lower Star Formation Efficiency at Lower Metallicity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 68 (13pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac892	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 Kuiper, R.; Hosokawa, T.	4. 巻 616
2. 論文標題 First hydrodynamics simulations of radiation forces and photoionization feedback in massive star formation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 101 (22pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201832638	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 Sugimura, Kazuyuki; Hosokawa, Takashi; Yajima, Hidenobu; Inayoshi, Kohei; Omukai, Kazuyuki	4. 巻 478
2. 論文標題 Stunted accretion growth of black holes by combined effect of the flow angular momentum and radiation feedback	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3961-3975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1298	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 Nakatani, Riouhei; Hosokawa, Takashi; Yoshida, Naoki; Nomura, Hideko; Kuiper, Rolf	4. 巻 865
2. 論文標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks. II. Metallicity Dependence of UV and X-Ray Photoevaporation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 75 (13pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad9fd	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 Toyouchi, Daisuke; Hosokawa, Takashi; Sugimura, Kazuyuki; Nakatani, Riouhei; Kuiper, Rolf	4. 巻 483
2. 論文標題 Super-Eddington accretion of dusty gas on to seed black holes: metallicity-dependent efficiency of mass growth	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 2031-2043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3012	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 Umeda Hideyuki, Hosokawa Takashi, Omukai Kazuyuki, Yoshida Naoki	4. 巻 830
2. 論文標題 THE FINAL FATES OF ACCRETING SUPERMASSIVE STARS	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L34 ~ L34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/830/2/L34	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 -

1. 著者名 Tomida Kengo, Machida Masahiro N., Hosokawa Takashi, Sakurai Yuya, Lin Chia Hui	4. 巻 835
2. 論文標題 Grand-design Spiral Arms in a Young Forming Circumstellar Disk	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L11 ~ L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/835/1/L11	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 -

1. 著者名 Nakauchi Daisuke, Hosokawa Takashi, Omukai Kazuyuki, Saio Hideyuki, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 465
2. 論文標題 Do stellar winds prevent the formation of supermassive stars by accretion?	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5016 ~ 5025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw3114	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 -

1. 著者名 Sugimura Kazuyuki, Hosokawa Takashi, Yajima Hidenobu, Omukai Kazuyuki	4. 巻 469
2. 論文標題 Rapid black hole growth under anisotropic radiation feedback	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 62 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx769	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 -

1. 著者名 Vorobyov Eduard I., Elbakyan Vardan, Hosokawa Takashi, Sakurai Yuya, Guedel Manuel, Yorke Harold	4. 巻 605
2. 論文標題 Effect of accretion on the pre-main-sequence evolution of low-mass stars and brown dwarfs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A77 ~ A77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201630356	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 Hirano Shingo, Hosokawa Takashi, Yoshida Naoki, Kuiper Rolf	4. 巻 357
2. 論文標題 Supersonic gas streams enhance the formation of massive black holes in the early universe	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1375 ~ 1378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aai9119	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 Fukushima Hajime, Omukai Kazuyuki, Hosokawa Takashi	4. 巻 473
2. 論文標題 Upper stellar mass limit by radiative feedback at low-metallicities: metallicity and accretion rate dependence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4754 ~ 4772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2620	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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 杉村和幸、細川隆史、矢島秀伸、稲吉恒平、大向一 行
2. 発表標題 ブラックホール降着円盤へのガス降着率とガスの角運動量の関係
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 豊内大輔、杉村和幸、仲谷 峻平、細川隆史
2. 発表標題 超巨大ブラックホールへの dusty gas の超臨界降着
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仲谷峻平、細川隆史、吉田直紀、野村英子、Rolf Kuiper
2. 発表標題 原始惑星系円盤における紫外線/X線光蒸発の金属量依存性
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猪口睦子、嶺重慎、細川隆史
2. 発表標題 分子雲破壊における解離光の役割：残骸化学組成と星形成効率の抑制
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細川隆史、Rolf Kuiper
2. 発表標題 銀河系での大質量星形成における光電離フィードバックの役割
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福島肇、細川隆史、大向一行、千秋元、吉田直紀、Rolf Kuiper
2. 発表標題 2次元輻射流体計算による大質量星質量の金属度依存性の解明
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鄭昇明、細川隆史
2. 発表標題 星形成円盤中での分裂片のmigration過程と連星形成
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Hosokawa
2. 発表標題 Feedback from Accreting seed BHs and Progenitor Stars
3. 学会等名 The early growth of supermassive black holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Hosokawa
2. 発表標題 Feedback & Fragmentation: key processes in high-mass star formation
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 福島肇、細川隆史、大向一行
2. 発表標題 大質量星形成における輻射フィードバックの金属度・降着率依存性
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鄭昇明、細川隆史、吉田直紀
2. 発表標題 宇宙論的環境下における超大質量星形成シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 仲谷峻平、細川隆史、吉田直紀、野村英子、Rolf Kuiper
2. 発表標題 原始惑星系円盤光蒸発の金属量依存性
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富田賢吾、町田正博、細川隆史、櫻井祐也、Chia Hui Lin
2. 発表標題 若い原始惑星系円盤の大域的渦状腕の起源
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Hosokawa
2. 発表標題 Formation of massive primordial stars controlled by the protostellar evolution
3. 学会等名 Francesco's legacy-Star formation in space and time, Florence, Italy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Hosokawa
2. 発表標題 Evolution of Accreting Supermassive Stars
3. 学会等名 TITANS in the early universe, Prato, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ビッグバン直後の超音速ガス流が生んだモンスターブラックホールの種 http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/170929_1.html</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