様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６ 年　６ 月 ２５ 日現在

機関番号：１２６０８
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2023
課題番号：１９Ｋ１４７６０

研究課題名（和文）理論と観測から迫る大質量星形成

研究課題名（英文）Revealing Massive Star Formation through Theory and Observation

研究代表者
田中　圭（Tanaka, Kei）

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：２０６３４４５５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では理論と観測の両面から大質量星形成過程の解明に取り組み、4年間にわたり多くの国際共同研究を通じて重要な成果を挙げた。まず、大質量星形成の最大障壁である「輻射フィードバック」について、円盤降着による克服のシナリオを提唱し、観測で実証した。また、大質量原始星円盤の高温環境が岩石ダストの合体成長や蒸発を促進することを明らかにし、宇宙鉱物学研究の実験室としての価値を示した。さらに、低重元素量環境における大質量星形成過程を数値シミュレーションとサーベイ観測で調査し、物理過程や化学特性の多様性を明らかにした。これらの成果は、包括的な理解と将来の研究指針となる重要な一歩である。

研究成果の学術的意義や社会的意義
国際共同研究を通じて、次世代の天文学者や物理学者の育成に寄与する。特に、若手研究者が最先端の研究に参加する機会を提供し、国際的な視野を持つ人材の育成を促進する。高精度な観測技術やシミュレーション技術の発展を通じて、科学技術全般の進歩に貢献する。これにより、他の科学分野や工学分野への応用も期待される。宇宙の起源や星の形成に関する理解を深めることで、一般社会への科学啓発を促進する。これにより、科学への興味を喚起し、科学教育の充実に繋がる。

研究成果の概要（英文）：This project undertook the elucidation of the massive star formation process through both theoretical and observational approaches, achieving significant results over four years of extensive international collaboration. Firstly, a scenario for overcoming the major obstacle of massive star formation, “radiation feedback,” via disk accretion was proposed and empirically verified through observations. Additionally, it was clarified that the high-temperature environment of massive protostar disks promotes the coalescence and evaporation of silicate grains, establishing its value as a laboratory for astro-mineralogical research. Furthermore, the massive star formation process in low-metallicity environments was investigated through numerical simulations and survey observations, revealing the diversity of physical processes and chemical properties. These results represent a crucial step toward comprehensive understanding and future research directions.

研究分野：星形成

キーワード：大質量星形成　電波観測　星形成理論　輻射輸送

※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、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景
大質量星は強力な紫外線放射と恒星風，超新星爆発によって星間乱流を駆動し、重元素を供給することで、初期宇宙の再電離から銀河系内での星・惑星の誕生に至る幅広い現象に多大な影響を与える天体である。さらに、その死後にはブラックホール，中性子星、つまり現在注目を集める重力波源天体へと姿を変える。そのため大質量星の形成条件と質量決定機構を理解することは極めて重要である。1980 年代には標準シナリオが確立していた小質量星形成と比べ、大質量星形成研究は現在まさに発展を見せている分野である。
大・小質量星の最も顕著な違いは輻射強度である。強烈な輻射フィードバックによりガス降着が抑制されるため、大質量星の形成過程は小質量星と大きく異なると考えられていた。しかし 2015 年以降、理論研究の進展により円盤降着によって強烈な輻射を克服できる可能性が示され始めた（Tanaka et al. 2017, 2018 等）。同時にアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA の高解像度観測が始まり、大質量星原始星の周りでも円盤構造が発見されはじめた（Johnston et al. 2015 等）。そのため、大質量形成における降着円盤の重要性に注目が寄せられ始めていた。

２．研究の目的
理論と観測を組み合わせ、大質量星原始星の輻射フィードバックと降着円盤の物理特性を詳細に調べ、大質量星形成における「円盤降着による輻射フィードバック克服」というシナリオの確立を目指した。

３．研究の方法
(1)[観測]アルマ観測による大質量原始星円盤の探査：最高性能電波望遠鏡であるアルマ望遠鏡を用いた、様々な大質量原始星周囲の高分解能観測を行い、円盤構造の普遍性を検証し、また円盤物理・化学特性を明らかにする。特に、超コンパクト電離領域が形成されるほど強烈な輻射フィードバックが確認される大質量原始星においても円盤降着が確認されれば、「円盤降着による輻射フィードバック克服」の重要な証拠となる。この研究手法における主な共同研究者は Yichen Zhang 准教授(上海交通大学)である。

(2)[理論]フィードバックの磁気流体シミュレーション：大質量原始星からフィードバック強度の理論予測のため、磁気流体シミュレーションによりアウトフロー構造の時間進化と、その観測特性を理論的に調べる。実際の観測データとの直接比較により、電波フラックスから物理・化学特性に焼き直すことが可能となる。この研究手法における主な共同研究者は Jan E. Staff 研究員(チャルマース工科大学)である。

(3)[理論]大質量原始星円盤における岩石ダスト合体成長モデル：大質量原始星円盤においてもダスト微粒子が合体成長する可能性が観測から示された（Girart et al. 2018）。ダストが合体成長すると円盤の温度構造や観測特性に大きな影響を与えるため、理論的解釈が不可欠となる。そこで、大質量原始星円盤の温度・密度構造と共に、ダスト成長を整合的に計算する理論モデルを構築した。この研究手法における主な共同研究者は山室良太氏，奥住聡教授(東京工業大学)である。

(4)[理論・観測]低金属量環境における大質量星形成：理論・観測ともに順調に進行したため、研究対象を初期宇宙のような低重元素量環境における大質量星形成にまで拡張した。理論的には重元素量円盤における円盤形成の輻射流体シミュレーションを、観測的には低重元素量銀河・大小マゼラン雲における原始星サーベイ観測を進めた。この研究手法における主な共同研究者は下西隆准教授(新潟大学)，松木場亮喜研究員(筑波大学)である。

４．研究成果
(1)「円盤降着による輻射フィードバック克服」の観測的証拠：超コンパクト電離領域を持つ大質量原始星 G45.47+0.05(約 50 太陽質量)に対する、アルマ望遠鏡と VLA 望遠鏡の高分解能観測を行った(Zhang, Tanaka et al. 2019; 図１左)。その結果、輻射フィードバックにより質量損失は進行しているが、その損失率は Tanaka et al. (2017, 2018)の理論研究が予測した通り十分に低く、質量降着が可能であることがわかった。さらに水素再結合線 H30αデータの解析から、アウトフローの付け根には回転円盤が存在することを突き止めた。また、1.3㎜と 7㎜の連続波データから、円盤回転と垂直な向きにジェットが放出されている可能性を示した。以上より、世界で初めて「円盤降着による輻射フィードバック克服」が実際に起こっている現場を特定したと結論づけた。この成果については、理化学研究所などからプレスリリースが出されている。
他の大質量原始星においても「円盤降着による輻射フィードバック克服」が一般的に起こったいるのかを調査するため、超コンパクト電離領域が付随する大質量原始星１８天体に対するサーベイ観測を現在推進している(HiPPOS 計画; 研究代表者田中)。今後、天体数が増えることで、

円盤降着が可能/不可能な物理条件が明らかになると期待される。

(2)熱くて塩っぱい円盤の発見：大質量原始連星 IRAS16547-4247 に対するアルマ望遠鏡高分解能観測から、ダストが砕かれて飛び出した塩化ナトリウム(食塩の主成分)や、高温に加熱された水蒸気が含まれていることを発見した (Tanaka et al. 2020; 図１右)。塩化ナトリウムは通常、星形成領域では固相に存在するため発見されることは非常に珍しく、これが世界でも２例目となった。塩化ナトリウムやシリコン化合物が気化しているというは、この連星円盤が高温(数百-数千 K)であることが示唆される。塩化ナトリウムなどの難揮発性物質が気相で検出されたことで、大質量原始星を育むガス円盤の熱くダイナミックな環境であることが示唆される。この成果については、国立天文台などからプレスリリースが出されている。

その後、このような「熱くて塩っぱい円盤」がどの程度一般的に存在するのかを調査するため、アルマアーカイブデータから約 20 天体の追解析を進めた。その結果、合計 10 個の「熱い円盤」を検収することに成功し、「熱い円盤」が必ずしも稀な天体ではないことを示した(Ginsburg et al. 2023)。

大質量原始星の「熱い円盤」は、これまで困難であった宇宙空間における難揮発性物質の化学過程、すなわち宇宙鉱物学研究のための最適な実験室となる。46 億年前に太陽系を生んだ原始太陽系円盤でも、ダストが蒸発するような高温を経験したことが隕石に含まれる様々な証拠から知られているため、今後は「熱い円盤」の観測を進めることで、太陽系誕生時の様子を探る示唆も得られるだろう。

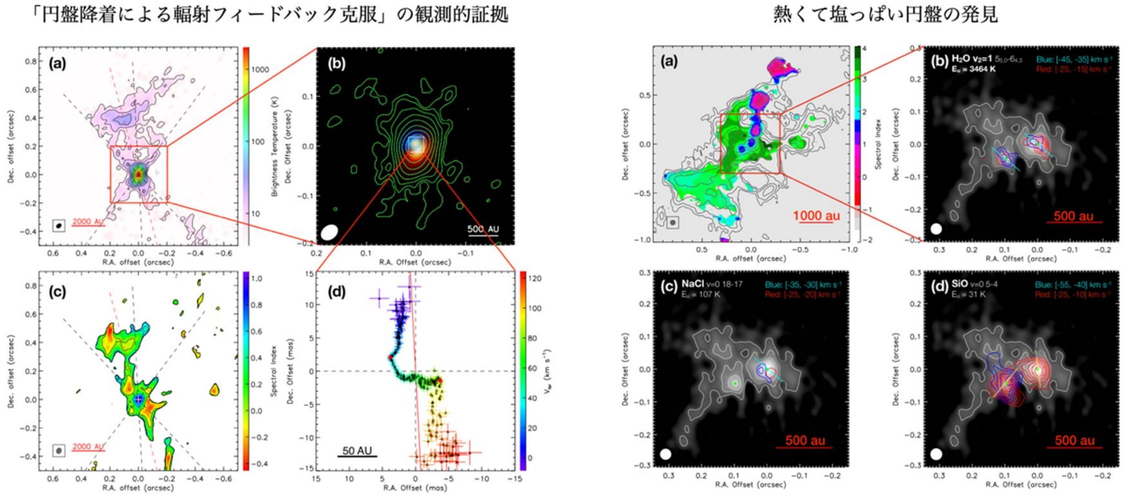

図１．高分解能アルマ観測が捉えた大質量原始星誕生の様子。(左)G45.47+0.05 における「円盤降着による輻射フィードバック克服」の実証。(右) IRAS16547-4247 におけるが砕かれて飛び出した塩化ナトリウムの検出。

(3)磁気駆動円盤風アウトフローのシミュレーション：上記の観測から、かつて考えられていたよりも輻射フィードバックの影響は小さいことが示唆されつつあり、一方、磁場と円盤回転によって駆動される円盤風アウトフローのフィードバックに注目が集まってきた。そこで、磁気流体シミュレーションにより円盤風アウトフローの強度を調べた。その結果、初期分子雲コアにおける 3-6 割程度のガスはアウトフローによって星間空間へ飛ばされるが、残りの 4-7 割のガスは中心の大質量量星へ降着可能であることがわかった (Staff, Tanaka et al. 2023; 図２左)。さらに、このシミュレーションデータをもとに輻射輸送計算を行い、一酸化炭素分子輝線や電波連続波放射に対する観測的特性予測も行った(Xu et al. 2024; Gardiner et al. 2024)。今後は実際の観測データとの詳細比較により、アウトフローモデルのより詳細な検証が進められる。

(4)[理論]岩石ダストの合体成長モデル：円盤特性が明らかになるにつれて、大質量原始星円盤内でのダスト微粒子の合体成長の重要性が理解され始めた。冷たい原始惑星系円盤ではダストは氷に覆われているのに対して、熱い大質量原始星円盤では「岩石ダスト」の合体成長を詳細に調べることができる。これは地球のような岩石惑星の形成過程を理解するうえでも有用なアプローチとなる。

そこで世界初となる、大質量原始星円盤内の岩石ダスト成長モデルを構築した(Yamamuro, Tanaka, & Okuzumi 2023)。その結果、岩石ダストは衝突合体により成長もするが、次第に衝突破壊が優勢となりサイズが制限されることが分かった。実際に大質量原始星円盤 GGD27-MM1 で観測推定されたダストサイズとの比較から、岩石ダストが破壊される臨界速度を約 10m/s と見積もった。この低い臨海速度は、合体成長のみでは岩石惑星形成は困難であることを示唆する。

現在は、この岩石ダスト成長モデルからの円盤観測輝度計算(Tanaka et al., in prep.)および観測輝度データとの直接比較(Yamamuro, Tanaka et al., in prep.)に関する投稿論文の執筆を進めている。

(5)[理論]低重元素円盤の激しい自己重力分裂：初期宇宙のような低重元素環境と、現在の宇宙のような高重元素環境における円盤形成過程の違いを理解するため、輻射流体シミュレーションを行った(Matsukoba, Tanaka et al. 2022; 図２右)。その結果、低重元素量の場合ほど自己重力不安定により円盤分裂が促進され、星団的な星形成モードへと移行することが確認された。これはTanaka et al. (2014)の解析的見積もりが予想したものと整合的な結果であり、星形成過程の多様性を示唆する重要な成果と言える。

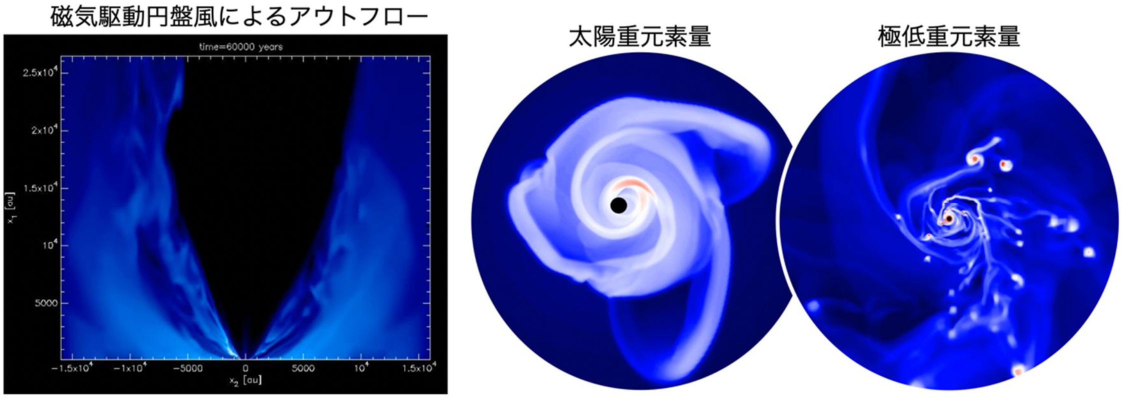

図２. 数値シミュレーションによる大質量原始星誕生の様子。(左)磁気流体シミュレーションによるアウトフローのフィードバック。(右)輻射流体シミュレーションによる様々な重元素量の円盤形成。

(6)[観測]大小マゼラン雲における原始星サーベイ：観測からも低重元素量環境における星形成過程を探るため、近傍矮小銀河・大小マゼラン雲の大質量原始星４０天体に対するアルマ原始星サーベイ計画MAGOSを進めている。初期成果として、小マゼラン雲における原始星アウトフロー初検出(Tokuda et al. 2022)、豊かな分子輝線を放つホットコア初検出(Shimonishi, Tanaka et al. 2023)を報告した。低重元素量環境では有機分子メタノールの存在度が、数桁も変動することが明らかとなり、化学的多様性への重要な示唆が得られた。これらの成果については、九州大学，新潟大学などからプレスリリースが行われた。

現在は、全４０天体に対するアウトフロー強度解析の投稿論文を準備している(Tanaka et al., in prep.)。銀河系と大マゼラン雲ではアウトフロー強度は同程度であるのに対して、重元素量が最も低い小マゼラン雲ではアウトフロー強度が１桁程度弱い可能性が示唆された。これは大質量星形成の物理過程が重元素量に非線形に依存することを示唆している。

<引用文献>

Tanaka, K. E. I., Tan, J. C., & Zhang, Y. 2017, Astrophysical Journal, 835, 32. doi:10.3847/1538-4357/835/1/32

Tanaka, K. E. I., Tan, J. C., Zhang, Y., et al. 2018, Astrophysical Journal, 861, 68. doi:10.3847/1538-4357/aac892

Johnston, K. G., Robitaille, T. P., Beuther, H., et al. 2015, Astrophysical Journal Letters, 813, L19. doi:10.1088/2041-8205/813/1/L19

Girart, J. M., Fernandez-Lopez, M., Li, Z.-Y., et al. 2018, Astrophysical Journal Letters, 856, L27. doi:10.3847/2041-8213/aab76b

Zhang, Y., Tanaka, K. E. I., Rosero, V., et al. 2019, Astrophysical Journal Letters, 886, L4. doi:10.3847/2041-8213/ab5309

Tanaka, K. E. I., Zhang, Y., Hirota, T., et al. 2020, Astrophysical Journal Letters, 900, L2. doi:10.3847/2041-8213/abadfc

Ginsburg, A., McGuire, B. A., Sanhueza, P., et al. (including K. E. I. Tanaka) 2023, Astrophysical Journal, 942, 66. doi:10.3847/1538-4357/ac9f4a

Staff, J. E., Tanaka, K. E. I., Ramsey, J. P., et al. 2023, Astrophysical Journal, 947, 40. doi:10.3847/1538-4357/acbd47

Xu, D., Tan, J. C., Staff, J. E., et al. (including K. E. I. Tanaka) 2024, Astrophysical

Journal, 966, 117. doi:10.3847/1538-4357/ad3211
Gardiner, E. C., Tan, J. C., Staff, J. E., et al. (including K. E. I. Tanaka) 2024, Astrophysical Journal, 967, 145. doi:10.3847/1538-4357/ad39e1
Yamamuro, R., Tanaka, K. E. I., & Okuzumi, S. 2023, Astrophysical Journal, 949, 29. doi:10.3847/1538-4357/acc52f
Matsukoba, R., Tanaka, K. E. I., Omukai, K., et al. 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515, 5506. doi:10.1093/mnras/stac2161
Tanaka, K. E. I. & Omukai, K. 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439, 1884. doi:10.1093/mnras/stu069
Tokuda, K., Harada, N., Tanaka, K. E. I., et al. 2023, Astrophysical Journal, 955, 52. doi:10.3847/1538-4357/acefb7
Shimonishi, T., Tanaka, K. E. I., Zhang, Y., et al. 2023, Astrophysical Journal Letters, 946, L41. doi:10.3847/2041-8213/acc031

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計28件（うち査読付論文　28件／うち国際共著　25件／うちオープンアクセス　27件）

1．著者名 Taniguchi Kotomi、Tanaka Kei E. I.、Zhang Yichen、Fedriani Ruben、Tan Jonathan C.、Takakuwa Shigehisa、Nakamura Fumitaka、Saito Masao、Majumdar Liton、Herbst Eric	4．巻 931
2．論文標題 Vibrationally Excited Lines of HC3N Associated with the Molecular Disk around the G24.78+0.08 A1 Hypercompact H ii Region	5．発行年 2022年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 99～99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac69d1	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 Tokuda Kazuki et al.	4．巻 933
2．論文標題 An ALMA Study of the Massive Molecular Clump N159W-North in the Large Magellanic Cloud: A Possible Gas Flow Penetrating One of the Most Massive Protocluster Systems in the Local Group	5．発行年 2022年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 20～20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac6b3c	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 Zhang Yichen、Tanaka Kei E. I.、Tan Jonathan C.、Yang Yao-Lun、Greco Eva、Beltran Maria T.、Sakai Nami、De Buizer James M.、Rosero Viviana、Fedriani Ruben、Garay Guido	4．巻 936
2．論文標題 Massive Protostars in a Protocluster - A Multi-scale ALMA View of G35.20-0.74N	5．発行年 2022年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 68～68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac847f	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 Tokuda Kazuki、Zahorecz Sarolta、Kunitoshi Yuri、Higashino Kosuke、Tanaka Kei E. I.、Konishi Ayu、Suzuki Taisei、Kitano Naoya、Harada Naoto、Shimonishi Takashi、Neelamkodan Naslim、Fukui Yasuo、Kawamura Akiko、Onishi Toshikazu、Machida Masahiro N.	4．巻 936
2．論文標題 The First Detection of a Protostellar CO Outflow in the Small Magellanic Cloud with ALMA	5．発行年 2022年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6．最初と最後の頁 L6～L6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ac81c1	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 Matsukoba Ryoki、Tanaka Kei E I、Omukai Kazuyuki、Vorobyov Eduard I、Hosokawa Takashi	４．巻 515
２．論文標題 Protostellar-disc fragmentation across all metallicities	５．発行年 2022年
３．雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	６．最初と最後の頁 5506～5522
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stac2161	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 Law Chi-Yan、Tan Jonathan C.、Gorai Prasanta、Zhang Yichen、Fedriani Ruben、Tafoya Daniel、Tanaka Kei E. I.、Cosentino Giuliana、Yang Yao-Lun、Mardones Diego、Beltran Maria T.、Garay Guido	４．巻 939
２．論文標題 Isolated Massive Star Formation in G28.20-0.05	５．発行年 2022年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 120～120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac90c7	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 Fedriani Ruben、Tan Jonathan C.、Telkamp Zoie、Zhang Yichen、Yang Yao-Lun、Liu Mengyao、De Buizer James M.、Law Chi-Yan、Beltran Maria T.、Rosero Viviana、Tanaka Kei E. I.、Cosentino Giuliana、Gorai Prasanta、Farias Juan、Staff Jan E.、Whitney Barbara	４．巻 942
２．論文標題 The SOFIA Massive (SOMA) Star Formation Survey. IV. Isolated Protostars	５．発行年 2022年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 7～7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aca4cf	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 Ginsburg Adam、McGuire Brett A.、Sanhueza Patricio、Olguin Fernando、Maud Luke T.、Tanaka Kei E. I.、Zhang Yichen、Beuther Henrik、Indriolo Nick	４．巻 942
２．論文標題 Salt-bearing Disk Candidates around High-mass Young Stellar Objects	５．発行年 2023年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 66～66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac9f4a	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 Shimonishi Takashi、Tanaka Kei E. I.、Zhang Yichen、Furuya Kenji	４．巻 946
２．論文標題 The Detection of Hot Molecular Cores in the Small Magellanic Cloud	５．発行年 2023年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	６．最初と最後の頁 L41～L41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/acc031	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 Staff Jan E.、Tanaka Kei E. I.、Ramsey Jon P.、Zhang Yichen、Tan Jonathan C.	４．巻 947
２．論文標題 Disk Wind Feedback from High-mass Protostars. II. The Evolutionary Sequence	５．発行年 2023年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 40～40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acbd47	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 Yamamuro Ryota、Tanaka Kei E. I.、Okuzumi Satoshi	４．巻 949
２．論文標題 Massive Protostellar Disks as a Hot Laboratory of Silicate Grain Evolution	５．発行年 2023年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 29～29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acc52f	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 Bally John、Chia Zen、Ginsburg Adam、Reipurth Bo、Tanaka Kei E. I、Zinnecker Hans、Faulhaber John	４．巻 924
２．論文標題 Supersonic Expansion of the Bipolar H ii Region Sh2-106: A 3500 Year Old Explosion?	５．発行年 2022年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 50～50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac30de	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 Marchand Pierre、Tomida Kengo、Tanaka Kei E. I.、Commercon Benoit、Chabrier Gilles	4．巻 900
2．論文標題 Protostellar Collapse: Regulation of the Angular Momentum and Onset of an Ionic Precursor	5．発行年 2020年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 180～180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abad99	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 Tanaka Kei E. I.、Zhang Yichen、Hirota Tomoya、Sakai Nami、Motogi Kazuhito、Tomida Kengo、Tan Jonathan C.、Rosero Viviana、Higuchi Aya E.、Ohashi Satoshi、Liu Mengyao、Sugiyama Koichiro	4．巻 900
2．論文標題 Salt, Hot Water, and Silicon Compounds Tracing Massive Twin Disks	5．発行年 2020年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6．最初と最後の頁 L2～L2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/abadfc	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 Liu Mengyao、Tan Jonathan C.、De Buizer James M.、Zhang Yichen、Moser Emily、Beltran Maria T.、Staff Jan E.、Tanaka Kei E. I.、Whitney Barbara、Rosero Viviana、Yang Yao-Lun、Fedriani Rubin	4．巻 904
2．論文標題 The SOFIA Massive (SOMA) Star Formation Survey. III. From Intermediate- to High-mass Protostars	5．発行年 2020年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 75～75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abbefb	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 Kobayashi Masato I. N.、Inoue Tsuyoshi、Inutsuka Shu-ichiro、Tomida Kengo、Iwasaki Kazunari、Tanaka Kei E. I.	4．巻 905
2．論文標題 Bimodal Behavior and Convergence Requirement in Macroscopic Properties of the Multiphase Interstellar Medium Formed by Atomic Converging Flows	5．発行年 2020年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 95～95
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abc5be	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 Bisbas Thomas G、Tan Jonathan C、Tanaka Kei E I	4．巻 502
2．論文標題 Photodissociation region diagnostics across galactic environments	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6．最初と最後の頁 2701～2732
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stab121	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 Staff Jan E.、Tanaka Kei E. I.、Tan Jonathan C.	4．巻 882
2．論文標題 Disk Wind Feedback from High-mass Protostars	5．発行年 2019年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 123～123
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab36b3	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 Zhang Yichen、Tanaka Kei E. I.、Rosero Viviana、Tan Jonathan C.、Marvil Joshua、Cheng Yu、Liu Mengyao、Beltran Maria T.、Garay Guido	4．巻 886
2．論文標題 Discovery of a Photoionized Bipolar Outflow toward the Massive Protostar G45.47+0.05	5．発行年 2019年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 L4～L4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ab5309	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 Shimonishi Takashi、Das Ankan、Sakai Nami、Tanaka Kei E. I.、Aikawa Yuri、Onaka Takashi、Watanabe Yoshimasa、Nishimura Yuri	4．巻 891
2．論文標題 Chemistry and Physics of a Low-metallicity Hot Core in the Large Magellanic Cloud	5．発行年 2020年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 164～164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab6e6b	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 Tokuda Kazuki、Harada Naoto、Tanaka Kei E. I.、Inoue Tsuyoshi、Shimonishi Takashi、Zhang Yichen、Sewilo Marta、Kunitoshi Yuri、Konishi Ayu、Fukui Yasuo、Kawamura Akiko、Onishi Toshikazu、Machida Masahiro N.	4．巻 955
2．論文標題 An ALMA Glimpse of Dense Molecular Filaments Associated with High-mass Protostellar Systems in the Large Magellanic Cloud	5．発行年 2023年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 52～52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acefb7	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 Bhat Bratati、Kar Rumela、Mondal Suman Kumar、Ghosh Rana、Gorai Prasanta、Shimonishi Takashi、Tanaka Kei E. I.、Furuya Kenji、Das Ankan	4．巻 958
2．論文標題 Chemical Evolution of Some Selected Complex Organic Molecules in Low-mass Star-forming Regions	5．発行年 2023年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 111～111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acfc4d	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 Sewilo Marta、Tokuda Kazuki、Kurtz Stan E.、Charnley Steven B.、Moller Thomas、Wiseman Jennifer、Chen C.-H. Rosie、Indebetouw Remy、Sanchez-Monge Alvaro、Tanaka Kei E. I.、Schilke Peter、Onishi Toshikazu、Harada Naoto	4．巻 959
2．論文標題 The Detection of Higher-order Millimeter Hydrogen Recombination Lines in the Large Magellanic Cloud	5．発行年 2023年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 22～22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acf5ed	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 Gorai Prasanta、Law Chi-Yan、Tan Jonathan C.、Zhang Yichen、Fedriani Ruben、Tanaka Kei E. I.、Bonfand Melisse、Cosentino Giuliana、Mardones Diego、Beltran Maria T.、Garay Guido	4．巻 960
2．論文標題 Astrochemical Diagnostics of the Isolated Massive Protostar G28.20-0.05	5．発行年 2024年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 127～127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ad09bb	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 Inoguchi Mutsuko、Hosokawa Takashi、Fukushima Hajime、Tanaka Kei E I、Yajima Hidenobu、Mineshige Shin	4．巻 527
2．論文標題 Observational signatures of forming young massive clusters: continuum emission from dense Hii regions	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 3612～3623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stad3297	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 Crowe S.、Fedriani R.、Tan J. C.、Whittle M.、Zhang Y.、Caratti o Garatti A.、Farias J. P.、Gautam A.、Telkamp Z.、Rothberg B.、Grudic M.、Andersen M.、Cosentino G.、Garcia-Lopez R.、Rosero V.、Tanaka K., et al.	4．巻 682
2．論文標題 Near-infrared observations of outflows and young stellar objects in the massive star-forming region AFGL 5180	5．発行年 2024年
3．雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6．最初と最後の頁 A2～A2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202348094	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 Xu Duo、Tan Jonathan C.、Staff Jan E.、Ramsey Jon P.、Zhang Yichen、Tanaka Kei E. I.	4．巻 966
2．論文標題 Disk Wind Feedback from High-mass Protostars. III. Synthetic CO Line Emission	5．発行年 2024年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 117～117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ad3211	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 Gardiner Emiko C.、Tan Jonathan C.、Staff Jan E.、Ramsey Jon P.、Zhang Yichen、Tanaka Kei E. I.	4．巻 967
2．論文標題 Disk Wind Feedback from High-mass Protostars. IV. Shock-ionized Jets	5．発行年 2024年
3．雑誌名 The Astrophysical Journal	6．最初と最後の頁 145～145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ad39e1	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39件（うち招待講演　11件／うち国際学会　19件）

1．発表者名
Kei E. I. Tanaka et al.

2．発表標題
Massive Star Formation: Now & Then

3．学会等名
A half century of mm/submm astronomy（国際学会）

4．発表年
2022年

1．発表者名
Kei E. I. Tanaka et al.

2．発表標題
Massive Protostellar Disks as a Hot Laboratory

3．学会等名
DIG (Dust, Ice, and Gas) Astrochemistry（招待講演）（国際学会）

4．発表年
2022年

1．発表者名
Kei E. I. Tanaka et al

2．発表標題
Massive Star Formation in Different Environments

3．学会等名
Star Formation in Different Environments 2022（招待講演）（国際学会）

4．発表年
2022年

1．発表者名
Kei E. I. Tanaka

2．発表標題
The Hot and Dynamic Birth of Massive Stars

3．学会等名
the 44th COSPAR Scientific Assembly（招待講演）（国際学会）

4．発表年
2022年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka

２．発表標題
Massive Star Formation at Various Metallicities

３．学会等名
From Stars to Galaxies II（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka, Yichen Zhang, Kazuhito Motogi

２．発表標題
The Hot and Dynamic Birth of Massive Stars from the ngVLA Perspective

３．学会等名
Computational Astrophysics in the ngVLA Era（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
田中圭

２．発表標題
大小マゼラン雲における原始星アウトフロー観測

３．学会等名
近傍宇宙の観測的研究で探る星間物質ライフサイクル（招待講演）

４．発表年
2023年

１．発表者名
田中圭

２．発表標題
Hot Disks in Massive Star Formation

３．学会等名
惑星形成討論会2023春

４．発表年
2023年

１．発表者名 田中圭，Yichen Zhang，下西隆，富田賢吾，Jonathan C. Tan，野村英子，John Bally
２．発表標題 MAGellanic Outflow and chemistry Survey (MAGOS) II: 大小マゼラン雲原始 星アウトフローの物理特性
３．学会等名 日本天文学会2023年春季年会
４．発表年 2023年

１．発表者名 Kei Tanaka
２．発表標題 The hot and dynamical birth of massive stars
３．学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム（招待講演）
４．発表年 2023年

１．発表者名 Kei E. I. Tanaka et al.
２．発表標題 Metallicity Dependences of Massive Star Formation from Theoretical and Observational Perspectives
３．学会等名 IAU Symposium 361: Massive Stars Near and Far（国際学会）
４．発表年 2022年

１．発表者名 田中圭
２．発表標題 熱くて塩っぱい大質量原始星円盤:星形成観測から隕石学への架け橋?
３．学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022（招待講演）
４．発表年 2021年

１．発表者名
田中圭，Yichen Zhang，下西隆

２．発表標題
アルマ望遠鏡で探る低金属量星形成のダイナミクス

３．学会等名
新学術領域「星惑星形成」後半戦キックオフミーティング

４．発表年
2021年

１．発表者名
田中圭

２．発表標題
Accretion and Feedback in Massive Star Formation

３．学会等名
様々なスケールの衝突流による誘発的星形成（招待講演）

４．発表年
2021年

１．発表者名
田中圭

２．発表標題
Feedback in Massive Star Formation at Low Metallicities

３．学会等名
The metal-poor Universe 2021

４．発表年
2021年

１．発表者名
田中圭

２．発表標題
The Hot and Dynamic Birth of Massive Stars

３．学会等名
Linking the science of large interferometers in the 2030s（招待講演）

４．発表年
2021年

1．発表者名 田中圭
2．発表標題 低金属量環境での大質量星形成
3．学会等名 低金属量環境下における星・惑星形成
4．発表年 2021年

1．発表者名 Kei E. I. Tanaka, Yichen Zhang, Takashi Shimonishi, Kengo Tomida, Jonathan C. Tan, Hideko Nomura, John Bally
2．発表標題 MAGellanic Outflow and chemistry Survey (MAGOS): Exploring the Universality/Diversity of Star Formation at Various Metallicities
3．学会等名 Origins Workshop - ISM, Star and Cluster Formation（国際学会）
4．発表年 2022年

1．発表者名 田中圭，Yichen Zhang，下西隆
2．発表標題 ALMAで探る低金属量大質量星形成
3．学会等名 初代星・初代銀河研究会2021
4．発表年 2022年

1．発表者名 Kei E. I. Tanaka, Yichen Zhang, Takashi Shimonishi, Kengo Tomida, Jonathan C. Tan, Hideko Nomura, John Bally
2．発表標題 MAGellanic Outflow and chemistry Survey (MAGOS): the Power of LMC Protostellar Outflows
3．学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4．発表年 2022年

１．発表者名
田中圭

２．発表標題
多様な金属量環境における大質量星形成

３．学会等名
新学術領域「星・惑星形成」2021年度大研究会プログラム

４．発表年
2022年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka

２．発表標題
Hot Salty Disks around Massive Protostars

３．学会等名
East-Asian ALMA Science Workshop 2021（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka, Yichen Zhang, Tomoya Hirota, Nami Sakai, Kazuhito Motogi, Kengo Tomida, Jonathan C. Tan, Viviana Rosero, Aya E. Higuchi, Satoshi Ohashi, Mengyao Liu, & Koichiro Sugiyama

２．発表標題
Salty Twin Disks in IRAS 16547-4247

３．学会等名
The 237th AAS Meeting（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
田中圭，Yichen Zhang，元木業人，坂井南美，Jonathan C. Tan，Viviana Rosero

２．発表標題
ngVLAで観る大質量形成：近接連星と熱い円盤

３．学会等名
天文学会2021年春季年会

４．発表年
2021年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka

２．発表標題
Salt, Hot Water, and Silicon Compounds Tracing Massive Twin Disks

３．学会等名
ALMA Grant Fellow Symposium 2020

４．発表年
2020年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka, Kazunari Iwasaki, Kengo Tomida

２．発表標題
Synthetic Observations of Molecular Cloud Formation

３．学会等名
From Stars to Planets II, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
田中圭，岩崎一成，富田賢吾

２．発表標題
分子雲形成シミュレーションの模擬観測

３．学会等名
日本天文学会2019年秋季年会，熊本大学，熊本県

４．発表年
2019年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka

２．発表標題
Free-free Outflows and Synchrotron Jets in Massive Star Formation

３．学会等名
next generation VLA workshop，国立天文台，東京都

４．発表年
2019年

１．発表者名 Kei E. I. Tanaka, Kengo Tomida
２．発表標題 ALMA View of Massive Star Formation
３．学会等名 the ALMA Grant Symposium，国立天文台，東京都
４．発表年 2019年

１．発表者名 Kei E. I. Tanaka
２．発表標題 Dynamics of Low-Metallicity Star Formation
３．学会等名 Molecular gas observations toward the Local Group and the outer Milky Way，名古屋大学，愛知県
４．発表年 2020年

１．発表者名 Kei E. I. Tanaka
２．発表標題 Feedback in Very-Massive Star Formation
３．学会等名 大質量星形成ワークショップ，山口県
４．発表年 2020年

１．発表者名 Kei E. I. Tanaka
２．発表標題 Feedback in Massive Star Formation
３．学会等名 East-Asian ALMA Science Workshop 2019, ASIAA, Taipei, Taiwan（国際学会）
４．発表年 2020年

1．発表者名 Kei E. I. Tanaka
2．発表標題 Massive Star Formation
3．学会等名 The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars, Waseda University, Tokyo, Japan（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Kei E. I. Tanaka
2．発表標題 Metallicity Dependence of Massive Star Formation
3．学会等名 First Stars VI, Universidad de Concepcion, Concepcion, Chile（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Kei E. I. Tanaka
2．発表標題 Analytic Modeling of Multiple Feedback
3．学会等名 Modeling High-Mass Stellar Feedback, University of Tubingen, Tubingen, Germany（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Kei E. I. Tanaka et al.
2．発表標題 The Power of Outflows in Low-metallicity Star Formation
3．学会等名 Protostars and Planets VII（国際学会）
4．発表年 2023年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka et al.

２．発表標題
MAgellanic Outflow and chemistry Survey (MAGOS): The Power of Molecular Outflows in Low-metallicity Star Formation

３．学会等名
The Olympian Symposium 2023（国際学会）

４．発表年
2023年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka et al.

２．発表標題
The Power of Molecular Outflows in Low-metallicity Star Formation

３．学会等名
ALMA at 10 years: Past, Present, and Future（国際学会）

４．発表年
2023年

１．発表者名
Kei E. I. Tanaka et al.

２．発表標題
The Spicy Genesis of Massive Stars

３．学会等名
Simulating Physics in Celestial Ecosystems (SPiCE)（国際学会）

４．発表年
2024年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Massive protostar keeps growing despite ionization heating by ultraviolet light
https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20200228_1/index.html
塩と熱い水蒸気に包まれる巨大赤ちゃん星のペア
https://alma-telescope.jp/news/press/salt-202009
Featured Image: Explosive Star Formation
https://aasnova.org/2022/01/24/featured-image-explosive-star-formation/
小マゼラン雲にホットコアを初検出 - 遥か昔の宇宙における物質の化学進化に迫る -
https://www.niigata-u.ac.jp/news/2023/405599/
19 万光年かなたの小マゼラン雲から星の産声をキャッチ！
https://alma-telescope.jp/news/smc-202208?doing_wp_cron=1718899885.8953928947448730468750

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			
米国	コロラド大学ボルダー校	バージニア大学	アメリカ国立電波天文台	他1機関
スウェーデン	チャルマース工科大学			
中国	Zhejiang Laboratory	上海交通大学		
オーストリア	ウィーン大学			
ドイツ	ケルン大学			