慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	銀河系中心領域での局所的な爆発的星形成現象
Sub Title	Local burst-like star formation in galactic central region
Author	田中, 邦彦(Tanaka, Kunihiko)
Publisher	
Publication year	2019
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2018.)
JaLC DOI	
Abstract	銀河系中心部で見られる局所的な激しい星形成活動の起源を探ることを目的とし(1)衝突分子雲中での誘発的星形成 (2)中心核近傍領域への質量供給過程の観測的研究をALMA望遠鏡を用いて行った。高速度分子雲CO-0.4が分子雲衝突の現場であることを高い確度で明らかにし、衝突によって星形成可能な高密度構造が形成される現場を捉えることに成功した。これまで十分調べられていなかった中心核近傍の低密度ガスの分布と運動の解析を行い、比較的最近の大規模な質量供給イベントの痕跡を見出した。また階層的パラメータ推定を用いた多輝線励起計算による分子雲の物理・化学状態推定法を実用化した。 Origin of the local burst-like star formation activity in the Galactic central region was investigated via observational case studies of candidate sites of collision-triggered star-forming regions and the molecular gas feeding to the circumnuclear region. High-sensitivity and high-resolution observations with ALMA identified shock-compressed layer created by cloud-cloud collision in the cloud CO-0.4, which harbors dense-gas peaks that may qualify the density threshold for star-formation in the highly-turbulent environment in the Galactic center. Detailed analysis of distribution and kinematics of low-density gas component in the cirnumnuclear disk was conducted, which showed signatures of a large-scale mass-feeding event in recent past. A new method of multi-transition excitation analysis employing a hierarchical parameter inference framework was developed and used in the above studies.
Notes	研究種目：若手研究(B) 研究期間：2016～2018 課題番号：16K17666 研究分野：天文学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16K17666seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ６ 月 １０ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ１７６６６

研究課題名（和文）銀河系中心領域での局所的な爆発的星形成現象

研究課題名（英文）Local Burst-like Star Formation in Galactic Central Region

研究代表者
田中　邦彦（Tanaka, Kunihiko）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・助教

研究者番号：００５３４５６２

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）：銀河系中心部で見られる局所的な激しい星形成活動の起源を探ることを目的とし(1)衝突分子雲中での誘発的星形成 (2)中心核近傍領域への質量供給過程の観測的研究をALMA望遠鏡を用いて行った。高速度分子雲CO-0.4が分子雲衝突の現場であることを高い確度で明らかにし、衝突によって星形成可能な高密度構造が形成される現場を捉えることに成功した。これまで十分調べられていなかった中心核近傍の低密度ガスの分布と運動の解析を行い、比較的最近の大規模な質量供給イベントの痕跡を見出した。また階層的パラメータ推定を用いた多輝線励起計算による分子雲の物理・化学状態推定法を実用化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
星形成の多様な様態を理解することは観測天文学の主要な課題の一つであり、銀河系中心部のような極限環境下での星形成活動は特に近年注目されている。最新鋭のALMA望遠鏡の登場によって超高精度の天体画像を取得することができるようになっている現在、これまで考えられなかった豊富なデータが遠方の銀河についても続々と得られている。その最も身近な特異領域である銀河系の中心での現象をよく理解することは、そうしたより幅広いレンジでの宇宙の現象の直接の比較対象としても重要である。

研究成果の概要（英文）：Origin of the local burst-like star formation activity in the Galactic central region was investigated via observational case studies of candidate sites of collision-triggered star-forming regions and the molecular gas feeding to the circumnuclear region. High-sensitivity and high-resolution observations with ALMA identified shock-compressed layer created by cloud-cloud collision in the cloud CO-0.4, which harbors dense-gas peaks that may qualify the density threshold for star-formation in the highly-turbulent environment in the Galactic center. Detailed analysis of distribution and kinematics of low-density gas component in the cirnumnuclear disk was conducted, which showed signatures of a large-scale mass-feeding event in recent past. A new method of multi-transition excitation analysis employing a hierarchical parameter inference framework was developed and used in the above studies.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学　星形成

1. 研究開始当初の背景

星間ガスから恒星や星団が誕生する過程は宇宙の物質循環の主要な過程のひとつであり、銀河の形成・進化や、惑星をともなう恒星系形成にもつながる基本的な研究課題である。これまでの研究により、星形成の様態は幅広い環境にわたっておおむね一様であり、星形成率(誕生する恒星の質量/年)は母体となる高密度星間ガスの質量によってほぼ決まることが知られているが、その原因は明らかではない。そうした通常の星間空間の環境から大きく外れた極限環境下での星形成を研究ことで、星形成領域の諸々のパラメータ(密度・面密度・温度・乱流強度・宇宙線強度など)が星形成率に与える影響を調査するとともに、大多数の環境で星形成効率が一様となる原因をさぐることができる。

銀河系の中心領域はそうした極限環境下の特異領域として注目されている。銀河系中心には銀河系全体の数%にもなる巨大な量の高密度分子ガスが集中しているにもかかわらず、星形成率は目立った上昇を示さない。その一方で局所的には銀河円盤部では稀な若い大質量星団が頻繁に形成されており、特に銀河系中心核の超巨大ブラックホール近傍の最も星形成が困難なはずの領域に若い大質量星が密集している。本研究では、こうした銀河系中心領域の個々の高密度分子雲のケーススタディを通じて、銀河円盤部での標準的な環境や銀河系外の爆発的星形成領域と異なる星形成の様態を見出すことを目的としていた。

２．研究の目的

本研究では、特に以下二つの特異星形成領域/候補領域のケーススタディを中心に行った。

(1) 分子雲衝突による誘発的星形成候補領

分子雲相互の衝突は、短時間に分子ガスを高密度に圧縮し星形成を促進する機構として有望な仮説であり、特に銀河系中心のような過密領域で局所的な爆発的星形成を誘引するのに都合が良い。銀河系中心では過去の研究から複数の分子雲衝突領域候補天体が知られており、そのいくつかには高密度フィラメント/コア状の星形成の兆候とも考えられる構造が検出されていた。**ALMA** 望遠鏡を用いた観測によってより確実な分子雲衝突起源の構造を同定し、誘発星形成の兆候を捉えることを目的とした。

(2) 中心核近傍 1 pc 領域での星形成

中心核近傍の特異な星形成の解明のためには、同領域の分子ガスの正確な調査が必要である。銀河半径 **2 pc** の中心核周円盤 **(Circumnuclear Disk; CND)** の内部は長い間高密度分子ガスが欠乏していると考えられてきたが、従来の望遠鏡とは桁違いの感度を持つ **ALMA** 望遠鏡を用いた観測で、近年になってこの **Central Cavity** 内部に初めて分子雲が 検出された。本研究では、その **ALMA** 望遠鏡を用い、**CND** とその内部の分子ガスのマップを作成する。特に中性炭素原子 **[CI]** 輝線の観測によって、従来の観測では見逃されてきた 'CO-dark' な分子雲を含めた完全な分子ガスの質量分布を明らかにすることを目的とした。

３．研究の方法

ALMA 望遠鏡を用いて (1)波長 1㎜ 及び 870μm 帯での複数分子輝線の高分解能観測による、分子雲衝突候補領域(CO-0.3, CO-0.4 分子雲)の密度構造形成の観測、(2)600 μm 帯中性炭素原子[CI]輝線観測による、CO-dark 分子雲を含む中心核近傍のガス分布の完全マッピングを行った。(1)については当初の研究計画では CO-0.3 分子雲を主なターゲットとする予定であったが、もう一方のターゲット候補であった CO-0.4 分子雲の方がデータの取得状況が良かったために、後者を中心とした解析に移行した。

また、上記の中心課題の補助として、過去の取得済みデータを用いた銀河系中心領域全体の星形成環境の調査を平行して行った。これは、複数輝線の励起解析による分子ガス密度分布図の作成、高密度分子雲塊の同定、そして個々の分子雲塊の星形成率に最も影響する物理量の統計的な推定を含む。励起解析には階層的ベイズモデルを用いた手法を新規開発・改良して用いた。

研究は基本的に申請者単独で行った。

４．研究成果

(1) 分子雲 CO-0.4 における分子雲衝突起源の密度構造の同定、および分子雲コア候補天体の発見

分子雲 CO-0.4 はサイズ数 pc の分子雲小塊としては異常に高速の約 100 ㎞/s の速度幅を持つ特異天体であり、そのエネルギー源は未同定であった。ALMA を用いた CO-0.4 分子雲の観測を遂行し、1-㎜ 帯 CO 同位体輝線、及びその周辺の周波数帯の約 40 分子輝線のマッピングを完了した。またこの新規観測データとともに、アーカイブから取得した過去の Cycle-1 データを用いた密度構造解析を行い、同分子雲の高密度ガスの空間-速度構造を次の二つの作業仮説を検証した: すなわち、従来仮説: 10^5 太陽質量の中間質量ブラックホールとの重力相互作用による散乱、および対抗仮説: 高速の分子雲衝突による衝撃波、の二説である。

水素分子堆積密度 $10^{5\text{-}6}$ ㎝-3 以上の高密度領域をトレースする HCN J=3-2 の回転遷移輝線の空間-速度三次元分布から、dendrogram 法等を用いて主要な構造を抽出した。従来の低分解能データに基づくブラックホール相互作用モデルは、潮汐力によって引き伸ばされた分子ガスのストリームを分子雲の基本構造と考えていたが、ALMA の高感度・高分解能イメージでは予言されたストリームに対応する構造は見出されなかった。先行研究で報告されていた中間質量ブラッ

クホールからのシンクロトロン放射とされる点状天体、およびその近傍で潮汐散乱された分子ガス雲とされる高速度分子輝線は、いずれも同一データの再解析では確認されず、ドップラー効果補正と分解能補正のミスによる誤検出と結論された。

分子雲の基本的な三次元(空間二次元+速度一次元)構造は、視線方向に約 40km/s 離れた二つの独立な低密度分子雲、および両者を繋ぐ速度帯に広がる高密度かつ広速度幅成分に分離された。特に前者の二速度成分は明瞭な直線状の境界面で接しており(図 1)、速度差を持つ二つの物体の癒合、すなわち衝突を強く示唆する。また後者の広速度放射の主要な成分は分子雲の中心を通るフィラメントに沿って空間-速度図上で V 字型の構造に伴うものである。これは分子雲衝突のシミュレーション結果に現れる衝突境界面の速度構造の特徴によく一致する一方、点状重力源による散乱モデルを否定するものである。

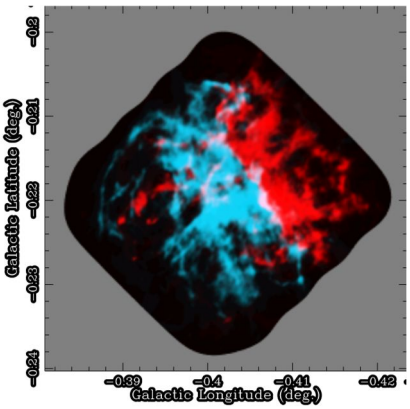


図 1 : CO–0.4 分子雲の ALMA 画像。–40km/s 成分と–80km/s 成分をそれぞれ赤・シアンで表している。両者の重なり領域(白)は僅かでありながら、分子雲全体をほぼ等分している。

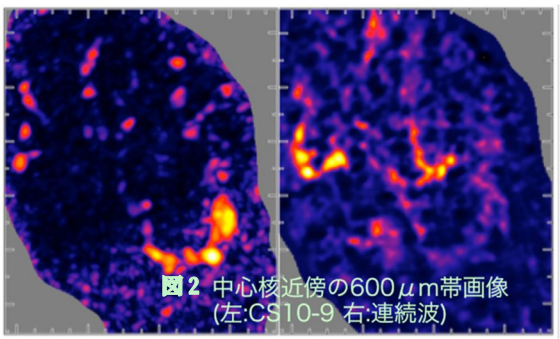
また、メタノールやフォルムアルデヒドなどの大型有機分子輝線や DCN などの重水素分子輝線などでは衝突界面付近のフィラメント構造上に明るいコンパクト放射が複数見出された。励起計算によると、検出された輝線強度を再現するためには温度数 100 K、密度 10^7 cm^{-3} という物理状態が必要となる。特にこの密度の値は銀河系中心での星形成コア形成の閾値と同等である。また重水素分子ピークの中には十分速度幅が狭く(=乱流圧が弱く) virial 比(virial 平衡質量と質量の比;約 2 以下が自己重力束縛の条件とされる)の推定値が 1-10 程度のものが存在する。また階層推定法に基づく堆積密度の確率密度分布測定からは、これらの高密度ピークの出現頻度が、ランダムな乱流圧縮によって確率的に現れる値を有意に超えている可能性が示される。今後入力データを増やした解析により精査が必要ではあるが、現時点では自己重力束縛構造の形成と考えても矛盾はない。

以上を総合すると、分子雲 CO-0.4 にはブラックホール等との潮汐相互作用の痕跡は存在せず、代わりに分子雲衝突を示す複数の証拠が見出された。また直接の星形成現象は確認されないものの、星形成コアであるのに十分な高密度のコンパクト構造が衝突界面付近に形成されていることも確認された。これは衝突誘発星形成の初期段階として解釈可能である。

一方で、銀河系中心全体の星形成率決定パラメータの探査からは、衝突誘発星形成による影響を統計的手法で見出すことはできなかった。個々の分子雲の星形成の有無はほぼ Virial 比と水素分子密度によってのみ決まっており、衝突の介在を示唆するパラメータ(速度幅の広がり等)に対する依存性は存在しないか、むしろネガティブな影響を与えているとするという結果となった。これが分子雲の頻繁な衝突は全体的には星形成を抑制する方向に働いていることを示すのか、あるいは分子雲の進化段階の差異によるものなのか(衝突衝撃波の散逸後を観測している等)等の検討は今後の課題として残された。以上の結果の主要部は Astrophysical Journal にて査読論文として発表した。

(2)中心核近傍領域の 600μm 帯 ALMA 観測

ALMA 望遠鏡を用いた波長 600μm(Band-8)帯で 288 視野モザイク観測によって、中心核円盤(CND)全面を含む中心核近傍領域の中性炭素原子[CI] 1-0 輝線、CS 10-9 輝線のマッピングを完了した(図 2)。二つの輝線は化学的・物理的に両極にある分子ガスをトレースし、前者は低密度(数 10^2 cm^{-3})で紫外線/宇宙線による解離作用が強い領域を、後者は高密度(数 10^7 cm^{-3})領域の分布をよく反映する。



両者の分布共に、中心核最近傍の Central Cavity 内の分子ガス質量は従来の知見を上回るものではないことを示しており、CO-dark ガスの質量はすくなくとも中心核近傍の最近の星形成に有意に寄与するものではない可能性が高い。また CND リング中には CS 10-9 の小塊が数個確認されたが、乱流圧や中心核の潮汐力に抗って自己重力束縛系を形成するだけの高密度である証拠は得られなかった。

一方、[CI]輝線で捉えられる CND の外縁部は最内部の高密度ガスリングの幅(約 1 秒角)を大きく超えて投影半径 1 分角以上まで広がっており、CND 全体が円盤状の形状をしていることが示された。主要な結果は①外縁部の低密度ガスは強い動径速度成分をもつ②円盤中の密度分布は非一様であり、高密度ガスが南西部に、低密度ガスが北部の外縁に集中して集中している③最外縁部には回転速度場に属しながら潮汐変形を受けていない球状のガス塊が散在している、とまとめられる。すなわち CND は安定した回転円盤ではなく、質量のかなりの割合が最近(＜数 10^5 年程度)に外部から流入したガスによって構成されていることを示唆している。したがって観測された CND 内の分子ガスが中心核近傍の現在の若い星の直接の形成母体である可能性は低いが、

過去に起きた同様の質量供給イベントが星形成の原料を供給したという描像は想定されうる。

(3) 階層的ベイズモデルを用いた励起計算手法の改良

従来の最尤推定法などに代わる新しい物理状態パラメータ推定法として、階層ベイズモデルを用いた手法を開発し、幅広い入力輝線やパラメータレンジに適用可能な改良を施した上で欧文誌 Astrophysical Journal Supplement Series に査読論文として発表した。従来法で顕著であったオーバーフィッティングによるノイズを抑制し、諸物理量(密度・温度・分子存在比など)の現実的な空間-速度分布を分子輝線の強度比に基づいて測定することを可能にしている。同手法は上記(1)の研究にも用いられているほか、今後は近傍の星形成銀河の観測にも適用し、銀河系中心との比較等に使用される予定である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　2 件）

(1) "HCN J = 4–3, HNC J = 1–0, H 13 CN J = 1–0, and HC 3 N J = 10–9 Maps of the Galactic Center Region. I. Spatially Resolved Measurements of Physical Conditions and Chemical Composition": Tanaka, Kunihiko; Nagai, Makoto; Kamegai, Kazuhisa; Iino, Takahiro; Sakai, Takeshi, 2018, Astrophysical Journal Supplement Series, 236, 40 (査読有)

(2) "ALMA Images of the Host Cloud of the Intermediate-mass Black Hole Candidate CO-0.40-0.22*": No Evidence for Cloud-Black Hole Interaction, but Evidence for a Cloud-Cloud Collision": Tanaka, Kunihiko, 2018, Astrophysical Journal, 859, 86 (査読有)

(3) "The Search for the CO-dark Mass in the Central Molecular Zone by using the ASTE 10-m Telescope": Tanaka, Kunihiko, 2017, Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 322, pp. 107-110 (査読無)

〔学会発表〕（計 5 件）

(1) "ALMA Observations of Colliding Clouds in the Galactic Center Region": Kunihiko Tanaka, Star formation with ALMA: Evolution from molecular clouds to protostars, Nagoya, Japan, 4-6 March 2019

(2) "ALMA による銀河系中心の衝突分子雲の検出": 田中邦彦 日本天文学会秋季年会 2018 兵庫県立大学(兵庫県・姫路市) 9/19–21 2018

(3) "Star Formation Conditions In the Milky Way's Galactic Central Molecular Zone": Kunihiko Tanaka, Star Formation in Different Environments, ICISE, Quy Nhon, Vietnam, 6 – 12 August 2017

(4) "階層的ベイズ推定法を用いた銀河系中心分子雲の物理状態/化学組成の測定": 田中邦彦 日本天文学会春季年会 2017 九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市) 3/15–18 2017

(5) "Search for the CO-dark Mass in the Central Molecular Zone by using the ASTE 10-m Telescope": Kunihiko Tanaka, IAUS 322: The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Cairns, Australia, 18-22 July 2016

〔図書〕（計　0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：
研究者番号（8 桁）：

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※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。