

Title	ミリ波 - サブミリ波観測で探る銀河系中心活動性
Sub Title	Investigating activities in milky way's central molecular zone through observations in millimeter and submillimeter wavelengths
Author	田中, 邦彦(Tanaka, Kunihiko)
Publisher	
Publication year	2017
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2016. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>銀河系の中心核活動, 中心核近傍の爆発的星形成に関わる, 分子雲化学組成や中心核へのガス降着の研究を行った。直接の目的は, 銀河系中心近傍の中性炭素原子雲の正体の解明である。サブミリ波帯の中性炭素原子輝線のASTE10-m望遠鏡による広域探査, ALMA望遠鏡による高分解能高精度観測を行い, また新規開発した手法による統計解析を組み合わせて中性炭素原子濃度の決定要因を調査した。中性炭素原子雲の分布と中心核近傍へ向かうガス流との共通点が多く見出される一方, 衝撃波解離や宇宙線解離の強い影響を示す統計は得られなかった。これにより比較的低密度の中心核への降着ガスが中性炭素ガスで鮮明に捉えられる可能性が示された。</p> <p>Investigation of molecular chemistry in the Galactic central region and gas accretion to the nucleus has been conducted through observations of atomic/molecular lines in the millimeter and sumillimeter wavelengths. The immediate aim was to understand the origin of the cloud with atypically rich abundance of atomic carbon. We have performed a large scale mapping of the atomic carbon line using the ASTE 10-m telescope and a high-sensitivity and high-resolutioal observation of atomic carbon in the circumnuclear reiong using ALMA. Chemical processes that determine the abundance of atomic carbon has been searched using a new method we have newly developed for this study. We have shown that the atomic carbon cloud is likely to trace gas streaming to the nucleus, but no evidence has been found for the effects of the cosmic-ray dissociation or mechanical dissociation. The atomic carbon cloud may provide a new means by which we observe gas accretion to the circumnuclear region.</p>
Notes	研究種目 : 若手研究(B) 研究期間 : 2014 ~ 2016 課題番号 : 26800105 研究分野 : 天文学
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26800105seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26800105seika</a>

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.

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800105

研究課題名(和文)ミリ波-サブミリ波観測で探る銀河系中心活動性

研究課題名(英文) Investigating Activities in Milky Way's Central Molecular Zone through Observations in Millimeter and Submillimeter Wavelengths

研究代表者

田中 邦彦 (TANAKA, KUNIHICO)

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) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系の中心核活動、中心核近傍の爆発的星形成に関わる、分子雲化学組成や中心核へのガス降着の研究を行った。直接の目的は、銀河系中心近傍の中性炭素原子雲の正体の解明である。サブミリ波帯の中性炭素原子輝線のASTE10-m望遠鏡による広域探査、ALMA望遠鏡による高分解能高精度観測を行い、また新規開発した手法による統計解析を組み合わせて中性炭素原子濃度の決定要因を調査した。中性炭素原子雲の分布と中心核近傍へ向かうガス流との共通点が多く見出される一方、衝撃波解離や宇宙線解離の強い影響を示す統計は得られなかった。これにより比較的低密度の中心核への降着ガスが中性炭素ガスで鮮明に捉えられる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Investigation of molecular chemistry in the Galactic central region and gas accretion to the nucleus has been conducted through observations of atomic/molecular lines in the millimeter and submillimeter wavelengths. The immediate aim was to understand the origin of the cloud with atypically rich abundance of atomic carbon. We have performed a large scale mapping of the atomic carbon line using the ASTE 10-m telescope and a high-sensitivity and high-resolution observation of atomic carbon in the circumnuclear region using ALMA. Chemical processes that determine the abundance of atomic carbon has been searched using a new method we have newly developed for this study. We have shown that the atomic carbon cloud is likely to trace gas streaming to the nucleus, but no evidence has been found for the effects of the cosmic-ray dissociation or mechanical dissociation. The atomic carbon cloud may provide a new means by which we observe gas accretion to the circumnuclear region.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学 星間化学

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙に存在する銀河には、われわれの銀河系(=天の川銀河)には見られない激しい活動を示すものがある。中心核の超巨大ブラックホールからの強烈な電磁放射やジェットをもつ活動銀河核(AGN)や、極端に速いスピードで大質量の恒星が誕生するスターバースト(SB)銀河がその代表である。

天の川銀河ではこれらの現象は直接には観測されない。しかしながら、X線、γ線、電波などの多波長の観測を通して天の川の中心部(銀河系中心)のプラズマやガスの性質を調査すると、AGNやSB銀河に特徴的な性質が数多く見られる。よく知られたいて座B2領域での巨大質量星団形成活動は、天の川銀河内での局所的なスターバーストと呼ぶべきものである。とりわけ、最新のγ線観測衛星 *Fermi* が発見した、銀河系中心を貫く双極ジェット様の巨大なγ線のローブ(フェルミ・バブル)は、銀河系がかつてAGN期を経験した可能性を提起した。「天の川銀河=典型的な静穏銀河」というシンプルな描像にとどまらず、銀河系中心部の持つ/持っていた活動を精査する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、銀河系中心分子雲の、特に化学的な性質を通じてその活動性を調査することであった。

分子ガスはAGNやSBの直接の燃料である。大量の高密度ガスが中心核巨大ブラックホールへ落下し、その重力エネルギーが解放される現象がAGNである。また、大質量の高密度ガスの局所的な集中はそこでのSBの引き金となる。つまり、中心核近傍での分子ガスの性質・ダイナミクスは銀河中心部の諸活動の直接の原因を解明するためのもっとも基本的な情報である。

本課題では、中心核を取り巻く質量約  $10^8$  太陽質量の分子雲層(Central Molecular Zone; CMZ)で発見された中性炭素原子ガスを手がかりとして観測的な研究を進めた。星間空間の高密度分子ガスには豊富に炭素が含まれるが、通常そのほとんどは一酸化炭素として存在する。しかし銀河系中心ではかなり多くの割合の炭素が酸素と結合せず、炭素原子単体のガスとして存在するという例外的な状態が生じている。その原因はほとんどわかっていない。

我々はこの炭素原子ガスの起源について二つの仮説を想定した。

### (1) X線・宇宙線解離

フェルミ・バブル等の示唆する過去の中心核活動が事実だとすれば、その時代の銀河系中心のX線放射場や宇宙線強度は現在の値に比べて著しく強かったはずである。それらの高エネルギー光子・陽子は一酸化炭素を破壊するため、中性炭素原子ガスの濃度が上昇する。炭素原子濃度の変動は遅いので、そうした過去の環

境がいわば化石として保存されていることが考えられる。

### (2) 非定常化学組成

前述の通り、高密度分子ガス中では中性炭素原子ガスの濃度は一酸化炭素に比べて非常に低い。しかしより原始的な低密度ガス(diffuse cloud)では紫外線の解離作用が強く、銀河系中心で観測されるのと同程度の炭素原子濃度は容易に実現しうる。前項で述べたように、この原始的な化学組成は十分高密度に進化した分子雲でもしばらくの間(典型的に約  $10^6$  年前後)保存される。銀河系中心での高濃度の中性炭素原子ガスは、急速な分子ガス集積の痕跡とも理解可能である。もっとも高濃度の中性炭素原子ガスは銀河系中心核の近傍数 pc に観測されており、赤外の観測から示唆される中心核SBや、過去のAGNの原因となった質量供給イベントの存在を裏付けているかもしれない。

上記二つの可能性は理想的に単純化した描像であり、現実には紫外線解離、衝撃波解離などを含めた星間分子科学のプロセスを広汎に検討しなければ、星間分子ガスの化学組成から物理現象の痕跡を見いだすことはできない。中性炭素原子の正確な分布の測定を行うとともに、他の分子種の分布の調査、銀河系中心部での様々な現象(分子雲のダイナミクス、星形成活動など)の全体を知ることが不可欠になる。

## 3. 研究の方法

研究は以下の方法で行った。

### (A) ASTE10-m望遠鏡を用いた中性炭素原子の広域観測

銀河系中心での中性炭素原子の観測はごく限られており、広域分布の特徴はまだ多くが不明のままである。チリのアタカマ高原に設置された10mサブミリ波望遠鏡ASTEと、望遠鏡に搭載された500GHz帯のBand8QM受信機を用いて、中性炭素原子[CI]  $^3P_1$ - $^3P_0$ 輝線の広域観測を行った。

### (B) 電波干渉計による個別の分子雲の詳細観測

広域観測の一方で、個別の重要領域をより高分解能かつ高感度のデータを用いて調査するために電波干渉計を用いた観測を行った。対象としたのは、中心核巨大ブラックホール近傍5pcの領域と、衝撃波相互作用領域候補のCO-0.30領域である。これらは銀河系中心領域のなかでも極端な物理的環境に置かれた分子雲であり、分子雲化学組成の決定要因を探る研究には適している。

### (C) 複数分子/原子輝線を用いた統計解析

観測データと理論モデルとの比較によって初めて中性炭素原子の濃度の解釈が可能になる。分子雲化学にかかわる精緻な理論モ

デルは多数存在するが、現実に観測される天体はさらに複雑である。また得られる情報はなお限られており(例えば、分子雲の三次元的な密度構造を直接観測で知ることがほぼ不可能である)、理論と観測の比較は一般に簡単ではない。したがって本研究では直接の比較を一旦諦め、統計解析によって観測で得られる情報を単純化する方法をとった。具体的な内容は次項に詳述する。

#### 4. 研究成果

ASTE10-m望遠鏡を用いた観測では、いて座Bからいて座Cにかけての主要な巨大分子雲複合体内の中性炭素原子ガスの分布の測定を完了した(図1)。

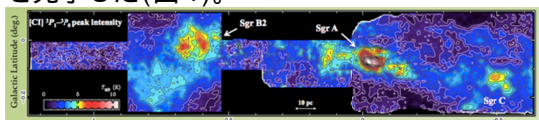


図1: ASTE10-m望遠鏡で取得した銀河系中心領域の中性炭素原子ガスの分布図

この観測からは、銀河系中心領域全体が高い中性炭素原子濃度(炭素原子/一酸化炭素分子の数密度比がおよそ0.2-0.5)を持つという従来の知見を確認するとともに、特に(1)中心核近傍のガスリング(2)中心核から最も近いいて座A複合体の北東部の二つの領域に渡り、一酸化炭素で検出される分子雲では確認できない中性炭素原子特有の構造の詳細が観測された。この領域では炭素原子/一酸化炭素分子の数密度比が1程度かそれ以上という極めて高い値が測定された。これはミリ波帯の一酸化炭素輝線をプローブとした従来の分子ガスの観測手法では検出できない「CO-dark」な分子ガスが非常に豊富に中心核近傍に分布していることを示している。

このCO-dark分子ガスの正体は何か。先行研究による100 GHz帯からテラヘルツ帯に及び一酸化炭素の多準位励起解析を精査し、もっとも低励起の $J=1,2$ 回転準位の $^{13}\text{CO}$ 同位体輝線の強度が、既知の分子雲成分で説明できない明瞭な超過を示すことを見出した。中性炭素原子輝線の分布はこの $^{13}\text{CO}$   $J=1,2$ の超過の分布とよく一致し、中心核近傍の高密度・高温のガスリングからさらに外部に裾を引いた低密度/低温の分子雲成分に対応する。この分布の特徴は、高分解能の電波干渉計の観測で知られていた“streamer”と大まかに一致する。つまり、外部のアンビエントな分子ガスが中心核近傍の分子ガス円盤に降着する過程の非定常ガスが中性炭素原子輝線で観測されている可能性がある。

実際に中性炭素原子ガス雲が降着を示す運動伴うかは、最新鋭の電波干渉計ALMAを用いた直接観測で確かめられる。ALMAの第3期(Cycle-3)の観測プログラムの一つとして中心核近傍ガス円盤の中性炭素原子観測が実行され、2016年度後期にデータ取得が完了

した。データの量が非常に膨大であるために当課題の研究期間中(延長期間を含む)に解析を完了することができなかったが、中心核近傍への分子ガス供給の過程についての新たな成果が2017年度以降の研究で期待される。

また、化学組成の統計分析により、銀河系中心分子雲で支配的な化学過程の推定を行った。用いたデータは、研究代表者自身の持つデータと国内外の諸アーカイブから取得した計13種類の分子輝線の銀河系中心全面マップの画像である。Large Velocity Gradient法と最尤推定を用いたスタンダードな励起計算メソッドでは測定値に隠れた系統的な誤差や理想モデルからの逸脱を評価できないため、あらたに階層的ベイズ推定法を組み入れた励起計算メソッドを構築し、分子ガスの温度・密度と8種の代表的な分子種の濃度の空間分布を同時に測定することに成功した。これらのパラメータに共通する変動成分を主成分分析によって抽出すると、温度・密度と共変な成分のほかには一つの主成分のみで解析に含まれた8種の分子種の空間変動の80%以上が説明されることがわかった。

この三つの成分の含有量によって分子種の分類を行うと、(1)高速の衝撃波領域下で増加する分子(2)低速の衝撃波領域で豊富な分子(3)静穏領域に多く存在する分子、の三つのカテゴリが現れた。すなわち、銀河系中心領域の分子組成を支配するのは衝撃波との相互作用過程である。

一方、宇宙線解離の影響を強く受けるはずフォルミルイオンの濃度は上記成分を除くと極めて空間的に一様な分布を示す。大きな空間変動をもつ中性炭素原子濃度分布との一致点は見られず、両者の濃度が共通の原因に左右されている証拠は発見できなかった。

さらに、分子雲CO-0.30の電波干渉計観測では、この天体がおそらく分子雲衝突による高速の衝撃波に支配された天体であることを突き止め、メタノールなどの比較的大型の分子が豊富に存在することを明らかにした。これは前段落で述べた衝撃波領域の化学組成の描像を裏付ける。しかし中性炭素原子ガスの濃度は、CO-0.30や、他の典型的な衝撃波領域では目立った上昇がない。衝撃波化学が中性炭素原子濃度の決定要因である証拠もまた、得られなかった。

以上を総合すると、(1)中性炭素原子の分布は中心核近傍に流入するガスが存在する領域で高い(2)現在の分子雲化学組成は衝撃波との相互作用にもっとも強く影響されている(3)中性炭素原子の分布が宇宙線・衝撃波の影響を受けている証拠は得られない、というものである。最終的な結論にはまだ多くの調査が必要であるものの、「研究目的」の項に述べた仮説のうちでは、非定常化学組成のモデルが他と比べてより容易にこれらの

結果を説明する。中心核活動・中心核スターバーストを引き起こす中心核近傍へのガスの供給活動との関わりとの研究をさらに推進すべきである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

「CO-0.30-0.07: A Peculiar Molecular Clump with an Extremely Broad Velocity Width in the Central Molecular Zone of the Milky Way」

Kunihiko Tanaka, Makoto Nagai, Kazuhisa Kamegai, & Tomoharu Oka,

The Astrophysical Journal, Volume 806, Issue 1, article id. 130, 13 pp. (2015).

査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

International Astronomical Union, the 29<sup>th</sup> General Assembly, Honolulu (USA), 3-14 August 2015

発表者・Kunihiko Tanaka

The 6<sup>th</sup> Zermatt ISM symposium, Zermatt (Switzerland), 7-11 September 2015

発表者・Kunihiko Tanaka

日本天文学会 2016 年春季年会・首都大学東京(東京都八王子市)・2017 年 3/14-17

発表者・田中 邦彦

International Astronomical Union, Symposium 322, Cairns (Australia), 18-22 July 2016

発表者・Kunihiko Tanaka

日本天文学会 2017 年春季年会・九州大学(福岡県福岡市)・2017 年 3/15-18

発表者・田中 邦彦

〔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:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 邦彦 (Kunihiko Tanaka)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号: 00534562

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

( )