

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23403001

研究課題名(和文) 電波・赤外線観測による最も進化段階の早い星形成過程の観測的研究

研究課題名(英文) Study of earliest stage of star formation process from multi-wavelength observations

研究代表者

河村 晶子 (KAWAMURA, Akiko)

国立天文台・チリ観測所・研究員

研究者番号：30377931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円、(間接経費) 3,780,000円

研究成果の概要(和文)：NANTEN2ミリ波サブミリ波望遠鏡及びオーストラリアMopraミリ波望遠鏡を用いて、銀河系円盤部、近傍分子雲、大マゼラン雲等の観測を進めるとともに、なんてんによる100GHz帯の銀河系分子雲の詳細な解析を行い、分子ガスの詳細分布を調べた。また、プランク衛星、ハーシェル赤外線望遠鏡による100ミクロンから500ミクロンで得られた、星間ダストの分布を調べ、原子、分子ガスとの比較を進め、さらに既存のあかり、スピッツァー天文衛星による点源カタログを合わせ、若い進化段階にある星のカタログ化を行った。これらを用いて分子ガス、星間ダスト、そして星形成活動について比較研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We have carried out various observations of molecular clouds towards nearby star forming regions, the Galactic plane, and the Large Magellanic Clouds with NANTEN2 submm telescope and Mopra mm telescope. We have also make use of the previous survey results by NANTEN and obtained the detailed physical properties of the molecular clouds. The new data taken by the Infrared Satellites, Planck and Herschel was used to obtain interstellar dust emission as well as point sources. Point source catalog was combined with Spitzer point source catalogs to determine the young stellar objects. All these datasets were used to carry out comprehensive study of molecular clouds, interstellar dust and star formation processes. The results are used to propose observations of star forming regions by ALMA and our successive proposal started to give us high resolution and high sensitivity data of a nearby star forming region.

研究分野：数物系科学B

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：電波天文学 星形成 星間分子雲 赤外線天文学 国際研究者交流(チリ) 国際情報交換

1. 研究開始当初の背景

銀河は、1 千億個を越える星の集団で、星と星の間には、ガスと、氷などの微粒子（ダスト）からなる星間物質が存在する。星は星間物質から形成され、その一生を終える際に惑星状星雲や超新星爆発といった形で物質を星間空間に再放出する。星は進化過程において内部で重元素をつくるため、星と星間物質とのサイクルが繰り返されることにより、銀河内の重元素量は増加する。一方、重元素は各種放射遷移によって星間ガスの冷却を支配し、その後の星形成を決定づける。すなわち星間物質⇒星⇒星間物質といったサイクルは宇宙の構成要素を決める重要な過程であり、銀河の進化を規定している。中でも星間分子ガスは、星形成の現場であり、その性質が星形成の条件を決める。

本研究では、高分解能なデータが取得可能で、詳細に物理状態を調べることができ、かつ、最も進化段階の早い星もとらえることが可能な近傍分子雲に着目し、星間ガスの諸相、分子・原子・イオンの空間分布・物理学的性質を克明に調べる。その結果と、星間ダストや水素原子ガス等とを比較し、星間ガス諸相の基本的性質を銀河全域にわたりはじめて明らかにする。

さらに、最新の赤外線データからそこでの星形成の特徴も明らかにする。本研究によって、系外銀河・銀河系の星間物質・星形成の進化の解明に多面的な波及効果が期待される。

分子雲探査と分子雲進化シナリオの構築：1990 年代後半、特に 2000 年代に行われた、12CO(1-0)輝線による第 2 回「なんてん」望遠鏡の大マゼラン雲全面探査(Fukui, Kawamura et al. 2008) によって、銀河として初めて、銀河全面にわたる巨大分子雲の完全なカタログが作成された。さらに研究代表者によって、我々の銀河系にはほとんど存在しないと考えられている「大質量星形成の伴わない巨大分子雲」が個数の約 1/3 を占めることが明らかになった。これは、低い重元素量が、メンバー数の多い星団の形成に本質的である可能性を示唆しており、低い冷却率、高い電離率が分子雲の実質的ジーンズ質量を大きくしている可能性が考えられる。また、若い星団や大質量星形成領域との付随状況から、巨大分子雲が大質量星を形成するまでの時間が 700 万年程度であり、巨大分子雲の年齢としては 3000 万年程度であることが明らかになった(Kawamura et al. 2009)。これは、銀河全域に対して巨大分子雲を空間分解できる分解能で一様に探査したことにより得られたものであり、銀河全体にわたる巨大分子雲の進化の様子を初めて観測的に明らかにしたものである。また、水素原子の高分解能(～1 分角)全面観測(Kim et al. 2003)データと分子ガスとの詳細比較から、分子雲の進化とともに分子雲に付随する原子水素ガスの質量が増えていること、などが明らか

になり、水素原子ガスから分子ガスへ進化していく様子が示唆された(Fukui, Kawamura et al. 2009)。一方、銀河系内においては、銀河面にわたる比較的粗い観測から、分子ガスの大局的な分布、巨大分子雲の基本的な性質と、太陽系近傍における星形成の条件や星形成率等が明らかになってきた。特に、近傍暗黒星雲に着目した詳細観測からは、太陽質量程度の星の形成過程については、星間分子雲の柱密度が高いところで、自己重力により星間物質が収縮し、磁場のすりぬけとともに星形成に至ることが理解されてきた。

赤外線観測：Spitzer, AKARI 赤外線天文衛星により、近赤外から遠赤外線までのデータが、数秒(短波長側)から 40 秒角(長波長側)の空間分解能で広域にわたり取得され(Meixner et al. 2006, Ita et al. 2008;)、星間ダストの分布が 1 分角程度の分解能で明らかになった。さらに、1000 個以上の原始星が同定され(Whitney et al. 2008)、詳細な星間物質・星形成条件の観測的研究の材料が急速に整ってきた。

2. 研究の目的

宇宙の主要な構成要素である恒星は、低温高密度領域で星間物質が自己重力で収縮することにより形成される。星形成領域は、星間ダストと星間分子ガスが混在する星間物質の奥深くにあり、可視光では見通すことができない。高感度広域観測を得意とする、NANTEN2 サブミリ波望遠鏡等を用いて、銀河系内星形成領域に対し、星間分子ガスの分布と物理状態を徹底的に観測する。そして、赤外線天文衛星による赤外線～電波域のデータを用いて、星間ダストの分布および物理状態を調査し、既存の原子、分子ガスのデータと合わせて、星間物質の諸相について物理状態を調べる。さらに、本研究の特色の一つである赤外線データを用いて形成されたばかりの星を検出する。これらのデータを統合し、星間物質が収縮し、星が形成される過程を詳細に明らかにする。また、日米欧の国際的プロジェクト、アタカマミリ波サブミリ波大型干渉計計画による観測へと発展させる。

3. 研究の方法

星間物質は、ガスと、氷などから成る微粒子(ダスト)に分けることができる。最新の NANTEN2 ミリ波サブミリ波望遠鏡、およびハーシェル赤外線望遠鏡を用いて星間分子雲および星間ダストの観測を行う。既存のあかり、スピッツァー赤外線望遠鏡による赤外線データおよび、ミリ波望遠鏡なんてん、Mopra 望遠鏡のデータ、さらに水素原子ガスのデータと合わせて、銀河全体にわたり、星間物質のさまざまな相について物理状態を調べる。赤外線データを用いることで、かつてない冷たい(=若い)形成されたばかりの星を検出することが可能である。これにより、星間物

質の進化 (= 星間原子ガス→星間分子ガス→高密度分子ガス→星) が、どのような条件のもとどのようなタイムスケールで起きるのかを調べ、各形成条件および銀河進化について理解を深める。

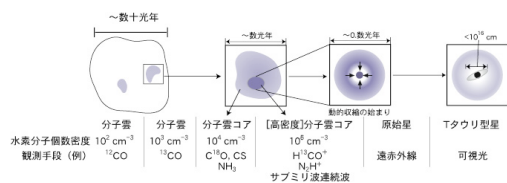


図1. 分子雲から星が形成される進化を表す模式図。今まで観測が困難であった高密度分子雲コアから原始星への移行にあたる、まさに動的収縮が始まろうとする天体を検出し、その進化過程の理解を深めることを目的とする。

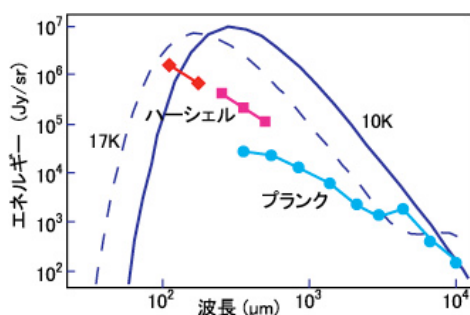


図2. 星間物質に埋もれた冷たい天体(10K:実線)と平均的な温度(17K)を持つ冷たい星間物質(17K:破線)から放射される電磁波のエネルギー分布。比較としてプランクサーベイ及びハーシェルで20分観測した際に得られる各波長での感度を示す。これらの観測によって、形成されたばかりの星をとらえ、星間物質と切り分けができることを示している。

4. 研究成果

NANTEN2 ミリ波サブミリ波望遠鏡に搭載されたミリ波受信機システム、及びオーストラリア Mopra ミリ波望遠鏡を用いて、銀河系円盤部、近傍分子雲、大マゼラン雲等の観測を進めるとともに、既存のなんてんによる100GHz帯の銀河系分子雲の詳細な解析を行い、分子ガスと赤外線データから得られる星形成活動との比較を行った。また、プランク衛星、ハーシェル赤外線望遠鏡による100ミクロンから500ミクロンで得られた、星間ダストの分布を調べ、原子、分子ガスとの比較を進めた。さらに既存のあかり、スピッツァー天文衛星による点源カタログを合わせ、若い進化段階にある星のカタログ化を行った。これらの結果をふまえ、研究分担者、協力者とともに、銀河系内近傍星形成領域に対し、アタカマミリ波、サブミリ波大型干渉計画へ観測を提案し、採択、遂行されたデータに

ついて解析を進め、例えば、おうし座分子雲内の若い進化段階にある星形成領域、MC27においては、かつてない、高分解能、高感度で、星がまさに形成されている段階での分子ガスの密度、速度分布について調べることが可能となった(徳田一起、2014年日本天文学会春季年会口頭発表、及び Tokuda et al. The Astrophysical Journal Letters, 2014 in press)。また、さらに新たな観測を提案し、採択されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計20件)

- ① Toth, L. V., Marton, G., Zahorecz, S., Balazs, L. G., Ueno, M., Tamura, M., Kawamura, A., Kiss, Z. T., Kitamura, Y., The AKARI Far-Infrared Surveyor young stellar object catalog, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, 17, DOI:10.1093/pasj/pst017
- ② Muller, E., Mizuno, N., Minamidani, T., Kawamura, A., Rosie Chen, C.-H., Indebetouw, R., Enokiyama, R., Fukui, Y., Gordon, K., Hayakawa, T., Mizuno, Y., Murai, M., Okuda, T., Onishi, T., Tachihara, K., Takekoshi, T., Yamamoto, H., Yoshiike, S., Unusually bright 12CO(3-2) condensations in the tidally perturbed Small Magellanic Cloud "tail", Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, 4, DOI:10.1093/pasj/pst006
- ③ Furukawa, N., Ohama, A., Fukuda, T., Torii, K., Hayakawa, T., Sano, H., Okuda, T., Yamamoto, H., Moribe, N., Mizuno, A., Maezawa, H., Onishi, T., Kawamura, A., 他10名, The Jet and Arc Molecular Clouds toward Westerlund 2, RCW 49, and HESS J1023-575 12CO and 13CO (J = 2-1 and J = 1-0) observations with NANTEN2 and Mopra Telescope, The Astrophysical Journal, 査読有, 781, 2014, 70, DOI:10.1088/0004-637X/781/2/70
- ④ Fukui, Y., Ohama, A., Hanaoka, N., Furukawa, N., Torii, K., Dawson, J. R., Mizuno, N., Hasegawa, K., Fukuda, T., Soga, S., Moribe, N., Kuroda, Y., Hayakawa, T., Kawamura, A., Kuwahara, T., Yamamoto, H., Okuda, T., Onishi, T., Maezawa, H., Mizuno, A., Molecular Clouds toward the Super Star Cluster NGC 3603 Possible Evidence for a Cloud-Cloud Collision in Triggering the Cluster Formation, The Astrophysical Journal, 査読有,

- 780, 2014, 36,
DOI:10.1088/0004-637X/780/1/36
- ⑤ Kawamura, A., Minamidani, T., Onishi, T., Mizuno, T., Kizawa, J., Mizuno, N., Fukui, Y., Physical Properties of Molecular Clouds in the Magellanic Clouds Revealed by Observations in Multi-transition CO Molecular Lines, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 査読無, 476, 2013, 73
- ⑥ Maxted, N. I., Rowell, G. P., Dawson, B. R., Burton, M. G., Fukui, Y., Walsh, A., Kawamura, A., Horachi, H., Sano, H., Yoshiike, S., Fukuda, T., Interstellar gas towards CTB 37A and the TeV gamma-ray source HESS J1714-385, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 434, 2013, 2188, DOI:10.1093/mnras/stt1159
- ⑦ Indebetouw, R., Brogan, C., Chen, C.-H. R., Leroy, A., Johnson, K., Muller, E., Madden, S., Cormier, D., Galliano, F., Hughes, A., Hunter, T., Kawamura, A., Kepley, A., Lebouteiller, V., Meixner, M., Oliveira, J. M., Onishi, T., Vasyunina, T., ALMA Resolves 30 Doradus: Sub-parsec Molecular Cloud Structure near the Closest Super Star Cluster, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 774, 2013, 73, DOI:10.1088/0004-637X/774/1/73
- ⑧ Meixner, M., 他著者 57 名, 内 33 番目、The HERSCHEL Inventory of The Agents of Galaxy Evolution in the Magellanic Clouds, a Herschel Open Time Key Program, *The Astronomical Journal*, 査読有, 146, 2013, 62, DOI:10.1088/0004-6256/146/3/62
- ⑨ Shimonishi, T., Onaka, T., Kato, D., Sakon, I., Ita, Y., Kawamura, A., Kaneda, H., AKARI Infrared Camera Survey of the Large Magellanic Cloud. II. The Near-infrared Spectroscopic Catalog, *The Astronomical Journal*, 査読有, 145, 2013, 32, DOI:10.1088/0004-6256/145/2/32
- ⑩ Takita, S., Ikeda, N., Kitamura, Y., Ishihara, D., Kataza, H., Kawamura, A., Oyabu, S., Ueno, M., Yamamura, I., Slow-Scan Observations with the Infrared Camera (IRC) aboard AKARI, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 64, 2012, 126, DOI:10.1093/pasj/64.6.126
- ⑪ Kato, D., Ita, Y., Onaka, T., Tanabe, T., Shimonishi, T., Sakon, I., Kaneda, H., Kawamura, A., Wada, T., Usui, F., Koo, B.-C., Matsuura, M., Takahashi, H., AKARI Infrared Camera Survey of the Large Magellanic Cloud. I. Point-source Catalog, *The Astronomical Journal*, 査読有, 144, 2012, 179, DOI:10.1088/0004-6256/144/6/179
- ⑫ Pineda, J. L., Mizuno, N., Rolling, M., Stutzki, J., Kramer, C., Klein, U., Rubio, M., Kawamura, A., Minamidani, T., Benz, A., Burton, M., Fukui, Y., Koo, B.-C., Onishi, T., Submillimeter line emission from LMC 30 Doradus: The impact of a starburst on a low-metallicity environment, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 544, 2012, A84, DOI:10.1051/0004-6361/201118321
- ⑬ Paradis, D., Dobashi, K., Shimoikura, T., Kawamura, A., Onishi, T., Fukui, Y., Bernard, J.-P., Dark gas in the solar neighborhood from extinction data, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 543, 2012, A103, DOI:10.1051/0004-6361/201118740
- ⑭ Kaneda, H., Ishihara, D., Mouri, A., Oyabu, S., Yamagishi, M., Kondo, T., Onaka, T., Fukui, Y., Kawamura, A., Torii, K., Processing of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Molecular-Loop Regions near the Galactic Center Revealed by AKARI, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 64, 2012, 25, DOI:10.1093/pasj/64.2.25
- ⑮ Fukui, Y., Sano, H., Sato, J., Torii, K., Horachi, H., Hayakawa, T., McClure-Griffiths, N. M., Rowell, G., Inoue, T., Inutsuka, S., Kawamura, A., Yamamoto, H., Okuda, T., Mizuno, N., Onishi, T., Mizuno, A., Ogawa, H., A Detailed Study of the Molecular and Atomic Gas toward the Gamma-Ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Spatial TeV Gamma-Ray and Interstellar Medium Gas Correspondence, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 746, 2012, 82, DOI:10.1088/0004-637X/746/1/82
- ⑯ Aikawa, Y., Kamuro, D., Sakon, I., Itoh, Y., Terada, H., Noble, J. A., Pontoppidan, K. M., Fraser, H. J., Tamura, M., Kandori, R., Kawamura, A., Ueno, M., AKARI observations of ice absorption bands towards edge-on young stellar objects, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 538, 2012, A57, DOI:10.1051/0004-6361/201015999
- ⑰ Ikeda, N., Kitamura, Y., Takita, S.,

- Ueno, M., Suzuki, T., Kawamura, A., Kaneda, H., Far-infrared Imaging Observations of the Chamaeleon Region, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 745, 2012, 48, DOI:10.1088/0004-637X/745/1/48
- ⑱ Wong, T., Hughes, A., Ott, J., Muller, E., Pineda, J. L., Bernard, J.-P., Chu, Y.-H., Fukui, Y., Gruendl, R. A., Henkel, C., Kawamura, A., Klein, U., Looney, L. W., Maddison, S., Mizuno, Y., Paradis, D., Seale, J., Welty, D. E., The Magellanic Mopra Assessment (MAGMA). I. The Molecular Cloud Population of the Large Magellanic Cloud, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 査読有, 197, 2011, 16, DOI:10.1088/0067-0049/197/2/16
- ⑲ Planck Collaboration, 著者 207 名 (内アルファベット順 89 番目), Planck early results. XIX. All-sky temperature and dust optical depth from Planck and IRAS. Constraints on the "dark gas" in our Galaxy, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 536, 2011, A19, DOI:10.1051/0004-6361/201116479
- ⑳ Planck Collaboration, 著者 200 名 (内アルファベット順 88 番目), Planck early results. XVII. Origin of the submillimetre excess dust emission in the Magellanic Clouds, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 536, 2011, A17, DOI:10.1051/0004-6361/201116473

[学会発表] (計 5 件)

- ① 河村晶子、Study of Star formation and ISM in the Magellanic Clouds by ALMA, 日本天文学会春季年会, 2014 年 3 月 21 日国際基督教大学 (東京)
- ② 徳田一起, ALMA Observations of Dense Molecular Condensation MC27 (L1521F), 日本天文学会春季年会, 2014 年 3 月 21 日国際基督教大学 (東京)
- ③ 河村晶子、Millimeter and Submillimeter Observations of Molecular Clouds in the Magellanic Cloud, IAU Symp. 292, 2012 年 8 月 20 日, 北京コンベンションホール(中国)
- ④ 河村晶子、Physical Properties of Molecular Clouds in the Magellanic Clouds Revealed by Observations in Multi-Transition CO Molecular Lines, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era, The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, 2012 年 12 月 4 日, ザ・プリンス箱根 (神奈

川県)

- ⑤ 河村晶子、スーパージャイアントシェル LMC 4 内 HII 領域、N 55 に附随する分子雲と星形、日本天文学会春季年会、埼玉大学 (埼玉県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 晶子 (KAWAMURA, Akiko)
国立天文台・チリ観測所・研究員
研究者番号: 30377931

(2) 研究分担者

大西 利和 (ONISHI, Toshikazu)
大阪府立大学・理学系研究科・教授
研究者番号: 30314058

山本 宏昭 (YAMAMOTO, Hiroaki)
名古屋大学・理学研究科・助教
研究者番号: 70444396