

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610045

研究課題名(和文) 赤外線クラスタの全天探査への挑戦

研究課題名(英文) A Challenge of All Sky Survey for Infrared Clusters

研究代表者

土橋 一仁 (Dobashi, Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近赤外線の星のデータベースである2 Micron All Sky Survey (2MASS) 点源カタログを利用して、分子雲に埋もれた若い星団である赤外線クラスタの全天探査を行った。その結果、全天で576個の赤外線クラスタを検出し、それらの座標、広がり、星数を記録したリストを作成した。また、いくつかの赤外線クラスタの母体分子雲コアに対してミリ波分子分光観測を遂行し、S235ABクラスタに付随する巨大分子雲コアが回転を伴う収縮運動をしていることを発見した。

研究成果の概要(英文)：We have performed an all-sky survey for infrared clusters using the 2 Micron All Sky Survey (2MASS) point source catalog. We detected 576 clusters, and recorded their coordinates, extents, and numbers of the constituent stars. In addition, we carried out molecular observations toward some of the natal clumps, and we detected infalling motion with rotation of the clump associated with the S235AB cluster.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学 データベース天文学

### 1. 研究開始当初の背景

太陽のような恒星の多くは、数十個から数百個の星からなる星団(クラスター)で生まれることが知られている(e.g., Lada & Lada 2003)。形成途上の若い星団は濃密な分子雲コアの中に深く埋もれているため、可視光ではその存在にすら気付かない。しかし、透過力の高い近赤外線の星のデータベースである 2 Micron All Sky Survey (2MASS) 点源カタログや、中間赤外線の Wide field Infrared Explorer (WISE) 点源カタログには、若い星団のメンバー星が多数記録されている。これらを利用して天空の広い範囲で星数密度(単位立体角当たりの星の数)の分布を調べれば、分子雲コアに埋もれた星団を容易に認識することができる。このように赤外線で見出される若い星団を、赤外線クラスターと呼ぶ。

赤外線クラスターのカタログとしては、Dutra & Bica (2001)やBica et al. (2003)が、2MASS 点源カタログを利用して作成したものが既に公開されている。しかし、彼らのカタログには赤外線クラスターの座標と広がりしか記載されていない。また、サンプリングも不完全で、おそらく2/3以上のクラスターが探査から漏れている。これは、2MASS 点源カタログのデータがあまりに膨大で扱いにくいことや、同カタログの感度ムラによりクラスターを画一的な方法で見出することが困難であることが原因であると考えられる。

### 2. 研究の目的

2MASS や WISE といった赤外線の星のデータベースは、形成途上の若い赤外線クラスター

の探査に適していることは間違いない。これらのデータベースの新しい解析法を模索してより完成度の高い赤外線クラスターの全天カタログを作成することは、銀河系内の恒星の形成過程を理解する上で、極めて重要であるといえる。本研究では、計算技術上の問題を解決し、赤外線クラスターのより完全な全天探査を実現することを目指す。このような赤外線クラスターのカタログは、世界中の星形成の研究者に極めて大きなインパクトを与えるものになると確信する。

本研究では、2MASS 点源カタログを解析することにより、以下の2点を実現することに挑戦する。

①赤外線クラスターの全天探査を遂行し、それらの座標・広がり・星数等を記載したカタログを作成する。さらに、クラスター中の星がどのような数密度分布をしているのかについても調査する。

②見出した個々の赤外線クラスターのうち、一酸化炭素等の分子輝線のデータが入手可能なものについてはその視線速度から力学的距離を推定し、さらに母体である分子雲コアの速度場や質量分布についても調査する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 方法の概要

図1aは、2MASS 点源カタログを利用して作成した星数密度分布の全天マップである。赤外線クラスターは、このような星数密度マップ上の局所的な「山」として認識することができる。例として、図1bに、Gem OB1 領域の赤外線クラスターの星数密度分布を示す。

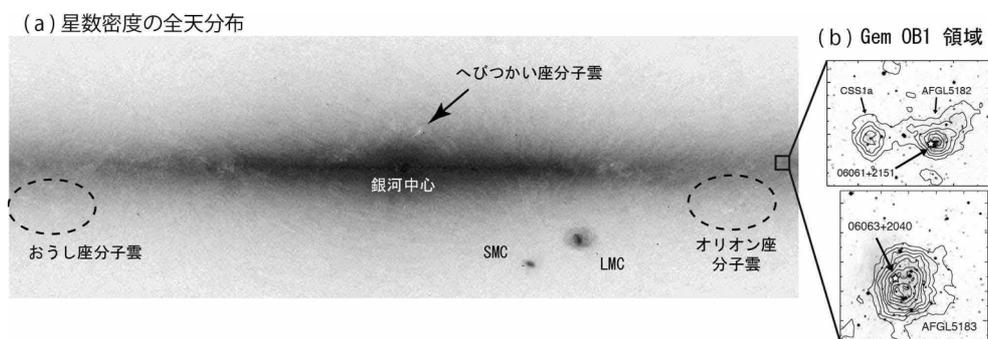


図1 (a) アダプティブグリッド法を用いて作成した全天の星数密度分布図(1'グリッド)。白く見えるのは暗黒星雲。黒いところほど星数密度が高い。(b) 10"グリッドで描いたGem OB1領域の赤外線クラスターの星数密度分布(コンター)。背景のグレースケールは2MASSのKsバンドのイメージ、白い星印はIRAS点源。

本研究では、星数密度マップ中でこのような山として認識される赤外線クラスタの全天探査を行い、それらの座標や広がりを見測する。個々の赤外線クラスタ中の星の数密度分布としては、従来、「 $r^{-1}$ 則」のモデルと「キングモデル」(King 1962)の二通りのモデルが提唱されてきたが、どちらがより現実に近い分布なのか、まだ決着が付いていない。本研究では、検出された赤外線クラスタを利用して、どちらのモデルが実際のクラスタをよりよく反映しているか確かめる。さらに、本研究では、赤外線クラスタの母体である分子雲コアの内部構造についても、一酸化炭素等の分子輝線のデータを取得して調査する。これには、国内の電波望遠鏡を利用する。

## (2) 星団探査

まず、銀経  $0^\circ \sim 360^\circ$  の銀緯  $-60^\circ \sim +60^\circ$  の範囲について、2MASS 点源カタログにアダプティブグリッド法を適用して  $1'$  グリッドの広域星数密度分布マップを作成した(図 1a 及び図 2a)。このような星数密度分布マップの作成には、通常、銀河座標(銀経・銀緯)に沿って等間隔に設定した測定点から一定の距離  $r$  以内にある星の数  $N$  を調べ、星数密度 ( $N/\pi r^2$ ) を計算するレギュラーグリッド法と呼ばれる方法が採られる。我々が使用したアダプティブグリッド法とは、 $r$  を固定するのではなく  $N$  を固定する方法で、各測定点の周りに  $N$  個の星が入る  $r$  を測定する方法である。計算方法はレギュラーグリッド法よりかなり複雑で、かつマップ内での角分解能がばらつくというデメリットがあるが、均一なノイズレベルのマップが得られる、というメリットがある。アダ

プティブグリッド法は、もともと可視光帯での減光量測定のために Cambresy (1998) により開発された研究手法であるが、本研究では、これを赤外線クラスタの全天探査に利用できるよう大幅に改良・高速化した。

得られたマップ(図 2a)のノイズレベルを調べ、 $5\sigma$  以上の星数密度をもつ一つのピクセル群を検出し、これらを赤外線クラスタ候補としてリストした。さらに、ノイズによる「偽物」の赤外線クラスタの混入を避けるため、30 個以上の星からなるものを赤外線クラスタとして選んだ。

検出した赤外線クラスタを丹念に調べると、 $1'$  以下の細かな構造をもつものや、全体的にコンパクトなものが相当数あることがわかった。そこで、星の数の多い銀緯  $\pm 16^\circ$  の領域については  $30''$  グリッドで(図 2b)、さらに星の数の多い銀経  $\pm 60^\circ \cdot$  銀緯  $\pm 4^\circ$  の領域では  $15''$  グリッドで(図 2c)、より高い角分解能の星数密度分布図を作成して上記の  $1'$  グリッドの場合と同じ方法で赤外線クラスタを検出した。

なお、この探査では、記録されている星をできるだけ有効に使用するために、2MASS 点源カタログに記録されている約 8 億個の星を全て使用して星数密度分布マップを作成した。

## (3) 一酸化炭素分子輝線データの収集

赤外線クラスタは、濃密な分子雲コアに埋もれているため、一酸化炭素等からの分子輝線が強く検出されるものが多い。分子輝線のデータは、その視線速度から赤外線クラスタの距離を推定するのに役立つだけでなく、母体分子雲コアの密度・速度構造の解明に、必

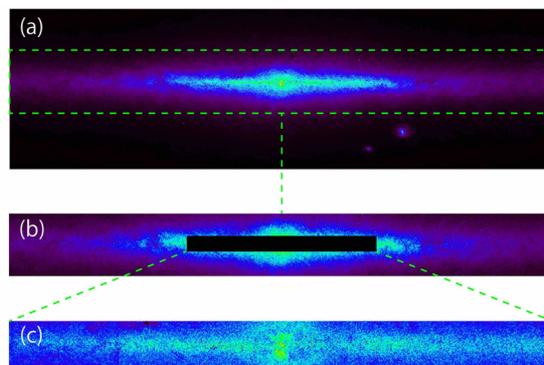


図2 アダプティブグリッド法を2MASS点源カタログに適用して (a)  $1'$  グリッドで作成した銀緯  $\pm 60^\circ$  以内の星数密度分布図、(b)  $30''$  グリッドで作成した銀緯  $\pm 16^\circ$  以内の星数密度分布図、(c)  $15''$  グリッドで作成した銀経  $\pm 60^\circ \cdot$  銀緯  $\pm 4^\circ$  以内の星数密度分布図。

要不可欠なものである。

我々は、検出した赤外線クラスタの一部に対して、大阪府立大学の所有する 1.85m 電波望遠鏡を用いて一酸化炭素及びその同位体分子による低角分解能観測を行った (回転遷移  $J=2-1$  による)。さらに、分子輝線が顕著に検出された約 20 個の赤外線クラスタについて、野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡を用いた分子分光観測を遂行し、その母体分子雲コアの速度構造や密度構造の解明に取り組んだ。

#### 4. 研究成果

##### (1) 赤外線クラスタの検出

2MASS 点源カタログを解析して作成した星数密度分布図 (図 2) より合計 576 個の赤外線クラスタを検出し、その座標、広がり、星数を記録したカタログを作成した。さらに、本研究でよく分解できているクラスタの密度分布を、 $r^{-1}$  則を仮定したモデルとキングモデルの 2 つのモデルでフィットした。その結果、多くのクラスタでは 2 つのモデルには有意な差は見られないことがわかった。

検出した赤外線クラスタのうち、100 個以上の天体について、1.85m 電波望遠鏡による  $^{12}\text{CO}$ ・ $^{13}\text{CO}$  及び  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=2-1$ ) 分子輝線によるマッピング観測を行った。分子輝線が強く検出された

天体のうち、観測に適していると考えられる約 20 個の赤外線クラスタに対して、野辺山 45m 電波望遠鏡による高角分解能での追加観測を遂行し、母体分子雲の密度分布や速度構造を調べた。その結果、母体分子雲コア内部の速度構造や密度分布が、近赤外線クラスタの進化段階に応じて変化していることが示唆された。

##### (2) 回転を伴うインフォール運動の発見

45m 電波望遠鏡で観測した母体分子雲コアのうち、複数のコアには  $\text{C}^{18}\text{O}$  分子輝線スペクトルに 2 つのピーク (速度成分) が見られることがわかった。S235AB と呼ばれる赤外線クラスタの母体分子雲コアの例を、図 3 に示す。解析の結果、これらの速度成分は、楕円形をした分子雲コア (図 3 a) の長軸方向に対称的に分布し (図 3 b)、さらに短軸方向にはゆるやかな速度勾配が見られる (図 3 c) という特徴があることがわかった。簡単なモデルフィットの結果 (図 3 d-f)、これは、1000 太陽質量の巨大な分子雲コアが全体的に回転を伴うインフォール運動 (重力収縮) をしているとすると、よく説明できることがわかった。このような回転を伴うインフォール運動は孤立した小質量原始星の周囲ではよく見られるが (例えば、Ohashi et al. 1997)、クラスタを形成する 1000 太陽質量規模の分子雲コアで検出されたのは、世界初のことである。

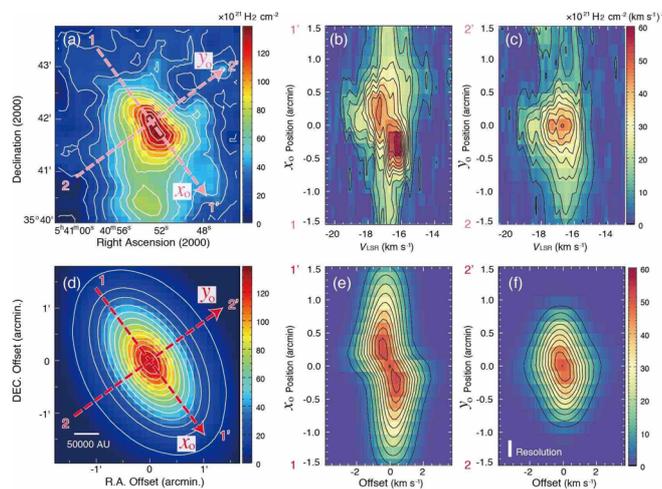


図 3 上段は、野辺山 45m 電波望遠鏡で取得した赤外線クラスタ S235AB の母体分子雲コアの  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) 分子輝線データ。3 つのパネルは、(a) 積分強度から推定した水素分子の柱密度、(b) 線分 1-1' に沿った位置-速度図、(c) 線分 2-2' に沿った位置-速度図である。下段の 3 つのパネル (d)-(f) は、分子雲コアのモデルフィットの結果。

(Shimoikura et al. 2016)

モデルと比較すると、S235AB については、母体分子雲コアの質量降着率は1年当たり  $1 \times 10^{-3}$  太陽質量にもなることがわかった。また、インフォール速度や回転速度は中心星から約6千天文単位の距離まで角運動量が保存される自由落下則に従うが、おそらく中心星からの強烈な星風や分子流の影響のため、それより内側ではより複雑な速度構造をもっていることが示唆された。

図3bのような速度構造の特徴は、観測した天体の約2割に見られる。45m電波望遠鏡で観測した天体数はごく限られたものであるが、おそらく、このような回転を伴うインフォール運動は、クラスタ形成のごく初期段階に現れる現象であると考えられる。今後、他の天体も複数観測し、回転を伴うインフォール運動の普遍性や、クラスタ形成のタイムスケールに関する議論を深めたい。

### (3) まとめと今後の展望

本研究では、2MASS点源カタログに改良したアダプティブグリッド法を適用して、全天で600個近くの赤外線クラスタを検出した。さらに、これらの一部に対して大阪府立大学1.85m電波望遠鏡と野辺山45m電波望遠鏡による分子分光観測を遂行し、その母体分子雲コアが回転を伴うインフォール運動を起こしていることを発見した。

本研究で検出した赤外線クラスタのデータは公開用のカタログにまとめつつあるが、背景の星の数が多い銀画面(銀緯ゼロ付近)では、バックグラウンドのノイズレベルが高すぎて、赤外線クラスタをうまく検出できていないという欠点があることがわかっている。現在、この点を改善すべく、赤外線クラスタの新しい探査法を模索中である。さらに、赤外線クラスタの母体分子雲の速度構造・密度構造については、その時間変化を追跡すべく、数値計算による大規模なシミュレーションを計画している。今後、これらの問題点を克服し、銀河系の主要な星形成メカニズムである星団形成についての理解を、さらに深めていきたい。

## 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9件)

- ① Nakamura, F., Dobashi, K., Shimoikura, T., Tanaka, T., Onishi, T., “Wide-field  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  and  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$  Observations toward the Aquila Rift and Serpens Molecular Cloud Complexes. I. Molecular Clouds and Their Physical Properties”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 837, article id. 154, 15pp., 2017 [査読有り]
- ② Shimoikura, T., Dobashi, K., Matsumoto, T., Nakamura, F., “Discovery of Infalling Motion with Rotation of the Cluster-Forming Clump S235AB and Its Implication to the Clump Structures”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 832, article id. 205, 11pp., 2016 [査読有り]
- ③ Nakamura, F. (他22人、Dobashi, K.は11番目), “Z45: A new 45-GHz band dual-polarization HEMT receiver for the NRO 45-m radio telescope”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 67, article id. 117, 19pp., 2015 [査読有り]
- ④ Shimoikura, T., Dobashi, K., Nakamura, F., Hara, C., Tanaka, T., Shimajiri, Y., Kawabe, R., “Dense Clumps and Candidates for Molecular Outflows in W40”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 806, article id. 201, 19pp., 2015 [査読有り]
- ⑤ Shimajiri, Y., Kitamura, Y., Nakamura, F., Momose, M., Saito, M., Tsukagoshi, T., Hiramatsu, M., Shimoikura, T., Dobashi, K., Hara, C., Kawabe, R., “Catalog of Dense Cores in the Orion A Giant Molecular Cloud”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 217, article id. 7, 28pp., 2015 [査読有り]
- ⑥ Matsumoto, T., Dobashi, K., Shimoikura, T., “Star Formation in Turbulent Molecular Clouds with Colliding Flow”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 801, article id. 77, 21pp., 2015 [査読有り]
- ⑦ Nishimura, A., Tokuda, K., Kimura, K., Muraoka, K., Maezawa, H., Ogawa, H., Dobashi, K., Shimoikura, T., Mizuno, A., Fukui, Y., Onishi, T., “Revealing the Physical Properties of Molecular Gas in Orion with a Large-scale Survey in J=2-1 Lines of  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ , and  $\text{C}^{18}\text{O}$ ”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 216, article id. 18, 24pp., 2015 [査読有り]
- ⑧ Dobashi, K., Matsumoto, T., Shimoikura, T., Saito, H., Akisato, K., Ohashi, K., Nakagomi, K., “Colliding Filaments and a Massive Dense Core in the Cygnus OB 7 Molecular Cloud”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 797, article id. 58, 22pp., 2014 [査読有り]
- ⑨ Nakamura, F. (他26人、Dobashi, K.は5番目), “Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South”, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 791, article id. L23, 5pp., 2014 [査読有り]

[学会発表] (計 11 件)

- ① 下井倉ともみ、土橋一仁、松本倫明、中村文隆、「星団を形成するクランプの力学的進化」、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) (2016 年 3 月 15 日)
- ② 土橋一仁、下井倉ともみ、松本倫明、中村文隆、「クラスターを形成するクランプの回転+インフォール運動のモデル化」、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) (2016 年 3 月 15 日)
- ③ 中村文隆、下井倉ともみ、土橋一仁、Quang Nguyen Luong、Patricio Sanhueza、原千穂美、島尻芳人、ほか星形成レガシーチーム、「星形成レガシープロジェクト: Aquila Rift, Orion A, M17 領域の CO 分子雲カタログの作成」、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) (2016 年 3 月 15 日)
- ④ 中村文隆、亀野誠二、土橋一仁、下井倉ともみ、谷口琴美、「磁場で支えられた分子雲コアの発見」、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) (2016 年 3 月 15 日)
- ⑤ 亀野誠二、中村文隆、土橋一仁、下井倉ともみ、谷口琴美、「TMC-1 における CCS 分子輝線のゼーマン効果計測検証」、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) (2016 年 3 月 15 日)
- ⑥ 土橋一仁、下井倉ともみ、亀野誠二、中村文隆、谷口琴美、「ゼーマン効果検出を念頭においた TMC-1 の CCS/HC<sub>3</sub>N の OTF 観測」、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) (2016 年 3 月 15 日)
- ⑦ 土橋一仁、下井倉ともみ、Deborah Paradis、Jean-Philippe Bernard、「おうし座分子雲に付随する冷たい HI ガスの定量」、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 (山形県・山形市) (2014 年 9 月 11 日)
- ⑧ 下井倉ともみ、土橋一仁、中村文隆、川邊良平、島尻芳人、西谷洋之、杉谷光司、原千穂美、田中智博、「W40 に付随する分子雲の <sup>12</sup>CO(J=3-2) 及び HCO<sup>+</sup>(J=4-3) 観測」、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 (山形県・山形市) (2014 年 9 月 12 日)
- ⑨ 落合哲、土橋一仁 (他 22 人)、「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 45GHz 受信機 (Z45) の試験観測」、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 (山形県・山形市) (2014 年 9 月 12 日)
- ⑩ 片倉翔、山日彬史、秦野義子、下井倉ともみ、土橋一仁 (他 5 人)、「星形成レガシープロジェクト IV. 大質量星形成領域 DR21 の分子輝線観測」、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 (山形県・山形市) (2014 年 9 月 12 日)
- ⑪ 澤村将太郎、土橋一仁 (他 9 人)、「1.85m 電波望遠鏡による銀画面分子雲の広域探

査 IV]、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 (山形県・山形市) (2014 年 9 月 12 日)

[その他]

ホームページ等

東京学芸大学天文学研究室

<http://darkclouds.u-gakugei.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土橋 一仁

(DOBASHI Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176

### (2) 研究分担者

梅本 智文

(UMEMOTO Tomofumi)

国立天文台・電波研究部・助教

研究者番号：30290886