

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540233

研究課題名(和文) 赤外線暗黒星雲の磁場構造の研究

研究課題名(英文) Studies of Magnetic Field Structures in Infrared Dark Clouds

研究代表者

杉谷 光司 (Sugitani, Koji)

名古屋市立大学・システム自然科学研究科・教授

研究者番号：80192615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：赤外線暗黒星雲は、近年、宇宙望遠鏡による大規模な赤外線サーベイにより多数存在することが明らかにされた天体であり、今まで知られている星間分子雲の進化段階の初期にあり、大質量星や星団の初期形成条件を探る上で重要な天体である。このため、ミリ波の分子輝線観測や連続波観測により分子ガスの密度や運動などが調べられている。しかし、天体現象では一般に重要と考えられている磁場を調べた研究はほとんどない。そこで、複数の赤外線暗黒星雲の近赤外線偏光観測を行い、そのフィラメント構造と磁場の関係を調べた。その結果、2領域でフィラメントは磁場に垂直で赤外線暗黒星雲の進化・構造が磁場の影響を受けている可能性の示唆を得た。

研究成果の概要(英文)：Infrared dark clouds (IRDCs) have been recently recognized by spaceborne, infrared surveys. They are considered to be in the early evolutionary stage of molecular clouds and to be good targets to examine the initial conditions of massive star/cluster formation. There are many molecular-line and continuum observations in millimeter wavelengths to explore their density structures and internal gas motions, but few observations to explore their magnetic field structures. We have made near-infrared polarimetric observations for several IRDCs with filaments and found that the main filaments are perpendicular to the magnetic field directions deduced from the observations in two IRDCs. This suggests that the magnetic field play a significant role in the evolution and formation of the molecular cloud.

研究分野：天文学

キーワード：国際研究者交流 赤外線暗黒星雲 星間磁場 星間偏光 赤外線観測

1. 研究開始当初の背景

飛翔体による赤外線観測技術の進歩により 1990 年代の末に、赤外線暗黒星雲 (IRDCs: InfraRed Dark Clouds) は銀河系の背景放射を遮って中間赤外線でシルエットとして黒く見える天体として発見された。最初、その実態は明らかでなかったが、星形成と関連する天体とは認識されず、ほとんど注目を浴びてこなかった。最近になって、スピッツァー宇宙望遠鏡により驚くほど多くの IRDCs が発見され、形成途中の大質量星や星団が付随したり、柱密度が非常に大きく ($\sim 10^{22}\text{-}10^{23}\text{ cm}^{-2}$)、温度 ($< 20\text{K}$) も低いことも分かってきたため、大質量星や星団の誕生候補地として近年非常に注目されるようになった。

IRDCs の際立った特徴は、顕著なフィラメント構造である。オリオン分子雲などの星形成が既にかなり進行したいわゆる星形成領域でも同様の構造が見られるが、それに比べてもたいへん際立っている。このため、IRDCs は現在知られている星形成領域の非常に若い段階に対応するもの (e.g., proto-Orion; Jackson et al. 2008, ASPC 387, 44) で、その初期条件を探ることができる領域として注目されている。

フィラメント構造の形成メカニズムとしては、星間ガスが超新星からの flow などの外圧や磁場による運動制限で分子ガスがシート状になり局所的な重力不安定・収縮によりフィラメント (=磁場と垂直) が形成される説や、乱流衝突によるフィラメント形成説などが考えられる。また、銀河磁場の磁気浮力でガスが持ち上がり磁場にそって沿ってフィラメントが形成される可能性もある。しかしながら、どの説がよいのかはまだ決着がつかないし、複数のメカニズムによる可能もある。

最近の観測によると、IRDCs の中には大質量星の原始星や原始星団 (protoclusters) の兆候を示すものもあることが報告されているが、空間的に広がった顕著な HII 領域などは付随していないため、依然として星形成領域の非常に若い段階にあると考えられている。このため、星形成・星団形成領域の初期条件を探るのには絶好の対象とされ、多くの観測がミリ波連続波や分子輝線でなされている。実際に、大質量星/星団を形成するのに十分な質量や重力収縮条件を満たす分子雲が IRDC フィラメントの中に存在することが示されている。

2. 研究の目的

上記のように IRDCs は分子雲の初期進化段階にある天体として注目されているが、天体現象において重要と考えられている磁場の本格的な観測が IRDCs に対してほとんどなされていない。唯一と言えるのは私たちが行った Serpens South 分子雲 (赤外線暗黒星

雲) 南部の近赤外線偏光観測 (Sugitani et al. 2011, ApJ 734, 63) くらいである。この観測結果は磁場がフィラメント構造形成の主な原因であることを示唆するが、これをもって全てのフィラメント構造形成が磁場であると結論することはできない。領域によっては、磁場が弱く乱流が優勢なため磁場整列が観測されない場合もあるかも知れないし、外圧が強い領域もあるかも知れない。また、磁場に沿ったガスの流れが支配的な領域 (=磁場と平行) もあるかも知れない。つまり、多くの IRDCs を系統的に近赤外線偏光イメージにより磁場を調べ、多くの観測例からフィラメントと磁場の関係を調べ、磁場の重要性 (or 非重要性) を統計的に調べるのが是非とも必要がある。

3. 研究の方法

そこで私たちは、系統的に IRDCs の磁場を調べるため近赤外線偏光観測を計画した。

星形成が進行した近傍の星形成領域の分子雲でなく星形成があまり進行していない IRDCs を観測する理由は、星形成が起きて時間が経過すると星からの outflow や形成された大質量星からの紫外線などの影響で元の磁場構造 (磁場の初期構造) が大きく乱されている可能性が高いからである。つまり、フィラメント形成の初期条件を探るのに好都合と考えたからである。また、IRDCs の方向は星間吸収が大きいため可視光に比べて星間偏光を測定する背景星が多数検出できる赤外線偏光観測をすることとした。

観測に用いた赤外線望遠鏡は、南アフリカ天文台サザランド観測所の IRSF1.4m 望遠鏡である。用いた偏光測定装置は、近赤外線 3 色 (J/H/Ks バンド) 同時撮像カメラ (SIRIUS) に偏光測定ユニットを装着した近赤外線偏光撮像装置 (SIRPOL) で、7.7 分角 \times 7.7 分角の視野を持つ。

観測は、平成 24-26 年度に各 2 回合計 6 回行った。観測ターゲットとしては、ミリ波の分子輝線や連続波で既に観測されている IRDCs で比較研究に都合がよいものを優先し、そのようなターゲットが観測できない時間帯には少ない視野でカバーできる比較の見かけの小さい IRDCs を選んだ。また、偏光装置のキャリブレーションや信頼性の確認を行うための観測も平成 25 年度末の観測時に合わせて行った (Appendix of Kusune, Sugitani et al. 2015, ApJ 798, 60)。

4. 研究成果

(1) 観測領域

この研究で観測した赤外線暗黒星雲は以下の通りである。

Nessie Nebula (2 視野)、Serpens South 分子雲北部の未観測領域 (4 視野)、M17SWex

(24 視野)、G011.11-0.12 (5 視野)、G011.36 (1 視野)、G023.60+0.00 (1 視野)、G28.34+0.06 (1 視野)、G032.02+0.06 (5 視野)、G034.43+0.24 (3 視野)、G035.39-0.33 (9 視野)、G304.74+1.32 (12 視野)、G351.77-0.51 (9 視野)。Nessie Nebula はこの研究の前前年度から、Serpens South 分子雲北部は前年から観測を始めているが、周辺部の観測がさらに必要があったために初年度に追加観測を行った。また、IRDC とは認識されていないが一般的によく知られている星形成領域よりは進化段階が若く IRDC に似た領域として比較対象になりうる Serpens Cluster B 領域の観測も合わせて 10 視野の観測を行った。

(2) データ処理・解析

データ処理は注目度が高い領域と考えられる Serpens South 分子雲の北部、M17SWex、G023.60+0.00、G028.34+0.06、G035.39-0.33 (一部のみ) から行った。データの解析も特に注目が高い 2 つの領域を優先して行った。今後順次、他の天体についてもデータ処理・解析を進める予定である。

(3) Serpens South 分子雲の磁場構造

Serpens South 分子雲は、ハーシェル宇宙望遠鏡による遠赤外線観測により詳細に観測された天体 (Andre et al. 2010, AA 518, L102) で、太陽系に最も近い IRDC である (距離約 1200 光年)。この分子雲は、フィラメント構造が顕著で、南部の複数のフィラメントが集まっている所 (ハブ) は星団が形成されつつある領域 (proto-cluster) としてたいへん注目されている (e.g., Gutermuth et al. 2008, ApJ 673, L151)。この研究の期間中に既に公表している南部領域の磁場構造 (Sugitani et al. 2011) と野辺山電波観測で取得した分子輝線 (N_2H^+ : Tanaka et al. 2013, ApJ 778, 34 および CCS, HCN, SiO など) データやハーシェル宇宙望遠鏡データを処理して得た分子ガスの柱密度 $N(H_2)$ のデータを比較研究した。その結果、この領域ではフィラメントの垂直方向に存在する磁場にガイドされてフィラメントが衝突して、高密度分子雲コアができ、星団形成が始まった可能性が高いことを明らかにした (図 1 ; Nakamura, Sugitani et al. 2014, ApJL 791, L23)。

さらにこの研究では、北部領域のフィラメントの顕著な領域をほぼカバーしてその磁場構造を明らかにした。その結果は、南部領域と同じようにフィラメントに対して磁場はほぼ垂直になっていることが分かった。しかしながら、複数のフィラメントが集まった構造は存在するものの、南部の星団が形成されている領域ほど顕著な集中はないことが分かったが、図 2 に示されたフィラメントに

垂直な磁場によりガイドされて将来的に星団形成に至る可能性が示唆される。

(b) triggered cluster formation

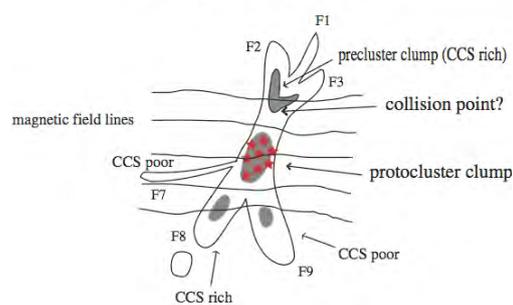


図 1 : 星団形成の概念図。

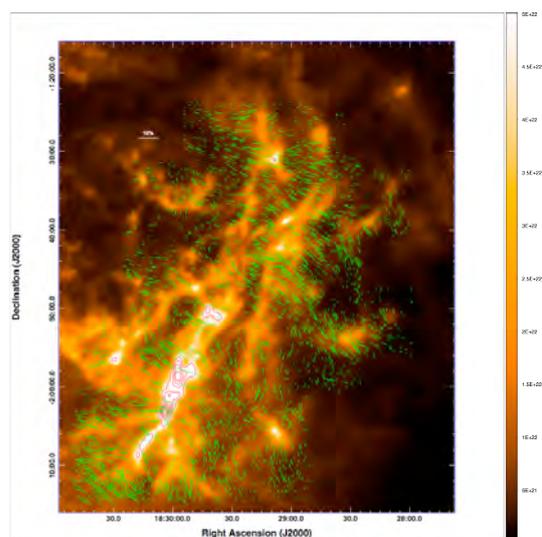


図 2 : Serpens South 分子雲の H バンド偏光ベクトル図。緑色のベクトルの方向が磁場の方向を示す。背景はハーシェル宇宙望遠鏡データを処理して得た分子ガスの柱密度 $N(H_2)$ の図。上が北方向、下が南方向、左が東方向、右が西方向。

(4) M17SWex の磁場構造

M17SWex は、M17 巨大分子雲複合領域の南西に位置する赤外線暗黒星雲で比較太陽系に近い (距離約 6000 光年) ところに存在する。その北東側にはよく知られた巨大分子雲で星形成が活発である M17 (図 3) が、さらにその北東側には既に星形成が終了した M17EB 領域がほぼ一直線に並んで大質量形成のシーケンスを示す領域と考えられている (Povich et al. 2009, ApJ 696, 1278)。実際、M17SWex では大質量の星はまだほとんど形成されていないことが報告されている (Povich & Whitney 2010, ApJL 714, L285) が、質量は大質量星や星団を形成するのに十分な量で、これらの形成初期条件を探るのに適した分子雲と考えられる。

私たちは、M17SWex の主要部分をカバーして近赤外線偏光観測を行った (図 3)。偏光データの解析の結果、この領域でもメインなフィラメントに対して磁場の方向は垂直 (図

4) であり、磁場の影響を受けてフィラメントが形成され、さらにフィラメントが磁場にガイドされて衝突して星団を形成する可能性が高い。実際、フィラメントが衝突し始めている箇所と考えられる場所で、星形成が活発化している兆候が見受けられる。今後、他の観測データと詳細に比較研究をしてフィラメントの衝突の可能性の検証が必要である。

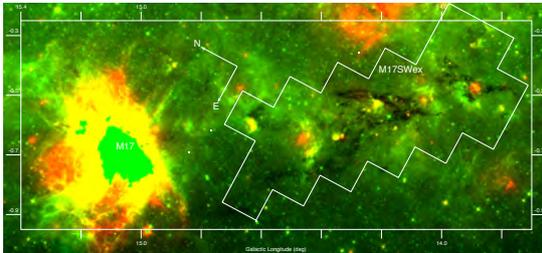


図 3: M17SWex と M17 のスピッツァー宇宙望遠鏡の中間赤外線イメージ。M17SWex の近赤外線偏光観測領域が図中に示されている。北方向と東方向は矢印で表示。

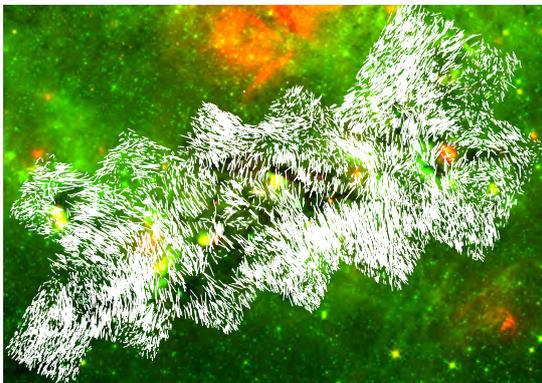


図 4: M17SWex のスピッツァー宇宙望遠鏡の中間赤外線イメージ上に、白色でHバンドの偏光ベクトル (=磁場の方向) が示されている。

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 3 件)

① Kusune, T., Sugitani, K., Miao, J., Tamura, M., Sato, Y.; Kwon, J., Watanabe, M., Nishiyama, S., Nagayama, T., Sato, S, "Near-IR Imaging Polarimetry toward a Bright-rimmed Cloud: Magnetic Field in SFO 74", *Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 798, Issue 1, article id. 60, 16 pp. (2015),
DOI: 10.1088/0004-637X/798/1/60

② Nakamura, F., Sugitani, K., Tanaka, T., et al. (27 人中の 2 番目), "Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South", *Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Volume 791, Issue 2, article id. L23, 5 pp. (2014),
DOI: 10.1088/2041-8205/791/2/L23

③ Tanaka, T., Nakamura, F., Awazu, Y., Shimajiri, Y., Sugitani, K., Onishi, T., Kawabe, R., Yoshida, H., Higuchi, A.E., "The Dynamical State of the Serpens South Filamentary Infrared Dark Cloud", *Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 778, Issue 1, article id. 34, 19 pp. (2013),
DOI: 10.1088/0004-637X/778/1/34

[学会発表] (計 7 件)

① 杉谷光司、中村文隆、楠根貴成、SIRPOL チーム、他、「赤外線暗黒星雲 M17SWex の SIRPOL 観測」、IRSF 勉強会、名古屋大学、2015 年 2 月 20 日

② Sugitani, K., Nakamura, F., SIRPOL Team, "Near-Infrared Imaging Polarimetry of the Serpens South Cloud in Aquila", *Astronomical Polarimetry 2014*, Grenoble, France, 26-30 May 2014

③ 岡田方孝、杉谷光司、永山貴宏、SIRPOL チーム、「団形成領域 Serpens Cluster B の近赤外線偏光観測」、日本天文学会春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 21 日

④ 中村文隆、島尻芳人、西谷洋之、杉谷光司、田中智博、土橋一仁、下井倉ともみ、他星形成レガシーチーム、「星形成レガシープロジェクト IV: 赤外線暗黒星雲 M17 SWex における大質量星形成領域の探査」、日本天文学会秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 日

⑤ 杉谷光司、中村文隆、楠根貴成、SIRPOL チーム、他、「赤外線暗黒星雲 M17SWex の近赤外線偏光観測」、日本天文学会秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 11 日

⑥ K. Sugitani, "Near-IR polarimetric observations of the Serpens South cloud", *Star Formation 2012*, IoA lecture room, Tokyo University, 10-12 December 2012

⑦ 杉谷光司、中村文隆、西山正吾、永山貴宏、渡辺誠、SIRPOL チーム、「赤外線暗黒星雲 Serpens South Cloud の磁場構造」、日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学、2012 年 9 月 20 日

[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：
出願年月日：
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

杉谷 光司 (SUGITANI, Koji)
名古屋市立大学・システム自然科学研究
科・教授
研究者番号： 80192615

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

中村 文隆 (NAKAMURA, Fumitaka)
国立天文台・理論研究部・准教授
研究者番号： 20291354

渡邊 誠 (WATANABE, Makoto)
北海道大学・理学研究院・特任助教
研究者番号： 10450181

永山 貴宏 (NAGAYAMA, Takahiro)
北海道大学・理工学研究科・准教授
研究者番号： 00533275

西山 正吾 (NISHIYAMA, Shogo)
宮城教育大学・教育学部・准教授
研究者番号： 20377948

(4) 研究協力者

楠根 貴成 (KUSUNE, Takayoshi)

岡田 方孝 (OKADA, Masataka)