

機関番号：23903

研究種目：基盤研究（B）海外

研究期間：2008～2010

課題番号：20403003

研究課題名（和文）Tタウリ型星の大規模探査による星団形成の研究

研究課題名（英文）A large-scale search for T Tauri stars toward star cluster forming regions

研究代表者

杉谷 光司 (SUGITANI KOJI)

名古屋市立大学・大学院システム自然科学研究科・教授

研究者番号：80192615

研究成果の概要（和文）：私たちは、ハワイ大学2.2m望遠鏡／広視野グリズム分光撮像装置（WFGS2）を用いてIC1396やCep Bなど星団形成領域でTタウリ型星を大規模に探査し、近赤外線データベースも用いて星形成史を明らかにしつつある。また、若い星団が付随すると考えられるSerpens Cloud CoreやSerpens South星団形成領域で近赤外線偏光観測やCO観測も行い、星団形成において磁場や原始星からのoutflowによる乱流が重要な役割を果たしている可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：We have carried out a search for T Tauri stars on a large scale toward a few cluster forming regions (e.g., IC1396, Cep B) with the Wide Field Grism Spectrograph 2 (WFGS2) mounted on the University of Hawaii 2.2-m telescope to examine their star formation histories. We also have conducted near-infrared polarimetry and/or CO (J=3-2) observations toward young cluster forming regions (Serpens Cloud Core, Serpens South), and suggested that the magnetic field and turbulence from protostars play an important role in cluster formation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	11,300,000	3,390,000	14,690,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙物理、光赤外線天文学、惑星起源・進化、Tタウリ型星、原始惑星系円盤、前主系列星

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 研究の背景

赤外線観測技術の進歩は、分子雲に埋もれた若い星団の存在を明らかにし、恒星のほとんどは星団で誕生することを示した (e.g., Lada & Lada 2003, ARA&A 41, 57; Allen et

al. 2007, PPV, 361)。そして、巨大分子雲の星団中では大質量星を含めてその内の大部分の星が誕生することが明らかになってきた。また、大半の星が星団として形成されることから、星団形成の研究は天文学に於ける最も重要な問題の一つと考えられている初期質量関数 (IMF) の問題に取り組むことでもある。さらに、大質量星は単独で誕生する

のではなく星団の最も質量の大きい方のメンバーとして誕生するため、この問題は大量星は如何にして誕生するかという問題にも深く関係している。しかしながら、星団形成メカニズムについては未だよく分かっていないのが現状であった。

最近のダスト連続波や高密度分子ガス・レーザーによる分子雲コアの大規模高分解能のサーベイの結果によると、分子雲コアの質量分布関数の冪は質量の大きい側（空間分解されている範囲）では IMF の冪と非常に近いことが明らかになった (e.g., Ikeda et al. *ApJ* 665, 1194)。これは、分子雲中のコアの形成過程（質量分布）が IMF に直接関連していることを強く示唆する。また、分子雲コアの質量分布の起源としては、星間ガスの乱流圧縮による乱流分裂が最も有力なシナリオである。つまり、乱流の性質が分子雲コアの形成、延いては星団形成につながっていると考えられる。しかしながら、分子雲中の超音速乱流は分子雲の横断時間程度のタイムスケールで減衰するので、乱流の新たな補給がないと分子雲で星団が一気に形成されることになり現実とは合わない。この問題を解決するために、分子雲中で誕生した星が乱流を供給するという着想は古くからあった (e.g., Norman & Silk 1980, *ApJ* 238, 158) が、星間磁場を考慮し乱流の供給源として原始星からの outflow を考えた現実的な 3次元 MHD シミュレーションが最近行われた (Li & Nakamura 2006, *ApJ*, 640, L187; Nakamura & Li 2007, *ApJ*, 663, 395)。

このシミュレーションでは、分子雲の初期乱流が急速に減衰し一部で密度がしきい値を越えると星が誕生するが、星間磁場が分子雲を支えているため分子雲全体が一気に潰れるのを妨げる。しかしながら、乱流は分子雲の横断時間程度で減衰するために局所的に星が誕生して outflow (乱流)の供給を開始する。時間経過に従って乱流の減衰と供給が繰り返され星が断続的に誕生し、分子雲全体を長期に渡ってビリアル平衡の状態を維持させる。この間、星の数が増えるつれ星形成率 (SFE) は高まる。また、分子雲ガスは徐々に中心に集まり重力ポテンシャルも深くなると共に運動 (乱流) エネルギーが増え、コアもだんだん大きい質量のものが多くなる。進化の初期に誕生した星は浅い重力ポテンシャルと長期間の固有運動で広がった分布を取るが、後で誕生した星は深いポテンシャルと短い経過時間により分子雲に集中したままの状態にあるというものである。これらは、実際の分子雲では全体としてビリアル平衡に近い状態で星形成が起きている事実だけでなく、分子雲コアの質量関数、延いては

IMF の起源や SFE までもうまく説明できる可能性があるたいへん魅力的なモデルであることを示している。また、進化の後期にはより大きな質量のコアが中心で形成されるので、分子雲の初期ガス質量が十分あれば、大量コア/大量星の誕生さえもこのモデルから期待できる。

しかしながら、星団形成の研究はミリ波帯での分子雲コア観測や赤外線での原始星の観測が中心であるが、上記の仮説が正しいとすると、これらの観測は星団形成のスナップショットしか見ていないことになる。非常に若い星だけなら、バースト/トリガー的な星形成でも説明できる可能性がある。つまり、上記の仮説の検証には、いろいろな進化段階にある星団をミリ波や赤外線でも多数観測するだけでなく、過去に誕生した星の年齢と分布も合わせて詳しく調べる必要がある。また、分子雲/星団形成の初期段階の磁場構造や原始星からの outflow が如何にして分子雲を破壊しないで全体を平衡状態に保つかを調べるのが重要である。

## (2) 研究当初までの私たちの取り組み

私たちは、星形成領域に於いての星形成履歴となる Tタウリ型星を深く効率的に探査するため、視野角 11.5'の可視光・広視野グリズム分光撮像装置 (WFGS2) をハワイ大学 2.2m 望遠鏡の専用装置として新たに開発した (Uehara, Nagashima, Sugitani, Watanabe et al. 2004, *SPIE*, 5492, 661)。この装置を用いて、本研究に関連して2つの星団形成領域の観測を行ってきた。

Serpens コアは Serpens 分子雲の北部に位置する活発な星団形成領域であり、原始星とその母体となる高密度コアがたくさん中心付近に集中していることがダスト連続波や Spitzer 衛星の観測から明らかにされている。私たちは、この Serpens コア中心だけでなくその周辺部も含めて H $\alpha$  輝線星 (Tタウリ型星) を深く探査した。その結果、40 個以上の Tタウリ型星を検出した。検出した星の色等級図 (HR 図) を作り若い星の進化モデルと比べその年齢を調べたところ、比較的古い星 (年齢 $\sim$ 100-300 万年)の分布重心は中心付近に持つが周辺部まで広がって分布しているのに対して、若い星 (年齢 $\sim$ 1 万年以下)は原始星のすぐ近くのかなり狭い領域に存在する様子が明らかになった。これは、原始星が中心に密集していることと合わせると、この分子雲では $\sim$ 300 万年の過去から現在まで継続的に星が誕生してきたことが示唆され、上記の仮説でよく説明される可能性が高いことがわかった。

W5-East は O7V 型星によって励起されている HII 領域であり、当初は HII 領域の周囲のブライトリム分子雲での紫外線によるトリガー星形成を調べるが目的であったが、広い視野を生かして励起星方向もカバーした観測を行った。その結果、ブライトリム分子雲方向だけでなく励起星の周囲でも多数の T タウリ型星を検出した (合計約 140 天体)。T タウリ型星の分布は、励起星周囲に若干の広がりを持って集中しており、そこからブライトリム分子雲 (BRC14) 方向に向かって連続的に延びていること (過去の分子雲分布 / 星形成史) が分かった。励起星付近に集中する (OB クラスタに付随する) T タウリ型星の年齢は ~400 万年と見積もられるのに対して BRC14 付近では ~100 万年なので、予想通り O 型星の影響でトリガー星形成が進行して来た様子が明らかになった。ここで興味深いことには、O 型星の年齢はその周囲の T タウリ型星より 100 万年以上若く、T タウリ型星が誕生した後に O 型星が誕生したらしいことも分かった。これは、上記の仮説が予測する後期での大質量コア / 大質量星の誕生を示唆している可能性が高い [Nakano, Sugitani, Watanabe et al., PASJ, 60, 739](#)。この領域では OB クラスタの母体の分子雲は既に蒸発しているが、広がったメンバー (年齢 ~200 万年) を持つオリオン星雲クラスタなどでは大質量星が誕生した直後 (~100 万年) でまだ母体分子雲が周囲に残っている星団形成途中の様子 (W5-East の少し前の進化段階に対応) を見ている可能性がある。

## 2. 研究の目的

これまで若い星団の年齢の研究は、その前提として星団のメンバーは同時または比較的狭い時間範囲内で誕生するという考え方に基づいている (e.g., [Haisch et al. 2001, ApJ 553, L153](#))。これは、赤外線やミリ波観測のデータにバイアスされた結果であり、検証すべきよい星団形成シナリオがなかったことによる可能性が高い。OB クラスタの年齢の見積もりもメンバーの同時形成を仮定して大質量側メンバーのみで決められており、星団内で年齢が異なるなどの認識は全くと言ってよいほどなかったのではないだろうか。本研究では、可視光から得られる過去の星形成情報もバイアスなく取り入れ、赤外線等から得られる現在の情報も最大限生かして、上記の 2 つの領域に加えていくつかの領域で大規模な探査を行い上記の仮説を十分に検証することを目指した。また、機会があれば星団形成領域の磁場構造や乱流供給源 (原始星からの outflow) も調べたいと考えた。

## 3. 研究の方法

本研究では、米国・ハワイ州ハワイ島マウナケア山頂にあるハワイ大学 2.2m 望遠鏡に私たちが開発した広視野グリズム分光撮像装置を取り付けて、スリットレス分光撮像により星団形成領域を大規模に深く観測し、T タウリ型星を多数検出することを目指した。合わせて測光撮像も行うことにより星の年齢と質量の決定も行い、星団形成領域での星形成史の全容を明らかにすることを目指した。そして、上記仮説のシミュレーションが予測するような年齢の幅を持つ星団メンバーが実際に存在するかどうかを確かめることを目指した。

できる限り多くの星団形成領域でたくさんの T タウリ型星の分布と年齢が調べるのが理想であったが、限られた時間や予算だけでなくハワイ大学 2.2m 望遠鏡のスケジュールなどを考慮すると、私たちのグループが資金を得て問題なく確保できそうな現実的な観測夜数は年間 10 夜程度と考えられる。そこで、年間 10 夜の観測時間で 2 年間で完結する研究規模を設定した。しかしながら、地上からの観測は悪天候や観測機器のトラブルなどに遭遇する可能性も高く、また follow-up 観測の必要性も考えて最終年度も 5 夜の観測時間を確保した。

前述したように既に 2 つの星団形成領域で T タウリ型星の探査を行っているが、これらは数夜程度で観測できる規模の領域で分子雲複合体や HII 領域の一部を観測したに過ぎない。本研究では分子雲複合体の全体や HII 領域全体など、小規模研究ではできない規模の観測も含めできるだけ多くの星団形成を観測することを目指した。

初年度は、本研究のハイライトとして HII 領域 IC1396 全体で探査を行った。この領域は、W5 に比べると距離が 750pc と約 1/3 で HII 領域としては比較的近距离なので、OB クラスタ・メンバーの様子が低質量なものまで含めて詳しく調べることができる。これにより、クラスタ内の年齢・分布構造を明らかにして、仮説の詳細な検証ができる可能性がある。また、HII 領域内や周囲の分子雲では、小規模な星団形成も起きている。これは、中心部の OB クラスタ内で最後に誕生した最も質量の大きな星 (IC1396 の主励起星) からの紫外線による誘発星形成も加わっている可能性もあり、たいへん興味深い。また、Serpens 分子雲 (Serpens cloud core) の星団形成領域の近赤外線偏光観測が南アフリカ天文台 IRSF1.4m 望遠鏡と SIRPOL を用いて既に取得

されていたので、ここでの磁場構造を調べるために、データ解析を開始した。

次年度は、IC1396 の大規模探査の完成を目指した。また、もう一つのハイライトとして、当初 W5-West の大規模観測を考えていたが、Spitzer 宇宙望遠鏡で広範囲に若い星が探査され (Koenig et al. 2008, ApJ, 688, 1142)、分光観測も進行中である情報を得たので、W5-West の大規模観測は行わないことにした。代わって、Spitzer 宇宙望遠鏡で広範囲に探査されていない Cep B 星団形成領域を大規模に探査することにした。

最終年度は、前々年度、前年度に行った大規模探査の follow-up 観測だけでなく、ペルセウス分子雲の西側の複数の星団形成領域観測も行った。これに加えて、星団形成の非常に初期段階にあると考えられているフィラメント状の分子雲 (Serpens South 分子雲) で近赤外線偏光観測を南アフリカ天文台 IRSF1.4m 望遠鏡と SIRPOL を用いて行った。さらに、ASTE 10m サブミリ波望遠鏡の観測時間を得ることができたので、CO(J=3-2) 輝線で Serpens South 分子雲の molecular outflow を調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) T タウリ型星の大規模探査

T タウリ型星 (H $\alpha$  輝線星) の大規模探査の観測データは大量であるためまだ一部がデータ解析中であるが、IC1396 に関してはデータ解析が既に完了し、その結果を学術雑誌に現在投稿中である (Nakano, Sugitani, Watanabe et al. 2011, submitted to *Astronomical Journal*)。

IC1396 星団形成領域では領域全体がほぼカバーできる 4.2 平方度で T タウリ型星を探査し、639 個と大量の候補天体を検出した。また、i' バンド測光データを近赤外線データベース (2MASS) を用いて星間吸収補正を行い色等級図 (i' vs. i'-J) を作成し前主系列星の進化モデルと比べた。その結果、IC1396 の中心部には主として年齢 $\sim$ 100-300 万年の星が直線状に分布すること、IC1396 領域の周囲のブライトリム分子雲には年齢 $\sim$ 100 万年以下の星が存在することが分かった。これは、中心部で星団形成が数 100 万年に渡って継続的に起きたことを意味するだけでなく、母体の分子雲がフィラメント状であった可能性を示唆する。また、ブライトリム分子雲に付随する星の年齢が $\sim$ 100 万年以下あることは $\sim$ 100 万年前に IC1396 の主励起星 (この領

域で最も質量が大きな星) が誕生したことを示唆する。これらは、前述 Nakamura & Li (2007, ApJ, 663, 395) モデルが指摘する数 100 万年の長期間に渡る星団形成を支持するだけでなく、星団形成の最後に質量の大きな星が誕生する可能性 (Li & Nakamura 2006, ApJ, 640) を支持するものである。

Cep B 星団形成領域でも約 2 平方度で T タウリ型星を大規模に探査し、763 個の大量の候補天体を検出している。現在まだデータ解析中であるが、3つの分布中心が存在するだけでなく、分子雲表面にも多くの候補天体が存在していることが分かった。ペルセウス座の星団形成の観測データは解析を開始し始めたところである。

##### (2) 星団形成領域の磁場と CO 観測

比較的若い星団形成領域 Serpens 分子雲 (Serpens cloud core) での近赤外線偏光データは、星団形成領域全体に渡ってよく整列した磁場 (比較的強い磁場) が存在することを明らかにしただけでなく、磁場構造は領域全体が準静的に重力収縮をしていることを示す砂時計型であることを明らかにした。さらに、過去に行われた分子輝線などの観測データとこの磁場構造を比べることにより、磁場が急激な重力収縮を妨げているだけでなく原始星からの outflow をガイドしてそのエネルギーの一部を効率よく外部に逃がし、継続的に星団メンバーが誕生するのに貢献していることも明らかにした (Sugitani, Nakamura, Tamura, Watanabe et al. 2010, ApJ, 716, 299)。

非常に若い星団形成領域を伴う Serpens South 分子雲の近赤外線偏光観測の解析結果は、この分子雲のメインフィラメントと垂直に整列した比較的強い磁場が存在することを明らかにした。これは、星団を誕生させる分子雲が比較的磁場が強い環境下で形成された可能性を初めて観測的に示したものである。この結果は、学術雑誌に掲載が受理されこの 5 月 25 日に出版された (Sugitani, Nakamura, Watanabe, et al. 2011, ApJ, 734, 63)。

また、Serpens South 分子雲での CO(J=3-2) 観測では、この領域に存在する複数の molecular outflow を検出に成功して outflow の物理量を求めた。その結果 outflow は、この領域の乱流を維持するのに十分なエネルギーを分子雲に供給しているが、分子雲を破壊するほどは強くないことを明らかにした。この結果も、学術雑誌に掲載が受理され近日中に出版予定である (Nakamura,

Sugitani, et al. 2011, ApJ, in press).

上記の結果は Li & Nakamura (2006, ApJ, 640, L187) および Nakamura & Li (2007, ApJ, 663, 395) のシミュレーションで採用されている比較的強い磁場と outflow による乱流生成が有効であることを示すものであり、磁場と outflow が星団形成に重要な役割を果たしている可能性を強く示唆する。

#### 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 Nakamura, F., Sugitani, K., Shimajiri, Y., Tsukagoshi, T., Higuchi, A., Nishiyama, S., Kawabe, R., Takami, M., Karr, J. L., Gutermuth, R. A., Wilson, G., Molecular Outflows from the Protocluster, Serpens South, Astrophysical Journal, 2011, in press, 査読あり
- ② Sugitani, K., Nakamura, F., Watanabe, M., Tamura, M., Nishiyama, S., Nagayama, T., Kandori, R., Nagata, T., Sato, S., Gutermuth, R. A., Wilson, G. W., Kawabe, R., Near-Infrared Imaging Polarimetry Toward Serpens South: Revealing the Importance of the Magnetic Field, Astrophysical Journal, Vol. 734, 2011, pp. 63-70, 査読あり
- ③ Sugitani, K., Nakamura, F., Tamura, M., Watanabe, M., Kandori, R., Nishiyama, S., Kusakabe, N., Hashimoto, J., Nagata, T., Sato, S., Near-infrared Imaging Polarimetry of the Serpens Cloud Core: Magnetic Field Structure, Outflows, and Inflows in a Cluster Forming Clump, Astrophysical Journal, Vol. 716, 2010, pp. 299-314, 査読あり

[学会発表] (計 6 件)

- ① 中村文隆、A Burst of Molecular Outflows from the Protocluster, Serpens South, ASTE Science Worksho, 2010 年 12 月 27 日、東京大学理学部
- ② 杉谷光司、中村文隆、西山正吾、永山貴宏、渡辺誠、SIRPOL チーム、星団形成領域 Serpens South のフィラメント分子雲と磁場構造、日本天文学会 2010 年秋季年会、

2010 年 9 月 22~24 日、金沢大学

- ③ 仲野誠、杉谷光司、福田尚也、渡辺誠、石原大助、WFGS2 による大規模 T タウリ型星探査 - IC1396 -、日本天文学会 2009 年春季年会、2010 年 3 月 24 日~27 日、広島大学
- ④ 仲野誠、杉谷光司、福田尚也、渡辺誠、IC1396 領域の大規模 T タウリ型星探査、日本天文学会 2009 年春季年会、2009 年 3 月 24 日~27 日、大阪府立大学
- ⑤ Sugitani, K., Tamura, M., Watanabe, M., SIRPOL Team, Near-Infrared Polarimetry of the Serpens Core, Astronomy, Astronomical Polarimetry 2008, Science from Small to Large Telescopes, 6-11 July 2008, La Malbaie, Quebec, Canada
- ⑥ 杉谷光司、星団形成領域の赤外線観測、国立天文台研究集会・NRO ワークショップ共催「第 4 回星形成ワークショップ ALMA, ASTE で切り開く星形成研究の新展開 2、2008 年 6 月 24 日、国立天文台、三鷹市

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

杉谷 光司 (SUGITANI KOJI)  
名古屋市立大学・大学院システム自然科学  
研究科・教授  
研究者番号：80192615

##### (2) 研究分担者

仲野 誠 (NAKANO MAKOTO)  
大分大学・教育福祉科学部・教授  
研究者番号：80198168  
(H20→H21, H22：連携研究者)

##### (3) 連携研究者

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

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