

平成22年5月26日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540242

研究課題名（和文）高密度分子雲コアに付随するTタウリ型星の探査

研究課題名（英文） A Search for T Tauri Stars toward Dense Cores

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）を用いて原始惑星系円盤・太陽系外惑星の研究対象となり得る T タウリ型星を可視光でカタログされた高密度分子雲コアの周りで探査した。50 個以上の高密度分子雲コアを探査した結果、100 個以上の T タウリ型星候補天体を発見した。

研究成果の概要（英文）：We have been conducting a search for T Tauri stars toward optically selected dense cores with the Wide Field Grism Spectrograph 2 (WFGS2) on the University of Hawaii 2.2-m telescope. These T Tauri stars would be unbiased samples for future studies of the protoplanetary disk and exoplanets. We have searched more than 50 dense cores and found more than 100 T Tauri star candidates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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

近年、多数の太陽系外惑星の発見により太陽系のような惑星系が唯一でなく、原始惑星系円盤から誕生する惑星系には多様性があることが明らかになった。この結果は、惑星系形成の始状態である原始惑星系円盤に多様性

があり、それが進化してできた惑星系もこれを反映して多様性があることが示唆された。

最近の T タウリ型星の研究で、若い星団内の T タウリ型星の H α 輝線等価幅を調べると、等価幅の大きな古典的 T タウリ型星だけでなく等価幅の小さな弱輝線星も星団内に多数存在することが明らかになっている。これは、従来から一般的に受け入れられている小質

量星が段階を経て徐々に進化するシナリオ（原始星→古典的Tタウリ型星→弱輝線Tタウリ型星）だけでなく、原始星から早期に弱輝線Tタウリ型星へ進化するシナリオ、すなわち何らかの原因（惑星が早期に形成されるなど）により原始惑星系円盤（少なくとも内側）が非常に早期に消失することを強く示唆するものである。

以上のような状況を考えると、Tタウリ型星の原始惑星系円盤の進化の多様性や惑星形成の多様性（惑星の形成・非形成も含む）を調べるには、天文学の伝統的な手法に従って進化のいろいろな段階にあるスナップショット・サンプルをできるだけ多く得て、これらの観測的事実を総合して多様性を説明できるシナリオを構築する必要がある。

従来、小質量星に付随する原始惑星系円盤の観測的研究は、距離約500光年のおうし座やへびつか座の分子雲のTタウリ型星を詳細に観測することにより主として行われてきた。これら以外の分子雲では、IC348（距離約1000光年）、NGC2264（距離約2600光年）、M42（距離約1500光年）などの比較的距離が遠い若い星団で原始惑星系円盤の統計的な研究やHII領域を背景光とした原始惑星系円盤のイメージング観測（i.e., シルエット円盤の観測）などが行われてきたが、距離が遠いため大望遠鏡／宇宙望遠鏡を用いても個々の円盤を詳しく調べるには観測の角分解能が十分でない。TW Hydraのような非常に近い距離（約200光年）にあるTタウリ型星も知られてはいるが非常に数が少ない。

つまり、今まで知られている近傍のTタウリ型星サンプルだけでは数が十分でなく、多様性を説明できるシナリオを構築するに至っていない。この状況を打開し、さらに研究を進めるためには、より多くのサンプルを得る必要がある。特に、大望遠鏡を用いて原始惑星系円盤の詳細が調査可能な近傍のTタウリ型星のサンプルは重要である。

（2）研究当初までの私たちの取り組み

私たちは、最も近い星形成領域一つと考えられていた高銀緯分子雲MBM12でTタウリ型星のサーベイを行った経験がある。この領域は後に距離約1000光年であることが分かったが、当初は距離約200光年と報告されていたため、私たちを含め国外のいくつかのグループがいろいろな手法で競い合ってTタウリ型星の探査を行っていた。私たちは、この領域での探査を含め近傍の星形成領域でTタウリ型星候補を効率的に深く探すための広視野（11.5x11.5分角）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を開始した。これと同時に進行で、他望遠鏡の既存のグリズム分光撮像装置を用いてMBM12をサーベイし、10

数天体のTタウリ候補天体をこの領域で検出した（Ogura, Sugitani et al. 2003, PASJ 55, L49）。さらに、ここで検出したいくつかの天体に対して野辺山ミリ波干渉計やすばる望遠鏡を用いて探求的詳細観測を行うなどの成果を得た（Itoh, Sugitani et al. 2003, ApJ 586, L141; Itoh, Sugitani et al. 2003, PASJ 55, L77）。

私たちが開発を進めていたWFGS2は、2003年11月のファーストライト（Uehara, Nagashima, Sugitani et al. 2004）および2004年の11月のセカンド・ライト観測を経て完成した。セカンドライト観測では、試験的に4個の高密度分子雲コアをスリットレス分光撮像／i'r'g'測光観測を行った。この観測の目的は、可視光で同定された比較的サイズの小さな高密度分子雲コア（Lee & Myers 1999, ApJS 123, 233）の周囲でTタウリ型星をこれまでになく深く探査することであった。星形成の兆候がある分子雲コアについては、コア中心の近くのかかり若い（年齢約100万年以下）Tタウリ型星の検出を目指した。星形成の兆候がない分子雲コア（星なし分子雲）については、現在の分子コアの親の分子雲で星が過去に誕生した比較的若い（年齢100万～1000万年）ものの検出を目指した。また、両タイプに共通して過去の観測で検出されない低光度のTタウリ型星の検出も目指した。

観測の結果、星形成の兆候がある分子雲コア1天体、兆候がない分子雲コア1天体の合計2天体で3個ずつ計6個のTタウリ型星候補を検出した。ここでTタウリ型星を検出した星なし分子雲コアは、Spitzer宇宙望遠鏡の観測で非常に低光度（or 褐色矮星）の原始星（L1014-IRS）が誕生していることが報告され、その当時たいへん注目されているL1014である。Tタウリ型星候補は、分子雲コアのエンベロープで発見され、年齢約100～1000万年のTタウリ型星と考えられる。この発見は、この分子雲コアの親の分子雲（progenitor cloud）で約100～1000万年前に星形成が起きたことを強く示唆する。ここで驚いたことには、色等級図（若い星の進化トラック）を用いた解析によると、L1014の距離は以前から採用されていた約650光年よりはかなり大きく、すくなくとも1300光年以上である可能性が高いことが明らかになった。これはL1014で形成された原始星の質量の評価に大きな影響を与える結果であり（Morita, Watanebe, Sugitani et al. 2006, PASJ 58, L41）、このような観測は公表されている分子雲コアまでの距離の妥当性や分子雲コアに付随しているかどうかを吟味するのに有効であることが示された。

2. 研究の目的

すばる望遠鏡には、明るい星のすぐ近くの暗い星周構造や伴星（惑星）を検出できる観測装置であるコロナグラフ撮像装置（CIAO）があった。この装置は、オカルティング・マスクにより主星からの強い光の影響を取り除くだけでなく補償光学装置（AO）を同時に使うことにより、より近くで暗い小さな構造（天体）を検出できる他にないユニークな観測装置で、若い星の周りの星周円盤や褐色矮星の研究でよい成果を出している。しかしながら、他の大望遠のAOの性能向上などで、その絶対的な優位性はなくなりつつある。このため、すばる望遠鏡でも36素子の現有AOが188素子にアップグレードされるのを期に、CIAOもすばる次期高コントラスト装置（HiCIAO）へとアップグレードが進行中であった。

このHiCIAOの完成後、既知の代表的なTタウリ型星は再観測等がなされることは間違いない。しかしながら、近傍のTタウリ型星サンプルが多ければ多いほど原始惑星系円盤の多様な進化の理解が深まる。そこで、HiCIAOの本格稼働に合わせて、おうし座やへびつか座の分子雲以外で比較的近距离（主に距離約200 pc）にありTタウリ型星がまだ探査されていない高密度コアに対してTタウリ型星の系統的な探査をWFGS2を用いて行い、北天で比較的近距离のTタウリ型星のサンプルを提供することを目指すことにした。

また、検出した候補天体が真にTタウリ型星かどうかに関しては公開されるSpitzer宇宙望遠鏡データなどのアーカイブデータを有効活用することにした。2010-2011年頃には、他の大望遠にもHiCIAOに匹敵する装置が立ち上がる予定だったので、その前にオリジナルなサンプルに対してHiCIAOによる詳細な観測ができることが望ましいと考えた。

さらに、日本の研究者がこのような研究で主体性を持って研究を進めるには、すばる望遠鏡が使える北天のサンプルで、海外の研究者に先駆けて独自のものを多数持つことが是非とも必要であると考えた。

3. 研究の方法

(1) 観測ターゲットの選択

本研究では高密度分子雲コアに付随するTタウリ型星を探査するので、最初にターゲットとなる高密度分子雲コアを選ぶ必要がある。比較的近傍の高密度分子雲コア（dense cores）がたいへんよくカタログされているのがLee & Myers (1999, ApJS 123, 233)である。このカタログでは、シュミットカメラで撮像された写真乾板をデジタル化したDigitized Sky Survey (DSS) のデータを使

って全天で系統的に既知の暗黒星雲の周囲を調べられ、406個の高密度分子雲コアがピックアップされている。また、ピックアップされた分子雲コアに埋もれた原始星（EYSO）が付随するかどうかはIRAS点源データを用いて調べられている。ここで、EYSOが付随しないものが星なし分子雲コア（starless core）であり、付随するものが星あり分子雲コアである。

Lee & Myersのカタログでは、EYSOの付随する星あり分子雲コアは130個程度あるが、北天（ハワイ）から観測できないものやおうし座などにあり既に探査されているものを除くと約70個程度がターゲットになる。星なしコアも系統的にすべてを探査することが理想的であるが、観測時間の確保の難しさなどの状況を考えるとすべてを探査することは難しい。そこで、探査する星なしコアの数を星ありコアと同じ数の約70個を目指した。また、星あり分子雲コアから優先的に探査した。

(2) WFGS2観測によりTタウリ型星候補天体のピックアップ

太陽のような比較的質量の小さな恒星は、分子雲コアで誕生し、原始星→古典的Tタウリ型星→弱輝線Tタウリ型星→主系列星（恒星）と進化する。この進化過程で、古典的Tタウリ型星は、これに付随する原始惑星系円盤の内側から星の表面（極領域）にガスが降着する途中で衝撃波により高温領域ができ水素ガスの輝線（ $H\alpha$ 輝線）を強く放射する。また、弱輝線Tタウリ型星は、原始惑星系円盤の内側が円盤の進化により既に無くなった状態なので、古典的Tタウリ型星のような強い輝線放射はしないが、星表面の彩層の活動が依然高いため、やはり弱い輝線（ $H\alpha$ 輝線）を放射する。太陽のような恒星は一般に水素は吸収線として観測されるため、水素輝線を示す星を探すことでTタウリ型星の候補天体をピックアップできる。このようにしてピックアップした星は、他の観測データや天文データベースを用いてTタウリ型星かどうかさらに吟味される。

私たちが観測に用いたWFGS2は、一般的な分光スペクトルに加えて分光スペクトルを画像イメージとして画面全体で取得できるスリットレス分光と呼ばれる観測を可能とする可視光の分光・撮像装置である。この装置は、 $H\alpha$ 輝線を効率的に探せる装置で、ハワイ島のマウナケア山にあり観測条件のよいハワイ大学2.2m望遠鏡専用に私たちが開発した装置である。

4. 研究成果

本研究の申請時期の2006年11月に、高密度分子雲コアをWFGS2とハワイ大学2.2m望遠鏡を用いて観測を開始した。

2007年5月には赤経15時から2時の天体で2006年11月の観測では観測できない高密度分子雲コアの観測を行った。2007年8月にもハワイ大学2.2m望遠鏡の合計4夜の観測を行い、一部を赤経16時以降の高密度分子雲コアの観測に割り当てた。また、スターカウントと銀河モデルによる分子雲コアの距離の評価を将来的に容易にするためVバンドフィルターをWFGS2に導入した。

2008年8月に星団形成領域IC1396においてH α 輝線星(Tタウリ型星候補)の大規模探査のために行った2回観測の際に、IC1396の観測高度が十分高くなる前と低くなった後の時間に高密度分子雲コアの観測を合わせて行った。また、IC1396(距離 \sim 2400光年)の探査においては手前に高密度分子雲コア(距離 \sim 500光年)が複数存在するため、この観測では手前にある分子雲コアに付随する候補天体も同時に探査されている。

2006年11月と2007年8月に取得したデータの一部(高密度分子雲コアに紫外線が照射され星が誘発的に誕生した証拠であると考えられるTタウリ型星のデータ)は、学術雑誌に公表した。ここで、連携研究者とも協力して解析手法の確立を行った。

この手法を用いて観測データの一部(約50個の分子雲コア)の解析を試み、2009年3月のThe 2nd Subaru International Conferenceでポスター論文として発表を行った。ここで検出された約100個のTタウリ型星候補天体を色等級図(HR図)を用いて分子雲コアの距離に実際に存在するかどうかを調べたところ、約半数は分子雲の背後にあると判定されたが、残り半数は分子雲コアの距離にあり分子雲コア付随する可能性が高いことがわかった。

2009年8月に星団形成領域IC1396においてH α 輝線星(Tタウリ型星候補)の大規模探査のために行った4夜の観測の際にも、IC1396の観測の前後の時間に高密度分子雲コアの観測を合わせて行った。また、9月に星団形成領域Cep Bを5夜観測した際にも同様に高密度分子雲コアの観測を合わせて行った。

大規模探査に付随して得られたデータは、大規模探査の解析を待つ必要があるものもあり、すべてのデータの解析はまだ完了していない。今後、全てのデータ解析を行い、これらをまとめて、今後の原始惑星系円盤や原始系外惑星研究に利用できるTタウリ型星のカタログを提供したいと考えている。

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2件)

①

Sugitani, K and Watanabe, M., A Search for T Tauri Stars toward Dense Cores, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity: Proceedings of the International Conference. AIP Conference Proceedings, Vol. 1158, 2009, 265-266, 査読なし

②

Ikeda, Hisashi, Sugitani, Koji, Watanabe, Makoto, Fukuda, Naoya, Tamura, Motohide, Nakajima, Yasushi, Pickles, Andrew J., Nagashima, Chie, Nagayama, Takahiro, Nakaya, Hidehiko, Nakano, Makoto, and Nagata, Tetsuya, Sequential Star Formation in a Cometary Globule (BRC37) of IC1396, *Astronomical Journal*, Vol. 135, 2008, 2323-2335, 査読有

[学会発表] (計2件)

①

福田尚也、杉谷光司、渡辺誠、HII領域W5に付随するBRC12における集団的星形成、日本天文学会2009年秋季年会、2009年9月14日～9月16日、山口大学

②

Koji Sugitani, Makoto Watanabe, and WFGS2 Team, A search for T Tauri stars toward dense cores, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, The 2nd Subaru International Conference, 9-12 March 2009, Keauhou, Hawaii, USA

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

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
(H19→H20：連携研究者)

