

ブライトリム分子雲に付随する前主系列星の探査

細谷 謙介¹、伊藤 洋一²

1) 兵庫県立大学物質理学研究科

2) 兵庫県立大学西はりま天文台

Spectroscopic Survey of Pre-Main Sequence stars in Bright Rimmed Clouds

Kensuke HOSOYA¹, Yoichi ITOH²

1) *University of Hyogo, 3-2-1 Kouto, Kamigouri-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1297, Japan* 2) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5313, Japan*

E-mail: hosoya@nhao.jp

(Received 2015 November 30)

概要

我々はブライトリム分子雲に付随する前主系列星の探査を行った。星間物質の密度が高い領域を分子雲という。分子雲と高温の星が隣接すると、その星からの紫外線放射により分子雲が圧縮され星形成が促される。このような分子雲をブライトリム分子雲 (BRC) という。リムは紫外線放射によって変形し、進化することも先行研究で知られている。分子雲の中で誕生する星は前主系列星といい、赤外波長域にエネルギーの超過がみられ、波長 6563\AA に強い $H\alpha$ 輝線を示す。BRC の近赤外波長域の観測研究によって、BRC に付随した前主系列星が同定され、その進化段階が議論された。しかし、近赤外測光観測だけでは全ての進化段階の前主系列星を観測することができず、統計的な議論に不足が生じる。そこで本研究では、先行研究にて観測した領域を $H\alpha$ 輝線を含む波長域で分光観測した。その結果、前主系列星候補天体を 64 天体同定した。各領域での結果を比較すると、分子雲が進化するにつれ $H\alpha$ 輝線天体数が減少することが分かった。これは分子雲が進化する間に $H\alpha$ 輝線天体も進化し、輝線を示さなくなったと考えられる。また、探査した領域では高温の星からリムの方向に $H\alpha$ 輝線天体、リム、近赤外測光観測で同定された星、と並ぶ。さらに、分子雲の進化が進むと $H\alpha$ 輝線天体とリムとの距離は増加する傾向を示した。こうした空間分布の特徴は、BRC は隣接する高温の星に対して後退する方向に進化するという理論予測と矛盾しないと考えられる。

Abstract

We conducted a survey of pre-main-sequence stars associated with Bright Rimmed Clouds. If molecular clouds a high temperature star is located near a molecular clouds, the molecular cloud is compressed by ultraviolet radiation from the star. Such a molecular cloud is called a

Bright Rimmed Cloud (BRC). It is known that the rim changes shape by ultraviolet radiation. Near-Infrared observations of BRCs have identified pre-main sequence stars associated with BRC. In this work, we observed BRCs at optical wavelengths including $H\alpha$ (6563\AA). It is found that the number of stars showing $H\alpha$ emission line decreases as the molecular clouds evolve. The objects are located in order of a high temperature star, $H\alpha$ emission stars, the rim of BRC, the stars identified at near infrared wavelengths. The distance from $H\alpha$ emission line stars to the rim of the BRC tends to increase from the evolved BRCs.

1. 導入

1-1. 星形成領域

星間空間は主に水素原子で構成されたガスや塵などの星間物質で満たされている。この中でも水素が分子の状態であり、 $10^2\sim 10^3$ 個 cm^{-3} 以上の密度である空間を分子雲と呼ぶ。星は分子雲が重力によって収縮することによってのみ形成される。星が形成する過程は主に2つに分けられる。1つ目は自己の重力で分子雲が収縮して星が形成する自発的星形成である。自発的星形成は比較的低質量の星が生まれる事がわかっている。例としておうし座分子雲があげられる。2つ目は、隣接するOB型星からの紫外線放射によって分子雲が圧縮され星形成が促される誘発的星形成である。オリオン座分子雲が代表的な誘発的星形成領域として挙げられる。誘発的星形成過程は Elmegreen & Lada (1977) によって以下のように考えられている。OB型星からの紫外線放射により星間ガスの水素原子が電離し、電離水素から成る HII 領域ができる。HII 領域の境界には電離波面 (イオン化フロント) が形成される。HII 領域の内部のガスは紫外線によって高温高圧になり HII 領域の外側の物質を圧縮する。そのため、電離波面の外側に衝撃波面 (ショックフロント) が形成され HII 領域は分子雲側に広がっていく。最終的に HII 領域と外側の物質が圧力平衡状態となる。この電離波面と衝撃波面が分子雲を伝播することでこの間の層は圧縮され高密度高圧となり、星形成が促される (Figure 1)。

1-2. ブライトリム分子雲 (Bright Rimmed Cloud)

誘発的星形成領域の1つにブライトリム分子雲 (Bright Rimmed Cloud : BRC) がある。BRCは隣接するOB型星からの紫外線放射により HII 領域と分子雲の境界に電離波面が形成され、電離波面が可視で明るく輝いて見える領域のことを指す。全天で 89 天体確認されており Sugitani et al. (1991,1994) によってカタログ化されている。BRCはリムの形によって3つの型に分類されている (Figure 2)。A型はゆるやかなカーブを持つ。 $(l/w < 0.5)$ B型は鋭いカーブを持つ。 $(l/w > 0.5)$ C型は彗星の様な形をしている。

1-3. 前主系列星

生まれてから 10^7 年程度の星を前主系列星と呼ぶ。前主系列星はさらに以下の3つの進化段階に分類することができる。

1. Class I : 分子雲が収縮して原始星になった段階。周囲を濃いガスや塵が覆っている。Class I の段階の天体は原始星の黒体放射に周囲のガスや塵の放射が赤外波長で加わるので、分光観測で得られるスペクトルに赤外波長での大きな超過がみられる。年齢は約 10^5 年である。
2. Class II : Class I 天体がさらに重力により収縮して進化が進んだ段階。この段階になると周囲を覆っているガスや塵が薄くなり、中心星のまわりに原始惑星系円盤を形成する。Class II の段階の天体は赤外超過

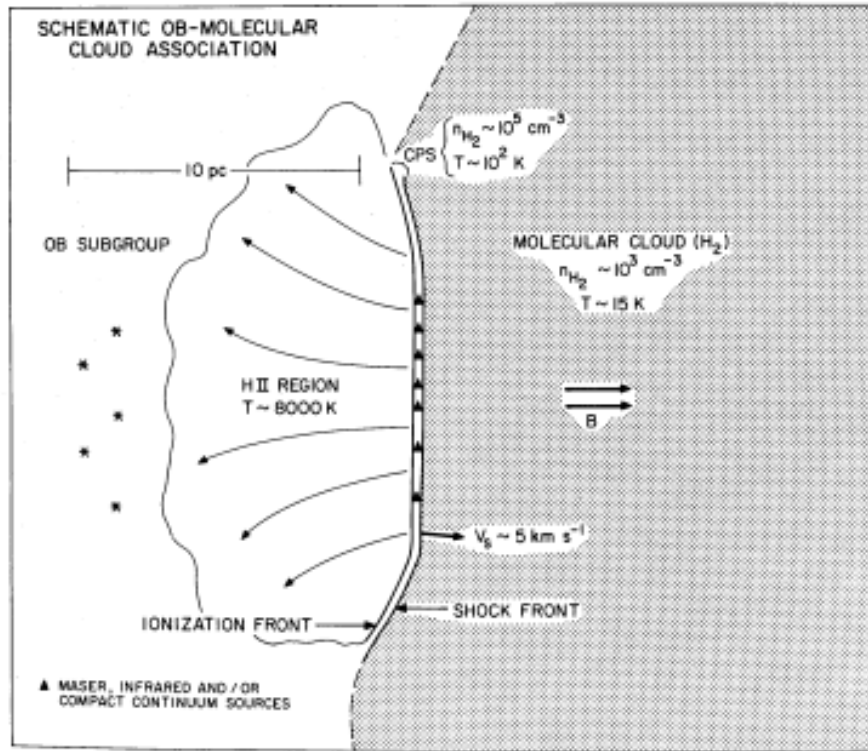


Fig. 1. 誘発的星形成過程の模式図 (Elmegreen & Lada 1977)。図の黒星は OB 型星、黒三角は形成された星を示す。図の左側が HII 領域であり、右側が分子雲である。

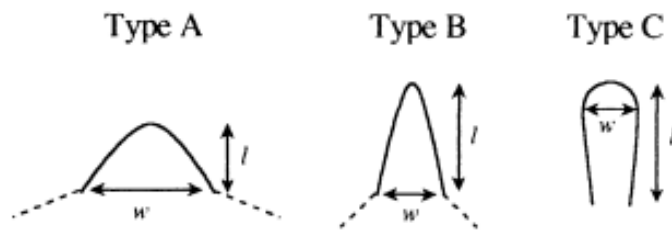


Fig. 2. BRC の形の分類 (Sugitani et al., 1991)

を示す。また、円盤から中心星への質量降着を示す $H\alpha$ 輝線が強くみられる。年齢は約 106 年で、この段階の星を古典的 T タウリ型星 (CTTS ; Classical T Tauri Star) と呼ぶ。

3. ClassIII : 周囲のガスや塵がなくなり、中心星の周りの円盤もほとんどなくなった段階。ClassIII の段階の天体はほとんど赤外超過を示さないが、弱い $H\alpha$ 輝線を示す。年齢は約 107 年で、この段階の星を弱輝線 T タウリ型星 (WTTS ; Weak line T Tauri Star) と呼ぶ。

1-4. ブライトリム分子雲の先行研究

(a) ブライトリム分子雲の進化 (*Miao et al., 2009*)

OB 型星から紫外線放射を受けた分子雲の形の変化を様々な条件を加えてシミュレーションを行っている。ブライトリム分子雲は A 型から B 型を経て C 型に進化すると述べている。

(b) ブライトリム分子雲にの近赤外撮像探査 (*Hayashi et al., 2011*)

32 個の BRC について近赤外測光観測を行い、近赤外超過に基づく 2114 個の前主系列星候補天体を発見した。また BRC が A 型 \rightarrow B 型 \rightarrow C 型と OB 型星から後退することが観測結果により確認された。

2. 研究手法

2-1. 先行研究との比較

Hayashi et al. (2011) では近赤外波長での BRC の観測が行われた。この研究では BRC 領域計 32 天体において、赤外超過に基づいて 2114 個の前主系列星候補天体を同定した。また各領域の前主系列星候補天体の空間分布から、BRC での星形成の統計的な議論を行った。しかしこの手法では、赤外超過を示さない ClasII 天体と ClassIII 天体を同定することができないので統計的な議論に不足が生じた。

2-2. 本研究の特色

そこで本研究では前主系列星の原始惑星系円盤から中心星への質量降着を示す $H\alpha$ 輝線に注目して、 $H\alpha$ 分光観測を行う。この観測により、先行研究で不足していた ClasII 天体と ClassIII 天体の数と空間分布が得られ、完全な統計的議論をすることができる。

2-3. 観測手法

観測はインドの IUCAA Girawali 観測所において主鏡 200 cm 望遠鏡の分光撮像装置 IFOSC (IUCAA Faint Object Spectrograph & Camera) を用いて行った。IFOSC は $2k \times 2k$ 素子を持ち、 $10.5' \times 10.5'$ ($2048\text{pixel} \times 2048\text{pixel}$) の視野で観測ができる。またピーク波長が 6000\AA 、波長範囲が $5200 \sim 10300\text{\AA}$ 、分解能が $\Delta\lambda = 9.2\text{\AA}$ の IFOSC5 グリズムと $H\alpha$ 狭帯域フィルターを使用した。観測領域は観測日に観測可能であった BRC15、17~19、21、23~29、45 であった。

3. 解析

IFOSC で得られた撮像データから $H\alpha$ 輝線を示す天体を同定する流れは以下のとおりである。

Table 1. 観測した BRC が付随する HII 領域。地球からの距離、ブライトリム分子雲の型、BRC の座標。

BRC Number	HII region	distance (pc)	Rim type	α (2000)	δ (2000)
15	S236 (IC 410)	3600	B	05h23m30.1s	+33°11' 54"
17	S264 (λ Ori)	450	A	05h19m48.9s	+12°05'24"
18	S264 (λ Ori)	450	A	05h44m29.8s	+09°08'54"
19	S277 (IC434)	400	A	05h34m30.7s	-02°38'12"
21	S277 (IC434)	400	A	05h39m41.3s	-03°37'12"
23	S249	1900	A	06h22m58.7s	+23°09' 58"
24	S275 (NGC2244)	1400	B	06h34m55.4s	+04°25'14"
25	S273 (NGC2264)	910	B	06h41m03.3s	+10°21'59"
26	S296 (CMa OB1)	990	A	07h03m47.2s	-11°45'47"
27	S296 (CMa OB1)	990	A	07h03m58.7s	-11°23'19"
28	S296 (CMa OB1)	990	A	07h04m43.4s	-10°21'59"
29	S296 (CMa OB1)	990	A	07h04m52.4s	-12°09'26"

1. V バンド画像の解析

- 1 次処理
- 星の座標の検出

2. 分光画像の解析

- 1 次処理
- 個々の星のスペクトルの切り出し
- $H\alpha$ 輝線をもつスペクトルの自動検出
- 目視による輝線スペクトルの確認

3-1. V バンド画像の解析

(a) 1 次処理

天体撮像データには天体からの情報の他に、機器特有の感度のムラや撮影環境によるノイズが混ざる。これらのノイズを取り除き天体からの信号を際立たせる処理を 1 次処理という。本研究では感度ムラの補正のみを行った。

(b) 星の座標の検出

V バンド撮像データでは星は点源として写る。Astromatic.net の Source Extractor というソフトを用いて、星の画像内での座標を検出する。Source Extractor は点源のピークの座標を検出する機能がある。Figure 3 は V バンドでの撮影画像である。



Fig. 3. V バンドでの撮像データ

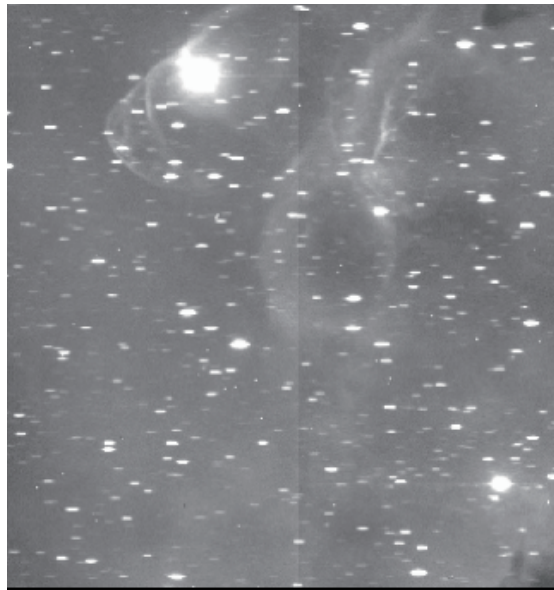


Fig. 4. (上) 分光撮像データ、(下) 分光撮像データから切り出した星のスペクトル

3-2. 分光画像の解析

(a) 1次処理

Vバンドの画像の解析と同様に感度ムラの補正のみ行う。

(b) 個々の星のスペクトルの切り出し

スペクトルは Figure 4 上のように線として写る。3-1-(b) 章で検出した座標に基づいて一定の範囲を切り出すことで個々の星のスペクトル画像を得る。Figure 4 下は切り出した星のスペクトルである。

(c) H α 輝線を持つスペクトルの自動抽出



Fig. 5. H α 輝線を持つ星の分光画像

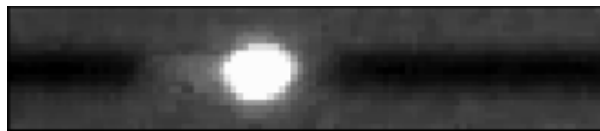


Fig. 6. Figure 5 に対して colbias タスクをかけた画像



Fig. 7. 背景星のスペクトル画像

切り出された個々の星のスペクトルはすべての領域を合わせると数千にもおよぶため本研究では H α 輝線を持つスペクトルの自動抽出を行う。はじめに IRAF 上で個々のスペクトルに対し colbias タスクを使用し、列方向の明るさの平均をスペクトル画像から引く。これによって画像内において輝線の部分が連続光の部分より際立つ。

次に Source Extractor を用いて、際立たせた輝線の座標を検出する。撮像に H α 狭帯域フィルターを使用しているので輝線として検出された座標は、切り出しの誤差を考慮してもある一定の範囲に入るはずである。本研究では切り出した画像の左から 41~46 ピクセル内に座標が検出されたスペクトルを、H α 輝線をもつスペクトルとして自動抽出を行う。

(d) 目視による輝線スペクトルの確認

スリットレス分光では、分光画像に 0 次光が混入する。これにより自動抽出結果に誤検出が生じてしまう。正確な分類のため自動抽出された H α 輝線を持つと思われるスペクトル画像をひとつひとつ目で確認する。

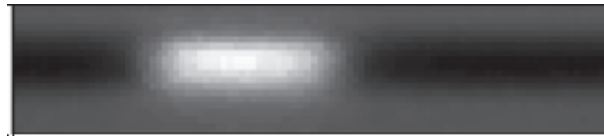


Fig. 8. Figure7 に対して colbias タスクをかけた画像

Figure 9、10 は 0 次光の分光画像と実際に $H\alpha$ 輝線をもつ天体の分光画像である。Figure 9 を見るともっとも明るい座標が $H\alpha$ 輝線と同じ場所にあり、誤検出をしてしまう可能性があることがわかる。3-2-(c) 章での自動抽出、3-2-(d) 章での目視による確認の結果を表 2 に示す。

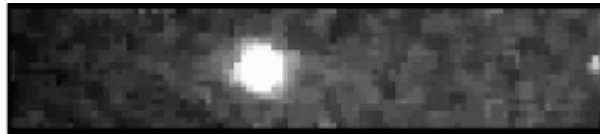


Fig. 9. 0 次光の分光画像



Fig. 10. $H\alpha$ 輝線を持つ星の分光画像

Table 2. 自動抽出と目視による確認の結果

領域	天体数	自動検出した数	目視による H α 輝線天体数
BRC15	6922	981	10
BRC17	1362	91	4
BRC18	3023	542	21
BRC19	341	29	1
BRC21	216	0	0
BRC23	142	0	0
BRC24	2911	279	13
BRC25	1110	98	4
BRC26	2199	81	0
BRC27	2534	221	11
BRC28	464	0	0
BRC29	714	79	0
BRC45	3055	108	3

4. 結果

4-1. 二色図による分類

(a) 二色図

二色図とは横軸と縦軸に天体の異なるカラーをとったものである。二色図を利用するにあたり必要な概念が赤化と赤外超過である。

(b) 赤化

星からの光は星間空間を通過して観測者のもとに届く。星間空間には分子雲や星間塵などが存在し、そこを光が通ると光は吸収・散乱れるために減光する。短い波長ほど大きく減光するため、星からの光は相対的に長波長側が強くなる。この現象を赤化という。赤化を受けるとカラーは二色図上で右上に移動する。赤化を受けていない主系列星や巨星が赤化した方向が背景星の領域である。赤化方向の傾き (E_{J-H}/E_{H-K}) は Meyer et al (1997) の 1.69 を用いた。E は色超過 Color excess を表す。

(c) 赤外超過

前主系列星は周囲に原始惑星系円盤やエンベロープを持つ。これらの中のダストにより星からの光は吸収・散乱されるために減光し長波長側で再放射される。そのため、前主系列星では主系列星と比べて長波長域の放射が増える。この現象を赤外超過という。赤外超過を受ける天体は二色図上で右上に移動する。Meyer et al (1997) により赤外超過していない ClassII・ClassIII 天体のカラーは以下のように求められている (ただし、 $H-K < 1$)。

$$(J - H)_{\text{CTTS}} = (0.58 \pm 0.11) \times (H - K)_{\text{CTTS}} + (0.52 \pm 0.06) \quad (1)$$

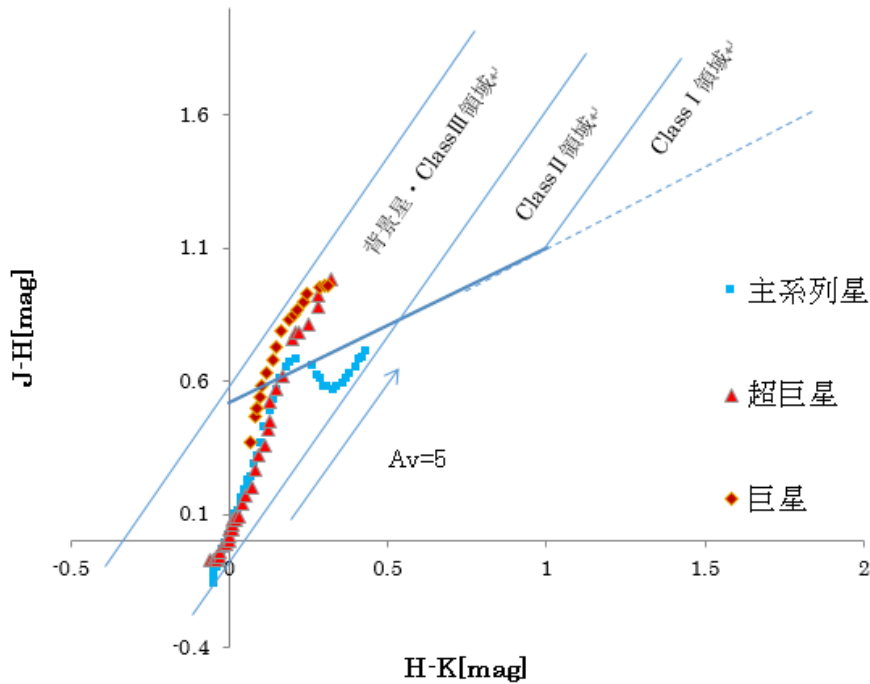


Fig. 11. 二色図 プロットは主系列星および巨星の本来のカラー。矢印は V 等級で 5 等級減光した時の赤化量を示す。

また、ClassII 天体も赤化するためこの直線から赤化の方向に伸ばした領域が ClassII 天体の領域である。ClassI 天体はエンベロープが濃く、ClassII 天体よりも大きな赤外超過を示すので ClassII 領域の右側に位置する。ClassIII 天体はほとんど赤外超過を示さないので主系列星や巨星の領域にプロットされ、背景星と区別することが難しい。

(d) 領域別の二色図

3-2-(c) 章の自動抽出結果により挙げた $H\alpha$ 輝線天体を領域別に Figure14 上にプロットし各 BRC の二色図を作成した。またプロットに用いた JHK の各等級は 2MASS カタログの値を用いた。

(e) 分類結果

二色図による分類の結果、13 の BRC 領域で $H\alpha$ 輝線天体を 67 天体発見した。全ての星は ClassI~ClassIII の領域にプロットするはずだが本研究では右下に大きくずれたプロットが目立った。Hayashi et al (2011) ではこれらの天体を銀河などの広がった天体やサチュレーションを起こしている天体として分類から除外した。本研究でも同様にこれらの天体を分類から外して進める。Table3 に二色図による分類結果を示す。

(f) $H\alpha$ 輝線天体と近赤外超過天体の空間分布

本研究で発見された $H\alpha$ 輝線天体の空間分布を、各 BRC の可視画像上にプロットした。可視画像は DSS2 のデータを用いた。赤い枠が本観測の観測領域であり、緑色の四角が本研究で見つかった $H\alpha$ 輝線天体である。

Spectroscopic Survey of Pre-Main Sequence stars

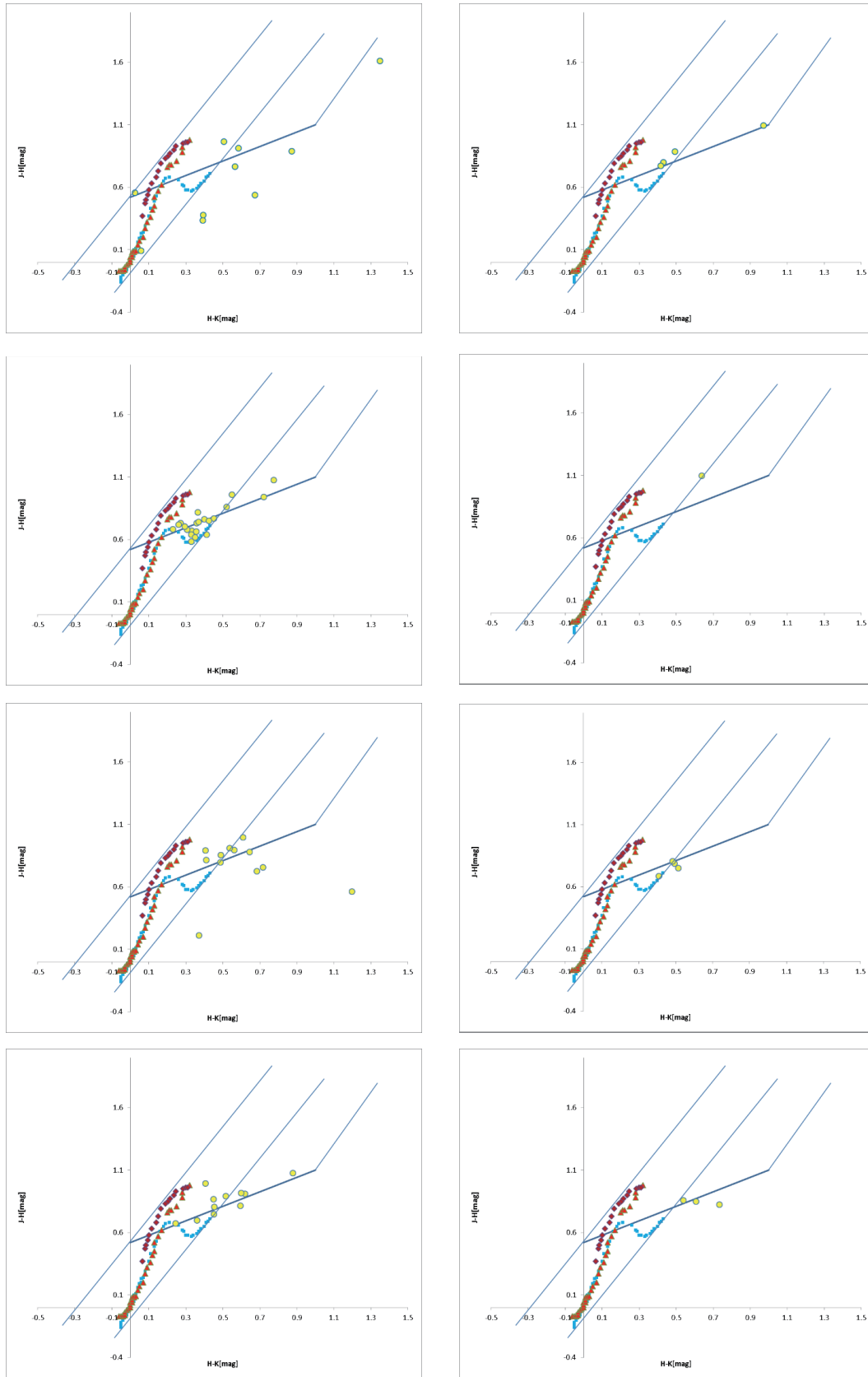


Fig. 12. 各 BRC の二色図。

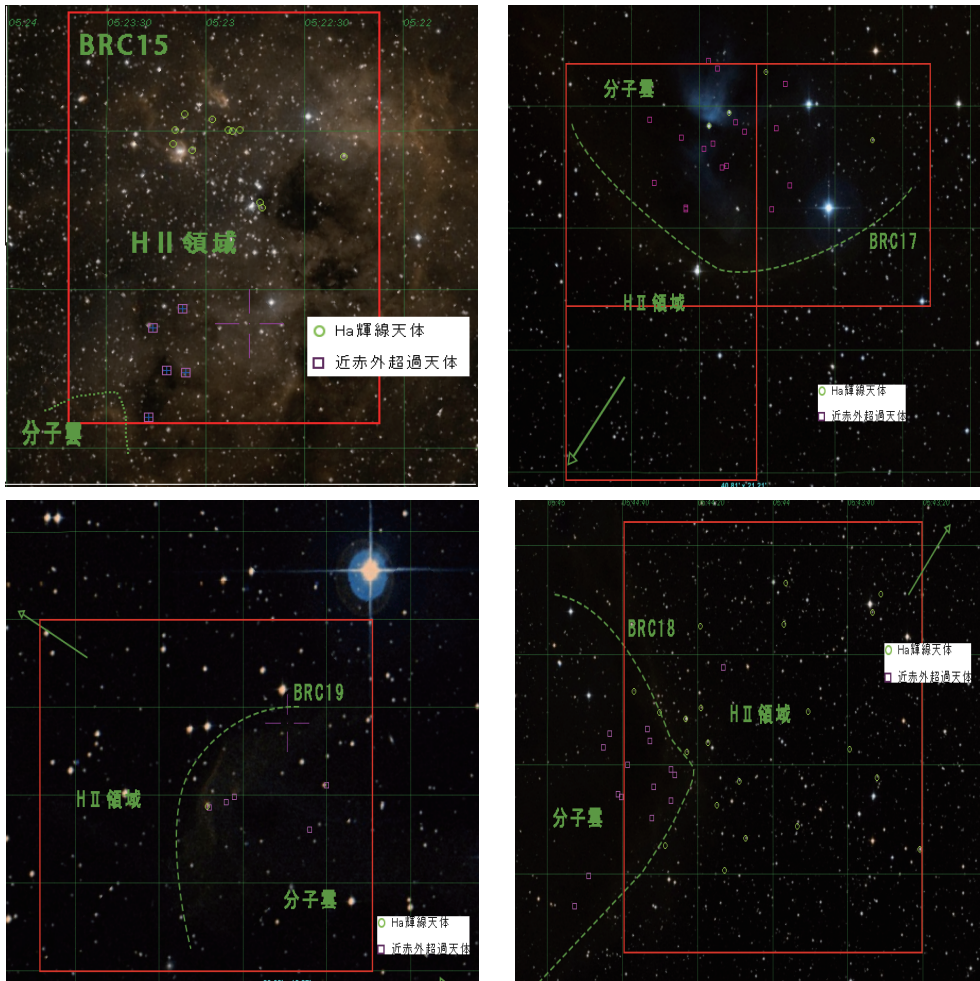


Fig. 13. H α 輝線天体と近赤外超過天体の空間分布。図はすべて同一サイズに縮小されている。

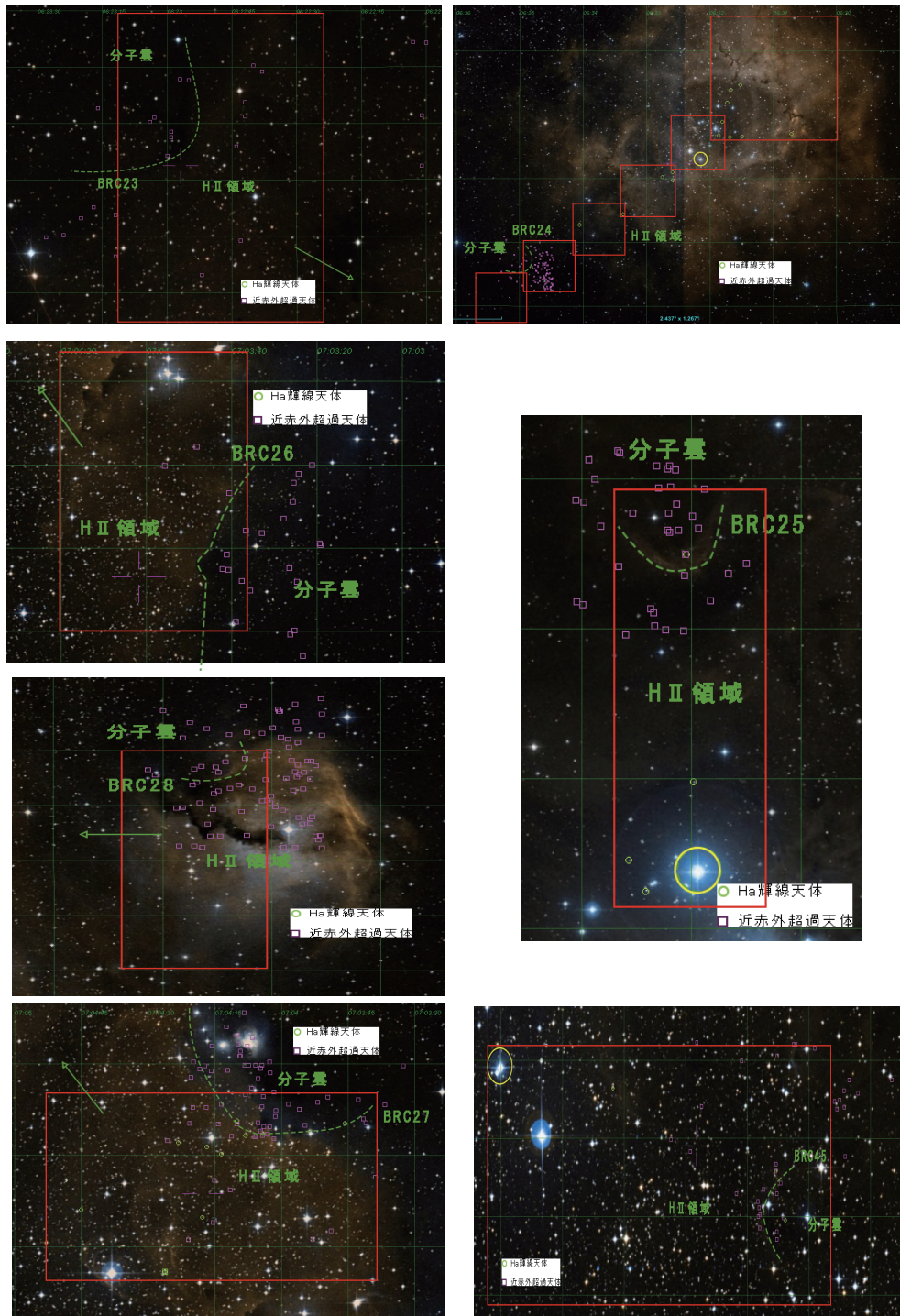


Fig. 14. H α 輝線天体と近赤外超過天体の空間分布。図はすべて同一サイズに縮小されている。

Table 3. 二色図による分類結果

BRC	BRC の型	H α 輝線天体数
15	B	10
17	A	4
18	A	21
19	A	1
21	A	0
23	A	0
24	B	13
25	B	4
26	A	0
27	A	11
28	A	0
29	A	0
45	A	3

なお紫色の四角は Hayashi et al (2011) で発見された近赤外超過天体を示す。緑色の矢印の方向は隣接する OB 型星がある方向を指し、画像内に OB 型星がある場合には黄色い丸で囲んだ。点線がリムである。

5. 議論

本研究の結果から、BRC における星形成の統計的議論を行った。

5-1. BRC の型と H α 輝線天体数の関係

Figure 15 は横軸に BRC の型を、縦軸に H α 輝線天体数をとったグラフである。Hayashi et al (2011) では BRC が A \rightarrow B \rightarrow C と進化するにつれて H α 輝線天体数が減少することを示したが、本研究では観測できた領域が少なかったので相関を示すことができなかった。

5-2. BRC の型と BRC から H α 輝線星までの距離の関係

Figure 16 は横軸に各 BRC を、縦軸に BRC から H α 輝線星までの距離をとったグラフである。このグラフから A 型よりも B 型のほうが、BRC から H α 輝線星までの距離が大きいことがわかる。また空間分布を見ると、BRC の内部から順に近赤外超過を示す天体 (Hayashi et al. 2011) \rightarrow 分子雲のリム \rightarrow 近赤外超過を示す天体 \rightarrow H α 輝線天体 \rightarrow OB 型星と並んでいる BRC が多くみられる。近赤外超過を示す天体よりも H α 輝線天体を示す天体の方が進化しているので、BRC は OB 型星から後退する方向に進化していることが結果から分かった。Hayashi et al. (2011) でも別の視点から同様のことが示されている。

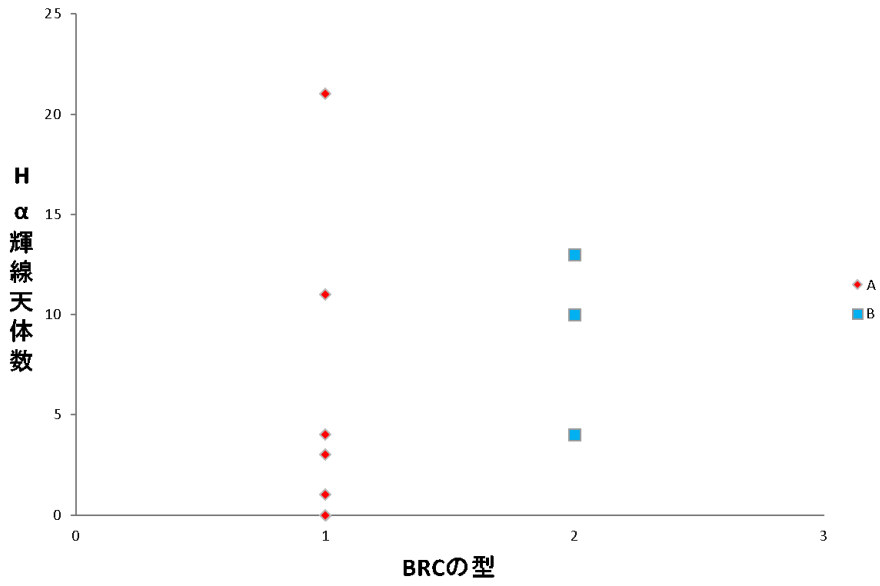


Fig. 15. BRC の型と H α 輝線天体数のグラフ

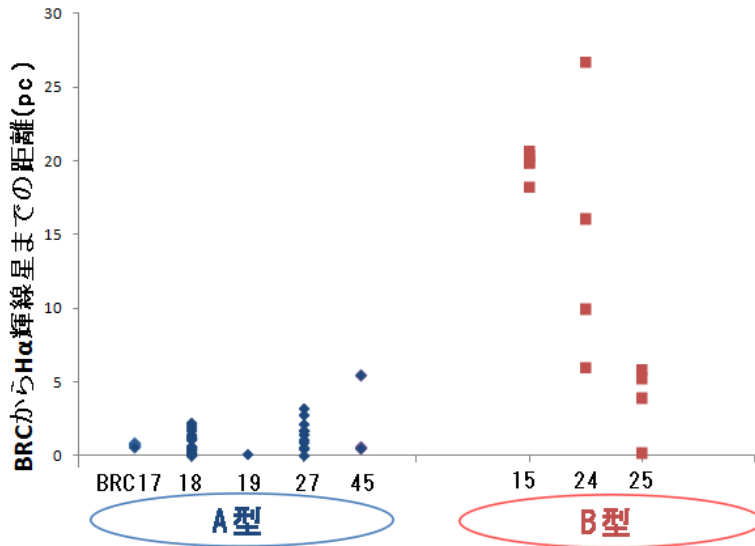


Fig. 16. BRC の型と BRC から H α 輝線星までの距離の関係

6. まとめと今後の課題

本研究では誘発的星形成領域の一つである BRC を対象に $H\alpha$ 狭帯域フィルターを用いたスリットレス分光観測を行った。スリットレス分光は一度に多くの星のデータがとれるため、解析する星の数が数千にも及ぶ。そのため、数千のデータの中から $H\alpha$ 輝線を持つスペクトルを自動抽出できるシステムを考案し利用した。自動抽出結果より挙げた $H\alpha$ 輝線天体を二色図により前主系列星と背景星に分類した。13 の領域を解析した結果、 $H\alpha$ 輝線に基づく前主系列星候補天体を 64 天体発見した。

先行研究で見つかった近赤外超過を示す天体と $H\alpha$ 輝線天体を可視撮影画像上にプロットして空間分布を調べた。その結果、BRC の内部から順に近赤外超過を示す天体 → BRC のリム → 近赤外超過を示す天体 → $H\alpha$ 輝線天体 → OB 型星の順に並んでいる BRC が多いことが分かった。これは、BRC が隣接する OB 型星に後退する方向に進化していることを示した。また、BRC の型と $H\alpha$ 輝線天体数を比較した。先行研究では BRC が進化するのに伴い、前主系列星候補天体が減少する関係にあることがわかったが、本研究では観測できた領域が少なかったため相関を示すことができなかった。今後の研究では C 型の BRC を含めさらに多くの BRC について $H\alpha$ フィルターを用いたスリットレス分光観測をし、BRC における星形成の完全な統計的な議論を行う。

《参考文献》

- Hayashi, M., et al. 2011, PASJ, 24, 96
 Miao, J., et al. 2009, ApJ, 692, 382
 Sugitani, K., et al. 1991, ApJS, 77, 59
 Sugitani, K., et al. 1994, ApJS, 92, 163
 Elmegreen, B. G., Lada, C. J., 1977, ApJ, 214, 725