特集「物質科学的研究・観測的研究で探る惑星系の誕生と進化」

誘発的星形成領域W5-Eastのミリ波観測

丹羽 隆裕[1]

（**要旨**）近年，隕石などの研究から『太陽は大質量星形成領域の誘発的環境下で誕生した』という可能性が指摘されている[1]．我々は，HII領域の周りに存在し，低質量星の誘発的形成が示唆されているブライトリム分子雲について，野辺山45m電波望遠鏡を用いた観測的研究を行っている．本稿では，ブライトリム分子雲を3つ含むW5-East HII領域について紹介する．観測輝線として，比較的低い密度の分子雲まで検出が可能である一酸化炭素の同位体を用いた結果，分子雲の詳細な構造と密度分布や，この領域での誘発的星形成の兆候を得た．また，これまで同定されていなかった領域での誘発的星形成を確認した．

1. イントロダクション

1.1　星形成のモード－自発的星形成と連鎖的星形成

恒星は，水素分子を主成分とする分子雲の中で形成される事が知られている．分子雲は非常に低温（10K程度）で可視光線を放射しない．そのため，電波観測が発達していなかった頃には，可視観測によって暗黒星雲や反射星雲として認識されていた．暗黒星雲はLyndsカタログ[6]がよく知られており，最近では東京学芸大の土橋らによって，全天の暗黒星雲がカタログ化された[3]．近年では，分子雲の研究は主に電波（特にミリ波）で進められ，一酸化炭素の分子輝線などによって，数多くの分子雲が観測されている．

分子雲が収縮し，星が形成されるプロセスは主に2つある．分子雲の収縮が主に自己重力だけで進行する自発的星形成と，外的な要因が分子雲の圧縮を促す誘発的星形成である．自発的星形成は，外部からの影響がなく，自己重力を主な収縮機構として静的な環境下で進行する．太陽系から最も近い星形成領域の一つである『おうし座分子雲』は，典型的な自発的星形成領域として知られている．

一方，誘発的星形成は，分子雲の収縮が外部からの圧縮を受けて進行するモードである．外部からの圧縮の要因になりうるものは，星風や超新星爆発に伴ってできる衝撃波や，大質量星の紫外線による圧縮である．Oort & Spitzerは，大質量星（本稿では，スペクトル型がO型かB型の恒星を指す）が放射する紫外線が周辺の分子雲を圧縮する過程について,『ロケット効果』と呼ばれるモデルを提案した[8]．大質量星は周囲の中性水素原子（HI）ガスを電離して,電離水素領域（HII領域）を形成する．HII領域が時間と共に拡大し分子雲に接すると,分子雲表面の分子が電離される．電離され，運動エネルギーを得た表面の電離ガスは膨張し，分子雲を「土台」にして，ロケットが飛び立つのと同じように，HII領域側に向かって広がってゆく．このとき，運動量が保存されるため，分子雲は内側に向かって圧縮される．

観測的には，オリオン大星雲で，初めて誘発星形成が確認された[4]．この領域では，分子雲から遠ざかるに連れて大質量星の年齢が高くなっていくことが，大局的に明らかになっている[11]．このことから，(1) 分子雲から最も遠く，かつ年齢の高い星団がはじめに

1. 神戸大学大学院自然科学研究科

形成され，(2) その星団からの紫外線による放射が分子雲を圧縮して『第二世代』の星団を形成し，(3)『第二世代』の星団付近の分子雲が散逸，(4) さらに奥側の分子雲が紫外線によって圧縮されて『第三世代』の星が形成されるという，一連の誘発的星形成が提唱された．

初期の観測的研究では，大質量星の星団規模の誘発的星形成に関するものが多くを占めていた．しかし近年では，高感度の近赤外測光観測などにより，太陽質量程度の天体でも誘発的に星が形成されている事が明らかになってきた[7]．このような低質量星の誘発的星形成を示唆する領域の一つとして『ブライトリム分子雲』が挙げられる．

1.2 ブライトリム分子雲

『ブライトリム分子雲（BrightRimmedCloud，以下，BRCと書く）』は，HII領域に接した分子雲の一つで，その境界面（以下，リムと表現する）が可視で明るく輝いている．全天の光学写真乾板と，IRAS（赤外線天文衛星，1985年打ち上げ）の点源カタログから選定した原始星候補天体をもとに，名古屋市立大の杉谷らによって全天で89天体が同定されている[9]，[10]．全てのBRCが原始星候補天体を含んでおり，活動中の星形成領域であることが分かっている．

1.3 研究意義

誘発的星形成は『ロケット効果』の提唱から現在に至るまで，可視，近赤外線，電波など多波長での観測が行われているが，過去の研究は個別の天体に対する観測結果が多く，統計的に議論された研究結果が少ない．そのため，以下のような未解決の問題点が残っている．(a) 誘発的星形成領域で形成される星がどのような質量を持つのかが明らかでない．特に，近赤外線による高感度の測光観測が十分とはいえず，低質量星については検出例が少ないため，誘発的星形成領域での低質量星の形成について，明らかでない点が多い．(b) 誘発的星形成領域での分子雲の進化は，分子雲の密度，質量だけでなく，紫外線源となる大質量星（励起星）のスペクトル型にも依存すると考えられる．なぜなら，スペクトル型が異なると，紫外線量が大きく変わるためである．しかし，複数の誘発的星形成領域を比較研究した例が少ないため，分子雲の進化と励起星スペクトル型との関係が明らかでない．(c) 星形成の活動性を表す星形成効率（星形成領域で検出された若い天体の総質量と，若い天体が付随する分子雲の質量の割合），特に自発的星形成領域との活動性の差について統計的に議論された結果が少ない．

我々の今回の研究では，HII領域周辺の分子雲全体について，分布，形状，密度などの特徴を明らかにするため，3つのBRCが付随するW5-East HII領域（以下，W5-East）を観測対象とした．

2. 観測と解析

2.1 W5-EastHII領域

W5-Eastは距離2kpc，ペルセウス腕に位置し，大局的にはIC1848，またはW3/W4/W5の分子雲複合体の一部である．W5-Eastを形成する主な大質量星は一つ（BD+590578）であり，HII領域はほぼ球形の形を保っている．他のHII領域と比べると，(1) 複数の大質量星に励起されたHII領域と比較して構造が単純，(2) 中心の励起源から分子雲までの距離がほぼ等しく，どの分子雲も中心星から浴びる単位面積あたりの紫外線量を同程度と見積もって議論できる，などのメリットを持つ．

W5-Eastは過去にも観測が行われているが，領域がBRC付近に限られていたり，低い分解能によるサーベイしか行われていない[2]，[5]，[12]など，領域全体での大局的な連鎖的星形成や，分子雲の詳細な密度構造などを明らかにできなかった．

2.2 観測

我々は，2005年の1月と4月の計14日間，国立天文台

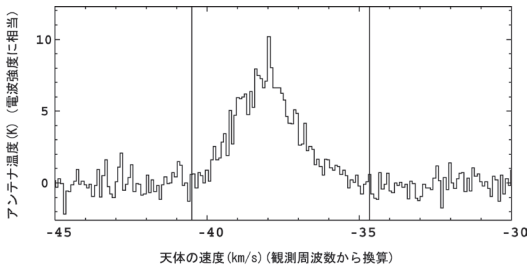

図1：観測で得られたスペクトルの例．大気や観測装置由来のゆらぎは除去してある．横軸は輝線の周波数を天体の速度に変換したもの，縦軸は『アンテナ温度』と呼ばれ，電波強度を温度に換算した値である．中心部が ^{13}CO 輝線である．

野辺山45m電波望遠鏡を用いた観測を行った．観測装置は，BEARS（BEam Array Reciever System）と呼ばれる，25素子のマルチビーム受信機を用いた．これはいわば「25素子の電波カメラ」であり，一度に観測できる素子数としては世界最大である．観測に用いた分子輝線は，比較的低密度の分子雲をよくトレースするとされている一酸化炭素の同位体の^{13}CO(J=1−0)と，分子雲内部でも特に「分子雲コア」と呼ばれる高密度領域を検出可能な$C^{18}O$（J=1−0）である．観測ではまず，分子雲の分布を探るため，^{13}COを用いてW5-East全体（1°×0.6°，観測点数は約5800点）の観測を行った．その後，分子雲の密度が高い部分(約600平方分，観測点数13000点）に限って，分子雲コアの詳細な分布を得るため$C^{18}O$での観測を行った．

2.3　解析

解析は，野辺山で開発されたソフト『NewStar』を用いる．図1は^{13}COのスペクトルの一例で，大気や観測装置由来のスペクトルの「ゆらぎ」を除去してある．中心部が一酸化炭素の輝線である．解析では，観測のノイズレベル（1σ）を決定し，さらに『積分強度』を求める．積分強度とは，スペクトルから輝線のみを取り出し，速度方向に積分（輝線部分の面積を求める事に相当）した電波強度を指し，単位はK km/sで表される．求められた積分強度から，柱密度，質量など

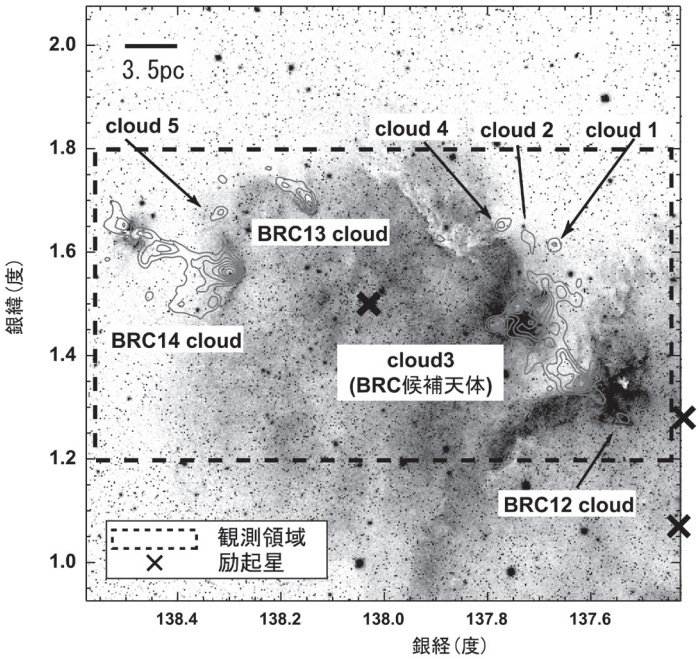

図2：W5-East 全域での ^{13}CO 電波強度 (灰色のコントア) と可視画像の重ね合わせを示す．コントアは 5σ（2.725Kkm/s）から 1σ おきに描画．ブライトリムの付随する分子雲（3 天体，BRC12-14cloud)，付随しない分子雲（4 天体，cloud1, 2, 4, 5)，cloud3 の計 8 個の分子雲を同定した．

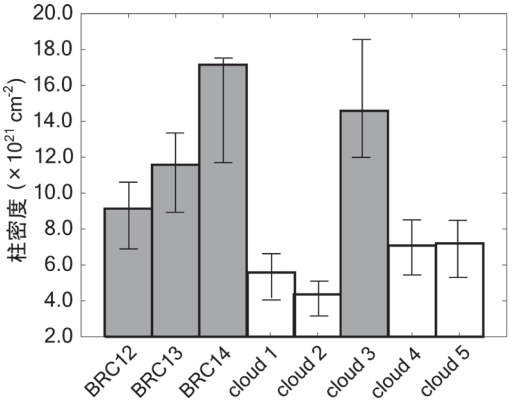

図3 ： 各分子雲の電波強度が最大の点について^{13}CO柱密度の比較したグラフ．横軸は分子雲の名前，縦軸は，^{13}COの柱密度を水素分子の柱密度に換算したものを示す．分子雲 の温度（励起温度）は30Kを仮定し，±10Kでの柱密度の差をエラーバーで示す．可視でリムが確認された天体は灰色で示す．

の計算を行う．

3. 結果と考察

3.1 分子雲の分布

この領域において私たちは「^{13}COの積分強度2.725 K km/s（水素分子の柱密度換算で1.6×10^{21}cm^{-2}に相当）のコントアで囲まれた領域」を分子雲と定義し，合計8個の分子雲を同定した．8個のうち3個はブライトリムが付随しており，それ以外の5つはブライトリムの付随しない分子雲である．図2は，W5-Eastの分子雲の分布をコントアで表したものである．背景には，可視観測のデジタルアーカイブ（DSS）を用いた．可視光線の強い部分が黒，弱い部分が白く表示されている．図2の中央で，可視光線が強く黒く表示された部分がHII領域を表しており，中心部には励起星が存在する．また，可視観測と電波観測の結果を比較すると，可視光線が弱く，星が少ない領域に，^{13}COの電波強度が強い部分が集中しており，分子雲がほぼ球殻上に分布している事も分かる．

それぞれの分子雲に注目してみると，ブライトリムを伴う分子雲（特にBRC13, 14）では，HII領域に接した部分でコントアが密に分布しており，密度勾配が急激な事を示している．密度勾配が急な部分は全て励起星に向いている事から，紫外線の照射による圧縮の効果が働いている事が考えられる．個々の分子雲の質量は30-2600太 陽質量，観測した領域の分子雲の総質量は5600太陽質量であった．また，BRCの密度の状態を比較するため，(a) 可視で明るいリムを持つ分子雲（図3，灰色のグラフ）と，(b) 持たない分子雲（白色のグラフ）にグループ分けして^{13}COの柱密度を比較し

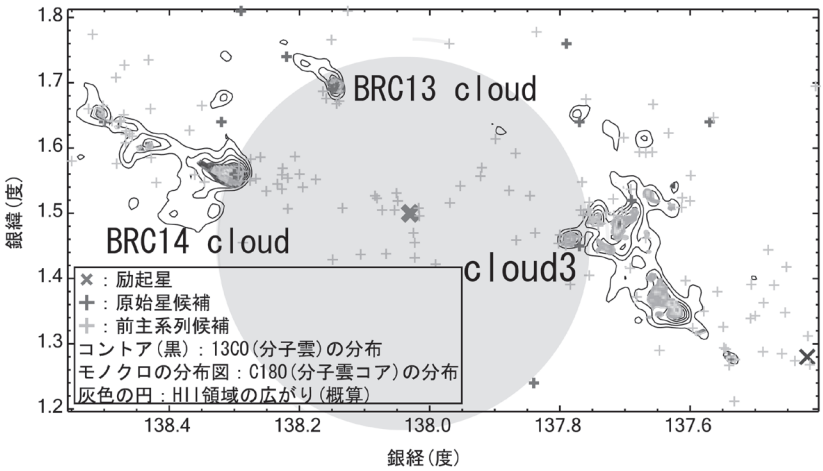

図 4： YSO の空間分布と分子雲の空間分布．モノクロで示した分布が C^{18}O で 0.66（K）(3σ）以上の積分強度に対応し，1σごとに色が変わるように描画．十字は若い天体の候補と励起星を示す．詳細は図中を参照のこと．

た．その結果，(a) 中で最小の柱密度のBRC12と，(b) のグループで最大の柱密度を持つcloud5では，約20%，全体の平均で（a）と（b）の間には2倍，柱密度に差があることが分かった．このことから，W5-EastのBRCでは，リムを持つ分子雲のピークでは，紫外線による圧縮の影響を受けて密度が高まっている事が考えられる．

3.2　分子雲コアの分布

図4のモノクロの分布図は，$C^{18}O$で検出した『分子雲コア』を示したものである．中心部の灰色の円は，HII領域のおよその広がりを示している．分子雲コアの多くは球状で，^{13}COの電波強度が高い部分に集中している．このことから，^{13}COと$C^{18}O$の分布が階層構造になっており，分子雲の密度が高い部分に分子雲コアが存在する事が分かる．特徴的な分子雲コアの構造として，(a) BRC14に付随する分子雲コアは，彗星のような形状を持ち，その一方で，(b) cloud3に付随する分子雲コアは，単一の大きな分子雲コアではなく，より小さな複数のコアが分布がしている．W5-Eastでは，分子雲が励起星を中心としてほぼ球殻状に分布しているため，紫外線の影響が同程度であるならば，(a) と (b) の差は，分子雲周辺の励起環境の違いを示唆していると考えられる．

3.3　若い星の大局的な分布

誘発的星形成を探るためには，分子雲だけでなく，すでに形成された星の空間分布を調べる必要がある．そのために，赤外線のIRAS点源カタログ（12 100μm）と，近赤外線3バンド（1.2μm, 1.6μm, 2.2μm）のサーベイ観測である，2 Micron All Sky Survey (2MASS) の点源カタログを用いて，若い天体の空間分布を調べた．中間〜遠赤外にかけてのIRASカタログからは，年齢10^5年程度で，原始星段階にあると考えられる天体を，近赤外の2MASSからは年齢が10^6年程度で，前主系列段階にあると考えられる天体をそれぞれ選定した．結果を図4に示す．各進化段階の星の分布を見ると，BRCとcloud3のうち，HII領域に面している領域について，原始星候補のIRAS点源は分子雲内に分布し，前主系列候補の2MASS源は分子雲とHII領域の境界付近から励起星にかけて分布していることが分かった．これらの空間分布は『分子雲，IRAS源，（分子雲とHII領域の境界面付近の）2MASS源，励起星』の順に並んでおり，若い星の進化段階を考えれば，これは天体の年齢が分子雲から励起星の方向に向かって高くなっていると考えることができる．よってW5-East全域での星形成は，中心の励起星によって誘発されていると示唆される．

3.4　カタログ化されていないBRC—『BRC候補天体』の同定

Cloud3の突端部分は，明るいリムを持ち[4]，リムを持たない分子雲（Cloud1, 2, 4, 5）と比較して柱密度が極端に高い．また，誘発的星形成を示唆する若い星の分布の様子から，この領域は実質的にはBRCと同じ性質を持つ．このことから我々は，この領域を『BRC候補天体』と同定した．『BRC候補天体』ではIRAS源が確認されているにもかかわらず，BRCと同定されていない．理由として，IRAS源が原始星起源ではない可能性を排除できなかったためと考えられる．仮にこのような天体が他の領域にも存在するならば，BRCのみに注目して観測を行うと，未知の誘発的星形成領域を見落とす可能性がある．これらは今後の観測において，注目すべき点と考えている．

3.5　『BRC候補天体』での星形成—2次的な『連鎖』のはじまり？

『BRC候補天体』は，他のBRCにはない特徴を持つ．この領域の過去の近赤外測光観測の結果から，年齢10^5年程度のゼロ歳主系列星（Zero Age Main Sequence; ZAMS，図5の十字で示す）が3天体付随していることが分かっている[11]．この点が他のBRCとは異なるほか，単一の彗星のような形状をした分子雲コアを持つBRC14に対して，複数個の小さな分子雲

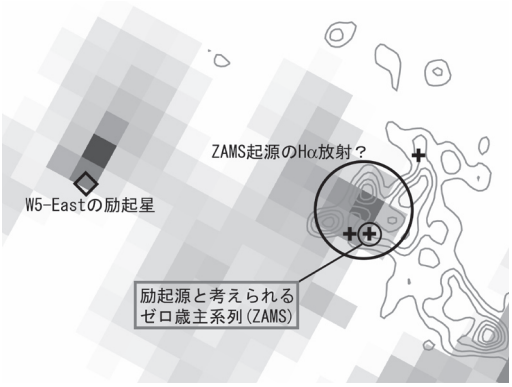

図5 ： H_α輝線の空間分布．灰色のコントアは^{13}CO電波強度である．ZAMSを十字，W5-EastHII領域の励起源をダイヤで表す．ZAMS付近でH_α輝線の強度が大きくなっており，ZAMS起源のUV放射である事が示唆される．

コアが存在する．このことから，W5-Eastが起源でない，別の影響を受けて星形成が進行している可能性を考える．図5は，『BRC候補天体』からW5-Eastの励起星にかけてのH_α輝線（水素原子の励起線の一つで，紫外線の励起によるガスの温度上昇を示唆する）の分布を示している．この領域では，W5-Eastの励起星（図中，ダイヤで示す）付近に強いH_α輝線が確認される．単独の励起星によるHII領域の形成であれば，励起星から遠ざかるに連れて，H_α輝線は弱くなるはずである．しかし『BRC候補天体』内部には，W5-Eastとは別の起源と思われるH_α輝線の強い部分（黒丸で囲まれた部分）が存在し，ピーク付近には，3天体中2天体のZAMSが存在している．これらのZAMS2天体の紫外線量を評価した結果，このうち1天体（図5，丸で囲まれたZAMS）の紫外線量が，W5-Eastの励起星と同等であることが分かり，『BRC候補天体』内部の新しい励起源である可能性が高い事が分かった．これは，W5-Eastの励起で形成されたZAMSが，周囲の分子雲で2次的な誘発星形成を起こしつつある事を示唆している．このように，星団ではなく，単体の天体による『誘発』は過去に研究例が少なく，さらに詳細な観測を行う予定である．

3.6 まとめと今後の展望－誘発的星形成のメカニズムの解明に向けて

本観測では，(a) W5-Eastでの分子雲の詳細な空間分布と柱密度と質量を求め，柱密度について圧縮の影響と考えられる差を発見し，(b) アーカイブデータを用いた若い星の年齢分布を調べ誘発的星形成の兆候を確認した．また，(c) カタログ化されていないBRCでは，2次的な連鎖が始まりつつあることを示した．

本稿で紹介したW5-Eastは，BRCを3天体持つが，統計的な議論を行い，誘発的星形成領域が持つ分子雲の性質や，誘発的星形成領域での星形成効率を議論するには不十分である．また，カタログ化されていない領域でも誘発的星形成の兆候が認められたことから，今後の観測では，BRCに限って観測することは，未知の誘発的星形成領域を見落とす事になりかねない．

そこで我々は，励起環境が異なり，複数のBRCを持つHII領域3天体の周辺について，野辺山45m電波望遠鏡での観測を継続中である．また，2次的な連鎖が疑われた領域については，『第二世代』の励起源になる星を特定するための観測を行う予定である．野辺山45m望遠鏡は，今シーズンから新しい観測手法が導入された結果，観測効率が大幅に向上し，しかも広大な領域を無バイアスで観測できるようになった．現時点で，本研究にはもっとも向いた望遠鏡である．誘発的星形成のメカニズムの解明に向けて，さらに観測を続けたい．

4. 謝　辞

まず，本稿の掲載に対し，有益なコメントを頂きましたレフェリーの皆様に感謝します．私の研究に対して，有益なアドバイスを頂いている指導教官の伊藤洋一氏，COE研究員の立原研悟氏，大朝由美子氏に感謝します．名古屋市立大学の杉谷光司教授には，研究に対する専門的な議論や観測戦略についてお時間を割いていただいております．また，国立天文台野辺山（現

在は水沢VERA観測所）の砂田和良氏をはじめとする野辺山のスタッフの皆様には，観測の手法，観測機器の操作方法，データ処理等，あらゆる面でサポートを頂きました．ここに感謝します．

5. 参考文献

[1] 三木ら，2007，遊星人，本号
[2] Carpenter, J.M. et al., 2000, ApJ, 130, 381
[3] Dobashi, K., et al., 2005, PASJ, 57, 1
[4] Elmegreen, B.G. & Lada, C.J., 1977, ApJ, 214, 725
[5] Karr, J.L. & Martin, P.G., 2003, ApJ, 595, 900
[6] Lynds, B.T., 1962, ApJS, 7, 1
[7] Matsuyanagi, I. et al., 2006, PASJ, 58, 29
[8] Oort, J.H. & Spitzer, L. Jr., 1955, ApJ, 121, 6
[9] Sugitani, K. et al., 1991, ApJS, 77, 59
[10] Sugitani, K. & Ogura, K., 1994, ApJS, 92, 163
[11] Warren, W.H. Jr. & Hesser, J.E., 1977, ApJS, 36, 497
[12] Wilking, B.A. et al., 1984, ApJ, 279, 2915