

2001 年度大規模数値シミュレーションプロジェクト 成果報告書

Cloud Cores Interacted with OB Associations in the M16 H II Region

福田 尚也 (Project ID: hnf14b)

1 2001 年度のプロジェクトについて

2001 年度のプロジェクトでは、集団的星形成領域の現場として考えられている M16 における星形成史を再現する数値シミュレーションをおこなう予定であった。しかしながら、数値シミュレーションの比較データとして検討する予定であった M16 の観測 (2000 年度野辺山ミリ波干渉計 共同利用観測プロジェクト、「Cloud Cores Interacted with OB Associations in the M16 HII Region」2001 年度野辺山ミリ波干渉計 共同利用観測プロジェクト「Star Formation History in the M16 HII Region」)、JST 研究員としての職務に終われ、大規模数値シミュレーションプロジェクトとして、数値シミュレーションは実行できなかった。

ここでは、数値シミュレーションの比較データとして検討する予定であった M16 の観測結果について述べ、それに対する数値シミュレーションでの課題を述べてプロジェクトの成果報告に変えたい。

2 野辺山ミリ波干渉計による M16 の観測：概要

我々は野辺山ミリ波干渉計を用いて、わし星雲 M16 に付随する分子雲を $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線、 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 輝線、2.7 mm 連続波で 2 ~ 3 秒の空間分解能で観測した。この観測により複数の ^{13}CO サブクランプと 4 つの C^{18}O コアを発見した。 ^{13}CO 分子雲は伸びた構造をしており、head-tail 構造を持っている。head-tail 構造は M16 を照らしている O 型星に向いていることから、O 型星の放射と星風に起因すると考えられる。 ^{13}CO 輝線の強度は rim で強いことから、 ^{13}CO 分子雲は表面で圧縮されているようである。この ^{13}CO 分子雲の構造は近赤外で観測された暗黒星雲と形状が良く似ている。領域 I の ^{13}CO 分子雲の内部には 4 つの C^{18}O コアが見つかった。 C^{18}O コアの一つは、2.7mm の連続波が付随することから原始星と考えられる。他の C^{18}O コアは星なしコアである。この ^{13}CO 分子雲の表面には class I 天体と考えられる 2.7mm 連続波源が見つかった。これらの天体は年齢順に並んでおり、進化が進んだ天体ほど O5 型星に近いところにあった。この系列は O 型星による星形成の伝播、すなわち連鎖的星形成が行われていることを暗示する。領域 II の分子雲でも同様な系列が観測された。

]

3 H II 領域 M16

H II 領域 M16 は Hubble Space Telescope (HST) により可視光で詳細に観測されている天体である (Hester et al. 1996)。可視光のイメージで約 4 分角の領域に、elephant trunk とよばれるガス雲が 3 つ連なっている (図 1 を参照)。それらの表面では OB 型星の UV 光によって分子ガスが光解離され、 $0.1''$ – $1''$ の大きさの globules が表面に露出している。

これらの globules は H II 領域によって圧縮を受けているだろうか? 圧縮によって、星形成は誘発されているのだろうか? 我々はこれらの問題にせまるべく、2000 年度共同利用観測 (野辺山ミリ波干渉計) で $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線、 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 輝線、2.7mm 連続波の高分解能観測をおこなった。4 箇所の高密度領域 (White et al. 1999) を D 配列で、そのうちの 2 領域をより高空間分解能の AB 配列、C 配列で観測した。FX 分光相関器で ^{13}CO 輝線を観測 (速度分解能 0.084 km/s) し、UWBC 分光相関器も同時に用いて、 C^{18}O 輝線 (速度分解能 21.8 km/s)、2.7 mm の連続波でも観測した。

4 観測結果

4.1 全体像

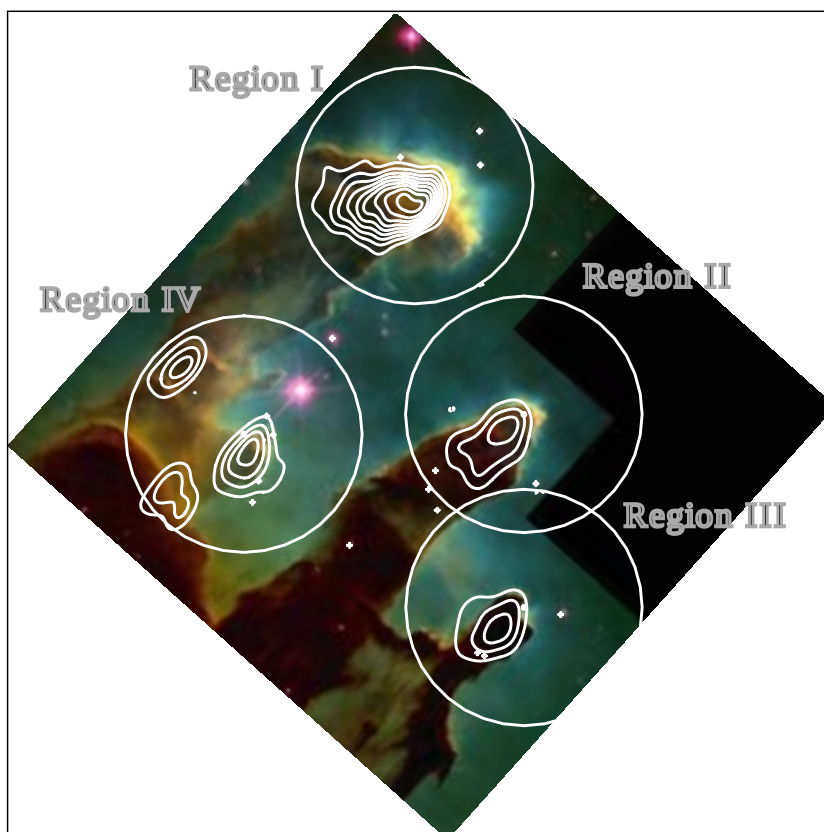


図 1: ^{13}CO 分子ガスの分布 : 可視光との比較

図 1 は HST による可視の写真に ^{13}CO 輝線の積分強度図を重ねたものである (D 配列)。4 つの円は観測領域をあらわしている。その直径は $1'$ であり、M16 領域の距離 (2 kpc) で 0.6 pc に相当する。空間分解能は約 $7''$ である。 ^{13}CO 輝線は水素分子個数密度が $\sim 10^3 \text{cm}^{-3}$ 以上の分子ガスをよくトレースする。主に ^{13}CO 分子ガスは光のイメージで細長く伸びた暗黒星雲の先端部 (H II 領域の励起星側) に集中して存在している。



図 2: ^{13}CO 分子ガスの分布：近赤外線との比較

図 2 は近赤外 3 色同時サーベイ用カメラ SIRIUS による近赤外線の 3 色合成イメージ¹に、図 1 と同様に ^{13}CO 輝線の積分強度図を重ねたものである。近赤外は可視光よりも透過力が強いため、薄い分子ガスの背後にある光源も見える。つまり、近赤外のイメージで暗い部分は密度の高い分子ガスが存在することを意味する。このような領域は ^{13}CO 輝線で受

¹名古屋大学、国立天文台提供、<http://www.z.phys.nagoya-u.ac.jp/~sirius>

かった領域とよく一致していた。領域 IV の ^{13}CO 輝線で受かった三領域はいずれも近赤外のイメージで暗くなっている。

検出した ^{13}CO 分子雲は約 0.2–0.4 pc の大きさを持ち、細長く伸びた楕円形をしている (軸比にして 1 : 0.5–1 : 0.7)。ここで、このサイズの分子ガス雲を分子雲クランプと呼ぶことにすると、D 配列の観測により、領域 I, II, III に 1 つずつ、領域 IV に 3 つ、合計 6 つの ^{13}CO 分子雲クランプを検出できた。その長軸方向はいずれも H II 領域の励起星の方向を向いており、この構造は H II 領域の影響を受け、吹き流されて形成されたことが示唆される。次節以降では、D 配列に加えて、AB 配列と C 配列で観測をおこなった領域 I と領域 II に関する結果について詳しくまとめる。

4.2 領域 I の密度分布

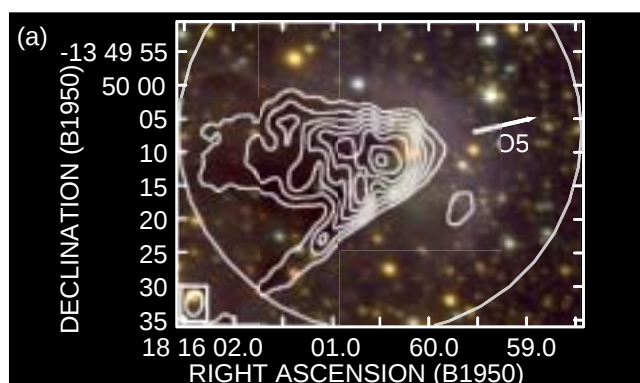


図 3: 領域 I の ^{13}CO 分子ガス

図 3 は領域 I における ^{13}CO 分子ガス (主成分: 24.4 — 25.1 km/s) の分布を示したものである。3 σ 以上の検出を得た領域を等高線で示した。空間分解能 3.6'' $\times$ 2.3'' を達成し、そのビームサイズの大きさを図の左下に示した。 ^{13}CO 分子で観測される分子雲と近赤外で観測される暗黒星雲はともに head-tail 構造をしている。その暗黒星雲はエンジェルフISHのような構造をしている。頭が O5 型星の方向を向き、尾が図の東西に伸び、ひれがそれぞれ北東と南東へと伸びている。尾とひれの方角は O5 型星の方角を向いていることからこれらの構造は O5 型星によって形成されたと考えられる。

^{13}CO 分子ガスの強度は分子雲の縁 (rim) で強くなっており、3 つのピークが存在する。ここでこれらのピークをサブクランプと呼ぶ。最も強度が強いサブクランプは、領域 I の elephant trunk の先端に位置する。他のサブクランプはその北東と南東に位置する。 ^{13}CO 分子ガスの強度が強い領域が O5 型星に面した側にあることは、ガス雲の形状が O5 型星によって形成されたという仮説を支持する。

^{13}CO 分子雲は、それよりも密度の高い $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$ の密度を持つと考えられる C^{18}O 分子雲コアを含んでいる。図 4 は領域 I における C^{18}O 分子ガスの密度分布を示したものである。3 σ 以上の検出を得た領域をカラースケールで示した。得られた空間分解能は 6.4'' $\times$ 3.7'' である。今回の観測では、3 つの分子雲コア (コア a、コア b、コア c) を検出した。

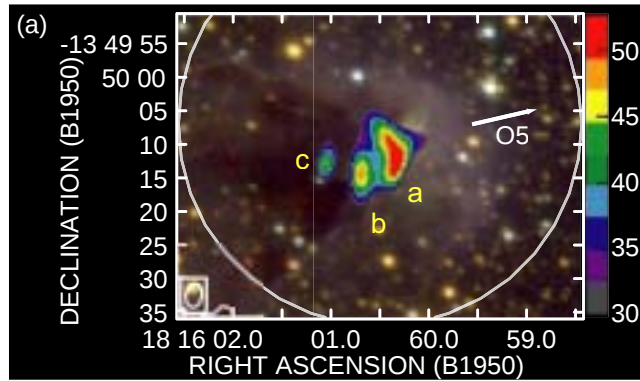


図 4: 領域 I の $C^{18}O$ 分子ガス

コア a は最も強度の強い ^{13}CO サブクランプに付随し、コア b も ^{13}CO サブクランプに付随している。コア c は対応する ^{13}CO サブクランプはないが、 ^{13}CO ガスの内部に存在する。コア a は elephant trunk の先端部に位置し、elephant trunk の先端に沿った弓上の構造をしている。この構造は分子雲の先端で圧縮を受けていることを暗示している。

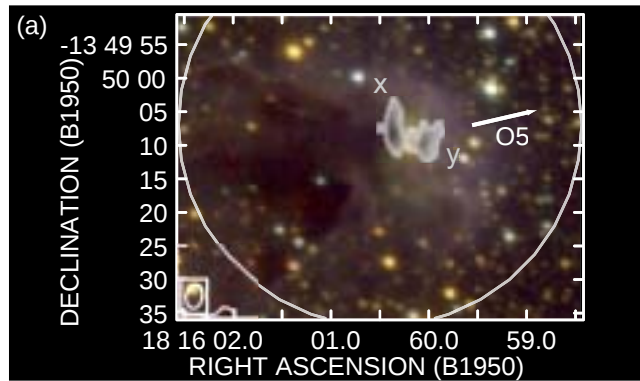


図 5: 領域 I の 2.7mm 連続波

図 5 は領域 I における 2.7mm の連続波の分布をグレースケールで示したものである。2.7 mm の連続波で 2 つのピーク (ピーク x とピーク y) が elephant trunk の先端にあることが明らかになった。2 つのピークはサブミリ波で観測されているピーク (White et al. 1999) の中に含まれている。ピーク x は $C^{18}O$ 分子雲コア a に部分的に重なっており、ピークに付随した弱い輻射は北に伸びている。一方、ピーク y は class I 天体と考えられる近赤外線源 (Sugitani et al. 2002) と一致している。ピーク y に付随した弱い輻射は北西に広がっている。これらの弱い輻射は 8.69 GHz のピーク (White et al. 1999) や $Br\gamma$ のピーク (Allen et al. 1999) と一致すると考えられる。ピーク x は高密度ガスからのダスト放射によるものと考えられ、一方、ピーク y は若い星の星周円盤からの放射によるものと考えられる。ピークに付随する弱い輻射は近赤外の暗黒星雲の外にあることからイオン化ガスの自由・自由放射と考えられる。

図 6 は図 3, 4, 5 の ^{13}CO 分子ガス、 $C^{18}O$ 分子ガス、2.7mm 連続波を重ね合わせたも

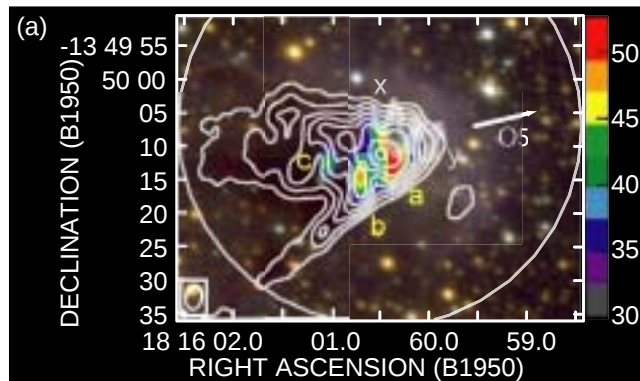


図 6: 領域 I のまとめ

のである。これらの輝線、連続波で検出された天体は若いほど O5 型星から離れた箇所に位置している。class I 候補天体であるピーク y はガス雲の head に近いところに位置している。コア a はガス雲の少し内部にあり、原始星と考えられる。コア b とコア c はガス雲の head から離れたところにあり、見つかった近赤外線源や中間赤外線源は付随していない。これらは星なしコアと考えられる。これらの配置は O5 型星の放射や星風との相互作用によって星形成が伝播したことを暗示する。

4.3 領域 II の密度分布

領域 II でも領域 I と似た構造が得られた。 ^{13}CO 分子雲は近赤外で観測される暗黒星雲とよく一致し、暗黒星雲の head は O5 型星に向いている。また、領域 II と領域 I で若干の相違も見られた。領域 II の ^{13}CO 輝線の最大強度は領域 I の約半分であり、tail 構造は明瞭に検出できなかった。領域 I と同様に図 7 - 10 で観測された密度分布を示す。

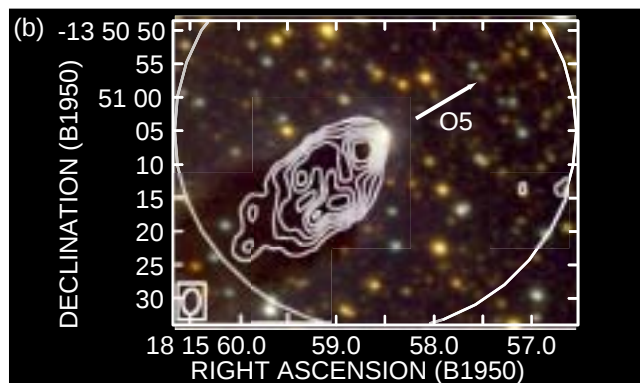


図 7: 領域 II の ^{13}CO 分子ガス

図 7 は領域 II における ^{13}CO 分子ガス (主成分: 22.1 — 22.8 km/s) の分布を示したものである。領域 II でもその head に 3 つのサブクランプを検出した。最も強度の強いサブクランプは領域 II の head の縁に位置し、他のサブクランプは北と南に位置する。 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 輝線はガス雲のへりでより強度が強く、ガス雲の表面で圧縮されたことによるものと

考えられる。

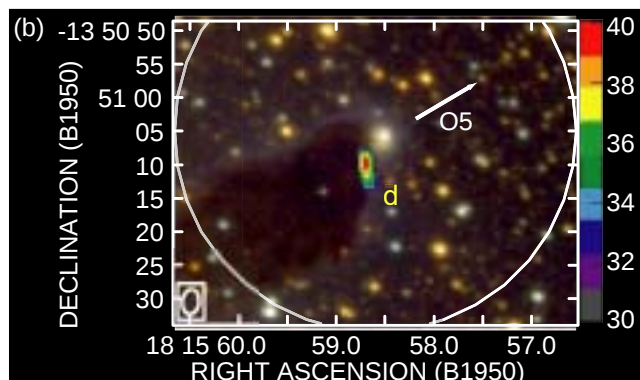


図 8: 領域 II の $C^{18}O$ 分子ガス

図 8 は領域 II における $C^{18}O$ 分子ガスの密度分布を示したものである。1 つの分子雲コア (コア d) を検出した。このコア d は最も強度の強い ^{13}CO サブクランプに付随している。

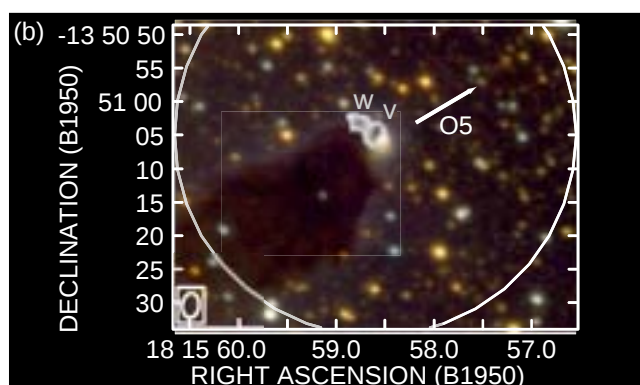


図 9: 領域 II の 2.7mm 連続波

図 9 は領域 II における 2.7mm の連続波の分布をグレースケールで示したものである。2.7 mm の連続波で 2 つのピーク (ピーク v とピーク w) を検出した。ピーク v は class I 候補天体である近赤外線源 (Sugitani et al. 2002) と一致しており、若い星の星周円盤からの放射によるものと考えられる。これらの配置もまた O5 型星の放射や星風との相互作用によって星形成が伝播したことを暗示している。

図 10 は図 6 と同様に Region II の観測結果である図 7, 8, 9 を重ね合わせたものである。Region I 同様に天体は若いほど O5 型星から離れた箇所に位置している。class I 候補天体であるピーク v がガス雲の表面に位置し、星なしコア d がその内側に位置している。

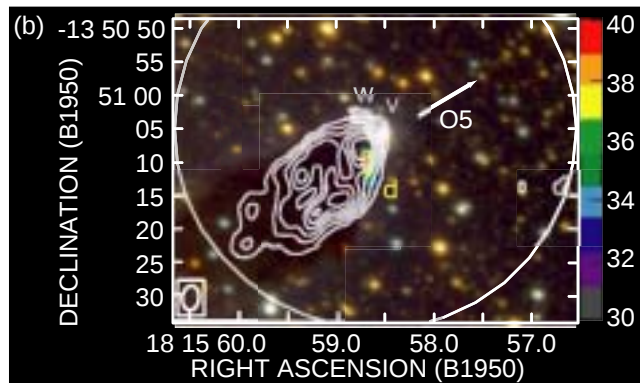


図 10: 領域 II のまとめ

5 議論

ここでは星形成の伝播の速度を見積もってみる。領域 I では、コア b、コア a、近赤外線源がおよそ 0.1pc の間隔で分布していた。これらの天体はそれぞれ、星なしコア、class 0 天体、class I 天体に相当する。年齢差は概して 10^5 yr である。これらの間隔と年齢差から、伝播速度は 1 km/s と見積もれる。この速度は星間空間における衝撃波よりも若干小さく、O5 型星が星形成を誘発したとすると、星形成の伝播速度として適当である。

6 数値シミュレーションでの課題

M16 のような bright rimmed cloud は RDI(radiative driven implosion) モデルによってモデル化されている。RDI モデルは、HII 領域の放射によって、ガス雲の表面で生じる衝撃波と分子雲との相互作用のモデルである。Lefloch(1994) による RDI モデルの数値シミュレーションでは、HII 領域の衝撃波によって、ガスが圧縮を受け、密度が上昇し(ガス雲収縮段階)、その後、head-tail 構造が作られていく様子(準定常 cometary 段階)を追跡している。M16 で観測されている ^{13}CO 分子雲の head-tail 構造と先端での圧縮は、Lefloch(1994) による RDI モデルによって予見されている初期のガス雲収縮段階と似ている。

しかしながら、YSOs と分子雲コアが並んでる様子は、これまでの RDI モデルでは説明できない。これは RDI モデルが初期に一樣のガス雲の中心に一つの高密度コアの形成に制限されているからであると考えられる。これまでの RDI モデルでは自己重力を無視しているからだと考えられる。星形成の伝播をシミュレーションするには、RDI と自己重力の両方を考慮したモデルが必要であると考えられる。

結果の公表

上記の結果は、天文学会 2001 年秋季年会、星形成研究会、理論懇談会、マゼラン研究会にて発表し、論文は ApJL に accept された。

参考文献

- Allen, L. E., Burton, M. G., Ryder, S. D., Ashley, M. C. B., & Storey, W. V. 1999, MNRAS, 304, 98
- Fukuda, N., Hanawa, T., & Sugitani, K. 2002, ApJL, 568
- Hester, J. J. et al. 1996, AJ, 111, 2349
- Lefloch, B. & Lazareff, B. 1994, A&A, 289, 559
- Pilbratt, G. L., Altier, B., Blommaert, J. A. D. L., Fridlund, C. V. M., Tauber, J. A., & Kessler, M. F. 1998, A&A, 333, L9
- Pound, M. W. 1998, ApJ, 493, L113
- Sugitani, K. et al. 2002, ApJ, 565, L25
- White G. J. et al. 1999, A&Ap, 342, 233