

グロービュールの密度構造の進化を探る

神 鳥 亮

〈総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1 国立天文台 ALMA 推進室〉

e-mail: kandori@alma.mtk.nao.ac.jp

恒星は分子雲コアの中で誕生すると考えられていますが、その誕生プロセスが、いつ、どのように始まるのかは、天文学の重要な未解決問題になっています。私は、すでに星を形成しているグロービュール（孤立した分子雲コア）と星形成前のグロービュールに対して近赤外線観測を行い、その密度構造を系統的に研究しました。ここでは、その結果得られたいくつかの重要な知見について紹介します。

1. 星形成の初期条件

星間物質から恒星が誕生するメカニズムを解明することは、天文学の重要な未解決問題の一つです。過去の研究により、星間分子雲（密度 $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ）の中でも特に密度の高い分子雲コア（密度 $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ）が重力収縮することで、星が形成されることが明らかになってきました。しかし、星の誕生プロセスが、どのように始まるか（星形成の初期条件）については、まだ確立した定量的描像がありません。星形成過程を理解することは、星の形成母体である分子雲コアの進化を理解することとほぼ等価の問題であると考えられます。したがって、その観測的研究としては、すでに星を形成している（星あり）分子雲コアとまだ星を形成していない（星なし）分子雲コアの両方を観測し、両者の物理的性質の違いを調べたり、既存のモデルと比較したりするアプローチが有力な方法になります。

本研究の目的は、近赤外線観測に基づいて、異なる進化段階にある分子雲コア（星なし、星あり段階）の密度構造を系統的に調べ、その進化の様子を明らかにすることです。観測天体には、孤立した分子雲コア（グロービュール）を選びました。

孤立したグロービュールは、複合分子雲中の分子雲コアと異なり、視線方向に異なる天体が重なり合う危険が小さく、密度構造をモデリングして物理量を抽出するのに適した天体です。グロービュールは太陽程度の質量の星（小質量星）の形成母体ですので、その観測により比較的孤立した系での小質量星の形成過程を調べられます。観測には、名古屋大学南アフリカ観測所の 1.4 m 赤外線望遠鏡 (IRSF) および国立天文台野辺山観測所の 45 m 電波望遠鏡を用い、グロービュール 10 天体について近赤外線撮像データ (*JHKs* バンド) と分子分光データ ($\text{C}^{18}\text{O } J=1\rightarrow 0$, $\text{N}_2\text{H}^+ J=1\rightarrow 0$) を取得しました。

2. グロービュールの“影”を調べる

グロービュールは、分子ガスとチリ（宇宙塵）が高密度に集まった塊です。グロービュールの背後に位置する星々からの光は、宇宙塵による吸収・散乱（減光）のため、本来の色（例えば、*H-K* 等級）よりも赤く観測されます。これは、宇宙塵による減光に波長依存性があり、短波長の光ほど大きく弱められるためです（図 1）。この性質を利用して、グロービュールの背景星の色の測定データから、グロービュールの減光量（単位は等級）の分布

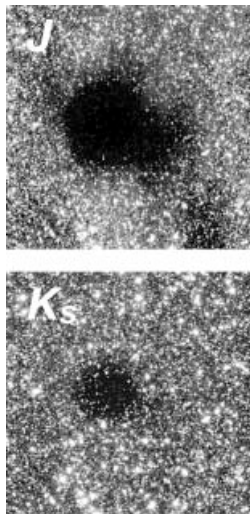


図 1 FeSt 1-457 の近赤外線画像. 上は J (1.2 mm), 下は K_s (2.2 mm) バンド. 画像の視野は $7'$ 角.

が求められます¹⁾. こうして求めた減光量は、視線方向のグロービュール内の宇宙塵の総量(柱密度)を反映しており、雲の質量の大部分を担う水素分子ガスの量とも比例関係にあります. グロビュール FeSt 1-457 の中心から外縁にかけての(水素分子)柱密度の動径分布を求めた例を図2に示します. 柱密度は密度を視線方向で積算した量ですから、この柱密度動径分布図は、グロービュールの密度構造を反映した重要な情報を含んでいます. これまで、グロービュールの密度構造の研究は、主に宇宙塵の熱放射の観測に基づいて進められてきました²⁾. しかしながら、最近になって、低温の星なしコア内部での宇宙塵の温度分布は一定でないことなどが報告され³⁾、これまでの研究の延長では正しい描像の獲得が困難であることがわかってきました. 私の方法は、宇宙塵の吸収量を測定しているため、塵の温度分布に影響されることなく、視線方向の物質量を正確に求められます. 過去に、近赤外線観測によるグロービュールの柱密度分布とモデルとの比較研究が行われた例がありますが、散発的なケーススタディーがあ

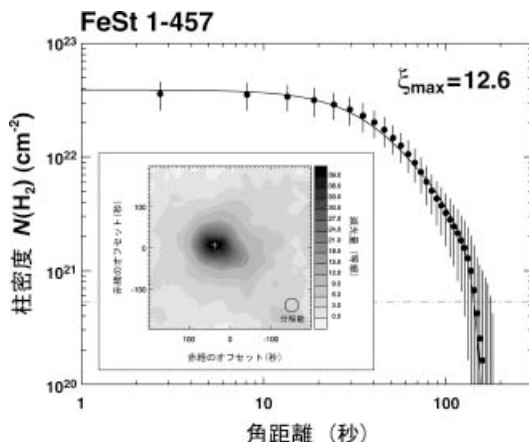


図 2 FeSt 1-457 の水素分子柱密度 $N(\text{H}_2)$ の動径分布. 黒丸は観測点, 実線はボナー・エバート球でのベストフィット ($\xi_{\text{max}}=12.6$). はめ込みの図は減光量分布図. 減光量は可視光 (V バンド) での値に換算. 減光量測定の間分解能は約 30 秒.

るのみで、これまで系統的な研究は行われたことがありません.

3. グロビュールの密度構造を探る

グロービュールが自己重力と外圧とで束縛された等温ガス球であるとする、その密度構造を表す解はボナー・エバート球モデル^{4),5)}で与えられます. 私は、グロービュールの柱密度動径分布をボナー・エバート球でフィットして、各天体の密度構造の形を調べました. FeSt 1-457 でのフィット結果を図2に示します. ボナー・エバート球の密度構造は、無次元変数 ξ_{max} で表され、 ξ_{max} が臨界値 ($=6.5$) よりも大きい場合は不安定な平衡解、小さい場合は安定な平衡解になります. ξ_{max} 値とコア中心-外縁の密度比(密度コントラスト)とは1対1対応しており、 ξ_{max} の大きな解ほど大きな密度コントラストをもちます ($\xi_{\text{max}}=6.5$ のとき密度コントラスト=14). $\xi_{\text{max}}=\infty$ の解は密度 \propto 半径 $^{-2}$ の密度分布のガス球に対応し、 ξ_{max} が0に近づくほど等密度ガス球に近くなります. 私は、本研究の10天体に先行研究の4天体⁶⁾⁻¹⁰⁾を加えた

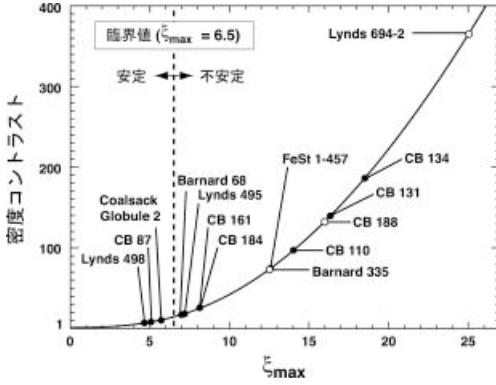


図3 ξ_{\max} 対密度コントラスト. すべてのポナー・エバート解は実線上にのる. 黒丸は星なし, 白丸は星ありグロービュールの位置. 破線は, ポナー・エバート球の臨界値. ξ_{\max} の決定精度は相対誤差で約 20%.

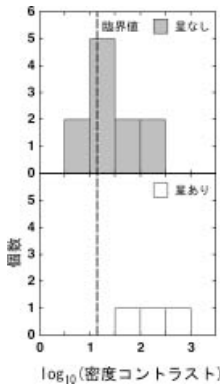


図4 星なし・星ありグロービュールの密度コントラスト頻度分布. 破線は臨界ポナー・エバート球の値 (=14).

計 14 天体のグロービュール (星なし: 11 天体, 星あり: 3 天体) のサンプルに基づき, 各天体の ξ_{\max} 値の分布を進化段階 (星なし, 星あり) ごとに調べました (図3 参照). その結果, 次の事柄がわかりました. (1) 星なしグロービュールの多く (7/11 天体) が, 臨界ポナー・エバート球に近い密度構造を示す ($\xi_{\max} = 6.5 \pm 2$). (2) 明らかに不安定な解 ($\xi_{\max} \gg 6.5$) を示す星なしグロービュールを発見 (4 天体). (3) すべての星ありグロービュール (3 天体) は明らかに不安定な解 ($\xi_{\max} \gg 6.5$) を示す.

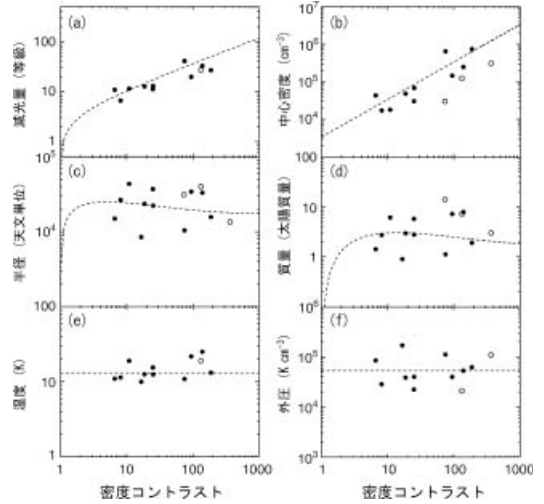


図5 密度コントラスト 対 その他の物理量. 黒丸は星なし, 白丸は星ありグロービュール. 破線は, 温度 = 13.2 K, 外圧 = $5.3 \times 10^4 \text{ K cm}^{-3}$ のポナー・エバート球が示す関係.

(4) (野辺山 45 m 鏡での分子輝線観測より) グロービュールの分子輝線幅は, 温度 10 K を仮定したときの熱運動速度に近い (図5: パネル e).

結果 (1) および (4) より, 典型的な星なしグロービュールの密度構造は, ほぼ熱運動でサポートされた臨界ポナー・エバート球で近似できそうであることがわかりました. 一方で, 星ありグロービュールの密度構造はすべて不安定なポナー・エバート球でフィットされ (結果3), 星形成活動の有無によりコアの密度構造の形が系統的に異なることがわかります. グロービュールの密度コントラストの頻度分布を図4に示します. 星なしグロービュールは臨界ポナー・エバート球に対応する区間で頻度のピークをもつ一方で, すべての星ありグロービュールは大きな密度コントラストを示すことから, 前述の特徴が再現されています.

さらに, グロービュールの物理的性質を調べるために, 密度コントラストとその他の物理量との相関図を作成しました (図5). ここで, パネル (e) の縦軸は, 電波観測の分子輝線幅から得られた (乱流成分込みの) 温度で, ポナー・エバート球

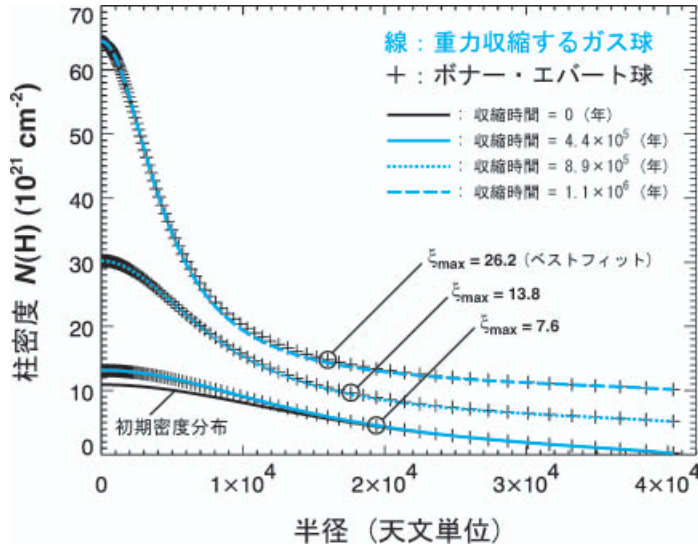


図 6 収縮ガス球の柱密度分布 (青線) に対するボナー・エバート球でのフィット (+印). 黒の実線は, 収縮ガス球の初期密度分布. 点線と破線は, それぞれ 5, 10 (10^{21} cm^{-2}) ずつ y 軸方向にずらしてある.

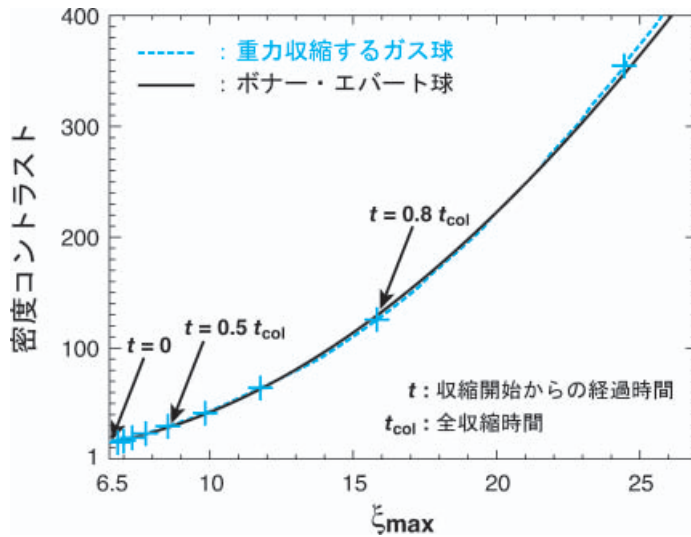


図 7 ξ_{\max} 対 密度コントラスト. 実線はボナー・エバート球, 破線は収縮ガス球. +印はガス球の収縮開始からの経過時間を全収縮時間の 10% 間隔でプロット. 収縮初期 ($\xi_{\max} \sim 6.5$) ほど+印の間隔が狭く, 滞在時間が長い.

フィットとは独立に得られた量です. グロビュールが収縮して星を形成するには, 密度コントラスト (中心集中度) が增大する必要があるので, 横軸はグロビュールの進化段階に対応すると考えられます. パネル (b), (c), (d) に着目すると, グロ

ビュールの密度, 半径, 質量は, それぞれ 10^{4-6} cm^{-3} , $\sim 10^4$ 天文単位, 1-10 太陽質量であり, 典型的な分子雲コアの性質とよく一致します. また, パネル (e), (f) より, グロビュールの温度と外圧は, 密度コントラストによらずほぼ一定値

(それぞれ, 13.2 K , $5.3 \times 10^4 \text{ K cm}^{-3}$) を示すことがわかります。温度と外圧が一定の場合のポナー・エバート解は図中の破線で表され、各パネルのデータ点の分布を比較的良好に近似します。この近似が妥当な場合、グロービュールの減光量は密度コントラストのよい指標になるので (パネル a), 測定された減光量の大きさからコアの進化段階を推定できることがわかります。

明らかに不安定な解の星なしグロービュールの存在を示す結果 (2) は、グロービュールの進化を考えるうえで重要です。 $\xi_{\max} > 6.5$ の平衡解は重力収縮に対して不安定なため、長期にわたりその密度構造を維持できません。したがって、これらの天体の物理状態をポナー・エバートモデル (等温の静水圧平衡ガス球) で説明することは困難です。これらの不安定な星なし天体の解釈としては、例えば、熱的な圧力以外の (磁場や乱流による) 内圧サポートにより安定に支えられている可能性¹¹⁾ や、すでに重力収縮を開始している可能性が考えられます。前者の可能性については、磁場強度の観測データがない現状での検証は困難ですが、グロービュールの分子輝線幅が熱運動速度に近いこと (結果 4) を考えると、乱流のサポートにより平衡状態を維持するのは難しそうです。本研究では、後者の描像の妥当性についてモデル計算を用いて検討しました。重力収縮させるガス球の初期状態は、結果 (1) を考慮して、臨界ポナー・エバート球に近い密度構造に設定しました。

4. グロビュールの進化の描像

私は、重力収縮するガス球の密度構造進化の計算結果¹²⁾を用いて、観測された不安定なポナー・エバート解のグロービュールを説明できるかどうか検討しました。中心密度を観測とよく合う $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、温度を 10 K とし、ほぼ臨界ポナー・エバート球の密度構造からガス球を収縮させると、自由落下時間 (t_{ff}) の数倍の時間 ($\sim 10^6$ 年) かけてゆっくりと収縮します。この収縮時間は、星あ

り・星なしコアの数比から求められた、星なし分子雲コアの観測的寿命 ($\sim 10^6$ 年)¹³⁾ とよく一致します。モデル計算では、収縮時間のほとんどの間、亜音速の収縮速度場がコア半径の広い範囲にわたって現れますが、この結果は、星なしコアで観測される収縮速度場の特徴¹⁴⁾をよく再現します。そこで私は、収縮するガス球の柱密度動径分布を計算し、各時間での柱密度分布を (静的な) ポナー・エバート平衡解でフィットできるかどうか試みました (図 6)。その結果、両者はよく一致することがわかりました。例えば、収縮開始から 4.4×10^5 年経過後の収縮ガス球の密度構造は、 $\xi_{\max} = 7.6$ の不安定平衡解と一致し、見かけ上ポナー・エバート球として観測されます。自由落下時間は密度上昇とともに短くなるため、収縮するガス球はわずかに不安定な (ξ_{\max} が 6.5 付近の) ポナー・エバート平衡解を長時間にわたり模倣することになります (図 7)。したがって、収縮するポナー・エバート球の描像は、臨界ポナー・エバート解に近い密度構造の星なしグロービュールが多いという観測 (結果 1) と、不安定平衡解のグロービュールが存在すること (結果 2) の両方をうまく説明できます。収縮モデルと平衡解との比較から、収縮時間と ξ_{\max} 値とを対応づけられるので、この描像が正しい場合に観測されるべき ξ_{\max} 値の頻度分布をモデルから予言できます。観測では、不安定解 ($\xi_{\max} > 6.5$) の星なしグロービュールの半数 (4/8 天体) が $\xi_{\max} = 6.5\text{--}8.5$ の間に分布します。サンプル数が少ないものの、これは、収縮モデルから導かれる割合 (50%) と矛盾しないことがわかりました。

5. まとめと今後の展望

本研究は、近赤外線観測に基づきグロービュールの密度構造を調べる初めての系統的研究¹⁵⁾です。本研究により、グロービュールのような孤立した系での小質量星形成の初期物理状態は、臨界ポナー・エバート球で近似できることがわかってき

ました。また、臨界ボナー・エバート球に近い初期状態から重力収縮するガス球の描像は、臨界ボナー・エバート球に似た密度構造の星なしグロービュールが多い観測結果と、不安定解の星なしグロービュールの存在の両方を自然に説明できることがわかりました。この知見は天体数を増やした本研究によって初めて得られました。

今後の研究の展望としては、天体サンプル数を増やすことが最重要課題です。私は現在までにグロービュール90天体の近赤外線データを取得しているので、全天体の密度構造解析を進め、グロービュールの進化を統計的に研究していきます。近赤外線データは、グロービュールの密度構造・質量・サイズを決めるうえで強力ですが、速度構造(コアの内部運動)を評価できません。本研究により、不安定解 ($\xi_{\max} \gg 6.5$) の星なしグロービュールはすでに重力収縮を開始しているという示唆が得られました。この描像の直接的な検証を行うことも重要な研究課題の一つです。私は、電波分子輝線観測(例えば、CS $J=2-1$ 輝線)により、不安定な星なしグロービュール内部で、実際にガスの重力収縮運動が検出されるかどうか調べる研究を進めています。これらの研究に基づいて、重力収縮の開始時期をまたいだグロービュールの内部構造進化の描像をより明らかにし、小質量星形成過程への理解を深めていきたいと考えています。

本稿で紹介した研究内容は、私の博士論文を基にまとめました。最後に、私との議論に多くの時間を割いて下さった指導教官の国立天文台 立松健一助教授、田村元秀助教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) Lada C. J., et al., 1994, ApJ 429, 694
- 2) Ward-Thompson D., et al., 1994, MNRAS 268, 276
- 3) Evans N. J., II, et al., 2001, ApJ 557, 193
- 4) Bonnor W. B., 1956, MNRAS 116, 351
- 5) Ebert R., 1955, Zs. Ap 37, 217
- 6) Alves J. F., Lada C. J., Lada E. A., 2001, Nature 409, 159
- 7) Harvey D. W. A., et al., 2001, ApJ 563, 903
- 8) Harvey D. W. A., et al., 2003, ApJ 598, 1112
- 9) Lada C. J., et al., 2004, ApJ 610, 303
- 10) Racca G., Gómez, M., Kenyon S. J., 2002, AJ 124, 2178
- 11) McKee C. F., Holliman J. H., II, 1999, ApJ 522, 313
- 12) Aikawa Y., et al., 2005, ApJ 620, 330
- 13) Lee C. W., Myers P. C., 1999, ApJS 123, 233
- 14) Lee, C. W., Myers P. C., Tafalla, M., 2001, ApJS 136, 703
- 15) Kandori R., et al., submitted to AJ

Density Structure of Globules at Different Evolutionary Stages

Ryo KANDORI

Department of Astronomical Science, Graduate University for Advanced Studies, Osawa, Mitaka-shi, Tokyo 2-21-1, Japan

Abstract: Stars are thought to be formed in dense molecular cloud cores. It, however, still remains unclear that how and when the star formation process takes place. On the basis of extinction (A_V) measurements of both starless and star-forming globules (isolated dense cores) at the near-infrared wavelengths, I investigated their density structure using the Bonnor-Ebert sphere model. Here I present important findings on the density structure, stability, and evolution of globules.