

筑波大学大学院博士前期課程

理工情報生命学術院

数理物質科学研究群修士論文

天の川銀河分子雲における階層的進化モデルの観測的検証

佐々木誇虎

物理学学位プログラム

2026年 2月

筑波大学大学院博士前期課程

理工情報生命学術院

数理物質科学研究群修士論文

天の川銀河分子雲における階層的進化モデルの観測的検証

佐々木誇虎

物理学学位プログラム

指導教員 久野成夫 印

概要

大質量星形成の物理過程は、銀河進化を理解する上で極めて重要であるが、その詳細なメカニズムには未解明な点が多い。近年、分子雲の広域的な収縮と共に内部に高密度構造が形成される「階層的進化モデル」が提唱されており、観測的な検証が待たれている。本研究では、銀河系内分子雲における階層構造と星形成活動の関連性を体系的に明らかにし、階層的進化モデルの観測的検証を行うことを目的とした。

解析には、野辺山 45m 電波望遠鏡による FUGIN プロジェクトの $^{13}\text{CO}(J = 1 - 0)$ 輝線データを用い、W51A, W49 などを含む活発な星形成領域 12 箇所を対象とした。さらに、*Spitzer* による中間赤外線画像および WISE データに基づく HII 領域カタログを参照し、星形成活動との比較を行った。

分子雲内部の階層構造の抽出には、3次元データキューブに対してツリーデータ構造を構築する Dendrogram 解析を適用した。

解析の結果、階層構造を持つ分子雲 (leaf, branch, trunk) は、単一構造 (isolated) と比較して体積密度が高く、ピリアルパラメータが低い (重力的に束縛されている) 傾向が見られた。また、位置-速度図の分布からは、大規模な構造 (trunk) が複数の速度成分にまたがって分布している様子が確認され、異なる速度を持つ内部構造が大規模構造内に閉じ込められ、相互作用している可能性が示唆された。また、これら高密度な階層構造は $8\ \mu\text{m}$ および $24\ \mu\text{m}$ の赤外線強度が強い領域と良く一致しており、活発な星形成現場と対応していることが確認された。HII 領域との比較においては、構造の質量や密度に対する「HII 領域を一つ以上含む確率」は階層構造と単一構造で大きな差は見られなかった。しかし、単一構造に含まれる HII 領域数が最大 4 個程度であるのに対し、階層構造内の leaf は最大 8 個含んでおり、同じ有効半径であっても階層構造の方がより多くの HII 領域を内包していることが明らかになった。これらの結果は、大規模な分子雲 (trunk) の収縮により内部構造 (leaf) が閉じ込められ、フィードバックによるガスの散逸を防ぎながら集団的な星形成が維持されるという階層的進化モデルを支持するものである。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 電波天文学	1
1.1.1 電波天文学とは	1
1.1.2 放射輸送	1
1.1.3 黒体放射	2
1.2 星間物質と星形成	4
1.2.1 星間物質	4
1.2.2 分子雲	4
1.2.3 CO 分子輝線	5
1.2.4 大質量星形成とフィードバック	5
1.2.5 分子雲衝突	5
1.2.6 階層的進化	6
1.3 研究目的	6
第 2 章 データ概要	7
2.1 FUGIN	7
2.1.1 概要	7
2.1.2 データ諸元	7
2.1.3 対象領域	8
2.2 <i>Spitzer</i> -GLIMPSE, <i>Spitzer</i> -MIPSGAL	8
2.2.1 概要	8
2.2.2 データ諸元	9
2.2.3 対象領域	9
2.3 WISE HII 領域カタログ	10
2.3.1 概要	10
2.3.2 データ諸元	10
2.3.3 HII 領域カタログ	10
第 3 章 解析手法	11
3.1 Dendrogram	11
3.1.1 概要	11

3.1.2	アルゴリズム詳細	11
3.1.3	パラメータ設定	13
3.2	物理量導出	15
3.2.1	有効半径	15
3.2.2	柱密度	15
3.2.3	質量	16
3.2.4	体積密度	17
3.2.5	速度分散	17
3.2.6	ビリアルパラメータ	17
3.2.7	8 μm および 24 μm 強度	18
第 4 章	結果	19
4.1	全構造の物理量ヒストグラム	19
4.2	W51A の解析結果	21
4.2.1	サイズ-密度プロット	22
4.2.2	ビリアルパラメータプロット	23
4.2.3	位置-速度図	24
第 5 章	議論	25
5.1	8 μm , 24 μm との比較	25
5.1.1	構造密度-強度プロット	25
5.2	HII 領域との比較	26
5.2.1	HII 領域数ヒストグラム	26
5.2.2	物理量に対する HII 領域付随構造の割合	27
5.3	階層的進化モデル	29
第 6 章	結論と今後の展望	31
6.1	まとめ	31
6.2	今後の展望	31
	謝辞	32
	参考文献	33
	付録 A 全領域の解析結果	34

目次

1.1	さまざまな温度での黒体放射の強度分布（天文学辞典（日本天文学会））	3
1.2	さまざまな密度, 温度における星間物質（天文学辞典（日本天文学会））	4
3.1	Dendrogram による階層構造	11
3.2	Dendrogram アルゴリズム 1	12
3.3	Dendrogram アルゴリズム 2	12
3.4	Dendrogram アルゴリズム 3	13
3.5	Dendrogram アルゴリズム 4	13
3.6	Dendrogram アルゴリズムにおける min_value と min_delta の例 1	14
3.7	Dendrogram アルゴリズムにおける min_value と min_delta の例 2	15
4.1	全構造の有効半径ヒストグラム	19
4.2	全構造の質量ヒストグラム	20
4.3	全構造の体積密度ヒストグラム	20
4.4	全構造のビリアルパラメータヒストグラム	21
4.5	W51A の Dendrogram 解析結果（位置-位置図）	22
4.6	W51A から得られた構造のサイズ-体積密度プロット	23
4.7	W51A から得られた構造の体積密度-ビリアルパラメータプロット	23
4.8	W51A の Dendrogram 解析結果（位置-速度図）	24
5.1	W51A の Dendrogram 解析結果と 8 μm データおよび 24 μm データの比較	25
5.2	W51A から得られた構造の体積密度-8 μm 強度プロット	26
5.3	W51A から得られた構造の体積密度-24 μm 強度プロット	26
5.4	解析対象全星形成領域における構造内 HII 領域数ヒストグラム	27
5.5	解析対象全星形成領域における構造質量に対する HII 領域付随構造の割合	28
5.6	解析対象全星形成領域における構造体積密度に対する HII 領域付随構造の割合	28
5.7	解析対象全星形成領域における構造ビリアルパラメータに対する HII 領域付随構造の割合	29
5.8	単一構造の進化モデル概念図. 重力収縮により数個の大質量星が形成されるが, フィードバックによりガスが散逸し星形成が停止する.	30
5.9	階層構造の進化モデル概念図. 大規模な分子雲構造に閉じ込められた複数の小規模内部構造が相互作用し, 高密度化して大質量星を形成する. 大規模構造の閉じ込めにより, ガスはフィードバックに耐え, 集団的な星形成が維持される.	30

A.1	G18.15-0.30+51 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	34
A.2	G45.3+0.1 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	35
A.3	M16 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	35
A.4	M17 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	36
A.5	N4 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	36
A.6	N14 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	37
A.7	N35 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	37
A.8	W33 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	38
A.9	W42 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	38
A.10	W43 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	39
A.11	W49N の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)	39

表目次

2.1 FUGIN プロジェクトの観測パラメータ	7
2.2 本研究で解析対象とした星形成領域	8
2.3 <i>Spitzer</i> -GLIMPSE の観測パラメータ	9
2.4 <i>Spitzer</i> -MIPSGAL の観測パラメータ	9
2.5 WISE の観測パラメータ	10
4.1 leaf と isolated の物理量分布に対する t 検定結果	21

第 1 章 序論

1.1 電波天文学

1.1.1 電波天文学とは

電波天文学とは、宇宙から到来する電磁波のうち、電波領域に属する波長約 1 mm から約 10 m までの電磁波を観測する天文学の一分野である。可視光では観測が困難な天体や現象を観測できるため、宇宙の理解を深める上で重要な役割を果たしている。

1.1.2 放射輸送

電磁波の周波数 ν と波長 λ の間には以下の関係が成立する。

$$\nu\lambda = c \quad (1.1)$$

ここで c は光速である。また、電磁波を量子とみなすと、エネルギー E と運動量 p の間には以下の関係が成立する。

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

$$p = h/\lambda = E/c \quad (1.3)$$

ここで h はプランク定数である。

電磁波の振る舞いは、一般的には電場と磁場の時間変化を記述するマクスウェル方程式によって支配される。だが系の空間スケールが波長に比べて十分大きい場合には、電磁波を光線として扱うことができる。このとき、電磁波の伝播を光線の振る舞いとして記述する枠組みを放射輸送という。

放射輸送において、時間 dt あたりに面積 dA を通過する電磁波のエネルギーが $FdAdt$ であるとき、 F をエネルギーフラックスという。エネルギーフラックス F は単位時間あたり単位面積を通過する電磁波が持つエネルギーを表し、単位は $[\text{Js}^{-1} \text{m}^{-2}] = [\text{W m}^{-2}]$ である。

時間 dt あたりに面積 dA を通過する電磁波のうち、周波数 $[\nu, \nu + d\nu]$ の範囲のエネルギーが $F_\nu d\nu dAdt$ であるとき、 F_ν は周波数 ν におけるエネルギーフラックス密度という。エネルギーフラックス密度は電磁波が運ぶエネルギーの周波数依存性を表す量で、単位は $[\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}]$ である。また $[\text{Jy}]$ という単位も用いられ、 $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ である。実際の電波観測では限られた周波数成分のみを観測する機会が多いため、その周波数成分の定量化にエネルギーフラックス密度が用いられる。またエネルギーフラックスとエネルギーフラックス密度の関係は以下のように表される。

$$F = \int_0^\infty F_\nu d\nu \quad (1.4)$$

立体角 $d\Omega$ を通過する電磁波のエネルギーが $I_\nu d\Omega dAdt d\nu$ であるとき、 I_ν は周波数 ν における強度という。強度はエネルギーフラックス密度に立体方向成分を考慮した量であり、単位は $[\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}]$ である。またエネルギーフラックス密度と強度の関係は以下のように表される。

$$F_\nu = \int I_\nu \cos\theta d\Omega \quad (1.5)$$

電磁波が物質を通過するとき起こる相互作用として、以下の三つがある。

- 放射: 物質の内部エネルギー状態がより低い状態へ遷移するとき, そのエネルギー差に相当する電磁波が放射される現象.
- 吸収: 電磁波を物質が吸収し, 物質の内部エネルギー状態がより高い状態へ遷移する現象.
- 散乱: 電磁波が物質に衝突し, 進行方向が変化する現象.

ある物質から放射される周波数 ν の電磁波の強度 I_ν は, 物質の厚さ s に比例するから, 以下のように表される.

$$I_\nu = j_\nu s \Rightarrow j_\nu = \frac{dI_\nu}{ds} \quad (1.6)$$

ここで j_ν は周波数 ν における放射係数と呼ばれ, 単位は $[\text{W m}^{-3} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}]$ である.

一方, 物質に入射した周波数 ν の電磁波の強度 I_ν が, 吸収によって dI_ν だけ減少するとき, 吸収後の強度は以下のように表される.

$$\begin{aligned} I_\nu + dI_\nu &= I_\nu e^{-\kappa_\nu ds} \sim I_\nu(1 - \kappa_\nu ds) \\ \Rightarrow dI_\nu &= -\kappa_\nu I_\nu ds \end{aligned} \quad (1.7)$$

ここで κ_ν は周波数 ν における吸収係数と呼ばれ, 単位は $[\text{m}^{-1}]$ である.

物質を厚さ ds だけ通過したときの電磁波の強度変化 dI_ν は, 放射と吸収の効果を合わせると, 式 (1.6), (1.7) より以下のように表される.

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu I_\nu + j_\nu \quad (1.8)$$

この式を放射輸送方程式という. 物質の放射と吸収がつりあっている熱平衡状態 ($dI_\nu = 0$) においては, 放射係数と吸収係数の関係は以下のように表される.

$$I_\nu = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} \equiv S_\nu \quad (1.9)$$

ここで S_ν は周波数 ν における源泉関数と呼ばれる. 源泉関数を用いて放射輸送方程式 (1.8) を書き直すと, 以下のようなになる.

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu \quad (1.10)$$

ここで $d\tau_\nu = \kappa_\nu ds$ とした. S_ν が一定であるような, 厚さ L の物質を電磁波が通過するとき, この式の解は以下のように表される.

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (1.11)$$

ここで $I_\nu(0)$ は物質に入射した電磁波の強度である. また τ_ν は以下の式で表される.

$$\tau_\nu = \int_0^L \kappa_\nu ds \quad (1.12)$$

τ_ν をこの物質の光学的厚さと呼び, 光学的厚さ $\tau_\nu \ll 1$ である場合を光学的に薄い, $\tau_\nu \gg 1$ である場合を光学的に厚いという.

1.1.3 黒体放射

入射された電磁波を 100% 吸収し, 吸収したエネルギーを全て再放射する理想的な物体を黒体という. 黒体の例として, 十分に大きく, 小さな穴が開いた容器を考える. この容器は電磁波を遮断する断熱壁で囲まれている. 穴から容器に入射した電磁波は, 壁を何度も反射し, 最終的に壁に吸収される. このように容器の中に入った電磁波は再び穴から出ることはないため, 容器は黒体として振る舞う.

この容器が温度 T に保たれているとき, 穴から入った電磁波を吸収するだけであれば容器はエネルギーを受

ける一方である。しかし実際には容器は壁から電磁波を放射しており、その電磁波が穴から外部へ出ていくことで熱平衡が維持される。このように、黒体自身と電磁波の間に完全な熱平衡が実現されるときに放射される電磁波を黒体放射という。

黒体放射の強度 B は、プランクの放射式と呼ばれる以下の式で表される。

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.13)$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.14)$$

ここで T は黒体の温度、 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ はボルツマン定数である。図 1.1 はさまざまな温度での黒体放射の強度分布を示している。

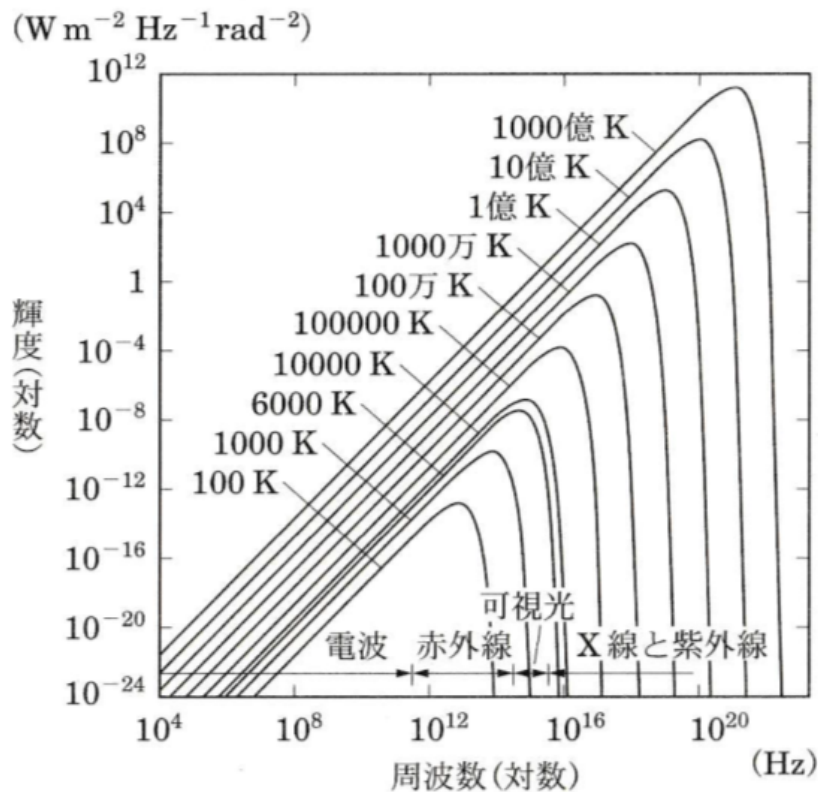


図 1.1 さまざまな温度での黒体放射の強度分布 (天文学辞典 (日本天文学会))

式 (1.13) において、 $h\nu \ll k_B T$ であるとき、 $\exp(h\nu/k_B T) \sim 1 + h\nu/k_B T$ と近似できるため、プランクの放射式は以下のように近似される。

$$B_\nu(T) \sim \frac{2\nu^2}{c^2} k_B T = \frac{2k_B T}{\lambda^2} \quad (1.15)$$

この近似式をレイリー・ジーンズの近似式という。電波天文学では観測周波数が十分に低いため、黒体放射はレイリー・ジーンズの近似式で表されることが多い。

式 (1.15) を温度について解くと、以下の式が得られる。

$$T_b = \frac{c^2}{2k_B \nu^2} I_\nu \quad (1.16)$$

ここで T_b は強度 I_ν に対応する温度であり、輝度温度と呼ばれる。

ある物質が温度 T で熱平衡状態にあるとき、その物質から放射される電磁波の強度は式 (1.9) より $S_\nu =$

$B_\nu(T)$ となる。すなわち、温度 T で熱平衡となる物質の源泉関数は黒体放射の強度に等しい。これをキルヒホッフの法則という。 $S_\nu = B_\nu(T)$ を放射輸送方程式 (1.11) に代入すると、以下の式が得られる。

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (1.17)$$

レイリージーンズの近似式が成り立つとき、式 (1.17) を、物質の温度 T と輝度温度 T_b で表すと、以下の式が得られる。

$$T_b = T_b(0)e^{-\tau_\nu} + T(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (1.18)$$

このようにして強度 I_ν を輝度温度 T_b で表すと、電磁波と相互作用する物質の温度との対応が直感的に理解しやすくなる。

1.2 星間物質と星形成

1.2.1 星間物質

宇宙空間には星と星との間に様々な星間物質が存在している。星間物質は星間ガスや星間ダストからなり、密度や温度の違いによって分類されている。図はさまざまな密度、温度における星間物質を示している。星間物質は温度が低いいため、可視光では観測が困難であったが、電波観測によりその詳細な構造が明らかになってきた。

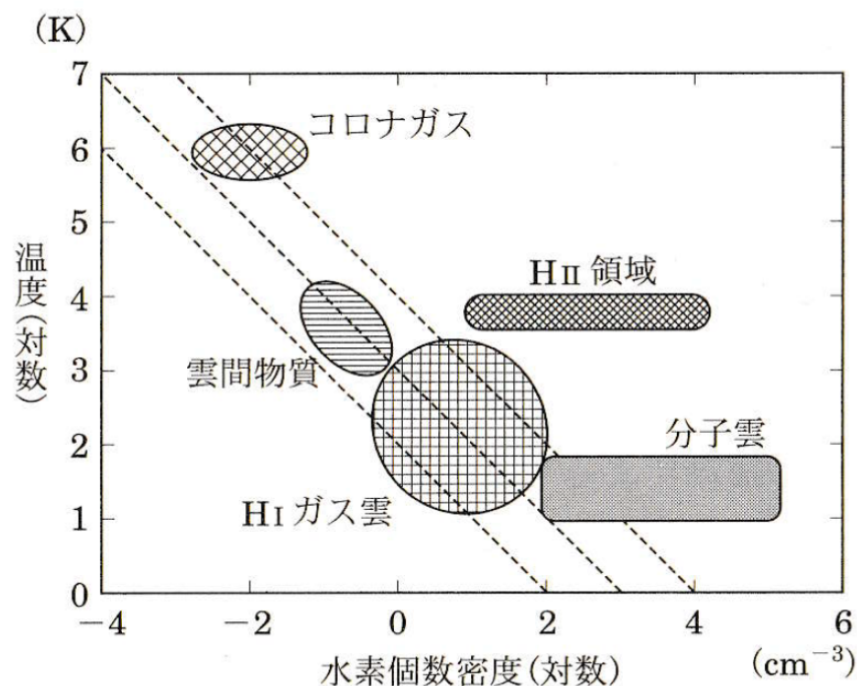


図 1.2 さまざまな密度、温度における星間物質 (天文学辞典 (日本天文学会))

1.2.2 分子雲

星間物質のうち、最も密度が高く低温な星間ガスは分子雲と呼ばれる。分子雲の主成分は水素分子 (H_2) であるが、水素分子は双極子モーメントを持たないため、分子の回線遷移による電磁波を放出することはできない。そのため、分子雲の観測には水素分子やヘリウムに次いで存在量の多い、一酸化炭素分子 (CO) の回線遷移によ

る分子輝線の観測がよく行われる。分子輝線の観測により、分子ガスの分布、温度、質量といった分子雲の物理情報を得ることができる。

1.2.3 CO 分子輝線

CO 分子輝線は強い電波強度を持つため、分子輝線の中でも観測が容易な輝線である。CO 分子輝線は複数の同位体を持ち、以下の三つがよく知られている。

- $^{12}\text{CO}(J = 1 - 0)$ (115 GHz): 最も存在量が多く、分子雲全体の分布を調べるのに適している。一般的に光学的に厚い。
- $^{13}\text{CO}(J = 1 - 0)$ (110.2 GHz): ^{12}CO よりも存在量が少なく、光学的に薄い場合が多いため、分子雲の内部構造を調べるのに適している。
- $\text{C}^{18}\text{O}(J = 1 - 0)$ (109.8 GHz): ^{13}CO よりもさらに存在量が少なく、非常に光学的に薄いため、分子雲の高密度領域を調べるのに適している。

この CO ガスからの分子輝線を観測することで、分子雲の主成分である H_2 ガスの物理情報を間接的に得ることができる。

1.2.4 大質量星形成とフィードバック

分子雲中で形成される恒星のうち、特に質量が太陽の 8 倍を超えるような大質量星は、形成後に表面温度が数万度に達し、強い紫外線放射を行う。この紫外線放射は周囲の水素ガスを電離し、HII 領域と呼ばれるイオン化ガス領域を形成する。この HII 領域は、高温ガスの熱圧力によって膨張し、周囲の星間物質を吹き飛ばす「フィードバック」として機能する。このフィードバック過程は、分子雲を破壊し星形成を抑制する負の側面を持つ一方で、周囲のガスを圧縮し新たな星形成を誘発する正の側面も持つと考えられている。したがって、大質量星形成過程の理解は、周囲の分子雲や銀河全体の星形成過程を理解する上で極めて重要である。

しかしながら、このような大質量星が具体的にどのような物理過程を経て形成されるのか、その詳細なメカニズムはまだ明らかでない。標準的な重力収縮モデルでは、形成途中の原始星からの強力な放射圧が周囲のガスの降着を阻害してしまうため、単純な球対称収縮だけでは大質量星への成長を説明することが困難であるためである。そのため、分子雲内部での自発的な重力収縮のみで十分な質量を集められるのか、あるいは外部からの力学的相互作用による急速な質量供給が必要なのかという点は、大質量星形成過程を理解する上で重要な課題となっている。

1.2.5 分子雲衝突

近年、多数の観測的・理論的研究が、大質量星形成の主要な誘因の一つとして分子雲同士の衝突 (cloud-cloud collision; CCC) を支持している。速度の異なる雲の補完的分布や衝突界面の圧縮構造が示すように、CCC は短時間で高密度ガスを形成し、大質量星団の形成を促進する有力なメカニズムと考えられている。一方で Sun et al. (2022) によれば、銀河内の分子雲のダイナミクスから推定される雲衝突の発生時間尺度はおおよそ 100 Myr と長く、これは分子雲の自由落下時間 (5–20 Myr 程度) よりも顕著に大きい。このことは、雲衝突は全体として稀な現象であるにもかかわらず、観測では衝突起源と考えられる大質量星形成領域が数多く存在する、という一見矛盾した状況を示唆している。したがって、大質量星形成過程の理解を深めるためには、より高頻度で CCC が発生するメカニズムの解明が必要である。

1.2.6 階層的進化

近年の観測的・理論的研究は、雲からコアに至るまで多階層で重力収縮が同時進行するグローバル階層的収縮 (global hierarchical collapse; GHC) の描像を支持している (Vázquez-Semadeni et al. (2019) など)。GHC では、大きなスケールがゆっくりと収縮しながら、その内部でより小さく高密度な構造が後から短い時間尺度で形成・収縮するという、動的かつ入れ子状の進化が生じる。この結果、フィラメント網やクランプ・コアが雲内で絶えず形成・移動し、構造間の流入や合体が頻繁に起こる。

このような階層的進化の描像は、分子雲内での内部構造同士の衝突や合体が自然に引き起こされることを示唆する。特に、小スケール構造が短い時間で急速に高密度化する過程では、空間的・速度的に近接したクランプ同士が相互作用しやすく、局所的な衝突頻度は雲全体の衝突時間尺度 (~ 100 Myr) よりもはるかに高くなり得る。こうした内部衝突は、圧縮された界面で高密度ガスを効率的に形成し、大質量星形成を誘発する有力なメカニズムとなる可能性がある。

1.3 研究目的

分子雲の階層的進化は、大質量星形成の観測的特徴を統一的に説明しうる有力な枠組みである。しかしながら、銀河系内の分子雲を対象として系統的・包括的に検証した研究は依然として限られている。これまでの多くの研究は個別の雲に焦点を当てており、階層構造の特徴や進化段階、さらには星形成活動との関係を複数領域間で比較する枠組みは十分に整備されていない。

本研究では、銀河系内に存在する複数の分子雲を対象に、階層的構造と星形成活動の関連性を体系的に評価することを目的とする。そのために、野辺山 45m 電波望遠鏡で取得された FUGIN プロジェクト (Umamoto et al. (2017)) のデータを対象に、階層構造分類アルゴリズムの Dendrogram (Rosolowsky et al. (2008)) を適用して分子雲の階層構造を定量的に抽出する。得られた階層構造の物理量を基に、分子雲階層構造の形成・進化過程を具体的に議論し、階層的進化モデルの観測的検証を行うことで、大質量星形成メカニズムの包括的かつ詳細な理解を目指す。

第 2 章 データ概要

2.1 FUGIN

2.1.1 概要

FUGIN (FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with the Nobeyama 45m telescope) は, 野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載された多ビーム受信機 FOREST (FOur-beam REceiver System on 45m Telescope) を用いた, 天の川銀河の CO 多輝線同時サーベイ観測である. 本プロジェクトは野辺山宇宙電波観測所レガシー観測プロジェクトの一つであり, 国立天文台の梅本智文助教を中心として, 2014 年から 2017 年にかけて観測が実施された.

FUGIN では $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $^{13}\text{CO}(J=1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ の三つの分子輝線が同時に観測されており, 分子雲の広がった低密度成分から高密度領域に至るまでを一貫して捉えることができる. このため, 分子雲がどのように希薄な構造から高密度構造へと発展し, 最終的に星形成に至るのかを調べる上で極めて有用なデータセットであり, 銀河系における星間ガスの進化研究に重要な役割を果たしている.

2.1.2 データ諸元

FUGIN プロジェクトの観測パラメータを表 2.1 に示す.

観測領域は銀河系第一象限である $10^\circ \leq l \leq 50^\circ$, $|b| \leq \pm 1^\circ$ と, 銀河系第三象限である $198^\circ \leq l \leq 236^\circ$, $|b| \leq \pm 1^\circ$ の二つである. またアンテナを短い時間間隔で連続的に走査する OTF (On-The-Fly) 観測が採用され, 大気による電波強度の揺らぎが抑えられている. サーベイ観測については $1^\circ \times 1^\circ$ の領域について X スキャン (銀経方向) と Y スキャン (銀緯方向) の 2 スキャンを行うことで観測を行い, 得られた $1^\circ \times 1^\circ$ 領域のデータを結合して最終的なデータキューブを作成している.

表 2.1 FUGIN プロジェクトの観測パラメータ

分子輝線	$^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $^{13}\text{CO}(J=1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$
ビームサイズ	14'' (^{12}CO), 15'' (^{13}CO , C^{18}O)
角度分解能	20'' (^{12}CO), 21'' (^{13}CO , C^{18}O)
速度分解能	1.3 km s ⁻¹
T_{sys}	250 K (^{12}CO), 150 K (^{13}CO , C^{18}O)
R.M.S(T_{A}^*)	0.24 K (^{12}CO), 0.12 K (^{13}CO , C^{18}O)
銀経	$10^\circ \leq l \leq 50^\circ$, $198^\circ \leq l \leq 236^\circ$
銀緯	$ b \leq \pm 1^\circ$
観測領域	80 deg ² , 76 deg ²
ピクセルサイズ	8.5''

2.1.3 対象領域

本研究で解析対象とした星形成領域を表 2.2 に示す。これらの領域にある分子雲は、CCC や、GHC の一形態であるハブフィラメントによって活発な星形成を行っていることが、FUGIN をはじめとする観測データを解析した先行研究で示されている。よってこれらの星形成領域は、階層的進化モデルの観測的検証を行う上で適切なサンプルであると考えられる。

これらの領域を含む FUGIN データキューブから、各領域に対応する部分を切り出して解析を行った。また分子輝線は、光学的に薄く、分子雲の内部構造をよく捉えることができる $^{13}\text{CO}(J = 1 - 0)$ 輝線データを用いた。

表 2.2 本研究で解析対象とした星形成領域

領域名	銀経 [°]	銀緯 [°]	視線速度範囲 [km s^{-1}]	距離 [kpc]	参考
G18.15-0.30+51	17.8 - 18.8	-0.8 - 0.0	25 - 75	6.07	Sofue (2023)
G45.3+0.1	45.0 - 45.6	-0.3 - 0.3	50 - 75	8.00	Bhadari et al. (2022)
M16	16.6 - 17.4	0.1 - 0.9	14 - 30	1.74	Nishimura et al. (2021)
M17	14.8 - 15.5	-0.8 - -0.3	0 - 30	1.98	Nishimura et al. (2018)
N4	11.8 - 12.0	0.7 - 1.0	20 - 30	2.80	Fujita et al. (2019)
N14	13.7 - 14.9	-0.6 - 0.1	30 - 50	3.10	Dewangan et al. (2020)
N35	24.1 - 24.7	-0.1 - 0.5	100 - 130	8.80	Torii et al. (2018)
W33	12.5 - 13.5	-0.5 - 0.5	15 - 60	2.40	Kohno et al. (2018)
W42	25.5 - 26.0	-0.5 - 0.0	85 - 125	3.80	Dewangan et al. (2015)
W43	30.2 - 31.2	-0.5 - 0.5	70 - 120	5.49	Kohno et al. (2021)
W49N	42.8 - 43.4	-0.4 - 0.2	-5 - 20	11.11	Miyawaki et al. (2022)
W51A	48.7 - 49.7	-0.7 - 0.3	40 - 75	5.40	Fujita et al. (2021)

2.2 *Spitzer*-GLIMPSE, *Spitzer*-MIPSGAL

2.2.1 概要

スピッツァー宇宙望遠鏡 (*Spitzer* Space Telescope; 以下, *Spitzer*) は、NASA のグレートオブザバトリー計画 (Great Observatories Program) の第 4 機として、2003 年 8 月に打ち上げられた赤外線天文衛星である。*Spitzer* は口径 85 cm のベリリウム製主鏡を搭載し、 $3.6 \mu\text{m}$ から $160 \mu\text{m}$ までの広範な赤外線波長域において、かつてない高感度・高分解能での観測を実現した。地球からの放射熱を避けるため、地球を追尾する太陽周回軌道 (Earth-trailing orbit) を採用しており、極低温冷却材を用いた「コールド・ミッション」と、冷却材枯渇後の「ウォーム・ミッション」を通じて、系外惑星、星形成領域、および遠方銀河の研究において多大な成果を挙げた。

GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire, Benjamin et al. (2003)) は、*Spitzer* を用いて天の川銀河の主要部を中間赤外線でサーベイしたプロジェクトである。可視光では星間塵によって遮られる銀河面深部を赤外線で見透すことで、銀河系の渦巻構造やバー構造の特定、および星形成領域に埋もれた星団や原始星の検出において多大な成果を挙げた。

MIPSGAL (MIPS Galactic Plane Survey, Carey et al. (2009)) は、GLIMPSE と同等の領域を遠赤外線で見透したプロジェクトである。GLIMPSE が主に星や PAH (多環芳香族炭化水素) の放射を捉えるのに対し、MIPSGAL はより波長の長い赤外線を用いて、星形成領域内の温められた星間塵そのものの分布を明らか

にした。これら二つのサーベイデータを組み合わせることで、星と星間物質の相互作用を包括的に理解することが可能となる。

2.2.2 データ諸元

Spitzer-GLIMPSE および *Spitzer*-MIPSGAL の観測パラメータを表 2.3 および表 2.4 に示す。

GLIMPSE では、赤外線アレイカメラ IRAC (Infrared Array Camera) が使用された。観測波長は 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 μm の 4 バンドであり、画素スケール 1.2'', 空間分解能 (FWHM) は約 2'' を達成している。この高い分解能により、混み合った銀河面領域においても個々の星や微細なフィラメント構造を分解することが可能である。

MIPSGAL では、遠赤外線撮像装置 MIPS (Multiband Imaging Photometer for *Spitzer*) が使用された。主な観測波長は 24 μm および 70 μm である。特に 24 μm バンドは、空間分解能 6'' を持ち、GLIMPSE のデータと比較可能な解像度で、低温のダストや埋もれた原始星からの熱放射を捉えることができる。

表 2.3 *Spitzer*-GLIMPSE の観測パラメータ

観測装置	IRAC (Infrared Array Camera)
観測波長	3.6 μm , 4.5 μm , 5.8 μm , 8.0 μm
角度分解能 (FWHM)	1.7'' (3.6 μm), 1.7'' (4.5 μm), 1.9'' (5.8 μm), 2.0'' (8.0 μm)
感度 (5 σ 点光源)	0.2 mJy (3.6/4.5 μm), 0.4 mJy (5.8/8.0 μm)
銀経	$ l = 10^\circ - 65^\circ$
銀緯	$ b \leq 1^\circ$
観測領域	220 deg ²
ピクセルサイズ	1.2''

表 2.4 *Spitzer*-MIPSGAL の観測パラメータ

観測装置	MIPS (Multiband Imaging Photometer for <i>Spitzer</i>)
観測波長	24 μm , 70 μm
角度分解能 (FWHM)	6'' (24 μm), 18'' (70 μm)
感度 (5 σ 点光源)	1.7 mJy (24 μm), 30 - 200 mJy (70 μm)
銀経	$ l < 65^\circ$
銀緯	$ b < 1^\circ$
観測領域	220 deg ²
ピクセルサイズ	2.45'' (24 μm), 4.0'' (70 μm)

2.2.3 対象領域

本研究では表 2.2 に示した星形成領域に対して、*Spitzer*-GLIMPSE の 8 μm データおよび *Spitzer*-MIPSGAL の 24 μm データを参照した。これらの赤外線データを用いることで、各領域における星形成活動の活発さを評価した。8 μm や 24 μm の赤外線放射が強い領域は、若い星や形成されたばかりの星団からの放射によって、周囲の星間物質が加熱・励起されていることを示唆する。したがって本研究では、赤外線強度の高さを星形成活動の指標とし、CO 分子輝線から同定された高密度な分子雲構造が、実際に活発な星形成現場と対応しているかどうかの検証を行った。

2.3 WISE HII 領域カタログ

2.3.1 概要

WISE(Wide-field Infrared Survey Explorer) は, NASA によって 2009 年 12 月に打ち上げられた赤外線天文衛星である. WISE は 40 cm 口径の望遠鏡を搭載し, 3.4, 4.6, 12, 22 μm の 4 つのバンド (W1, W2, W3, W4) を用いて全天サーベイ観測を行った.

WISE がカバーする中間赤外線の波長域は, 恒星からの光球放射だけでなく, 星間物質中に含まれる微細な塵 (ダスト) や多環芳香族炭化水素 (PAH) からの放射を含んでいる. このため, WISE のデータは, 銀河系内の星形成領域や, それに伴う星間物質の加熱状態・空間分布を広範囲かつ高感度で捉えるのに適しており, HII 領域の探索や形態分類において広く利用されている.

2.3.2 データ諸元

WISE の観測パラメータを表 2.5 に示す. WISE による中間赤外線画像の空間分解能は, 波長帯によって 6.1'' から 12.0'' である. これは本研究で使用する FUGIN データの角度分解能 ($\sim 20''$) と比較して高く, 分子雲と HII 領域の空間的な位置関係や, 領域の広がりを詳細に比較する上で十分な分解能を有している.

表 2.5 WISE の観測パラメータ

観測波長	3.4 μm (W1), 4.6 μm (W2), 12 μm (W3), 22 μm (W4)
角度分解能 (FWHM)	6.1'' (W1), 6.4'' (W2), 6.5'' (W3), 12.0'' (W4)
感度 (5σ)	0.08 mJy (W1), 0.11 mJy (W2), 1 mJy (W3), 6 mJy (W4)
銀経	全天 ($0^\circ \leq l \leq 360^\circ$)
銀緯	全天 ($ b \leq 90^\circ$)
観測領域	全天サーベイ

2.3.3 HII 領域カタログ

Anderson et al. (2014) は, WISE の中間赤外線データを用いて銀河系内の HII 領域を同定し, 包括的な HII 領域カタログを作成した. このカタログは, 銀河面全域 ($|b| < 8^\circ$) にわたる約 8,000 個の HII 領域およびその候補天体を収録した, 現在最も網羅的なカタログである. Anderson et al. (2014) は, HII 領域が示す特徴的な赤外線形態, すなわち「W4 バンドで見られる中心部のイオン化ガス領域」と, それを取り囲む「W3 バンドで見られる PDR のシェル構造」に基づき, HII 領域の同定を行っている.

1.2.4 節で述べたように, HII 領域は大質量星からの強い紫外線放射によって形成される. そのため, HII 領域の存在は, その分子雲における大質量星形成活動の指標となる. 本研究では, このカタログから得られる HII 領域の中心座標, および角径を利用し, FUGIN で同定された分子雲構造と HII 領域の空間的關係を評価して, 大質量星形成活動との関連性を検討した.

第 3 章 解析手法

3.1 Dendrogram

3.1.1 概要

本研究では、分子雲の階層構造を定量的に抽出するために、Dendrogram アルゴリズムを用いる。

Dendrogram は、多次元のデータセットにおける階層構造を樹形図上に分類するアルゴリズムである。それぞれの階層は、内部に構造を持たない最小構造であるリーフ (leaf) と、内部に構造を持つブランチ (branch) に分類される。また最も上位の構造をトランク (trunk) と呼ぶ。解析対象のデータにおいては、ガスの質量が大きい部分ほどより多くの内部構造を持つ。一方 Dendrogram には階層構造でない高質量構造も抽出する。以下ではそのような構造を isolated と呼称する。

Dendrogram についてのその他の詳細は、<http://www.dendrograms.org/> に記載されている。

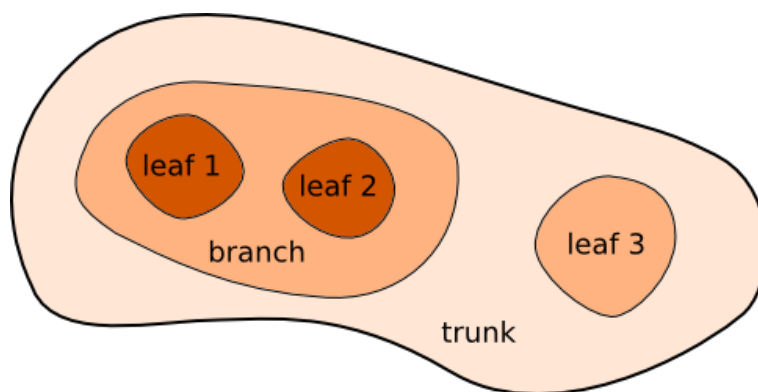


図 3.1 Dendrogram による階層構造

3.1.2 アルゴリズム詳細

Dendrogram のアルゴリズムにおいては、最大値を持つピクセルから分類が始まり、徐々にほかのピクセルが構造に加えられていく。

図 3.2 から図 3.5 は、1 変数のデータを例にとって Dendrogram のアルゴリズムについて図示している。まずアルゴリズムはデータの最大値を検出する (図 3.2)。その後アルゴリズムは current value を最大値から降下させ、その最大値をピークを持つ leaf を生成する。current value が二つ目のピークに到達した段階で、その値をピークとして、最初に生成していた leaf とは独立した二つ目の leaf が生成される (図 3.3)。current value が降下を続けると、二つのピークが一つの山に結合されるが、それに対応して二つの leaf は一つの branch に結合される (図 3.4)。同様の手順が繰り返され、今回の例では最終的にデータは一つのトランクにまとめられる (図 3.5)。

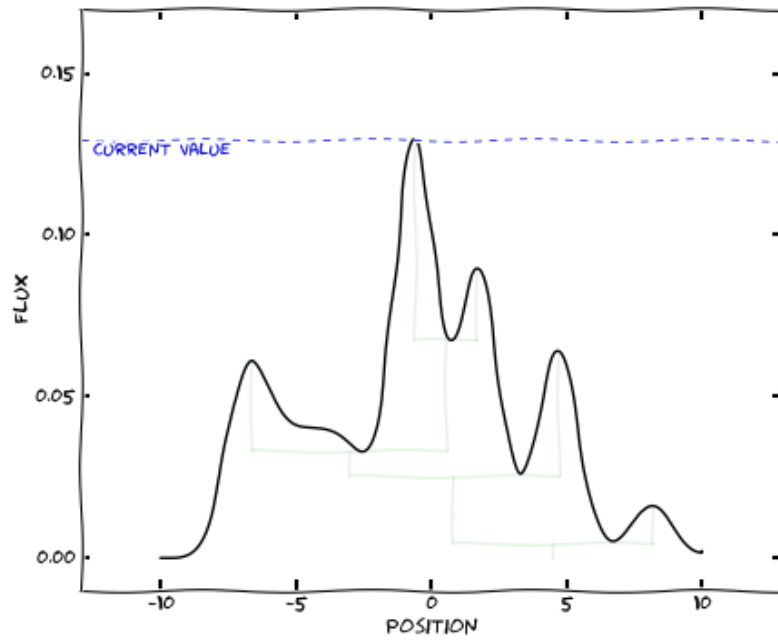


図 3.2 Dendrogram アルゴリズム 1

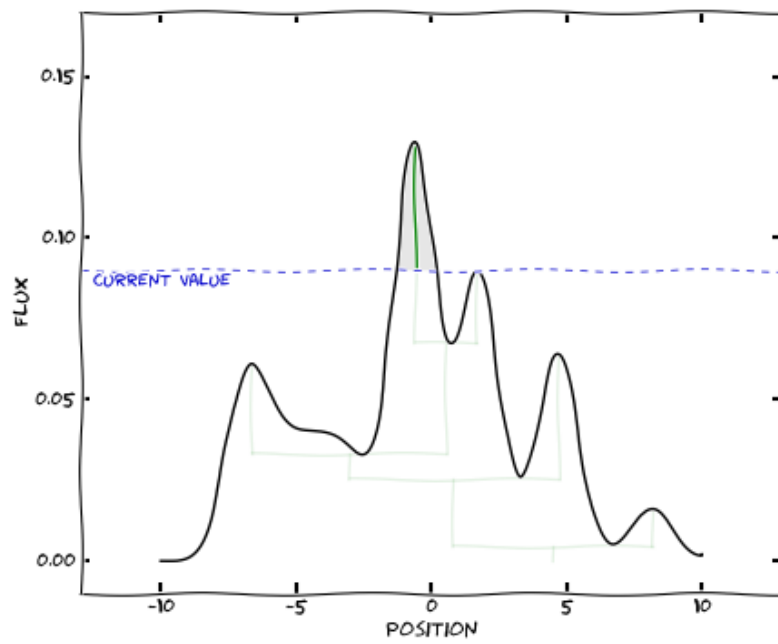


図 3.3 Dendrogram アルゴリズム 2

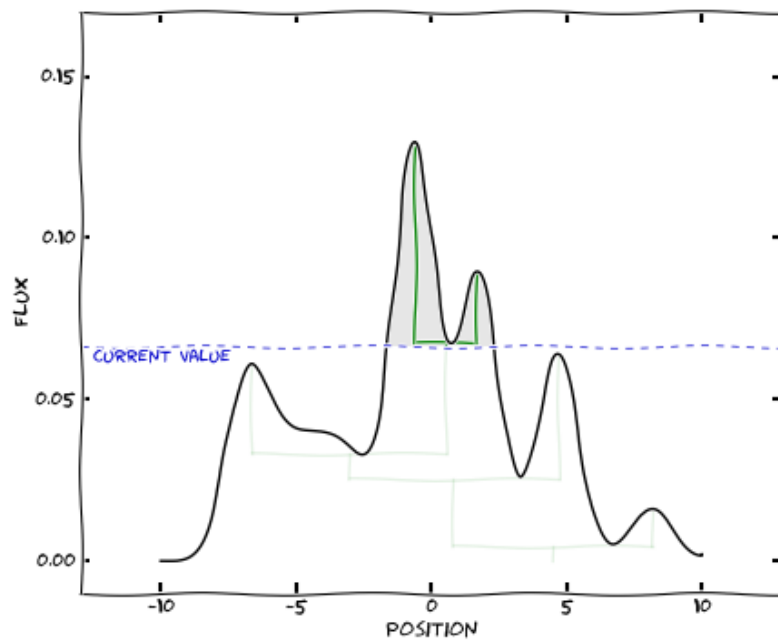


図 3.4 Dendrogram アルゴリズム 3

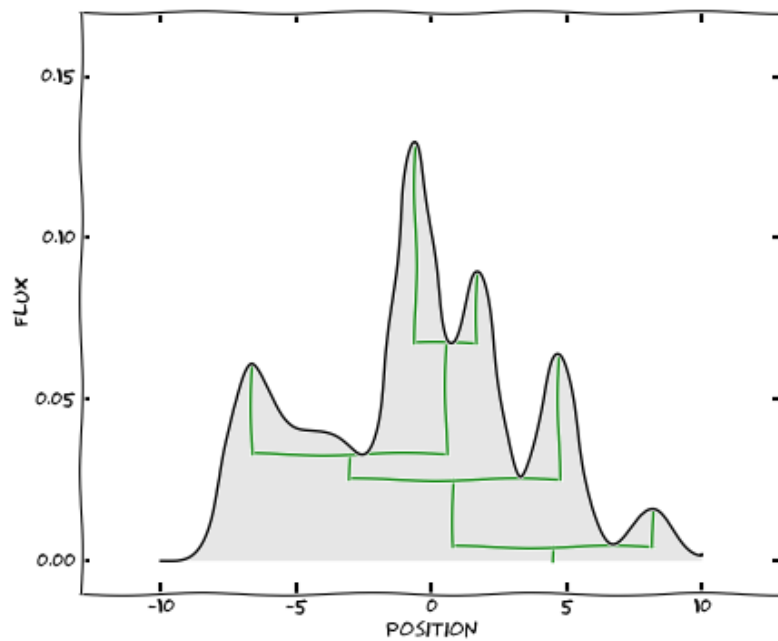


図 3.5 Dendrogram アルゴリズム 4

3.1.3 パラメータ設定

Dendrogram を実行する際は、以下の三つのパラメータを設定する必要がある。

- min_value: アルゴリズム実行の際に current value が到達できる最小の値. これより小さい値を持つピクセルは考慮されない.
- min_delta: current value に加算される値. この値よりも小さいピークは独立した leaf とはみなされない.
- min_npix: 独立した leaf を生成する際に必要なピクセル数の最小値.

図 3.6 や図 3.7 において, current value が min_value よりも下に降下することはない. また図 3.6 において, まだピークは加算された min_delta の幅よりも小さいため, leaf とはみなされていない. その後 current value が降下を続け図 3.7 のようになると, ピークが min_delta の幅より大きくなり, ピークは leaf とみなされるようになる.

本研究では, min_value をデータキューブの R.M.S. ノイズ値の 1.5 倍, min_delta を R.M.S. ノイズ値の 1 倍, min_npix を 500 ボクセルに設定した.

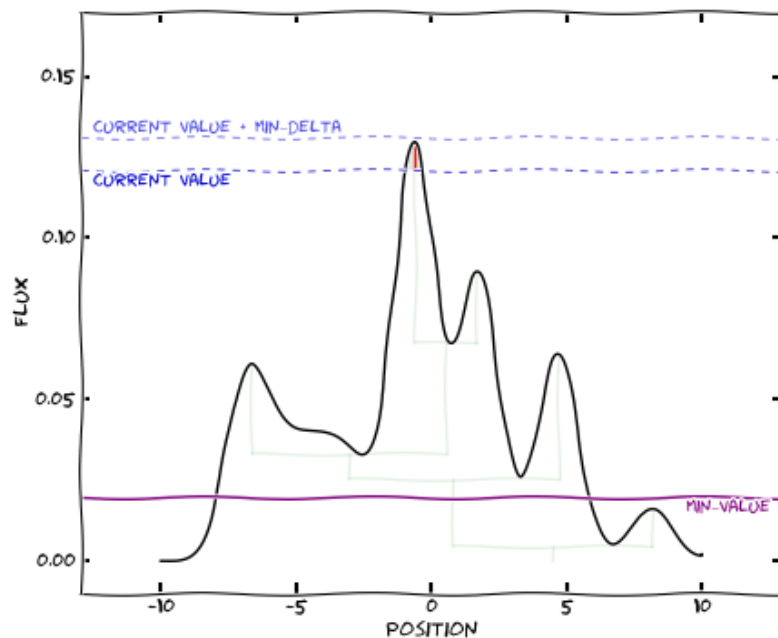


図 3.6 Dendrogram アルゴリズムにおける min_value と min_delta の例 1

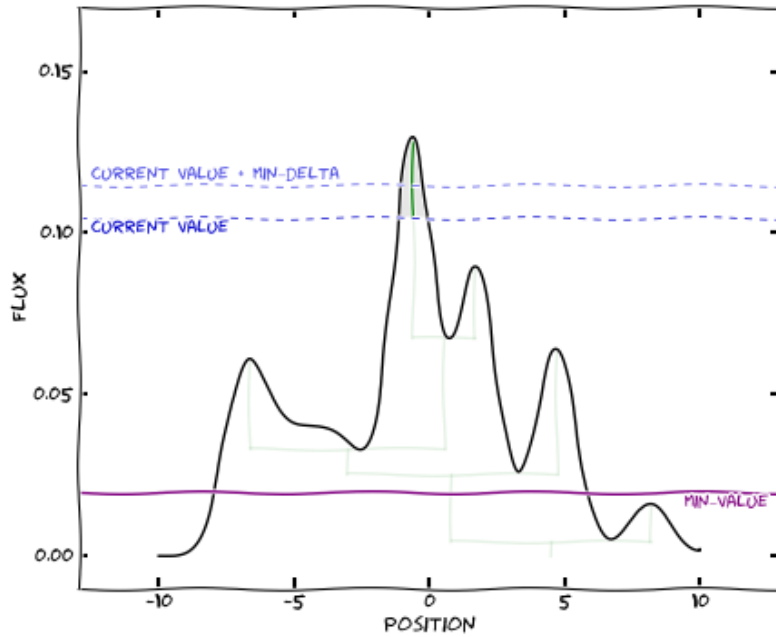


図 3.7 Dendrogram アルゴリズムにおける min_value と min_delta の例 2

3.2 物理量導出

Dendrogram によって同定された階層構造に対し、以下の物理量を導出した。

3.2.1 有効半径

構造サイズの指標として有効半径 R を以下のように求めた。

まず、位置-位置-速度空間における構造の、位置-位置平面に対する投影面積 S [pc²] を以下の式で求めた。

$$S = N_{\text{pix}} \times (D \times \Delta\text{grid})^2 \quad (3.1)$$

ここで N_{pix} は位置-位置平面における構造のピクセル数、 D は構造までの距離 [pc]、 Δgrid はデータキューブのグリッドサイズ [rad] である。

これを用いて、有効半径 R [pc] は以下の式で求めた。

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (3.2)$$

3.2.2 柱密度

構造の H₂ 柱密度 N_{H_2} は、局所熱力学平衡を仮定し以下の手順で推定した。

まず、¹³CO の励起温度 T_{ex} を、以下の式から求めた。

$$\Delta I = (1 - e^{-\tau})(B_{\nu}(T_{\text{ex}}) - B_{\nu}(T_{\text{bg}})) \quad (3.3)$$

ここで ΔI は放射強度、 τ は光学的厚さである。また $B_{\nu}(T_{\text{bg}})$ は宇宙マイクロ波背景放射の強度であり、温度 $T_{\text{bg}} = 2.7$ K に対応する。すなわち、放射強度は励起温度 T_{ex} と宇宙背景放射 T_{bg} の差によって生じるプラン

ク関数値の差である。プランクの放射公式より

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (3.4)$$

であり、またレイリージェーンズの近似式より

$$\Delta I = \frac{2h\nu^3}{c^2} T_{\text{peak}} \quad (3.5)$$

である。ここで T_{peak} は $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線のピーク輝度温度である。式 (3.4) と式 (3.5) を用いて、励起温度 T_{ex} は以下の式で表される。

$$T_{\text{ex}} = \frac{5.53}{\ln\left(1 + \frac{5.53}{T_{\text{peak}} + 0.819}\right)} \quad (3.6)$$

次に、構造内の各視線に対し、 ^{13}CO の光学的厚さ τ を以下の式で求めた。

$$\tau = -\ln\left(1 - \frac{T_b}{5.29(J - 0.164)}\right) \quad (3.7)$$

ここで、

$$J = \frac{1}{\exp\left(\frac{5.29}{T_{\text{ex}}}\right) - 1} \quad (3.8)$$

であり、 T_b は $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の構造内にある各ピクセルの輝度温度である。

これらから、構造内の各視線に対し、 ^{13}CO の柱密度 N_{13} [cm^{-2}] を以下の式で求めた。

$$N_{13} = 2.42 \times 10^{14} \frac{T_{\text{ex}} + 0.88}{1 - \exp\left(-\frac{5.29}{T_{\text{ex}}}\right)} \int \tau dv \quad (3.9)$$

ここで光学的厚さ τ の積分範囲は構造内にある各視線の速度幅とした。最終的に、構造内の各ピクセルに対し、水素分子 H_2 の柱密度 N_{H_2} [cm^{-2}] を以下の式で求めた。

$$N_{\text{H}_2} = 5.0 \times 10^5 N_{13} \quad (3.10)$$

ここで Dickman (1978) から、 ^{13}CO 分子と H_2 分子の存在比を 5.0×10^5 とした。

3.2.3 質量

構造の質量 [M_\odot] は、 H_2 の柱密度 N_{H_2} を用いて以下の式で求めた。

$$M = \sum_{\text{line of sight}} \frac{\mu m_{\text{H}} (d \times \tan(\Delta \text{grid}))^2 N_{\text{H}_2}}{M_{\text{sun}}} \quad (3.11)$$

ここで $\mu = 2.8$ は平均分子量、 m_{H} は水素原子の質量 [kg]、 d は対象領域までの距離 [cm]、 Δgrid はデータキューブのグリッドサイズ [rad]、 M_{sun} は太陽質量 [kg] である。また、質量の和は構造内にある全ての視線に対して行った。

3.2.4 体積密度

構造の体積密度 ρ は、以下の式で求めた。

まず、構造の体積 V [cm^3] を以下の式で求めた。

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (3.12)$$

ここで R は式 3.2 で求めた有効半径である。

これを用いて、体積密度 ρ [g cm^{-3}] は以下の式で求めた。

$$\rho = 6.77 \times 10^{-23} \frac{M}{V} \quad (3.13)$$

3.2.5 速度分散

構造の速度分散 σ_v は以下のようにして求めた。

まず、位置-位置-速度空間上の構造内にある各視線に対し、構造が占める速度幅のスペクトルを抽出し、それらを足し合わせて構造全体のスペクトルを得た。そのスペクトルに対し、以下で定義されるガウス関数でフィッティングを行った。

$$G(v; A, \mu, \sigma) = A \exp\left(-\frac{(v - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.14)$$

フィッティングされたガウス分布に対して、最大値の半分になる 2 点の間の距離である半値全幅 (FWHM) を以下のように求め、それを構造の速度分散 σ_v [km s^{-1}] とした。

$$\sigma_v = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \quad (3.15)$$

3.2.6 ビリアルパラメータ

自己重力系において、重力と圧力が釣り合った平衡状態をビリアル平衡という。ビリアル平衡下にある系の全運動エネルギー K と全重力ポテンシャル U は以下の式で表される。

$$2K + U = 0 \quad (3.16)$$

構造がビリアル平衡下にあると仮定すると、構造の運動エネルギー K と重力ポテンシャル U はそれぞれ以下の式で表される。

$$K = \frac{3}{2} M \sigma_v^2 \quad (3.17)$$

$$U = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \quad (3.18)$$

ここで G は万有引力定数である。式 (3.17) と式 (3.18) を式 (3.16) に代入すると、以下の式が得られる。

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{5} \frac{GM}{R} \quad (3.19)$$

ここで、ビリアルパラメータ α_{vir} は以下のように定義される (Bertoldi & McKee (1992)) 。

$$\alpha_{\text{vir}} = \frac{5\sigma_v^2 R}{GM} \quad (3.20)$$

式 (3.19), (3.20) より、構造がビリアル平衡にあるとき、 $\alpha_{\text{vir}} = 1$ である。ビリアルパラメータは、構造の重力的束縛状態を評価する指標として用いられる。 $\alpha_{\text{vir}} \gg 1$ の場合、構造は重力的に非束縛であり、外部圧力や磁場などの他の要因によって支えられている可能性が高い。構造が重力的に束縛されているとき、 α_{vir} は 1 に近い値を取る。

3.2.7 8 μm および 24 μm 強度

各構造の 8 μm および 24 μm 強度 [MJy/sr] は, *Spitzer*-GLIMPSE および *Spitzer*-MIPSGAL のデータを用い, 位置-位置空間上の投影領域内における各ピクセルの強度値の中央値として求めた.

第 4 章 結果

4.1 全構造の物理量ヒストグラム

図 4.1 から図 4.4 は、各解析領域から Dendrogram によって同定された全構造の物理量ヒストグラムである。leaf, branch, trunk, isolated はそれぞれ、赤、オレンジ、黄色、灰色で示されている。

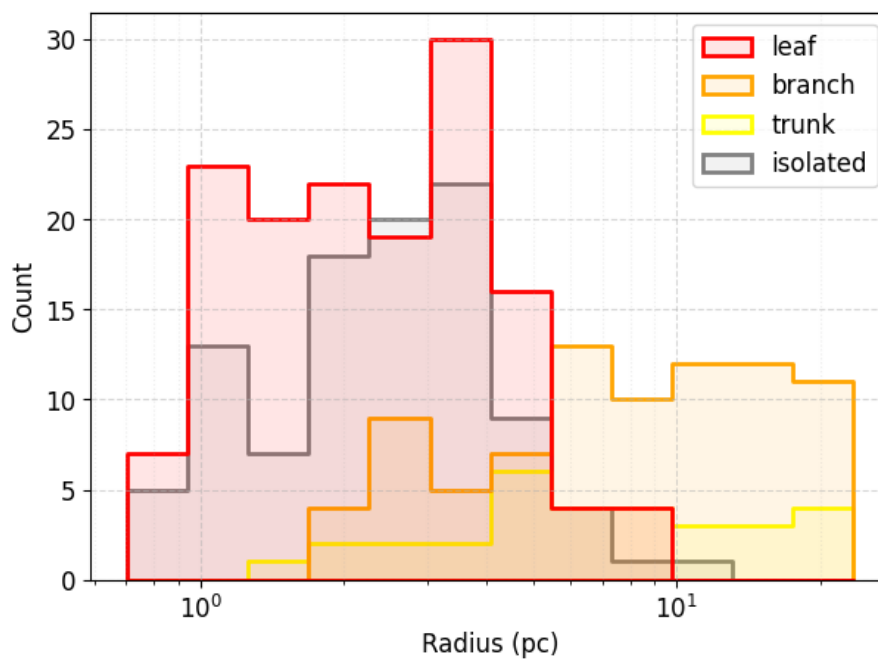


図 4.1 全構造の有効半径ヒストグラム

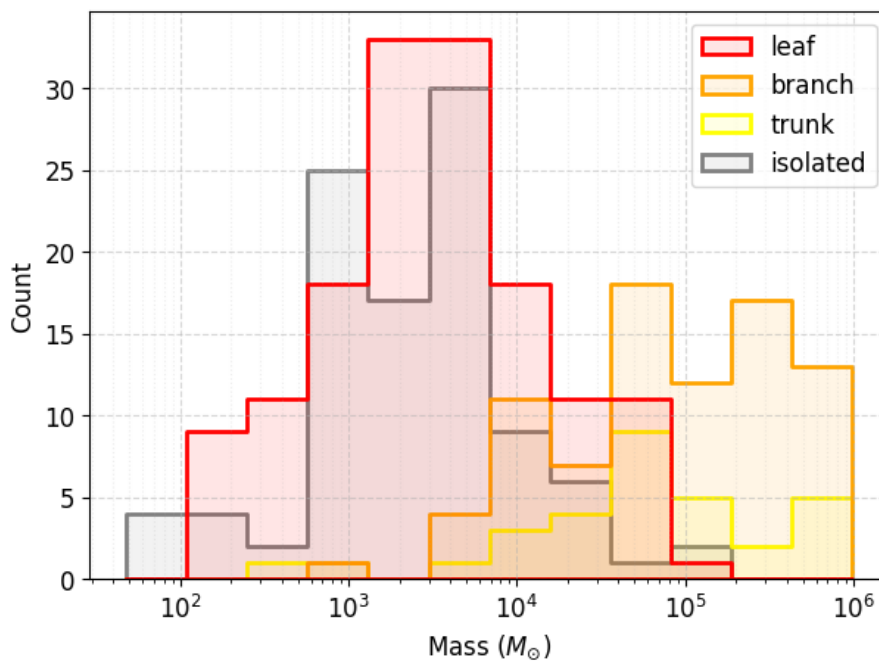


図 4.2 全構造の質量ヒストグラム

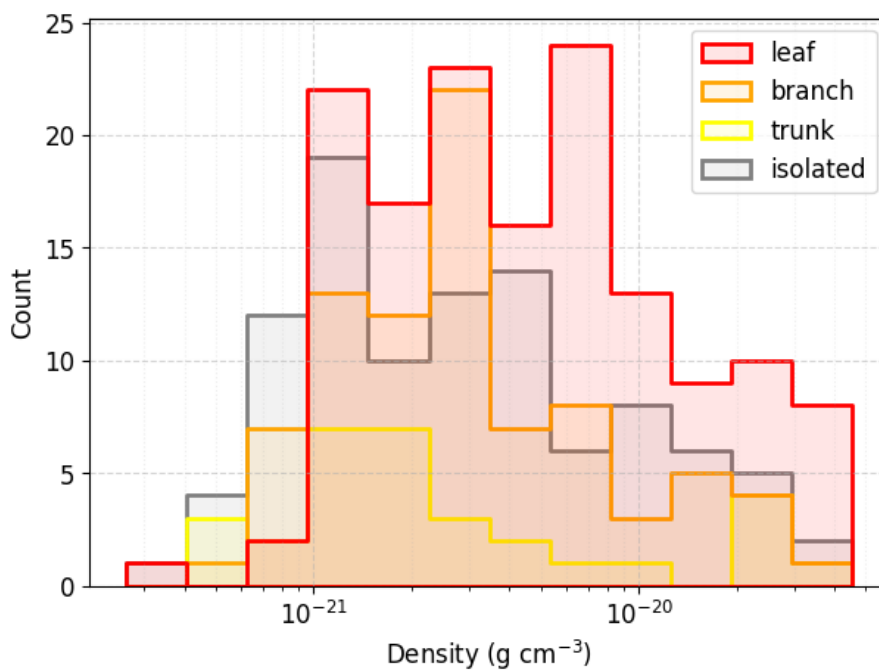


図 4.3 全構造の体積密度ヒストグラム

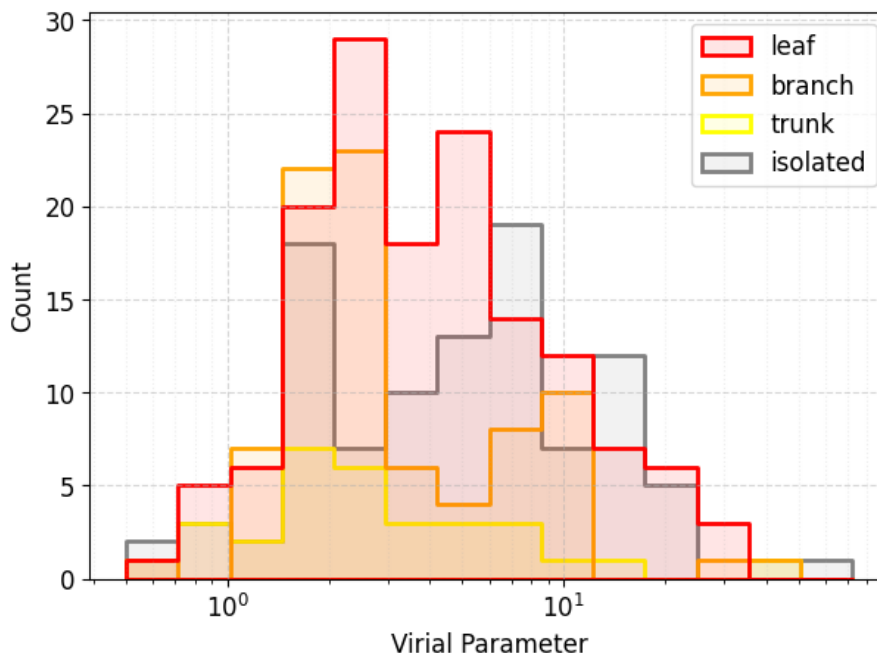


図 4.4 全構造のビリアルパラメータヒストグラム

これら四つの物理量について、leaf と isolated の間の統計的有意差を評価するため、各解析領域から同定された leaf と isolated の物理量分布に対し、分散分析を行った。その結果として得られた p 値を表 4.1 に示す。 $p < 0.05$ である場合、で統計的有意差があると判断した。

サイズについては、 $p = 0.48$ であり、leaf と isolated の間に有意な差は見られなかった。一方質量と体積密度については、いずれも $p < 0.05$ であり、leaf は isolated に比べて質量が大きく、体積密度が高いことが示された。またビリアルパラメータについても $p < 0.05$ であり、leaf は isolated に比べてビリアルパラメータが小さいことが示された。これらの結果は、階層構造内の leaf が、単一構造である isolated に比べてより高質量かつ高密度であり、またより重力的に束縛され、星形成に適した環境であることを示唆している。

表 4.1 leaf と isolated の物理量分布に対する t 検定結果

物理量	p 値
有効半径	0.52
質量	2.1×10^{-6}
体積密度	2.6×10^{-9}
ビリアルパラメータ	4.1×10^{-4}

4.2 W51A の解析結果

図 4.5 は、星形成領域 W51A の Dendrogram 解析結果を、位置-位置図で示したものである。背景は $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ のデータキューブを速度方向に積分した積分強度図であり、色付きのコントアは Dendrogram によって同定された階層構造の、位置-位置空間上での投影図を示している。leaf, branch, trunk, isolated はそれぞれ、赤、オレンジ、黄色、白色でコントアが描かれている。

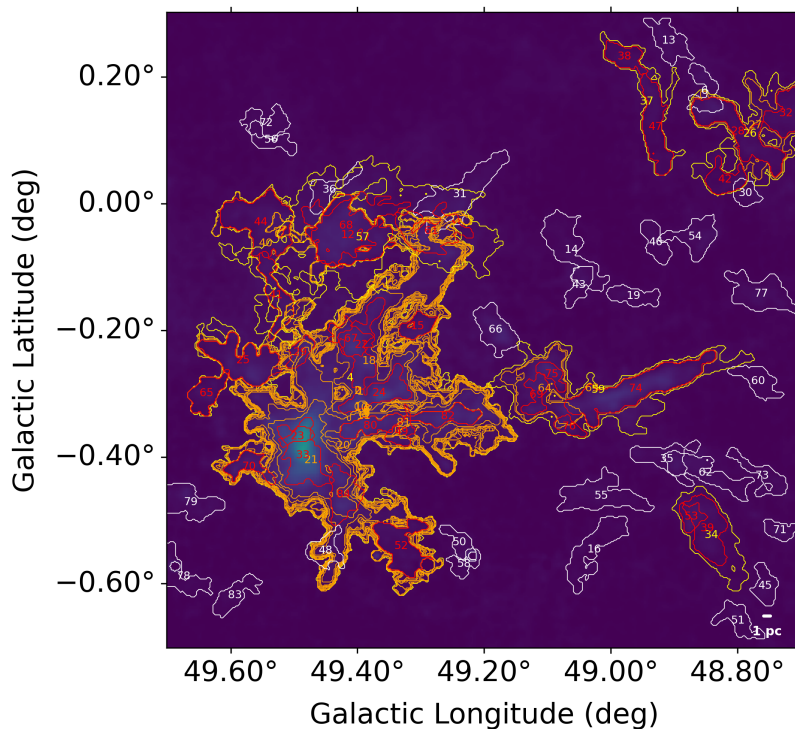


図 4.5 W51A の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

4.2.1 サイズ-密度プロット

図 4.6 は、W51A から同定された構造の有効半径-体積密度プロットである。leaf, branch, trunk はそれぞれ、赤、オレンジ、黄色の点で示されており、直接の親子関係にある構造同士は線で結ばれている。また isolated は灰色の点で示されている。プロットから、W51A において、階層構造は単一構造に比べて、より高密度であることがわかる。また trunk や branch の内部には、より高密度の leaf と、より低密度な leaf の両方が存在していることがわかる。

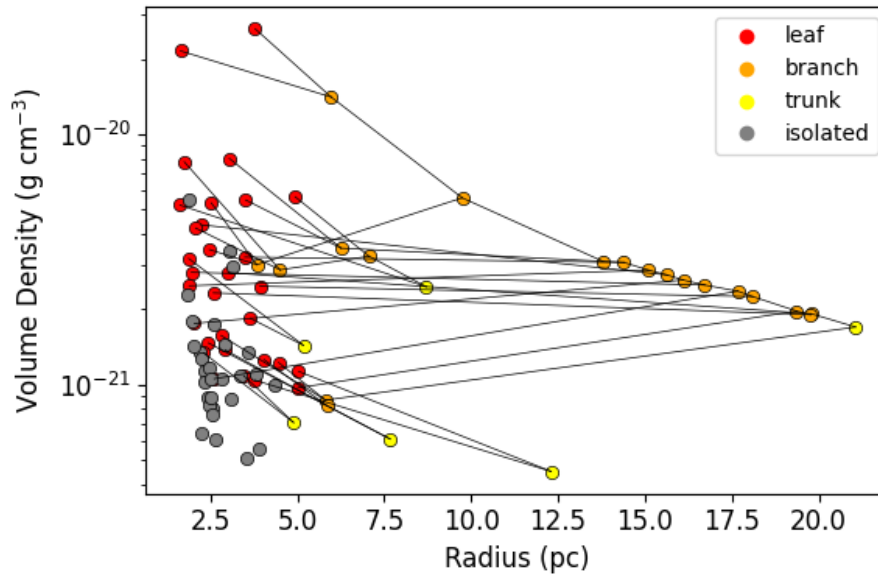


図 4.6 W51A から得られた構造のサイズ-体積密度プロット

4.2.2 ビリアルパラメータプロット

図は、W51A から同定された構造の体積密度-速度分散プロットである。leaf, branch, trunk はそれぞれ、赤、オレンジ、黄色の点で示されており、直接の親子関係にある構造同士は線で結ばれている。また isolated は灰色の点で示されている。プロットから、W51A において、階層構造は単一構造に比べて、より高密度かつ低ビリアルパラメータであることが示唆される。

W51A における leaf と isolated のビリアルパラメータに対し Welch t 検定を行った結果、 $p = 0.012$ であり、leaf と isolated の間に有意な差があることが分かった。すなわち、階層構造内の leaf は、単一構造である isolated に比べて、より重力的に束縛されている可能性が示唆される。

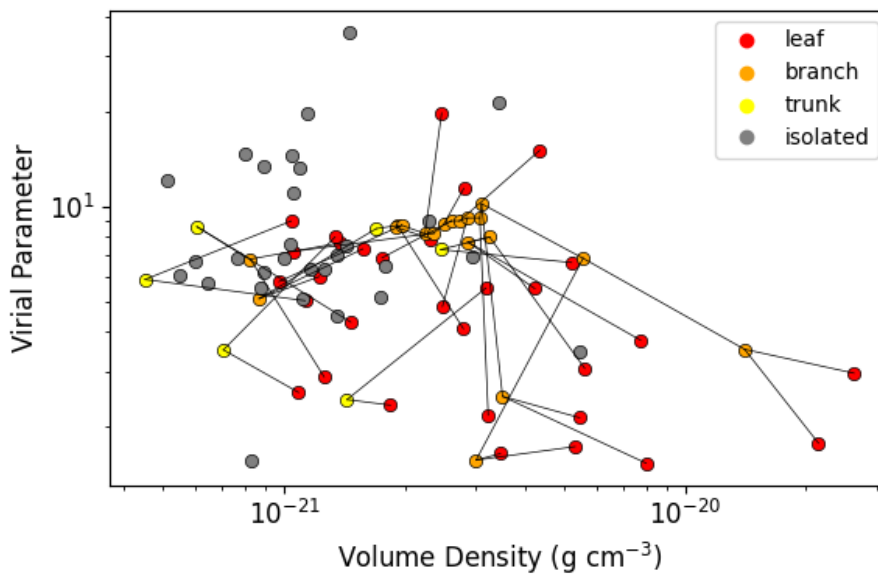


図 4.7 W51A から得られた構造の体積密度-ビリアルパラメータプロット

4.2.3 位置-速度図

図 4.8 は, W51A の解析結果を, 位置-速度図で示したものである. 背景は $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ のデータキューブを銀緯方向に積分した積分強度図であり, 色付きのコントアは Dendrogram によって同定された階層構造の, 位置-速度空間上での投影図を示している. leaf, branch, trunk, isolated はそれぞれ, 赤, オレンジ, 黄色, 白色でコントアが描かれている.

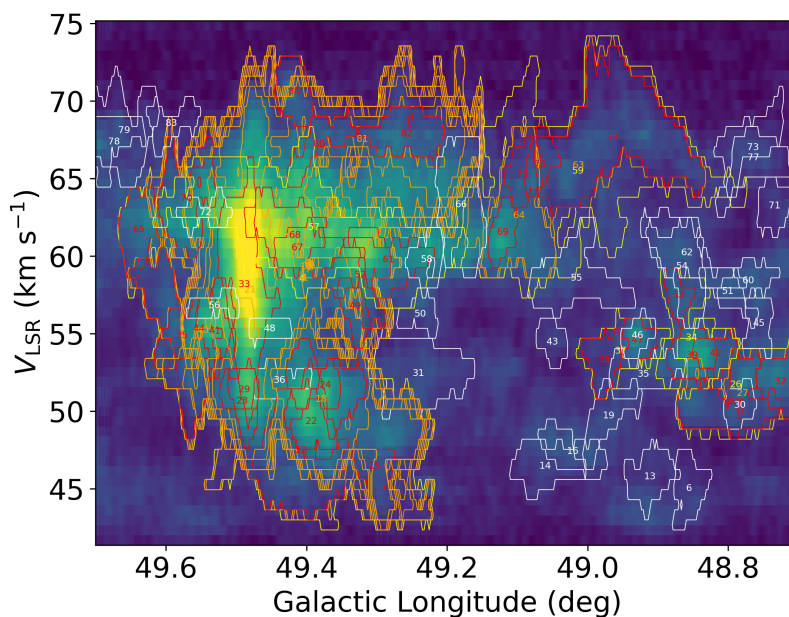


図 4.8 W51A の Dendrogram 解析結果 (位置-速度図)

背景の積分強度図を見ると, W51A の分子雲は複数の視線速度成分から構成されていることがわかる. Dendrogram 解析結果によれば, leaf は複数ある速度成分のそれぞれに存在している. また branch や trunk はそれらの速度成分を包含しつつ, 複数の速度成分にまたがって存在していることがわかる. このことから, W51A 分子雲の階層構造では, より大きなスケールの構造である branch, trunk に, 内部構造である leaf が複数閉じ込められており, これらの leaf が異なる速度で相互作用している可能性が示唆される.

第5章 議論

5.1 8 μm , 24 μm との比較

図 5.1 は, W51A の Dendrogram 解析結果を, *Spitzer*-GLIMPSE の 8 μm 強度および *Spitzer*-MIPSGAL の 24 μm 強度と比較したものである. 背景のうち緑色は 8 μm 強度図, 青色は 24 μm 強度図を示している. 色付きのコントアは Dendrogram によって同定された階層構造の, 位置-位置空間上での投影図を示している. leaf, branch, trunk, isolated はそれぞれ, 赤, オレンジ, 黄色, 白色でコントアが描かれている.

図から, W51A の分子雲において, Dendrogram によって同定された階層構造は, 8 μm 強度および 24 μm 強度が高い領域と対応していることがわかる. すなわち, 単一構造と比較してより高密度な階層構造が, 実際に活発な星形成活動を行っている領域と対応していることがわかる.

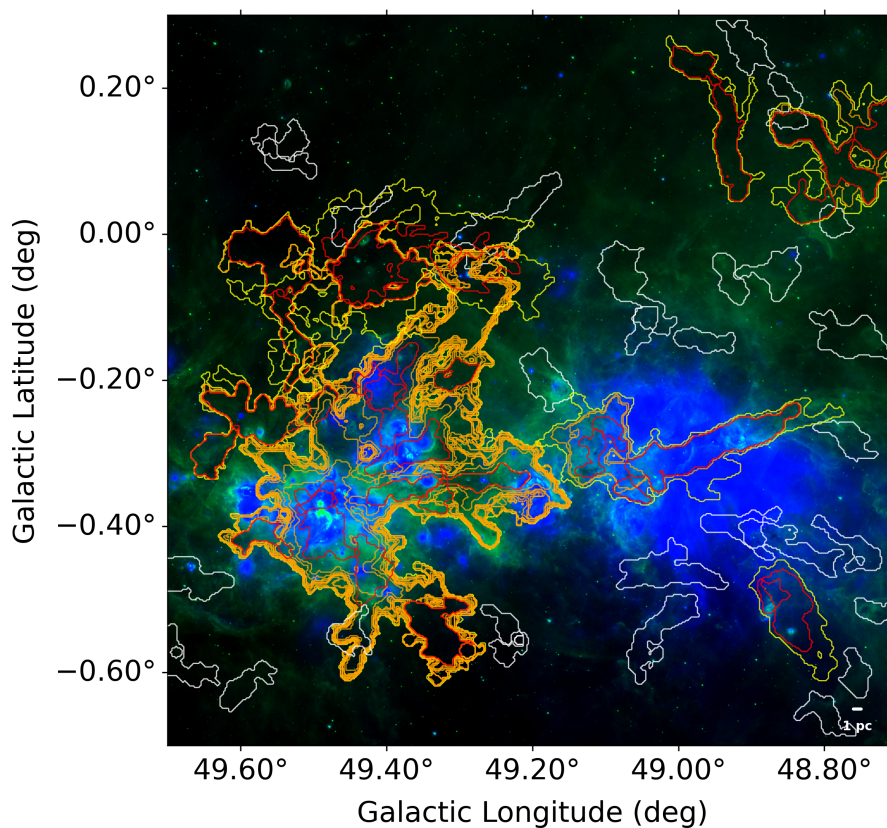


図 5.1 W51A の Dendrogram 解析結果と 8 μm データおよび 24 μm データの比較

5.1.1 構造密度-強度プロット

W51A から同定された階層構造について, 体積密度と 8 μm 強度, 24 μm 強度の中央値をプロットしたのが図 5.2, 図 5.3 である. leaf, branch, trunk はそれぞれ, 赤, オレンジ, 黄色の点で示されており, 直接の親子関係にある構造同士は線で結ばれている. また isolated は灰色の点で示されている. これらの図から, より高密

度な構造ほど、 $8\ \mu\text{m}$ 強度および $24\ \mu\text{m}$ 強度が高い傾向が見られる。また階層構造単一構造に比べて、より高密度かつ高強度であることがわかる。すなわち、実際に活発な星形成活動を行っている領域ほど、より高密度な階層構造を持っている可能性が示唆される。

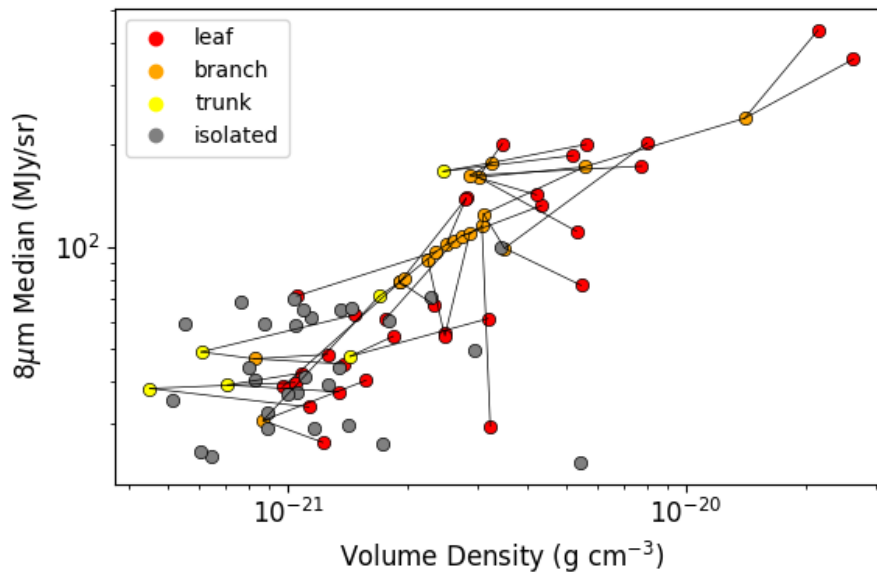


図 5.2 W51A から得られた構造の体積密度- $8\ \mu\text{m}$ 強度プロット

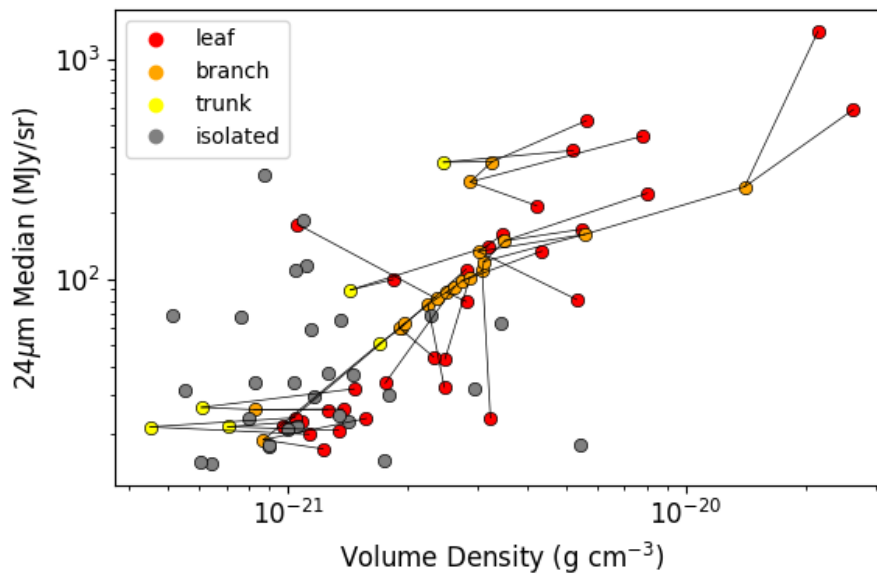


図 5.3 W51A から得られた構造の体積密度- $24\ \mu\text{m}$ 強度プロット

5.2 HII 領域との比較

5.2.1 HII 領域数ヒストグラム

図 5.4 は、解析対象になった全星形成領域における、Dendrogram で同定された階層構造と単一構造内部に含まれる HII 領域数のヒストグラムである。leaf, branch, trunk, isolated はそれぞれ、赤、オレンジ、黄色、灰

色で示されている。図から, *isolated* は最大でも 4 個の HII 領域を含むのに対し, *leaf* は最大で 8 つの HII 領域を含んでいることがわかる。また図 4.1 から, *leaf* と *isolated* はサイズ分布に大きな差はないことがわかる。すなわち, 同じサイズの構造であっても, 階層構造内の *leaf* は単一構造である *isolated* に比べて, より多くの HII 領域を含んでいることがわかる。

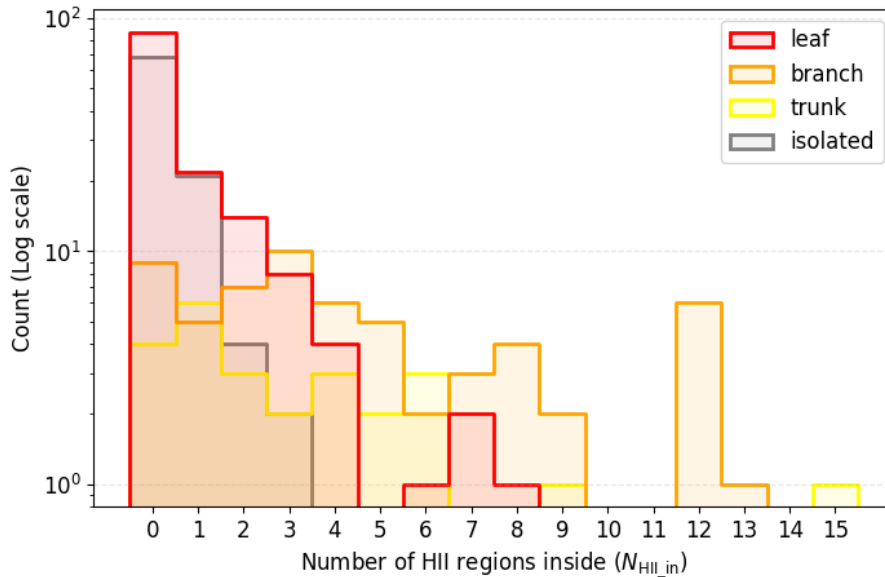


図 5.4 解析対象全星形成領域における構造内 HII 領域数ヒストグラム

5.2.2 物理量に対する HII 領域付随構造の割合

図 5.5 から図 5.7 は, 解析対象になった全星形成領域における Dendrogram で同定された階層構造の質量, 体積密度, ピリアルパラメータに対し, HII 領域を内部に一つでも含むような構造の割合を示している。図からいずれの物理量においても, *leaf* と *isolated* の間で, HII 領域付随構造の割合に大きな差は見られないことがわかる。すなわち, 初めて大質量星とそれに伴う HII 領域が形成されるまでの間に, 階層構造内の *leaf* と単一構造である *isolated* では物理量に大きな差はないことがわかる。

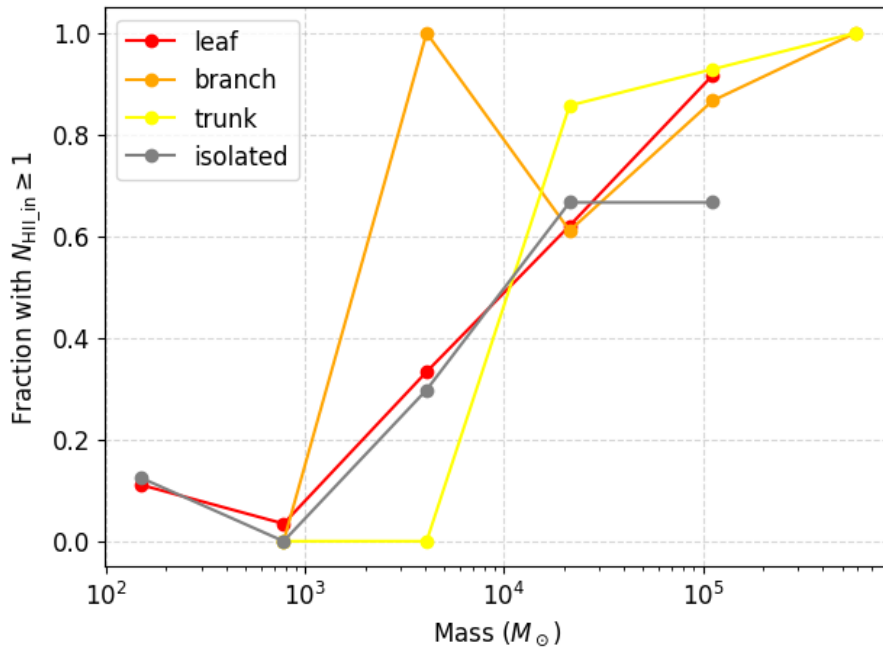


図 5.5 解析対象全星形成領域における構造質量に対する HII 領域付随構造の割合

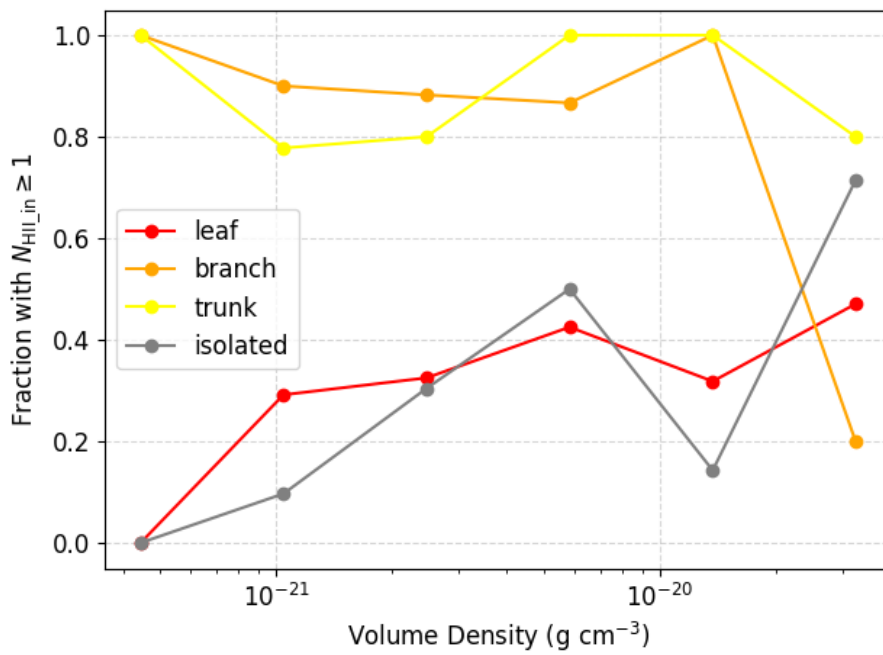


図 5.6 解析対象全星形成領域における構造体積密度に対する HII 領域付随構造の割合

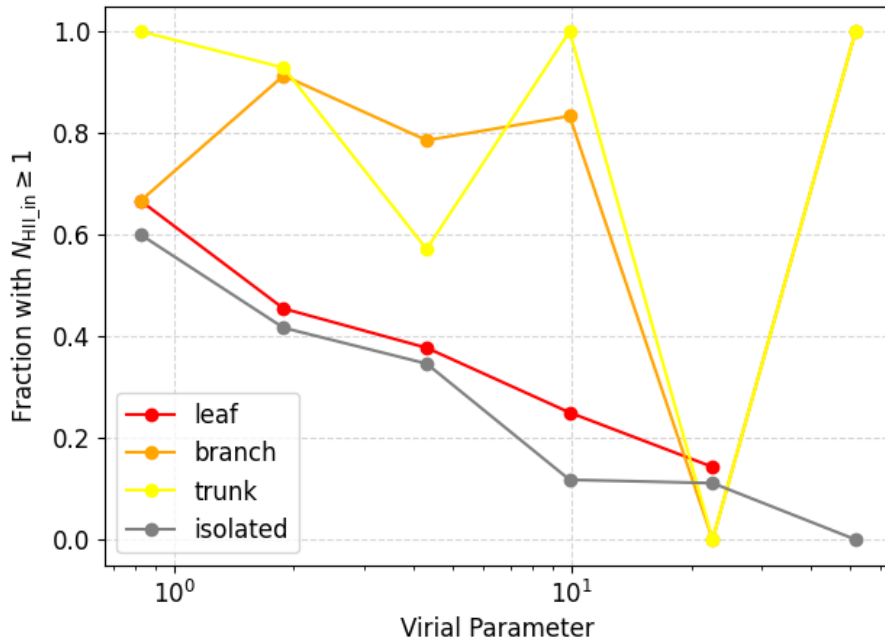


図 5.7 解析対象全星形成領域における構造ビリアルパラメータに対する HII 領域付随構造の割合

前節の結果と合わせて考えると, 以下のことが示唆される.

- 階層構造と単一構造の間で, 星形成を開始するための物理的条件に大きな差はない.
- 単一構造は星形成後のフィードバックにより, 単発あるいは少数の星形成で終わってしまう. 一方で階層構造の方が, 単一構造に比べよりガスを内部に閉じ込めることができ, 集団的な星形成を維持できる.

5.3 階層的進化モデル

以上の結果や議論から, 以下の階層的進化モデルが支持されることが示唆される.

1. 密度一様なガスが収縮を始めると, まず大規模な分子雲構造 (trunk に対応) として収縮が進む. 大規模な構造は内部に様々な速度成分を持つ.
2. trunk がさらに収縮を続けると, trunk 内部に小規模な分子雲構造 (leaf に対応) が形成される. 小規模内部構造はそれぞれ固有の速度成分を持つ.
3. 内部構造はより大規模な構造に閉じ込められ, 星形成に適した高密度構造を維持する. 異なる速度成分を持つ複数の内部構造が相互作用することで, 密度が高まり, 大質量星が形成される.
4. 大規模な分子雲構造の閉じ込めによって, 分子ガスは星形成フィードバックに対して散逸することなく耐え, 集団的な星形成が維持される.

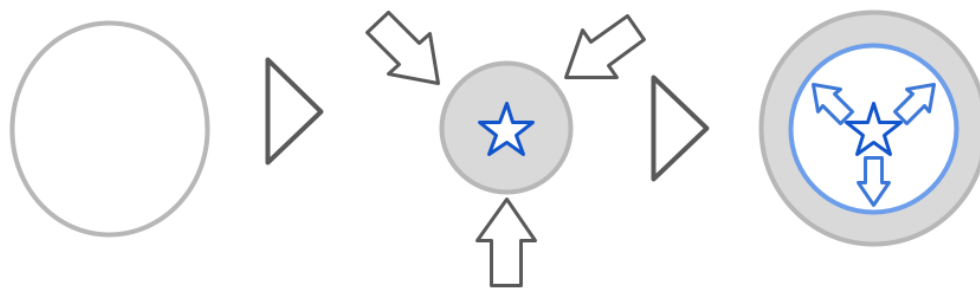


図 5.8 単一構造の進化モデル概念図. 重力収縮により数個の大質量星が形成されるが, フィードバックによりガスが散逸し星形成が停止する.

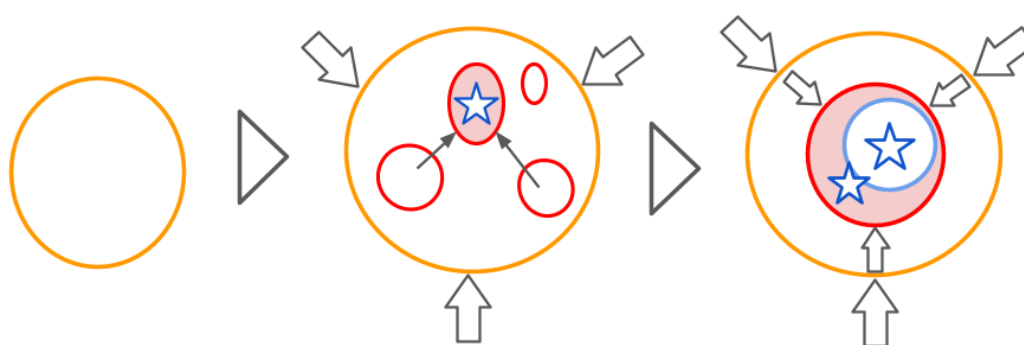


図 5.9 階層構造の進化モデル概念図. 大規模な分子雲構造に閉じ込められた複数の小規模内部構造が相互作用し, 高密度化して大質量星を形成する. 大規模構造の閉じ込めにより, ガスはフィードバックに耐え, 集団的な星形成が維持される.

第 6 章 結論と今後の展望

6.1 まとめ

本研究では、天の川銀河内の主要な星形成領域 12 箇所を対象に、FUGIN プロジェクトの $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ データを用いて分子雲の階層構造を同定し、大質量星形成における階層的進化モデルの検証を行った。Dendrogram アルゴリズムを用いて抽出された階層構造 (leaf, branch, trunk) 及び単一構造 (isolated) について、その物理量を抽出し、*Spitzer* および WISE による赤外線データとの比較を行った。得られた結論は以下のとおりである。

1. Dendrogram によって同定された階層構造は、単一構造と比較して高質量かつ高密度であり、またピリアルパラメータが小さい傾向があることが分かった。これは、階層構造の方が単一構造に比べて、より星形成に適した環境であることを示唆している。また、位置-速度図の解析から、大規模な構造 (trunk) 内部には異なる速度成分を持つ複数の内部構造 (leaf) が存在し、相互作用している可能性が示唆された。
2. 同定された構造と *Spitzer* の赤外線画像 ($8\ \mu\text{m}$ および $24\ \mu\text{m}$) との比較から、高密度な階層構造ほど赤外線画像が強く、活発な星形成活動と空間的に良い一致を示すことが確認された。
3. WISE データに基づく HII 領域カタログとの比較により、構造が HII 領域を一つ以上内包する確率は、質量や密度などの物理量が同程度であれば、階層構造と単一構造の間で大きな差はないことが分かった。しかし、構造内に含まれる HII 領域の数に着目すると、単一構造は少数 (最大 4 個) の形成にとどまるのに対し、階層構造 (leaf) はより多数の HII 領域を含んでいることが明らかになった。これは、単一構造では星形成フィードバックによりガスが散逸し星形成が停止しやすいのに対し、階層構造では大規模な構造による閉じ込めが働き、ガスが散逸することなく集団的な星形成が維持されていることを示唆している。

以上の解析結果に基づき、本研究では以下の階層的進化モデルを結論づける。密度一様なガスの収縮から始まった分子雲は、まず大規模な分子雲構造 (trunk) として収縮する。収縮が進むと、その内部に異なる速度成分を持つ小規模な内部構造 (leaf) が形成される。これらの内部構造は大規模構造のポテンシャルに閉じ込められることで高い密度を維持し、相互作用によってさらに高密度化して大質量星を形成する。この階層的な閉じ込めが、大質量星からのフィードバックに耐え、銀河系内において集団的な星形成活動を維持させる本質的なメカニズムであると考えられる。

6.2 今後の展望

今後は、シミュレーションデータに対しても同様の Dendrogram 解析を行い、観測データとの比較を進める予定である。シミュレーションは観測データと比較して、時間発展に伴う構造の変化を追跡することが容易である。シミュレーションデータに対する解析を通じて、階層構造の形成過程や進化過程を明らかにし、階層的進化モデルの更なる検証を行いたいと考えている。

また、すでに得られている、W51A 以外の 11 箇所の星形成領域における解析結果についても、より詳細に検討を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導とご助言を賜りました。

指導教員である久野成夫教授には大変多くのご指導、ご支援をいただきました。ご多忙の中、定期的に研究進捗を報告する機会を設けていただき、様々なご指摘、ご指導を賜りました。また、研究内容のみならず、研究者としての姿勢や考え方についても多くのことを学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。

筑波大学宇宙理論研究室の福島肇助教、統計数理研究所の藤田真司特任助教、九州大学の野崎信吾氏には、定期的なミーティングの機会を通して、多くのご助言を賜りました。また研究会参加時には、本研究の共著者として、多くの貴重なアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、宇宙観測研究室の皆様にも多大な感謝を申し上げます。先生方や先輩方には、進捗発表やゼミを通して、多くのご指導、ご助言をいただき、自分の研究を見つめ直す機会をいただきました。また同期や後輩の皆様には、日々の研究活動において多くの刺激を受け、切磋琢磨しながら研究を進めることができました。こうして本研究を完成させることができましたのも、皆様のご支援とご助力のおかげです。今一度、心より感謝申し上げます。

参考文献

- Anderson, L. D., Bania, T. M., Balser, D. S., et al. 2014, *ApJS*, 212, 1
- Benjamin, R. A., Churchwell, E., Babler, B. L., et al. 2003, *PASP*, 115, 953
- Bertoldi, F., & McKee, C. F. 1992, *ApJ*, 395, 140
- Bhadari, N. K., Dewangan, L. K., Ojha, D. K., Pirogov, L. E., & Maity, A. K. 2022, *ApJ*, 930, 169
- Carey, S. J., Noriega-Crespo, A., Mizuno, D. R., et al. 2009, *PASP*, 121, 76
- Dewangan, L. K., Baug, T., Pirogov, L. E., & Ojha, D. K. 2020, *ApJ*, 898, 41
- Dewangan, L. K., Luna, A., Ojha, D. K., et al. 2015, *ApJ*, 811, 79
- Dickman, R. L. 1978, *ApJS*, 37, 407
- Fujita, S., Torii, K., Tachihara, K., et al. 2019, *ApJ*, 872, 49
- Fujita, S., Torii, K., Kuno, N., et al. 2021, *PASJ*, 73, S172
- Kohno, M., Torii, K., Tachihara, K., et al. 2018, *PASJ*, 70, S50
- Kohno, M., Tachihara, K., Torii, K., et al. 2021, *PASJ*, 73, S129
- Miyawaki, R., Hayashi, M., & Hasegawa, T. 2022, *PASJ*, 74, 128
- Nishimura, A., Minamidani, T., Umemoto, T., et al. 2018, *PASJ*, 70, S42
- Nishimura, A., Fujita, S., Kohno, M., et al. 2021, *PASJ*, 73, S285
- Rosolowsky, E. W., Pineda, J. E., Kauffmann, J., & Goodman, A. A. 2008, *ApJ*, 679, 1338
- Sofue, Y. 2023, *MNRAS*, 525, 4540
- Sun, J., Leroy, A. K., Rosolowsky, E., et al. 2022, *AJ*, 164, 43
- Torii, K., Fujita, S., Matsuo, M., et al. 2018, *PASJ*, 70, S51
- Umemoto, T., Minamidani, T., Kuno, N., et al. 2017, *PASJ*, 69, 78
- <http://www.dendrograms.org/>
- Vázquez-Semadeni, E., Palau, A., Ballesteros-Paredes, J., Gómez, G. C., & Zamora-Avilés, M. 2019, *MNRAS*, 490, 3061
- 天文学辞典（日本天文学会）

付録 A 全領域の解析結果

以下に, 解析対象となった全星形成領域における Dendrogram 解析結果を示す. 図 4.5 と同様に位置-位置図で示す. 背景は $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ のデータキューブを速度方向に積分した積分強度図であり, 色付きのコントアは Dendrogram によって同定された階層構造の, 位置-位置空間上での投影図を示している. leaf, branch, trunk, isolated はそれぞれ, 赤, オレンジ, 黄色, 白色でコントアが描かれている.

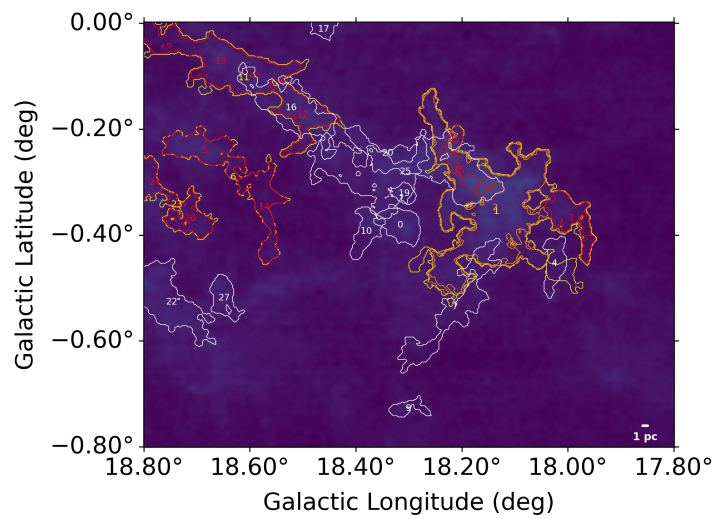


図 A.1 G18.15-0.30+51 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

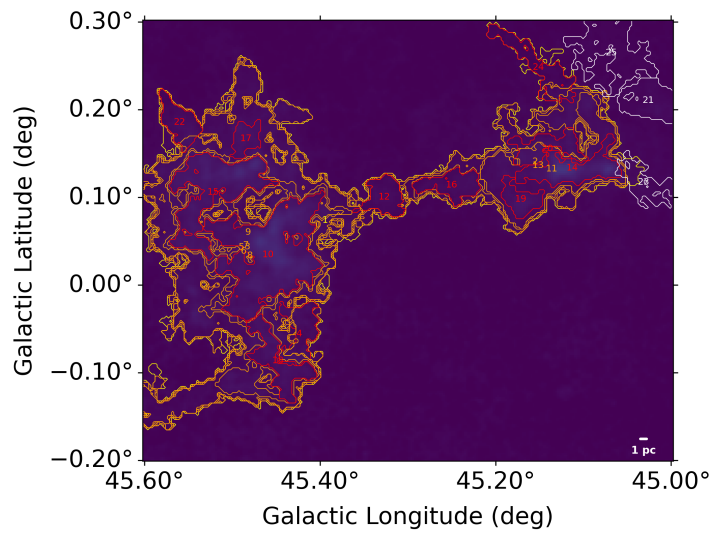


図 A.2 G45.3+0.1 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

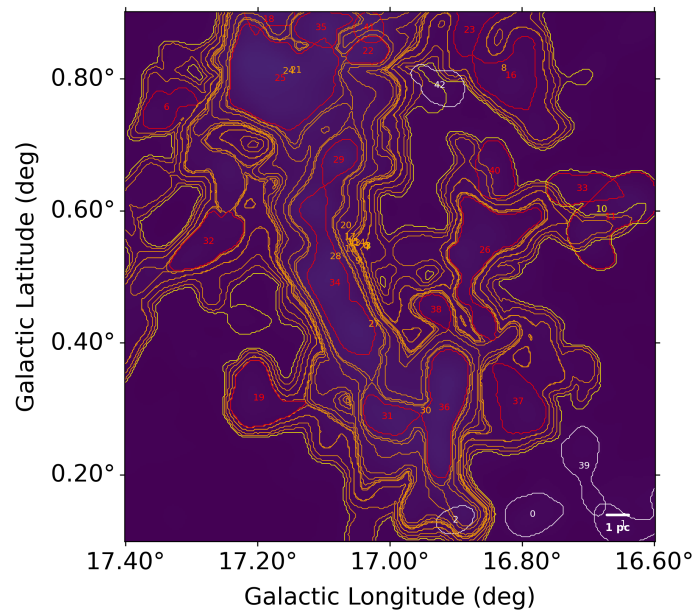


図 A.3 M16 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

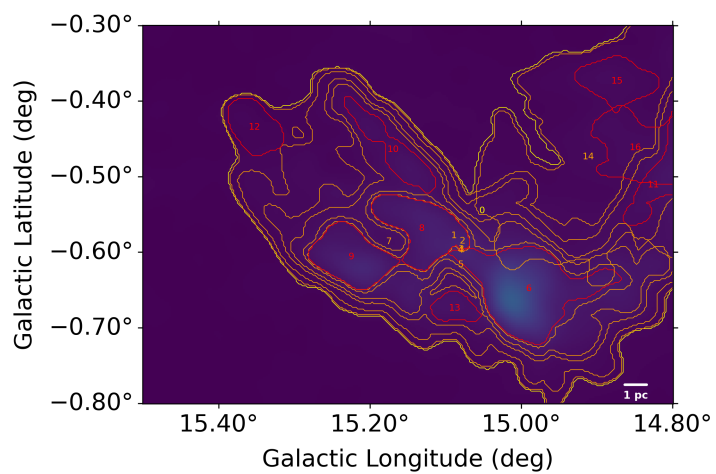


図 A.4 M17 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

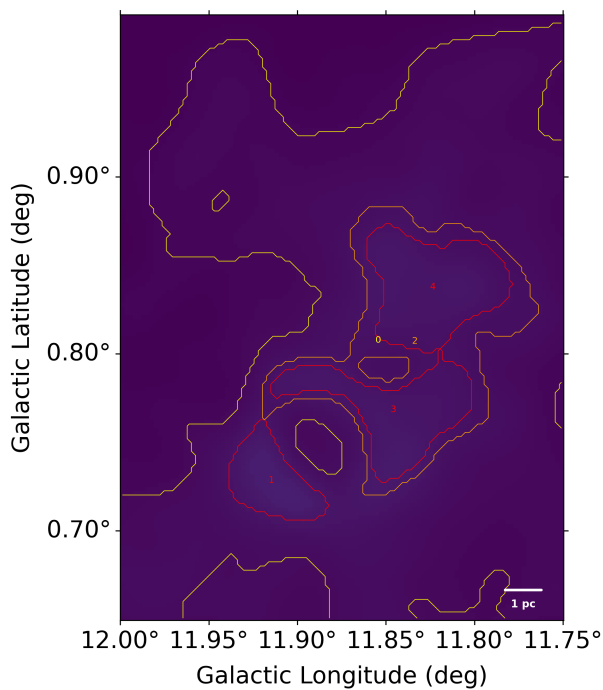


図 A.5 N4 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

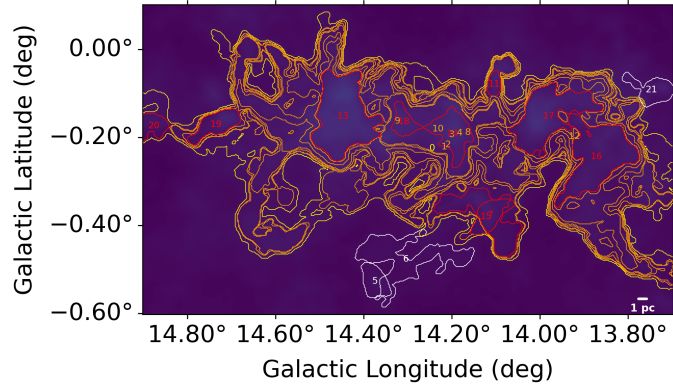


図 A.6 N14 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

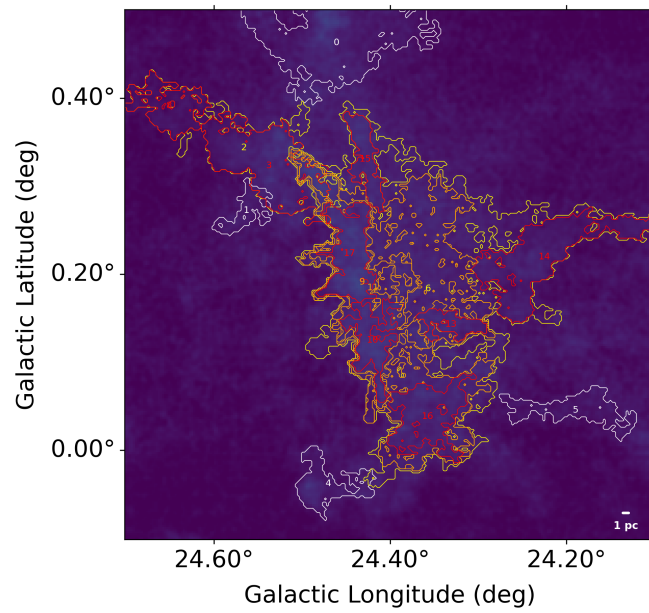


図 A.7 N35 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

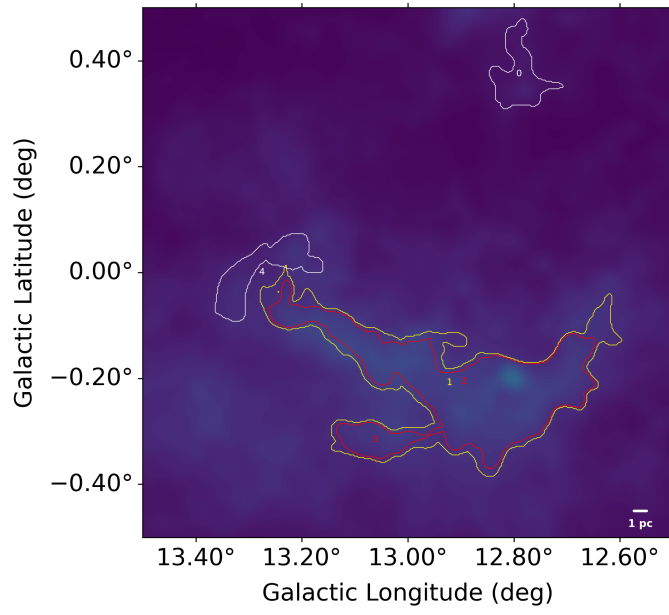


図 A.8 W33 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

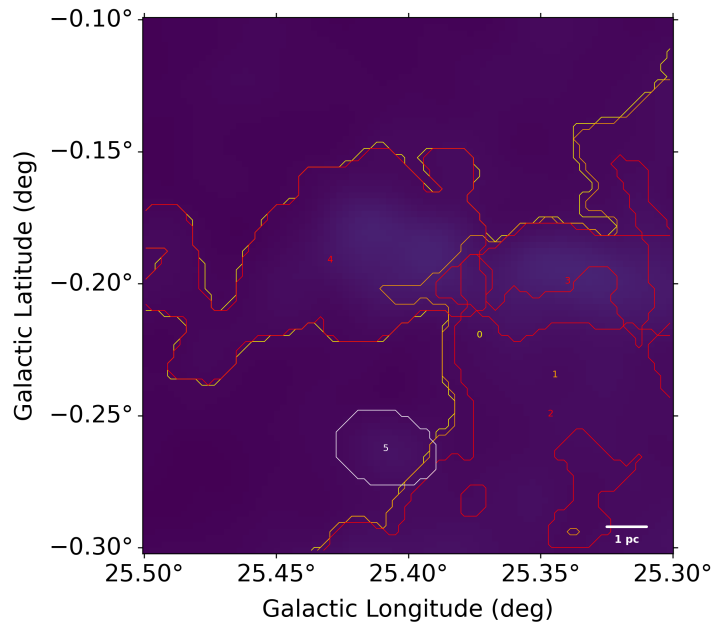


図 A.9 W42 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

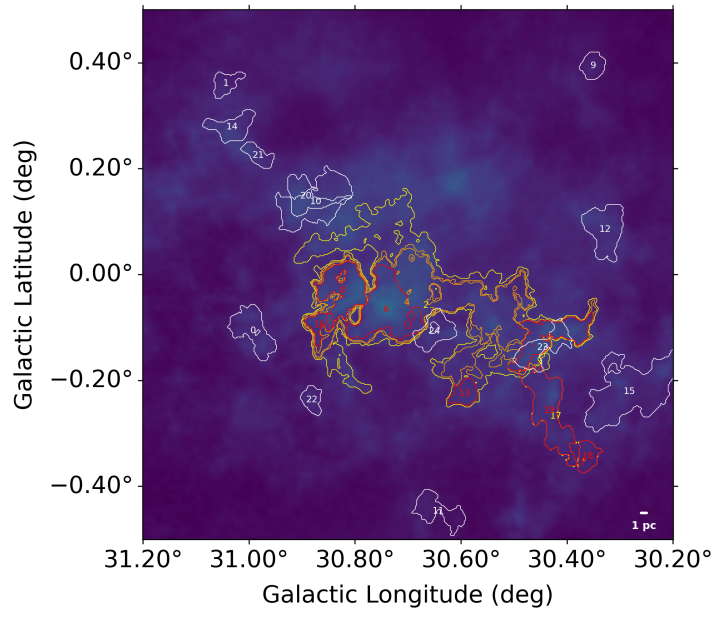


図 A.10 W43 の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)

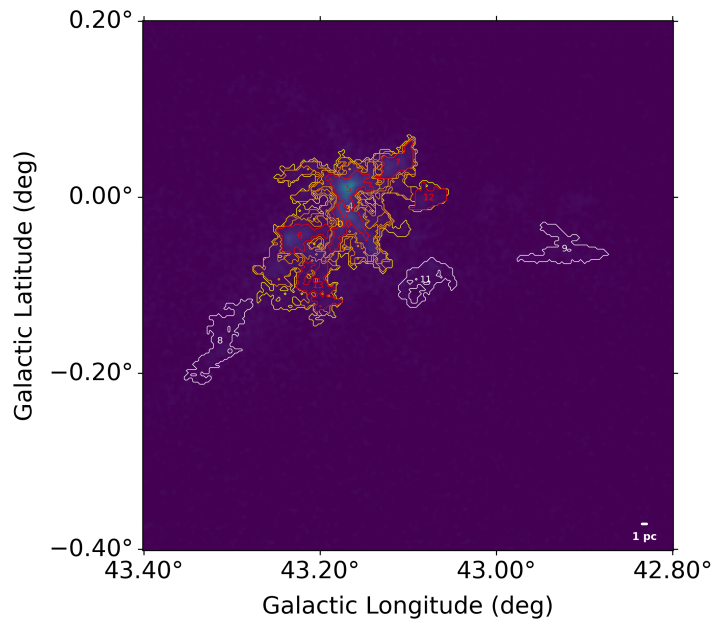


図 A.11 W49N の Dendrogram 解析結果 (位置-位置図)