

筑波大学 理工学群 物理学類

卒業論文

分子雲の構造進化の理解に向けた自己重力流  
体シミュレーションの解析

令和6年1月

202011722

佐々木誇虎

指導教員 久野成夫

# 概要

星形成は分子ガスの塊である分子雲で起こることがわかっている。しかし、分子雲がどのような構造をとりながら星形成に至るかという詳細な進化過程はまだ明らかになっていない。星形成に至る分子雲の進化過程を理解するためには、観測に加え、シミュレーションを用いた研究が重要である。シミュレーションは観測と比較して、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。故に分子雲進化のシミュレーションを解析することは、星形成を詳細に理解する上で有効な手段である。

本研究では、分子雲進化を想定した自己重力流体シミュレーションを観測的研究でしばしば用いられる Dendrogram を用いて解析することで、分子雲内の構造進化を調べた。対象のデータは四つの時点に分かれており、観測データと同じようにそれぞれ視線速度、位置、位置からなる三次元空間にガスの質量が格納されている。解析はデータを視線方向に積分した積分強度図と、三次元散布図それぞれに対して行った。

解析の結果、積分強度図において同定された構造のうち、最も外側の構造については自己重力により収縮していく様子が確認できた。またこの構造のビリアルパラメータの推移から、分子雲全体としてビリアル平衡に近づいていることがわかった。また内部構造については、そのサイズ、質量、ビリアルパラメータが増減を繰り返していることがわかった。三次元散布図の解析結果からは、同定された各構造のサイズ、質量、ビリアルパラメータが増減を繰り返していることがわかった。一方で時間発展につれ比較的大きな構造が生じ、成長していく様子も見られた。

以上の解析結果から、分子雲進化の構造について、自己重力による収縮が平衡に近づき、内部では小規模な構造がより大規模な構造へ成長するということが明らかになった。小規模な構造が大規模な構造へ成長する過程において、構造同士の衝突などの原因で星形成が促進される可能性がある。

# 目次

概要 .....	i
1 序論 .....	1
1.1 星間物質と星形成 .....	1
1.1.1 星間物質 .....	1
1.1.2 分子雲と星形成 .....	1
1.1.3 ビリアルパラメータ .....	2
1.2 星形成の研究手法 .....	2
1.2.1 観測を用いた研究 .....	2
1.2.2 シミュレーションを用いた研究 .....	4
1.3 本研究の目的 .....	5
2 対象データ .....	6
2.1 シミュレーション概要 .....	6
2.2 データ詳細 .....	6
3 解析方法 .....	11
3.1 Dendrogram 概要 .....	11
3.2 アルゴリズム詳細 .....	11
3.3 パラメータ .....	13
4 解析結果 .....	15
4.1 積分強度図の解析結果 .....	15
4.2 三次元散布図の解析結果 .....	17
5 議論 .....	20
5.1 積分強度図上のトランクの変化 .....	20
5.2 積分強度図上の内部構造の変化 .....	24
5.3 積分強度図上の各構造のヒストグラム .....	26
5.4 三次元散布図上の各構造の変化 .....	29
5.5 三次元散布図上の各構造のヒストグラム .....	31
5.6 mass function との比較 .....	34

5.7 解析結果から明らかとなった分子雲進化シナリオ .....	35
6 結論と今後の展望 .....	36
6.1 まとめ .....	36
6.2 今後の展望 .....	36
謝辞 .....	37
参考文献 .....	38

# 図目次

1.1	様々な密度, 温度での星間物質(天文学辞典(日本天文学会))	1
1.2	(a)M33 北部の (J=2-1)積分強度図と分子雲. (b)同領域の H $\alpha$ 輝線. (Kondo, et al. 2021)	3
1.3	(a)M33 GMC-16 の (J=2-1)積分強度図. (b)同分子雲の (J=2-1)積分強度図. (Tokuda, et al. 2020)	4
1.4	(a)M33 GMC-8 の (J=2-1)積分強度図. (b)同分子雲の (J=2-1)積分強度図. (Kondo, et al. 2021)	4
2.1	0.57 Myr の積分強度図	6
2.2	1.1 Myr の積分強度図	7
2.3	1.7 Myr の積分強度図	7
2.4	2.2 Myr の積分強度図	8
2.5	0.57 Myr の三次元散布図	8
2.6	1.1 Myr の三次元散布図	9
2.7	1.7 Myr の三次元散布図	9
2.8	2.2 Myr の三次元散布図	10
3.1	Dendrogram による階層構造	11
3.2	Dendrogram による解析開始	12
3.3	リーフの生成	12
3.4	リーフの結合	13
3.5	解析完了	13
3.6	パラメータ詳細:この段階ではまだリーフは生成されていない	14
3.7	パラメータ詳細:ピークの大きさが min_delta を超えるとリーフ生成	14
4.1	0.57 Myr の積分強度図の解析結果	15
4.2	1.1 Myr の積分強度図の解析結果	16
4.3	1.7 Myr の積分強度図の解析結果	16
4.4	2.2 Myr の積分強度図の解析結果	17
4.5	0.57 Myr の三次元散布図の解析結果	17

4.6	1.1 Myr の三次元散布図の解析結果	18
4.7	1.7 Myr の三次元散布図の解析結果	18
4.8	2.2 Myr の三次元散布図の解析結果	19
5.1	積分強度図上のトランクのサイズ変化	20
5.2	積分強度図上のトランクの質量変化	21
5.3	0.57 Myr におけるトランク内部の質量分布	21
5.4	1.1 Myr におけるトランク内部の質量分布	22
5.5	1.7 Myr におけるトランク内部の質量分布	22
5.6	2.2 Myr におけるトランク内部の質量分布	23
5.7	フィラメント構造発展の模式図	23
5.8	積分強度図上のトランクの速度分散変化	24
5.9	積分強度図上のトランクのビリアルパラメータ変化	24
5.10	積分強度図上の内部構造のサイズの平均値変化	25
5.11	積分強度図上の内部構造の質量の平均値変化	25
5.12	積分強度図上の内部構造のビリアルパラメータの平均値変化	26
5.13	積分強度図上の各構造のサイズのヒストグラム	27
5.14	積分強度図上の各構造の質量のヒストグラム	28
5.15	積分強度図上の各構造のビリアルパラメータのヒストグラム	29
5.16	三次元散布図上の各構造のサイズの平均値変化	30
5.17	三次元散布図上の各構造の質量の平均値変化	30
5.18	三次元散布図上の各構造のビリアルパラメータの平均値変化	31
5.19	三次元散布図上の各構造のサイズのヒストグラム	32
5.20	三次元散布図上の各構造の質量のヒストグラム	33
5.21	三次元散布図上の各構造のビリアルパラメータのヒストグラム	34
5.22	各時点における mass function	35
5.23	分子雲進化シナリオの模式図	35

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 星間物質と星形成

#### 1.1.1 星間物質

宇宙空間には星と星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 1.1 に様々な密度、温度における星間物質を掲載する。

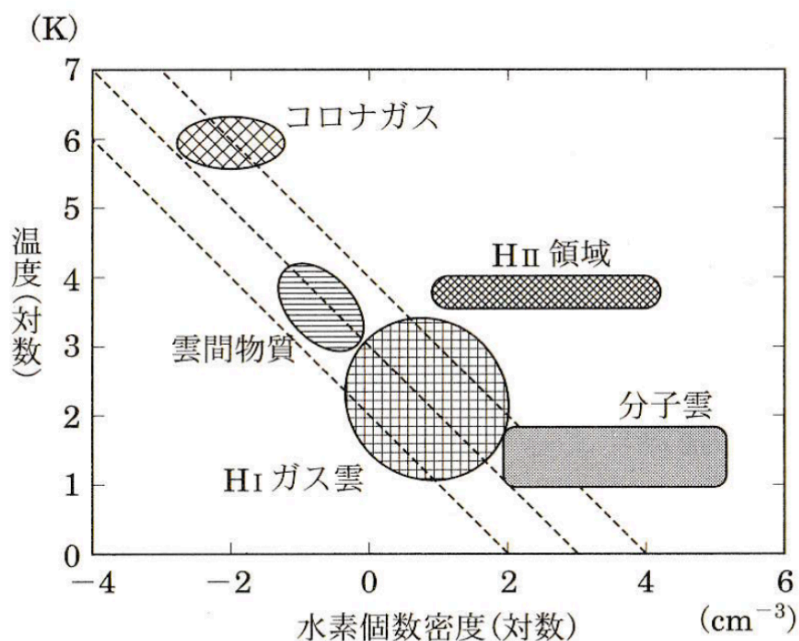


図 1.1 様々な密度、温度での星間物質(天文学辞典(日本天文学会))

#### 1.1.2 分子雲と星形成

星間物質のうち、最も密度が高い星間ガスは分子雲と呼ばれる。分子雲は低温なため、内部では水素が分子の状態で存在している。分子雲中で特に密度が高い領域は分子雲コアと呼ばれる。分子雲コアは重力的に不安定なため、その中心部で星形成が行われると考えられている。だがそのようなコアがどのような構造を経て生じ、星形成に至るかという詳細なシナリオはまだ明らかになっていない。

### 1.1.3 ビリアルパラメータ

分子雲では自身の内圧など外へ広がろうとする力と、自己重力など内へ収縮しようとする力とはたらいっている。この二つの力が釣り合っている状態をビリアル平衡と呼ぶ。ビリアルパラメータは、分子雲が平衡にどの程度近いかを評価する際に用いられる指標である。ビリアルパラメータは以下のような式で表せる。

$$\alpha_{\text{Gvir}} = \frac{5\sigma^2 R}{3GM} \quad (1.1)$$

ここで $\sigma$ は分子雲の三次元速度分散 [ $\text{km s}^{-1}$ ],  $R$ は分子雲の半径 [pc],  $G$ は万有引力定数,  $M$ は分子雲の質量 [ $M_{\odot}$ ]である。

分子雲内部で外へ広がろうとする力が強くはたらいっている状態では、ビリアルパラメータの値は $\alpha_{\text{Gvir}} \gg 1$ である。その状態から分子雲が重力平衡に近づくと値は $\alpha_{\text{Gvir}} = 1$ へ近づいていく。

## 1.2 星形成の研究手法

星形成の研究は、観測とシミュレーションの二つのアプローチがある。

### 1.2.1 観測を用いた研究

分子雲コアに代表されるような星形成領域の観測は、これまで盛んにおこなわれてきた。

例えば Tokuda, et al. 2020 や Kondo, et al. 2021 では、M33 北部に存在する GMC-8, NGC 604, GMC-16 の 3 つの分子雲を ALMA により観測して構造や質量を比較している。図 1.2 に M33 北部の $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 積分強度図と H $\alpha$ 線を示す。積分強度図中でこれら 3 つの分子雲の位置が同定されている。また分子雲と H $\alpha$ 線の位置関係から、NGC 604 や GMC-16 は HII 領域が伴っており星形成活動が活発であること、反面 NGC-8 は HII 領域が伴っておらず星形成が活発でないことがわかる。Tokuda, et al. 2020 では、GMC-16 が図 1.3 に示すような大規模なフィラメント構造を持つことが示されている。一方で Kondo, et al. 2021 では、GMC-8 が図 1.4 に示すような円形に広がった構造を持つことなどが示されている。

このように、観測を用いた研究では複数の分子雲を比較してその進化段階を相対的に評価することとなる。反対に、単一の分子雲の観測データのみからでは、構造進化を理解するのは困難である。分子雲が収縮し星となるまでに要する時間は $10^5$ 年から $10^6$ 年であり、観測データはその長い時間における一時点の情報に過ぎないからである。

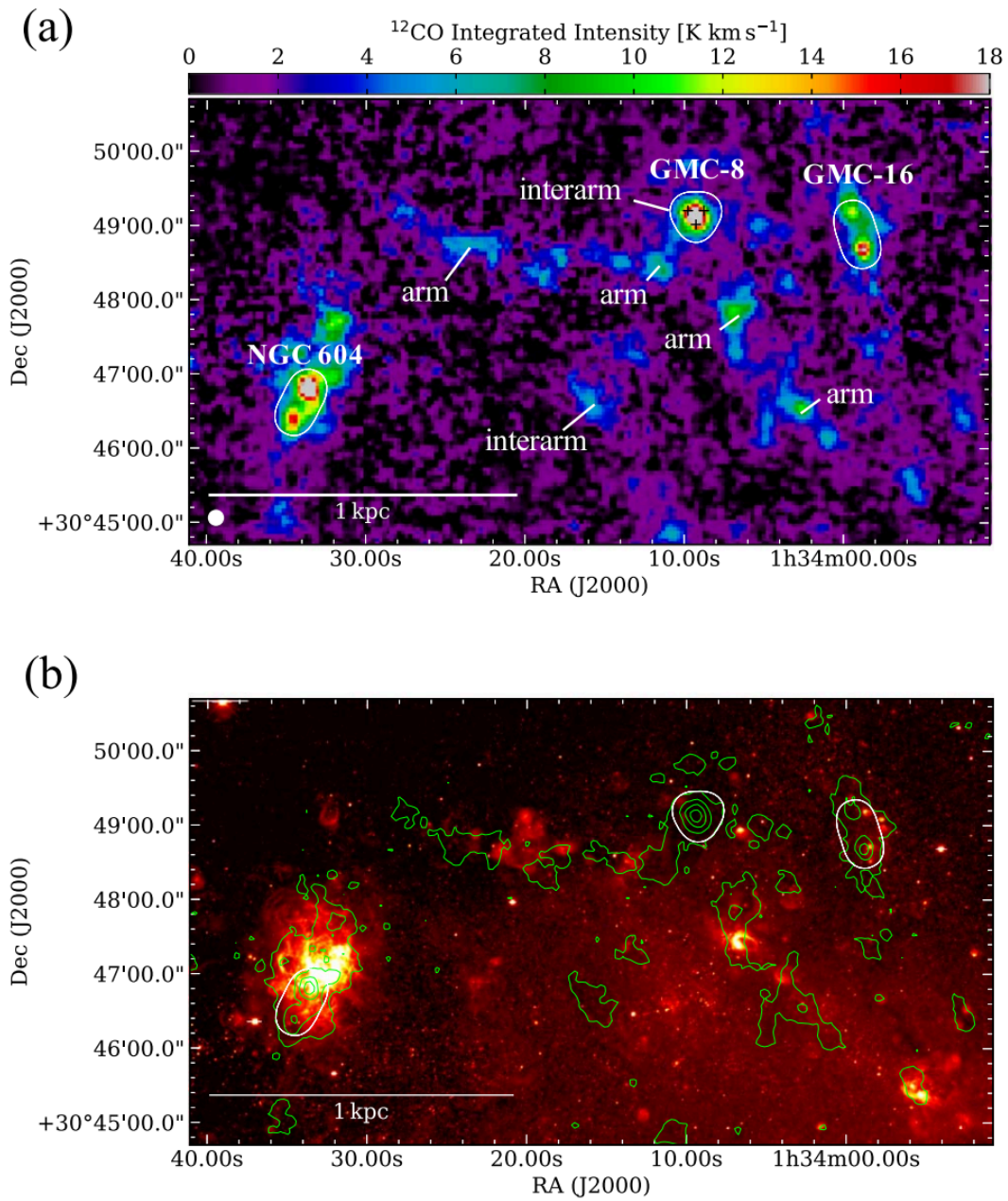


図 1.2 (a)M33 北部の $^{12}\text{CO}(J = 2 - 1)$ 積分強度図と分子雲. (b)同領域の  $\text{H}\alpha$ 輝線. (Kondo, et al. 2021)

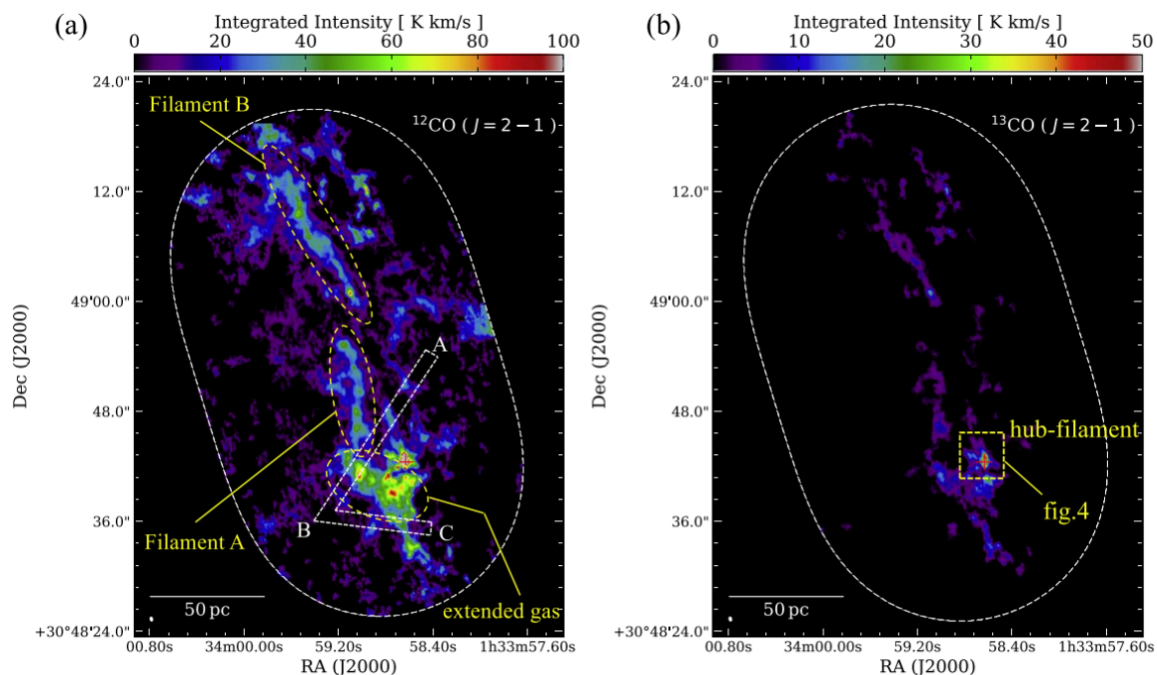


図 1.3 (a)M33 GMC-16 の $^{12}\text{CO}(J = 2 - 1)$ 積分強度図. (b)同分子雲の $^{13}\text{CO}(J = 2 - 1)$ 積分強度図. (Tokuda, et al. 2020)

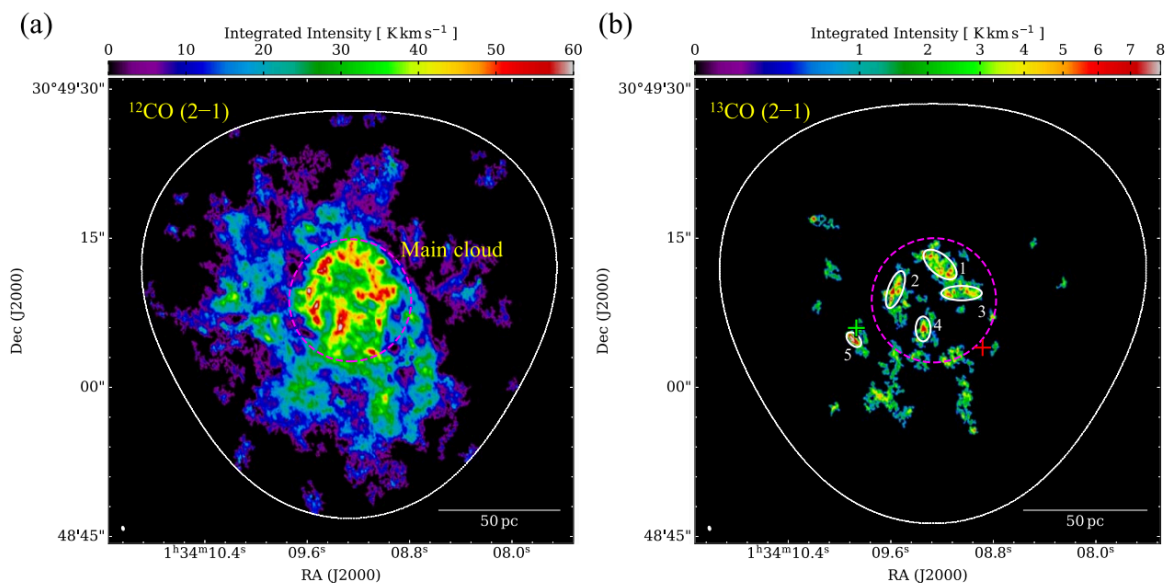


図 1.4 (a)M33 GMC-8 の $^{12}\text{CO}(J = 2 - 1)$ 積分強度図. (b)同分子雲の $^{13}\text{CO}(J = 2 - 1)$ 積分強度図. (Kondo, et al. 2021)

## 1.2.2 シミュレーションを用いた研究

シミュレーションを用いて研究する場合、そのシミュレーションが観測データを再現するものであることが重要である。多様な観測データを再現するため、シミュレーションにおいては自己重力流体に対して様々なモデルを仮定する。

星形成の研究では、この自己重力流体のモデルに応じて星形成機構を探ることが多い。例えば Federrath et al.(2012)では、星形成率(SFR)に関する6つの理論モデルを磁場を含む形に拡張して解析し、SFR と他のパラメータの依存性について調べている。

一方、流体の中で分子雲コアに対応するシンク粒子などの構造がどのような過程を経て形成されるかについては、まだあまり考えられていなかった。前項で述べたように、観測データのみを

用いて単一の分子雲の構造進化を追うことは難しい. しかし, 観測データを十分に再現したシミュレーションであれば, 自己重力流体の時間発展を解析することで, このような構造進化の研究を容易に行うことができる.

### 1.3 本研究の目的

本研究では, 星形成に至るまでの分子雲進化の詳細な理解を目的とする. この目的を達成するため, 自己重力流体シミュレーションの解析を行う. 解析においては時間発展に伴う流体の構造の変化に注目する. また解析の手法として, 観測データに対し頻繁に用いられる手法をシミュレーションに対して用いることで, 実際の観測データとの比較がこれまでより容易になると考える. 得られた解析結果から, 分子雲進化を経てどのように星形成へ至るか推定する.

## 第 2 章 対象データ

### 2.1 シミュレーション概要

本研究で解析の対象としたのは、筑波大学宇宙理論研究室の福島肇助教により行われた、SFUMATO を用いて計算された自己重力流体シミュレーションである。SFUMATO は自己重力 MHD 問題を解くための天体物理シミュレーションコードである。コードの詳細は "Sfumato AM-R" (<https://redmagic.i.hosei.ac.jp/research/sfumato/>) に記載されている。

シミュレーションは磁場のない一様な分子雲を想定して質量  $10^6 M_{\odot}$ 、面密度  $350 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ 、半径  $30 \text{ pc}$  の一様な流体の球を自己重力により変化させた。

### 2.2 データ詳細

本研究では、先述のシミュレーションのうち、それぞれ  $0.57 \text{ Myr}$ 、 $1.1 \text{ Myr}$ 、 $1.7 \text{ Myr}$ 、 $2.2 \text{ Myr}$  の時点における質量のデータを福島助教に提供していただき、解析した。これらのデータは視線速度、位置、位置からなる三次元データである。  $40 \times 65 \times 65$  個のボクセルの中に質量が数値として格納されている。また 1 つのボクセルは  $0.65 \text{ km s}^{-1} \times 1.4 \text{ pc} \times 1.4 \text{ pc}$  の三次元空間に相当する。このようなデータの形は観測データと同様であるから、得られる解析結果は観測データとの比較が容易である。

解析はこのデータを視線速度方向に積分した積分強度図と、もとのデータをそのまま三次元空間にプロットした散布図に対して行った。

図 2.1 から図 2.4 にそれぞれの時点における積分強度図を示す。

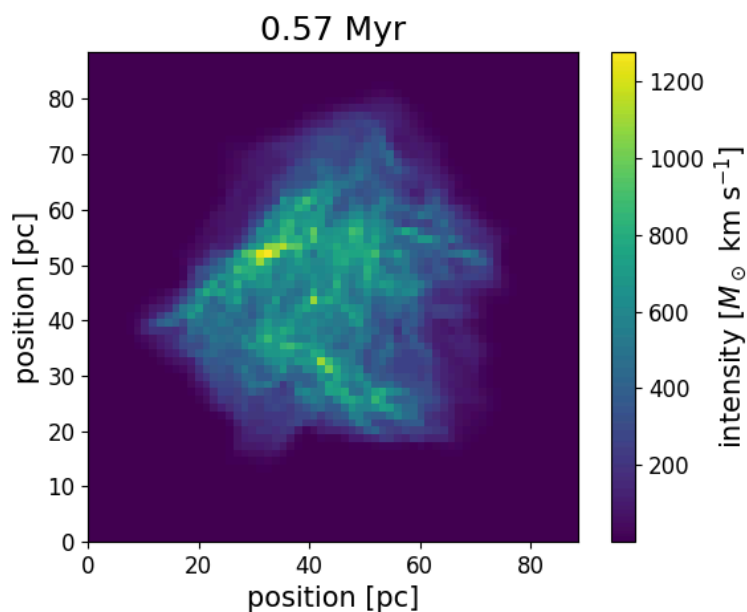


図 2.1 0.57 Myr の積分強度図

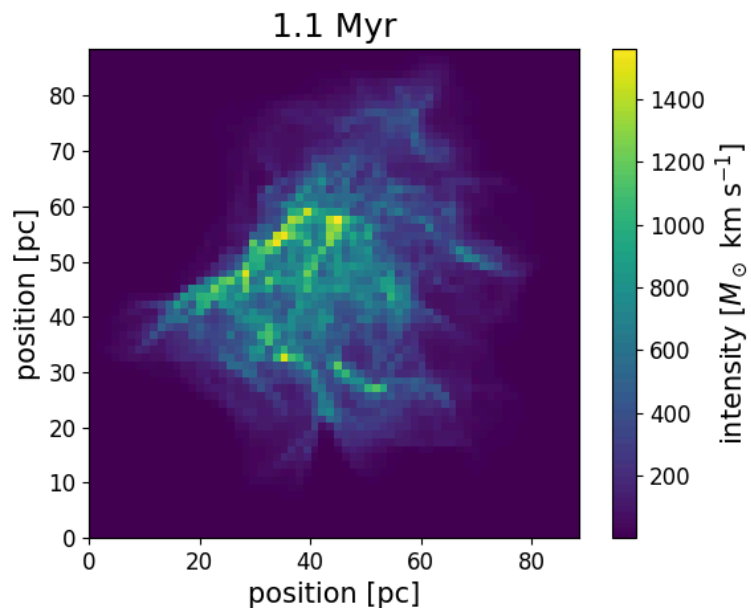


図 2.2 1.1 Myr の積分強度図

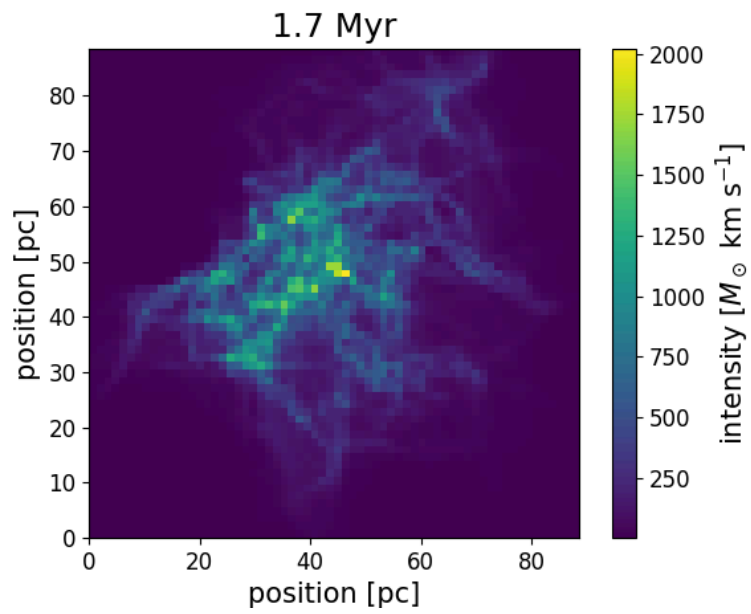


図 2.3 1.7 Myr の積分強度図

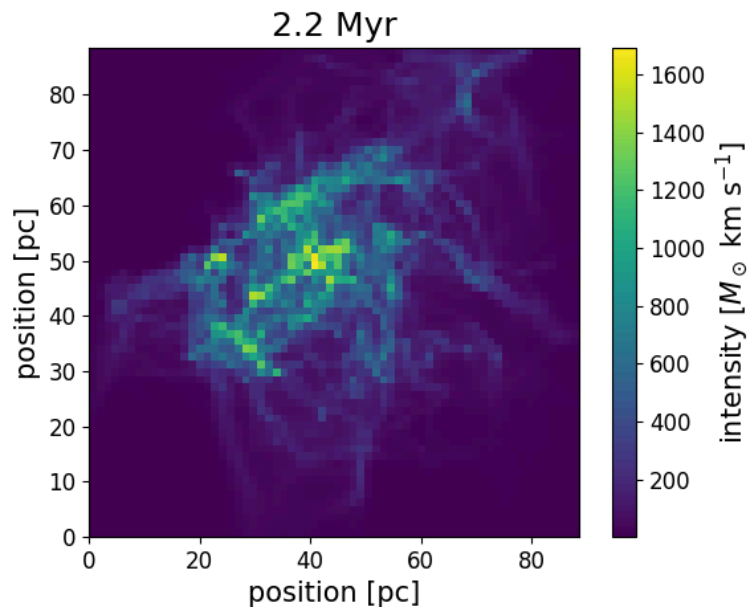


図 2.4 2.2 Myr の積分強度図

図 2.5 から図 2.8 にそれぞれの時点における三次元散布図を示す．なおガスの構造がわかりやすいように，プロットは質量が $40 M_{\odot}$ 以上のボクセルに対して行った．

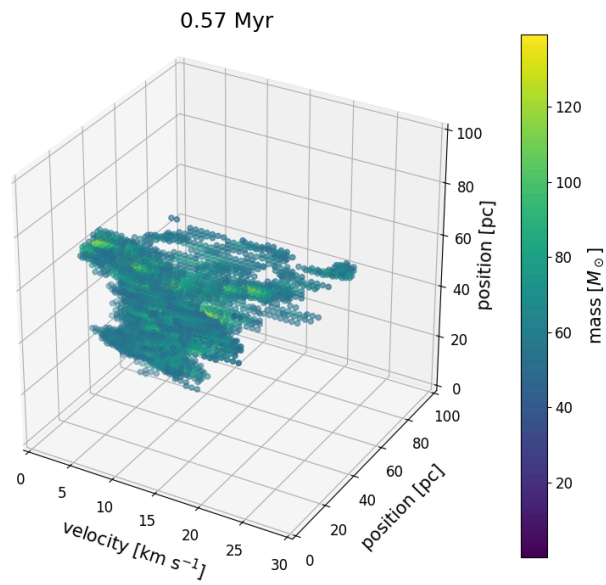


図 2.5 0.57 Myr の三次元散布図

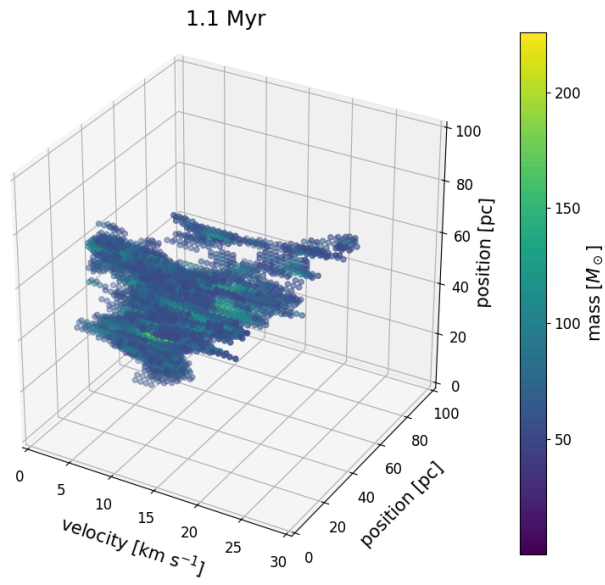


図 2.6 1.1 Myr の三次元散布図

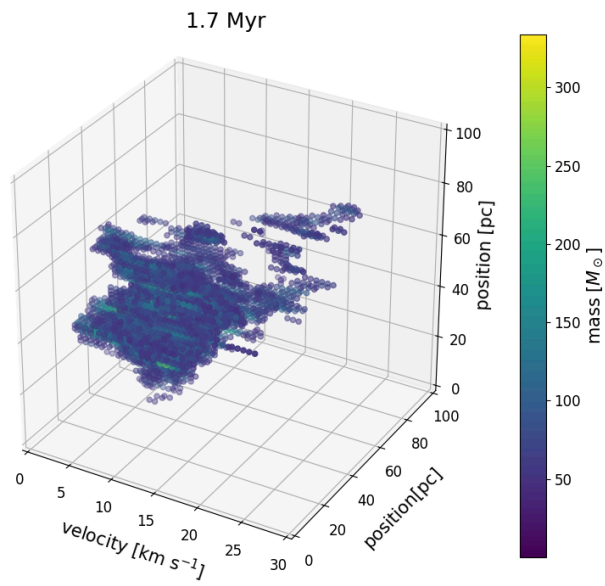


図 2.7 1.7 Myr の三次元散布図

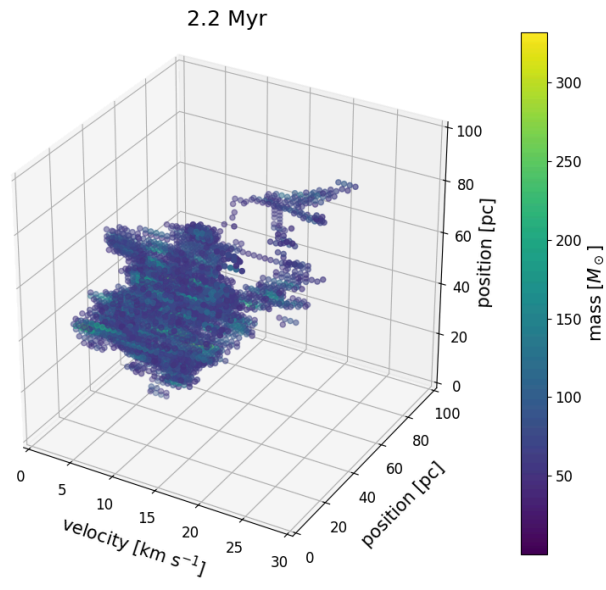


図 2.8 2.2 Myr の三次元散布図

## 第 3 章 解析方法

### 3.1 Dendrogram 概要

本研究では, Dendrogram を用いて構造の同定を行っていく.

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. 詳細は"Astronomical Dendrograms in Python"(<https://dendrograms.readthedocs.io/en/stable/>)に記載されている.

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.

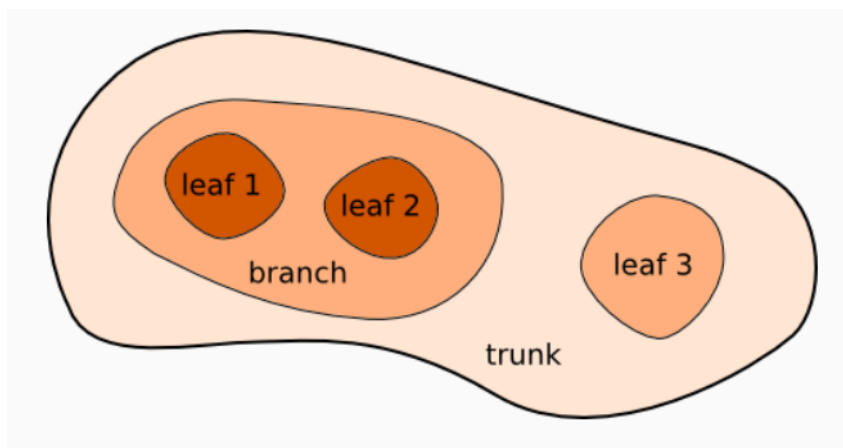


図 3.1 Dendrogram による階層構造

### 3.2 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, 徐々に他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たものである. 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リーフを生成する. 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リーフとは独立した二つ目のリーフが生成される(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リーフも一つのブランチに結合される(図 3.4). 同様の手順が繰り返され, 結局今回の例ではデータは一つのツリーに結合される(図 3.5).

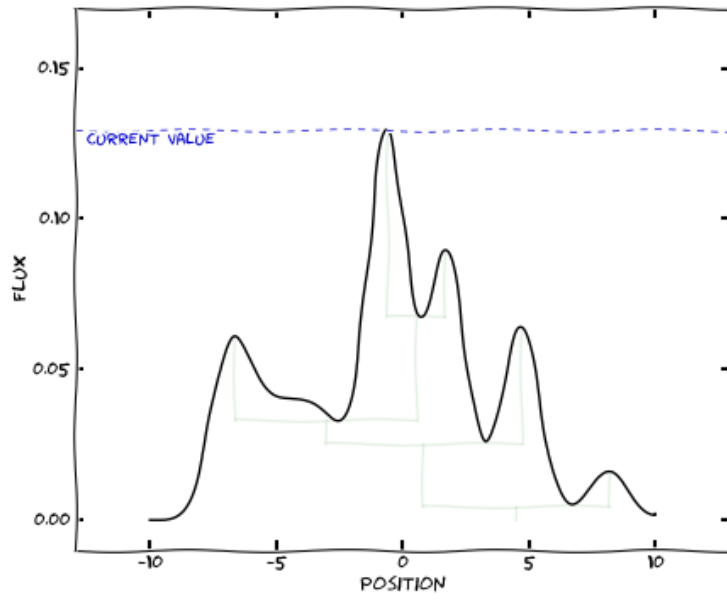


図 3.2 Dendrogram による解析開始

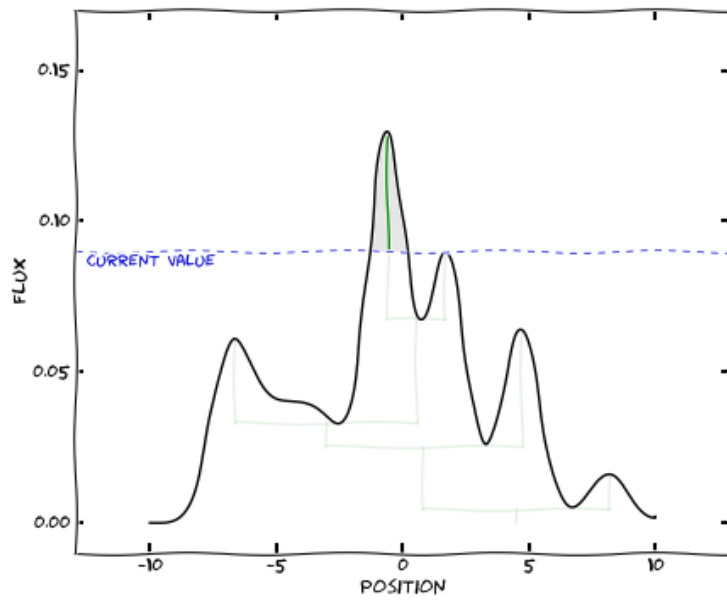


図 3.3 リーフの生成

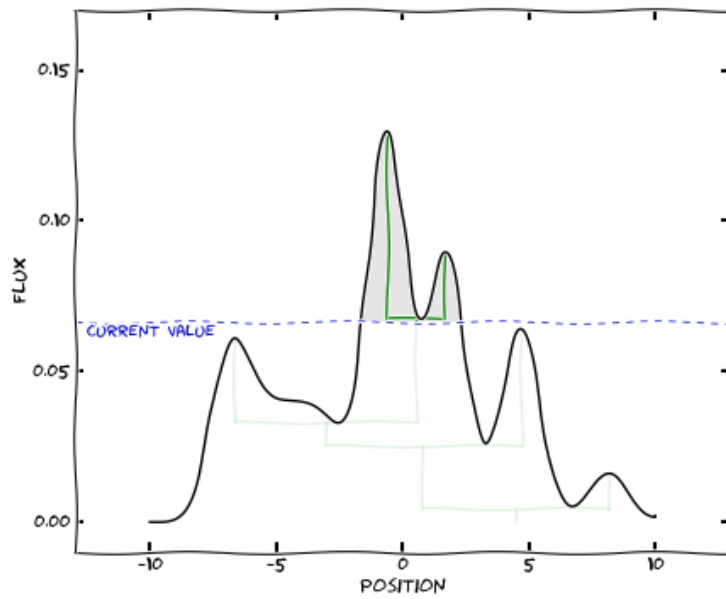


図 3.4 リーフの結合

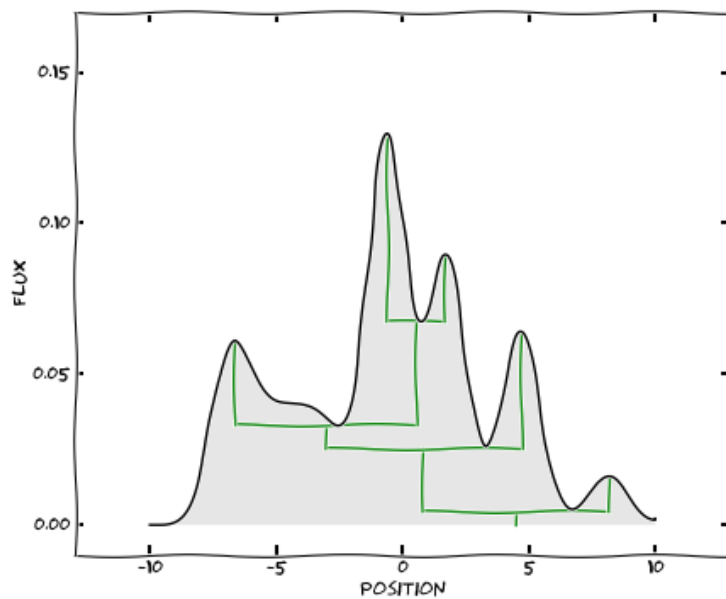


図 3.5 解析完了

### 3.3 パラメータ

Dendrogram を実行する際は、以下の 3 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リーフとはみなされない。
- min\_npix: 独立したリーフ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 では，まだピークは加算された min\_delta の幅よりも小さいため，リーフ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，ピークはリーフとみなされるようになる。

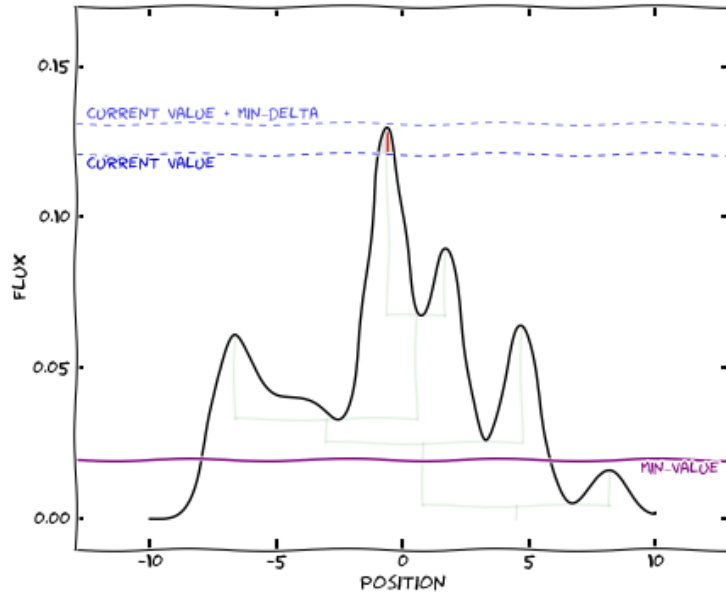


図 3.6 パラメータ詳細:この段階ではまだリーフは生成されていない

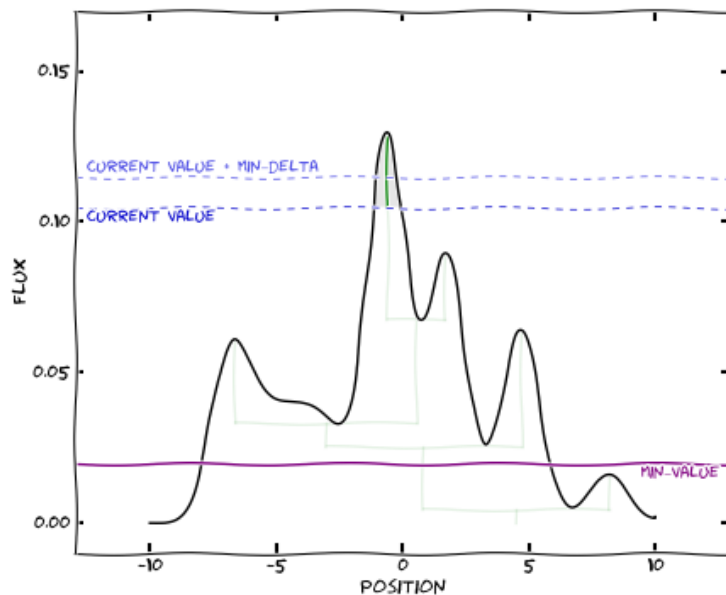


図 3.7 パラメータ詳細:ピークが大きさが min\_delta を超えるとリーフ生成

## 第 4 章 解析結果

### 4.1 積分強度図の解析結果

まず, 積分強度図に対して Dendrogram を実行した. パラメータは全時刻に対して同様に以下のよう設定した.

- `min_value = 400`
- `min_delta = 120`
- `min_npix = 15`

図 4.1 から図 4.4 に同定された構造を示す. 赤の線がリーフの輪郭, 黄色の線がブランチの輪郭を表している.

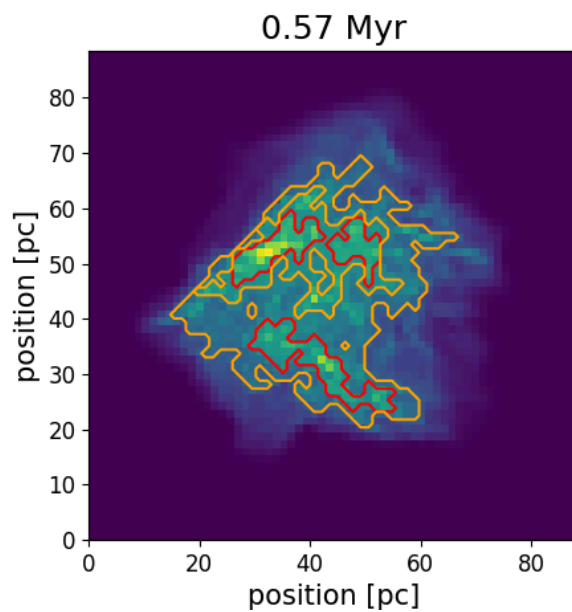


図 4.1 0.57 Myr の積分強度図の解析結果

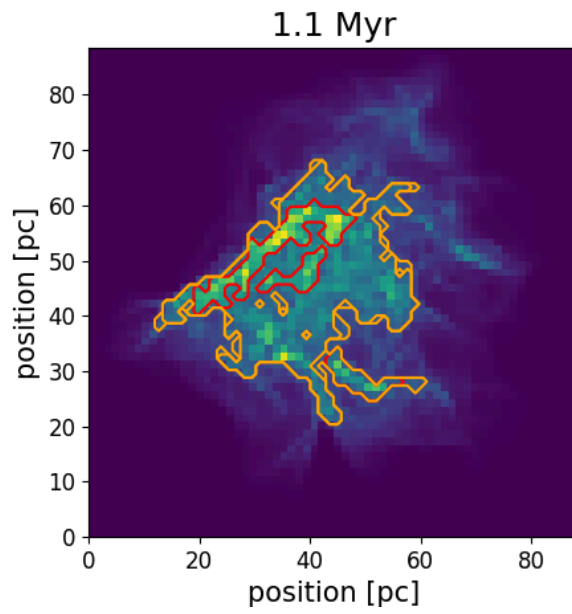


図 4.2 1.1 Myr の積分強度図の解析結果

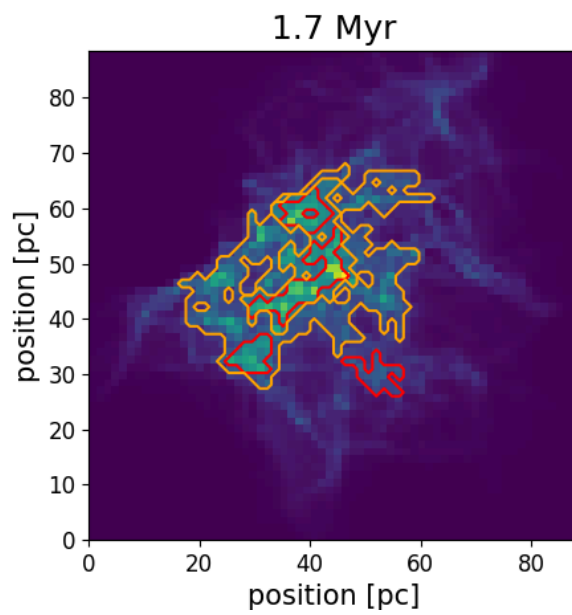


図 4.3 1.7 Myr の積分強度図の解析結果

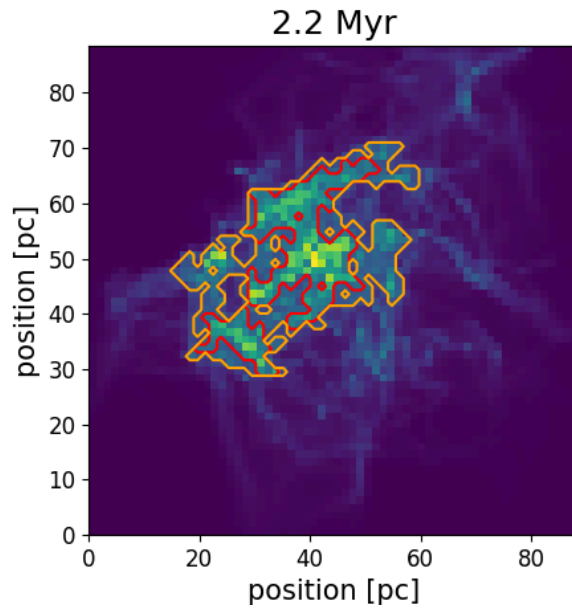


図 4.4 2.2 Myr の積分強度図の解析結果

## 4.2 三次元散布図の解析結果

続いて三次元散布図において Dendrogram を実行した。パラメータは全時刻に対して同様に以下のように設定した。

- $\text{min\_value} = 90$
- $\text{min\_delta} = 20$
- $\text{min\_npix} = 50$

図 4.5 から図 4.8 に同定された構造を示す。赤の表面がリーフの輪郭，黄色の表面がブランチの輪郭を表している。

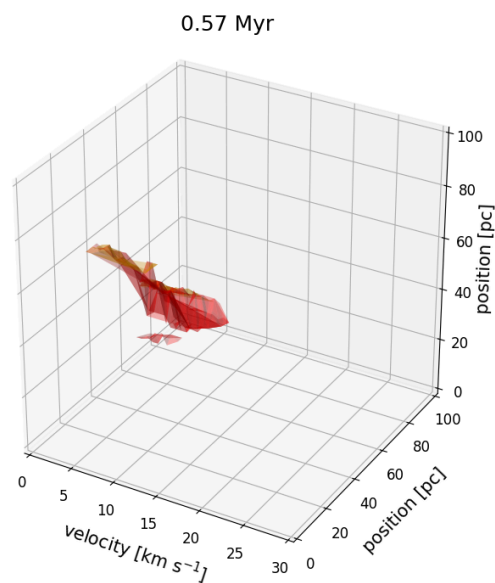


図 4.5 0.57 Myr の三次元散布図の解析結果

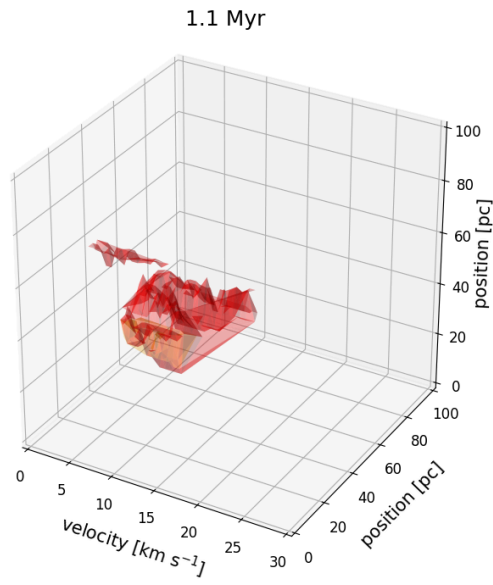


図 4.6 1.1 Myr の三次元散布図の解析結果

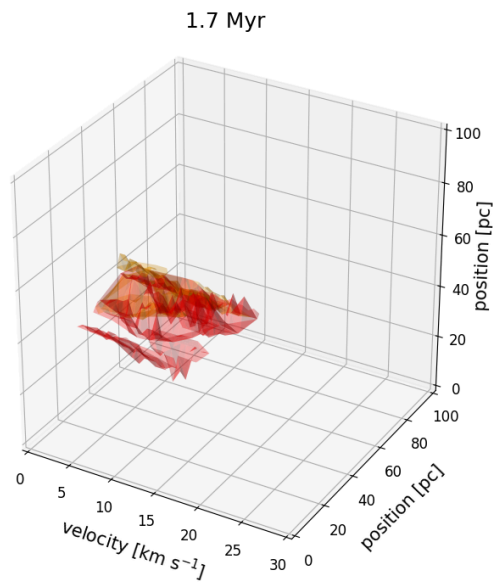


図 4.7 1.7 Myr の三次元散布図の解析結果

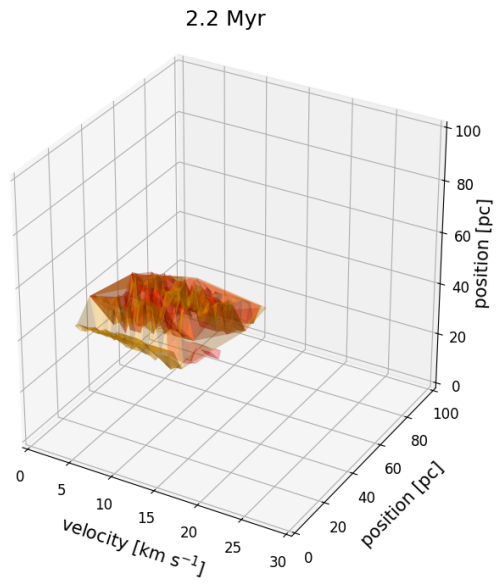


図 4.8 2.2 Myr の三次元散布図の解析結果

## 第 5 章

### 議論

#### 5.1 積分強度図上のトランクの変化

以下では分子雲の全体像についてその構造進化を議論する。そのために、積分強度図の解析で得られた構造のうち、最外部の構造であるトランクのサイズ、質量、ビリアルパラメータの変化を考察していく。

図 5.1 はトランクのサイズ変化のグラフである。グラフから、トランクは徐々に収縮していることがわかる。しかしグラフの傾きに相当する収縮のスピードは減少していることがわかる。

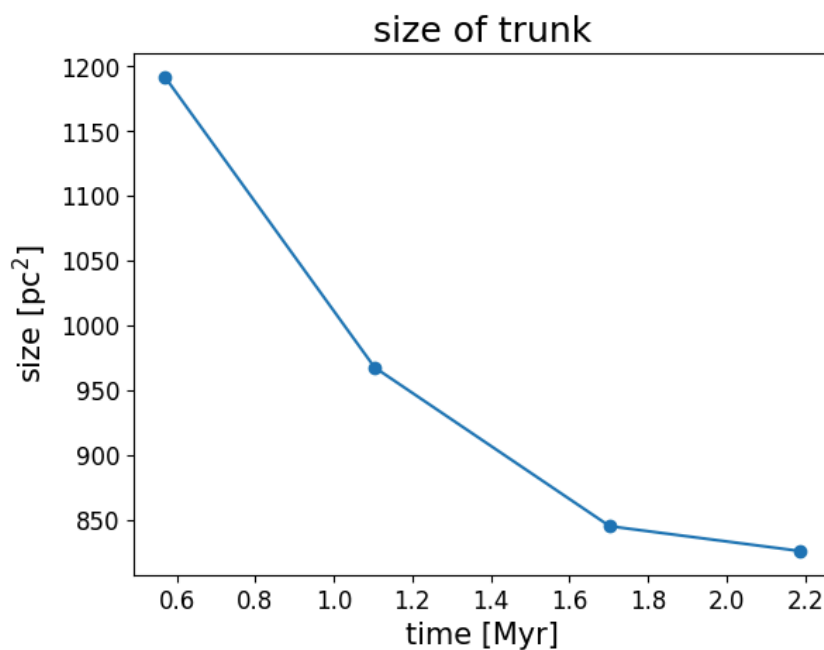


図 5.1 積分強度図上のトランクのサイズ変化

図 5.2 はトランクの質量変化のグラフである。グラフから、トランクの質量はサイズとは異なりほぼ線形に減少していることがわかる。質量がこのような減少する原因としては、サイズの減少だけでなく、図 4.1 から図 4.4 で定性的に見られるような、トランクの内部におけるフィラメント構造の発達が挙げられる。図 5.3 から図 5.6 に、それぞれの時刻における、トランク内部にあるピクセルの質量分布を示す。これらの分布から、トランク内部では時間発展に伴い質量のばらつきが大きくなっていることがわかる。これはフィラメント構造の発達を定量的に示している。フィラメント構造の発達によりトランク内部に穴が開く形となった結果、質量がより急速に減少したと考えられる。

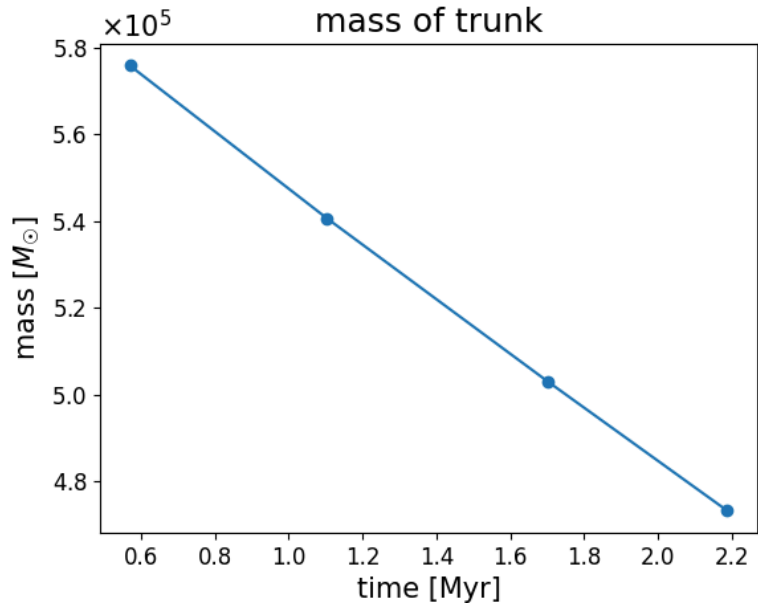


図 5.2 積分強度図上のトランクの質量変化

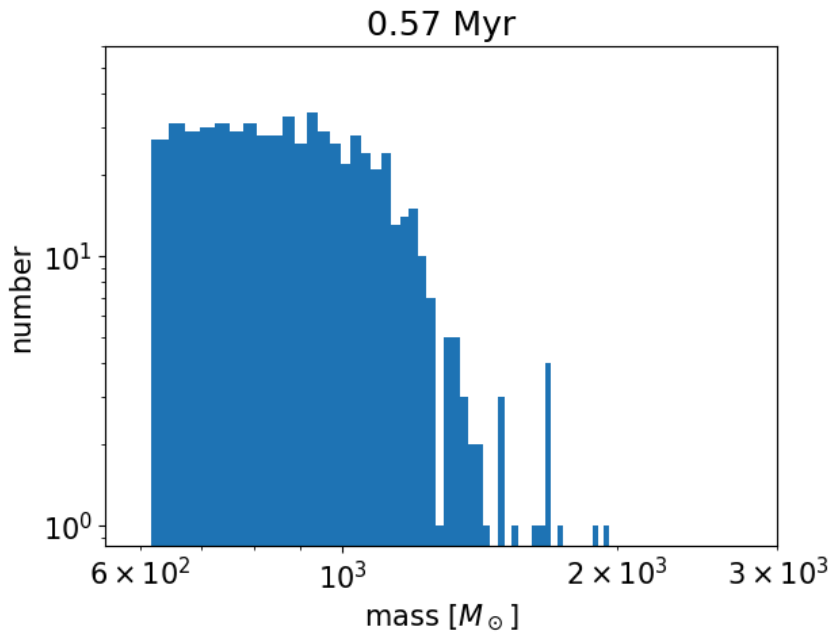


図 5.3 0.57 Myr におけるトランク内部の質量分布

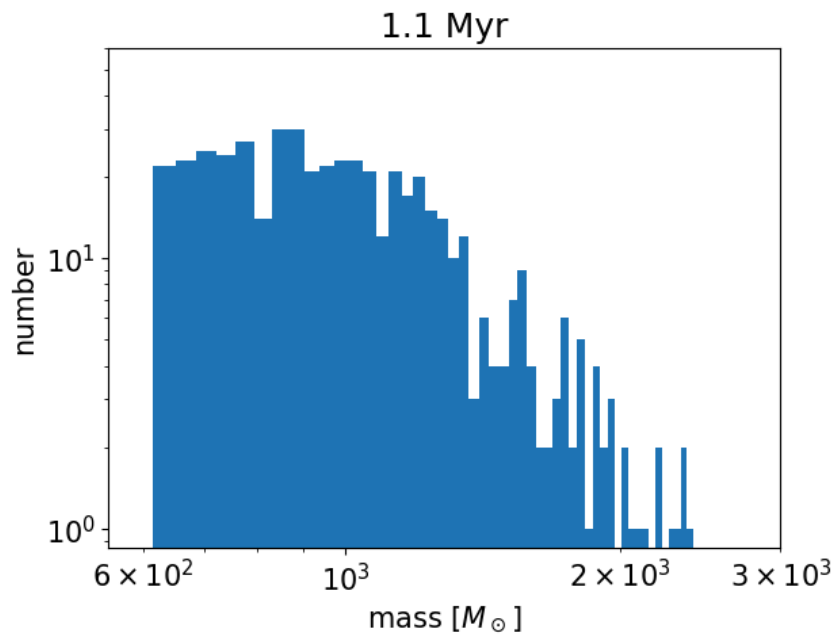


図 5.4 1.1 Myr におけるトランク内部の質量分布

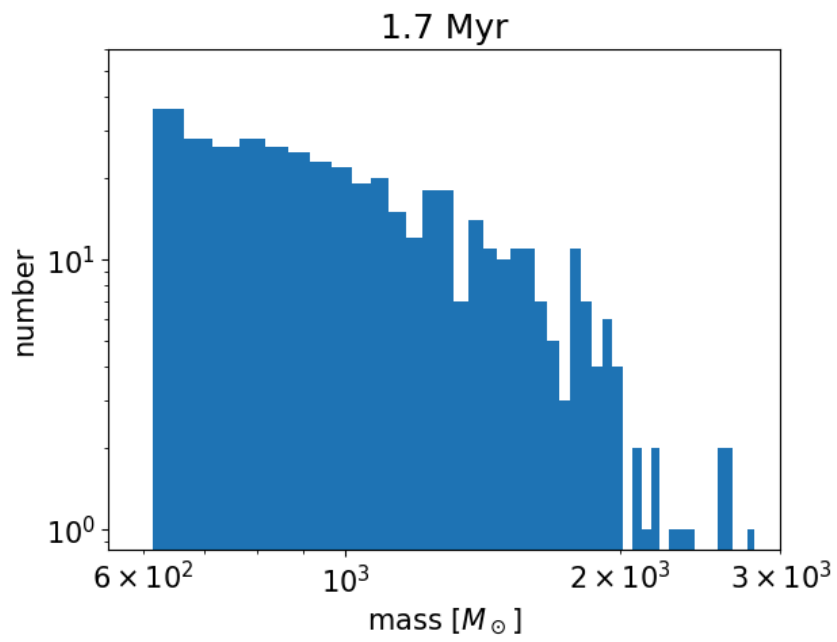


図 5.5 1.7 Myr におけるトランク内部の質量分布

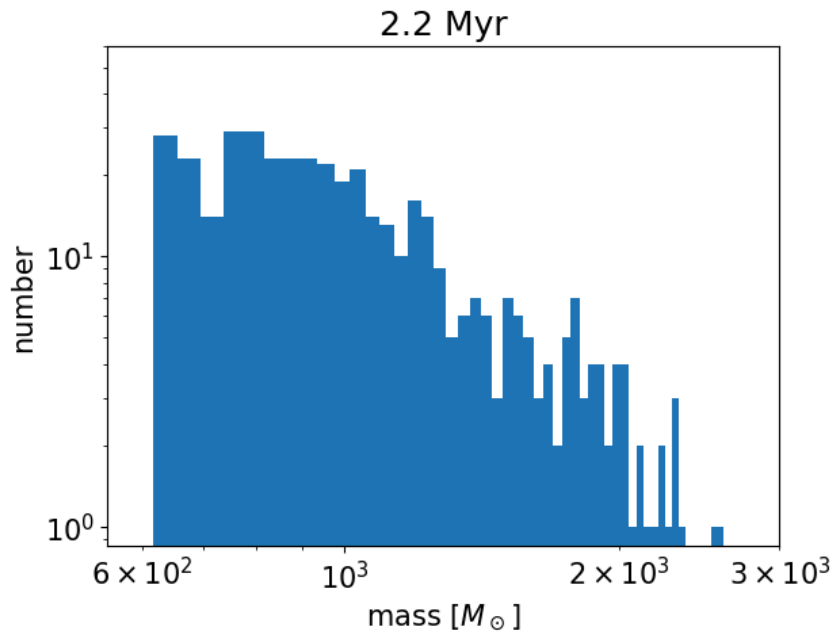
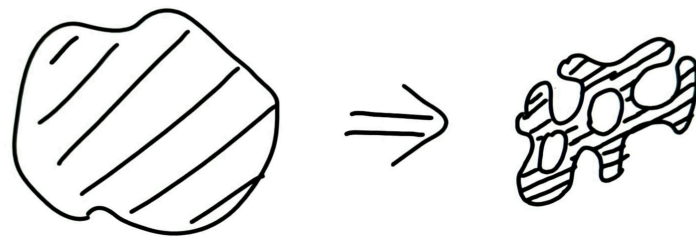


図 5.6 2.2 Myr におけるトランク内部の質量分布



サイズ減少 + フィラメント構造発展  
 → 質量が線形に減少

図 5.7 フィラメント構造発展の模式図

ビリアルパラメータは式 (1.1) を用いて算出した。なお  $R$  はトランクの面積から、トランクを円形と考えることで導出した。また  $\sigma$  はトランク内部の速度スペクトルを足し合わせて最小二乗法を用いてガウスフィッティングを行い、フィッティング結果の半値幅とした。図 5.8 に速度分散  $\sigma$  の変化を示す。

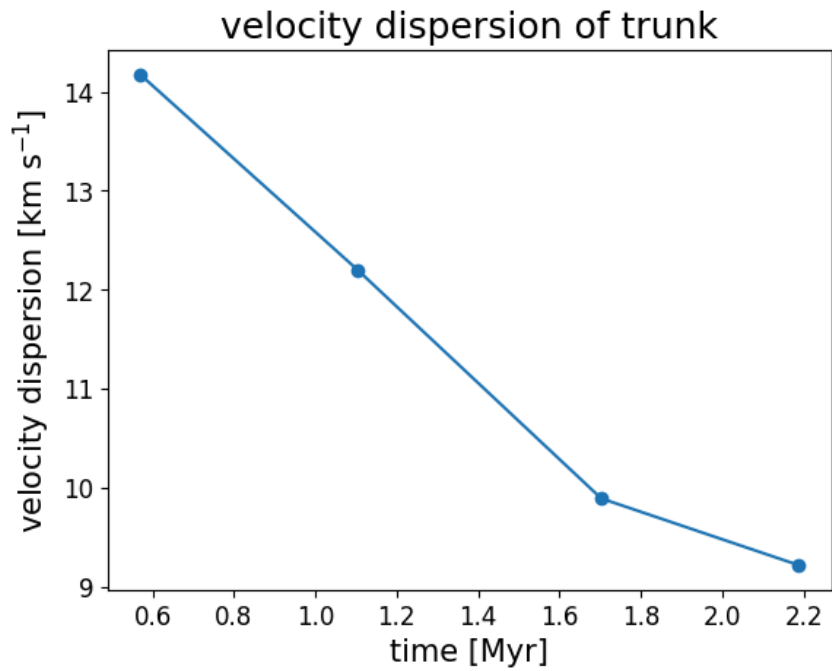


図 5.8 積分強度図上のトランクの速度分散変化

算出したビリアルパラメータの推移を図 5.9 に示す。図 5.9 より、ビリアルパラメータは徐々に減少しながら 1 に漸近していることがわかる。よってトランクは徐々にビリアル平衡に向かっていると考えられる。この事実はトランクの収縮スピードが減少している事実に対応する。

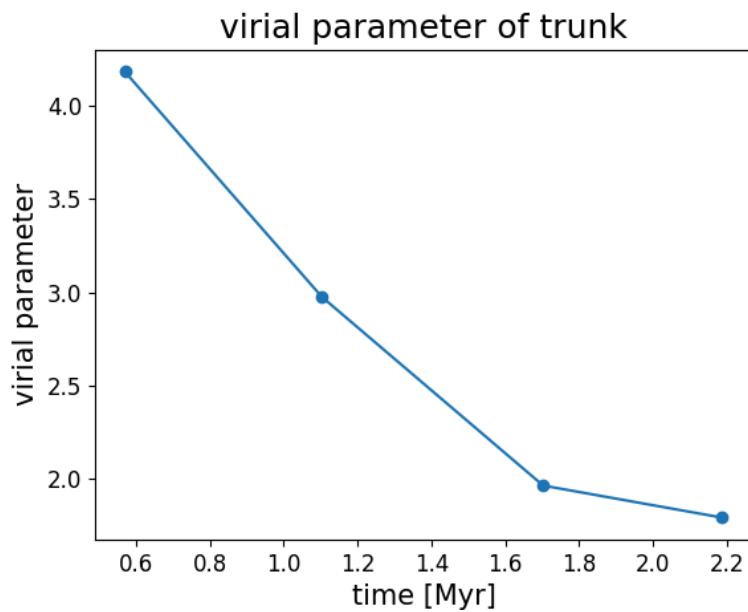


図 5.9 積分強度図上のトランクのビリアルパラメータ変化

## 5.2 積分強度図上の内部構造の変化

以下では分子雲の内部構造についてその構造進化を議論する。そのために、積分強度図の解析で得られた構造のうち、トランク以外の構造のサイズ、質量、ビリアルパラメータの平均値を算出してその変化を考察していく。

サイズ, 質量, ビリアルパラメータの平均値の変化を, それぞれ図 5.10, 図 5.11, 図 5.12 に示す. なおビリアルパラメータについては, 各構造に対してトランクと同様の手順で算出した.

これらのグラフから, 内部構造のサイズ, 質量, ビリアルパラメータの平均値はすべて増減を繰り返していることがわかる.

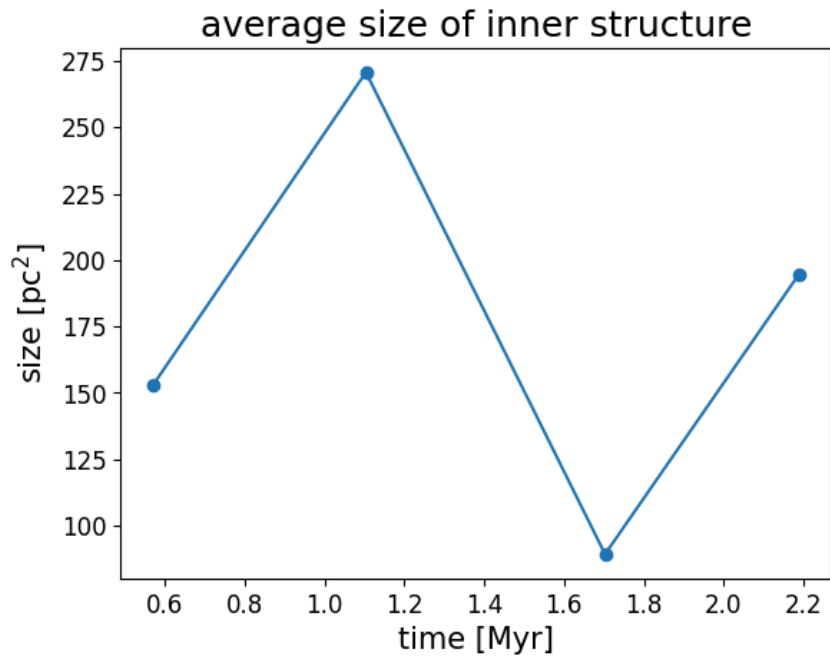


図 5.10 積分強度図上の内部構造のサイズの平均値変化

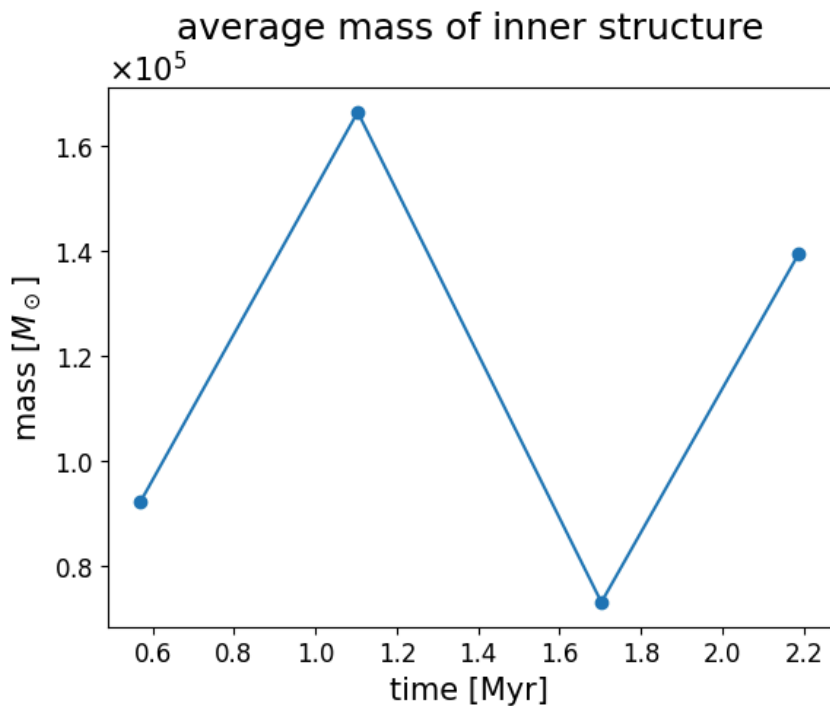


図 5.11 積分強度図上の内部構造の質量の平均値変化

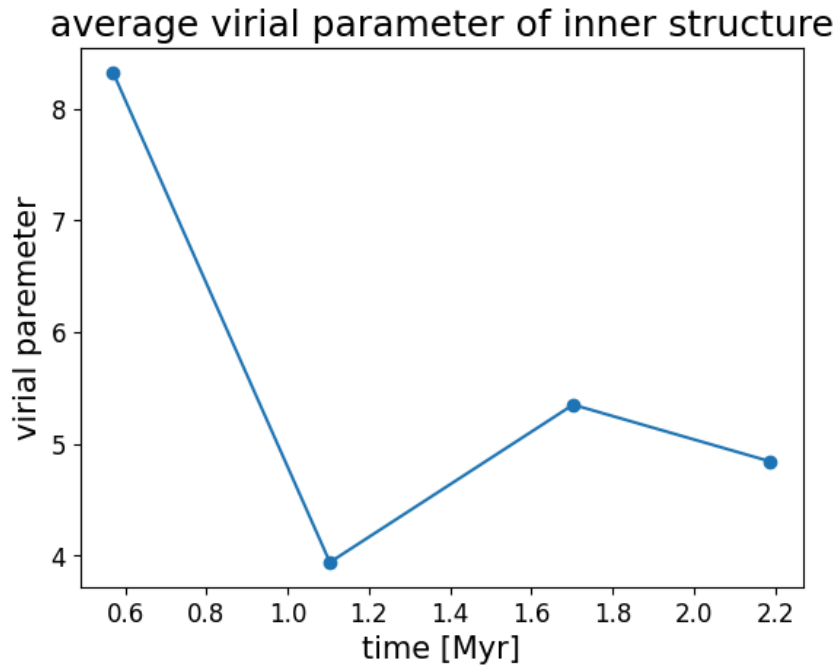


図 5.12 積分強度図上の内部構造のビリアルパラメータの平均値変化

### 5.3 積分強度図上の各構造のヒストグラム

積分強度図の解析で得られた各構造について、サイズ、質量、ビリアルパラメータのヒストグラムを作成した。結果を図 5.13，図 5.14，図 5.15 に示す。青のビンがリーフの個数，オレンジのビンがブランチの個数を表している。

図 5.13 から、最もサイズの大きいブランチ(トランク)が収縮していることが確認できる。またリーフやトランク以外のブランチについては、サイズの大きい構造の個数と小さい構造の個数が交互に増減していると読み取ることができる。この事実は 5.2 節 で見られるような、サイズの平均値の増減に対応する。

図 5.14 や図 5.15 より、質量やビリアルパラメータについても各構造において同様の傾向がみられる。

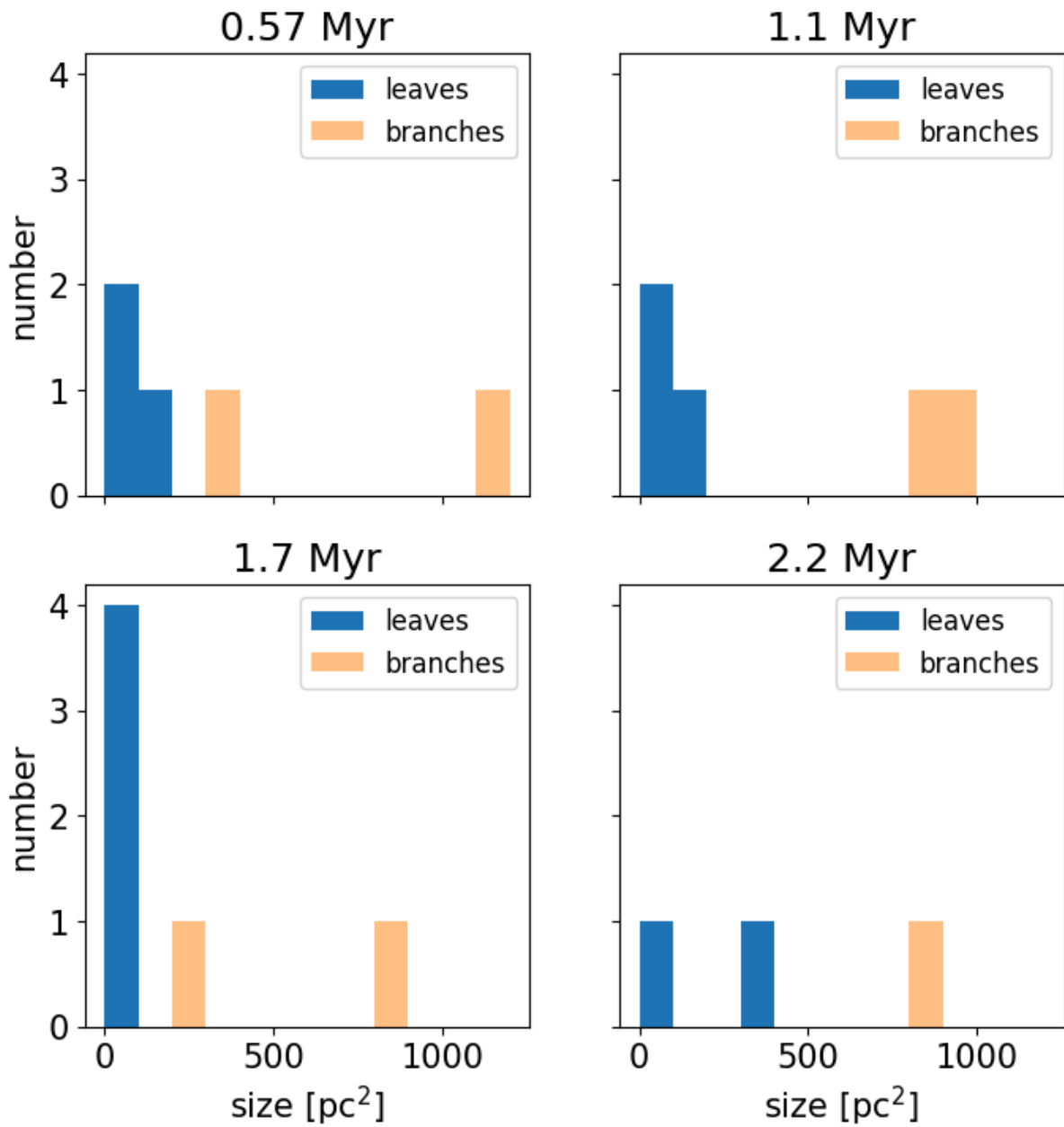


図 5.13 積分強度図上の各構造のサイズのヒストグラム

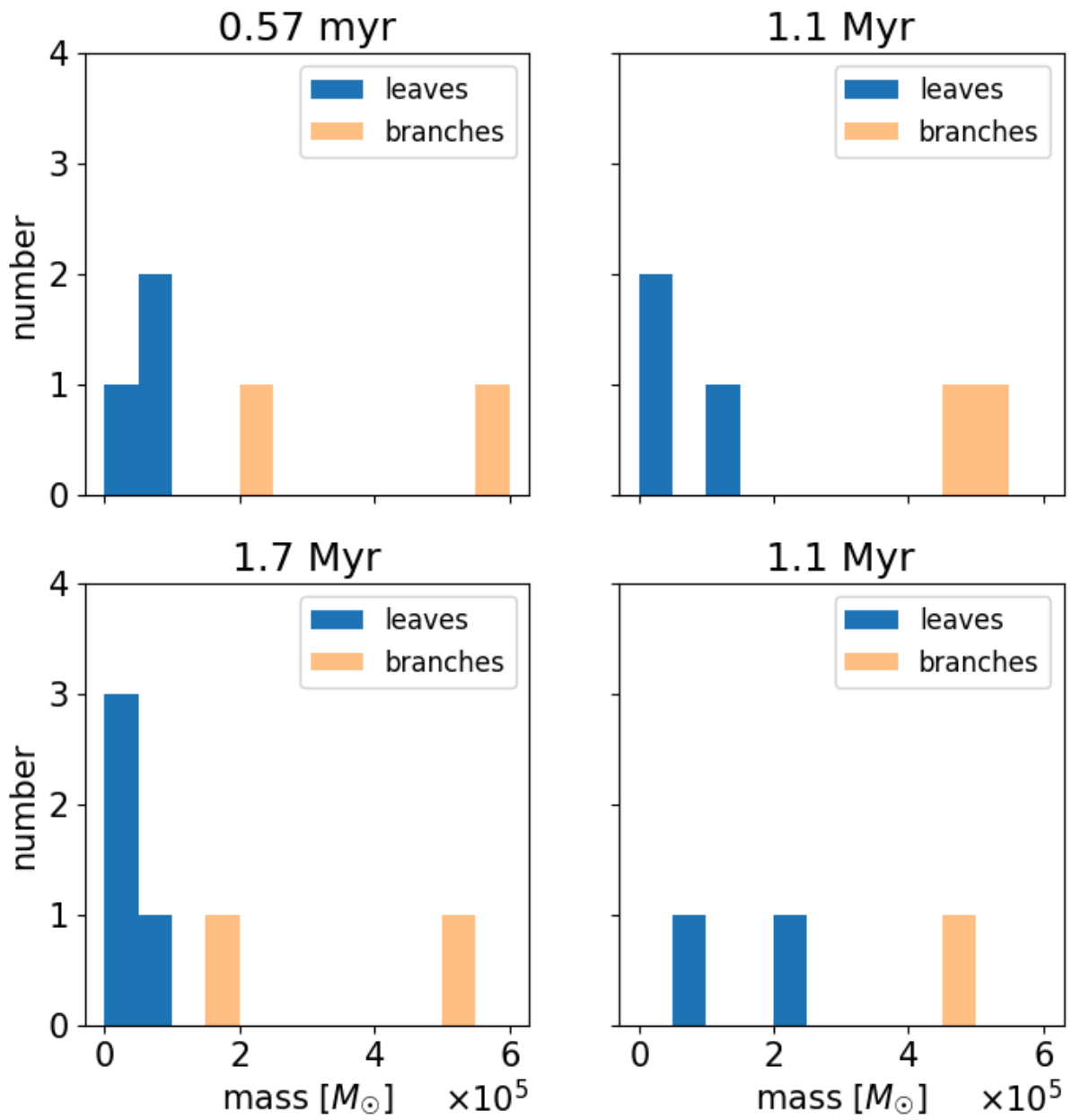


図 5.14 積分強度図上の各構造の質量のヒストグラム

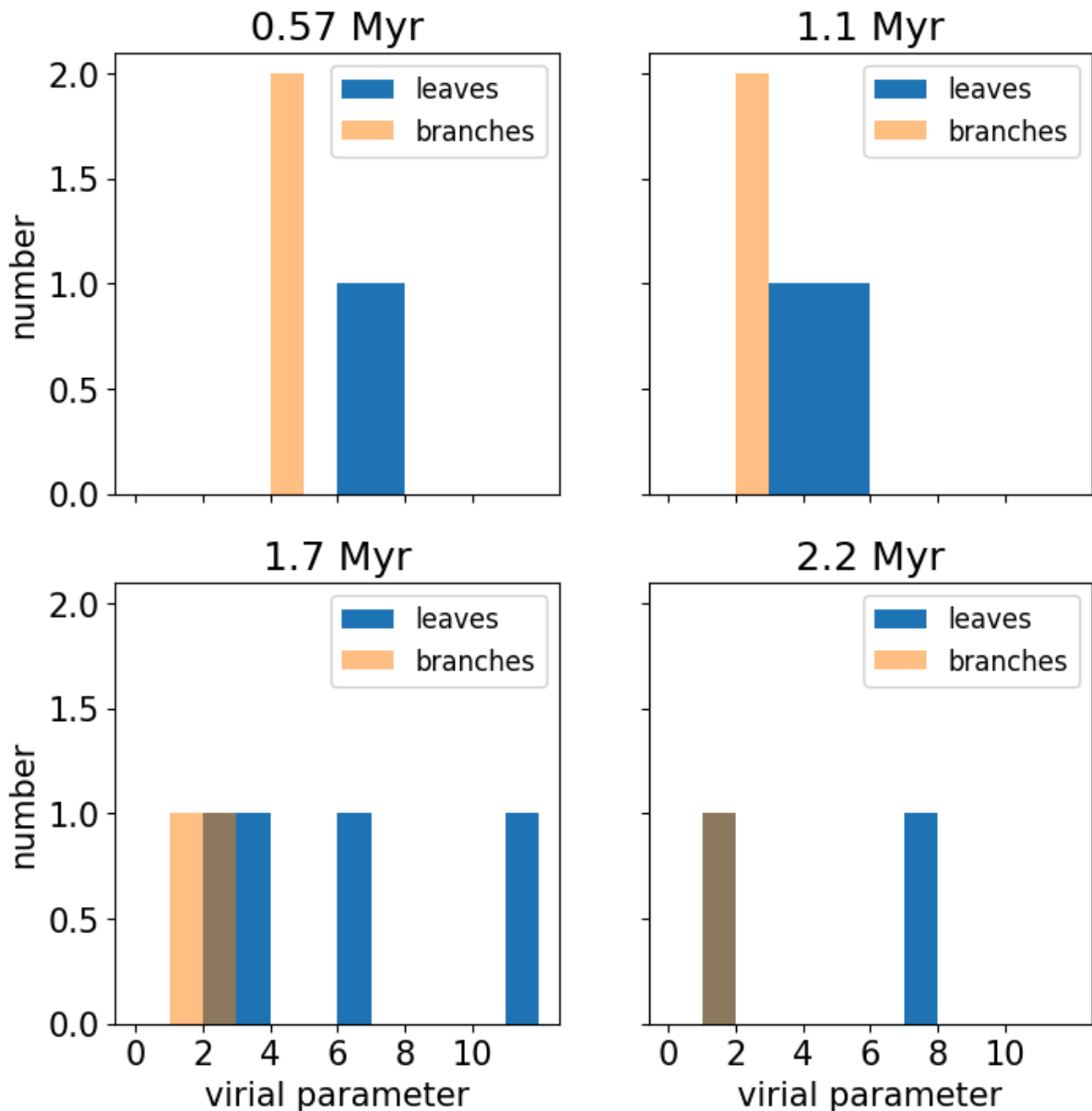


図 5.15 積分強度図上の各構造のビリアルパラメータのヒストグラム

## 5.4 三次元散布図上の各構造の変化

以下では分子雲の内部構造についてより詳細に議論する。そのために、三次元散布図の解析で得られた構造のサイズ、質量、ビリアルパラメータの平均値を算出してその変化を考察していく。

サイズ、質量、ビリアルパラメータの平均値の変化を、それぞれに図 5.16, 図 5.17, 図 5.18 に示す。青の線がリーフ、オレンジの線がブランチの平均値変化を表している。なおサイズについては、視線速度、位置、位置の三次元空間における体積であることを考慮し  $\text{pc}^2 \text{ km s}^{-1}$  という単位を用いている。またビリアルパラメータは式 (1.1) を用いて算出した。  $R$  は構造の体積から、構造を球形と考えることで導出した。また  $\sigma$  は構造が占めるボクセルの視線速度の値から分散の定義式を用いて導出した。

図 5.16 や図 5.17 から、リーフのサイズや質量の平均値は増減を繰り返していることがわかる。一方ブランチのサイズ、質量の平均値は時間発展に伴い徐々に増加していることがわかる。

図 5.18 から、リーフのビリアルパラメータについては増減しながらも全体としては減少傾向にあることがわかる。一方ブランチのビリアルパラメータについては、1.1 Myr から 2.2 Myr にかけて増加していることがわかる。

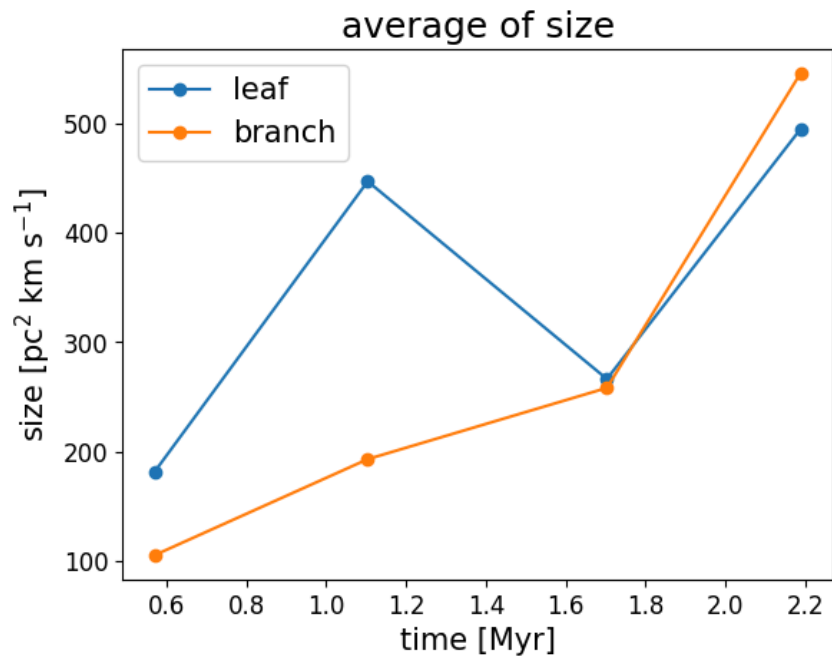


図 5.16 三次元散布図上の各構造のサイズの平均値変化

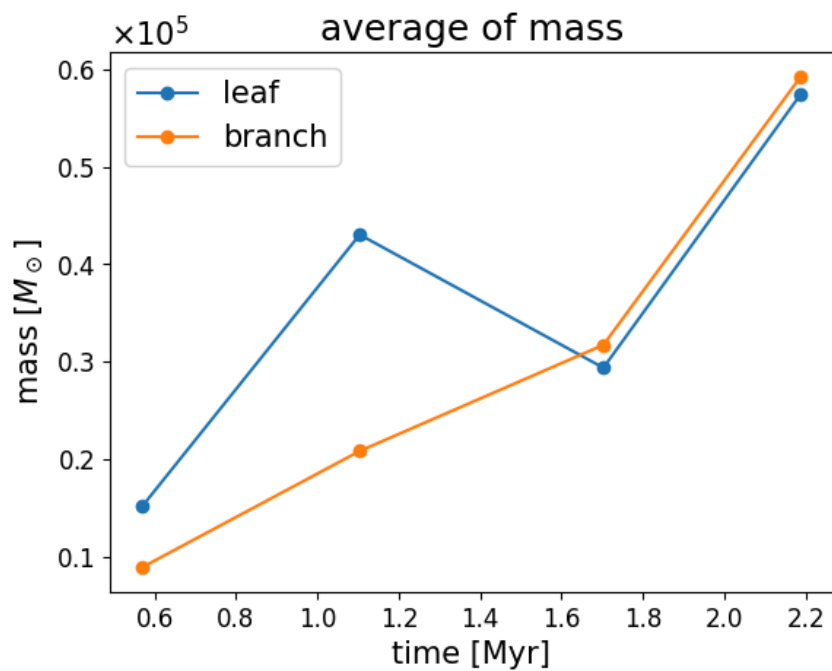


図 5.17 三次元散布図上の各構造の質量の平均値変化

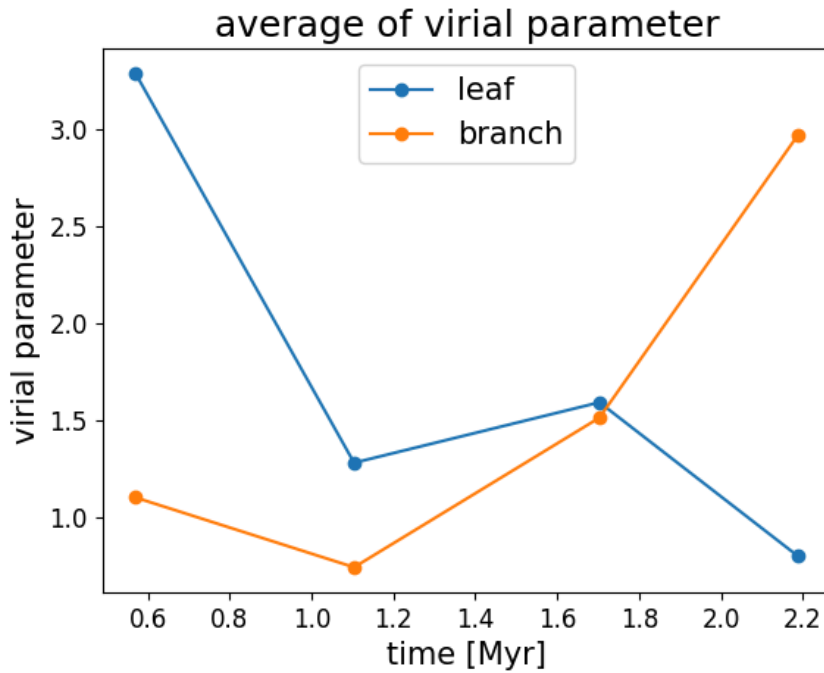


図 5.18 三次元散布図上の各構造のビリアルパラメータの平均値変化

## 5.5 三次元散布図上の各構造のヒストグラム

三次元散布図の解析で得られた各構造について、サイズ、質量、ビリアルパラメータのヒストグラムを作成した。結果を図 5.19, 図 5.20 に示す。青のビンがリーフの個数, オレンジのビンがブランチの個数を表している。

図 5.19 より, 積分強度図上の構造と同様, 三次元散布図上の各構造においても, サイズの大きい構造の個数と小さい構造の個数が交互に増減していると読み取ることができる。この事実は 5.4 節で見られるような, リーフのサイズの平均値の増減に対応する。一方で 1.7 Myr や 2.2 Myr において,  $1000 \text{ pc}^2 \text{ km s}^{-1}$  を上回るサイズのリーフやブランチが生じていることがわかる。特に 2.2 Myr における最大のブランチがリーフを覆うような巨大な構造となっていることが, 図 4.8 から定性的にも確認できる。またこの事実は 5.4 節で見られるような, ブランチのサイズの平均値の増加に対応する。

図 5.20 より, 質量についてもサイズと同様の傾向がみられる。

図 5.21 より, 時間発展に伴いビリアルパラメータの大きいリーフが減少し, 小さいリーフが増加する傾向にあることがわかる。これは 5.4 節で見られるような, リーフのビリアルパラメータの平均値の減少傾向に対応する。一方で特に 2.2 Myr において, ビリアルパラメータの大きいブランチが生じていることがわかる。これは 5.4 節で見られるような, ブランチのビリアルパラメータの平均値の増加に対応する。

1.7 Myr や 2.2 Myr において巨大な構造が形成される原因についてはまだ明らかでない。しかしこの二つの時点ではリーフの個数が減少していることから, 0.57 Myr や 1.1 Myr において存在している構造が衝突を起こすことで, その時点よりもサイズや質量の大きい構造が形成される可能性が考えられる。

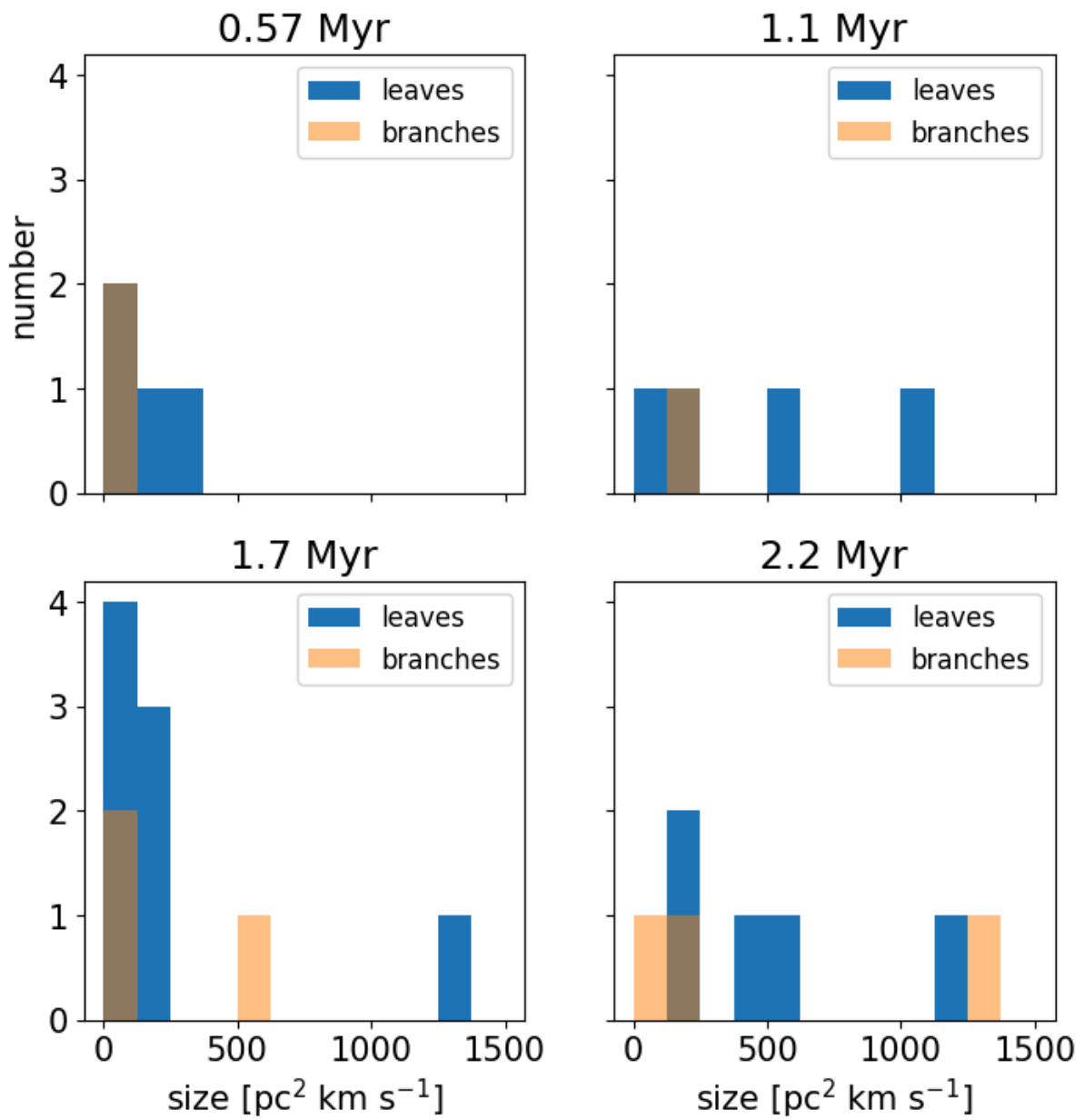


図 5.19 三次元散布図上の各構造のサイズのヒストグラム

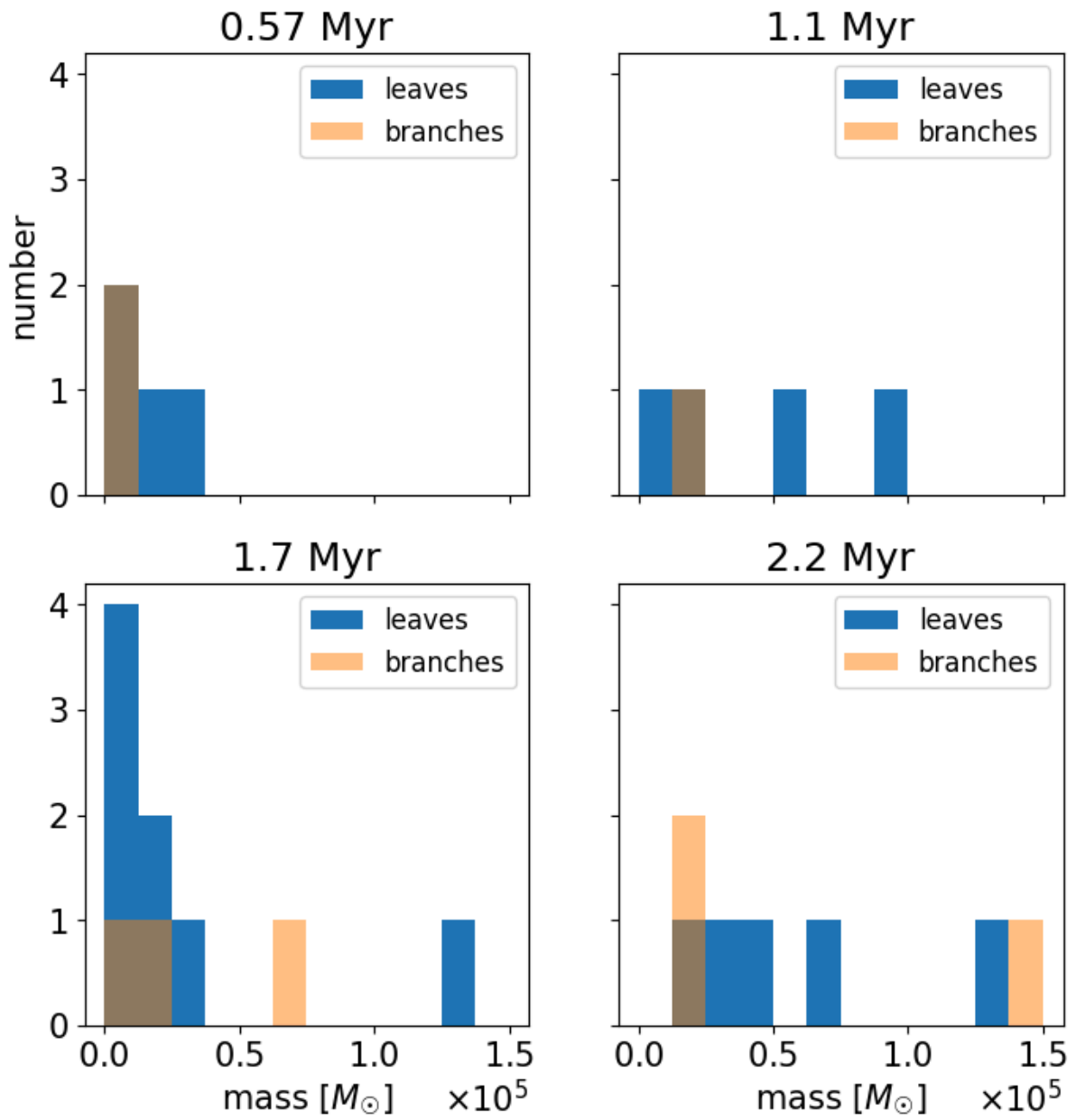


図 5.20 三次元散布図上の各構造の質量のヒストグラム

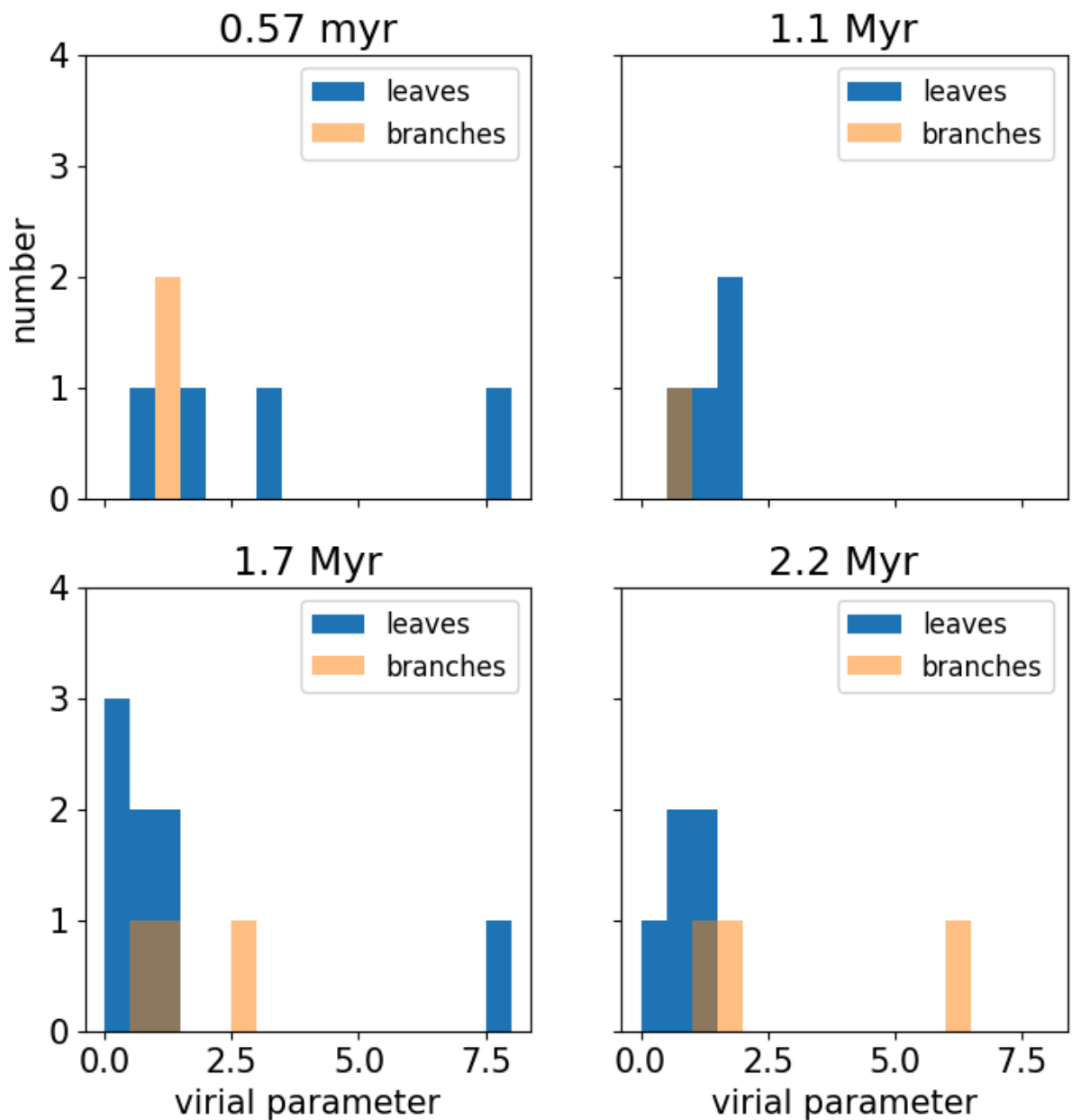


図 5.21 三次元散布図上の各構造のビリアルパラメータのヒストグラム

## 5.6 mass function との比較

Dendrogram による解析結果やその解釈についての正確性を確認するため、解析対象のデータについて各時点における mass function を作成した。結果を図 5.22 に示す。青線が 0.57 Myr, 黄色線が 1.1 Myr, 緑線が 1.7 Myr, 赤線が 2.2 Myr における結果である。

mass function から、時間発展に伴い質量の大きい部分と小さい部分が増加していることがわかる。これは分子雲においてフィラメント構造が発展しているためと考えられる。この事実は 5.1 節で述べたように、トランク内部でもみられる傾向である。

一方でフィラメント構造が発展するスピードについては徐々に減少していることがわかる。特に 1.7 Myr から 2.2 Myr においては質量の最大値がほぼ変わらないなど傾向が顕著である。これは分子雲が全体としてビリアル平衡に近づいているためと考えられる。この事実は 5.1 節においてみられたようなビリアルパラメータの変化に対応する。

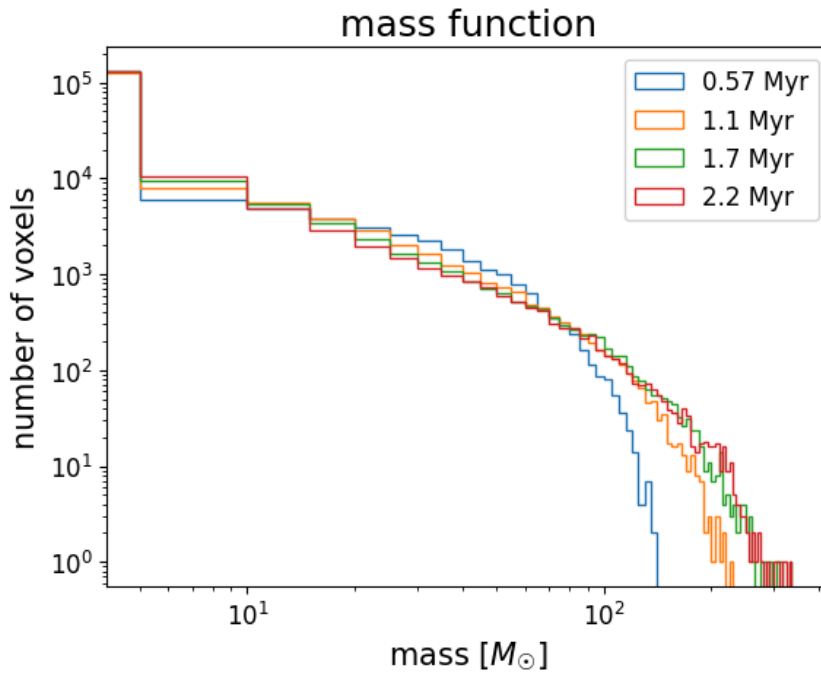


図 5.22 各時点における mass function

## 5.7 解析結果から明らかとなった分子雲進化シナリオ

以上の解析結果から、以下のような分子雲進化のシナリオが明らかとなった。

まず分子雲は、全体としては自己重力によって徐々に収縮しつつ、フィラメント構造を発展させる。一方で分子雲内部に存在する小規模な構造は、そのサイズ、質量、ビリアルパラメータについて増減を繰り返す。その後、分子雲全体としてビリアル平衡に近づくことによって、自己重力による収縮やフィラメント構造の発展のスピードは減少していく。一方で内部の小規模な構造はより大きな構造を形成していく。

これまでの多数の観測により、異なる分子雲の衝突によって星形成が促進される可能性が指摘されてきた。このような衝突は一般には、独立した複数の分子雲によるものとされている。しかし実際にはこのシナリオのように、重力的に安定した巨大な構造の内部で小規模な構造が衝突を起こすことで、星形成が促進されている可能性がある。

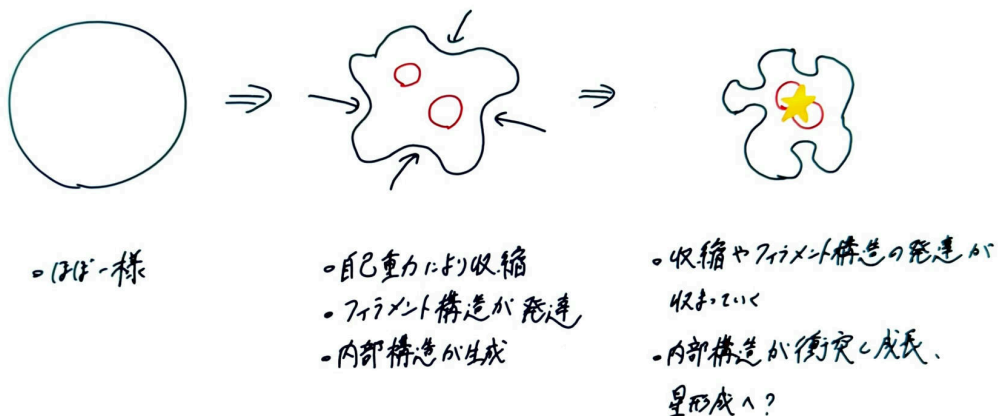


図 5.23 分子雲進化シナリオの模式図

## 第 6 章

# 結論と今後の展望

### 6.1 まとめ

本研究では、分子雲進化を想定した自己重力流体シミュレーションに対し、その進化の様子を構造的に理解し、星形成に至るまでのシナリオを推定するため、Dendrogram を用いた構造同定を行った。主な結果を以下にまとめる。

- 三次元データを視線方向に積分した積分強度図を Dendrogram で解析した。結果最も外側の構造であるトランクについて、自己重力により収縮する様子が見られたが、そのスピードについては遅くなっていた。ビリアルパラメータの推移との比較から、重力収縮については徐々に平衡に近づいていると考えられる。またトランク内部の質量が減少していたことから、時間発展により分子雲はフィラメント構造を発展させるものと思われる。
- トランクの内部にある小規模な構造においては、そのサイズ、質量、ビリアルパラメータは増減を繰り返していた。
- 三次元データをもとに作成した三次元散布図についても同様に Dendrogram で解析した。結果、各構造のサイズ、質量、ビリアルパラメータが増減を繰り返している様子がみられた。一方で時間発展につれ、比較的大きな構造が生じ、成長していく様子もみられた。
- 解析対象のデータに対し mass function を作成し、Dendrogram による解析と比較した結果、フィラメント構造の発展について共通する解釈が可能であることがわかった。
- 解析によって得られた情報をもとに、分子雲の構造的な進化について、自己重力による収縮が平衡に近づき、内部では小規模な構造が大規模な構造へ成長することが明らかになった。小規模な構造が大規模な構造へ成長する過程において、構造同士の衝突などの原因で星形成が促進される可能性がある。

### 6.2 今後の展望

本研究では主に四つの時点のデータに対し解析を行ったが、空間分解能を上げ、時間発展をより詳しく調べることで、明らかとなった分子雲進化シナリオを確認することができると考えられる。また本研究では視線速度、位置、位置からなる三次元の質量データを扱ったが、密度や温度など、その他のパラメータからなるデータも扱うことで、このシミュレーションに対するより深い理解が可能となる。

一方で観測データとの比較も行い、今回得られた構造と観測データとの対応などについても考察を進めたいと考えている。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援、ご協力をいただきました。

指導教員である久野成夫教授には大変多くのご支援をいただきました。ご多忙の中、定期的に進捗報告の機会を設けていただき、研究の方向性や進め方などについて多くのご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

福島肇助教には、本研究で解析対象としたシミュレーションデータを提供していただきました。またプログラミングやシミュレーションを用いた天文学研究について、大変多くのことをご教授いただきました。深く感謝申し上げます。

久野教授と福島助教をはじめとした星形成研究グループの皆さんには、月1回のミーティングで多くのアドバイスをいただきました。感謝申し上げます。

橋本拓也助教には、ゼミなどの機会を通じて天文学の基本的な知識をご指導いただきました。また本多俊介助教には、研究室の定例ミーティング等でアドバイスやコメントをいただきました。感謝申し上げます。

最後に、宇宙観測研究室の皆さんに多大な感謝を申し上げます。先輩方には、解析ソフトの使い方を教えていただいたり、国立天文台を案内していただいたりなど、多くの貴重な経験をさせていただきました。また定例ミーティングなどの機会を通じて多数のアドバイスをいただきました。同期の皆さんには、ゼミや研究等にも取り組む中でお互いに切磋琢磨することで、高いモチベーションで研究活動に取り組むことができました。今一度感謝申し上げます。

## 参考文献

- Federrath, C., et al. 2012, ApJ, 761, 156  
Fukushima, H., et al. 2020, MNRAS, 497, 3830  
Goldsmith, P. F., et al. 2008, ApJ, 680, 428  
Kim, Jeong-Gyu, et al. 2018, ApJ, 859, 68  
Kohno, M., et al. 2021, PASJ, 73, SP1  
Kondo, H., et al. 2021, ApJ, 912, 66  
Miyawaki, R., et al. 2022, PASJ, 74, 1  
Nishimura, A., et al. 2018, PASJ, 70, SP2  
Nishimura, A., et al. 2021, PASJ, 73, SP1  
Tokuda, K., et al. 2020, ApJ, 896, 36  
Astronomical Dendrograms in Python, <https://dendrograms.readthedocs.io/en/stable/>  
Sfumato AMR, <https://redmagic.i.hosei.ac.jp/research/sfumato/>  
天文学辞典(公益社団法人 日本天文学会), <https://astro-dic.jp>