

# 分子雲の構造進化の理解に向けた シミュレーションと観測データの解析

佐々木 誇虎 (筑波大学)

久野成夫、福島肇 (筑波大学)、

藤田真司 (統計数理研究所)、野崎信吾 (九州大学)

1. 背景・目的
2. シミュレーション解析
3. 観測データ解析
4. 議論
5. まとめ

# 1. 背景・目的

## 星形成の研究手法

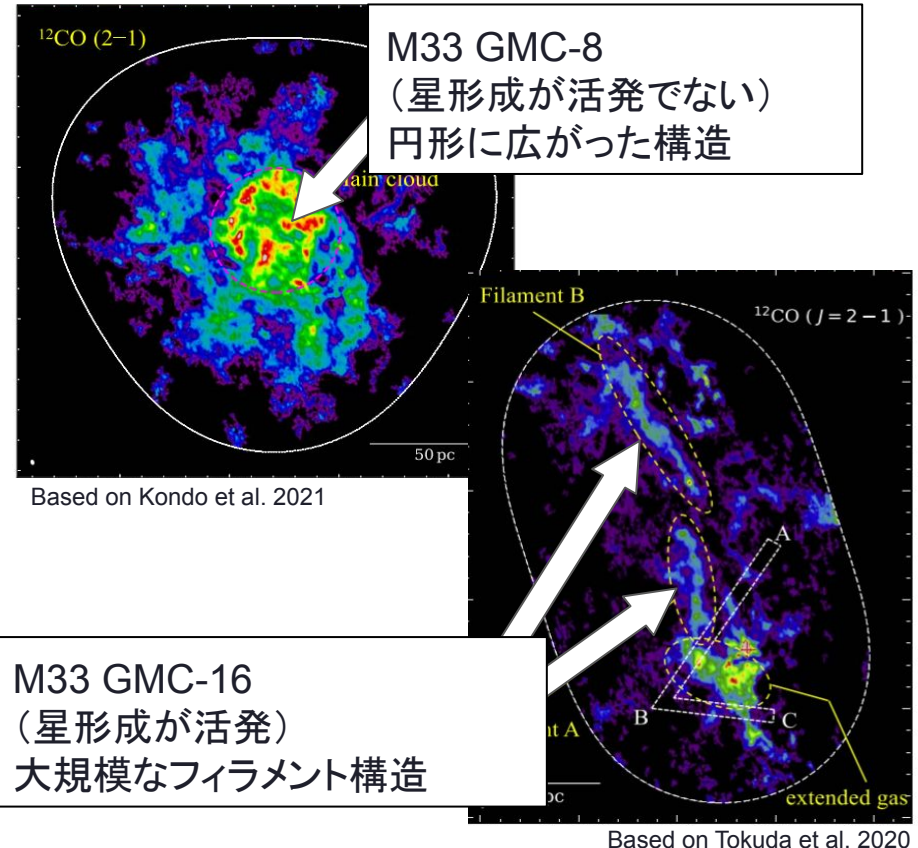
分子雲は星形成の現場であるが、その構造の進化過程の解明には未だ課題が多い

・観測: 複数の分子雲の構造などを比較して進化段階を相対的に評価

→ 単一分子雲のデータからでは構造進化の理解は困難

・シミュレーション: 実際の分子雲を再現するための様々な研究モデルから、星形成機構を研究

→ **観測を再現したシミュレーションで分子雲を想定した流体の時間発展を解析し、観測データと比較することで、分子雲の構造進化を研究することが容易になる**



# 1. 背景・目的

## 研究目的

**分子雲進化の詳細な理解のために、分子雲を想定した流体シミュレーションを行い、データを解析して観測データと比較する**

- ・時間発展に伴い、分子雲の構造はどのように変化するかに注目
- ・観測で用いられる構造解析ツールをシミュレーションデータの解析に適用  
→ **シミュレーションデータと観測データの比較が容易**
- ・同様の解析を観測データに対しても実施
- ・シミュレーションデータの解析と観測データの解析それぞれの結果を比較し、分子雲進化 シナリオの推定を行う

# 1. 背景・目的

## 解析ツール

astrodendro (Rosolowsky et al. 2008) を用いた解析

Dendrogram: 多次元のデータセットにおける階層構造を分類するアルゴリズム

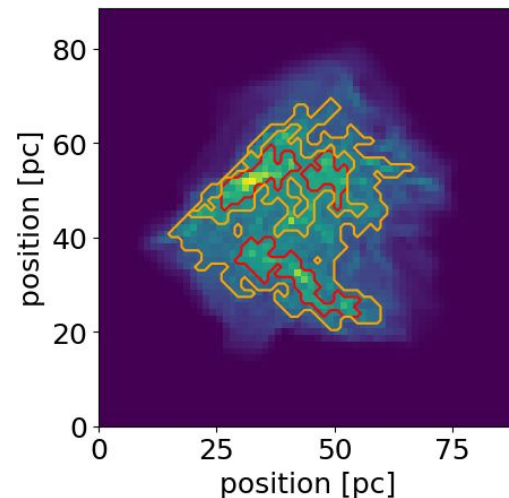
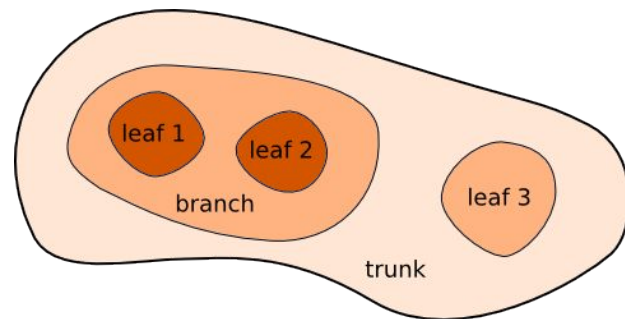
- ・内部構造を持たない最小構造: リーフ
- ・内部構造を包含する構造: ブランチ
- ・最外部の構造: トランク

観測データの解析にてしばしば用いられるツールをシミュレーションデータに対して適応する

→ **シミュレーションデータと観測データの比較が容易**

得られた構造それぞれについて、

- ・サイズ
  - ・質量
  - ・速度分散
  - ・ビリアルパラメータ
- を求めて考察する



## 2. シミュレーション解析

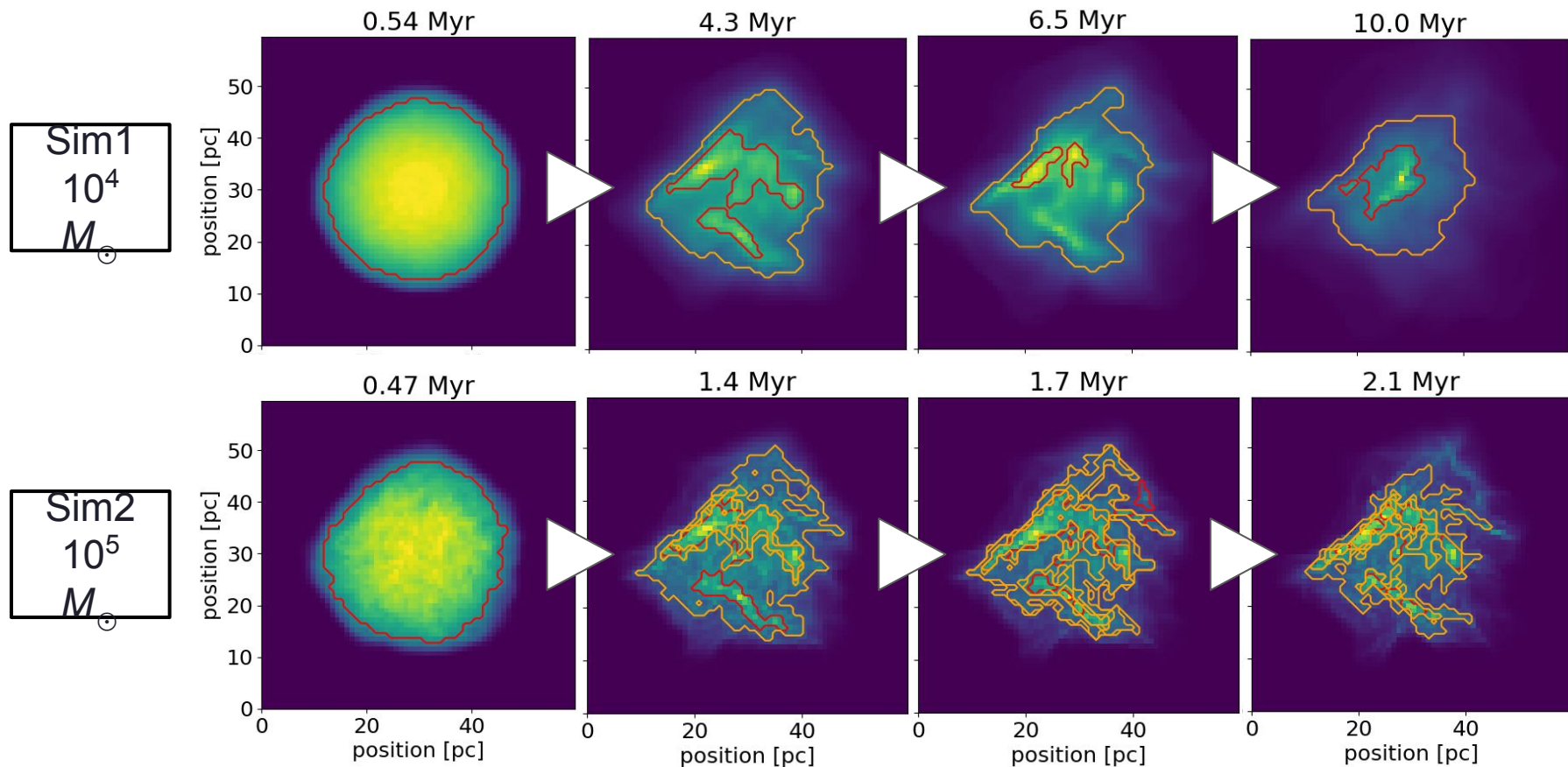
### シミュレーション概要

- ・コード: SFUMATO\_MHD (Matsumoto 2007)
- ・自己重力を持つ一様単一流体球を時間発展させた
- ・データは観測と同様、位置-位置-視線速度の3次元
- ・質量の違いや磁場の有無、形成された星からのフィードバックによって解析結果がどのように変化するか注目

	半径 [pc]	質量 [ $M_{\odot}$ ]	面密度 [ $M_{\odot}/\text{pc}^2$ ]	ビリアル パラメータ	磁場の 有無	フィード バック
Sim1	20	$10^4$	8	1	×	×
Sim2	20	$10^5$	80	1	×	×
Sim3	20	$10^5$	80	1	○	○

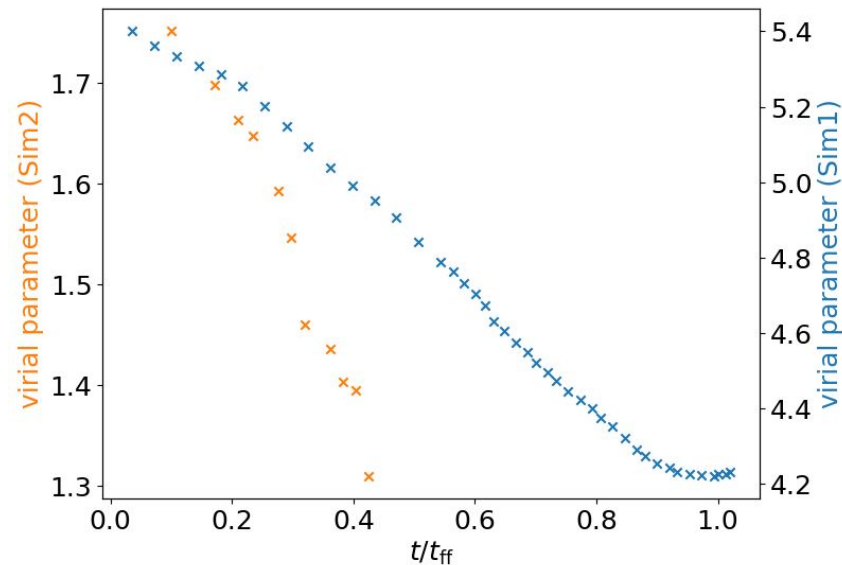
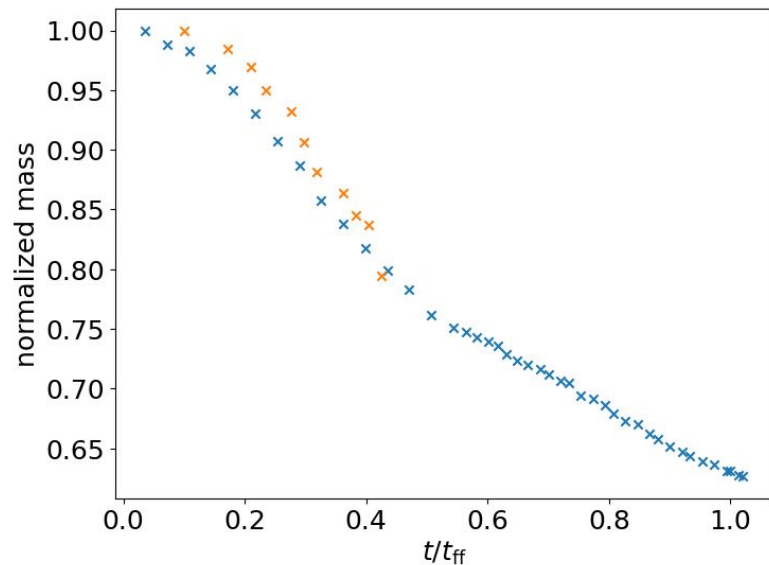
## 2. シミュレーション解析

### Sim1、Sim2の結果



## 2. シミュレーション解析

### Sim1、Sim2におけるトランクの物理量変化



質量は1ステップ目の値で規格化している

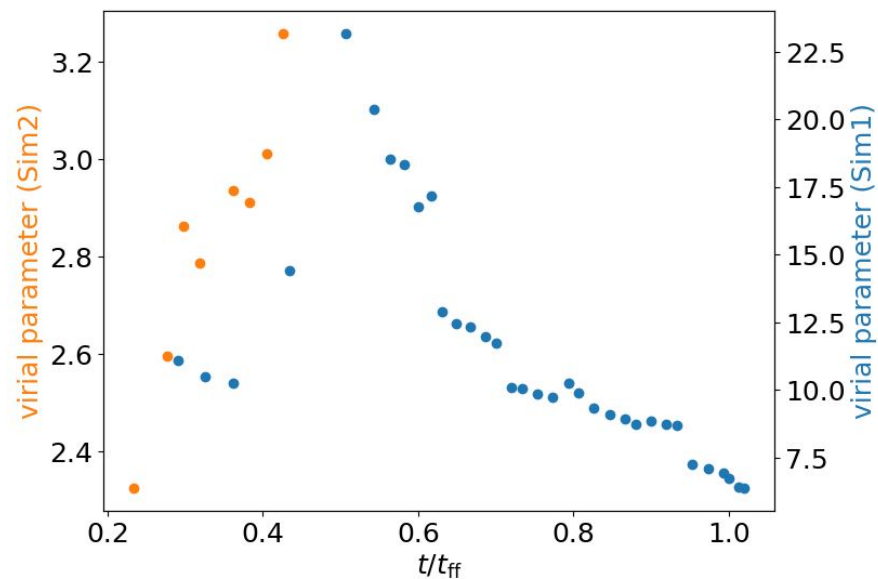
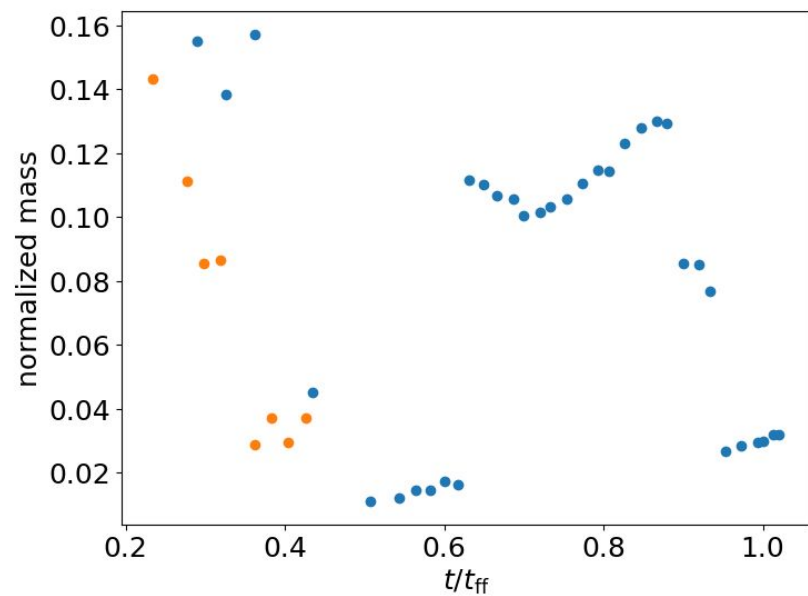
サイズ、質量、速度分散、ビリアルパラメータ: 減少  
→ ガスの重力的な収縮を示している

初期質量が大きいほどビリアルパラメータの減少スピードが早いことがわかる

- × Sim1  $10^4 M_{\odot}$
- × Sim2  $10^5 M_{\odot}$

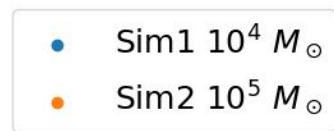
## 2. シミュレーション解析

### Sim1、Sim2における内部構造の物理量変化



Sim1については、  
サイズ、質量、ビリアルパラメータ: 増減  
速度分散: 減少

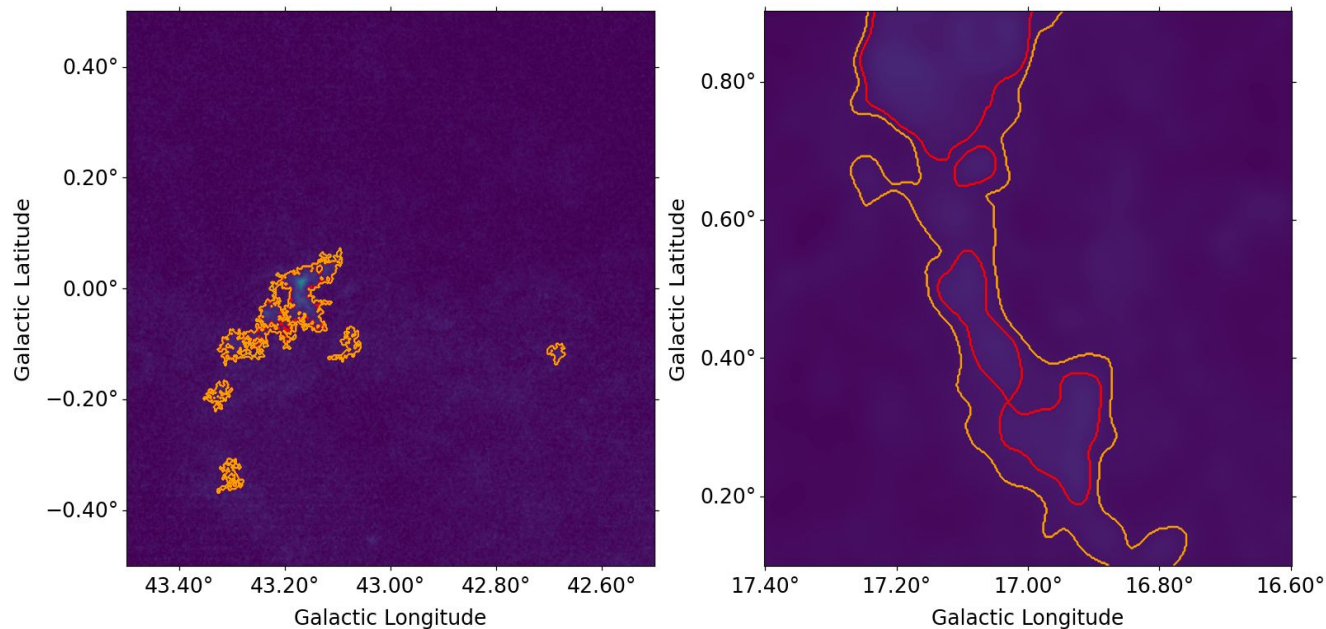
Sim2については、Sim1の初期の傾向と一致している



# 3. 観測データ解析

## 観測データ概要

- FUGIN (Umemoto et al. 2017) : 野辺山45m電波望遠鏡によるCO多輝線同時サーベイ観測
- 17種類の分子雲について、 $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ) 輝線強度マップから積分強度図を作成し解析
- $M_{^{13}\text{CO}} / M_{^{12}\text{CO}}$  を分子雲の進化段階とみなして物理量の推移を調べる



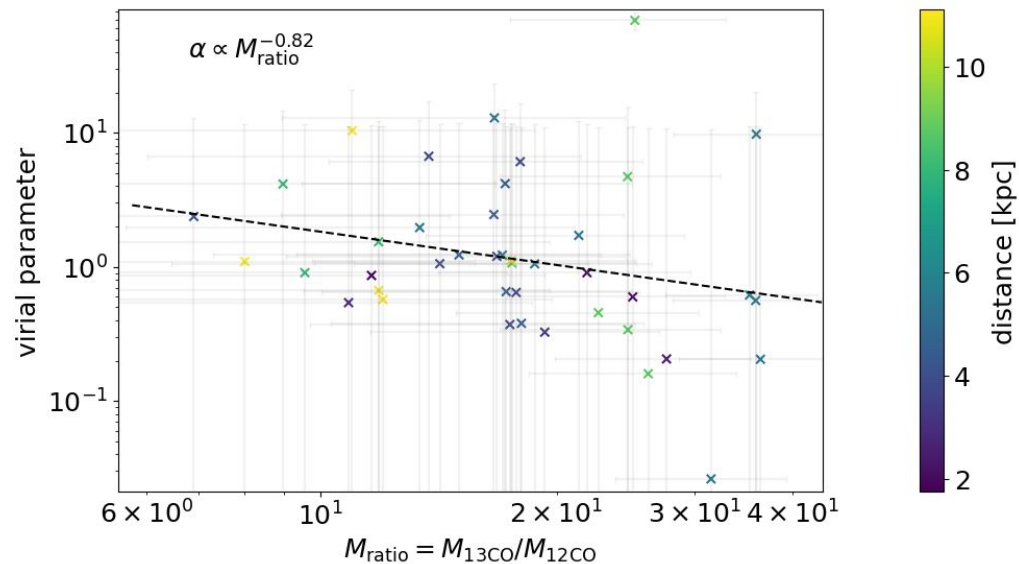
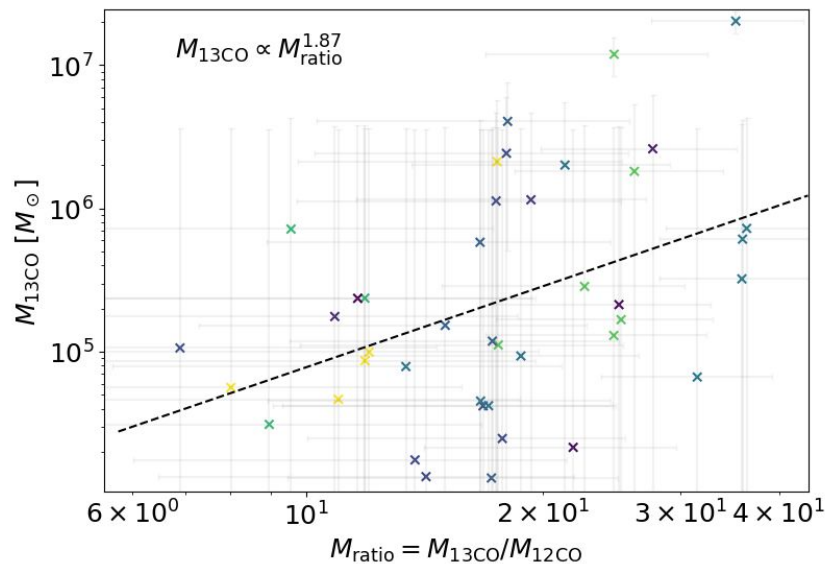
左: 最遠方のW49  
右: 最近傍のM17

最遠方のW49 (11.11 kpc) に  
合わせて分解能を調整した  
上で解析

分解能:  $\sim 0.46$  pc

### 3. 観測データ解析

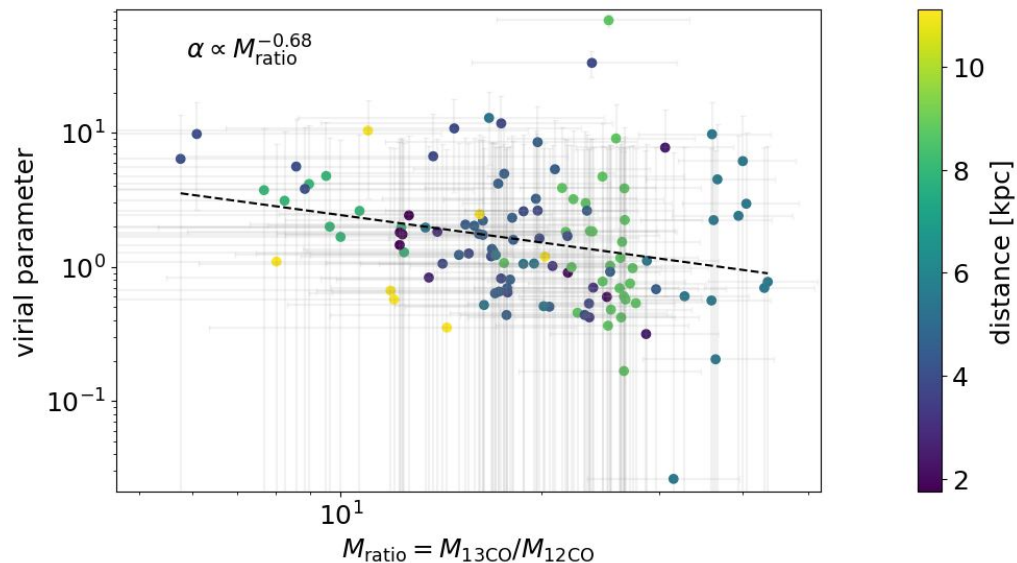
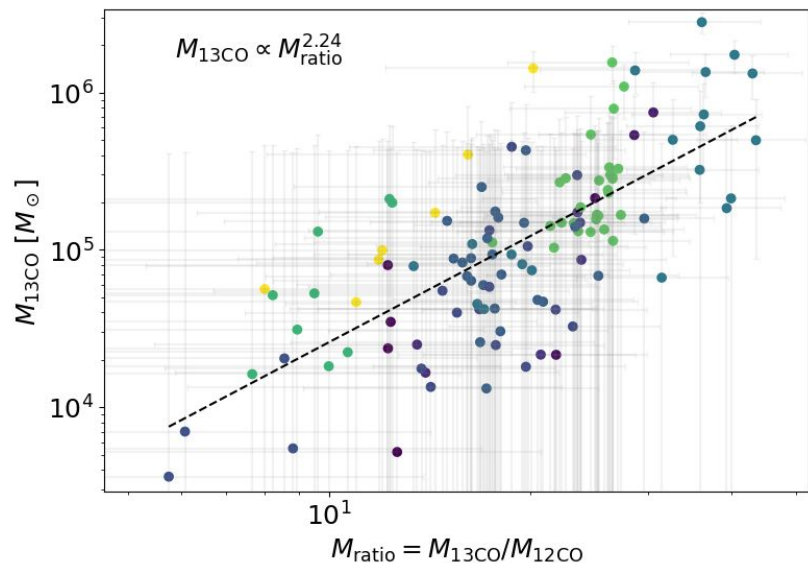
## 観測データにおけるトランクの物理量変化



- サイズ: 一定 (シミュレーションと異なる)
- 質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)
- ビリアルパラメータ: 減少
- 重力的に束縛されながら、ガス同士が合体・収縮?

### 3. 観測データ解析

## 観測データにおける内部構造の物理量変化



サイズ、質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)  
ビリアルパラメータ: 減少  
→ 重力的に束縛されながら、ガス同士が合体・収縮?

# 4. 議論

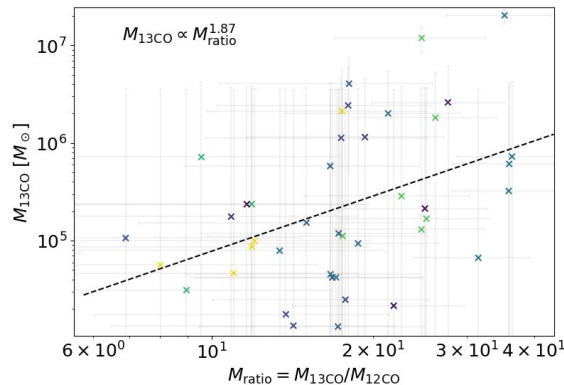
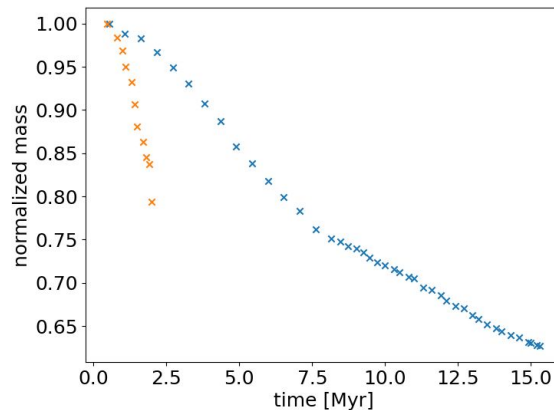
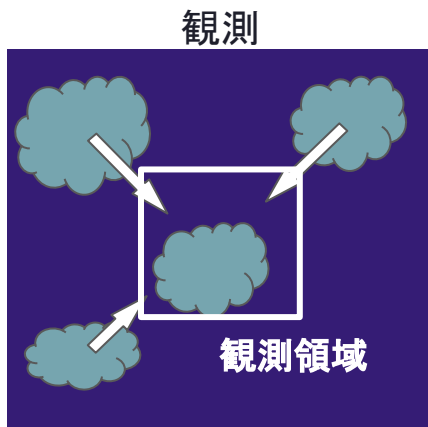
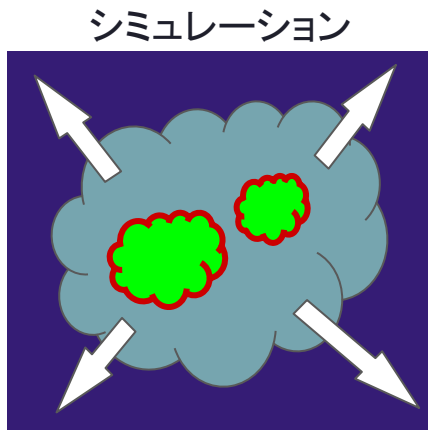
## 実際の分子雲により近いシミュレーションの必要性

観測データの解析結果から、実際の星形成現場では小さなガスや分子雲が重力的に集まって衝突・合体することでサイズや質量が増加していると考えられる

銀河系内外で分子雲同士の衝突を示す解析結果が報告されている(系内: Fujita et al. 2021など、系外: Sano et al. 2021など)

流体球同士の衝突シミュレーションも行われてきた(Inoue and Fukui 2013など)が、それらは共通の解析ツールで観測データと比較されたことはこれまでなかった

**観測領域の外側から分子雲が集積するような状況を想定した流体シミュレーションを astrodendro で解析し、観測データと比較する必要がある**



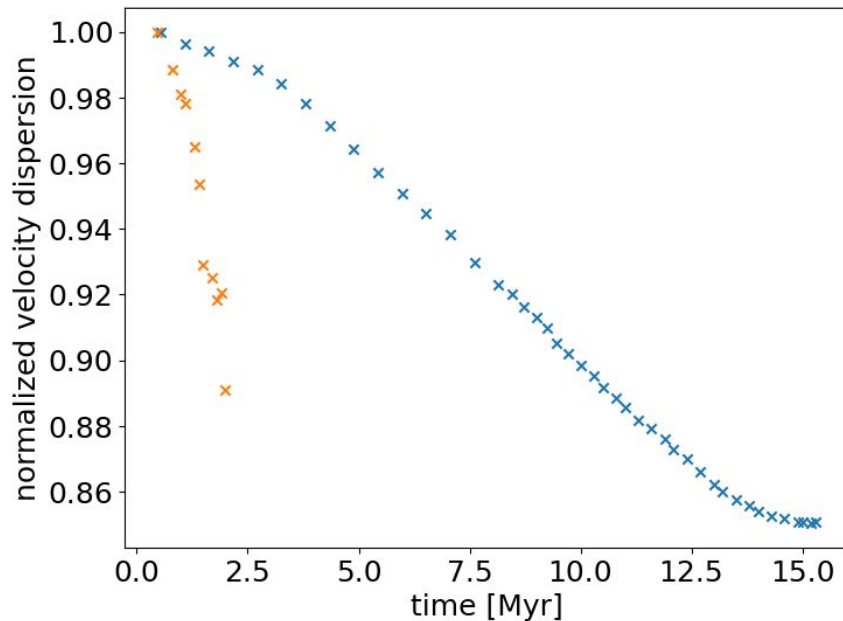
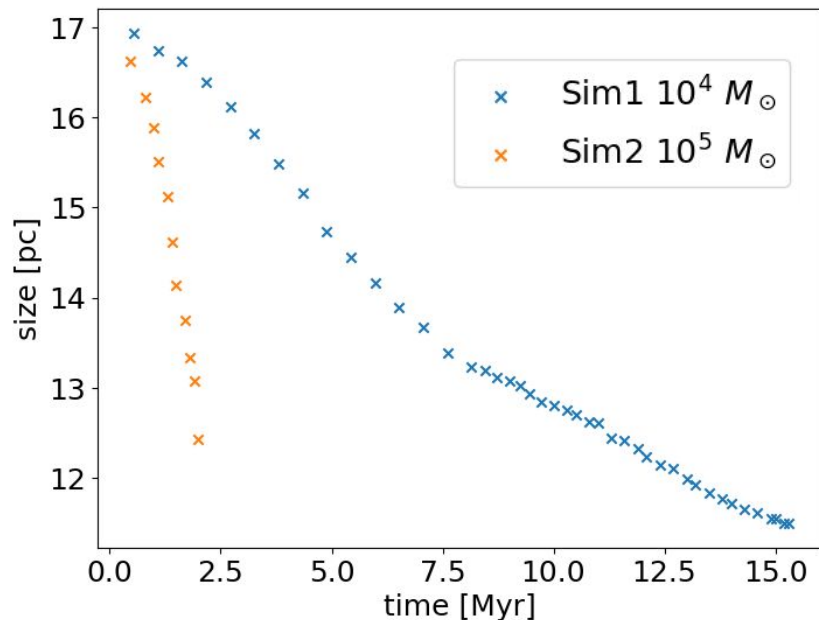
## 5. まとめ

- ・分子雲を想定した流体シミュレーションを行い、データをastrodendroで解析した
  - ・**初期の流体の質量が大きいほど重力による束縛が大きく、サイズや質量の減少するスピードが早かった**
- ・シミュレーションデータ解析と同様のツールで観測データを解析し、シミュレーションの解析結果と比較した
  - ・シミュレーションと異なり、分子雲の進化とともに**サイズや質量などは増加していた**
  - ・実際の分子雲の物理量推移を再現するには、単一流体球ではなく、**周囲のガスの降着や複数の分子雲の衝突を想定したシミュレーションが必要だと考えられる**

今後:

- ・複数の分子雲を想定したシミュレーションの実行
- ・シミュレーションにおける $M_{^{13}\text{CO}} / M_{^{12}\text{CO}}$ の計算、実際の時刻との比較
- ・さらなる観測データの解析

# Appendix. Sim1, Sim2におけるサイズ、速度分散の変化



速度分散は1ステップ目の値で規格化している

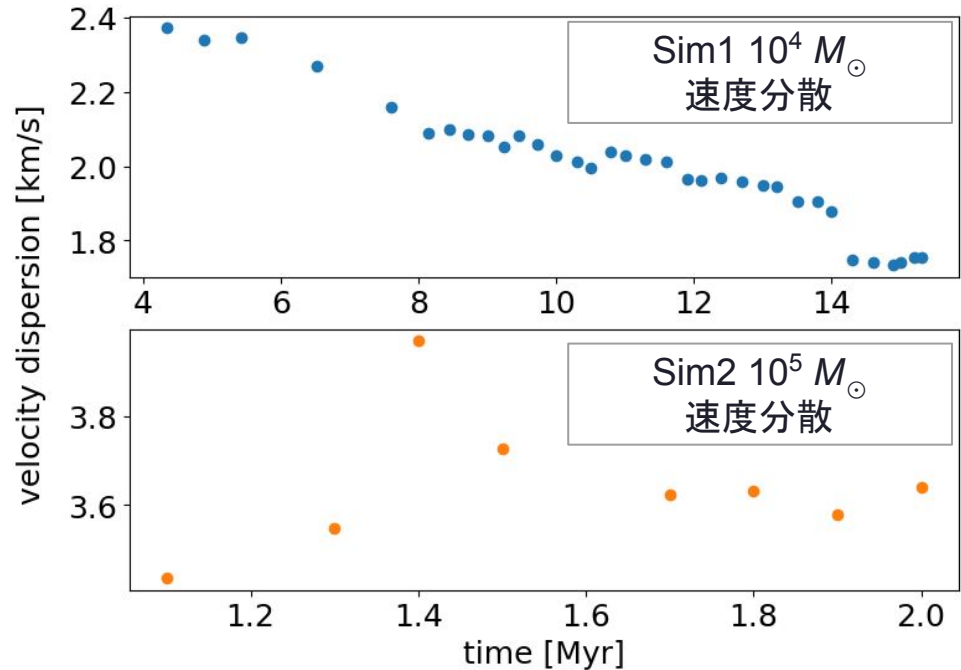
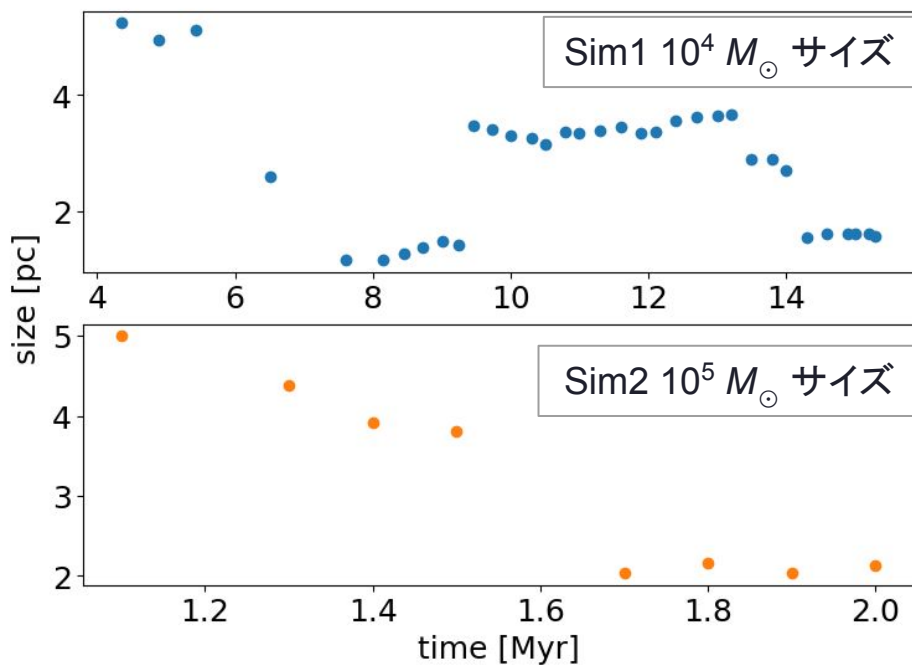
サイズ、質量、速度分散、ビリアルパラメータ: 減少

→ ガスの重力的な収縮を示している

初期質量が大きいほど物理量の減少スピードが早いことがわかる

## 2. シミュレーション解析

### Sim1、Sim2における内部構造の物理量変化

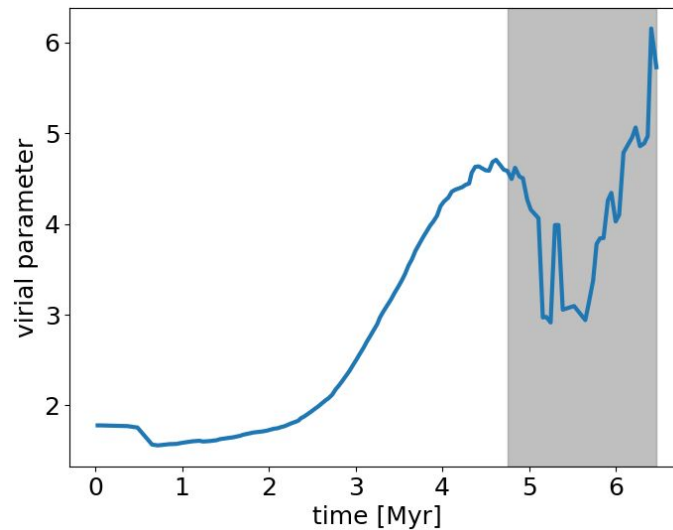
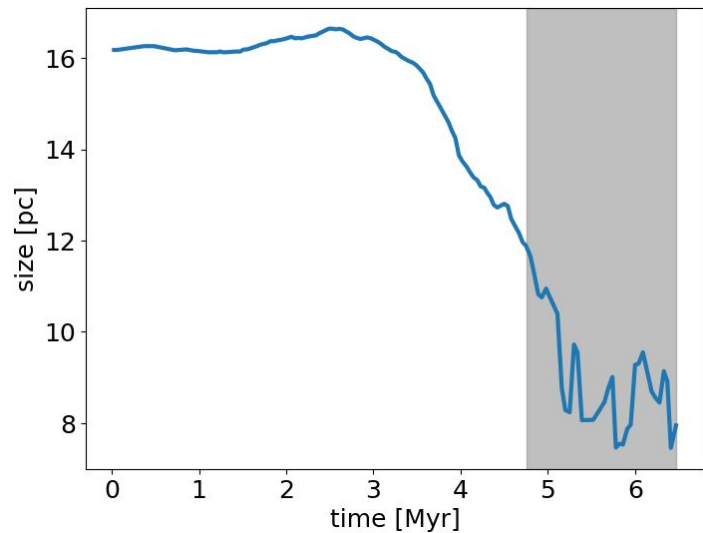


Sim1については、  
サイズ、質量、ビリアルパラメータ: 増減  
速度分散: 減少

Sim2については、Sim1の~8 Myrまでの傾向と一致している



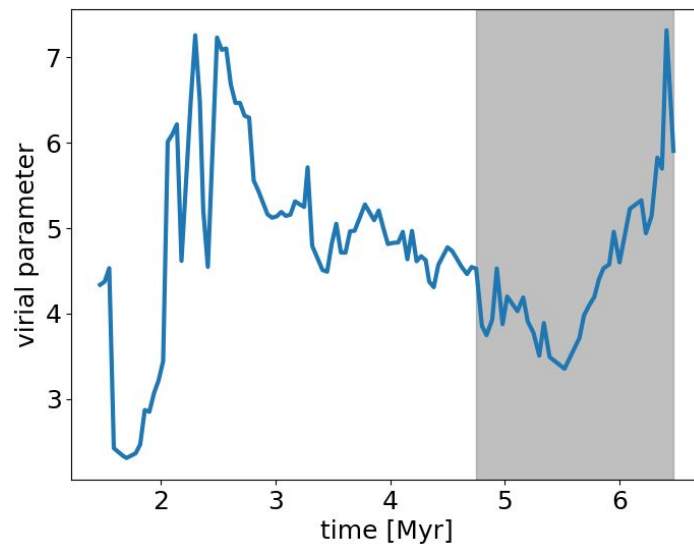
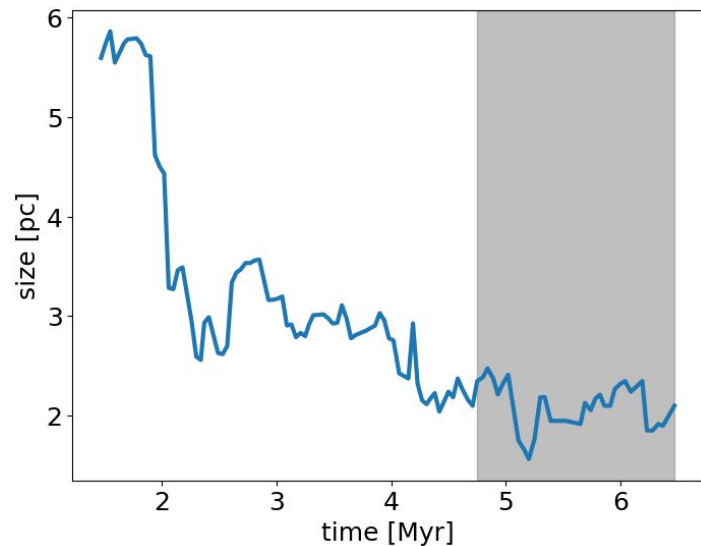
# Appendix. Sim3におけるトランクの物理量変化



グレーの領域：  
フィードバックあり

磁場なしのシミュレーションと同じく、サイズや質量は減少する  
ビリアルパラメータは磁場なしシミュレーションと異なり上昇する

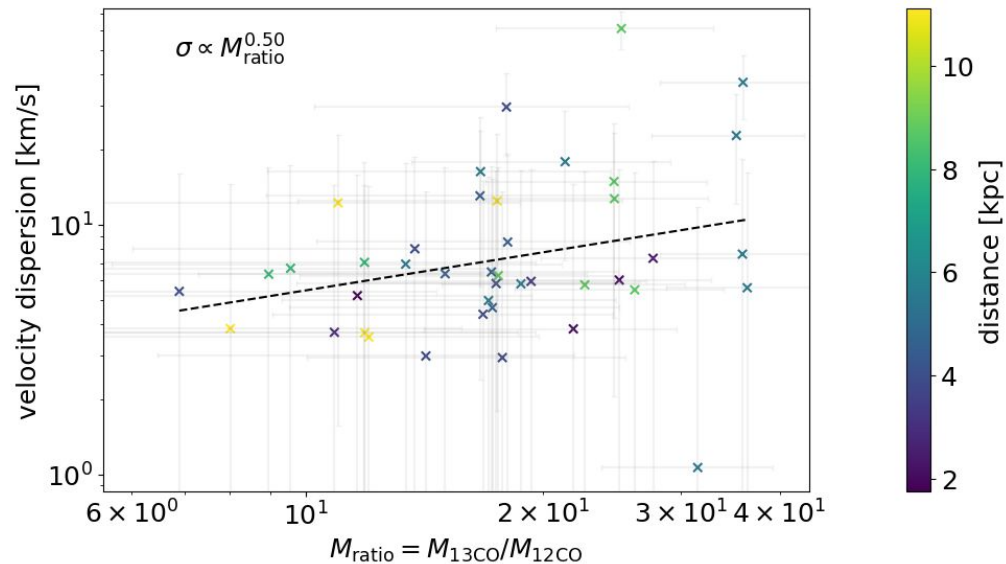
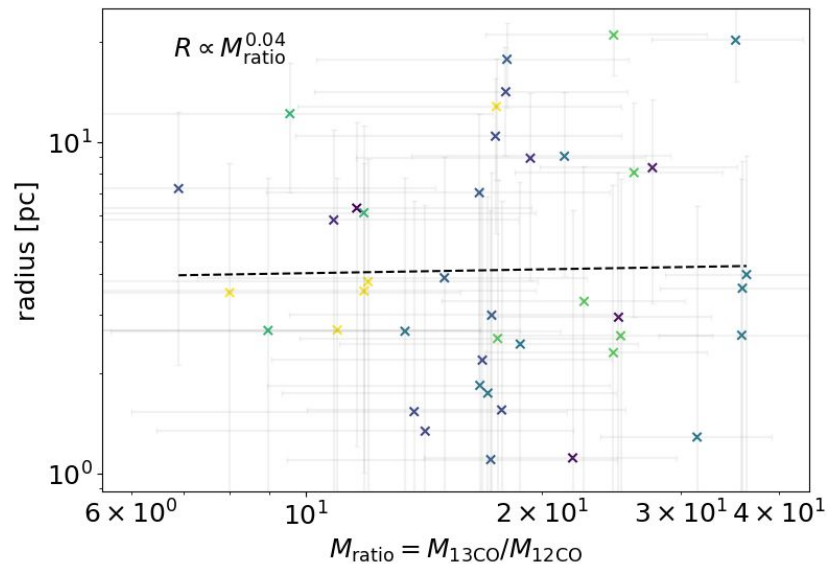
# Appendix. Sim3における内部構造の物理量変化



グレーの領域：  
フィードバックあり

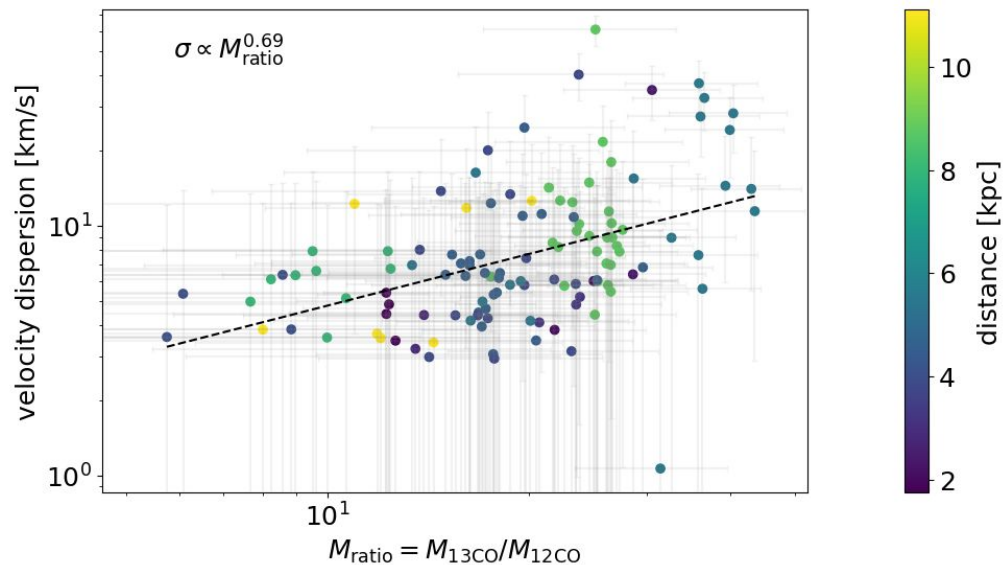
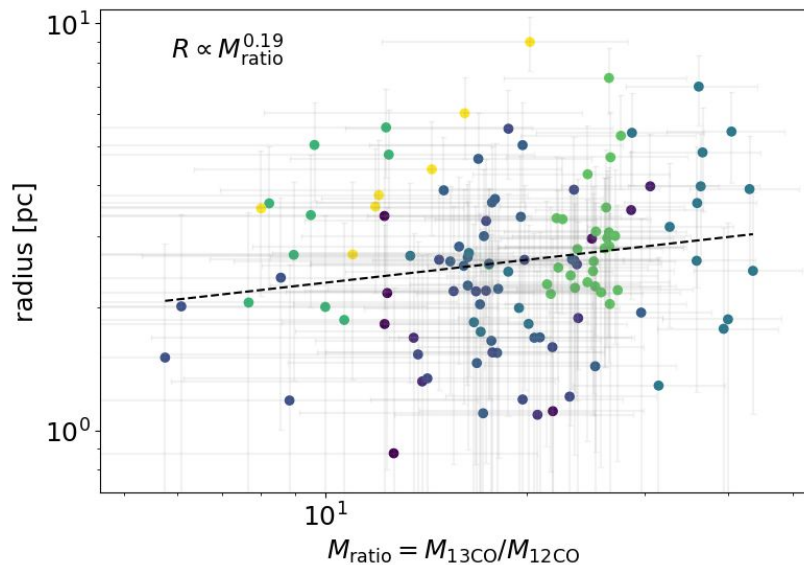
磁場なしのシミュレーションと同じく、サイズや質量は減少する  
リアルパラメータは磁場なしシミュレーションと異なり複雑に増減する

# Appendix. トランクのサイズ、速度分散の変化



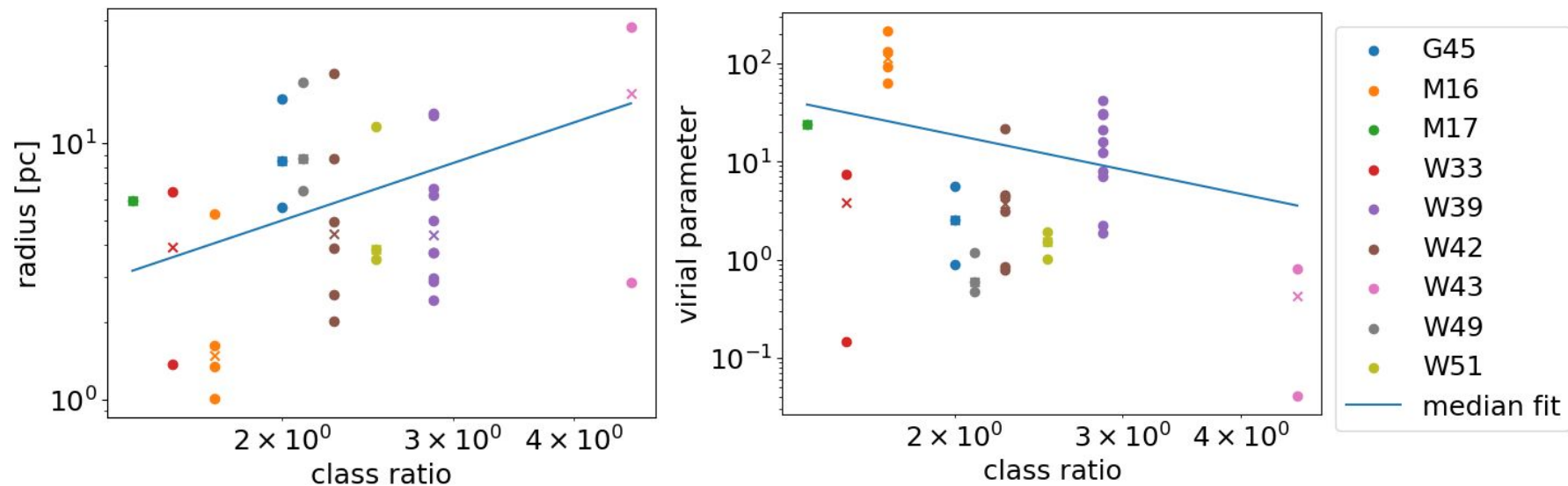
- サイズ: 一定 (シミュレーションと異なる)
- 質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)
- ビリアルパラメータ: 減少
- 重力的に束縛されながら、ガス同士が合体・収縮?

# Appendix. 内部構造のサイズ、速度分散の変化



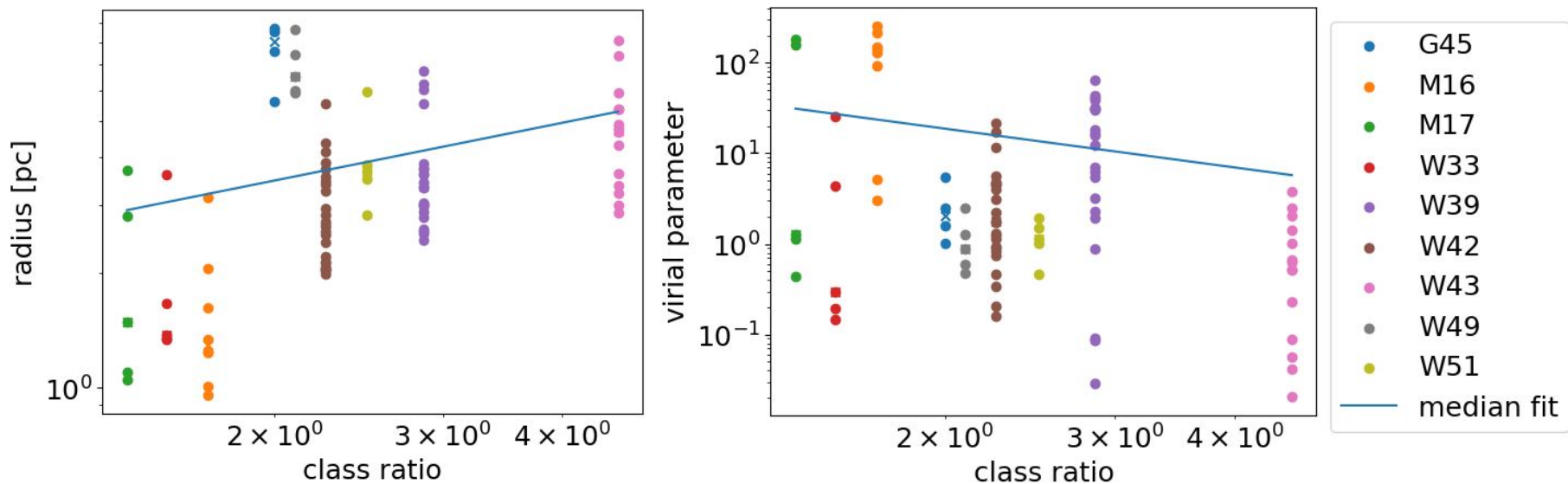
サイズ、質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)  
ビリアルパラメータ: 減少  
→ 重力的に束縛されながら、ガス同士が合体・収縮?

# Appendix. クラス比に対するトランクの物理量変化



近傍星団のクラス比を分子雲年齢としたときの物理量推移  
サイズ、質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)  
ビリアルパラメータ: 減少

# Appendix. クラス比に対する内部構造の物理量変化



近傍星団のクラス比を分子雲年齢としたときの物理量推移  
サイズ、質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)  
ビリアルパラメータ: 減少