

2020/10/22 天体形成研究会

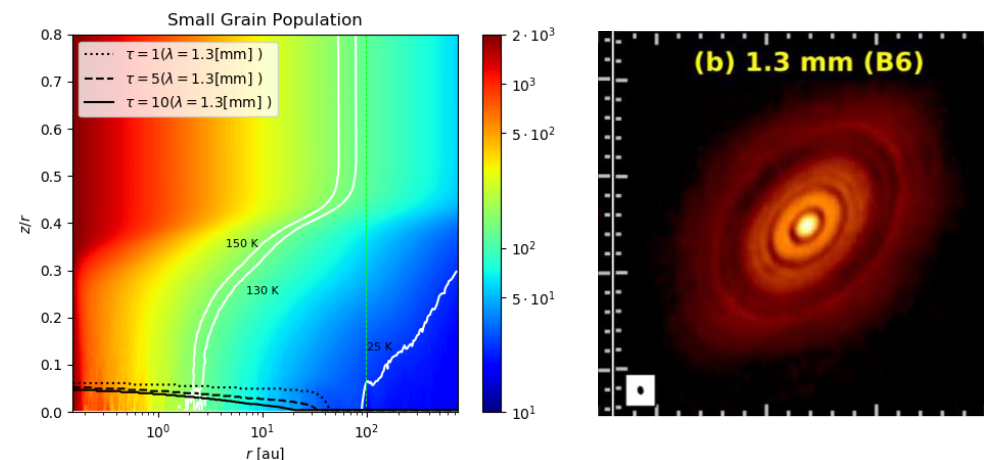
Fragmentation velocity of icy aggregates in
a planetesimal formation

東京工業大学
理学院 地球惑星科学系
中本研 M2 橋 拓海

軽く自己紹介

2016~2020 筑波大学 理工学群 物理学類

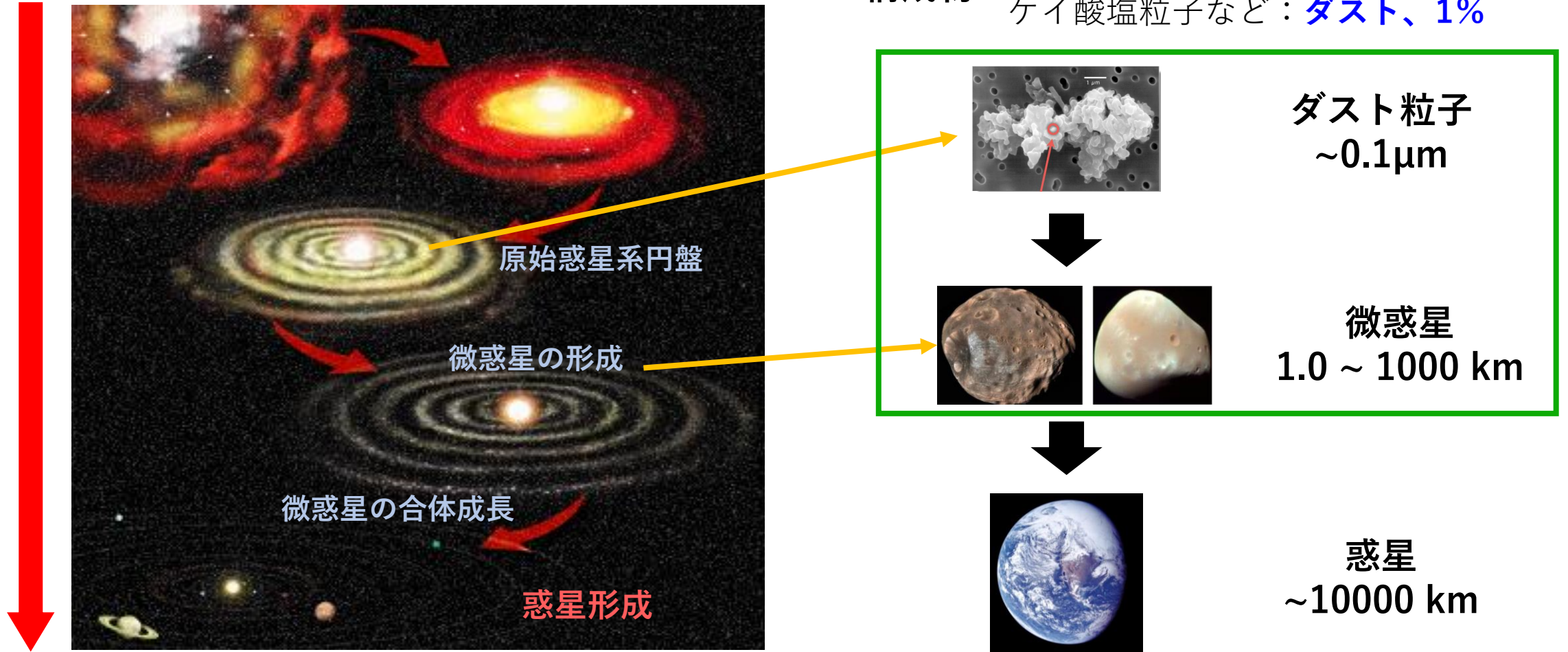
- ・ 4年次は宇宙理論研究室に所属。
- ・ 梅村雅之 先生、古家健次 先生(現 国立天文台)のもとで、原始惑星系円盤内における輻射輸送、温度構造などを研究。



2020~ 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 地球惑星科学コース 中本研

- ・ 中本泰史 先生のもとで研究。
- ・ 専ら惑星科学

惑星形成のシナリオ



☆ ダスト～微惑星～惑星までの間を埋める成長過程は未解決。

ダスト粒子～微惑星の成長過程

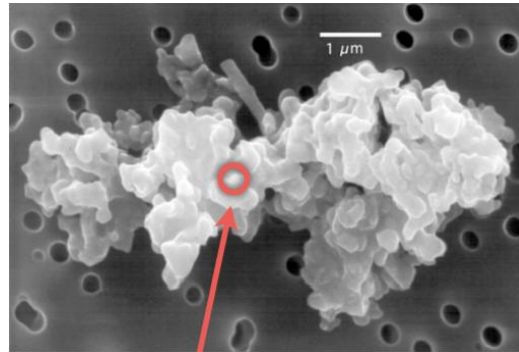
☆ ダスト粒子～微惑星までの成長過程は、様々な説が展開されている。

- ・ 重力不安定説 (Goldreich & Ward 1973 etc...)
- ・ ストリーミング不安定 (Johansen et al. 2007 etc...)

・ 直接合体成長説 (Weidenschilling 1977, Okuzumi et al. 2012 etc...)

モノマー
モノマー
ダスト粒子(モノマー)
～ 0.1 μm

合体
成長



アグリゲイト

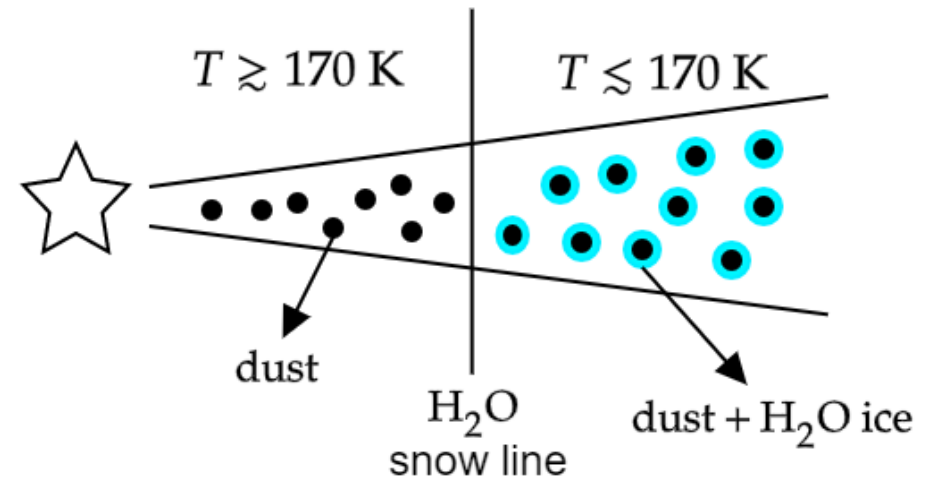
合体
成長



微惑星
1.0 ～ 1000 km

円盤のスノーラインとダストの状態

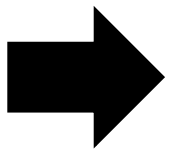
- ・ダストはケイ酸塩粒子を考える。
- ・Snowlineより外側の粒子は、周囲をH₂O氷がまとっている。



ケイ酸塩粒子に比べ、H₂O氷粒子は付着しやすく、合体成長が起こりやすい。

N-body Simulation ... Dominik & Tielens 1997

Experiment ... Gundlach et al. 2011, Gundlach & Bulm 2015



**Snowline外側の氷を纏ったダストやアグリゲイト
は成長しやすく、微惑星形成に大きく貢献！**

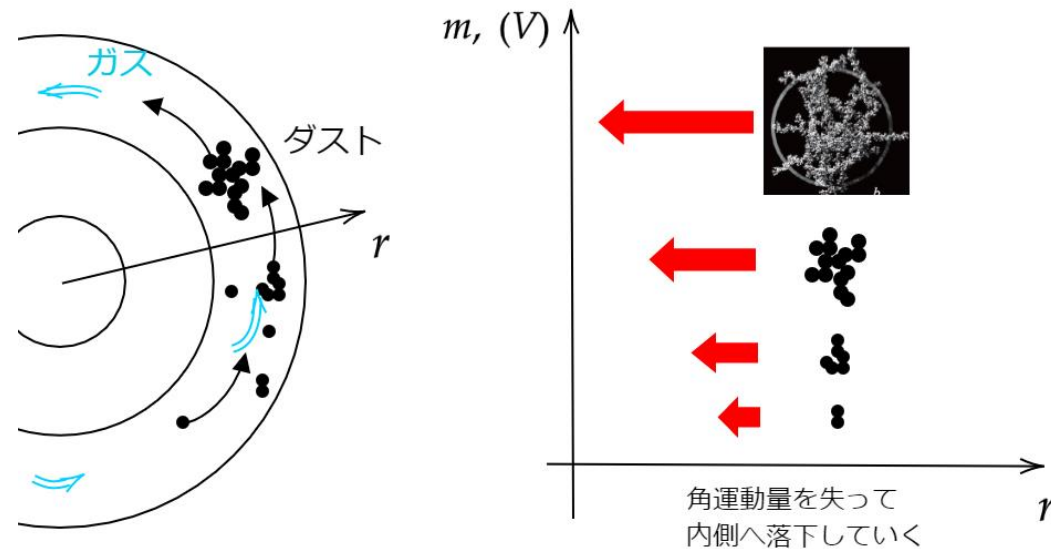
Okuzumi et al. 2012, Drazkowska & Alibert 2017 etc...

ダストが受けるガス抵抗

- ・成長が早ければ早いほど良いのか？

- ・ダストはガスよりも少し速く中心星の周りを回っている。

→ ダストはガスから向かい風(ガス抵抗)を受け、角速度を失って中心星方向に落下 + 表面積が大きい程向かい風の効果を受けやすい。



→ ガス抵抗により、ガスは半径方向に移動する。

合体成長と衝突破壊

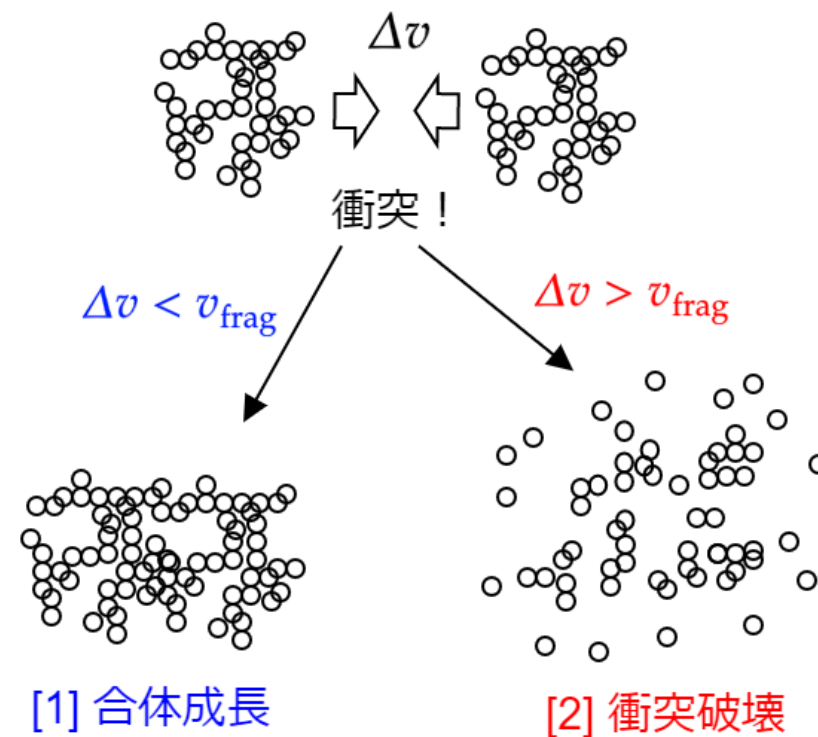
- ・ダストやアグリゲイトの**衝突**により、サイズや質量が変化し、微惑星ができる。

➡ **[1] 合体成長** or **[2] 衝突破壊**

[1] と **[2]** どちらが起こるの……？

- ・モノとモノどうしの**相対速度**(衝突速度) Δv
- ・**衝突破壊速度** (閾値) v_{frag}

➡ $\left\{ \begin{array}{l} \Delta v \text{ が } v_{\text{frag}} \text{ よりも小さい} : \text{合体成長} \\ \Delta v \text{ が } v_{\text{frag}} \text{ よりも大きい} : \text{衝突破壊} \end{array} \right.$



氷ダストの衝突破壊速度の研究

• N-body Simulation

Wada et al. 2009

氷アグリゲイトの衝突破壊速度を解析
多孔質な氷アグリゲイトの破壊に注目

$$v_{\text{frag}} = 35 \sim 70 \text{ m s}^{-1}$$



多孔質なアグリゲイト

• Laboratory Experiment

Gundlach & Bulm 2015

ミクロンサイズの氷ダストの衝突破壊速度
を実験で測定

$$v_{\text{frag}} \sim 9.6 \text{ m s}^{-1}$$

Musiolik & Bulm 2019

氷ダストの付着力を低音環境で測定
200K → 175Kで大幅に表面エネルギーが減少

$$v_{\text{frag}} < 9.6 \text{ m s}^{-1} \text{ の可能性あり}$$

★ 衝突破壊速度の実際の値は未解明(不定性を持つ)。

円盤のシミュレーションの立場から、この議論に一石を投じたい。

今回のシミュレーション

★ 円盤の進化と、氷ダストの成長を同時に計算する。

- ・ 円盤半径方向 + 質量座標の2次元シミュレーション
- ・ 円盤は軸対称。空間的な物理量はz方向に積分。

★ 円盤形成初期、定常期におけるダストの合体成長と衝突破壊を計算。

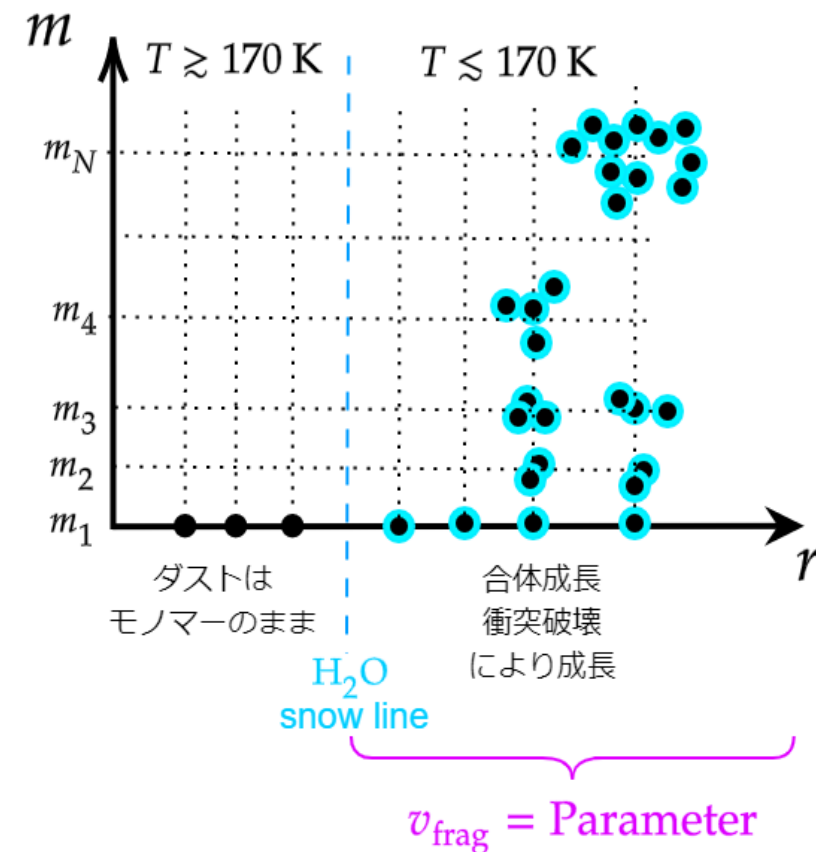


★ Snowline外側の衝突破壊速度 v_{frag} をパラメータとして変化させ、様々な値で計算を行う。

$$v_{\text{frag}} = 50, 20, 10, 5 \dots \text{m s}^{-1}$$



★ 各 v_{frag} について、Snowlineのダストのフラックスを調べる。



ダストのフラックスを調査する意義

☆ 隕石の同位体分析から、太陽系は**内側**と**外側**に二分化できる。

- ・ 様々な研究に於いて、その二分性を実現するためのシナリオを考察。

- ・ snow line付近に巨大なエンブリオを早期に作ることで、snowline を超える内向きのフラックスの流れを止める。(Chambers 2021) etc...



☆ 太陽系の内側と外側の二分性を説明するために、snow lineにおけるダストのフラックスは重要。



[1] v_{frag} に対するフラックスの変化を調べる。

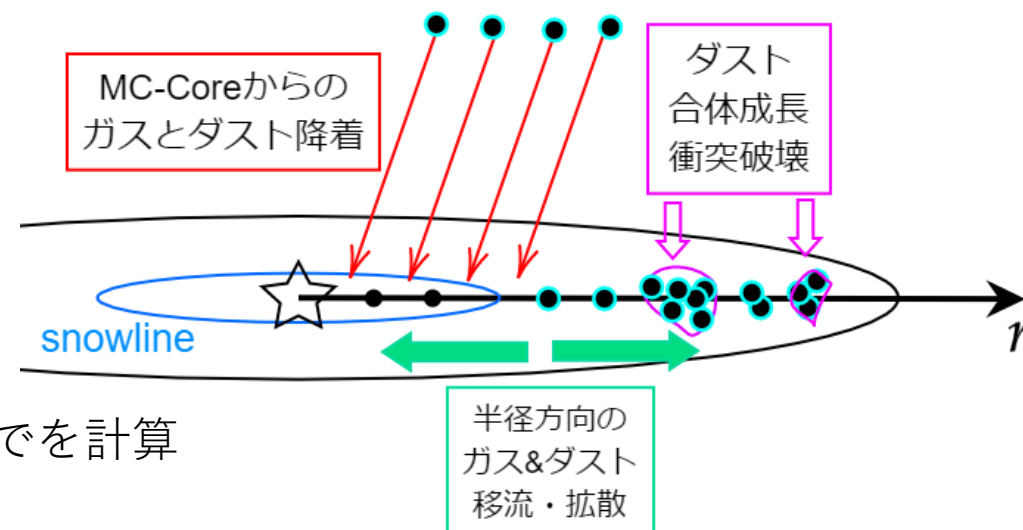
[2] 太陽系の二分性を再現するようなフラックスとそれを生み出す v_{frag} を得ることが出来れば、シミュレーションの立場から、相応しい衝突破壊速度の値を提案することができる。

使用する合体成長モデル

Homma & Nakamoto 2018

- ・ 太陽系のもととなる円盤のシミュレーション
(MC-Coreからの降着総質量は M_{\odot})

- ・ 円盤形成初期～MC-Coreからの降着完了～200万年までを計算



[1] 円盤ガス進化

- ・ 円盤ガスの粘性進化 + MC-Coreからの降着
$$\frac{\partial \Sigma_g(r)}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_g(r) r v_g(r)) + S_g(r)$$

[2] 円盤の温度構造(赤道面)

- ・ 粘性加熱 + MC-Coreからの温度の寄与

$$\sigma T^4 = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{8} \tau_R + \frac{1}{2 \tau_P} \right) \dot{E}_v + \sigma T_{cd}^4$$

[3] ダスト進化

- ・ 多孔性を伴う多孔質な合体成長 + 衝突圧縮 + 自己重力による静的な圧縮
- ・ ガスの進化に伴う移流拡散 + MC-Coreからの降着



多孔質なアグリゲイト

$$\frac{\partial \mathcal{N}(r, m)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^m K(r, m', m - m') \mathcal{N}(r, m') \mathcal{N}(r, m - m') dm' - \mathcal{N}(r, m) \int_0^\infty K(r, m, m') \mathcal{N}(r, m') dm'$$

使用する衝突破壊モデル

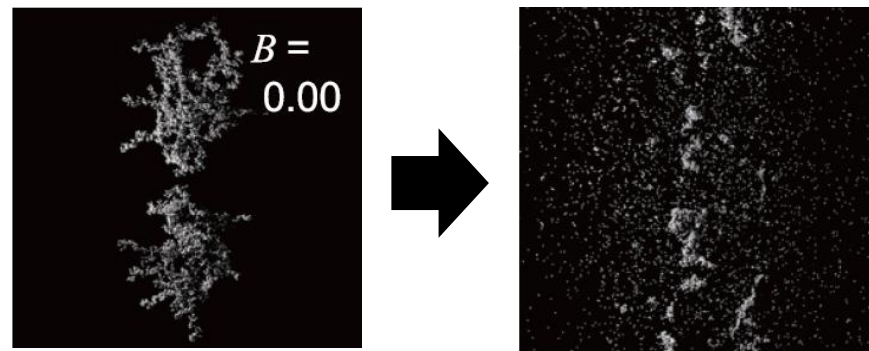
Birnstiel et al. 2011

[1] 生成される破片の数密度

$$\mathcal{N}_{\text{frag}}(m)dm \propto m^{-11/6}dm$$

※ 様々な質量の破片が出てくる。

Homma & Nakamoto 2018の計算コードに、
Birnstielの衝突破壊モデルを組み込む。



※多孔質アグリゲートの破片は、様々な質量の“ユニット”が放出される。

Wada et al. 2009

$$\Delta v = (\text{空間的な移流速度} + \text{乱流速度} + \text{ブラウン運動速度}) \gtrsim v_{\text{frag}}$$

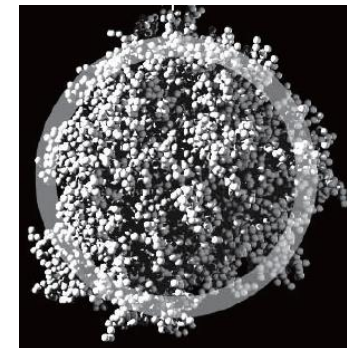
Okuzumi et al. 2011

テスト計算

★ Birnstiel et al. 2011を再現

- ・ 設定

- ・ $r = 1 \text{ AU}$ におけるダスト合体成長・衝突破壊をシミュレーション



考えるアグリゲイト

- ・ アグリゲイトは多孔性を持たず、十分に凝縮して進化(内部密度がモノマーのまま変化せずに成長)する場合を考える。

- ・ 衝突速度： $\Delta v = (\text{空間的な移流速度} + \text{乱流速度} + \text{ブラウン運動速度}) \gtrsim v_{\text{frag}}$

テスト計算の結果

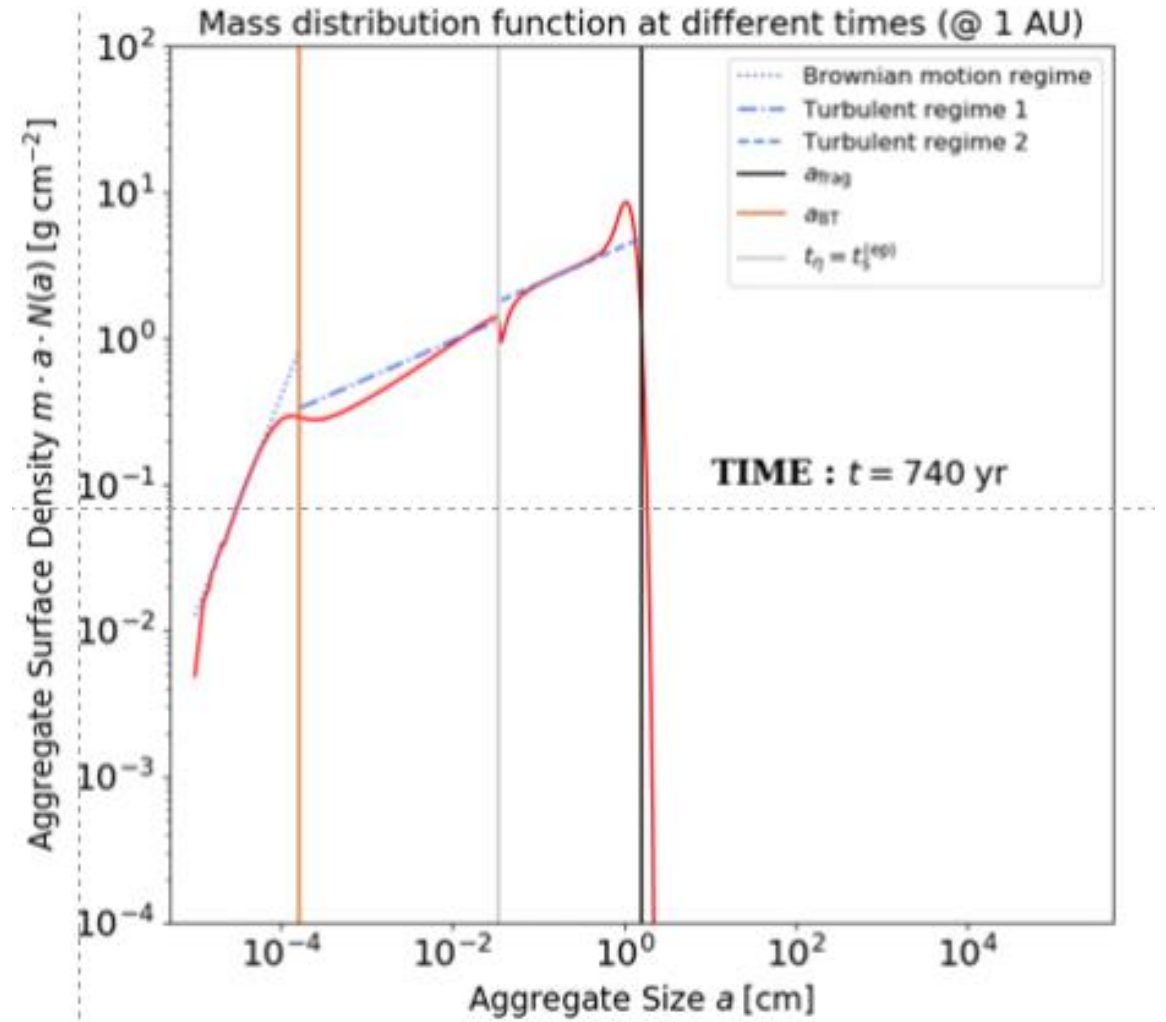
- ・ およそ700 yrで平衡状態に達する。
- ・ **青線**はBirnstielが理論的に導出した平衡状態の場合のふるまい
- ・ **黒縦線**は最大アグリゲイトサイズ

$$a_{\text{frag}} = \left(\frac{1}{1.5} \right)^2 \frac{2}{\pi} \frac{\Sigma_g}{\alpha_t \rho_{\text{int},0}} \frac{v_{\text{frag}}^2}{c_s^2}$$



- ・ テスト計算がうまくいった。

$$\Delta v = (\text{空間的な移流速度} + \text{乱流速度} + \text{ブラウン運動速度}) \gtrsim v_{\text{frag}}$$



本計算

[1] 初期設定

- ・モノマーサイズ： $0.1 \mu\text{m}$
- ・モノマー内部密度： 3.0 g cm^{-3}

[2] パラメータ

- ・MC-Core温度： 15 K
- ・MC-Core回転角速度： $2 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$
- ・乱流パラメータ： $\alpha_{\text{turb}} = 10^{-3}$

- ・衝突破壊速度 $v_{\text{frag}} = 10 \text{ m s}^{-1}$

[3] 合体成長

- ・多孔性を伴う多孔質な合体成長 (Okuzumi et al. 2009)
- ・衝突圧縮 (Okuzumi et al. 2012)
- ・自己重力による静的な圧縮 (Kataoka et al. 2013)

[4] 衝突破壊

- ・Birnstiel et al. 2011のモデルを使用

[5] 座標軸

$$0.1 \text{ AU} < r < 1.0 \times 10^3 \text{ AU} , N_r = 250$$

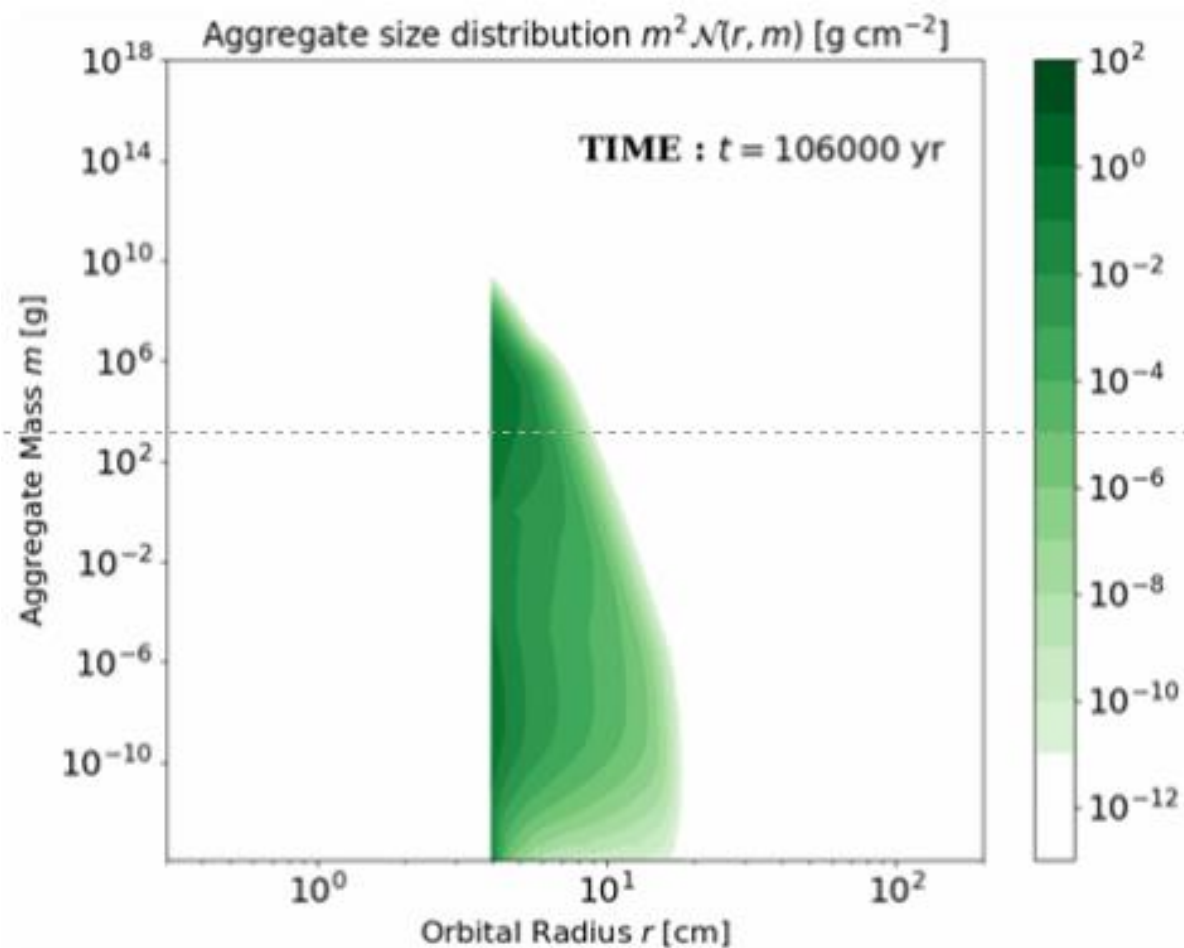
$$0 \text{ g} < m < 10^{20} \text{ g} , N_m = 400$$



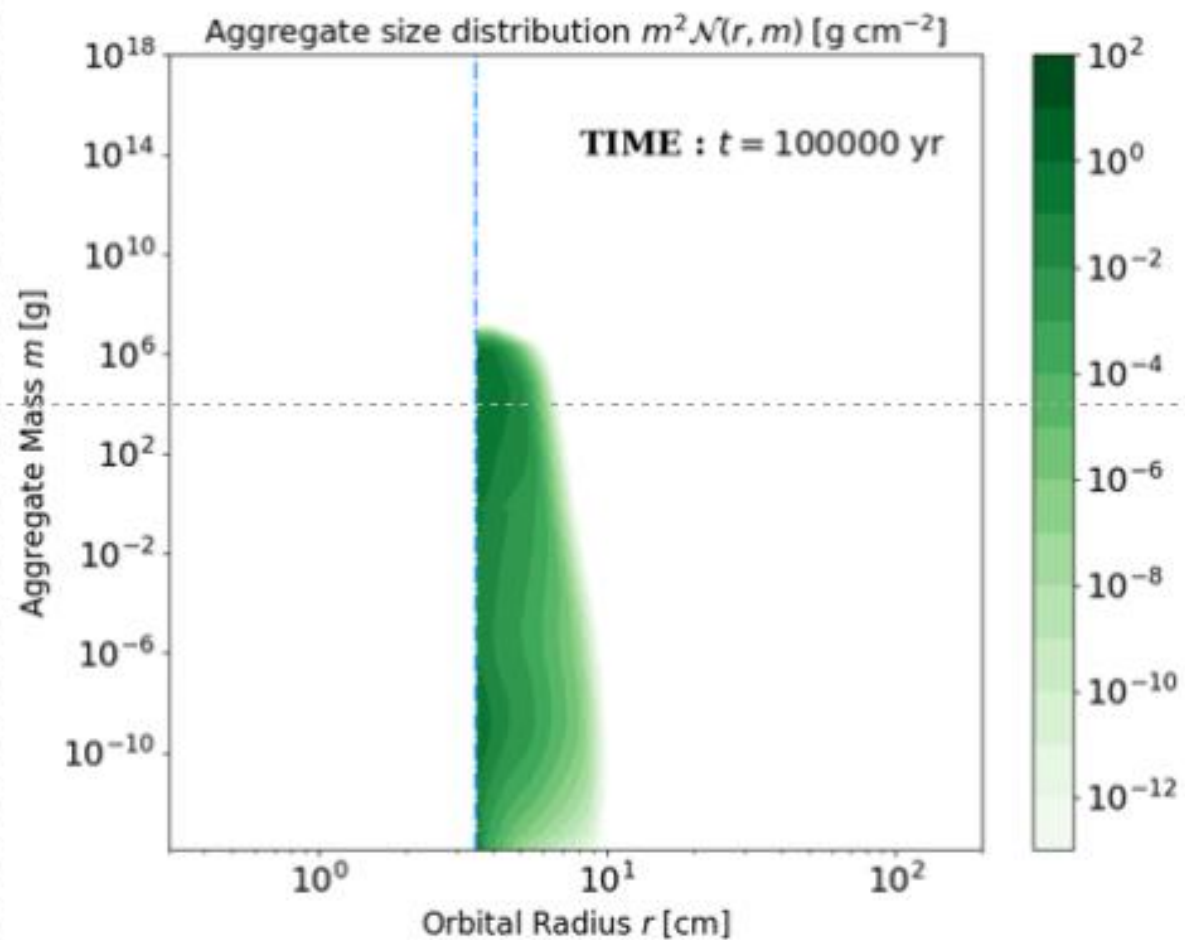
考えるアグリゲイト

速報結果 1

HN18のコードそのまま

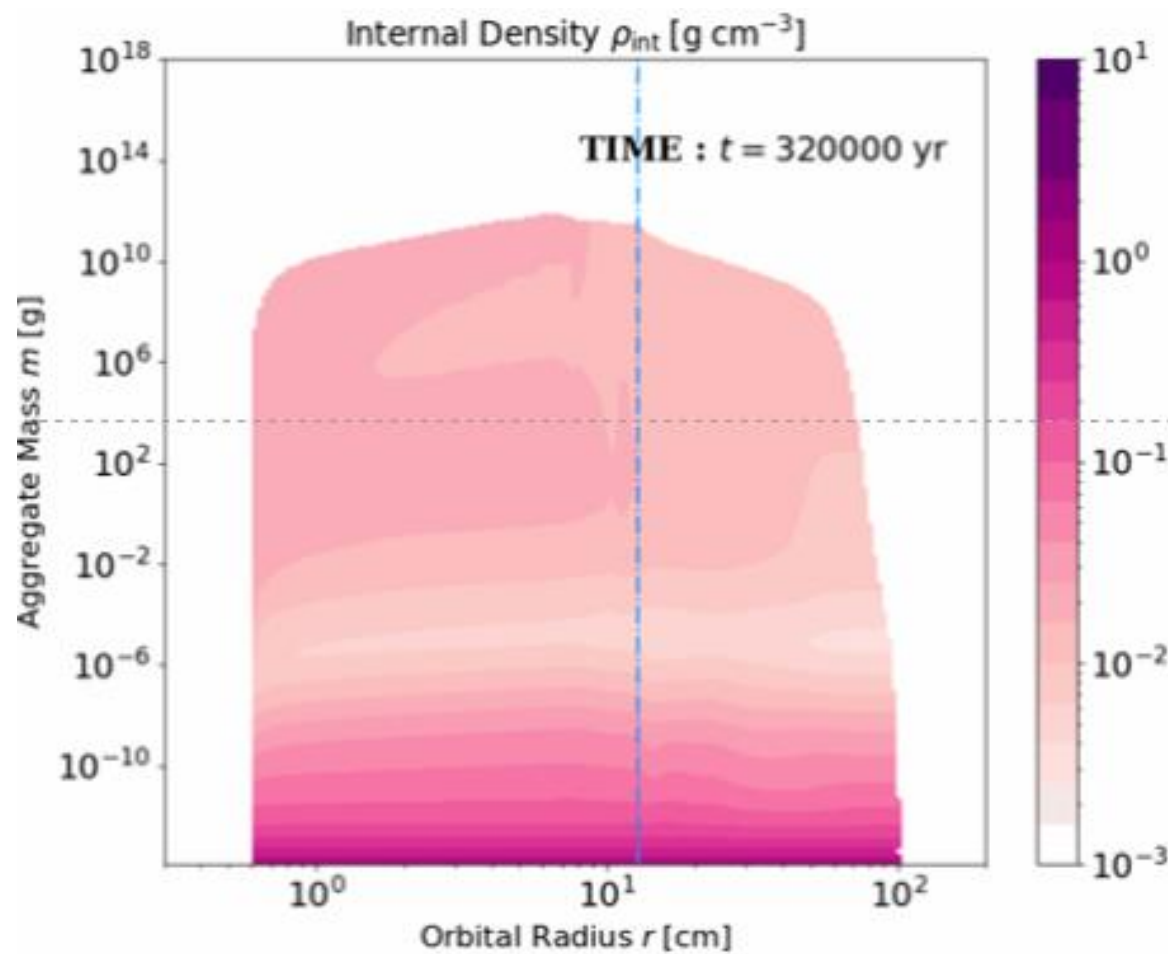


衝突破壊を入れた場合

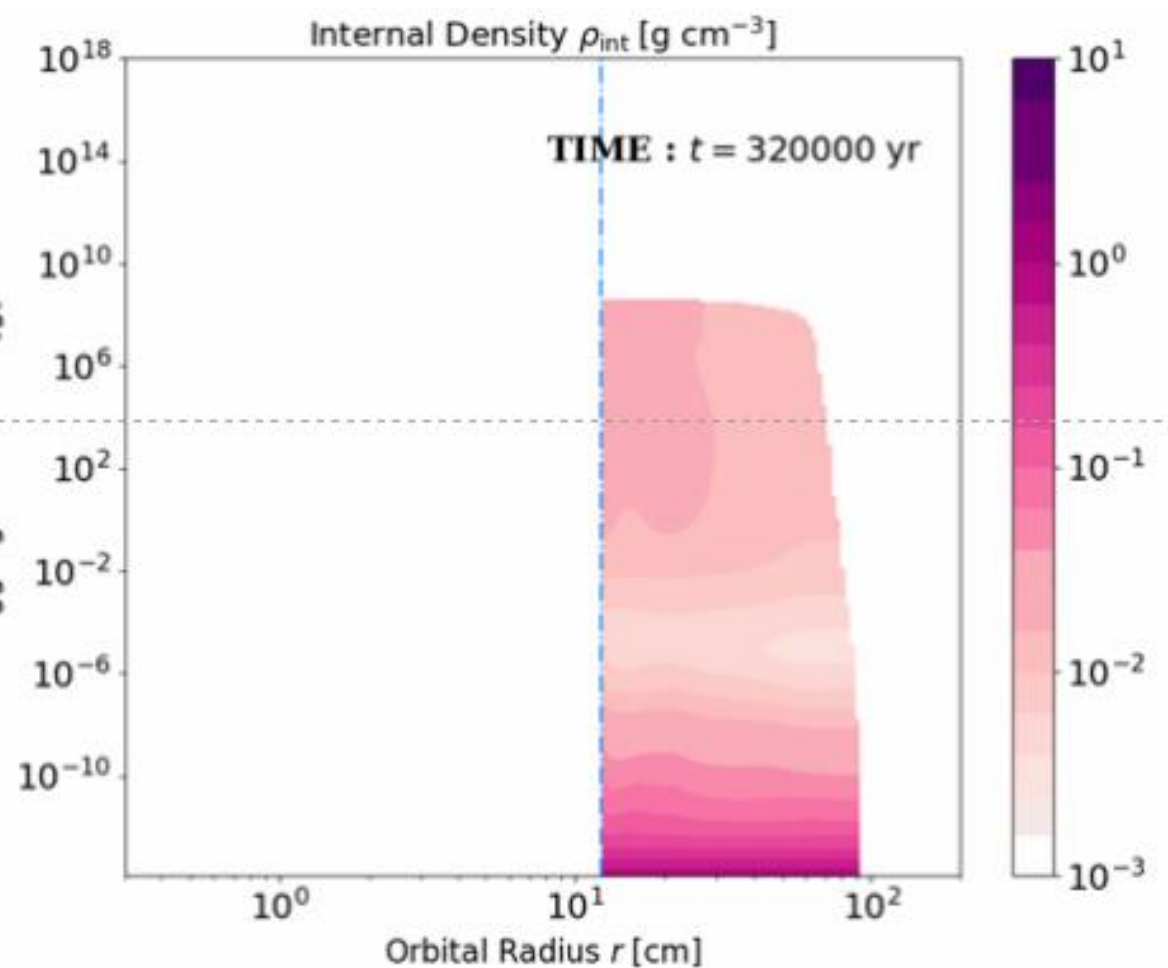


速報結果 2

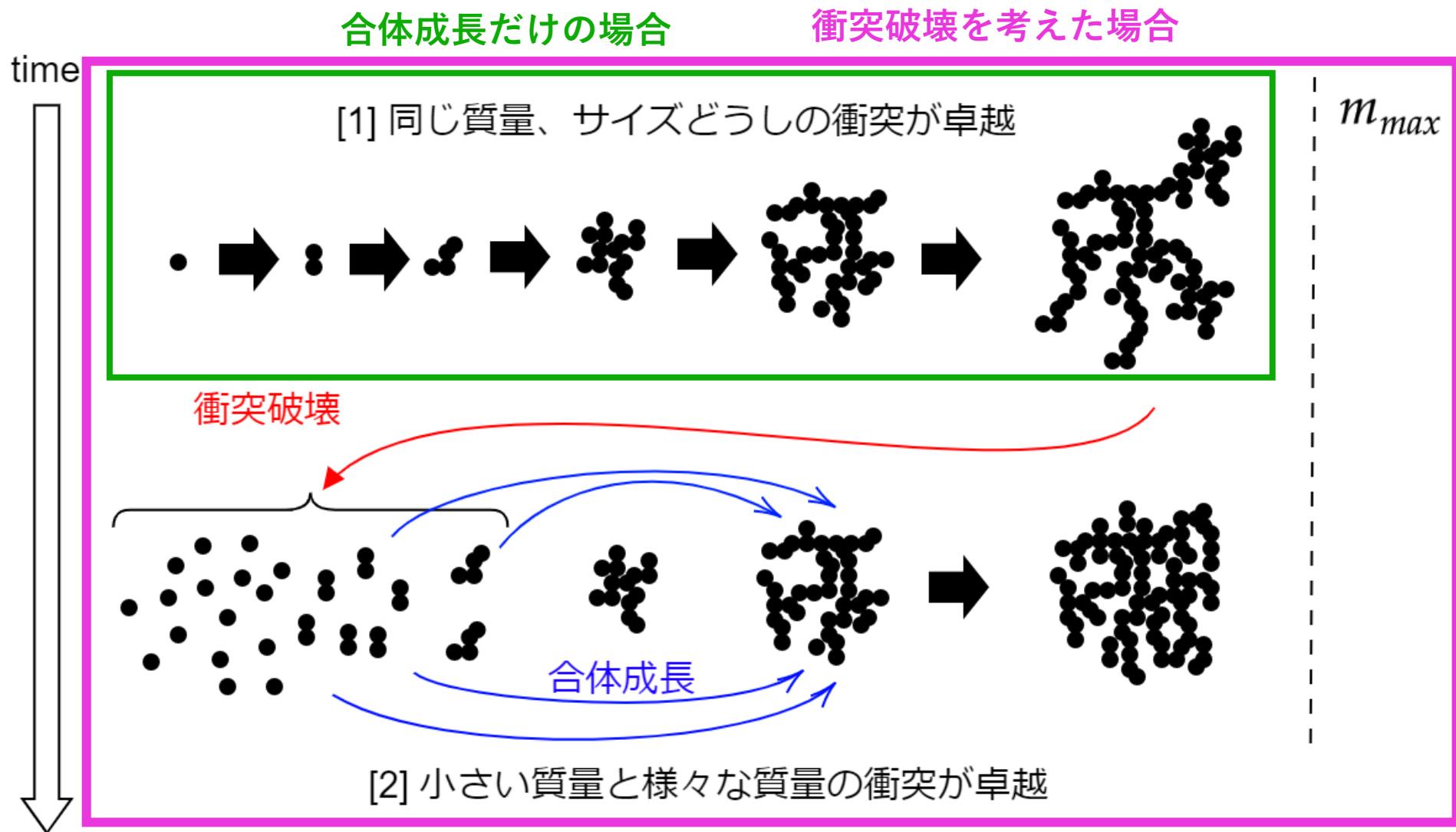
HN18のコードそのまま



衝突破壊を入れた場合



速報結果 3



まとめ

- ☆ 衝突破壊速度の値は判然としない為、シミュレーションの立場から議論に一石を投じたい。
- ☆ 原始惑星系円盤内の氷ダストの合体成長・衝突破壊をシミュレーション。
衝突破壊速度をパラメータとして変化させる。
- ☆ 太陽系の観測結果を再現するようなシミュレーションが出来れば、その値が衝突破壊速度の目安として提案することができる。
- ☆ シミュレーションのコード開発が完了したので、計算を進めて、結果を逐次解析していく。
 - ダストのフラックスと、衝突破壊速度の関係性を導く。

以

上

補足1 円盤の粘性進化

[1] 円盤ガスはケプラー角速度に従う角速度で回転。

→ 円盤外側の方が速い

$$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_\odot}{r}}$$

[2] 円盤は強い乱流状態にある。

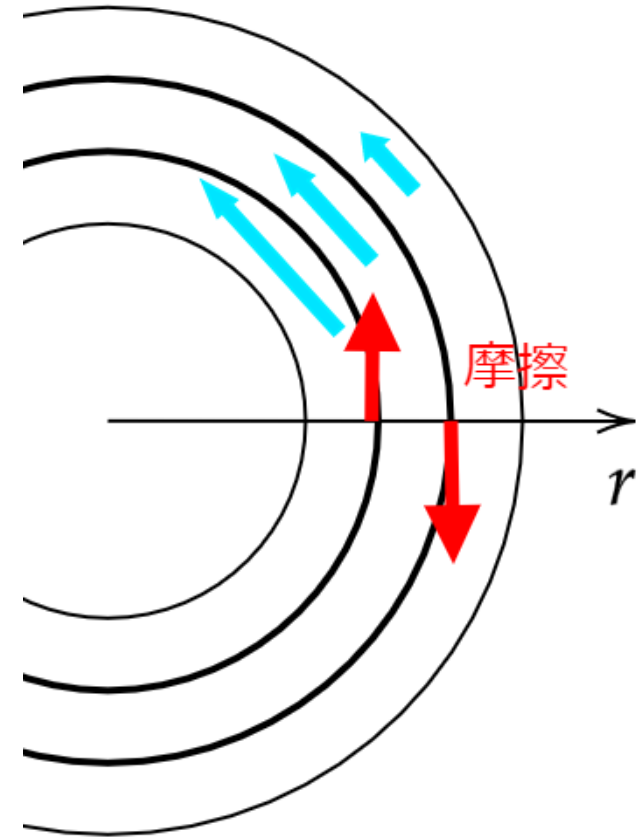
→ 円盤ガスは乱流を起源とする**粘性**を持つ。

☆ ガスの速度差により、摩擦が生じる。



☆ 粘性により円盤ガスにトルクが生じ、角運動量が変化する。

→ 角速度が変化すると、円盤ガスは半径方向に移動する。

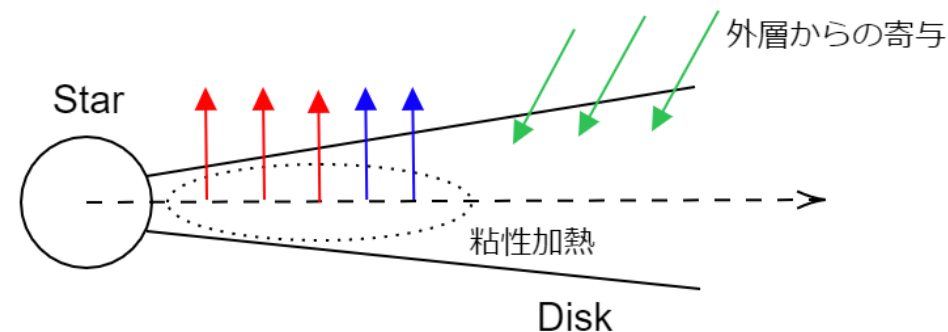


補足2 円盤の温度構造

・ Homma & Nakamoto 2018で考える円盤の温度構造

- ・ 円盤内側へのガス輸送によるポテンシャル低下に伴う熱エネルギーの放射 (粘性加熱)
- ・ 外層からの放射 (MC-Coreの温度寄与)

$$\begin{aligned}\sigma T_{\text{mid}}^4 &= \frac{1}{2} \left(\frac{3}{8} \tau_{\text{R}} + \frac{1}{2\tau_{\text{P}}} \right) \dot{E}_{\text{v}} + \sigma T_{\text{cd}}^4 \\ &= \boxed{\frac{3}{16} \tau_{\text{R}} \dot{E}_{\text{v}}} + \boxed{\frac{1}{4\tau_{\text{P}}} \dot{E}_{\text{v}}} + \boxed{\sigma T_{\text{cd}}^4}\end{aligned}$$



… 円盤の光学的に厚い極限での粘性加熱による熱放射



… 円盤の光学的に薄い極限での粘性加熱による熱放射



… MC-Coreからの放射による寄与

Homma & Nakamoto 2018 – 補足

- 円盤ガス進化 e.g. Nakamoto & Nakagawa 1994

$$\frac{\partial \Sigma_g(r)}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_g(r) r v_g(r)) + \boxed{S_g(r)} \longrightarrow \text{Shu 1977のMC-Core崩壊モデル}$$

$$\alpha_t = 10^{-3} \quad \text{円盤内の乱流の強さ}$$

- ダスト進化

[a] ダスト面密度

$$\frac{\partial \Sigma_d(r, m)}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(F_{\text{adv}} + F_{\text{diff}})] + S_d(r, m)$$

[d] モノマーサイズ

$$a_0 = 0.1 \mu\text{m}$$

[b] 合体成長 e.g. Okuzumi et al. 2009, 2012

$$\frac{\partial \mathcal{N}(r, m)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^m K(r, m', m - m') \mathcal{N}(r, m') \mathcal{N}(r, m - m') dm' - \mathcal{N}(r, m) \int_0^\infty K(r, m, m') \mathcal{N}(r, m') dm'$$

[c] 内部密度の進化

多孔性合体成長 (Okuzumi et al. 2009) + 衝突圧縮 (Okuzumi et al. 2012)
+ 静的な圧縮 (Kataoka et al. 2013)

Brauer et al. 2008 – 補足

- ・ 生成される破片の数密度

$$\mathcal{N}_{\text{frag}}(m)dm \propto m^{-1.83}dm$$

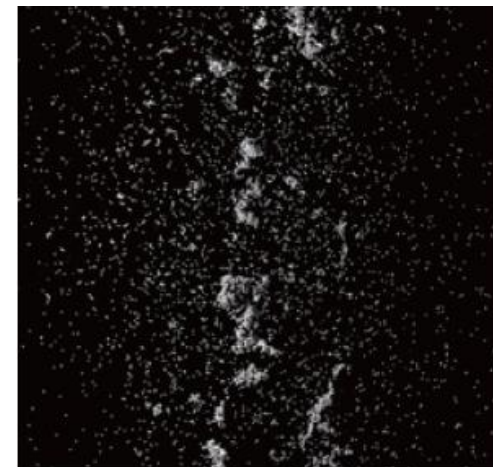
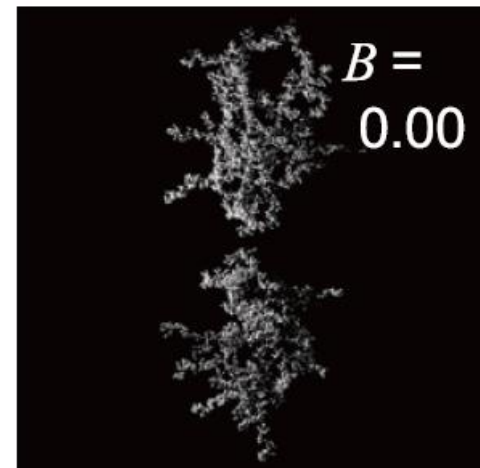
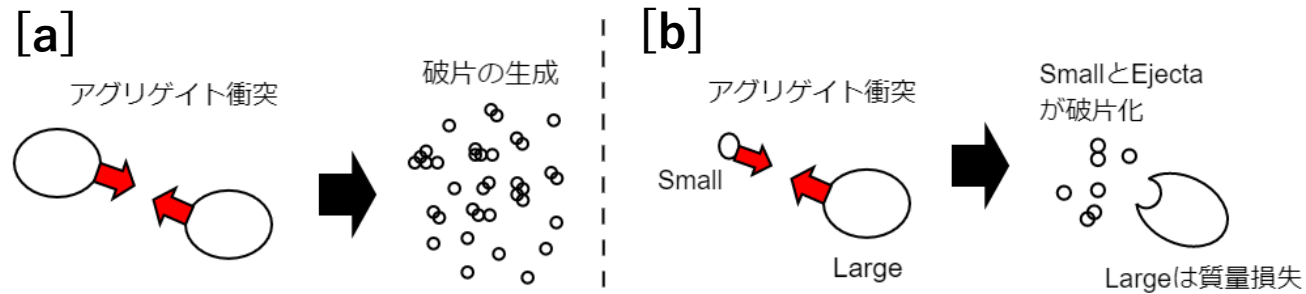
- ・ 衝突破壊は2種類

[a] 質量が近いもののどうしの衝突破壊

[b] 質量が大幅に異なるもの同士の衝突



- ・ モノマーのみの放出を考えるよりも Realistic。
- ・ 多孔質のアグリゲイト破壊では、色々な質量のユニットが破片として生成される。



Wada et al. 2009

補足 5 氷ダストの付着力

☆ 行われている実験の数々

[1] 実際に氷ダストの衝突を起こして、その振る舞いを見る。

• Gundlach et al. 2015 etc...

[2] 氷ダストの付着力を測定する。

• Gundlach et al. 2011

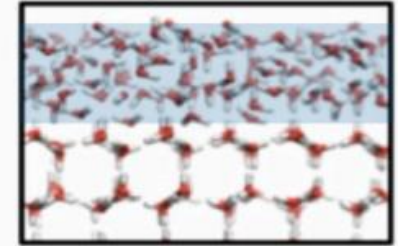
• Musiolik & Wurm 2019 etc...

[3] N体シミュレーション

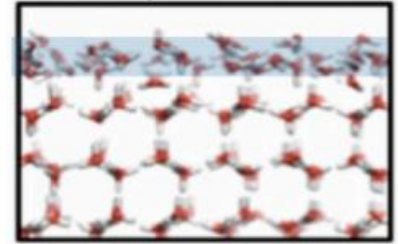
• Dominik & Tielens 1997

• Wada et al. 2009 etc...

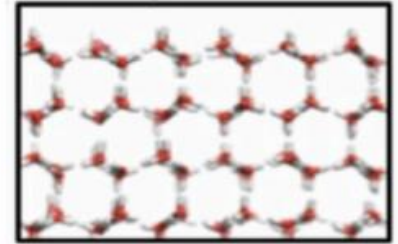
Temp = 257 K



Temp = 200 K

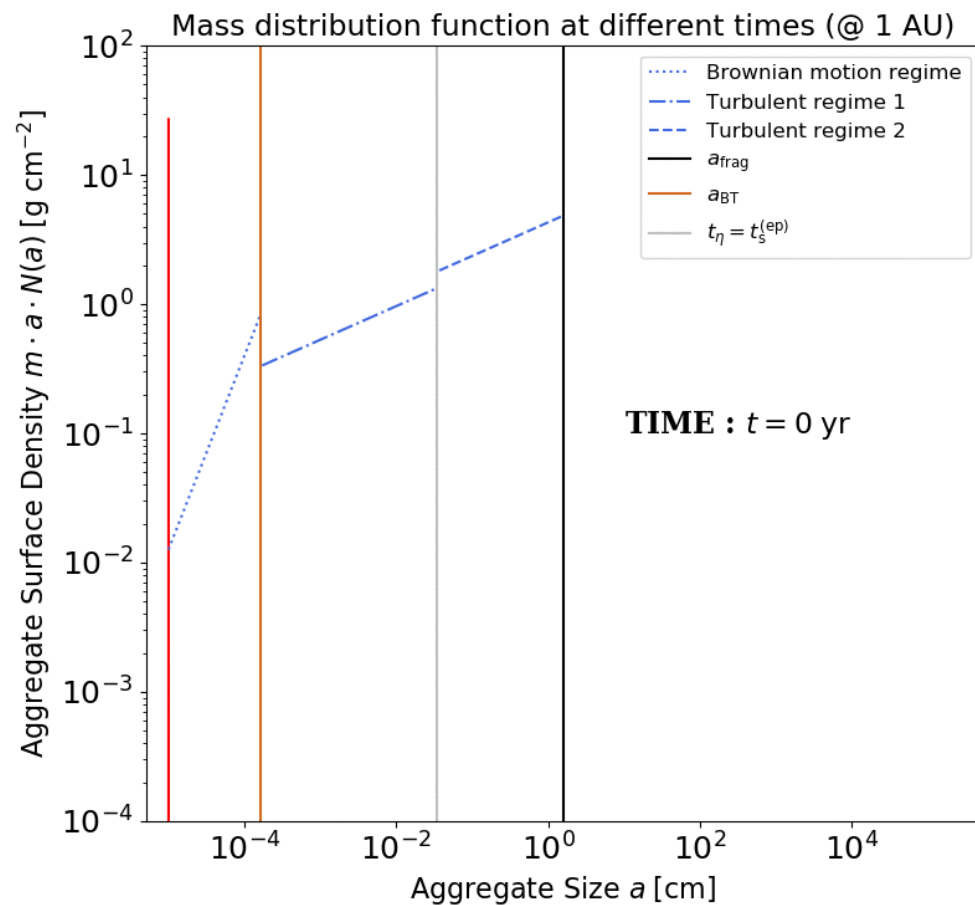


Temp < 200 K

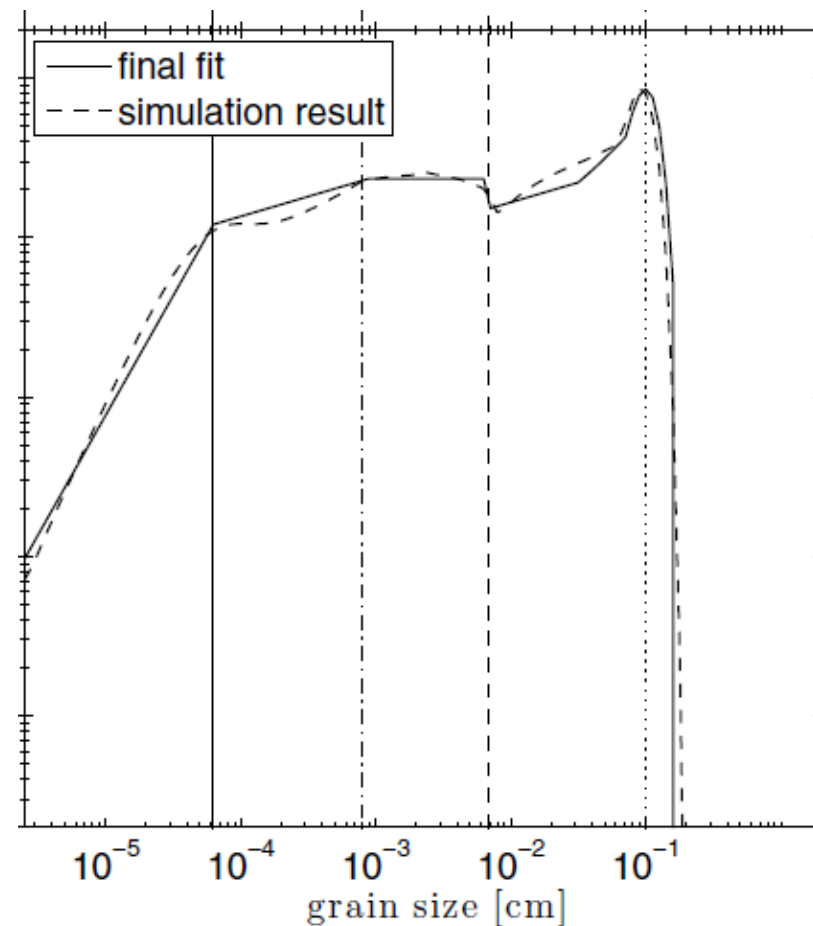


補足 6 BirnstielのFitについて

テスト計算の結果



Birnstiel et al. 2011のFitting



衝突速度の内訳

- **Collision velocity(衝突速度) Δv**

$$\Delta v = \sqrt{(\Delta v_B)^2 + (\Delta v_{d,r})^2 + (\Delta v_{d,\phi})^2 + (\Delta v_{d,z})^2 + (\Delta v_t)^2}$$

★ Okuzumi et al. 2012 より,

★ 与式の各項は, 様々なRelative Velocity.

$$\Delta v_B = \sqrt{\frac{8k_B T_{\text{mid}}}{\pi} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \quad (\text{ブラウン運動})$$

$$\Delta v_t = (\text{Relative velocity caused by Gas turbulence : Ormel \& Cuzzi 2007})$$

使用する衝突破壊モデル

[Birnstiel et al. 2011](#)

[1] 生成される破片の数密度

$$\mathcal{N}_{\text{frag}}(m)dm \propto m^{-11/6}dm$$

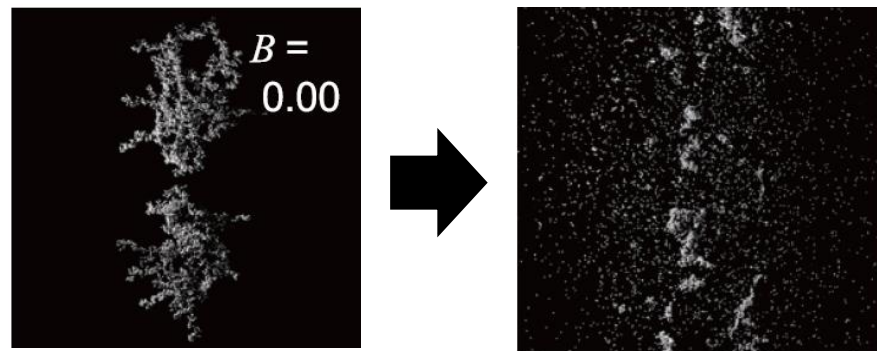
※ 様々な質量の破片が出てくる。

[2] 衝突破壊は2種類

[a] 質量が近いものどうしの衝突破壊

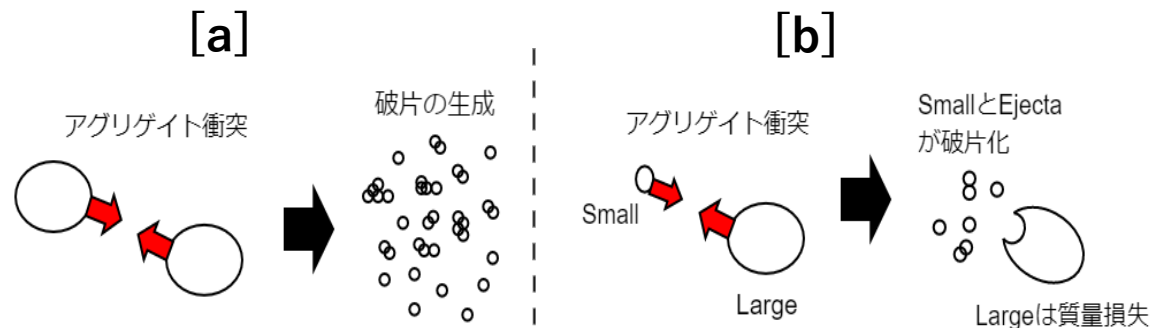
[b] 質量が大幅に異なるもの同士の衝突

Homma & Nakamoto 2018の計算コードに、**Birnstiel**の衝突破壊モデルを組み込む。



※ Fluffyアグリゲートの破片は、様々な質量の“ユニット”が放出される。

Wada et al. 2009



$$\Delta v = (\text{空間的な移流速度} + \text{乱流速度} + \text{ブラウン運動速度}) \gtrsim v_{\text{frag}}$$