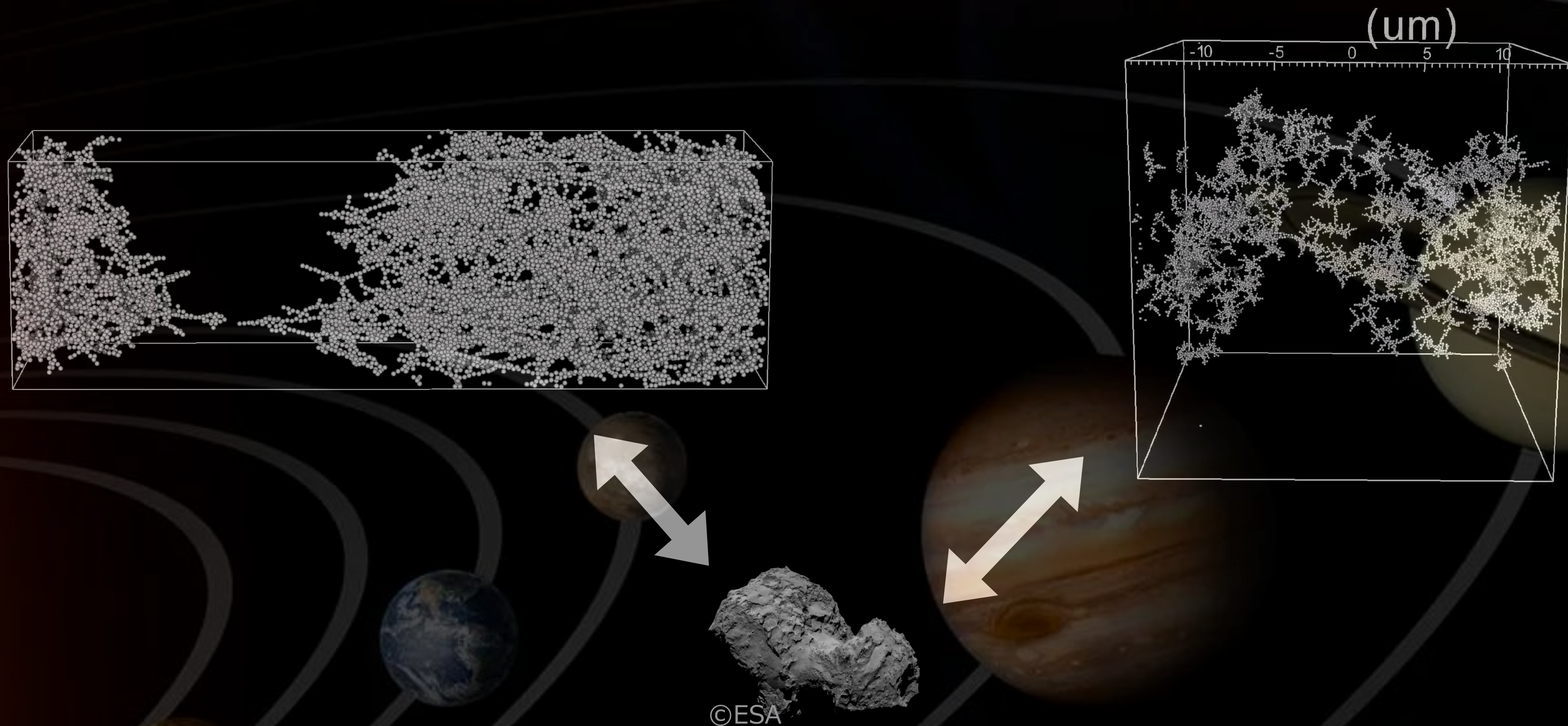


# 惑星の作り方 ～ふわふわ成長理論～



©ESA

理化学研究所 数理創造プログラム 辰馬 未沙子

# 自己紹介

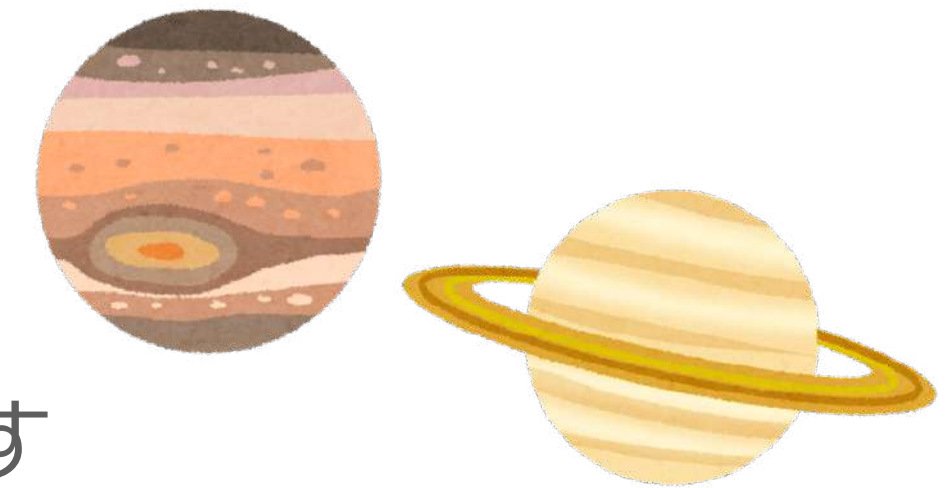
- 名前: 辰馬 未沙子 (たつうま みさこ)
- 専門: 惑星形成論 (天文学/惑星科学)
- 経歴:
  - 生まれ: 岩手県釜石市 (母の実家)
  - 幼稚園: 東京都 → 京都府 (父の仕事の都合で転園)
  - 小学校: 京都府の公立
  - 中学校: 京都府 → 東京都の公立 (父の仕事の都合で転校)
  - 高校: 都立西高等学校
  - 大学・大学院: 東京大学 (理科一類 → 理学部天文学科 → 理学系研究科天文学専攻)
    - 修士課程で結婚 → 博士課程で2人の子供 (現在5歳と2歳) を出産
  - 研究者: 東京工業大学 (2022-2023, 学振特別研究員) → 理化学研究所 (2023-, 研究員)



# なぜ理系？惑星形成論？博士課程進学？

---

- 小中高時代：理系を選択するも、詳細は決めず
  - 小さい頃から物事を理屈で考えることが好き → 高校2年生のとき理系を選択
  - 物理は好きだが、理学・工学の中で何をやりたいかはわからない  
→ 入学後2年次に学部学科を決められる東京大学を受験
  - **女性である私が理系や東京大学を選択したことに対して、親や周囲からの反対はなく、応援してもらえた**
- 大学学部生時代：惑星形成論との出会い
  - 学部1年のとき、小久保英一郎 教授 (国立天文台) の惑星形成論の授業を受け、  
遠いと思っていた宇宙が簡単な式で表現できることに感動し、惑星形成研究を志す
- 修士課程時代：現在の研究テーマ & 人生のパートナーとの出会い
  - 修士論文執筆の少し前、夫 (惑星形成の研究者) と出会い、今の研究テーマに取り組み始める
  - やっとやりたい研究テーマに出会えたので、まだ研究がしたいと思い、博士課程へ進学



# なぜ研究者？なぜ学生出産？

- 博士課程時代 (25-29歳): 研究者になることを決意 → 子供を産むタイミングを考える
  - 夫を見ていて、私も研究者を目指そうと思うようになる
  - 私は子供の有無についてどちらでもよかったが、夫が子供好きで育児をしてくれそう → 子供を産むことを決意
  - いつ子供を産むか？ → 夫は6歳上 (当時31歳) なので早いほうがいいかも？私が学生のうちに？
- 妊娠・出産のタイミングについての個人的考え
  - 研究者のキャリア: 卒業後、ポスドクとしていくつかの職を転々と移り、無期雇用の研究職に就く  
→ ポスドクになってからの就業場所や契約の期間 (典型的には2-3年) はまだわからない
  - **そもそも、子供は生まれてほしいときに生まれるとは限らない**  
→ **ライフプランなんて、とてもじゃないけど立てられない**
  - 「子供をいつ産もう……」と悩みながら決断を先延ばしにして過ごすのは、私の性格に合わない
  - じゃあ、環境の整っている今、学生のうちに、産みきってしまおう！
    - 託児面: 研究室のある国立天文台には保育施設があり、学生でも年度途中でも預けられ、いつでも復帰できる
    - 金銭面: 無期雇用の研究者である夫の安定した収入があるので、不安はない



# 思っていたよりも大変だった、妊娠・育児と研究の両立

---

- 妊娠と研究の両立

- **つわりが非常に重かった** (点滴、1週間の入院、学会発表キャンセル、2ヶ月間寝たきり)
- 体に何が起こるかわからないため、**妊娠中は長距離出張に行けない**

- 産後の育児と研究の両立

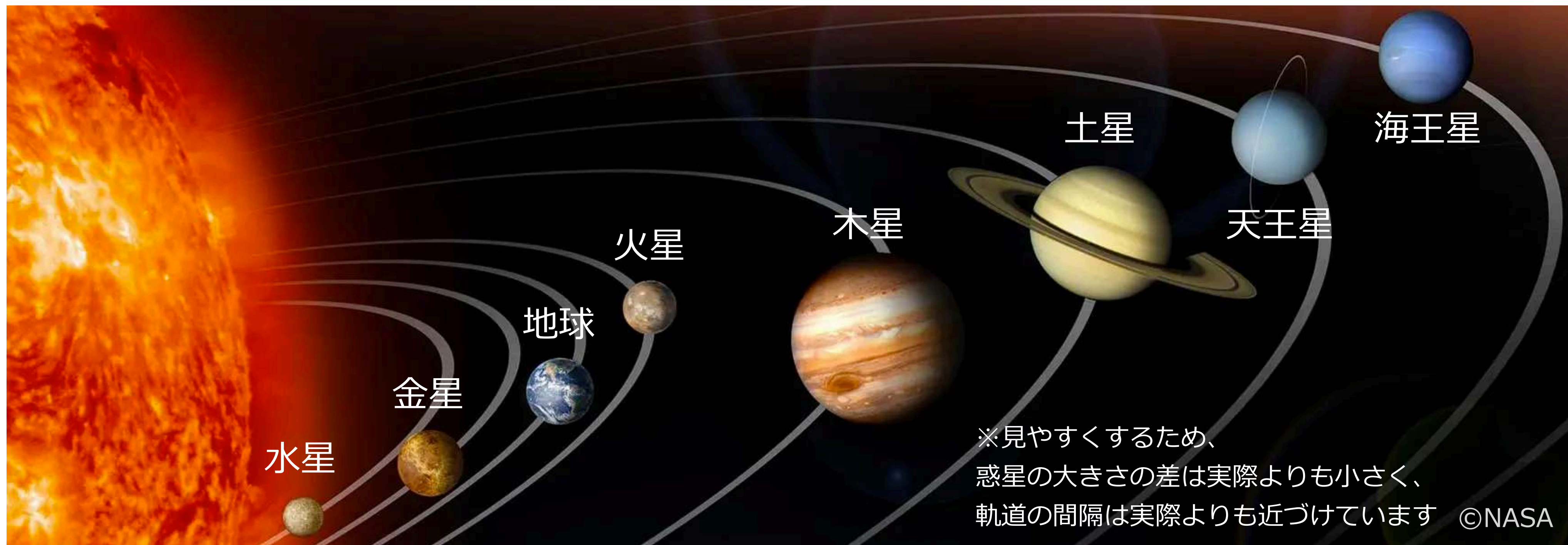
- 出産前後は第一子、第二子とも半年間ずつ休学
- 復帰のときは、国立天文台の保育ルームに子供を預けた (現在は自宅近くの保育園)
- 母乳育児中、**子供と離れての出張 = 乳腺炎の恐怖**
  - 母乳を与え続けないと、胸が張って固くなり非常に痛くなる
- **子連れ出張は検討したが、親子共に負担が大きいだらうと断念**
- 日々の生活は子供が保育園に行く時間で制限され、さらによく熱を出して休むため、**研究時間を思うように取れない**

それでも、子供はとても可愛く、子供の成長を感じる瞬間は他の何にも代えがたい

# 惑星形成とその問題

# 惑星とは？ —2006年国際天文学連合での惑星の再定義—

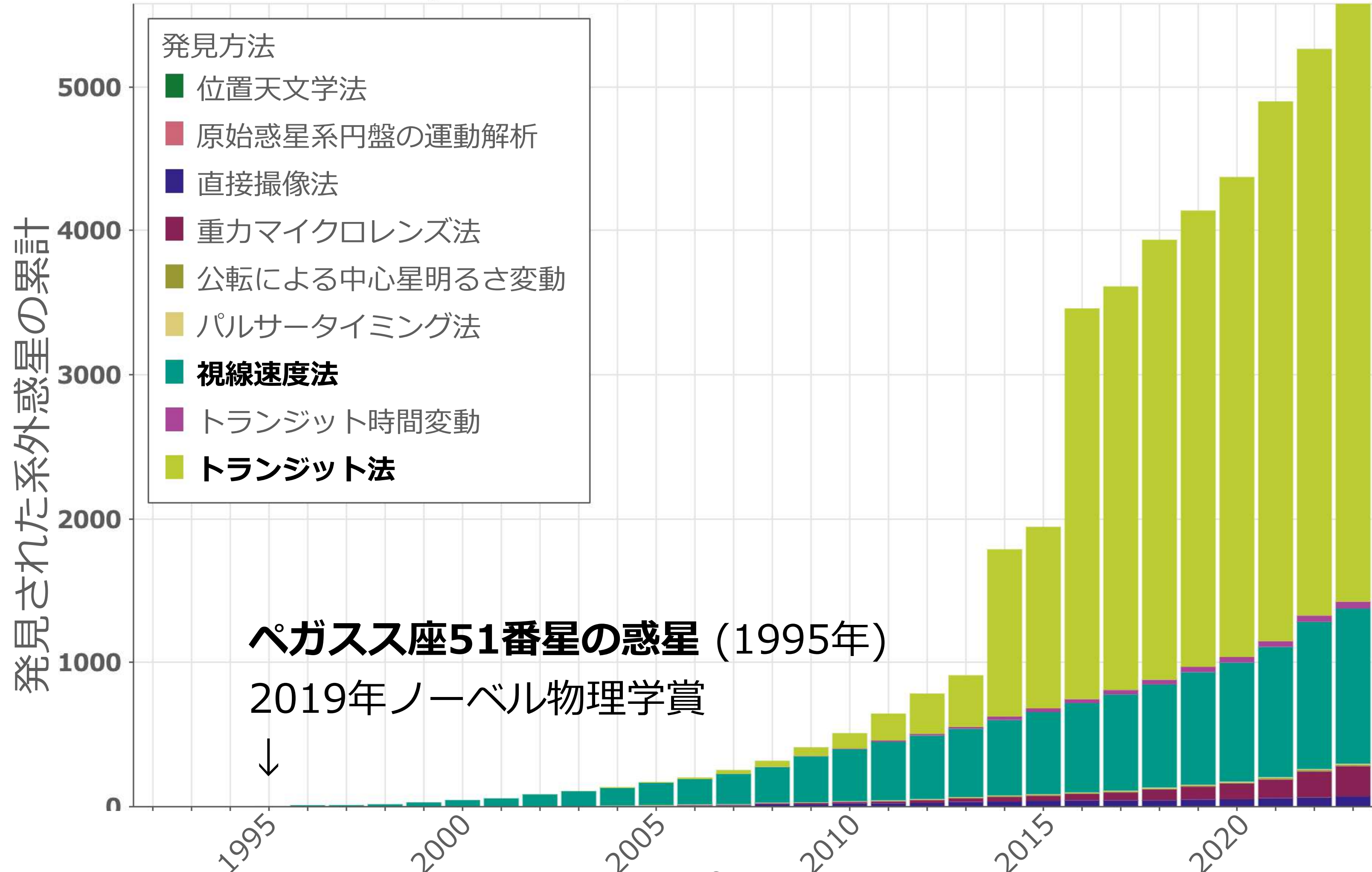
- 恒星の周りを回り
  - ほぼ球形で
  - その軌道近くに似た天体がない
- 天体を惑星という



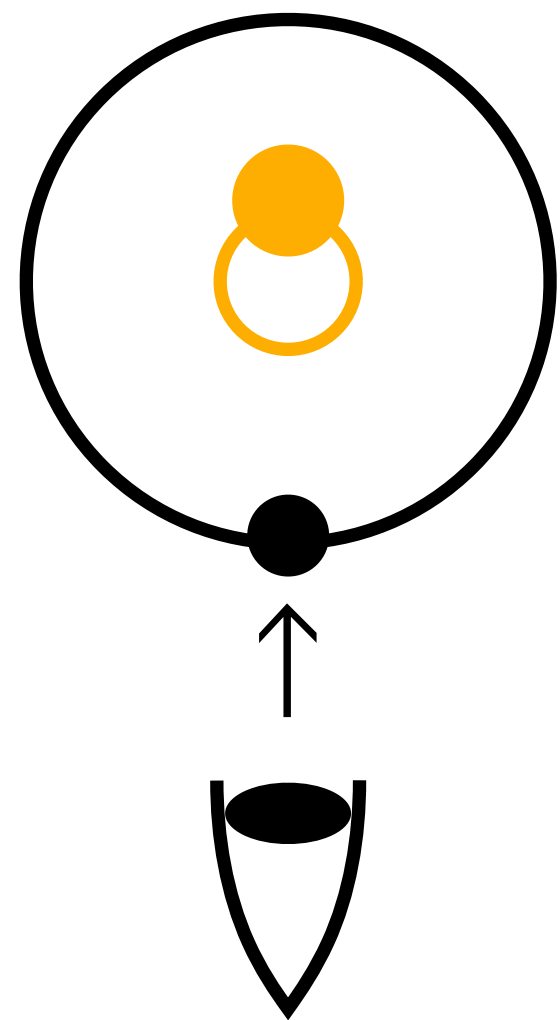
# 太陽系の外に惑星はいるの？

→ いる！系外惑星は5000個以上見つかったている！

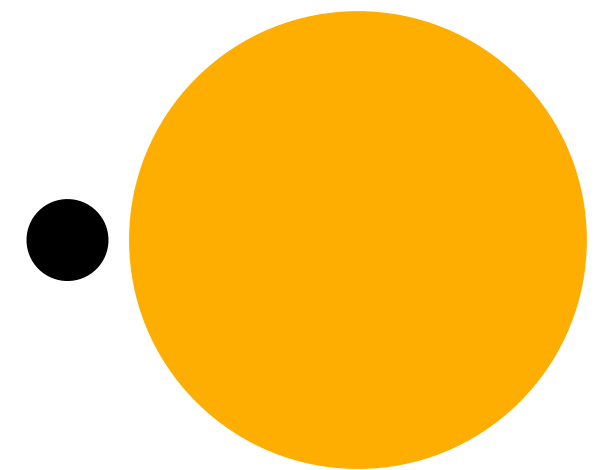
12 Mar 2024 exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



視線速度法



トランジット法





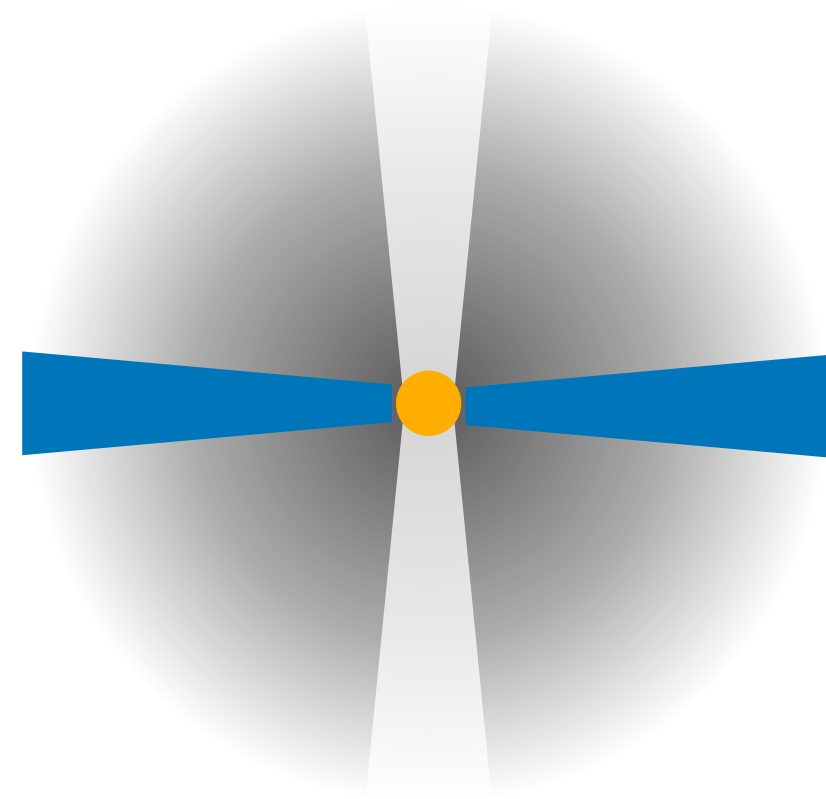
# 惑星はいつ、どこで、何から作られるの？

原始星&分子雲



10万年以下？

原始星円盤



約10万年？

原始惑星系円盤



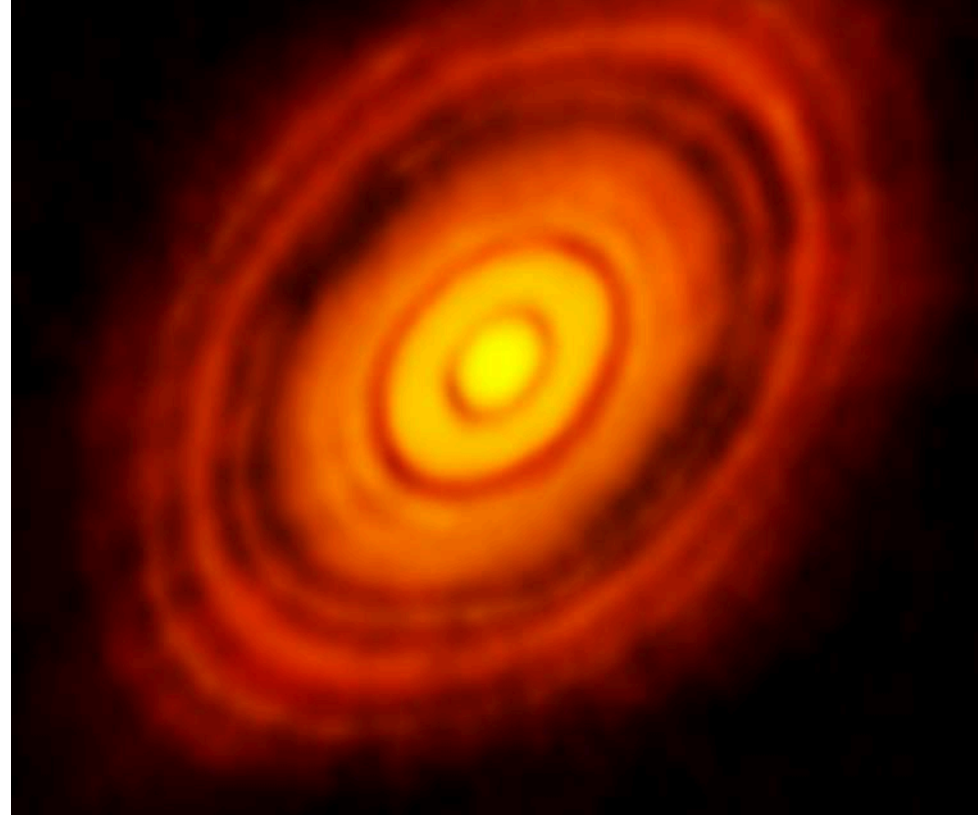
約100万年

残骸円盤&惑星



約1000万年

おうし座HL星の円盤



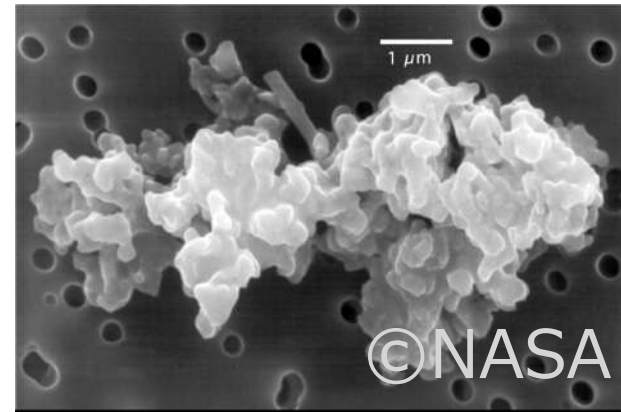
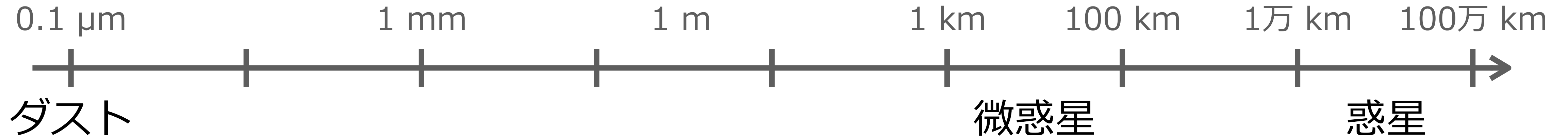
ALMA Partnership et al. (2015)

原始惑星系円盤

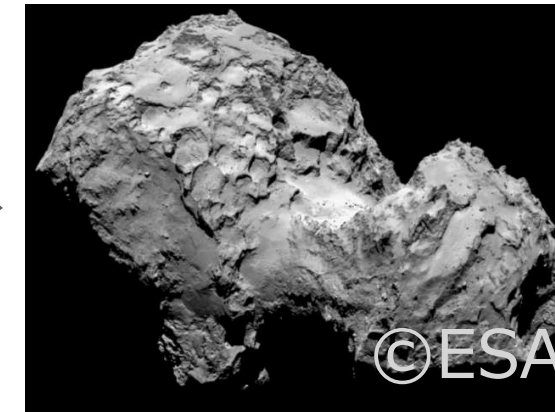
- 大きさ: 約100天文単位  
(天文単位: 地球-太陽間の平均距離)
- 質量: 太陽質量の0.001-10%
- 成分: 気体99%、固体1%

惑星は、  
星が作られるとき、  
星の周りで、  
星の材料の残り物から作られる  
(木星質量=太陽質量の0.1%)

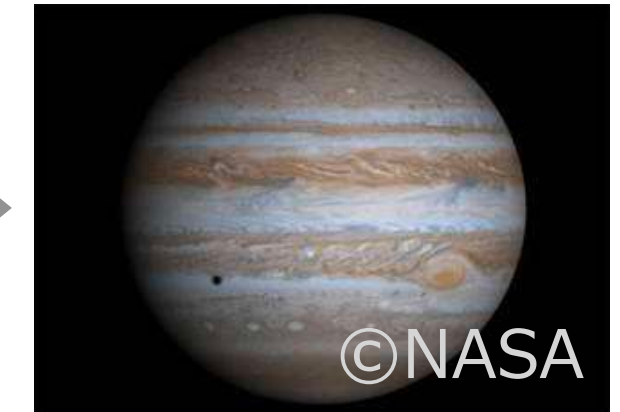
# 惑星形成とは？ —固体のサイズ成長の観点から—



分子間力などの付着力で直接合体



重力で合体

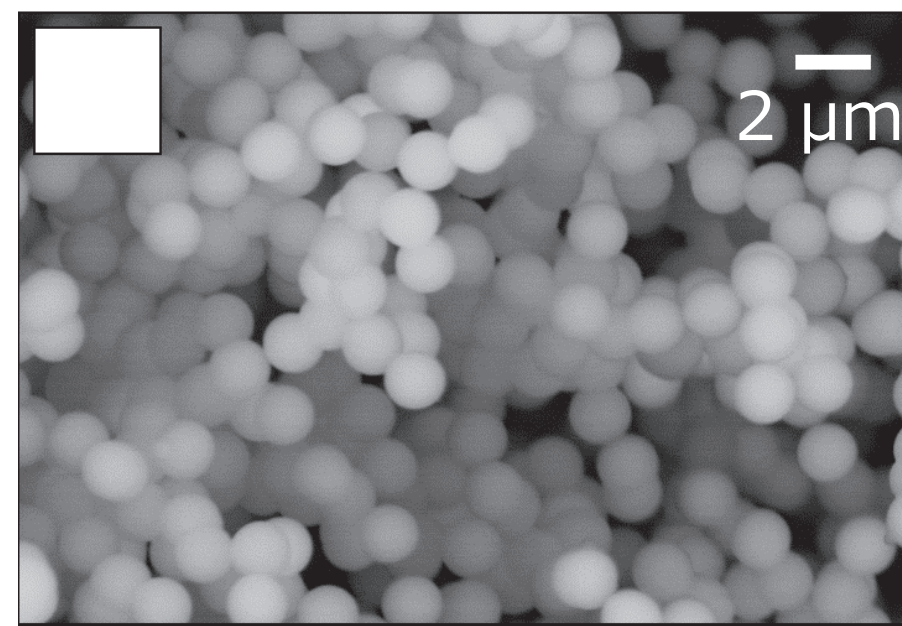


ダスト集合体のシミュレーション



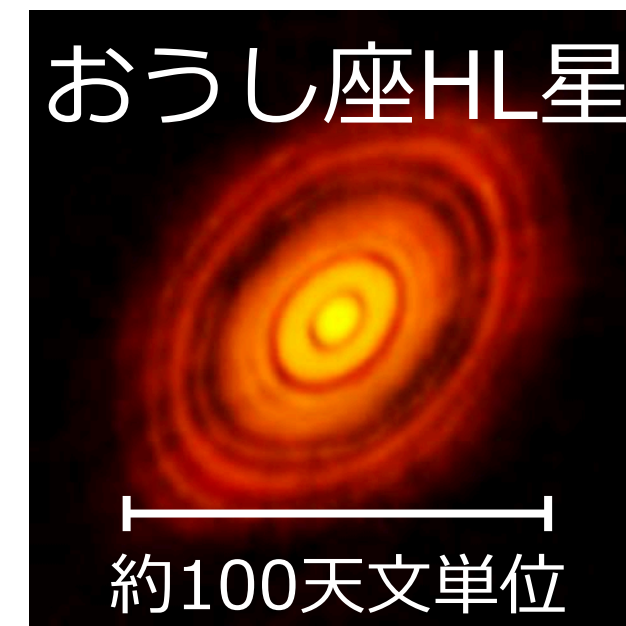
e.g., Suyama et al. (2008)

ダスト集合体の実験



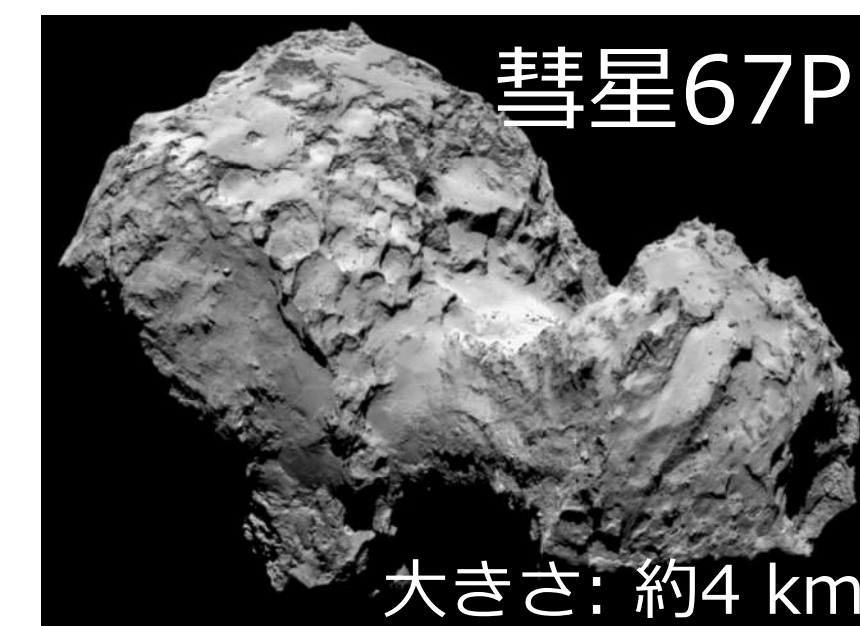
e.g., Blum et al. (2006)

原始惑星系円盤のダスト観測



e.g., ALMA Partnership (2015)

太陽系の小惑星・彗星探査



©ESA

- 小惑星
- イトカワ
  - リュウグウ
  - ベヌー など
- 彗星
- 67P など

# クイズ：惑星の夕ネが衝突する最大の速さは？

A. 亀の歩く速さ  $\approx 0.1 \text{ m/s} = 0.36 \text{ km/s}$



B. 床に物を落とした速さ  $\approx 5 \text{ m/s} = 18 \text{ km/s}$



$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad m: \text{質量、} v: \text{速度、} g: \text{重力加速度、} h: \text{高さ}$$

$$v = \sqrt{2gh} \approx \sqrt{2 \times 10 \times 1} \approx 5 \text{ m/s}$$

C. 野球選手の投球の最速の速さ  $\approx 45 \text{ m/s} \approx 160 \text{ km/h}$



# 惑星のタネが衝突する最大の速さ

原始惑星系円盤の乱流により衝突する最大速度:  $v \approx \sqrt{\alpha} c_s$  (Ormel & Cuzzi 2007)

$\alpha$ : 乱流の強さのパラメータ (Shakura & Sunyaev 1973)

$c_s$ : 音速 (温度は125 K @ 5 au: -148°C @ 木星の軌道長半径)

- 乱流が強い場合 ( $\alpha = 10^{-2}$ ):  $v \approx \sqrt{10^{-2}} \times 670 \text{ m/s} = 67 \text{ m/s}$
- 乱流がほどほどの場合 ( $\alpha = 10^{-3}$ ):  $v \approx \sqrt{10^{-3}} \times 670 \text{ m/s} \approx 21 \text{ m/s}$

A. 0.1 m/s



B. 5 m/s



C. 45 m/s



答え: C. 野球選手の投球の最速の速さ に近い速さ

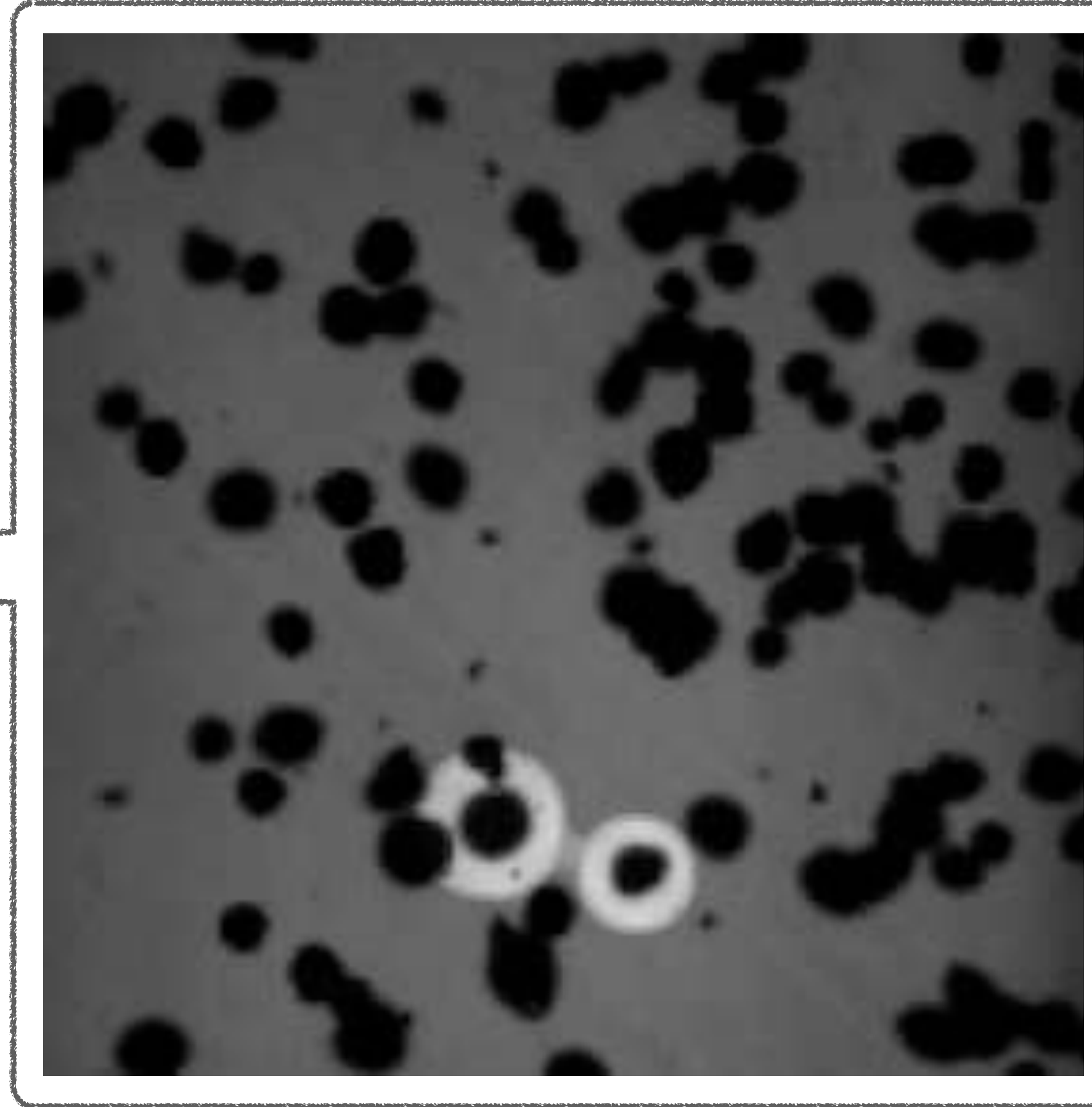
# ダスト同士が高速度で衝突するとどうなる？

---



ドイツの実験グループ: Blum et al. (<https://www.jove.com/v/51541/laboratory-drop-towers-for-experimental-simulation-dust-aggregate>)

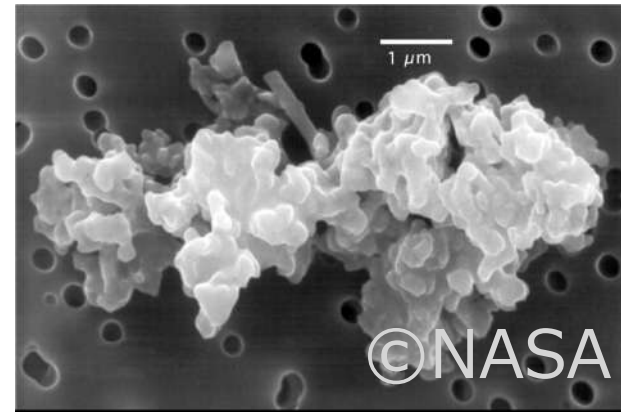
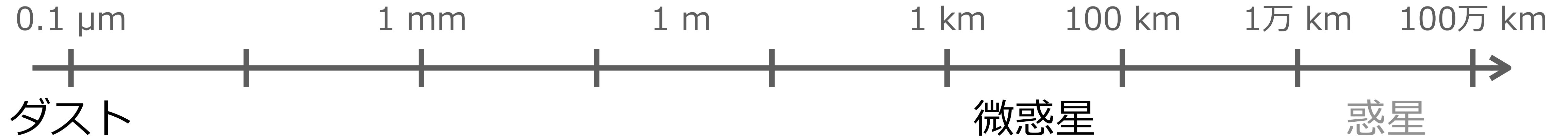
# では、ダスト同士が低速度で衝突すれば問題ない？



**跳ね返ることもある！**

ドイツの実験グループ: Weidling et al. (2012)

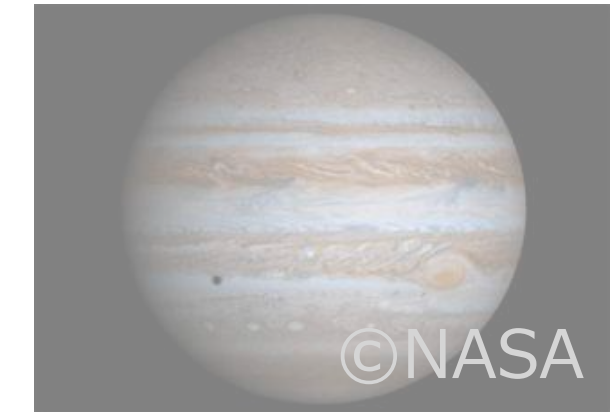
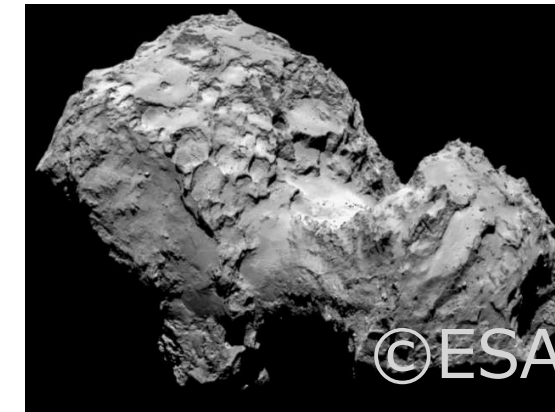
# 惑星形成の問題と解決方法



衝突破壊問題

跳ね返り問題

中心星落下問題



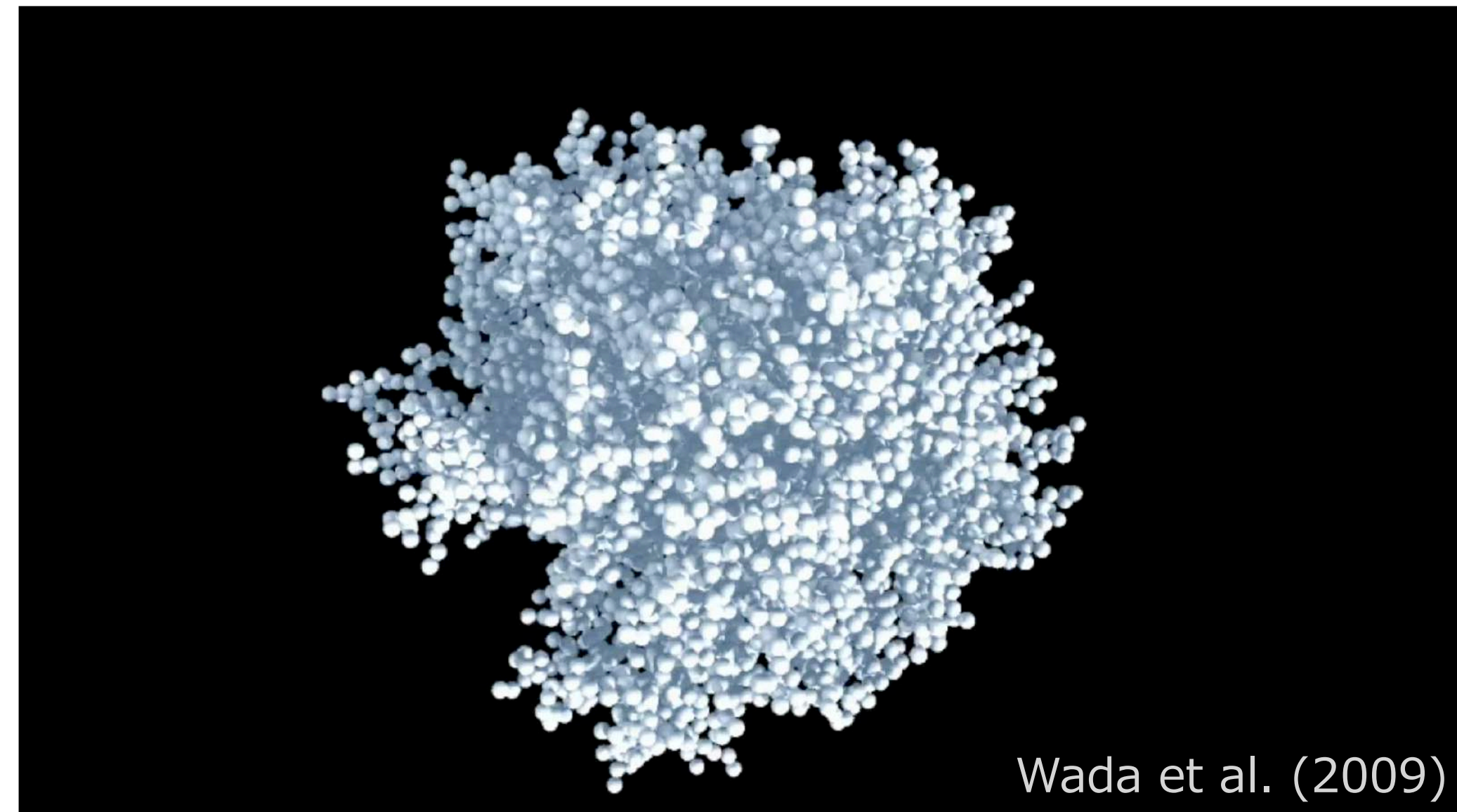
解決方法: ふわふわなダスト集合体



ではなく、



ふわふわ?



# 休憩 & 5分質問タイム

---

休憩ついでに……受験・進路選択について

- 大学受験はどうだった？
  - 典型的な理系人間 → 東京大学は2次試験に苦手な国語があるので、頑張って勉強した
  - 結果: **苦手な国語の大きな伸びしろに助けられた**
  - 克服のコツ1: **選択問題は、「なんとなく」ではなく論理的に選ぶ** (○、△、×で評価)
  - 克服のコツ2: **自由記述は、本文をほぼ丸写し** (部分点狙い)



研究者としての国語力は必要で、苦しみながら現在も頑張っています

- なぜ天文学科を選んだ？
  - 宇宙を学べる学科: 物理学科の一部、天文学科、地球惑星物理学科の一部
  - **どの研究室を選んでも宇宙を学べる天文学科を選択**

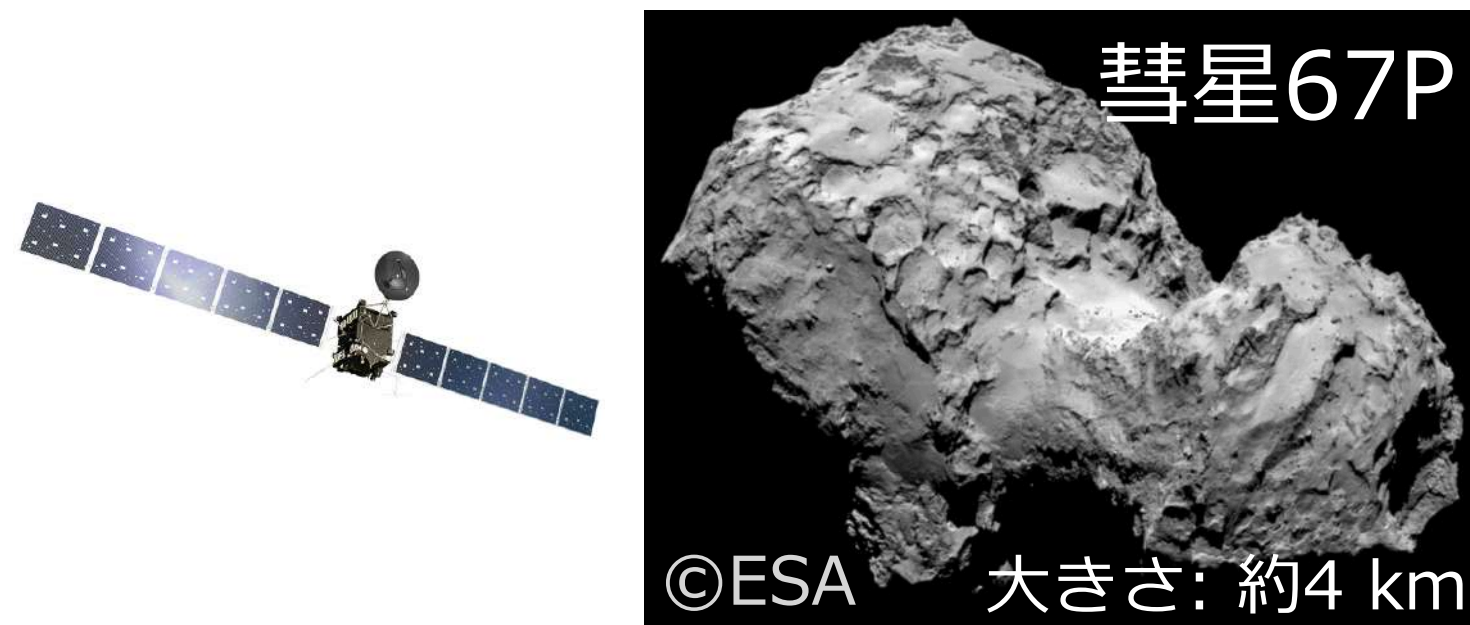




# 私の研究 — 太陽系小惑星・彗星探査との関連 —

惑星のふわふわ成長理論で、太陽系の小惑星・彗星を説明できるのか？

## 太陽系の小惑星・彗星探査

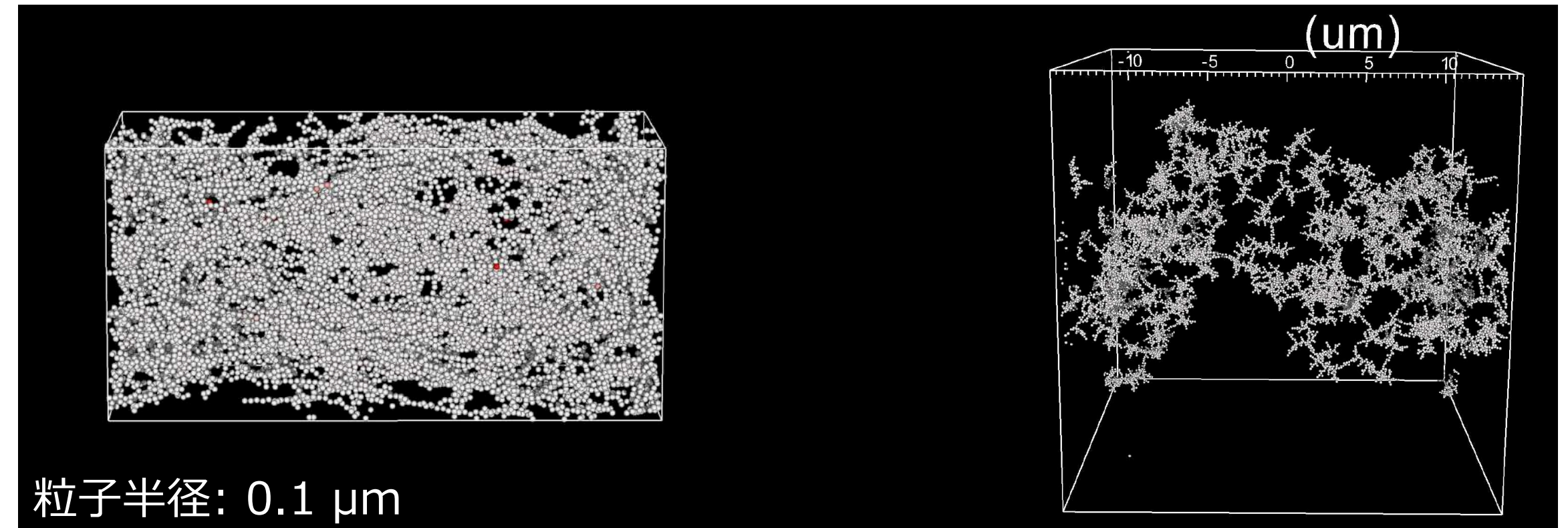


探査からわかること

- **表層の形状** → **引張強度**
- **正確な体積、質量** → **平均内部密度**

(e.g., Basilevsky et al. 2016, Jorda et al. 2016)

## ダスト集合体のシミュレーション

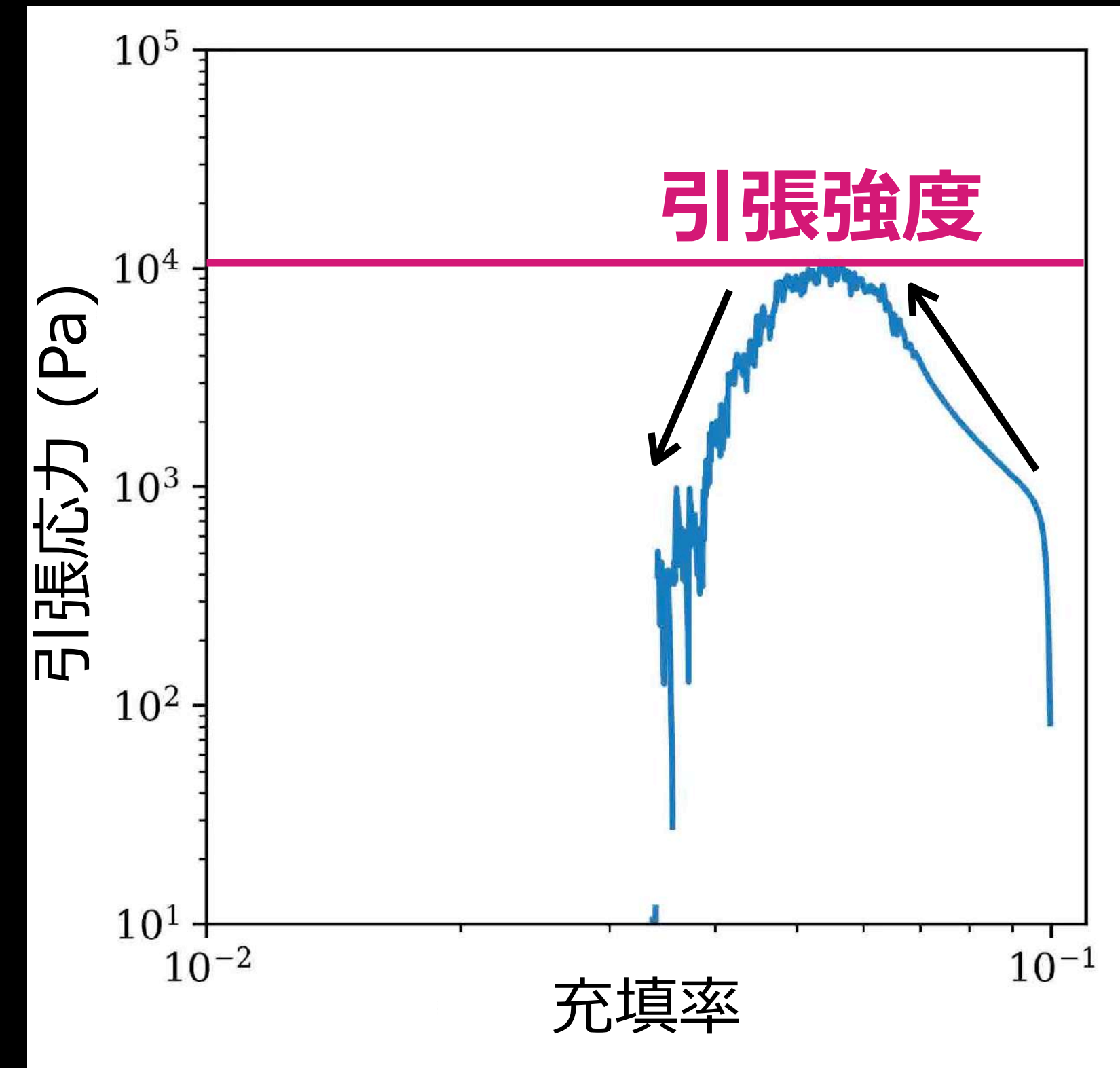
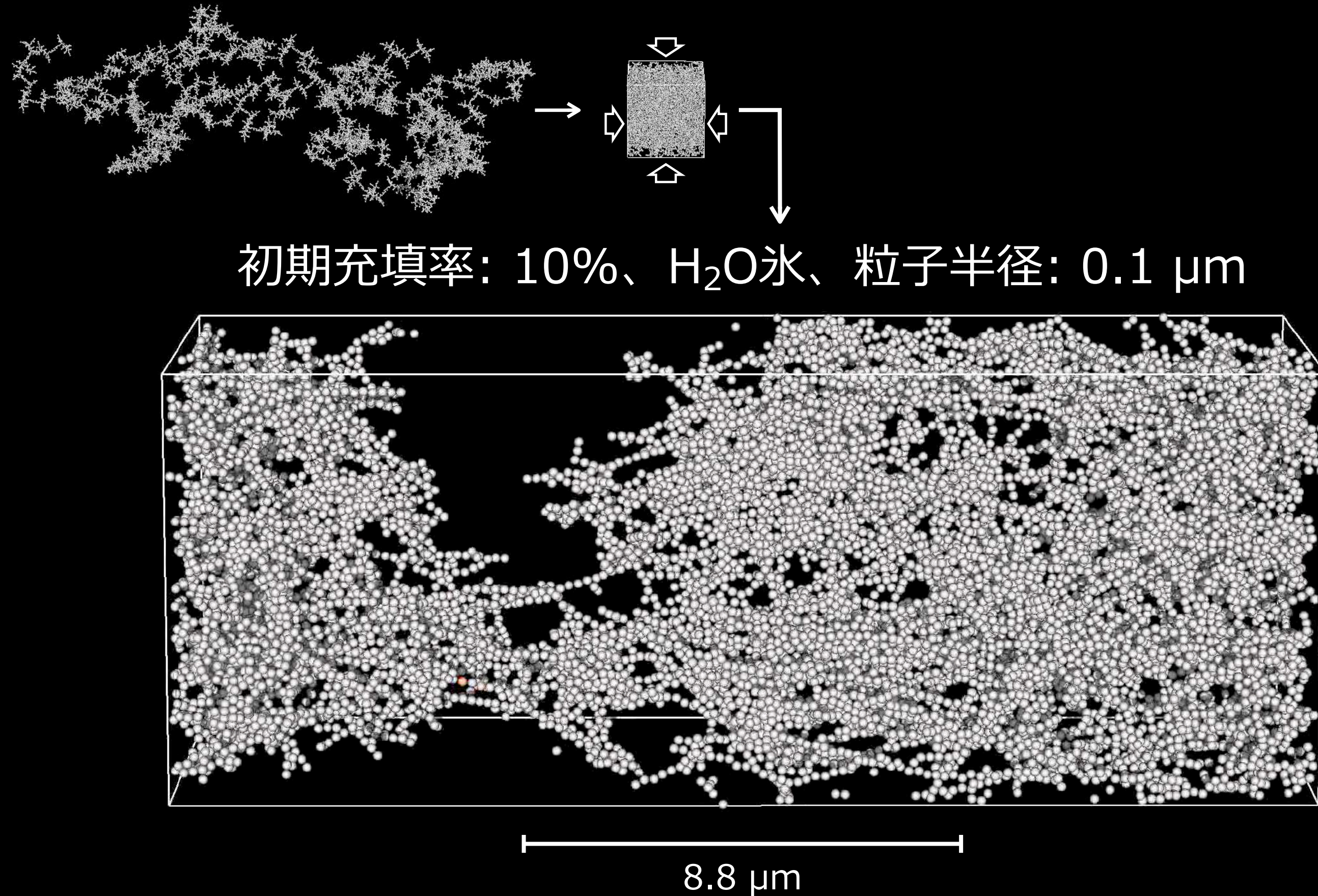


ダスト集合体についてやってきたこと

- **引張強度モデルの作成** → **彗星67Pと比較**
- **圧縮強度モデルの作成** → **平均内部密度への応用と比較**

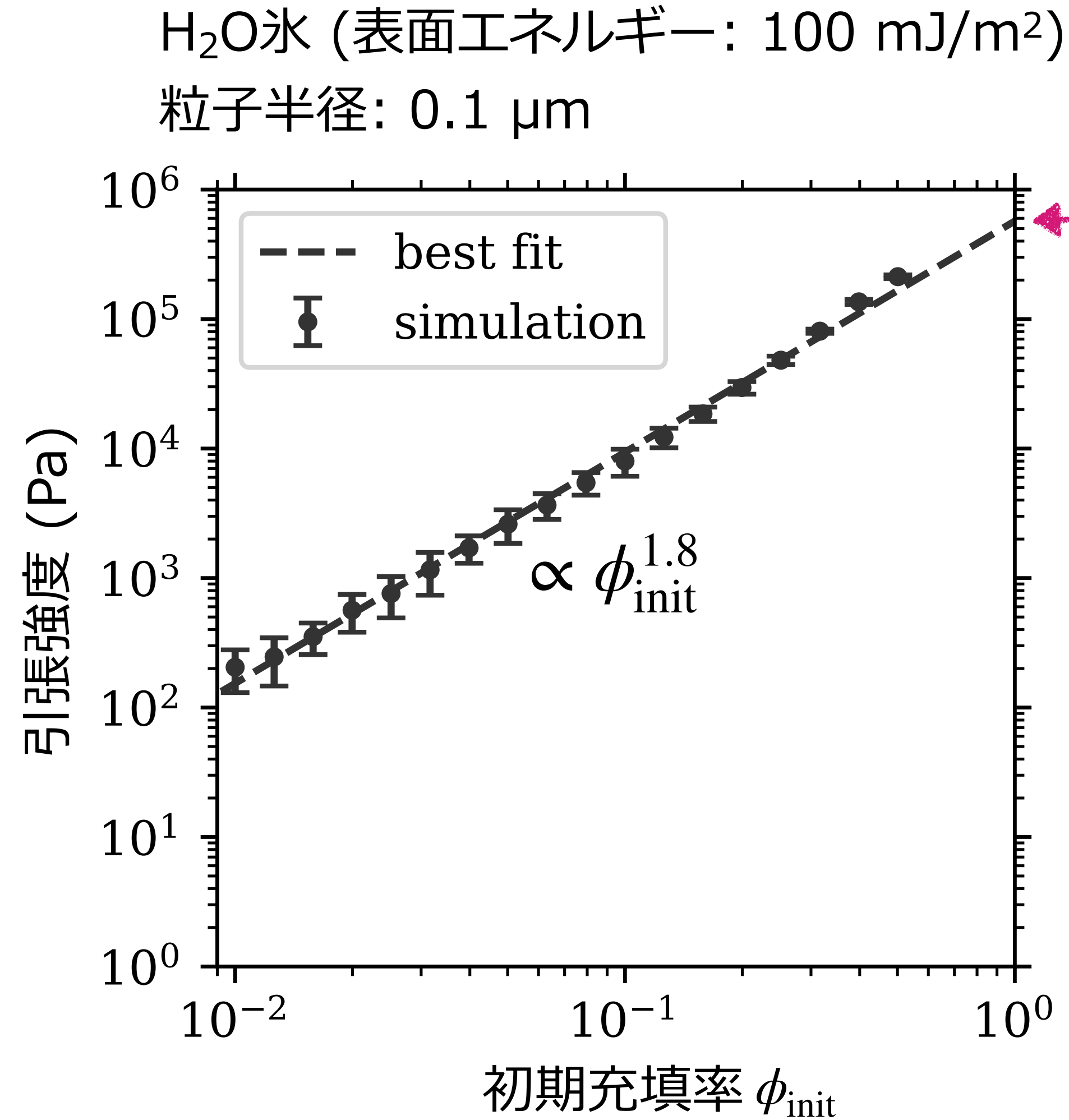
(Tatsuuma et al. 2019, 2023, submitted)

# ダスト集合体の引張強度をシミュレーションで求める



- ダスト粒子を付着力 (分子間力) をもった弾性球とし、接触した粒子から受ける力を計算
- 周期境界の壁を動かしていき、応答の力を計算

# ダスト集合体の引張強度モデルとの比較



## ダスト集合体の引張強度モデル

$$\simeq 6 \times 10^5 \text{ Pa} \left( \frac{\gamma}{100 \text{ mJ m}^{-2}} \right) \left( \frac{r_0}{0.1 \text{ } \mu\text{m}} \right)^{-1} \phi_{\text{init}}^{1.8}$$

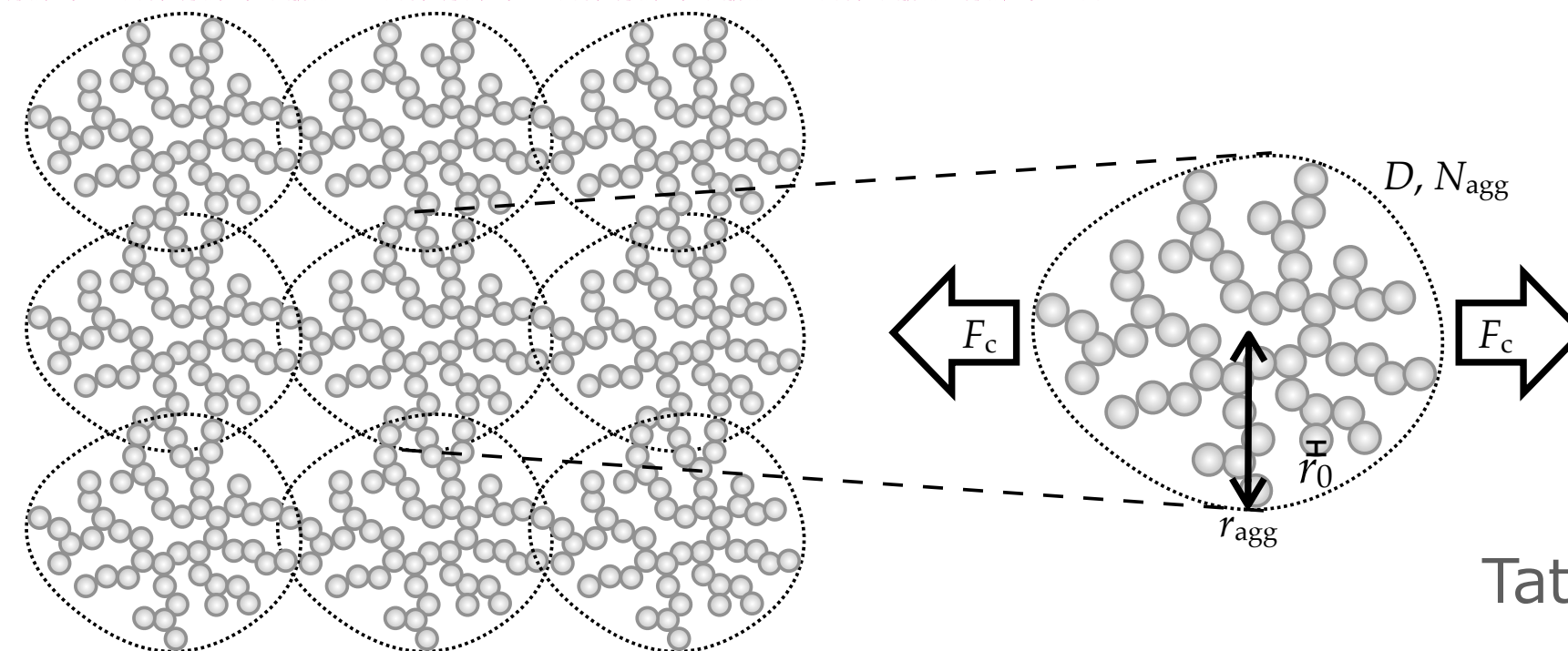
表面エネルギー      粒子半径      初期充填率

ダスト集合体の中の小さな構造同士 (初期のフラクタル次元1.9) が  
 ちぎれるときの応力で引張強度モデルを作成

$$\frac{F_c}{r_{\text{agg}}^2} \propto \frac{1.5\pi\gamma r_0}{[r_0\phi_{\text{init}}^{-1/(3-D)}]^2} \propto \gamma r_0^{-1} \phi_{\text{init}}^{2/(3-D)}$$

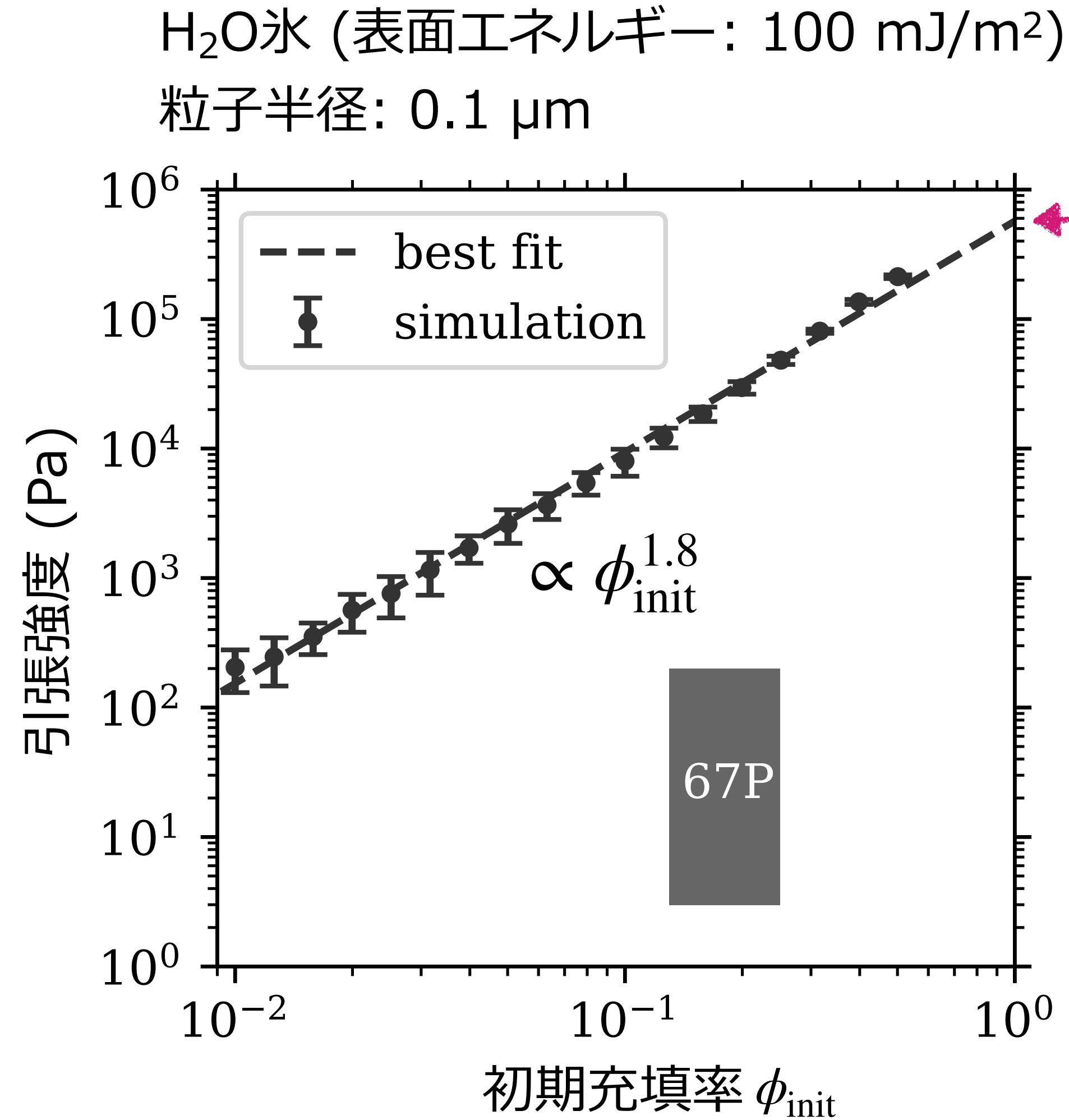
$$r_{\text{agg}} \propto N_{\text{agg}}^{1/D} r_0$$

$$\phi_{\text{init}} = N_{\text{agg}} (r_0/r_{\text{agg}})^3$$



Tatsuuma et al. (2019)

# 探査からわかる彗星の引張強度との比較

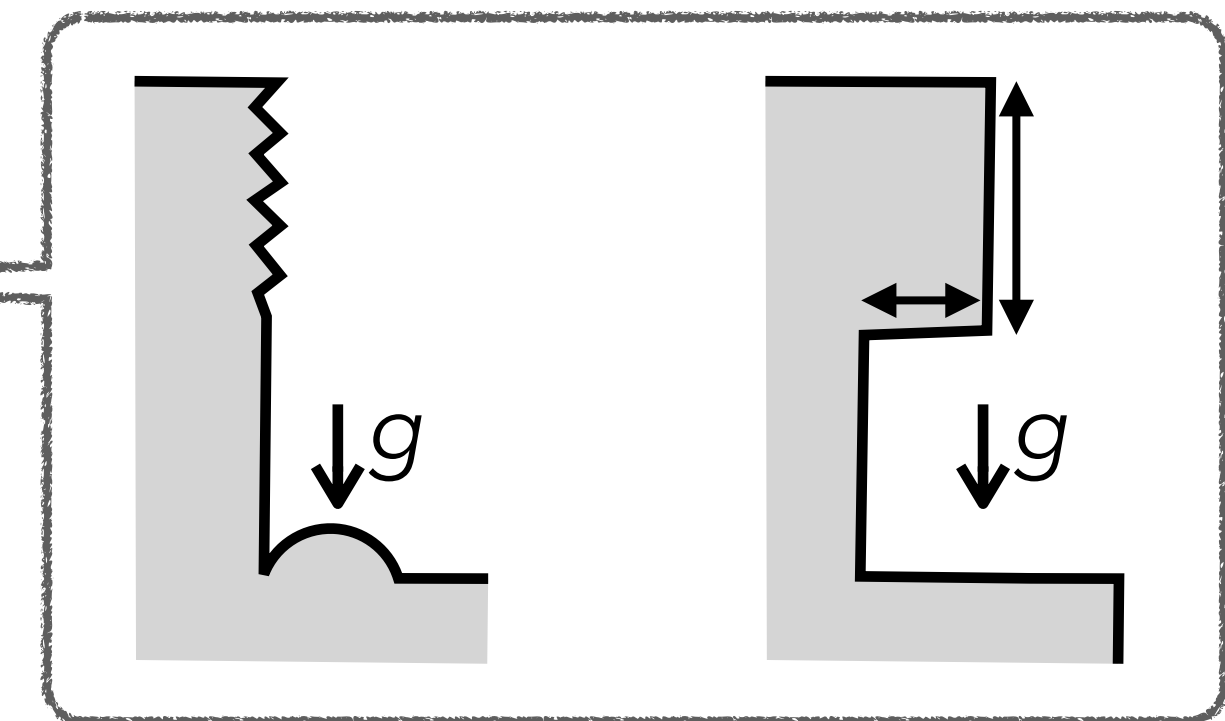
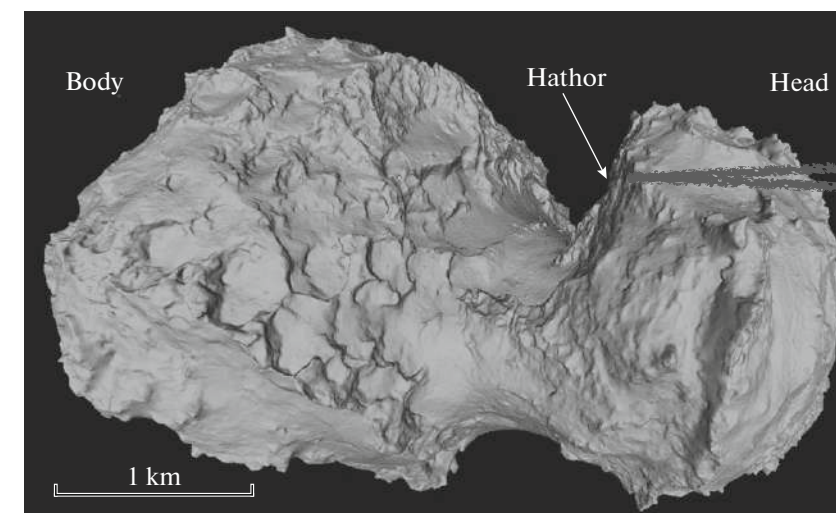


## ダスト集合体の引張強度モデル

$$\simeq 6 \times 10^5 \text{ Pa} \left( \frac{\gamma}{100 \text{ mJ m}^{-2}} \right) \left( \frac{r_0}{0.1 \text{ } \mu\text{m}} \right)^{-1} \phi_{\text{init}}^{1.8}$$

表面エネルギー      粒子半径      初期充填率

彗星67Pの引張強度  $\sim 1.5\text{--}100 \text{ Pa}$  (Basilevsky et al. 2016)



- 彗星67Pをもろくするメカニズムが必要
- 構成粒子半径は0.1 μmよりも大きい?

# まとめ & 伝えたいこと

---

- 0.1  $\mu\text{m}$ サイズのダストから惑星までの形成過程にあった、衝突破壊・跳ね返り問題など
  - ふわふわなダスト集合体で解決できる
  - ただし、まだまだ問題は山積み (理論と原始惑星系円盤のダスト観測との整合性など)
- これまでの私の研究: シミュレーションでダスト集合体の強度を求め、モデルを作った
  - 太陽系の彗星と比較した結果、彗星をもろくするメカニズムが必要なことがわかった  
→ 微惑星形成過程のヒントとなるかもしれない
- 伝えたいこと
  - (研究者に限らず) 国語力は大事、典型的な理系人間は頑張りましょう
  - ライフプランなんて立てられない、子供は授かりもの
  - 妊娠 (つわりで入院した)・育児と仕事の両立は大変だけど、子供のいる生活は楽しい