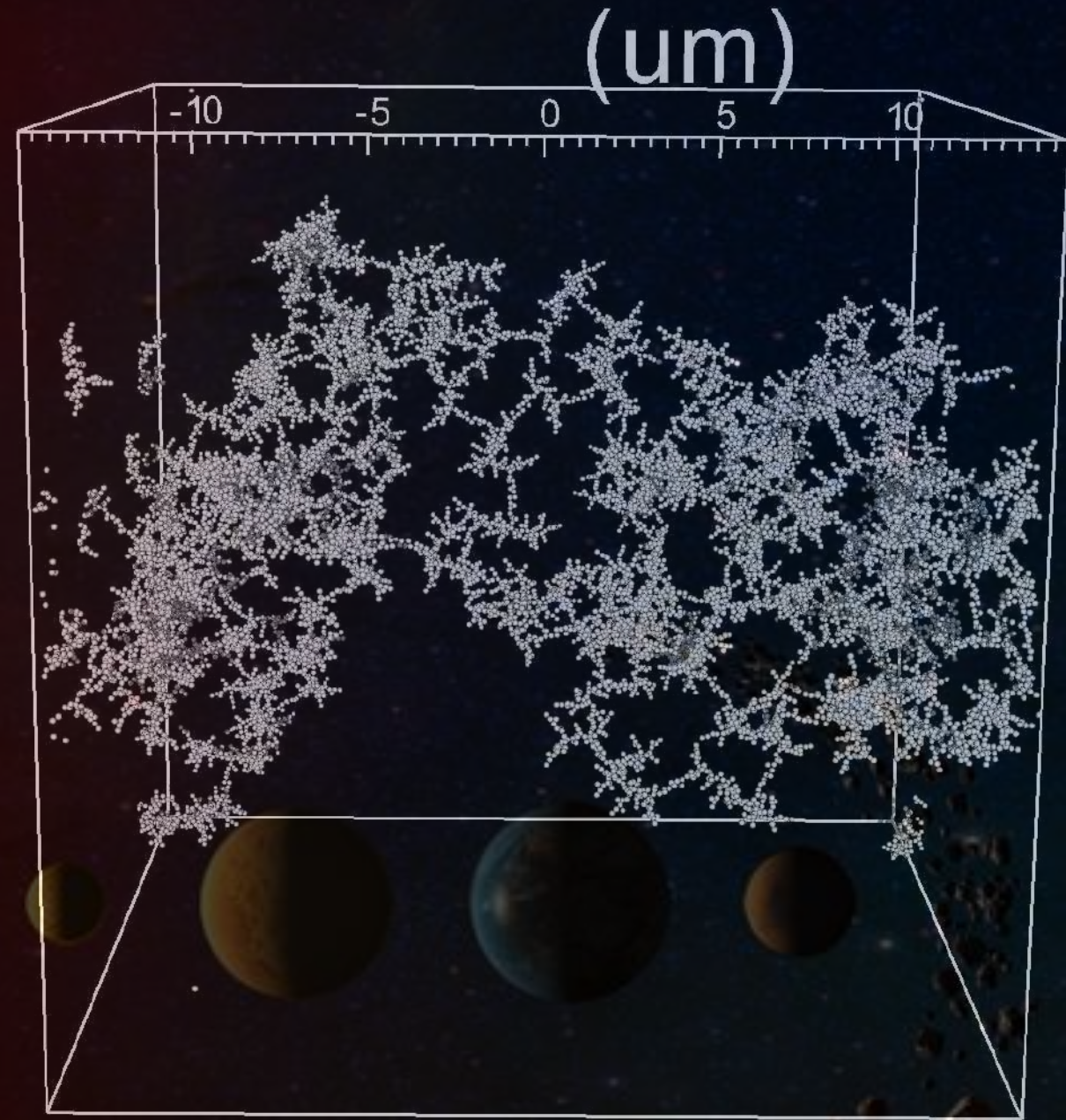


惑星のレシピ



©ESA

理化学研究所 数理創造プログラム 辰馬 未沙子 (たつうま みさこ)

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6歳と3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)



天文・惑星の理論研究者って普段は何をしているの？



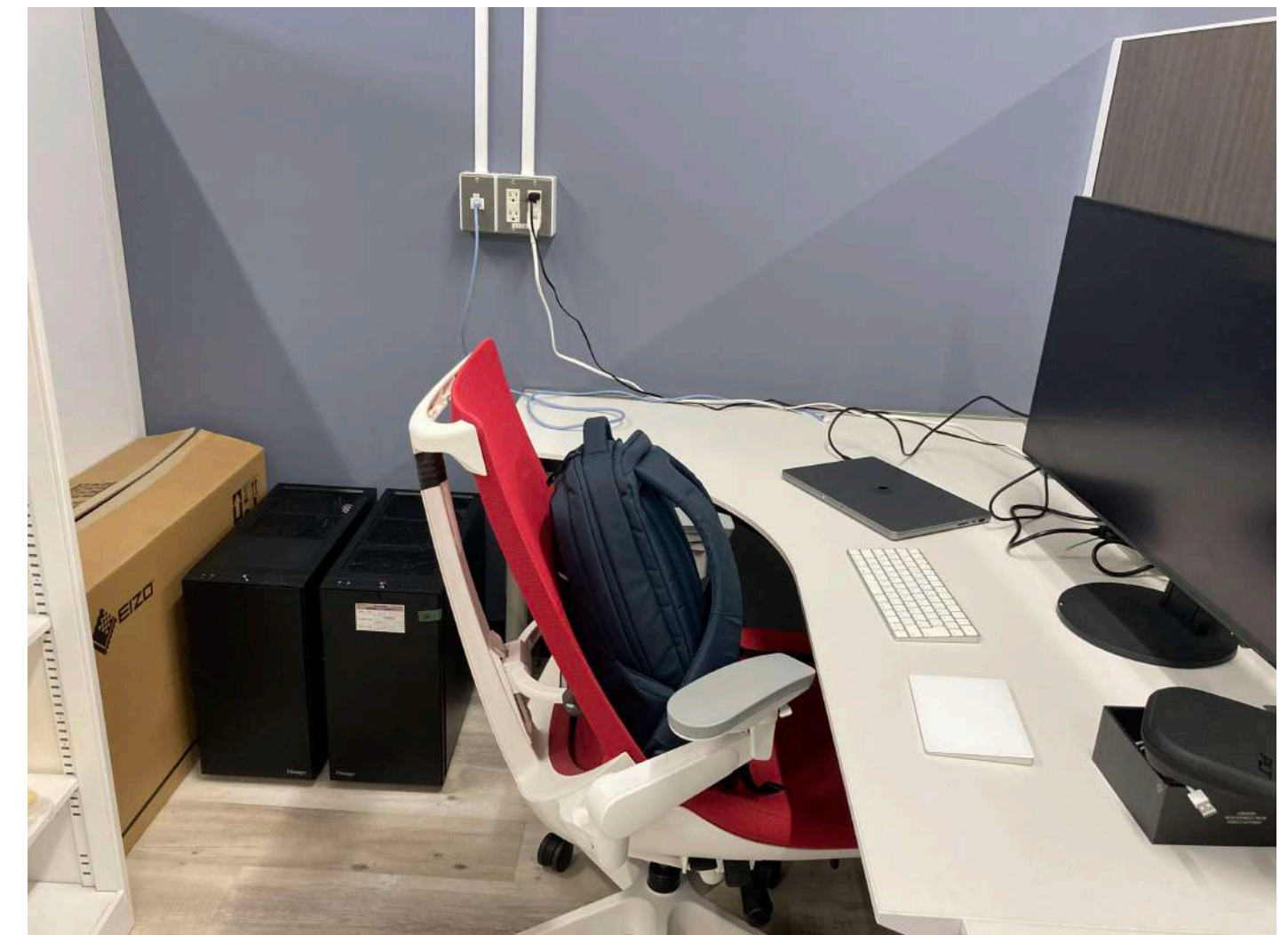
望遠鏡は… **覗きません！**

(※すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡による研究成果は使っている)

星座は… **わかりません！**

(※理論家に多い。オリオン座ならわかる)

机に向かい、パソコン・紙とペンを使って
シミュレーションや計算をしています



研究者ってどんな職業なの？

- 博士号を持っている人がなれる (少なくとも天文・惑星の研究職は)
- 英語の論文や本を読んで日々勉強
- 研究成果は英語の論文にまとめ、査読を通ったら、お金を払って出版
 - 査読を頼まれることもある
- 国内外の学会や研究会で研究成果を発表
 - 学会や研究会の企画をすることもある
- 共同研究を通して大学生・大学院生の研究活動をサポート
- 大学での講義
- 研究に必要な資金を得るために申請書を書く
- アウトリーチ (この講演など)

...



+ 職探し

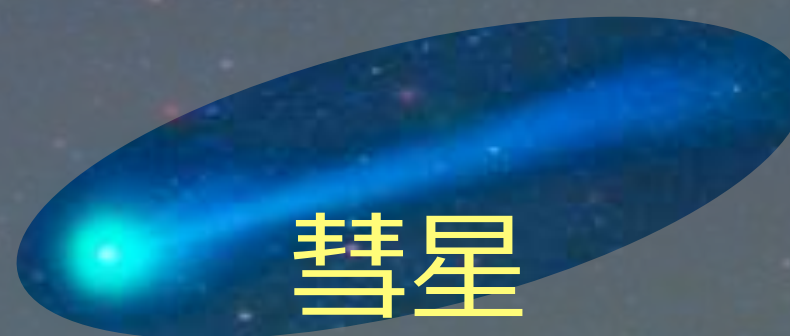
(現在任期のある職です)

惑星のレシピ（作り方）とその困難

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



彗星



水星 金星 地球 火星



木星



土星



天王星 海王星



小惑星

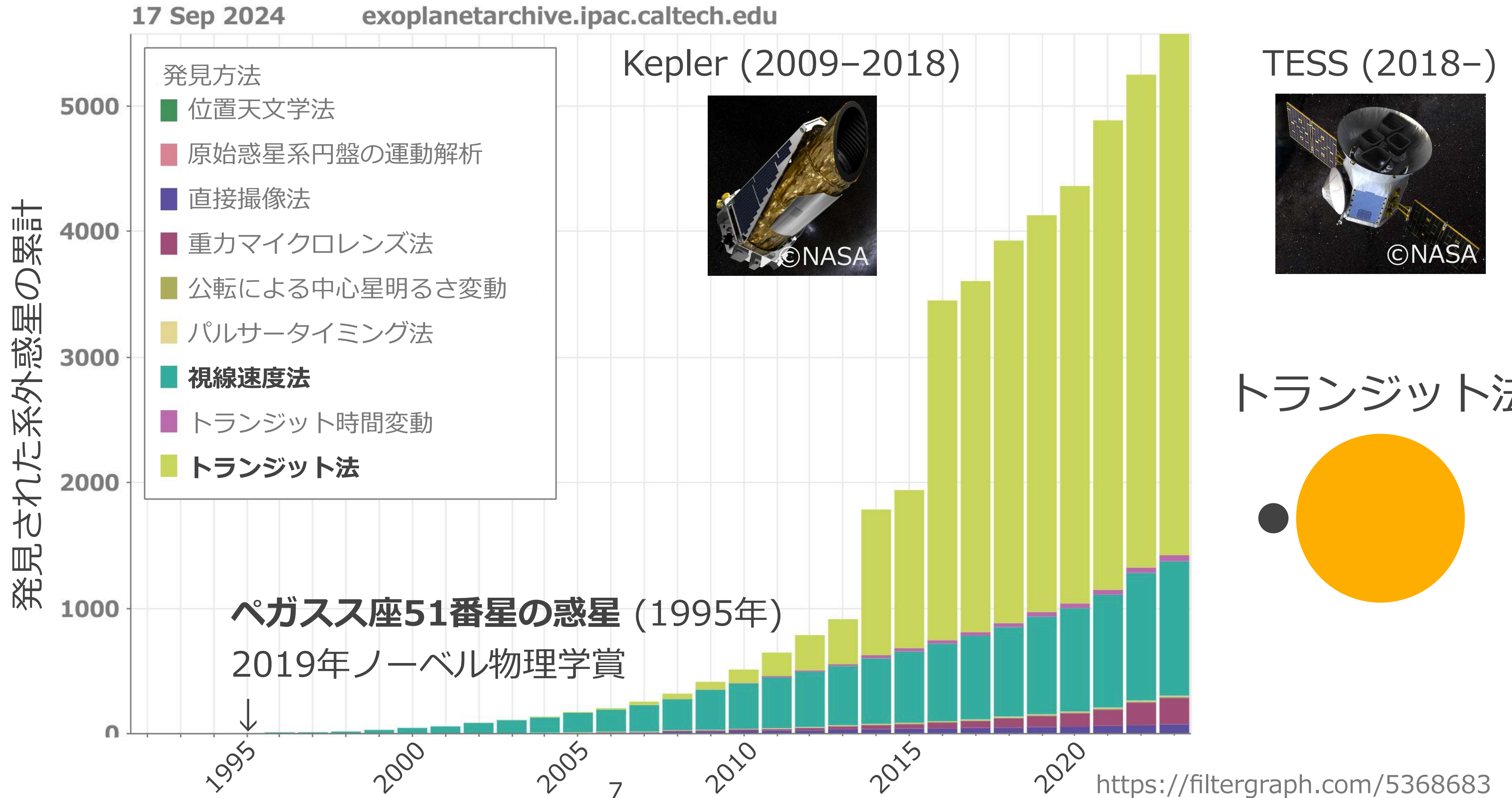
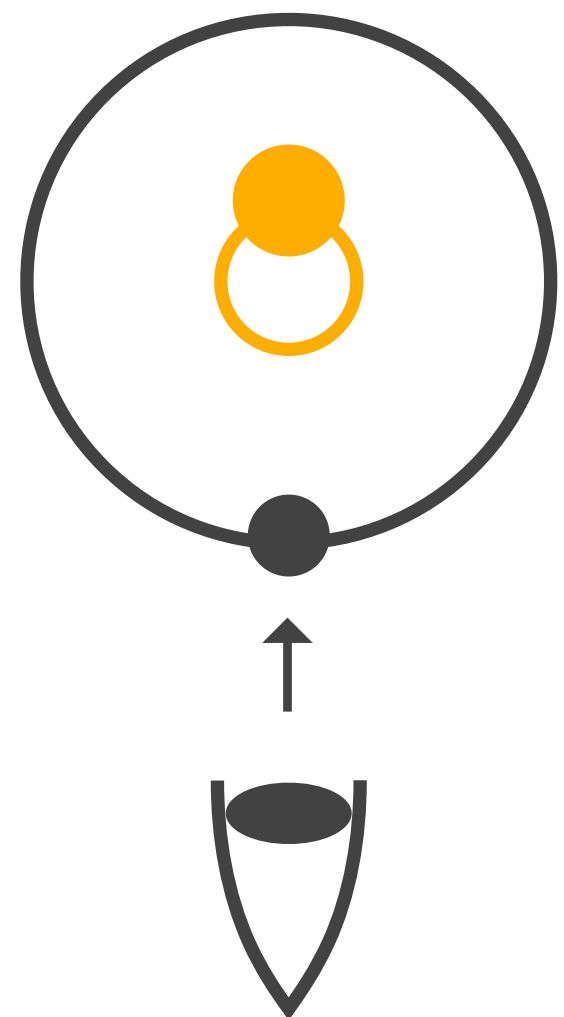
小惑星・彗星：惑星になりきれなかったもの

※見やすくするため、
惑星の大きさの差は実際よりも小さく、
軌道の間隔は実際よりも近づけています

太陽系の外に惑星はあるの？

→ ある！系外惑星は5000個以上見つかったている！

視線速度法



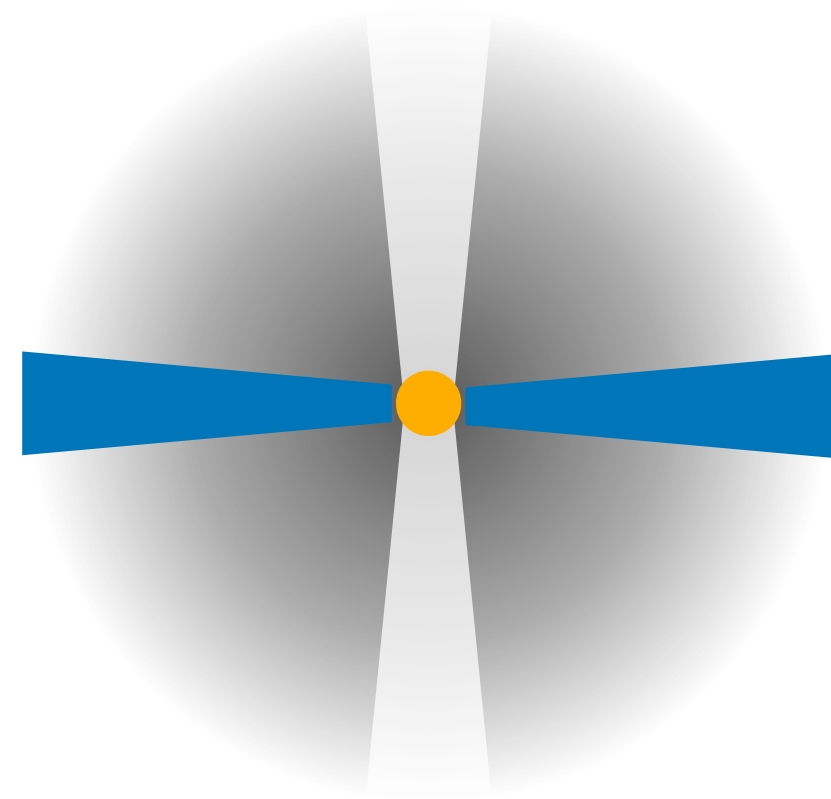
惑星はいつ、どこで、何から作られるの？

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



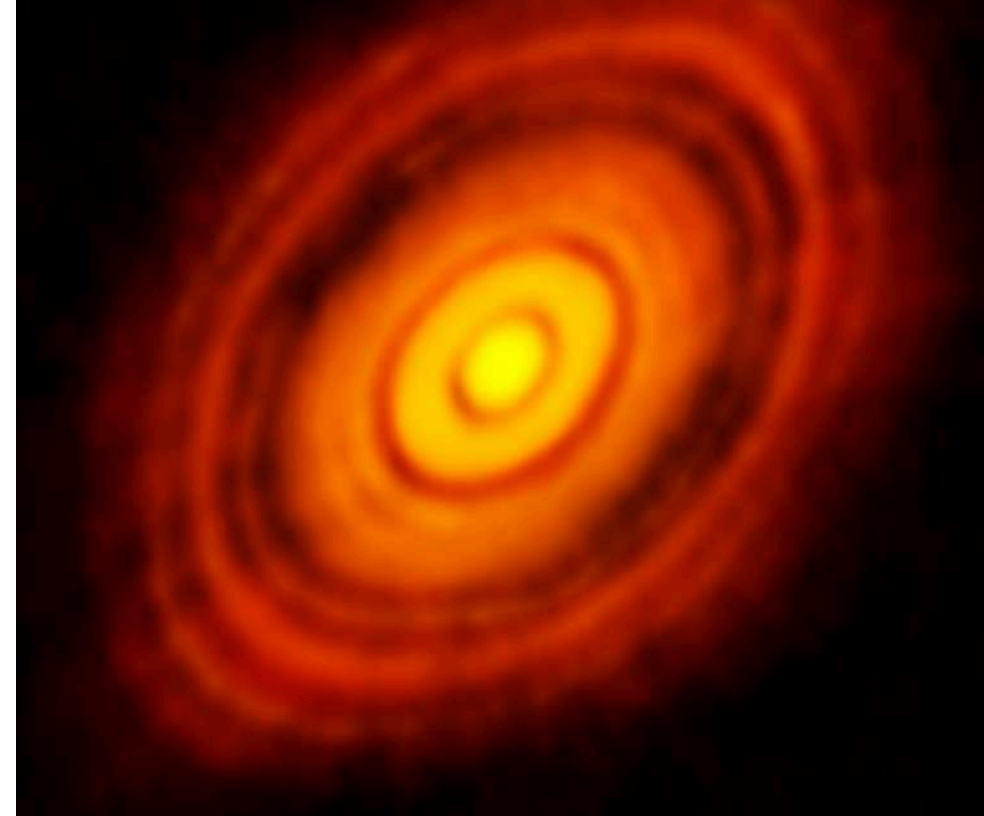
約100万年

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0.00001-0.1倍
- 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0.001倍)

惑星形成とは？ —固体のサイズ成長の観点から—

1 mmの1万分の1

対数目盛

× 100

× 100

地球の半径は
6378 km

0.1 μm

1 mm

1 m

1 km

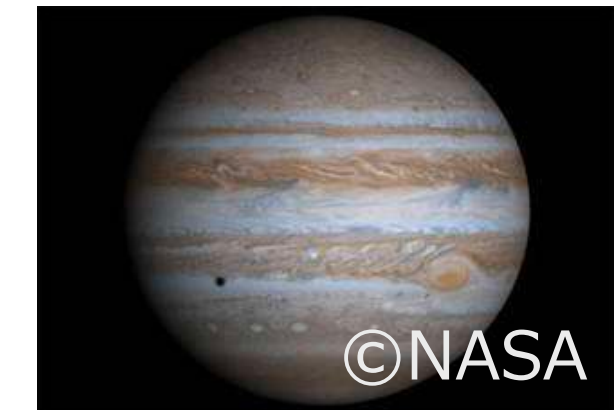
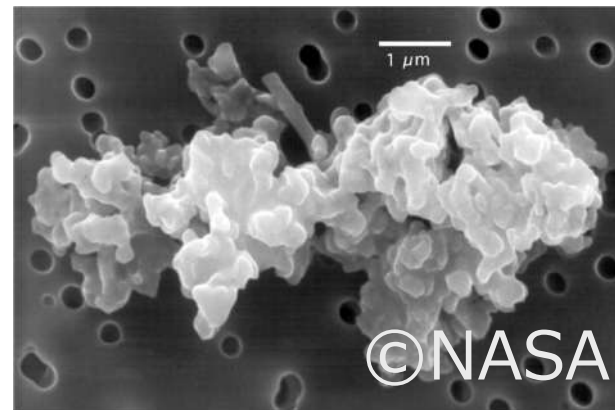
100 km

1万 km

100万 km

ダスト

惑星

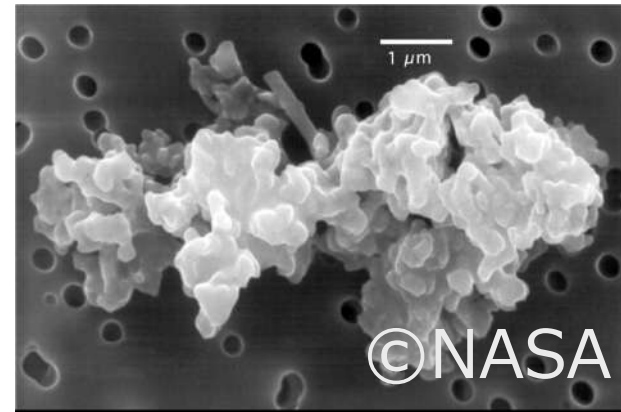
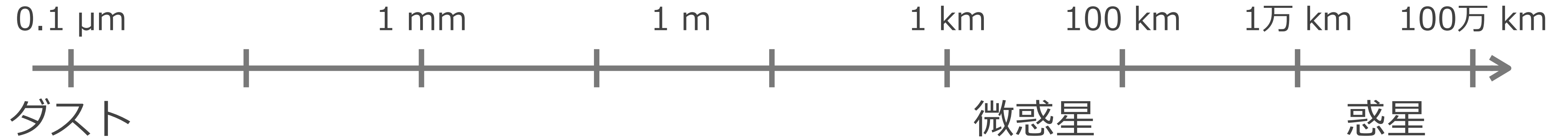


半径: 10^{14} 倍 (100兆倍)

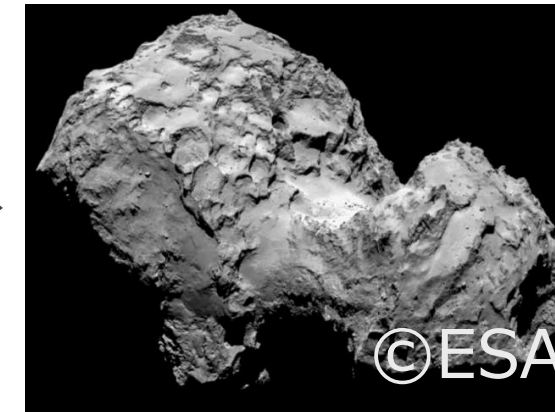
質量: 10^{42} 倍

塵も積もれば 惑星 となる

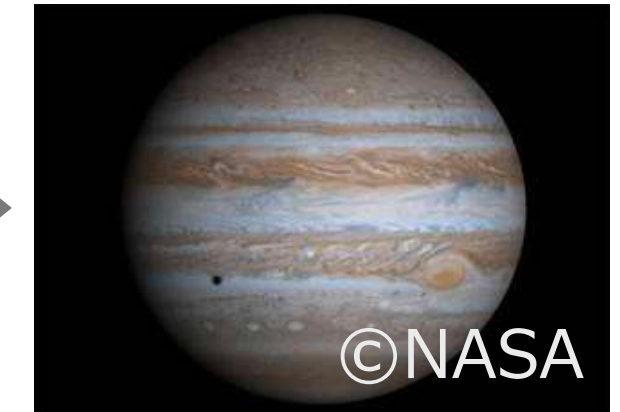
惑星形成とは？ —固体のサイズ成長の観点から—



分子間力などの付着力で直接合体



重力で合体

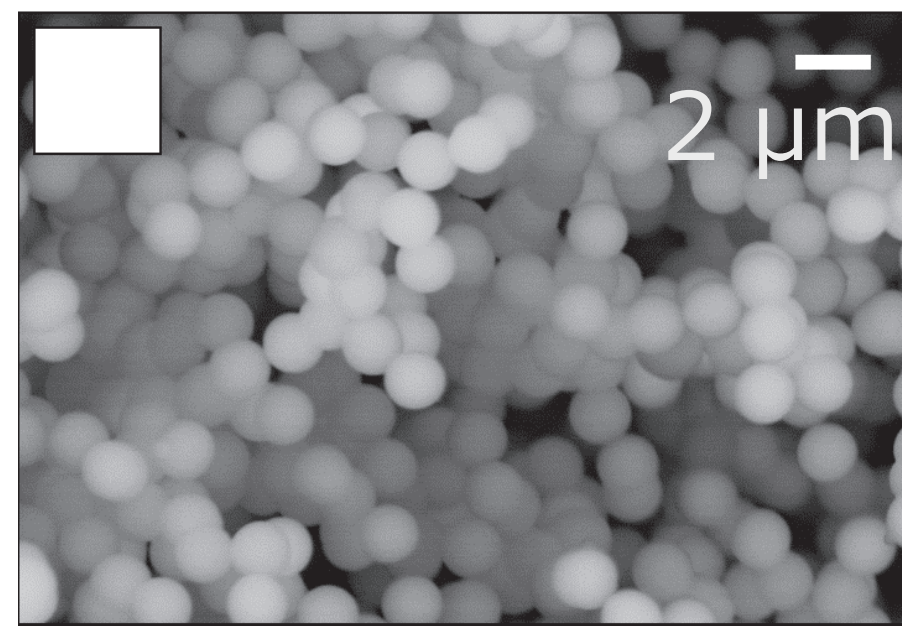


ダスト集合体のシミュレーション



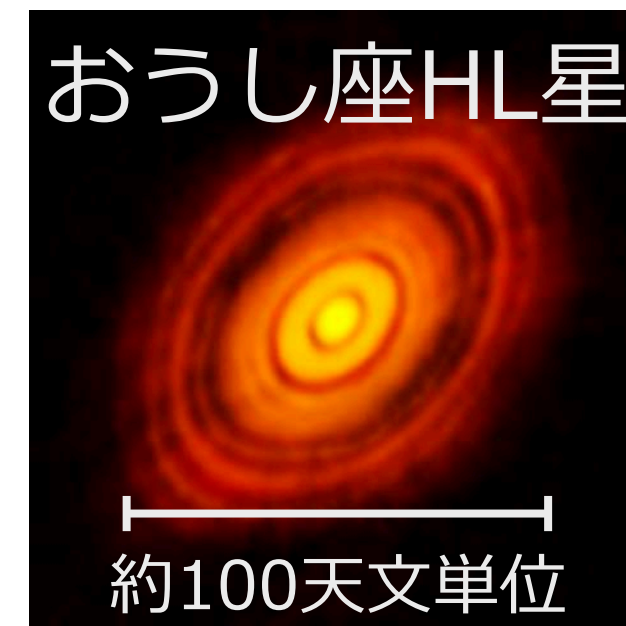
e.g., Suyama et al. (2008)

ダスト集合体の実験



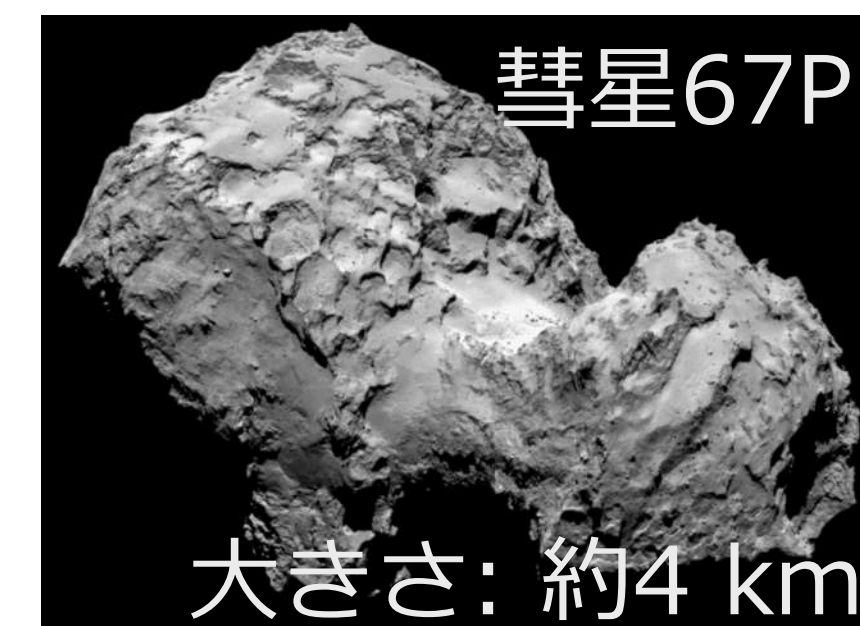
e.g., Blum et al. (2006)

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

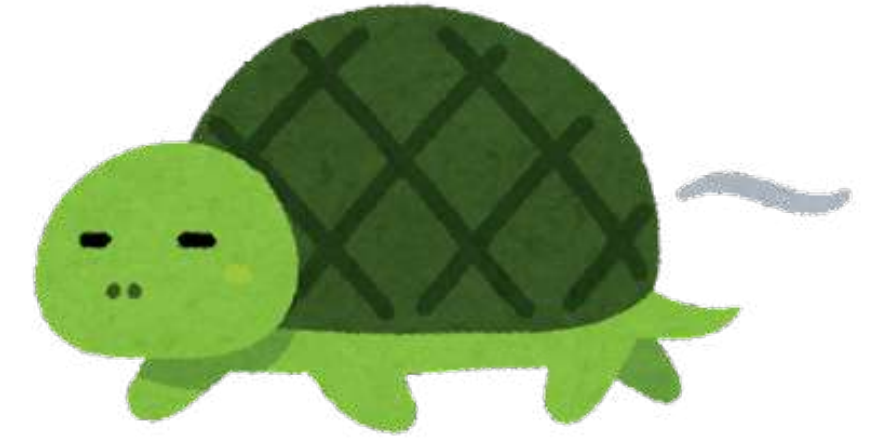


©ESA

- 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：惑星のタ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)

α : 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



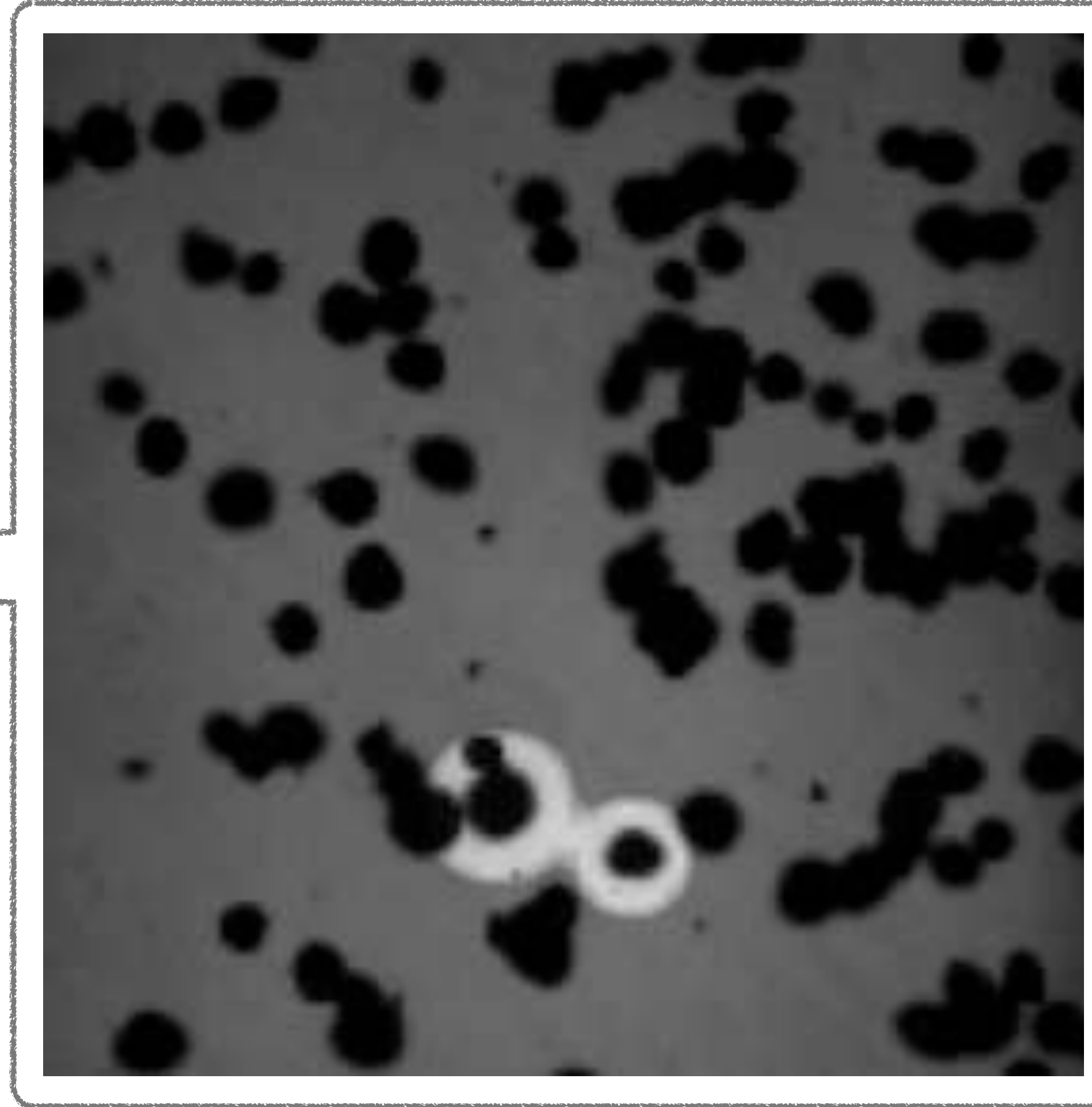
答え: C. 野球選手の投球の最速の速さ に近い速さ

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>)

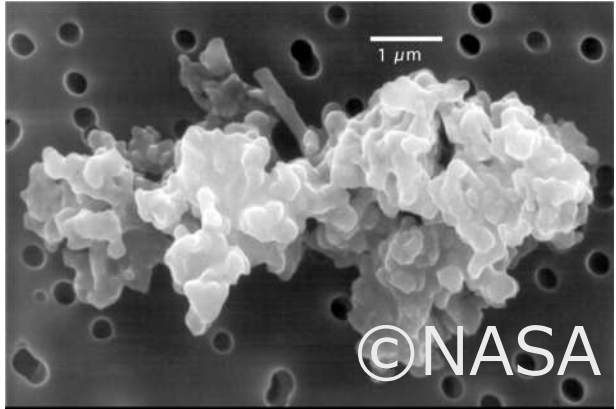
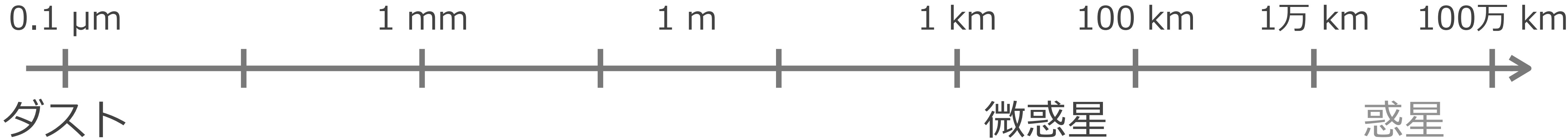
では、ダスト同士が低速度で衝突すれば問題ない？



跳ね返ることもある！

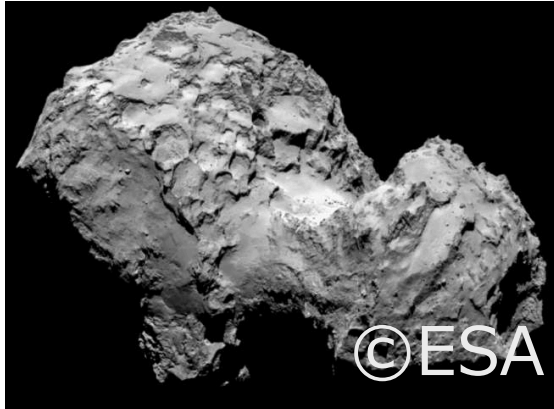
ドイツの実験グループ: Weidling et al. (2012)

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



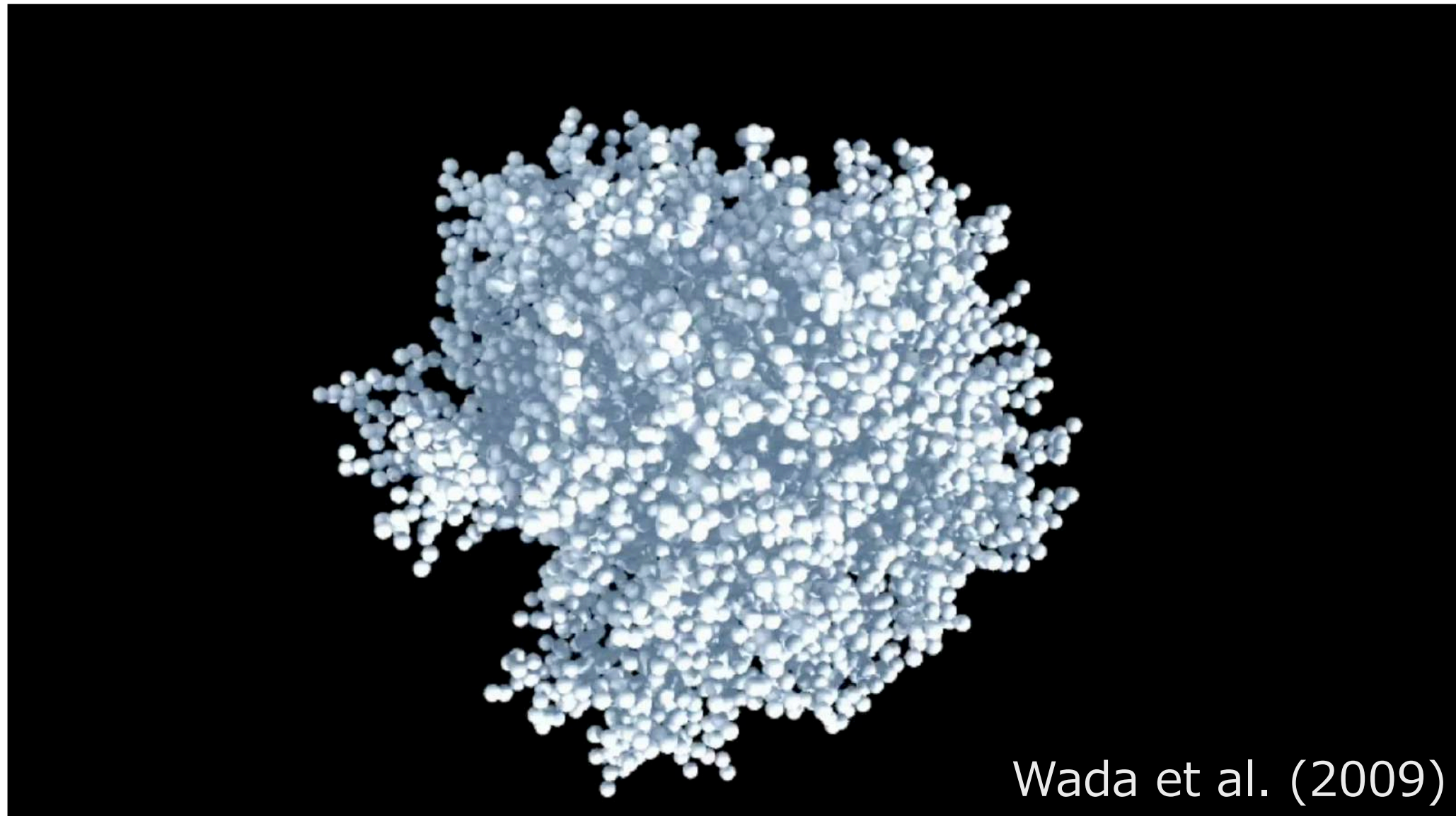
解決方法: ふわふわなダスト集合体



ではなく、



ふわふわ?



Wada et al. (2009)

惑星形成の問題と解決方法と、その検証方法

小惑星

彗星

小惑星・彗星：惑星になりきれなかった、微惑星の生き残り
特に彗星は、大規模な破壊や熱進化を経験していない可能性が高い

67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星

Northern
Hemisphere



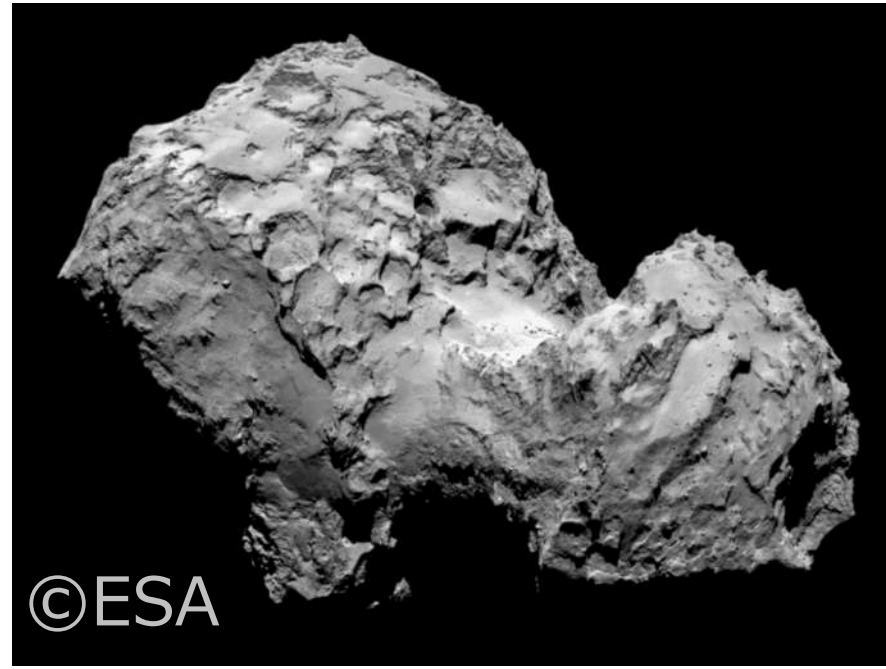
©ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team
MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA
Carsten Güttler博士から個人的にもらった動画

1000 m

17

3 August 2014
285 km; 5.5 m/px

67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星



探査からわかること

- 正確な体積、質量 → 平均密度: $532 \pm 7 \text{ kg m}^{-3}$ (Jorda et al. 2016)
- 表層の形状 → 引張強度: $1.5\text{--}100 \text{ Pa}$ (Basilevsky et al. 2016)

密度は水氷の半分（岩よりも軽い！）

強度は弱く、非常に脆い（タバコの灰くらい？）

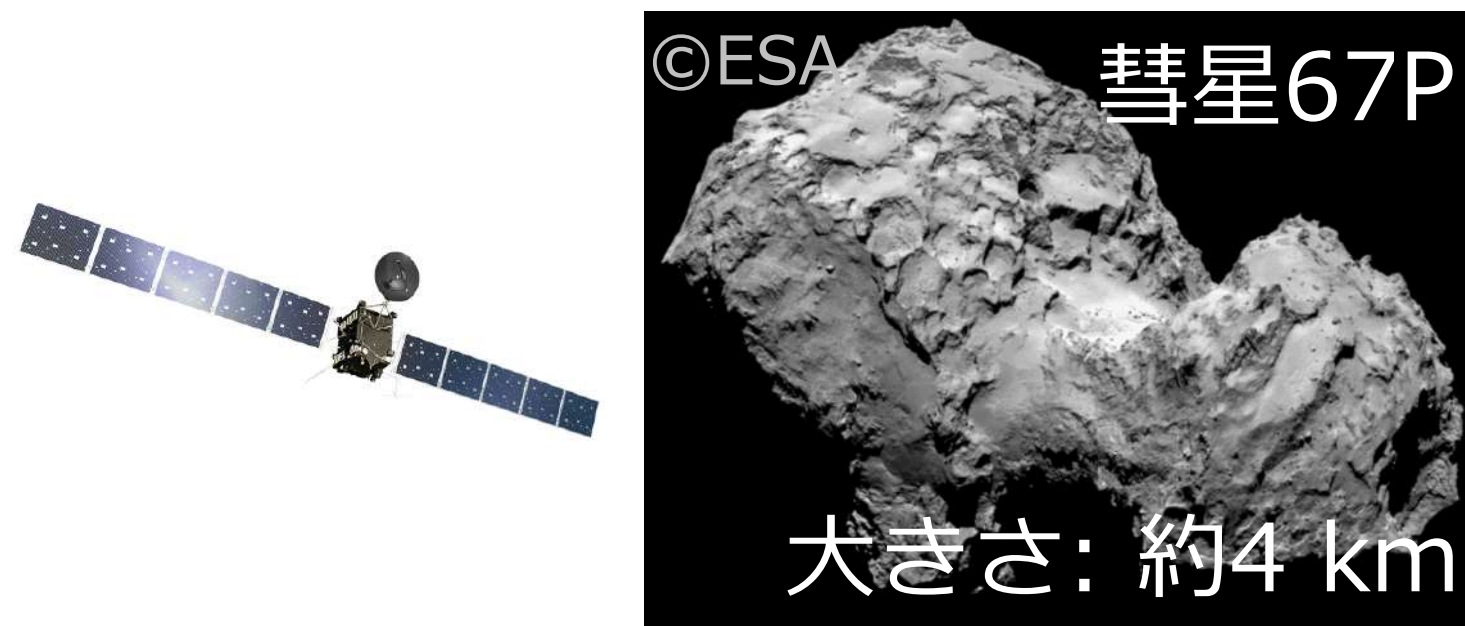
ふわふわなダスト集合体で彗星を説明できるのか？

「ふわふわな惑星のタネ」について調べる！

私の研究 —太陽系小惑星・彗星探査との関連—

ふわふわなダスト集合体で、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

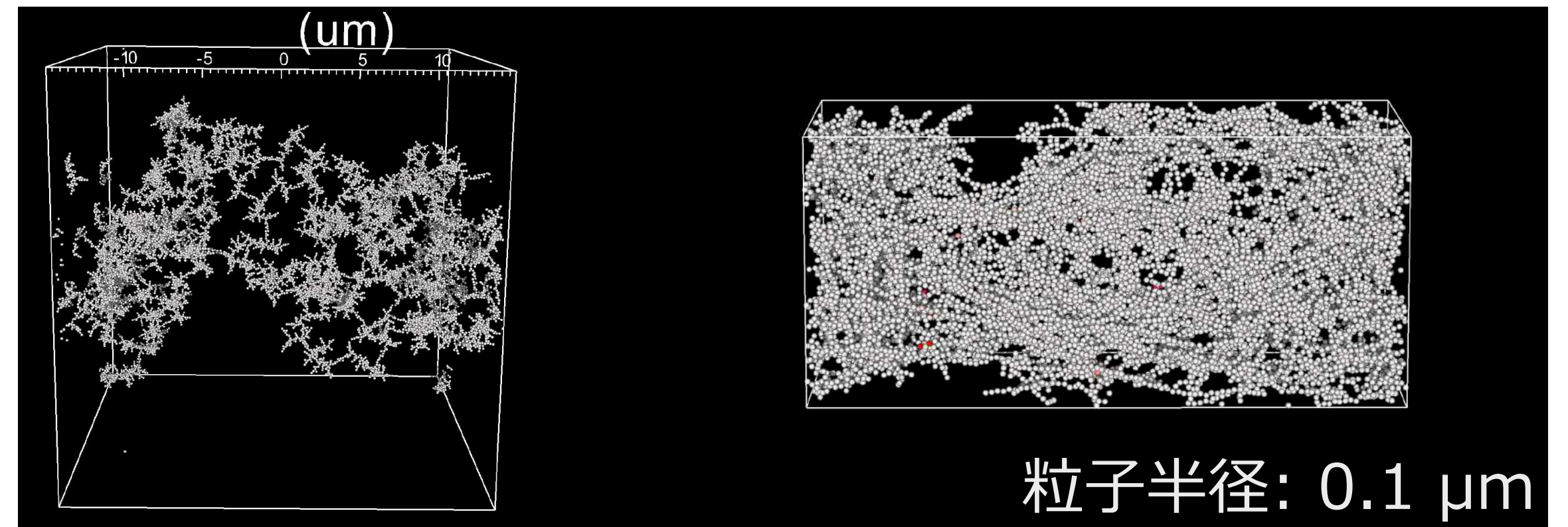


探査からわかること

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

(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

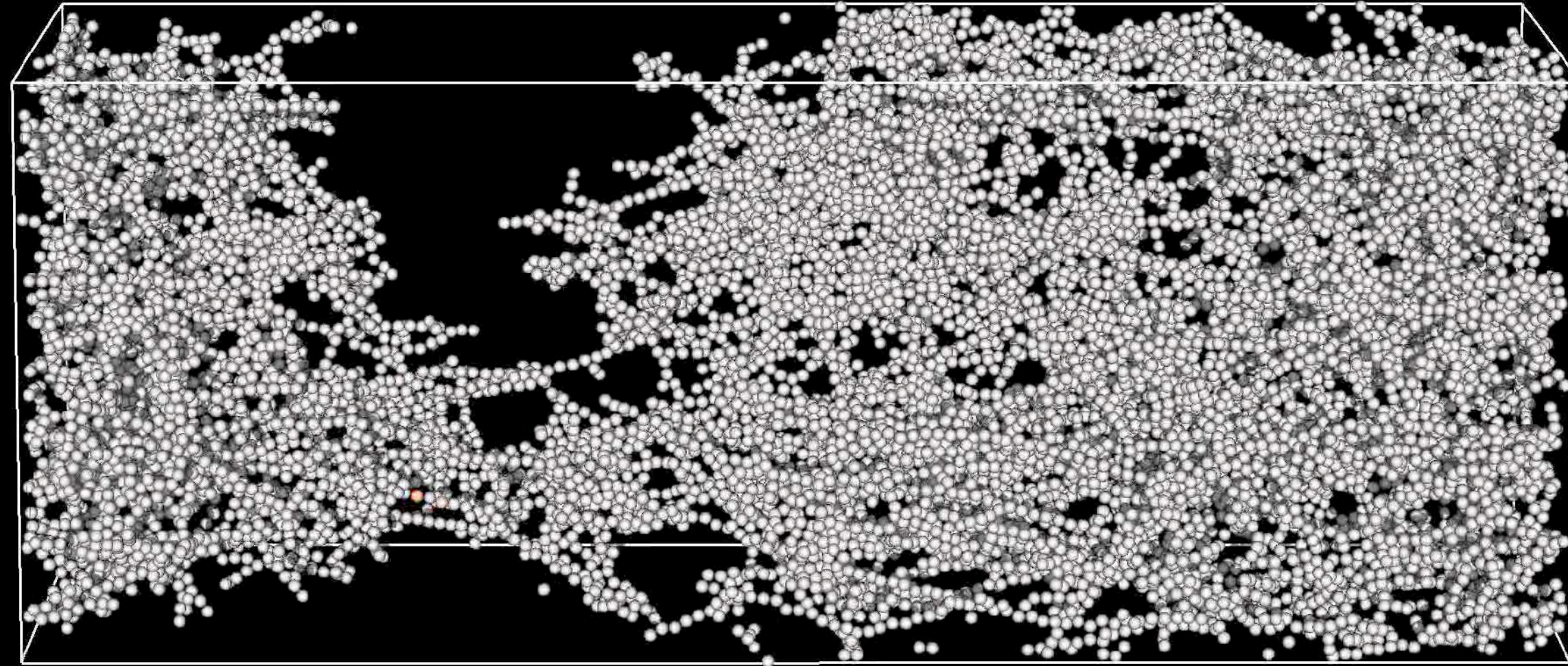


ダスト集合体についてやってきたこと

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

(Tatsuuma et al. 2019, 2023, 2024)

シミュレーションって何？何をしているの？



「シミュレーション」を説明するときには、よく動画を見せますが…

これは、パソコンで計算した結果、出てきた **数字** を **可視化** した画像をつなげて動画にしたものです

```
-4.180081e+00 -2.796186e+00 -2.575034e+00
-4.226994e+00 -2.627260e+00 -2.480924e+00
-4.121392e+00 -2.547886e+00 -2.296422e+00
-4.242199e+00 -2.440907e+00 -2.412852e+00
-4.044736e+00 -2.850831e+00 -1.805303e+00
-4.089885e+00 -2.739304e+00 -1.963789e+00
-4.257033e+00 -2.587092e+00 -1.971136e+00
-4.110256e+00 -2.600419e+00 -2.104822e+00
-3.948090e+00 -2.745812e+00 -2.980926e+00
-4.015515e+00 -2.860660e+00 -2.833087e+00
-3.888168e+00 -2.978574e+00 -2.708027e+00
-4.078756e+00 -2.942933e+00 -2.663309e+00
-3.517681e+00 -3.321165e+00 -2.994161e+00
-3.658494e+00 -3.223522e+00 -2.893010e+00
-3.843921e+00 -3.317122e+00 -2.801207e+00
-3.776109e+00 -3.134820e+00 -2.759246e+00
-4.075946e+00 -2.534134e+00 -2.570940e+00
-4.162785e+00 -2.521451e+00 -2.749514e+00
-4.371204e+00 -2.461194e+00 -2.816446e+00
-4.212470e+00 -2.472529e+00 -2.935874e+00
```

シミュレーションって何？何をしているの？

シミュレーションコードの一部

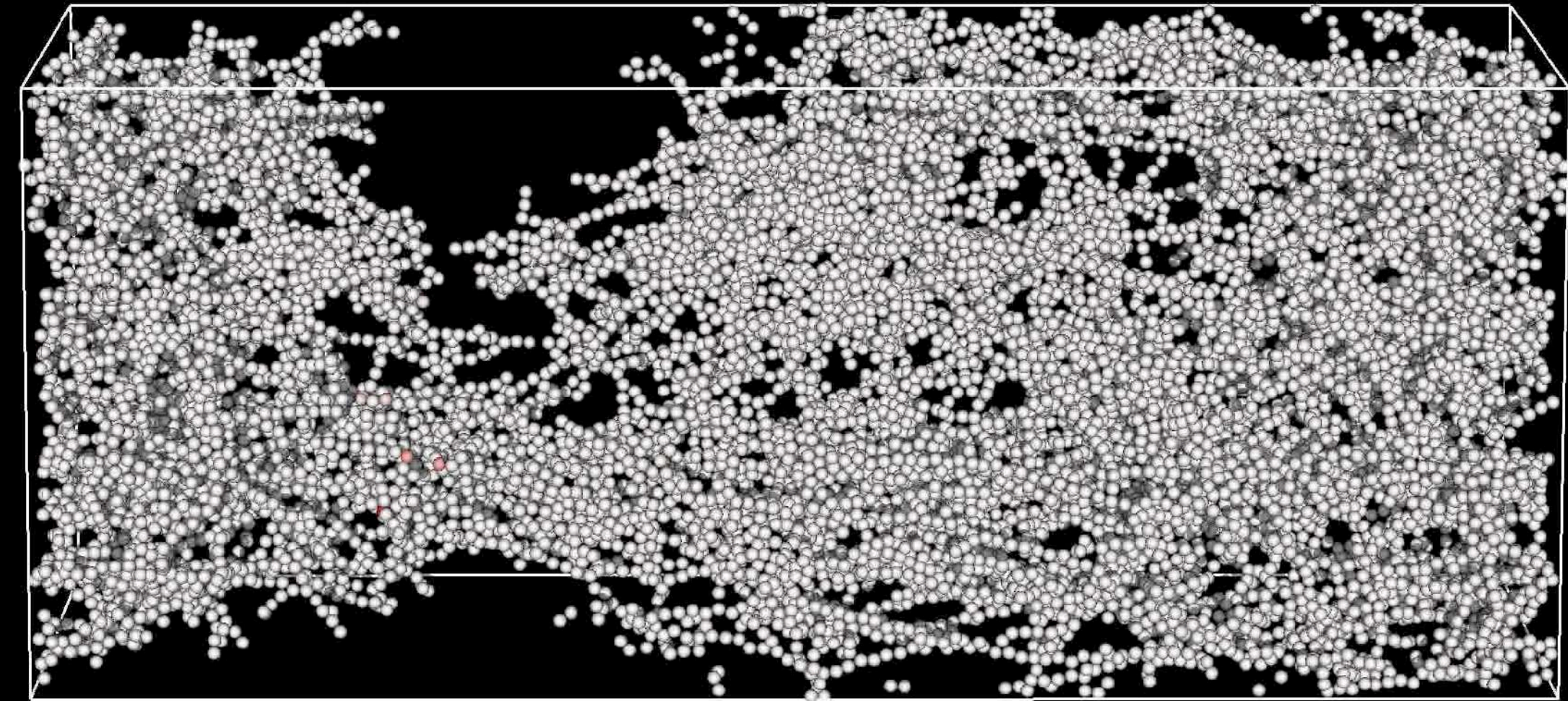
`t = t + dt;` dt: ものすごく細かい時間

```
if(flag_period==1){ // periodic boundary
  if (flag_shear == 1){ // shear
    dis_shear = dis_shear - 2.0*vwall[1]*dt;
  }

  for(i2=1;i2<=3;i2++){
    if(flag_shear==0){ // tensile & compression
      L[i2] = L[i2]-2.0*vwall[i2]*dt;
    }
    vwalltmp[i2] = vwall[i2];
  }
  if(flag_comp==1||flag_comp==2){ // compression
    for(i2=1;i2<=3;i2++){
      vwall[i2] = C_v[i2]*L[i2];
    }
  }
}
```

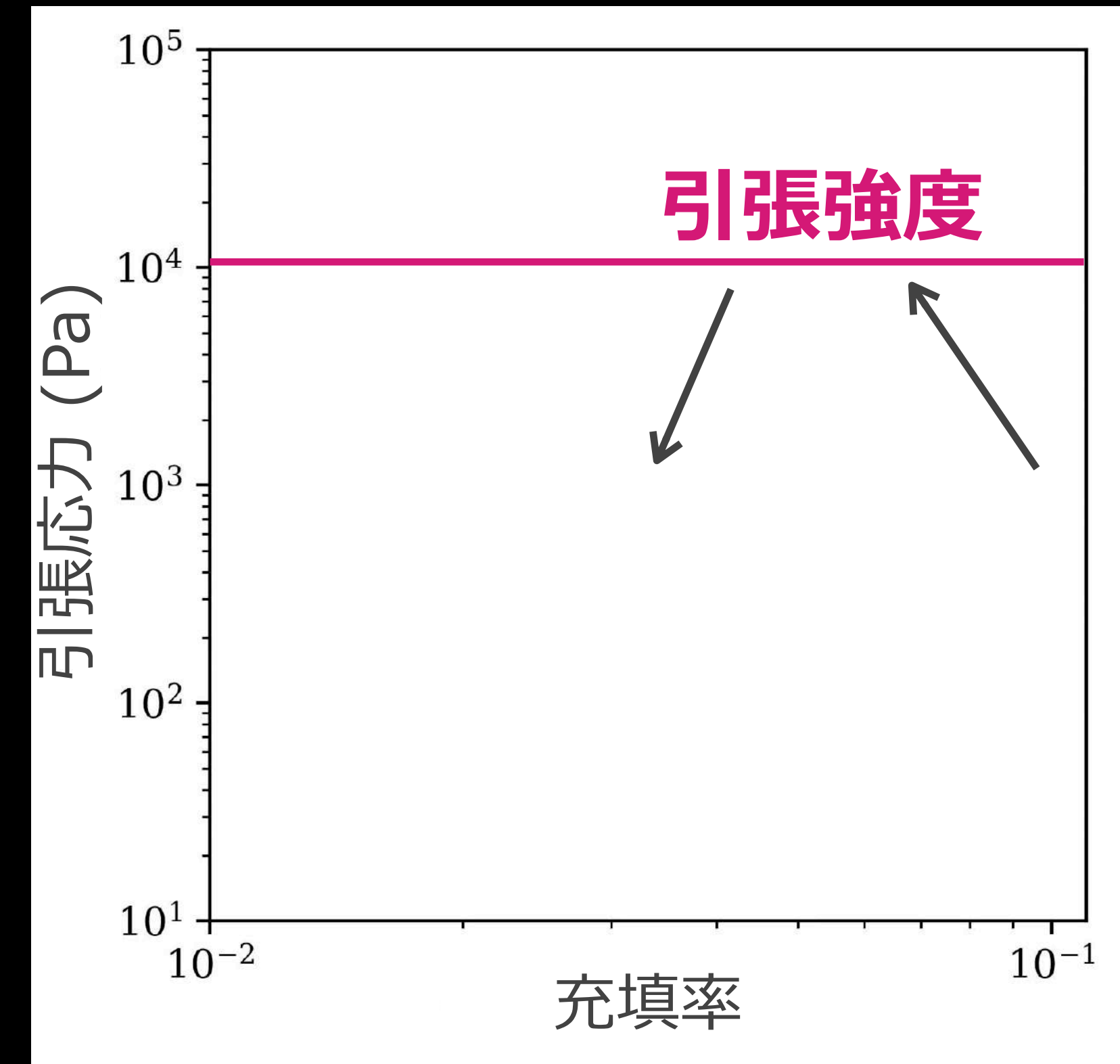
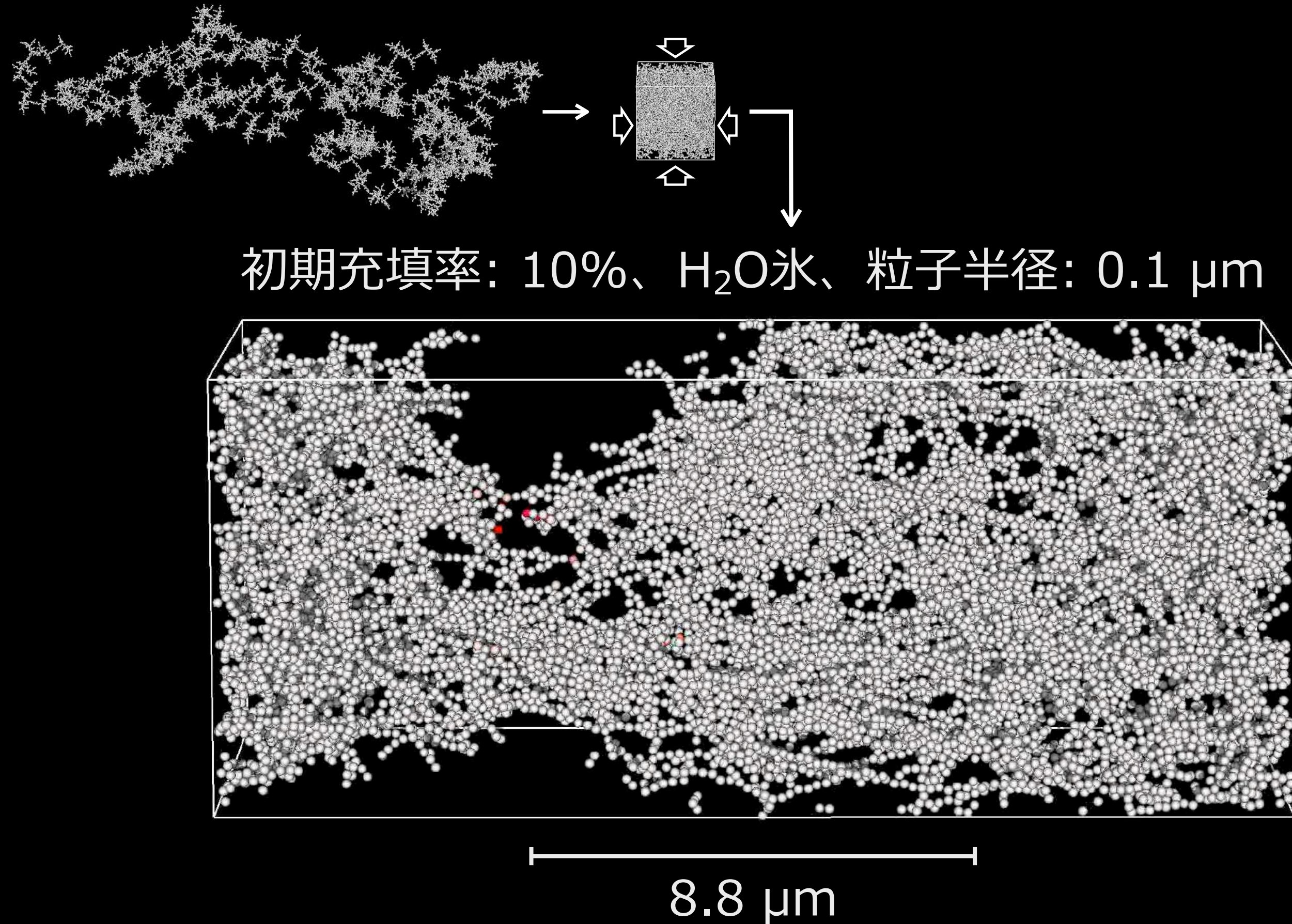
周期境界の壁を少し動かす

```
for(n=1;n<=np;n++){
  for(i2=1;i2<=3;i2++){
    v[i2][n] = v[i2][n]+fi[i2][n]/m*dt; 運動方程式
    omega[i2][n] = omega[i2][n]+trqi[i2][n]/im*dt;
    x[i2][n] = x[i2][n]+v[i2][n]*dt; 粒子の座標
  }
}
```



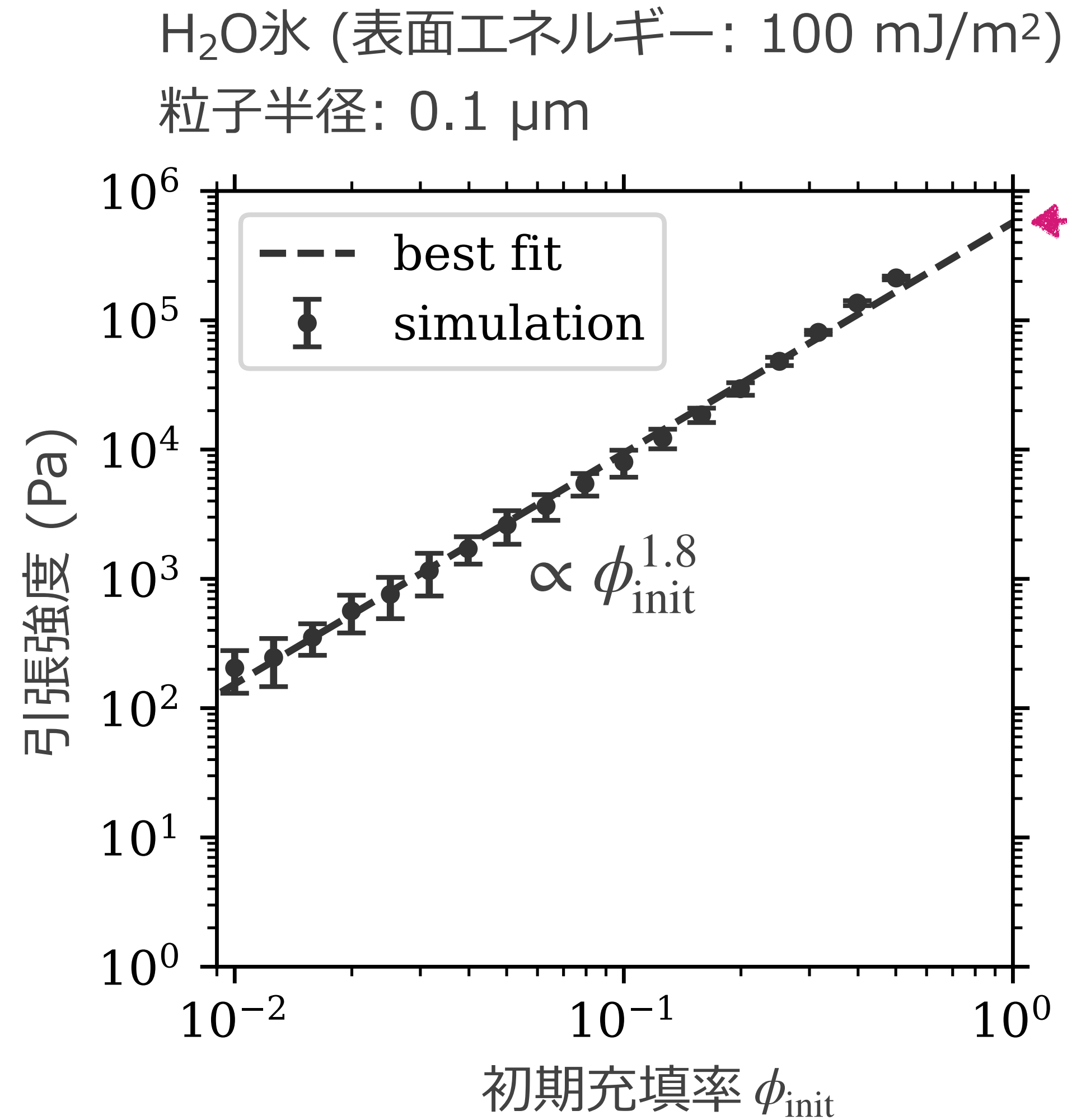
- 粒子1つ1つの座標を運動方程式($a=F/m$)に従って計算
- ものすごく細かい時間で区切って、そのときに各粒子にはたらく力を、それと接触している粒子から受ける力として計算
- 周期境界の壁を少しずつ動かしていく

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

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

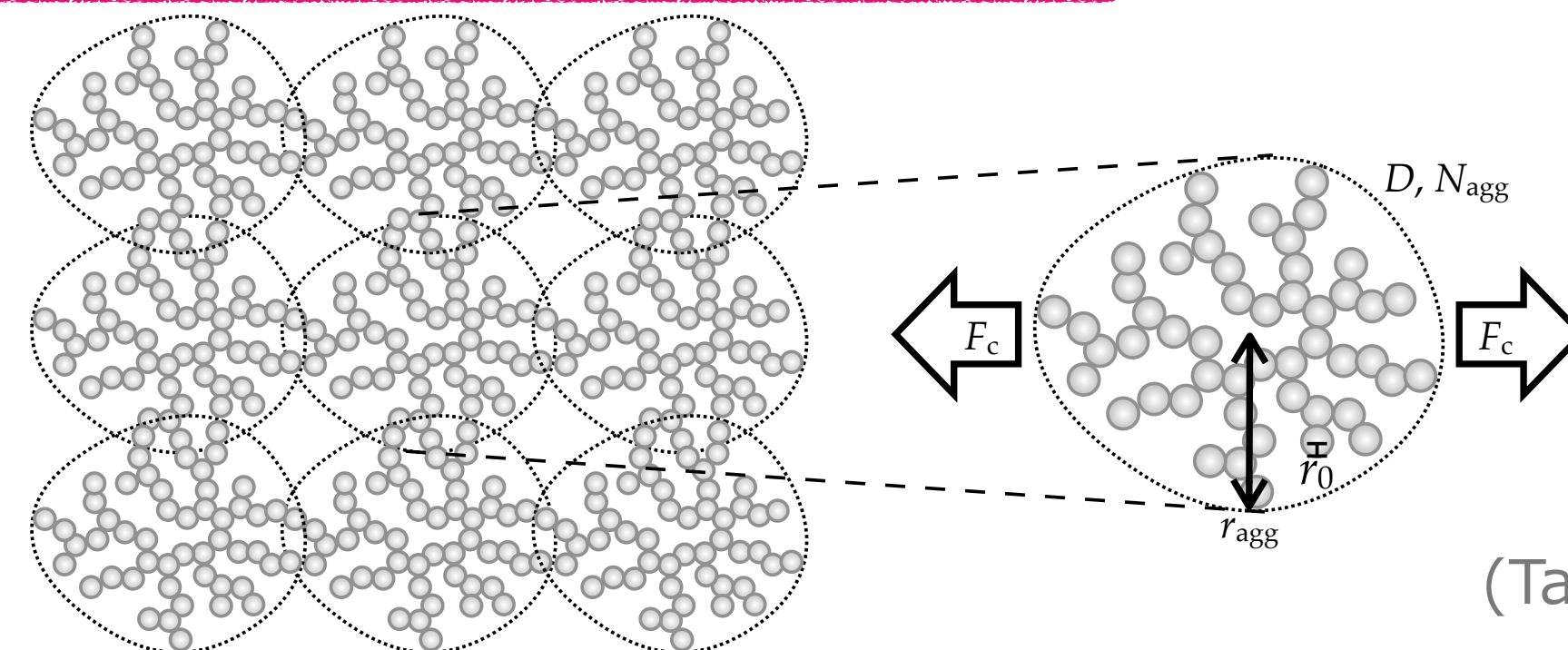
表面エネルギー 粒子半径 初期充填率

ダスト集合体の中の小さな構造同士 (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

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

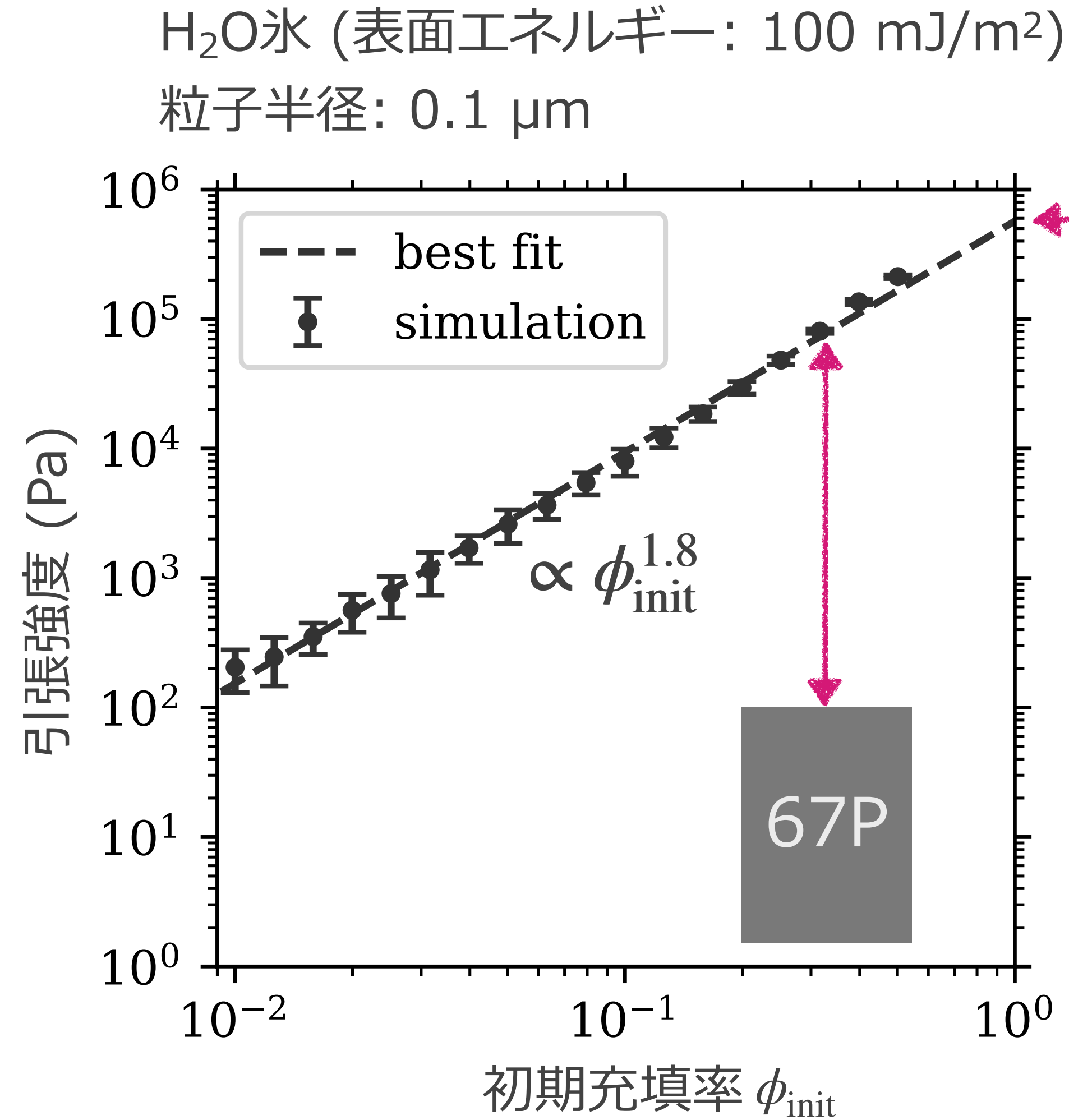
$$r_{agg} \propto N_{agg}^{1/D} r_0$$

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



(Tatsumura et al. 2019)

探査からわかる彗星の引張強度との比較

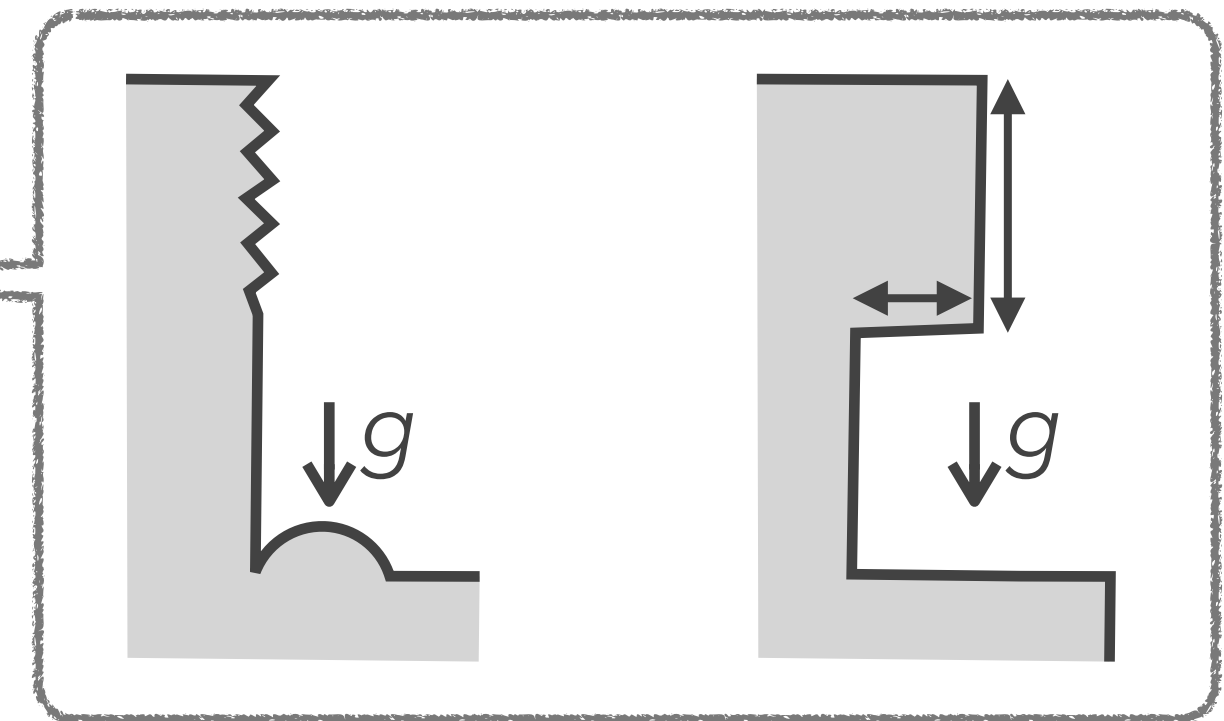
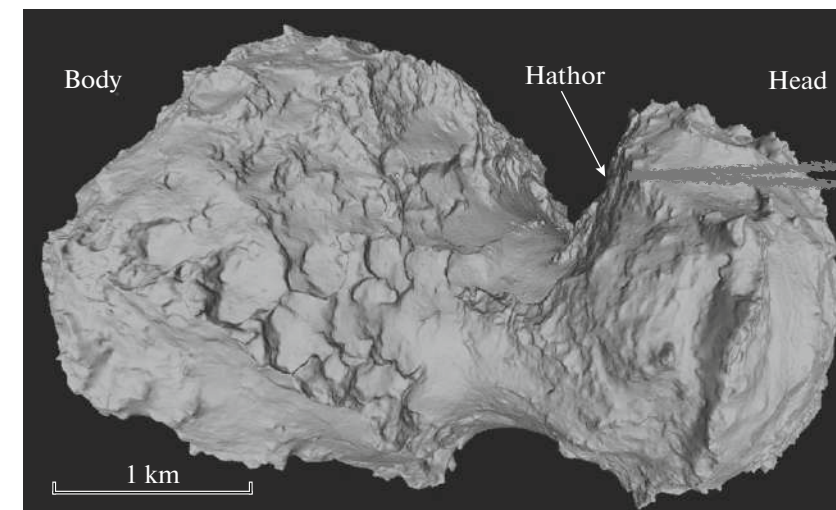


ダスト集合体の引張強度モデル

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

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?

(Tatsumi et al. 2019)

まとめ

- 0.1 μm 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)
- 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星について
 - 彗星は微惑星の生き残りであり、大規模な破壊や熱進化を経験していない可能性が高い
 - 彗星の密度は水氷の半分ほどで、タバコの灰くらい非常に脆い
- 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
 - 彗星の構成粒子半径は0.1 μm よりも大きくなければならない
 - 微惑星形成過程のヒントとなるかもしれない