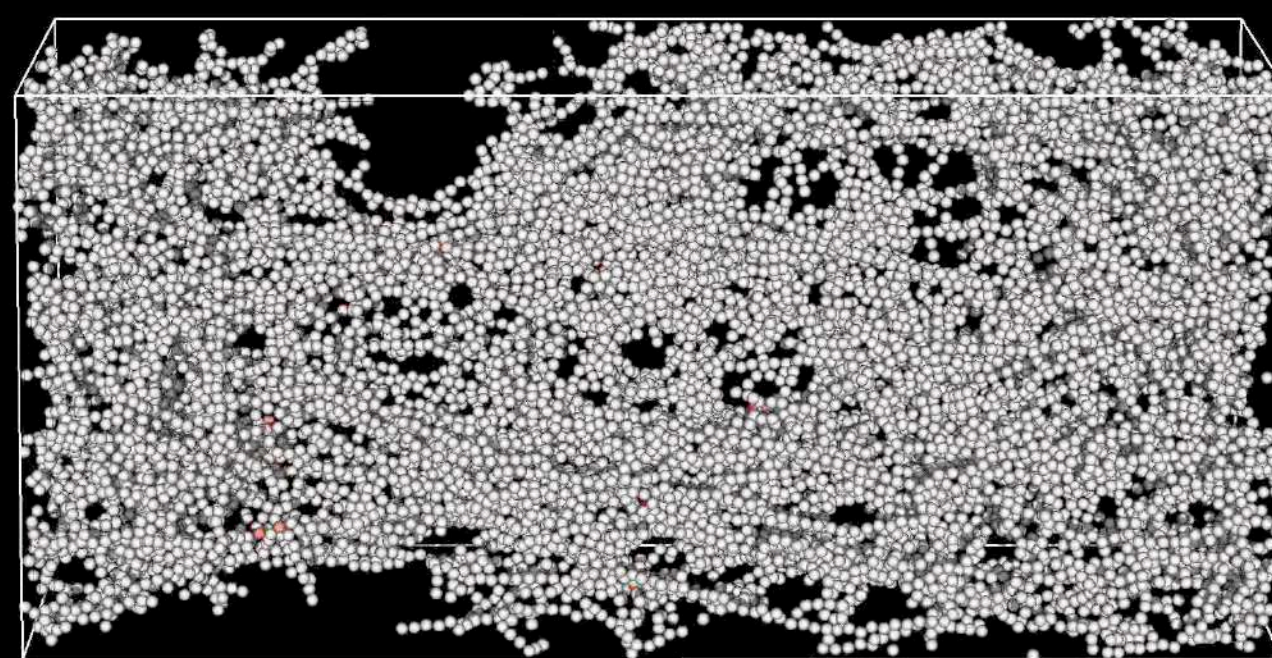
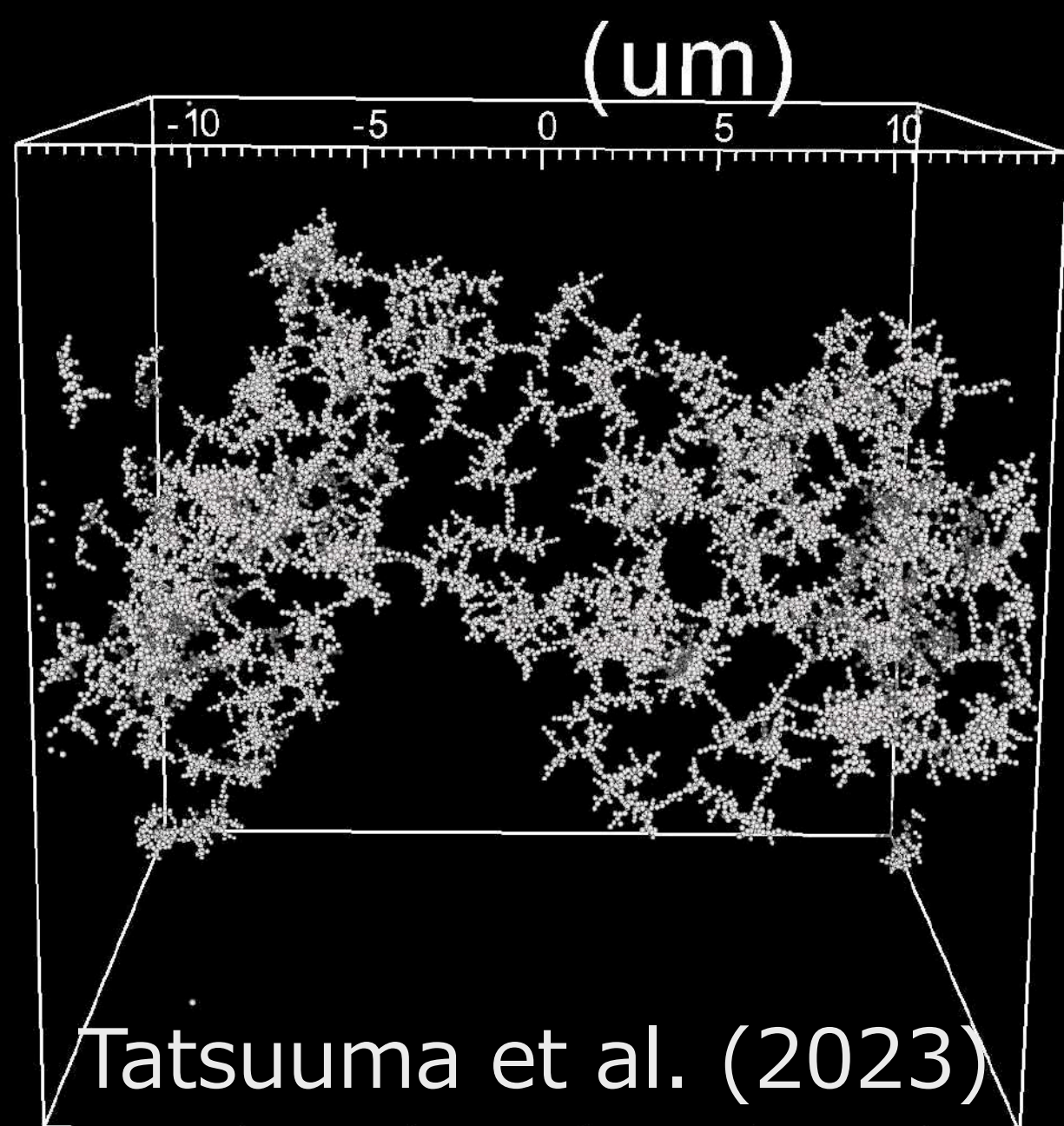
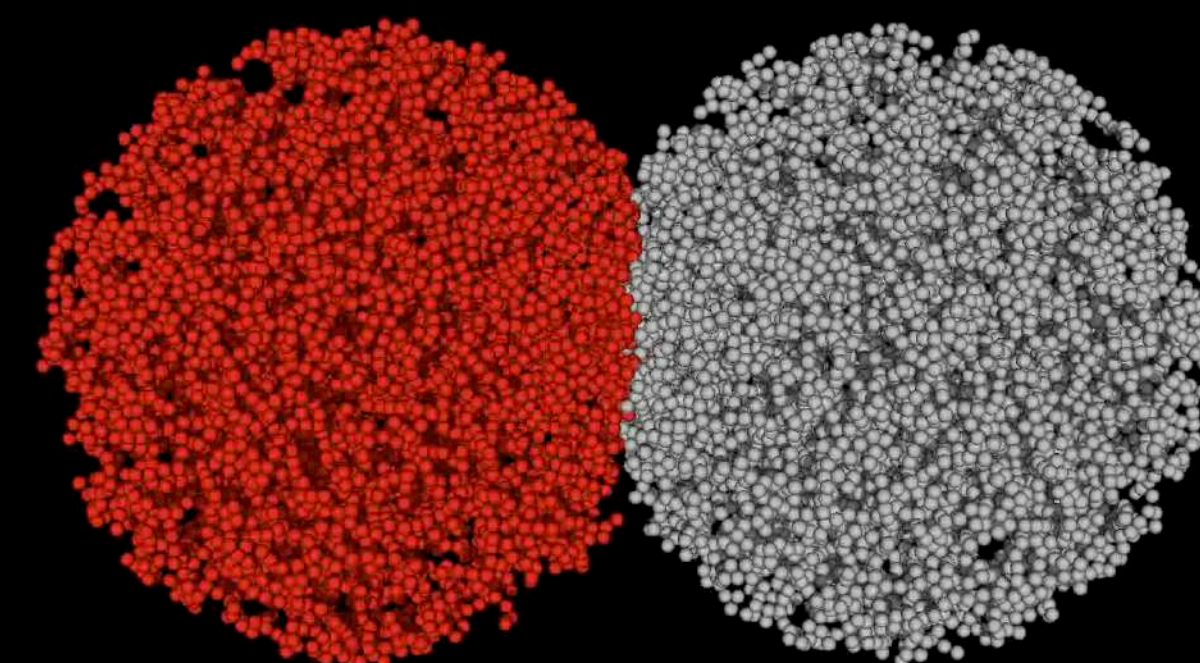


(AIや)数理・情報の研究者は何を研究しているの？

微粒子のシミュレーションで探る惑星形成



Tatsuuma et al. (2019)

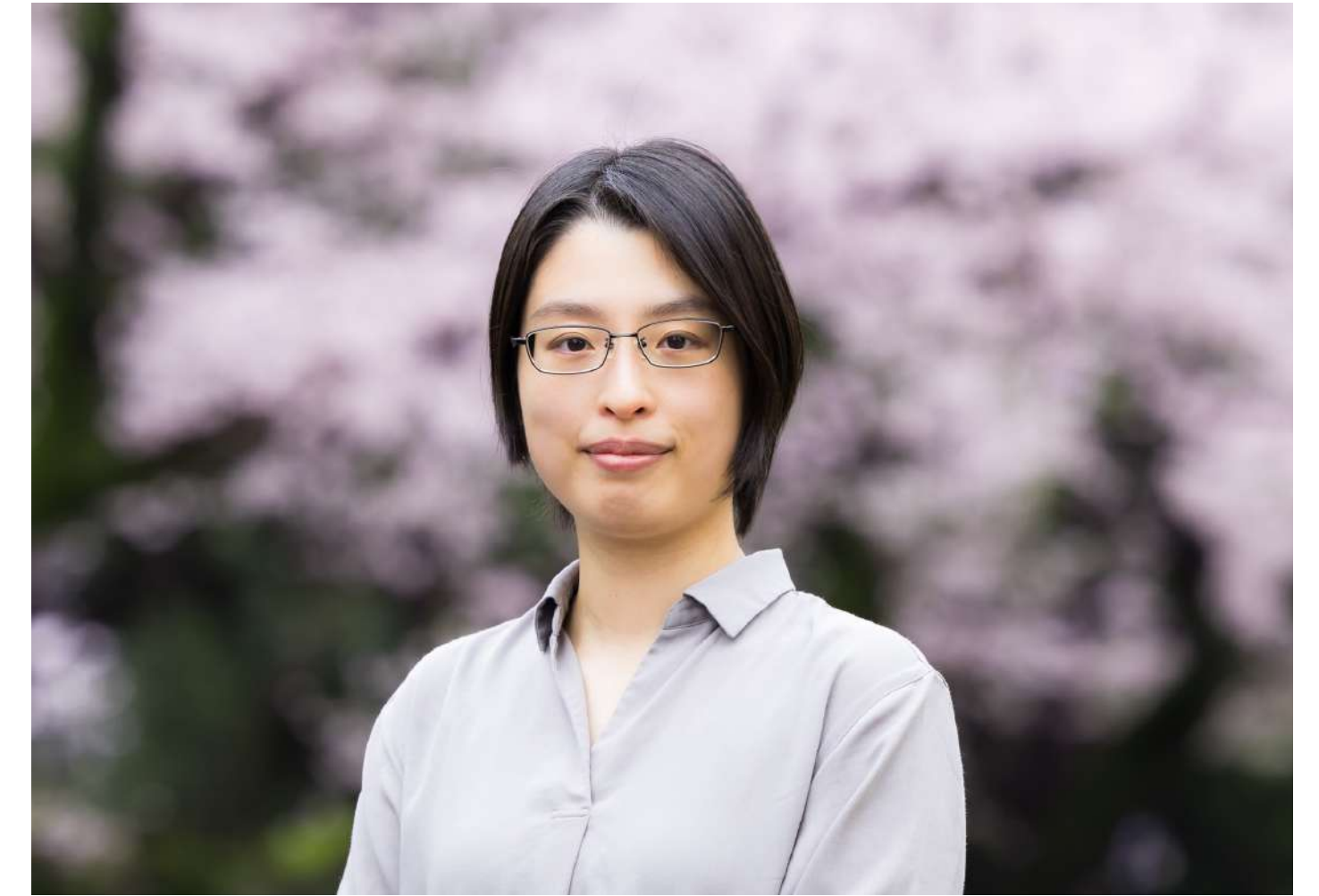


辰馬 未沙子 (たつうま みさこ)

理化学研究所 数理創造プログラム (iTHEMS) 研究員

簡単な自己紹介

- 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:
 - 中学校: 東京都三鷹市立第二中学校
 - 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:
 - 東京科学大学 (2022-2023, 学振特別研究員) → 理化学研究所 (2023-, 研究員)



なぜ惑星科学の研究者になったのか？

- 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年次に学部学科を選べる東京大学を受験**

中高時代は部活三昧
音楽や漫画も好き！

- 大学学部時代：惑星形成論との出会い

- 学部1年のとき惑星形成論の授業を受け、面白いと感じる → 理学部天文学科へ進学

太陽光発電にも興味あったけど
自分の「好き！」を大事にした

- 大学院時代：研究者になることを決意

- 修士課程のとき夫（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 → 博士課程へ進学
- 研究者という職業に挑戦することを決意し、子供を産むタイミングを考える → 今がいいのでは？

理論って面白い！
シミュレーション楽しい！

詳しくは「**研究者であり続けるために 辰馬**」で検索

天文学・惑星科学って何の役に立つの？と言われるけれど

- 惑星がどのようなプロセスを経て形成されるのか、わからないことがたくさんある
- それを解明しても、直ちに何か社会の役に立つとは限らない
 - 役に立つかどうかは、長い目で見ないとわからない
- 人を楽しく・わくわくさせ、人生が豊かになることがあってもいいのでは？
 - 例えば、私は謎解きイベントが好きで、よくそれに参加するが、これも直接社会の役に立ってはいない
- 天文学・惑星科学を極めたあとに、全く異なる分野に挑戦する人も多い
 - 何かを極めることは、それ自体が価値あるスキルで、応用先は幅広い
 - 何かを極めるときには、自分の「好き」が原動力になる
- 皆さんには、**自分の「好き」を信じ、大切にしてほしい**

最終的に「好き」とは違う仕事でも、「好き」を極めた経験そのものが財産！

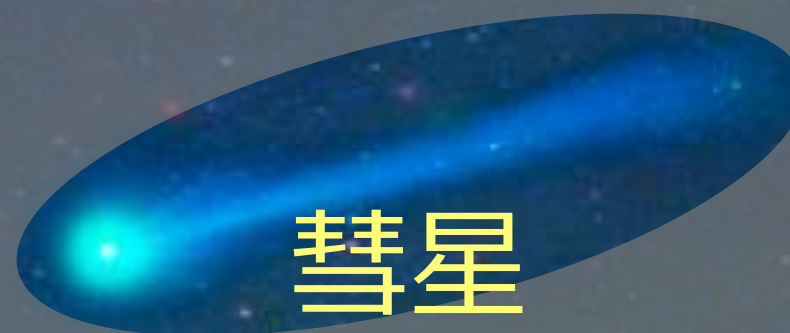
惑星はどのように形成するのか？

…の前に、惑星について簡単に紹介

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

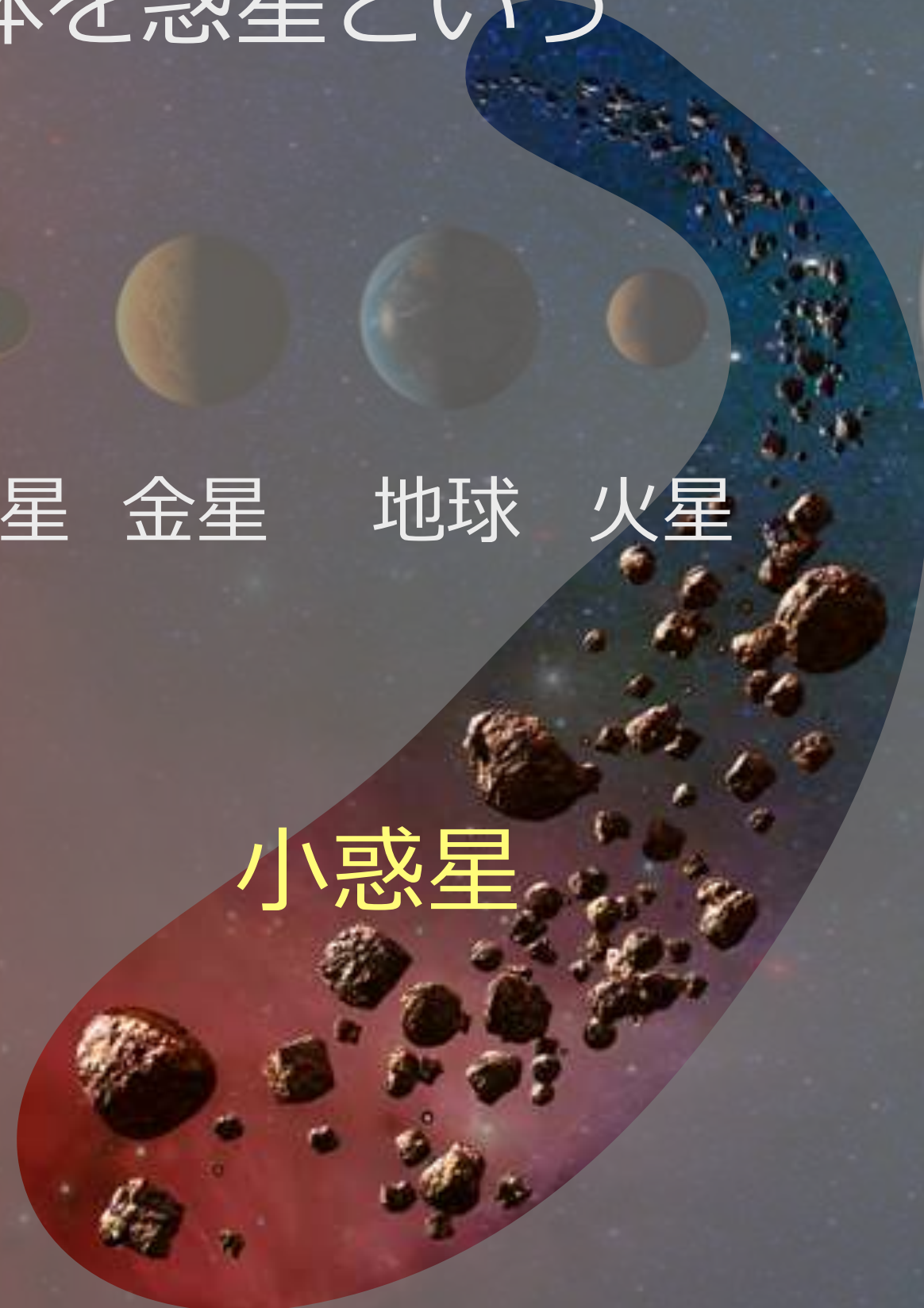


土星



天王星 海王星

小惑星



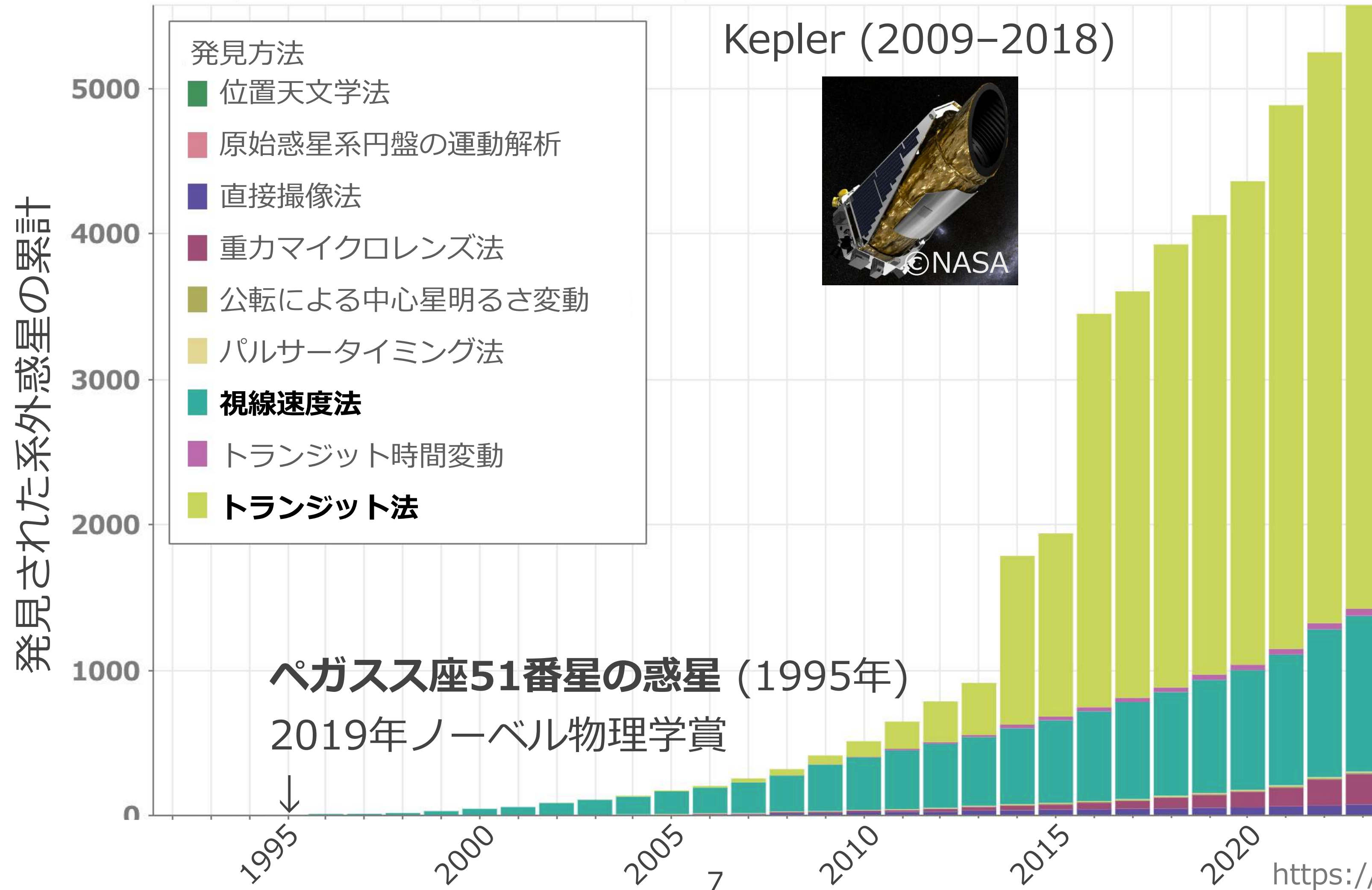
小惑星・彗星：惑星になりきれなかったもの

※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

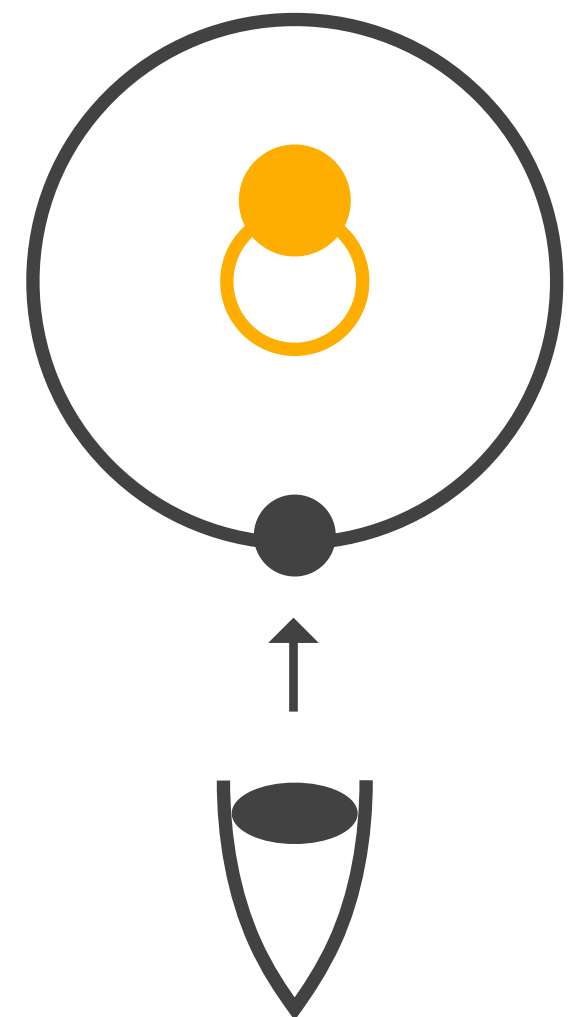
太陽系の外に惑星はあるの？

→ ある！系外惑星は5000個以上見つかった！

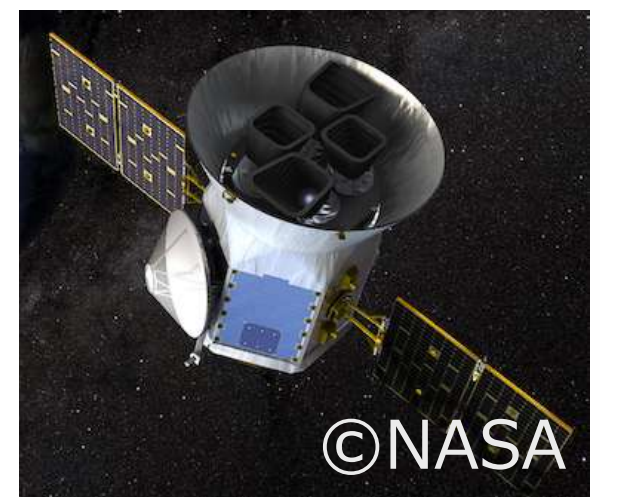
17 Sep 2024 exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



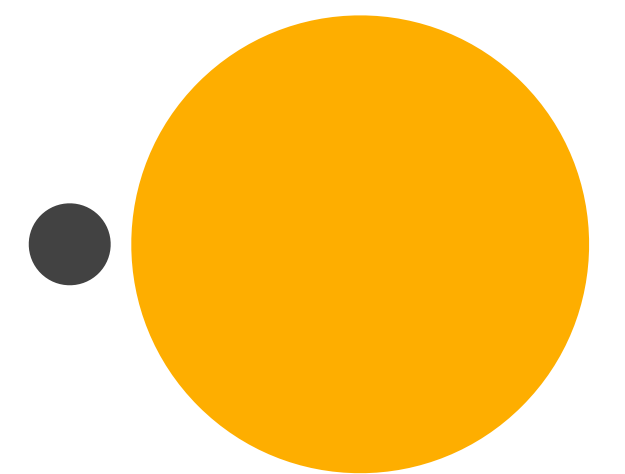
視線速度法



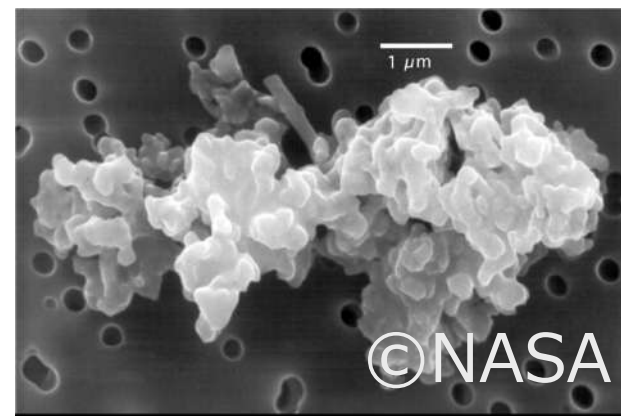
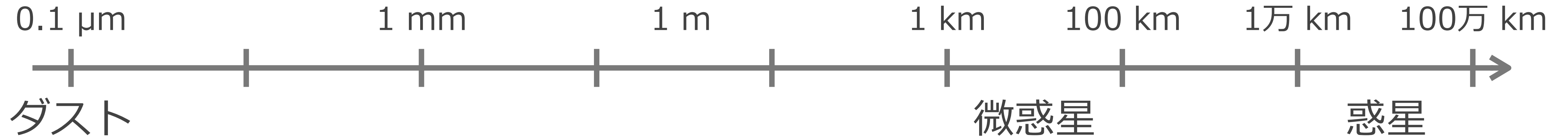
TESS (2018–)



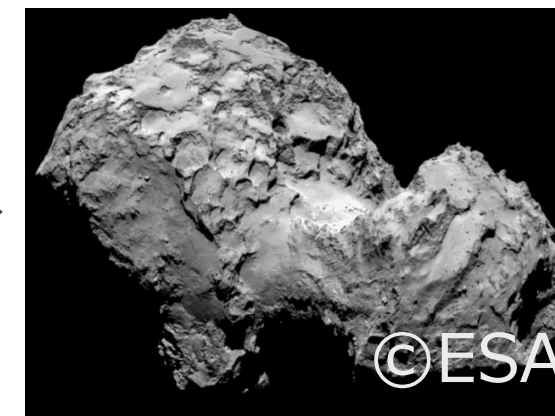
トランジット法



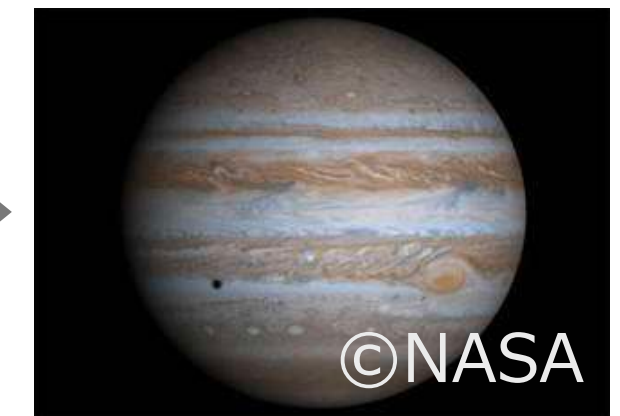
惑星形成とは？ —固体のサイズ成長の観点から—



分子間力などの付着力で直接合体



重力で合体

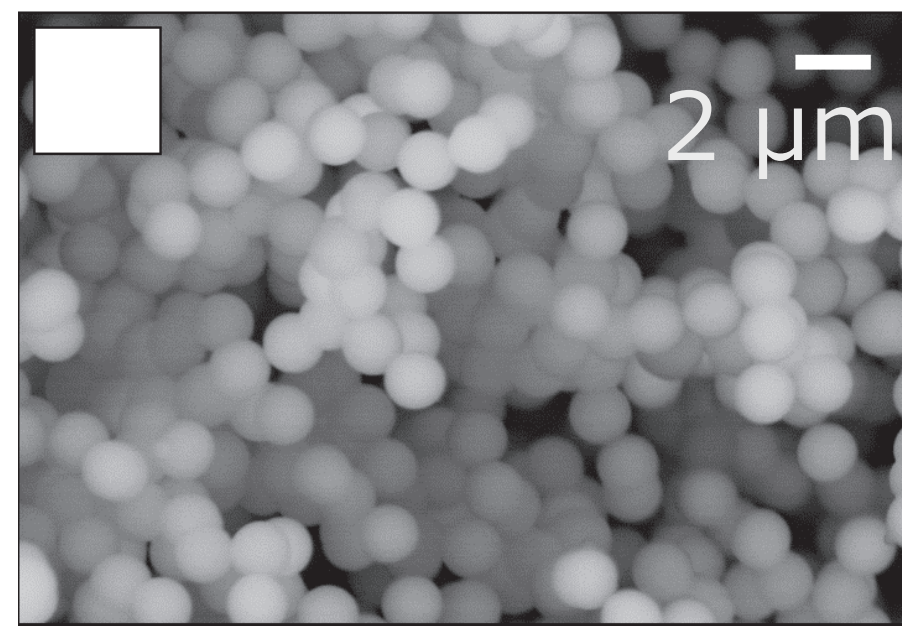


ダスト集合体のシミュレーション



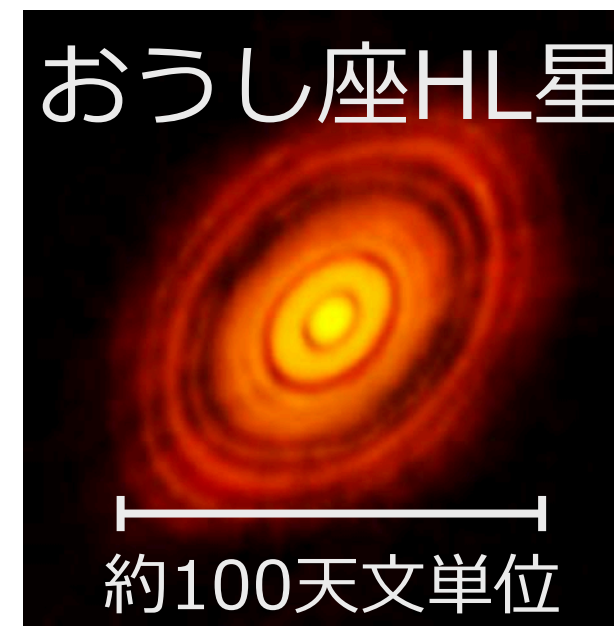
e.g., Suyama et al. (2008)

ダスト集合体の実験



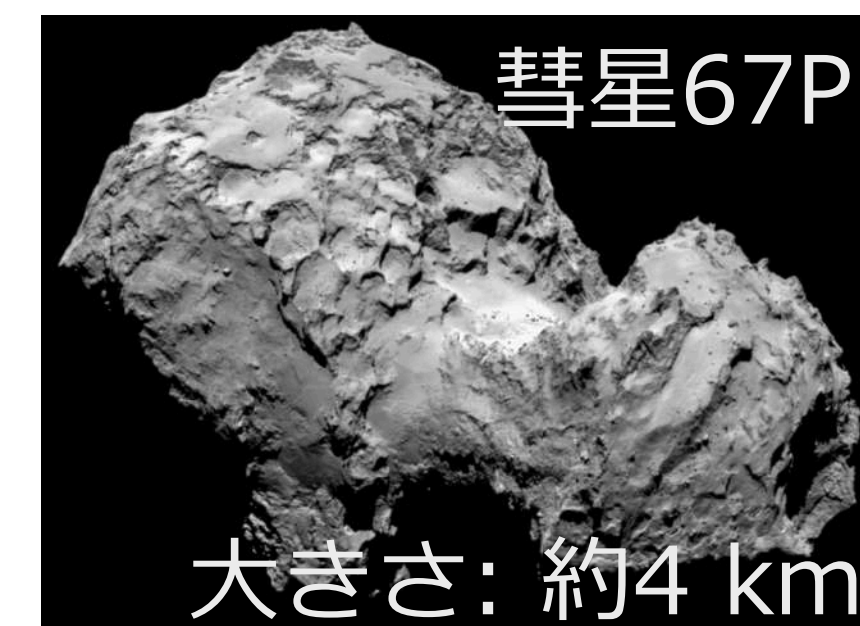
e.g., Blum et al. (2006)

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



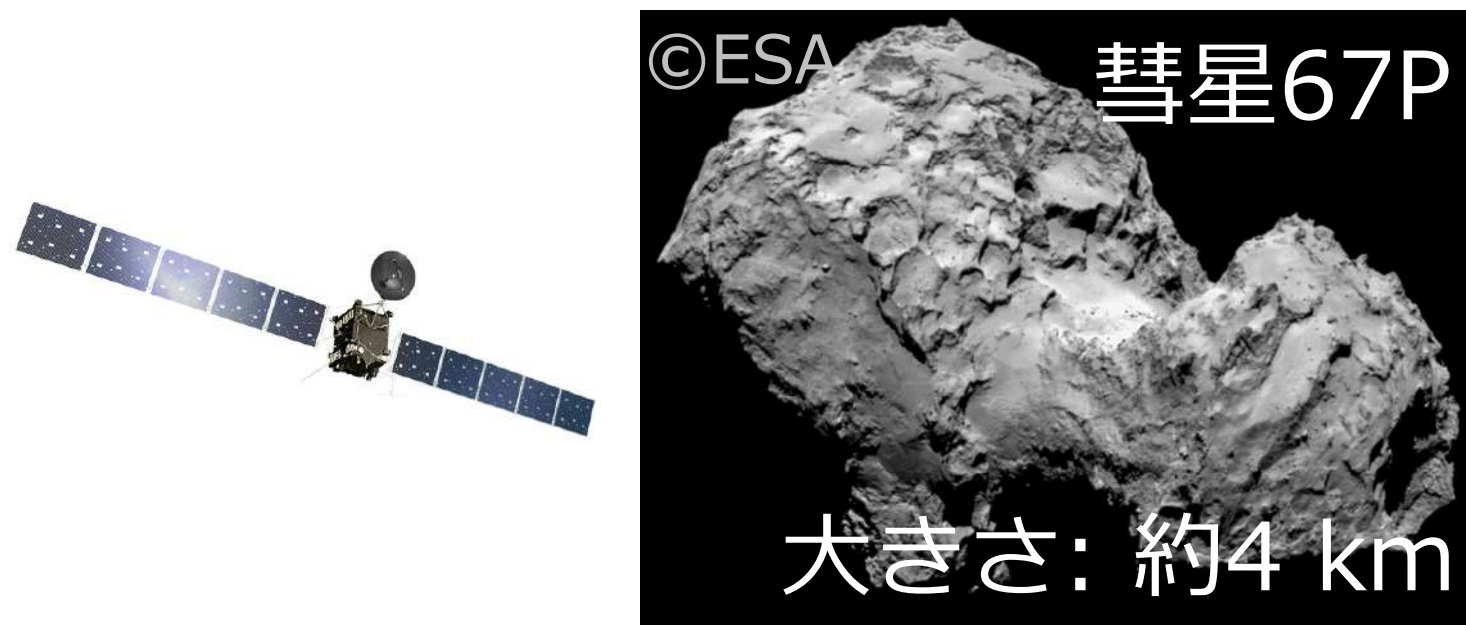
©ESA

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

私の研究 —太陽系小惑星・彗星探査との関連—

太陽系の小惑星・彗星探査結果を用いて、微惑星形成過程を明らかにしたい！

太陽系の小惑星・彗星探査

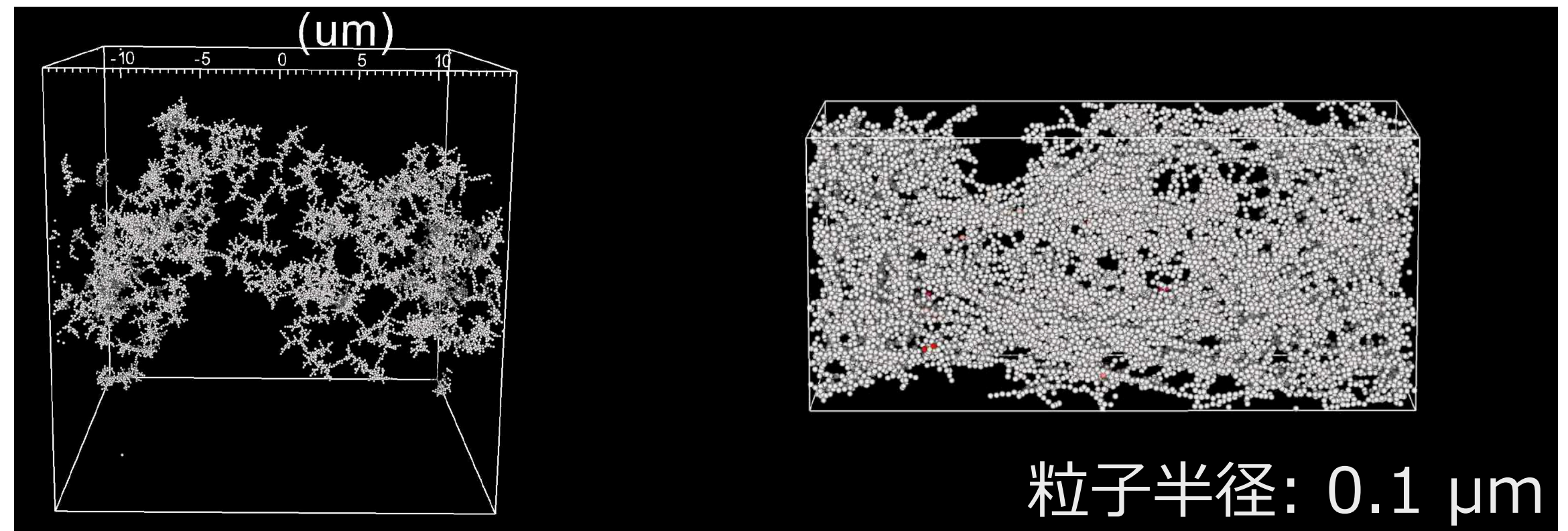


探査からわかること

- 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**

(Tatsumi et al. 2019, 2023, submitted)

シミュレーションでは何をやっているの？

シミュレーションコードの一部

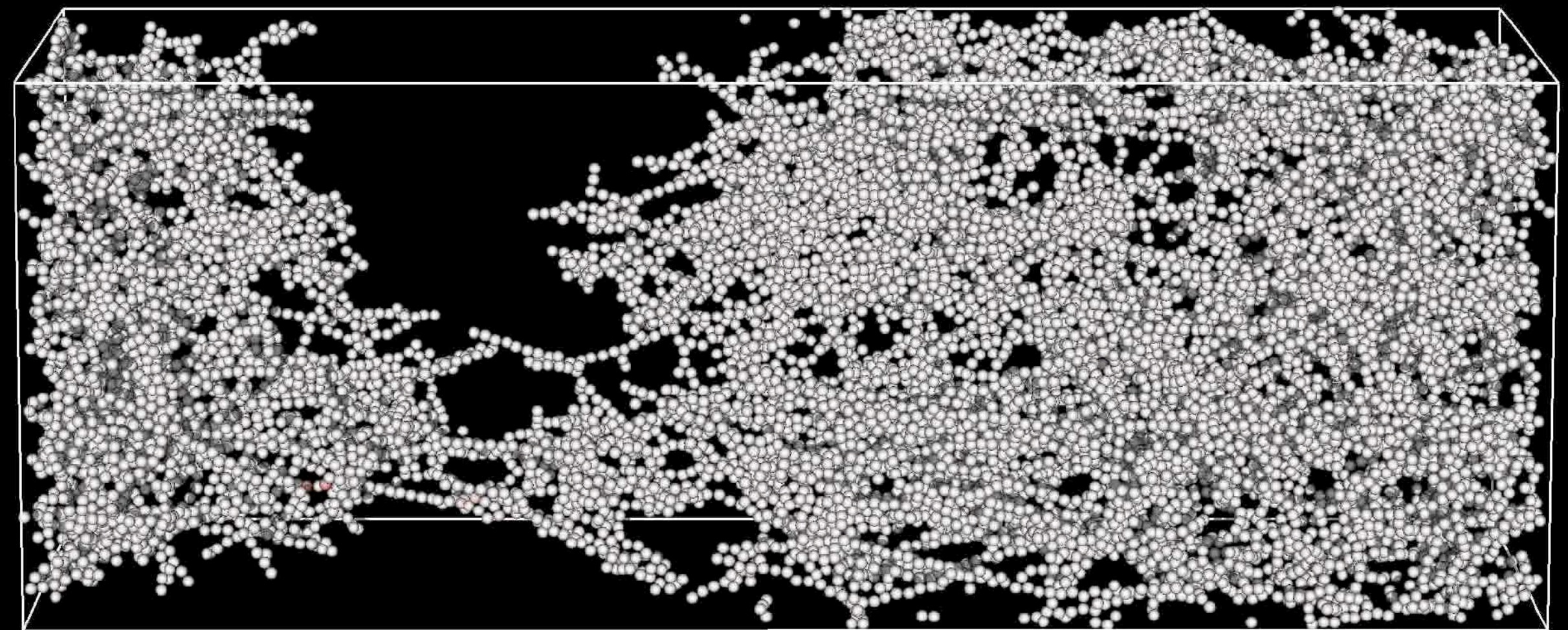
`t = t + dt;` dt: ものすごく細かい時間

```
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];
    }
  }
}
```

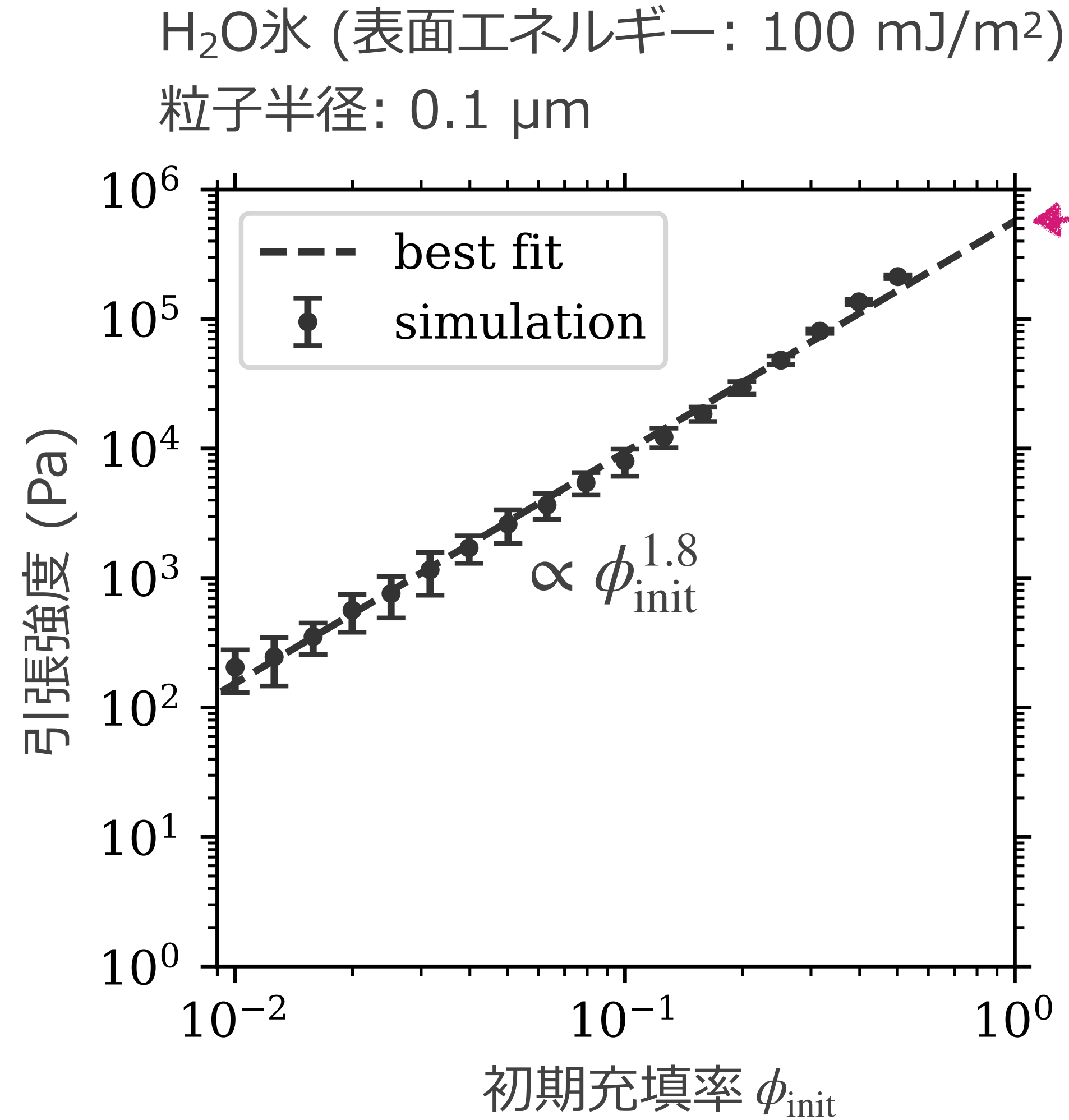
周期境界の壁を少し動かす

```
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

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

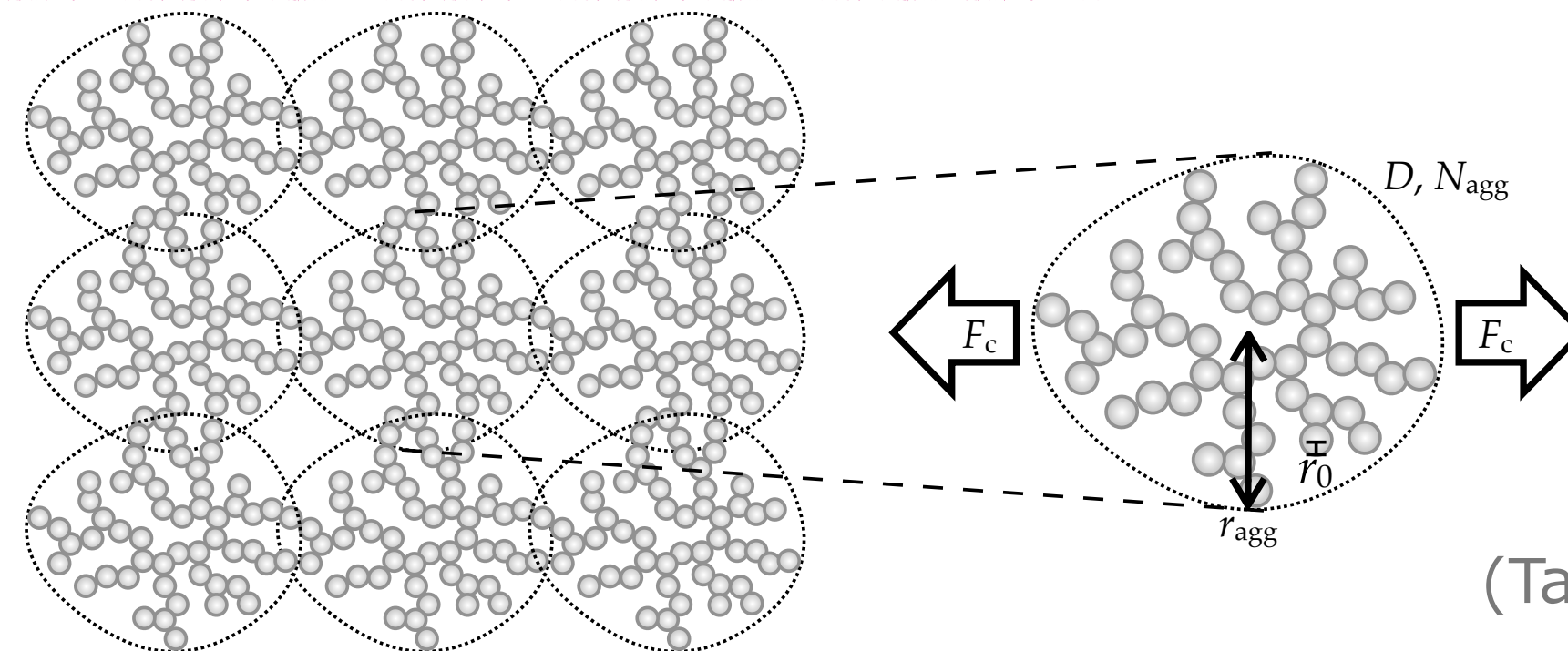
表面エネルギー 粒子半径 初期充填率

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

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

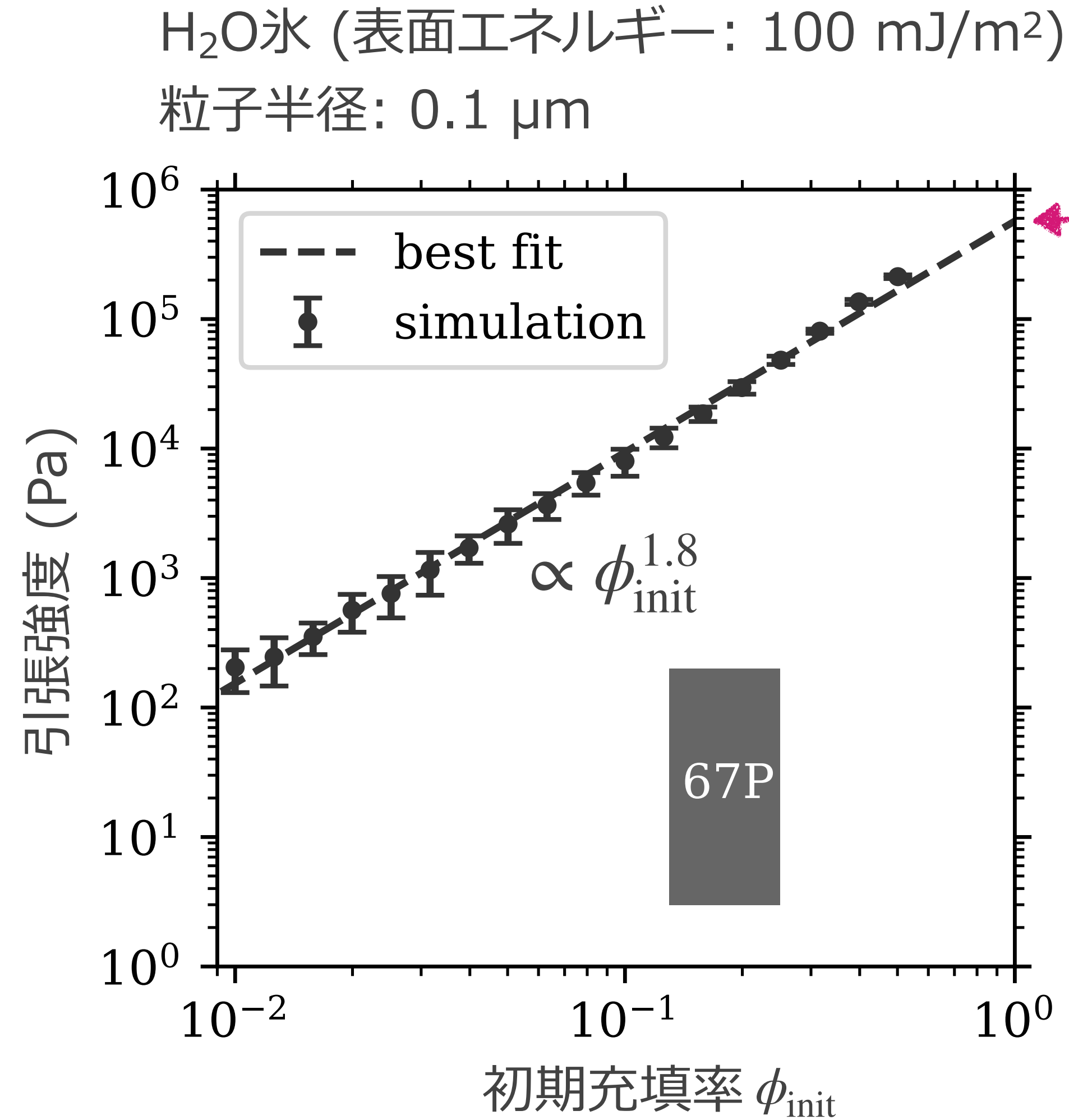
$$r_{agg} \propto N_{agg}^{1/D} r_0$$

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



(Tatsumi et al. 2019)

探査からわかる彗星の引張強度との比較

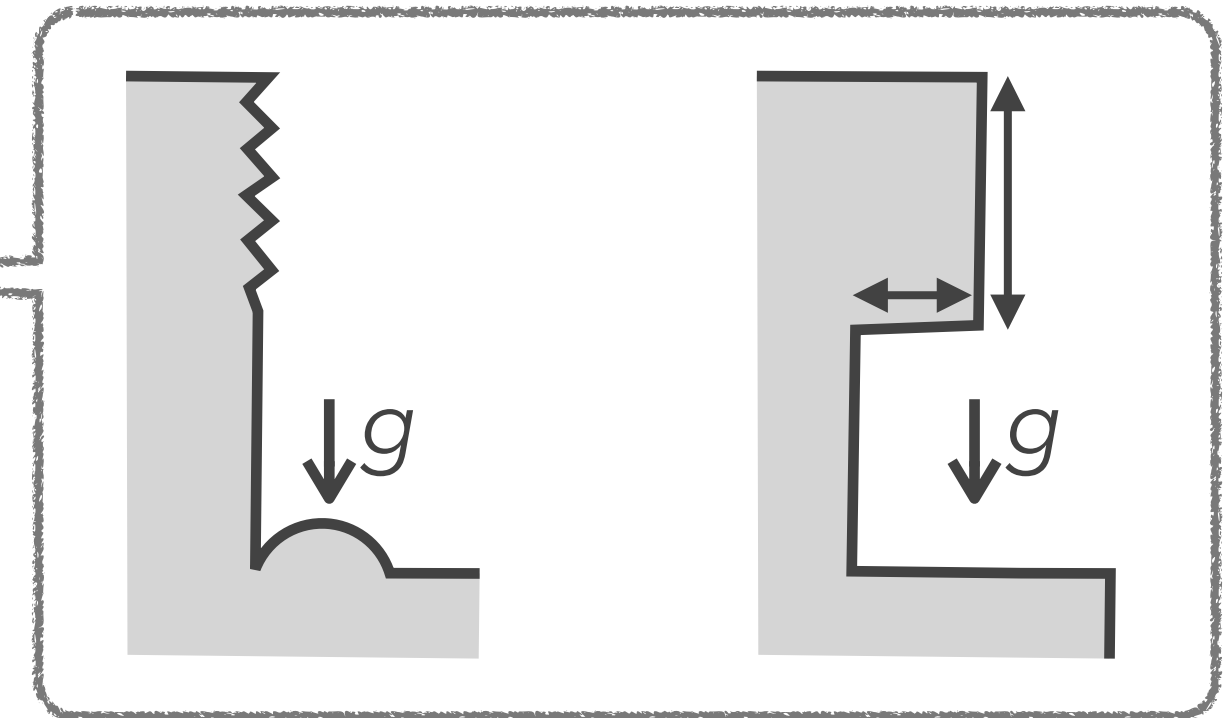
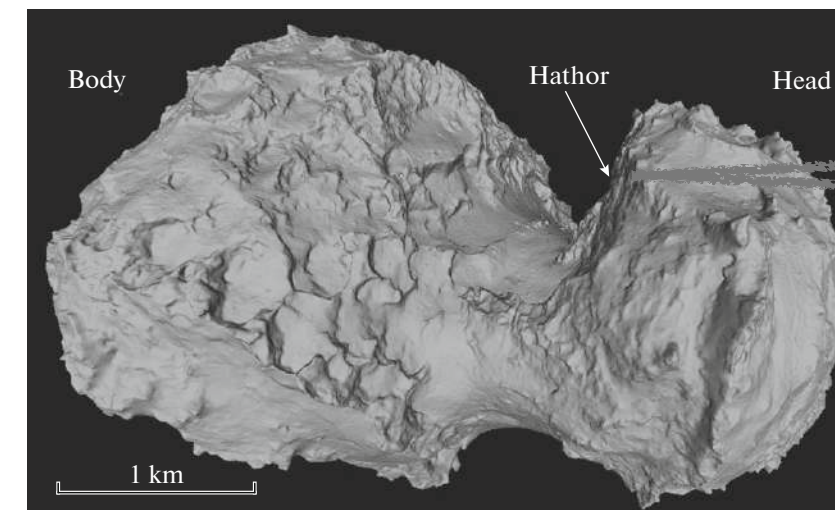


ダスト集合体の引張強度モデル

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

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

- 現在、5000個以上の系外惑星が見つかっている。惑星は宇宙にありふれている。
- 惑星形成は0.1 μm サイズのダスト (宇宙の塵) の付着成長から始まる。
 - ダスト粒子は分子間力で付着し、集合体を作る。
- これまでの私の研究: 惑星形成過程を明らかにするために、ダスト集合体の物質強度をシミュレーションで求めてモデルを作り、太陽系の小惑星・彗星と比較してきた。
 - ダスト集合体の引張強度を物理的に説明したモデルを作成した。
 - 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: 自分の「好き」を信じ、大切にしてほしい!