

微惑星形成研究としての彗星探査への期待

辰馬 未沙子¹ 奥住 聡¹ 片岡 章雅² 田中 秀和³ Tristan Guillot⁴

¹ 東京工業大学 ² 国立天文台 ³ 東北大学 ⁴ コートダジュール天文台

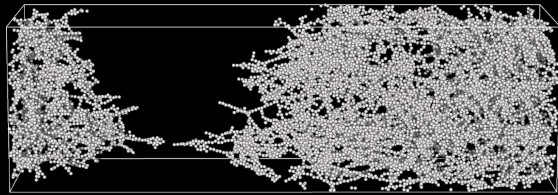
惑星はどのように形成されるのだろうか？惑星形成とは、 $0.1 \mu\text{m}$ の固体微粒子 (ダスト) から 1000 km を超える惑星までの、 13 桁を超えるサイズ成長過程である。特に、惑星の前駆体である $1\text{--}100 \text{ km}$ サイズの微惑星までの形成過程には、明らかになっていない部分が多い。私はその微惑星形成過程を明らかにするため、微惑星の生き残りだと考えられている、太陽系内の探査や観測が可能な彗星に着目し、その探査・観測結果から微惑星形成過程の情報を引き出す研究を行っている。本講演では、ダスト付着粒子計算を用いてダストの集合体の引張強度や圧縮強度を求め、彗星の物性との比較を行った結果について紹介し、今後の彗星探査への期待について触れる。

近年の探査技術の向上により、例えば彗星 67P に向かったロゼッタ探査機は、彗星表面の形状からその引張強度を見積もることに成功している。私はダスト付着粒子計算を用いてダスト集合体の引張強度を求め、それを彗星 67P の結果と比較した。その結果、彗星 67P はダスト集合体よりも非常にもろいことがわかった。また、彗星 67P の引張強度を説明するためには、構成粒子半径がこれまで考えられてきた $0.1 \mu\text{m}$ ではなく、 $7 \mu\text{m}$ から 1.3 mm 程度でなければならないことがわかった。

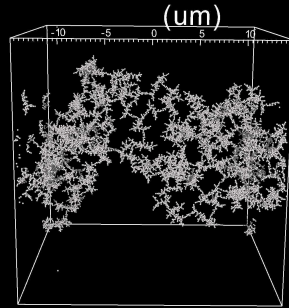
さらに、彗星のような数百 m を超える大きさの天体のバルク密度は、天体の自己重力と圧縮強度のつりあいによって決まると考えられている。私はダスト付着粒子計算を用いてダスト集合体の圧縮強度を求め、それを用いて自己重力とつりあうときのバルク密度を計算し、彗星のバルク密度と比較した。その結果、ダスト集合体の構成粒子半径が大きいほど、ダスト集合体はもろくつぶれやすくなり、バルク密度が高くなる傾向がわかった。そして、彗星 67P のバルク密度は、 $10 \mu\text{m}$ 以上の大きさの構成粒子であれば説明できることを明らかにした。

これらの結果をまとめると、彗星 67P は $0.1 \mu\text{m}$ サイズのダストの集合体ではなく、 $7 \mu\text{m}$ から 1.3 mm の大きさの構成粒子が必要であることがわかった。このような構成粒子は、 $0.1 \mu\text{m}$ サイズのダストからの成長過程を考えると、ダストが密に集まった集合体であることが予想される。すなわち、彗星は $0.1 \mu\text{m}$ サイズのダストの集合体が $7 \mu\text{m}$ から 1.3 mm の大きさになったものが、さらに集合体になったものである可能性があることを示唆している。このように、ダスト集合体の強度を用いることで、彗星表面の形状やバルク密度からその形成過程を探ることができる。そのためには、彗星探査において、彗星全球の写真を撮るなど、表面の地形モデルを構築できるような観測が必要である。

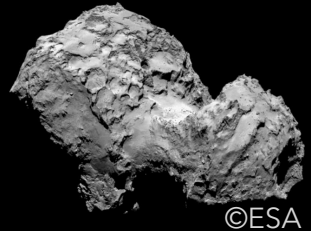
微惑星形成研究としての彗星探査への期待



Tatsuuma et al. (2019)



Tatsuuma et al. submitted



辰馬 未沙子 (東京工業大学 学振PD)

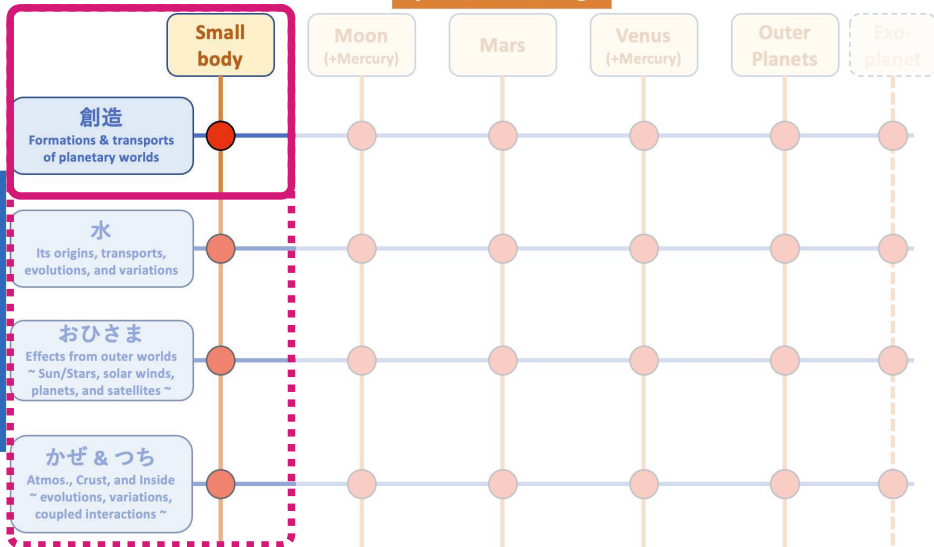
奥住 聡 (東京工業大学), 片岡 章雅 (国立天文台), 田中 秀和 (東北大学), Tristan Guillot (コートダジュール天文台)

はじめに：この講演の位置づけ

Focus of the Symposium 2023

Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy

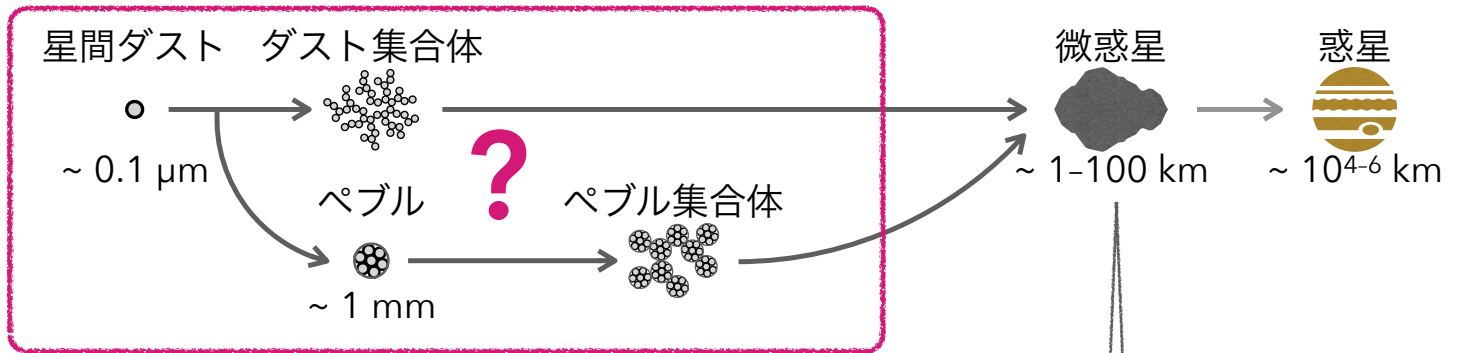
Splinter meetings



→ 太陽系小天体のデータを用いて、
微惑星形成過程を明らかにする

Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

ダスト粒子から微惑星までの固体成長過程



ダスト付着粒子計算

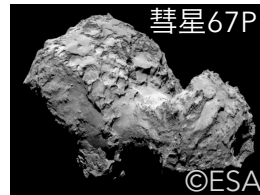


e.g., Suyama et al. (2008)

物性 (強度など) を比較

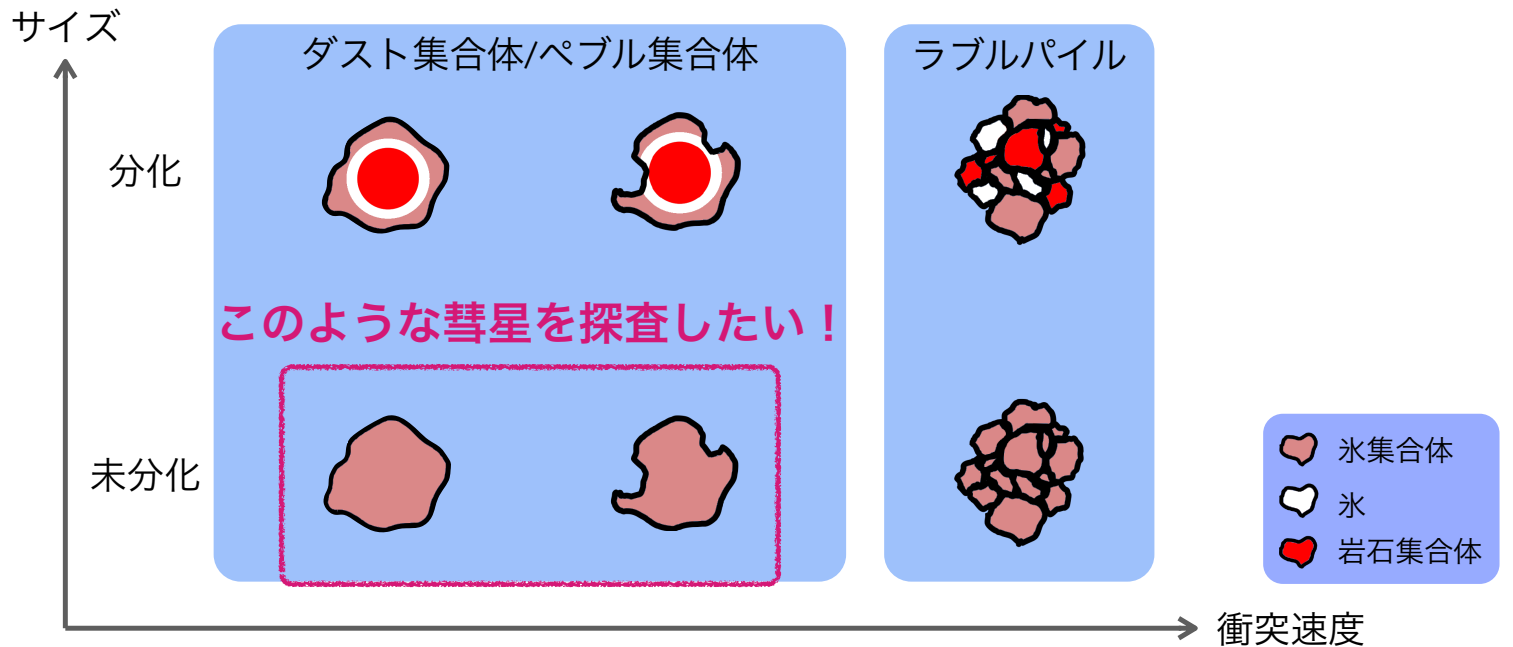
ダスト成長過程を明らかにする

太陽系小天体探査



e.g., Rosetta mission (2014)

なぜ彗星なのか？—微惑星に最も近い天体

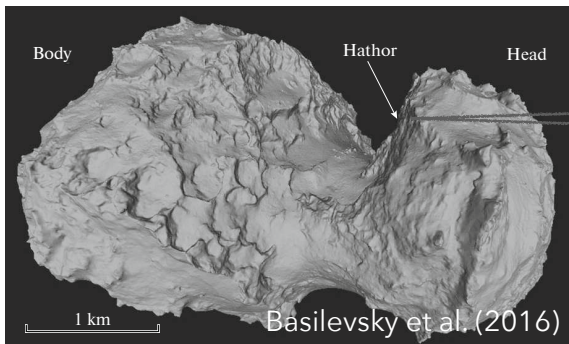


Blum et al. (2022)より改変

なぜ探査なのか？—表面形状からわかること

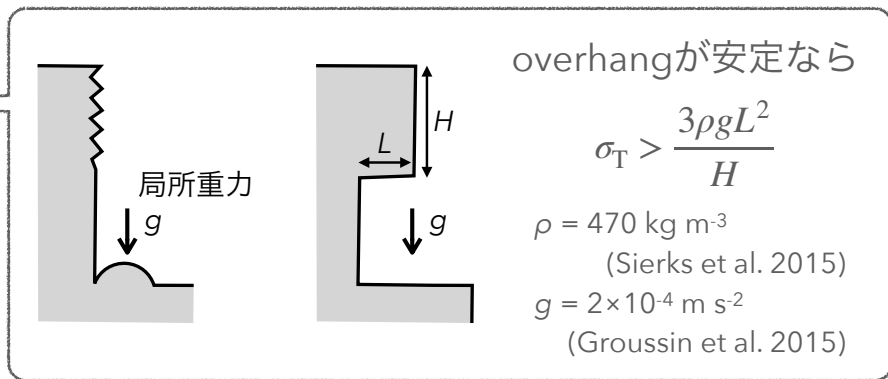
彗星67Pの表面の地形モデル

(e.g., Preusker et al. 2015)



彗星表面の突き出ている部分(overhang)に着目

(Groussin et al. 2015; Basilevsky et al. 2016)



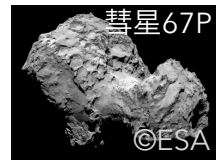
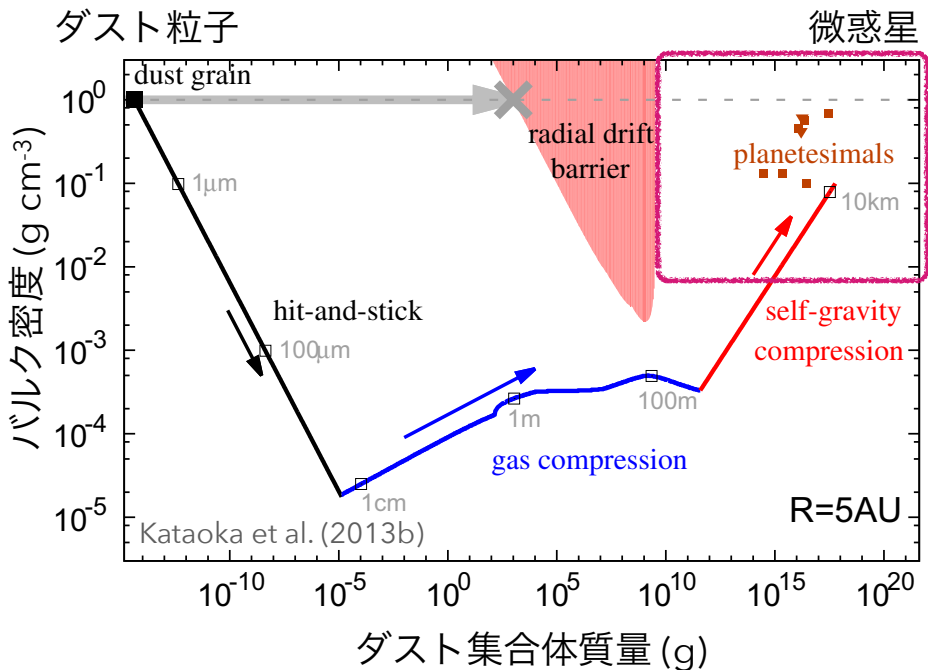
→ 正確な体積の見積もり

→ 正確な**バルク密度**の見積もり

彗星67Pの引張強度 1.5–100 Pa

($L = 10\text{--}100\text{m}$, $H = 5\text{--}200\text{m}$)

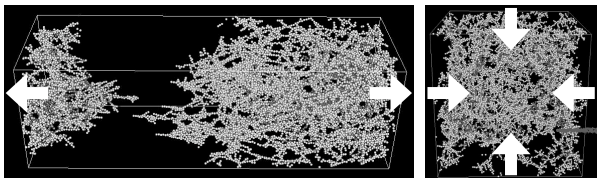
彗星のバルク密度からわかること



力のつりあい
自己重力 = 圧縮強度

彗星のバルク密度から
ダスト集合体の成長過程がわかる

我々の研究：ダスト集合体強度の計算と定式化



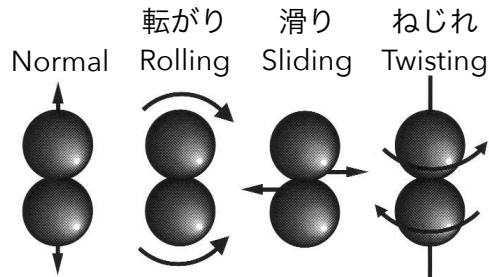
引張強度 → 彗星67Pとの比較

(Tatsuuma et al. 2019)

圧縮強度 → 小天体バルク密度との比較

(Tatsuuma et al. submitted, in prep.)

接触相互作用：付着力のある弾性球

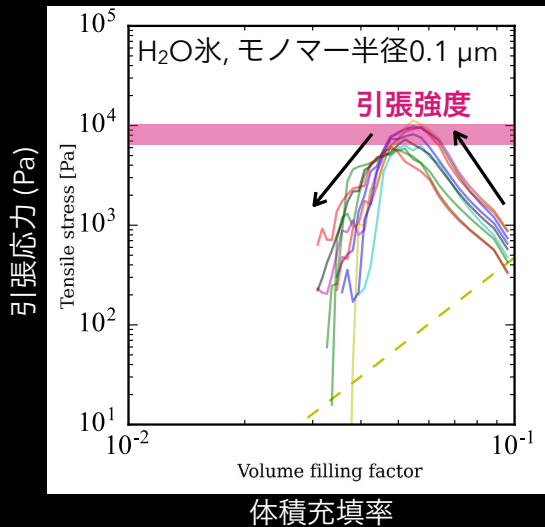
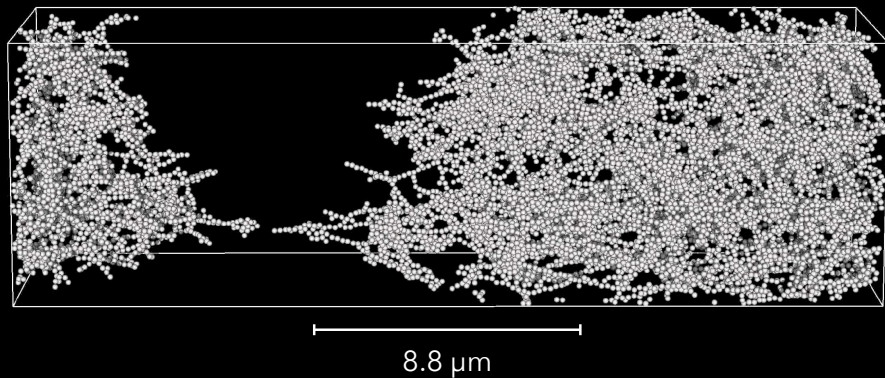


(Dominik & Tielens 1997, Wada et al. 2007)

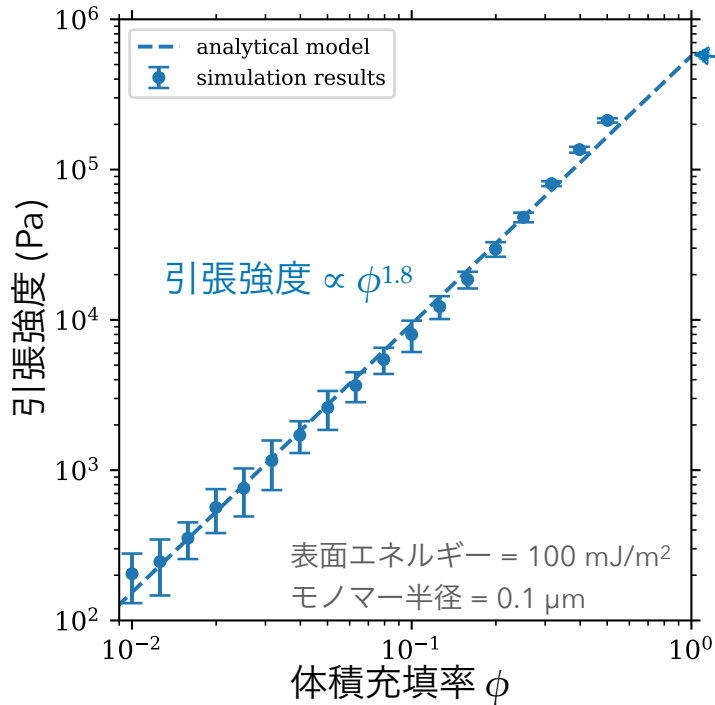
パラメータ

- 粒子(モノマー)半径
- 物性: 表面エネルギー、ヤング率、ポアソン比など

ダスト集合体の引っ張り計算例



ダスト集合体の引張強度と定式化

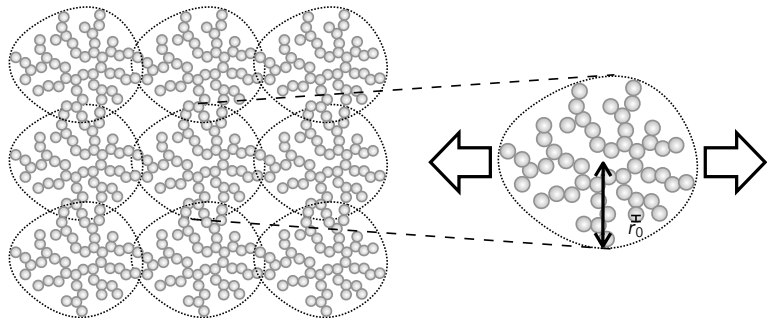


ダスト集合体の引張強度

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

表面エネルギー モノマー半径

小スケールの構造（フラクタル次元が1.9）間のモノマー接触が切断するというモデル

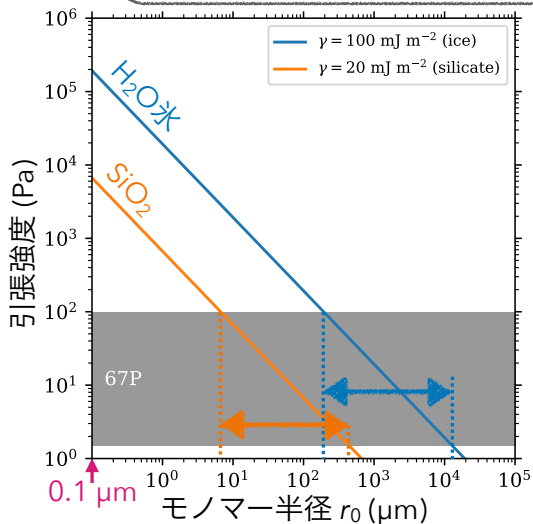


彗星67Pの引張強度との比較：モノマー半径の制限

彗星67P



- バルク密度: $532 \pm 7 \text{ kg m}^{-3}$ (Jorda et al. 2016)
→ 体積充填率: 0.53 (H_2O 氷: 1000 kg m^{-3}), 0.20 (SiO_2 : 2650 kg m^{-3})
- 引張強度: **1.5-100 Pa** (Basilevsky et al. 2016)



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

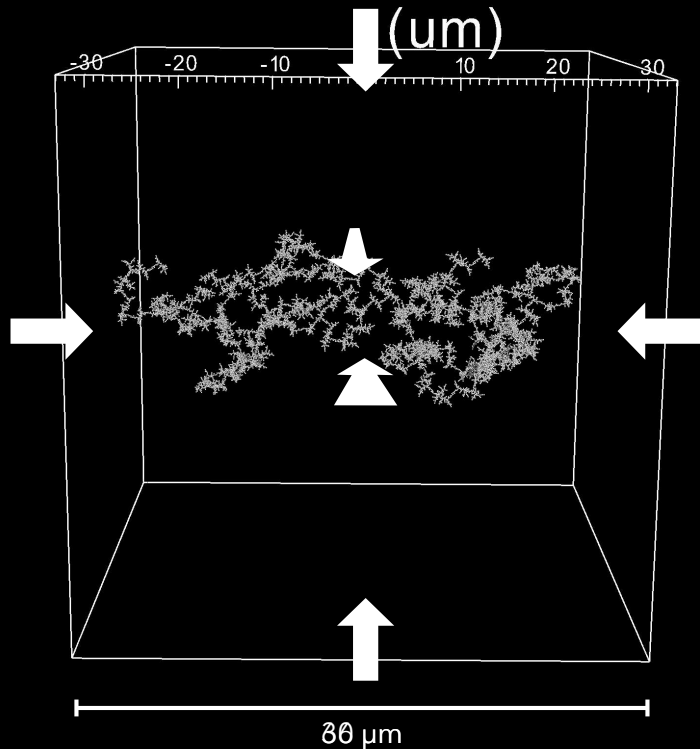
彗星67Pをダスト集合体で説明するには

モノマー半径が**0.1 μm** より大きくなければならない

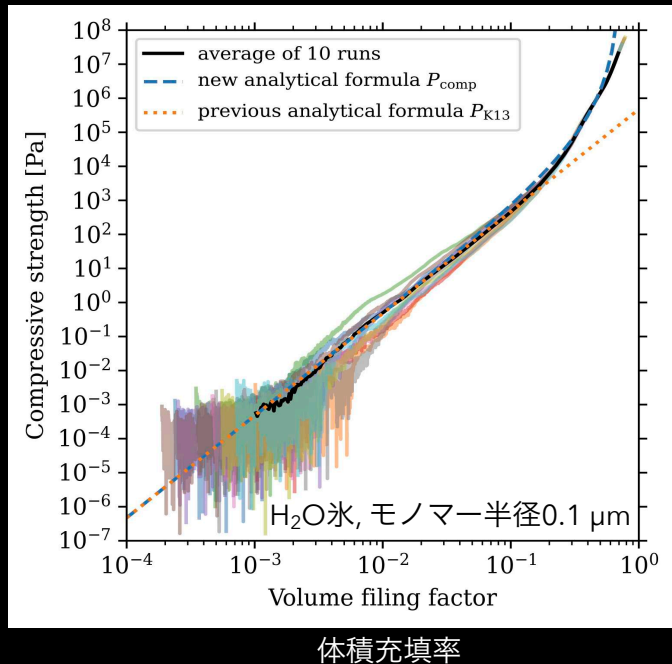


モノマーは **$7 \mu\text{m} < r_0 < 1.3 \text{ mm}$** のコンパクトな集合体？

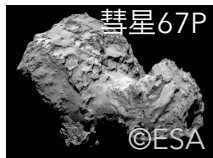
ダスト集合体の圧縮計算例



圧縮強度 (Pa)

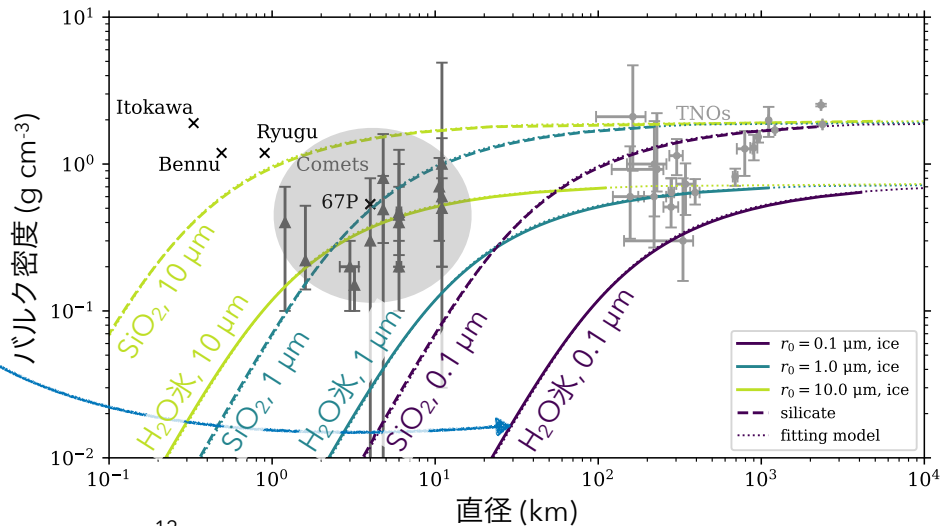
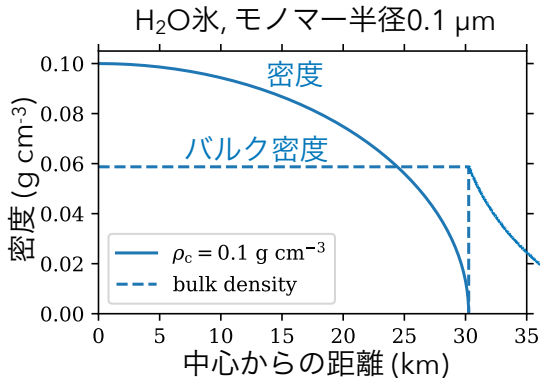


圧縮強度とバルク密度の関係：彗星との比較

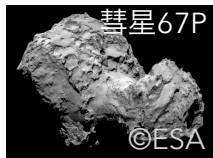


力のつりあい
自己重力 = 圧縮強度

球対称1次元の密度分布と圧力分布を解き、
直径と平均密度を求める



圧縮強度とバルク密度の関係：彗星との比較

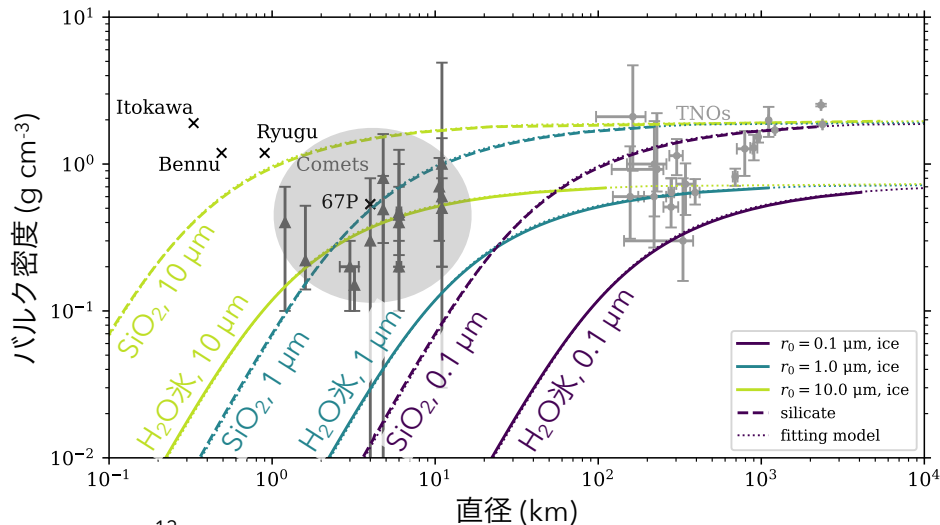


力のつりあい
自己重力 = 圧縮強度

球対称1次元の密度分布と圧力分布を解き、
直径と平均密度を求める

彗星67Pのバルク密度：

- モノマー半径0.1-1 μm では説明できない
- 10 μm 以上なら説明できる
- 引張強度(7 μm -1.3mm)と整合的



まとめ・彗星探査への期待

- 付着粒子計算を用いて、ダスト集合体の引張強度と圧縮強度を求めた。
- ダスト集合体と彗星67Pの**引張強度**と、圧縮強度から求められる**バルク密度**を比較した。
 - **彗星67Pはモノマー半径0.1 μm (星間ダストサイズ)のダスト集合体では説明できない。**
 - 彗星67Pのモノマー半径は7 μm -1.3 mmである必要がある。
 - 彗星はダスト集合体ではなくペブル集合体の可能性が高く、サイズ制限も可能。
- 今後の課題：**ペブルをどのように作るか明らかにする。**
- 彗星探査への期待：
 - 全球の写真を撮るなど、**表面の地形モデルを構築**できるような観測をしてほしい。
 - 彗星の構成粒子半径などの形成過程への制限が可能となる。
 - 多くの彗星で同様の探査をし、**統計的な議論**ができるようになってほしい。