

小惑星リュウグウの彗星起源説： 水氷の昇華に伴う彗星核収縮の理論計算

Nature Comm., rejected; *ApJL*, under review

○三浦 均¹, 中村 栄三², 国広 卓也³

2021年10月22日

天体形成研究会 2021 @筑波大学 (オンライン)

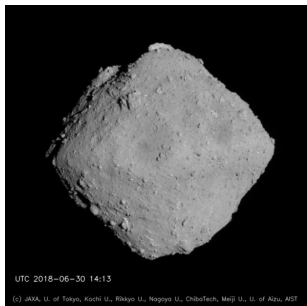
¹ 名古屋市立大学 大学院理学研究科

² 岡山大学自然生命科学研究支援センター

³ 岡山大学惑星物質研究所



小惑星リュウグウ



距離約 20 km から撮影された
リュウグウ [1]

- Spinning-top shape [2]
- ラブルパイル構造 [2]
- 有機物に富む [3]

衝突再集積説

より大きな母天体が破壊
され、破片が再集積して形
成 [4]

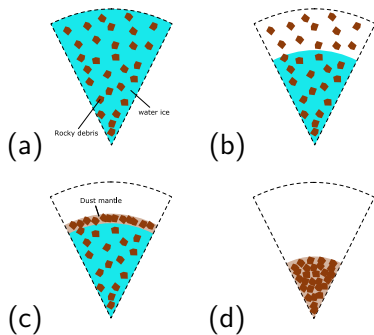
[1] https://www.hayabusa2.jaxa.jp/galleries/ryugu/pages/fig11_fmhome_front.html (閲覧日：2021/08/26)

[2] Watanabe, S. et al., *Science* **364**, 268-272 (2019)

[3] Potiszil, C. et al., *Astrobiology* **20**, 916-921 (2020)

[4] Michel, P. et al., *Science* **294**, 1696-1700 (2001); Walsh, K. J., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 593-624 (2018)

別の仮説「彗星起源説」



(a) 母天体の構造。(b) 表面から氷が昇華。(c) 岩塊が表面に積層。(d) 氷が枯渇。

主に水氷からなる彗星核が、太陽系外縁部で形成。岩塊を取り込む。

太陽系内縁部に進入した際、加熱されることで氷成分が昇華して、主に岩塊のみからなる小惑星へと進化。^[1]

リュウグウの主要な特徴を説明しうる（次ページ）

^[1] Nakamura, E. et al., *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **95**, 165-177 (2019); Potiszil, C. et al., *Astrobiology* **20**, 916-921 (2020)

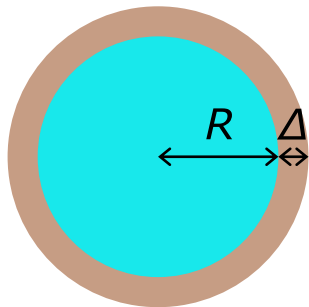
彗星起源説の特徴（定性的）

1. 氷が昇華すると、母天体全体が収縮して spin-up
⇒ spinning-top shape に？
2. 残された天体は主に岩塊（～ cm）が集積した構造
⇒ ラブルパイル構造
3. 氷に含まれている有機物が、蒸発残渣として岩塊に濃集
⇒ 有機物に富む

本研究の検討課題

氷の昇華に要する時間は？ どの程度 spin-up するのか？

球対称多孔質二層モデル



多孔質二層モデル。内側の始原領域の半径を R ，ダストマントルの厚さを Δ とする。

- 氷微粒子と岩塊からなる「始原領域」と，岩塊のみからなる「ダストマントル」の二層構造。各層内は一様。
- 多孔質。内部で生じた水蒸気は，空隙を通過して天体内を移動可能。空隙率は一定（いずれの層においても）。
- 球対称（物理量は中心からの距離 r のみに依存）。
- 温度一様と仮定。

多孔質天体内部の水蒸気圧分布

直径 d の球粒子からなる空隙率 ϵ の彗星核内部における自由分子流の流束 J は、圧力 P と温度 T の勾配によって決まる。^[1]

$$J = -\frac{16}{3} \left(\frac{m}{2\pi k_B} \right)^{1/2} \frac{\epsilon^{3/2}}{(1-\epsilon)^{1/3}} d \nabla \left(\frac{P}{\sqrt{T}} \right) \quad (1)$$

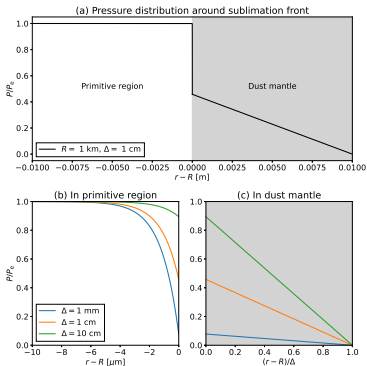
流れが定常だと仮定すると、天体内部の水蒸気生成率を q として、 $\nabla \cdot J = q$ が成り立つ。これは以下の解析解を持つ。ここで、 P_e は氷の平衡蒸気圧、 $g_{R,\Delta}$ は R, Δ に依存する無次元数である。

$$\frac{P_{(p)}(r)}{P_e} = 1 - g_{R,\Delta} \frac{\sinh(r/h)}{\sinh(R/h)} \frac{R}{r} \quad (\text{始原領域}) \quad (2)$$

$$\frac{P_{(m)}(r)}{P_e} = (1 - g_{R,\Delta}) \frac{R}{\Delta} \left(\frac{R + \Delta}{r} - 1 \right) \quad (\text{マントル}) \quad (3)$$

^[1] Mekler, Y. et al., *ApJ* **356**, 682-686 (1990)

多孔質天体内部の水蒸気圧分布 (続)



水蒸気圧 P の定常分布。(a) 領域境界の上下 $\pm 1 \text{ cm}$ の分布。 $\Delta = 1 \text{ cm}$ の場合。(b) 始原領域最表面の拡大図。(c) マントル内の分布。

始原領域では、大部分で固気平衡が成立。最上部において水蒸気圧が減少。その厚みは氷微粒子の直径程度 ($\sim \mu\text{m}$)。

ダストマントルでは、母天体表面に近づくにつれて、圧力がほぼ一定の割合で減少 (表面で $P = 0$ とした)。

水蒸気の流束が得られ、始原領域の収縮率が決まる

- 水蒸気流束の解析解を用いて、始原領域の半径 R の時間変化を数値的に計算する。

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{J_{(p,sf)}}{\rho_i \phi_{i(p)}} \quad (4)$$

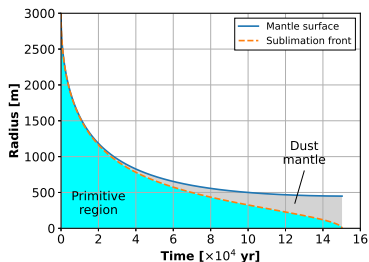
ここで、 $J_{(p,sf)}$ は領域境界における水蒸気流束、 ρ_i は氷微粒子の物質密度、 $\phi_{i(p)}$ は氷微粒子の体積割合である。

- 天体の慣性モーメント I と角運動量 L の変化から、自転角速度 ω の変化を計算する。 $L = I\omega$ を、始原領域の半径 R で微分して整理すると、以下を得る。^[2]

$$\frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dR} = \frac{1}{I\omega} \frac{dL}{dR} - \frac{1}{I} \frac{dI}{dR} \quad (5)$$

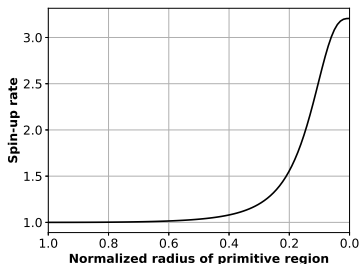
^[2] Watanabe, J., *PASJ* 44, 163-166 (1992)

母天体の収縮



初期半径 3 km の場合の計算結果。 $T = 200$ K, 氷微粒子の直径 $1 \mu\text{m}$, 岩塊の直径 1 cm, 空隙率 0.6, 氷成分の割合 0.99 の場合。

- 氷の昇華とともに始原領域の半径が減少。その表面にダストマントルが形成し、次第に厚みを増していく。
- 氷が完全に枯渇するのに要する時間は約 15 万年。
- 最終的に半径 449 m の小惑星が残される（リュウグウの直径は ~ 420 m）。



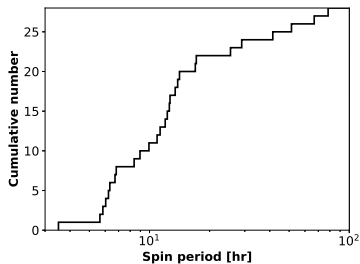
母天体の収縮に伴う自転角速度の変化。横軸は始原領域の半径（初期半径で規格化）。縦軸は自転角速度（初期値に対する比）。

- 始原領域の縮小に伴い、自転角速度が増幅。
- 最終的に、自転角速度は初期の 3.2 倍まで増加。
- Spin-up のタイムスケール（氷昇華のタイムスケール）は、YORP 効果による spin-up ($\sim 1 \text{ Myr}^{[1]}$) より桁で早くなりうる。

[1] Rubincam, D. P., *Icarus* **148**, 2-11 (2000)

Spin-up は十分か？

現在観測されている彗星核の自転周期分布^[1]の中央値は～12 hrである。自転角速度が3.2倍になれば、自転周期は～3.8 hrとなり、リュウグウがかつて経験したとされる自転周期（～3.5 hr^[2]）に近い値までspin-upされうる。



文献データ^[1]をプロット

^[1] Huebner, W. F. et al., *Inter. Space Sci. Inst.* (2006); Samarasinha, N. H., et al., *NASA Planetary Data System* (2019)

^[2] Watanabe, S. et al., *Science* **364**, 268-272 (2019)

^[1] Huebner, W. F. et al., *Heat and gas diffusion in comet nuclei* (2006); Samarasinha, N. H. et al., *NASA Planetary Data System* (2019)

- 小惑星リュウグウの彗星起源説の理論モデルを検討した。
- 典型的な初期条件を例として計算を行なった結果、彗星核から小惑星への進化は15万年程度で進行し、その過程で自転角速度が ~ 3 倍に増幅しうることがわかった。
- 今後、理論モデルの精密化を進めるとともに、リュウグウサンプルの分析結果と照らし合わせて彗星起源説の妥当性を検証していく。

謝辞

大幸財団，科研費（20K05347），国立大学イノベーション創出環境強化事業（内閣府）