

周惑星ガス円盤中で集積する 巨大氷衛星の原始大気



北大 理学院

三上 峻 高橋 康人 倉本 圭

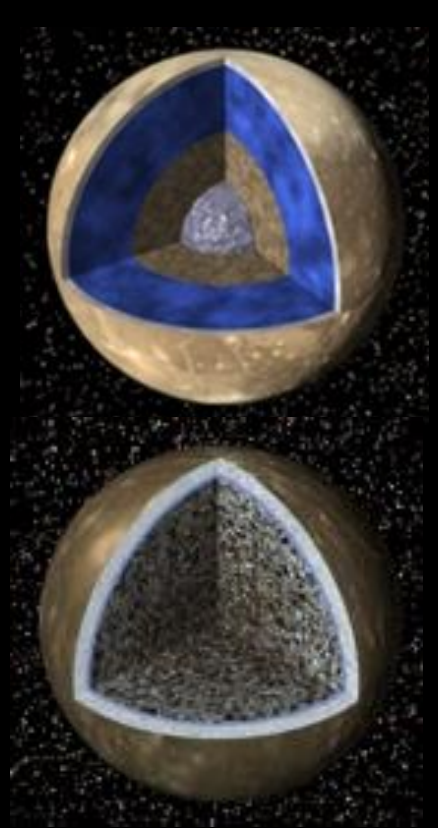
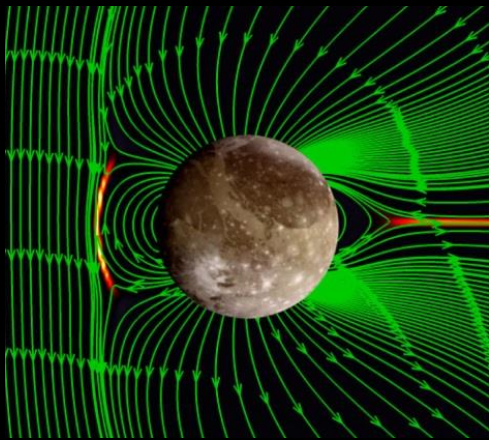
2014 年 衛星研究会
北大 低温研

目次

- インTRODクシヨN・研究目的
 - 巨大氷衛星
 - 形成場：周惑星円盤
 - 原始大気
- モデル概要
- 結果
 - 原始大気構造・大気放射量見積もり
- 議論
 - ガニメデ・カリストの内部構造への示唆

巨大氷衛星

- 太陽系で最大級のサイズの衛星
- 主に氷と岩石で構成
- 分化したガニメデ・未分化なカリスト

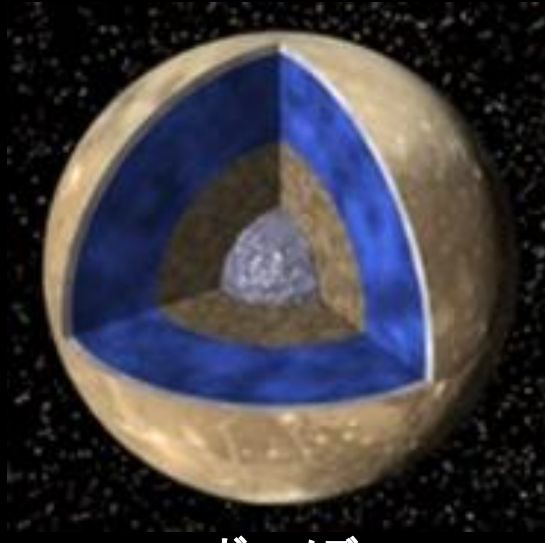


ガニメデ(上), カリスト(下) (NASA/JPL)

巨大氷衛星の性質 (NASA, NSSDC から抜粋)

衛星	半径 [km]	質量 [10^{23} kg]	平均密度 [kg/m ³]	慣性能率 [質量・(半径) ²]
ガニメデ	2,631	1.482	1,940	0.311
カリスト	2,410	1.076	1,830	0.358

巨大氷衛星のサイエンス



ガニメデ



カリスト

- 疑問

いつ・どのようにしてその分化構造の違いが生まれたのか？

=> 形成場の理解が必要

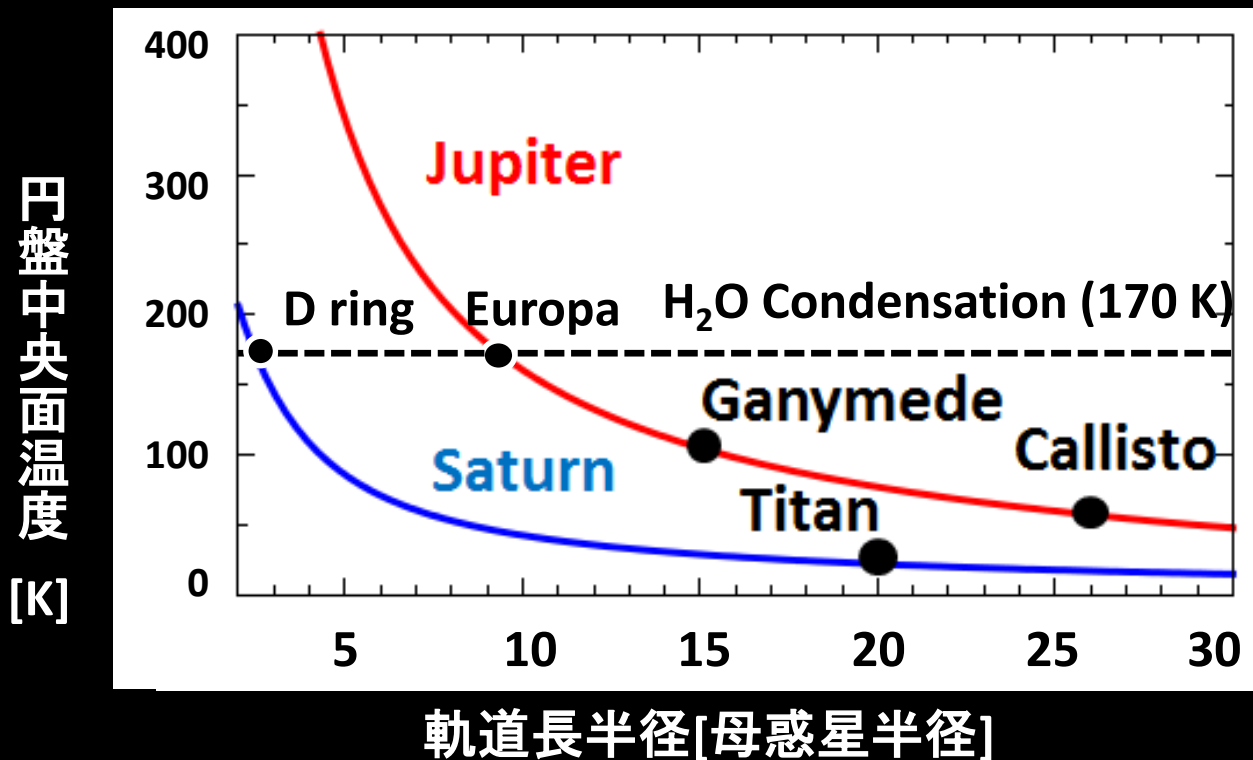
巨大ガス惑星周りの衛星

- 衛星は巨大ガス惑星周りに大量に存在
 - 規則衛星と不規則衛星
 - 規則衛星
 - ほぼ円軌道・惑星赤道面・順行
 - 全衛星質量の大部分を占める
- 周惑星円盤**中の形成を示唆



周惑星円盤

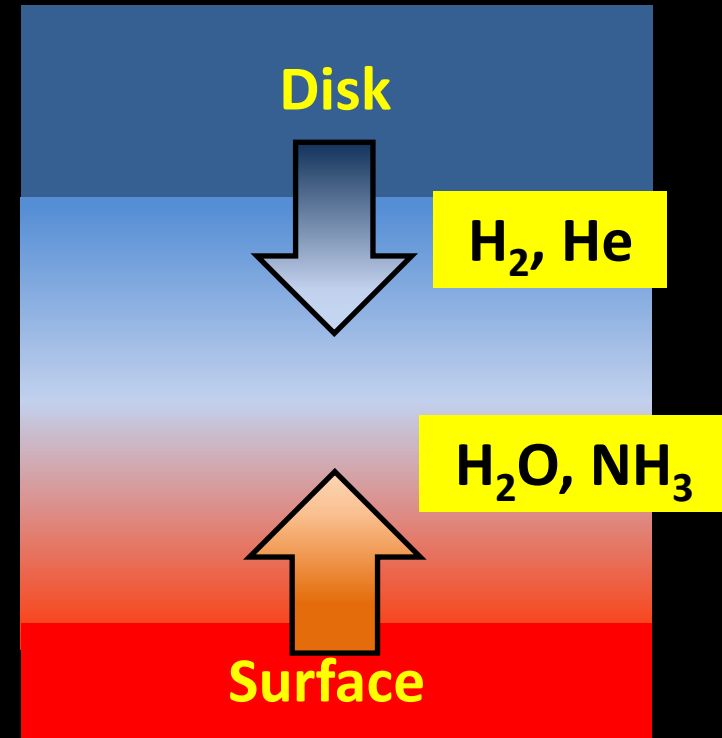
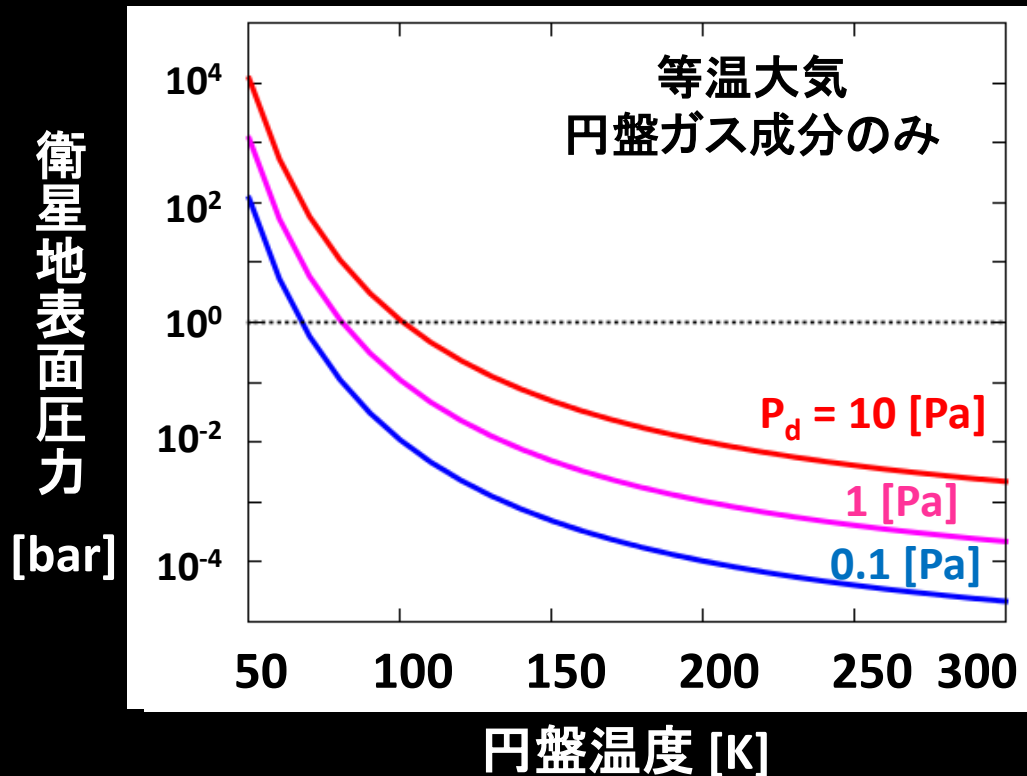
- 低温(< 170 K)・低圧(~ 1 Pa)
- 比較的長い集積時間(10^{5-6} yr)で成長



巨大氷衛星の原始大気

- 厚い**原始混合大気**が形成する可能性
 - 大気圧縮による大量の円盤ガスの捕獲
 - 氷成分(H_2O , NH_3)の蒸発

顕著な保温効果が期待 (先行研究では無視)

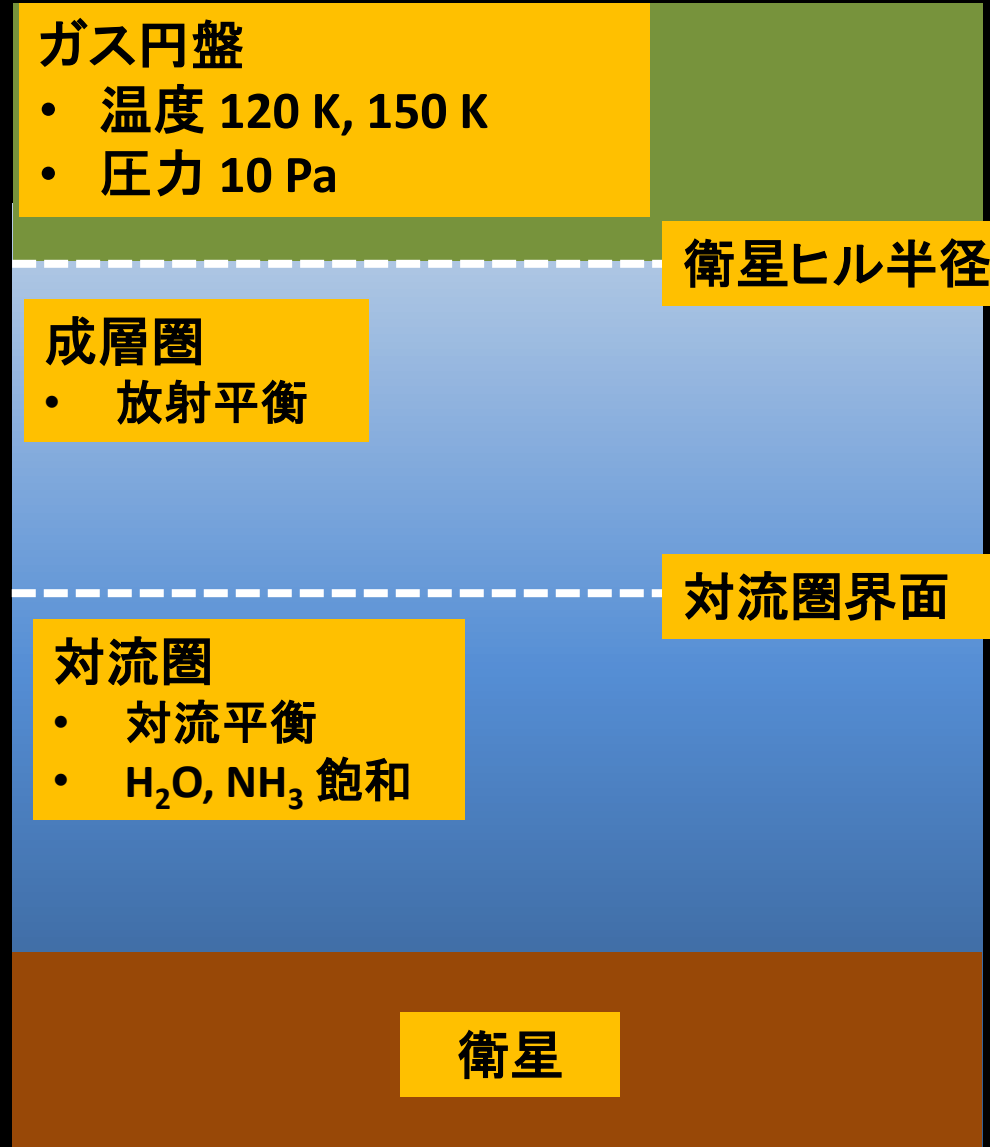


本研究の目的

- 周惑星ガス円盤中で形成する集積期の巨大氷衛星の環境を理解するために、原始混合大気の構造とその保温効果を数値的に見積もる
- 集積期の巨大氷衛星の表層環境の進化
 - 大気の保温効果でガニメデは分化するのか？

モデル概要

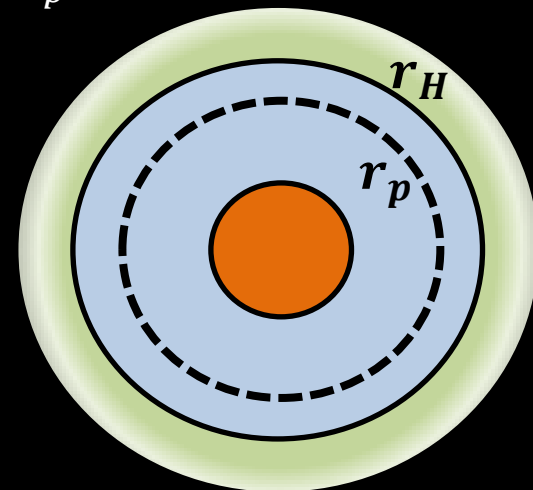
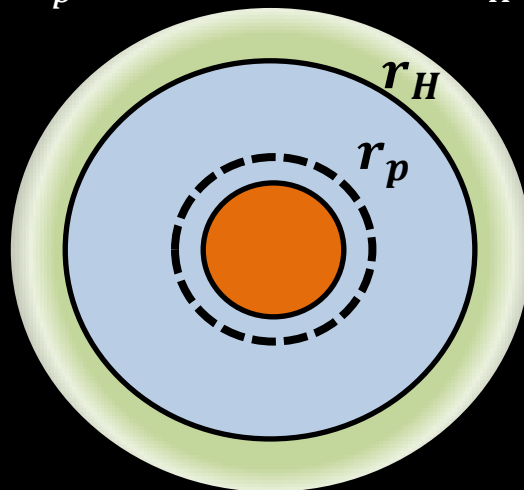
- 球対称1次元
- 大気組成
 - H_2 , He , H_2O , NH_3
- 対流圏と成層圏で構成
 - 対流圏: H_2O , NH_3 飽和
 - 成層圏: 混合比一定
- 静水圧平衡
- 衛星ヒル半径で円盤と接続
- 円盤条件 [Canup and Ward, 2002, 2006]
 - 円盤圧力: 10 Pa
 - 円盤温度: 120 K (カリスト)
: 150 K (ガニメデ)



モデル概要

$r_H \gg r_p$ の場合

$r_H \gg r_p$ ではない場合



- 圧力: 静水圧平衡

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g$$

- 温度: 衛星からの熱放射(ルミノシティ L) がフリーパラメータ

– 成層圏温度

$$T^4 = T_d^4 + \frac{L}{8\pi\sigma_{SB}r^2} \left(\frac{1 + \frac{15}{2}\tau}{2 + \frac{3}{2}\tau} \right) \quad (\tau < 2/3, r_H \gg r_p) \text{ (Hayashi et al., 1979 を修正)}$$

$$T^4 = T_d^4 + \frac{L}{8\pi\sigma_{SB}r^2} \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{r_p^2}{r^2}\right)^{1/2}} \left(1 + \frac{3}{2}\tau\right) \quad (\tau < 2/3, r_H \gg r_p \text{ ではない場合})$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\kappa\rho L}{64\pi\sigma_{SB}r^2T^3} \quad (\tau \geq 2/3)$$

– 対流圏温度: 湿潤断熱減率(H_2O , NH_3 の凝結潜熱を考慮)

P : 圧力, r : 衛星中心からの距離, ρ : 密度, g : 重力加速度, T : 大気温度,
 T_d : 円盤温度, L : 衛星からの熱放射, σ_{SB} : ステファンボルツマン定数,
 τ : 光学的厚さ, r_p : 光球面半径, r_H : 衛星ヒル半径, κ : 吸収係数

大気成分の吸収

- 吸収係数

- 衝突誘起吸収(H_2-H_2 , H_2-He) [Borysow 1985, 1992, 2002]

- 線吸収(H_2O , NH_3) [HITRAN 2012]

$$\sum_i \kappa_i(\lambda, T, P) \rho_i = \alpha_{H_2H_2}(\lambda, T) \left(\frac{P_{H_2}}{n_0 k T} \right)^2 + \alpha_{H_2He}(\lambda, T) \left(\frac{P_{H_2}}{n_0 k T} \right) \left(\frac{P_{He}}{n_0 k T} \right) \\ + \kappa_{H_2O}(\lambda, T, P) \rho_{H_2O} + \kappa_{NH_3}(\lambda, T, P) \rho_{NH_3}$$

- ロスランド平均で波長平均

$$\frac{1}{\kappa_R(T, P) \rho_{gas}} = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\sum_i \kappa_i(\lambda, T, P) \rho_i} \frac{dB(\lambda, T)}{dT} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{dB(\lambda, T)}{dT} d\lambda}$$

放射伝達

- 放射伝達方程式 (散乱無し, LTE)

$$dI = -I d\tau + B d\tau$$

- 吸収係数(後述)

- 光学的厚さ

$$d\tau = \kappa \rho \frac{r}{\sqrt{r^2 - r_{rad}^2 \sin^2 \theta}} dr$$

- 放射強度

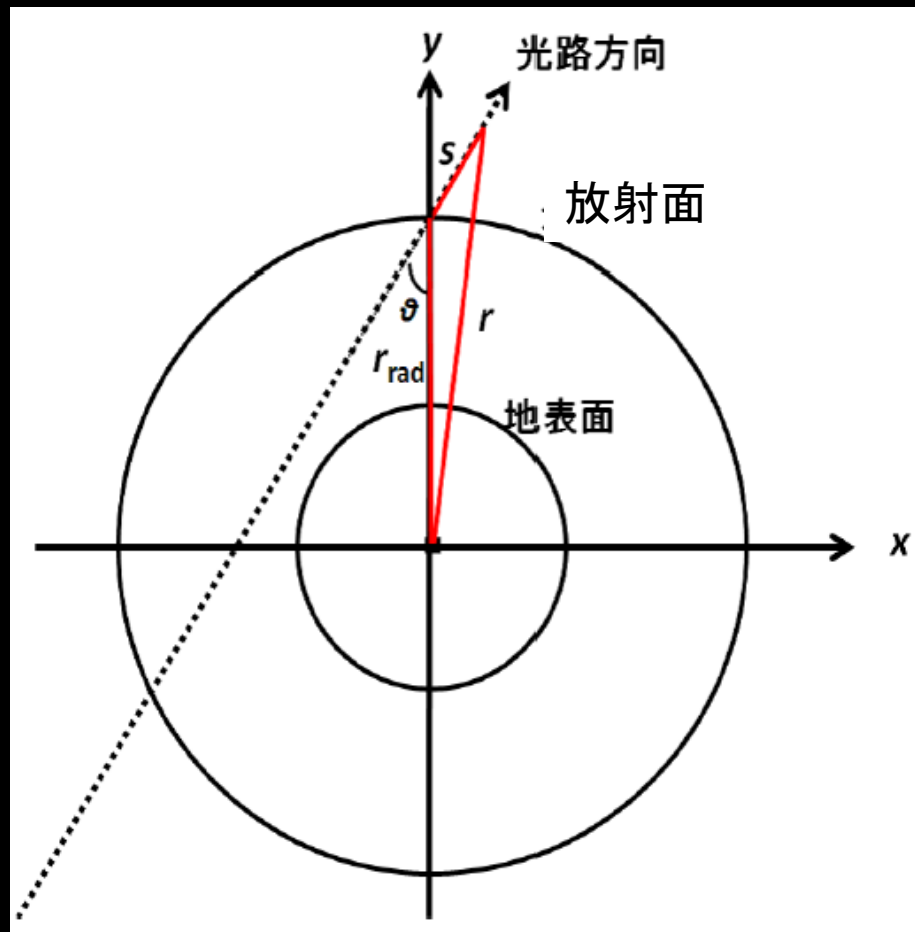
$$I = I_0 e^{\tau_0 - \tau_1} + \int_0^{\tau_1} B_{\tau'} e^{\tau' - \tau_1} d\tau'$$

- 放射フラックス

$$F_{up} = 2\pi \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta$$

$$F_{down} = -2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} I(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta$$

$$F_{net} = F_{up} - F_{down}$$

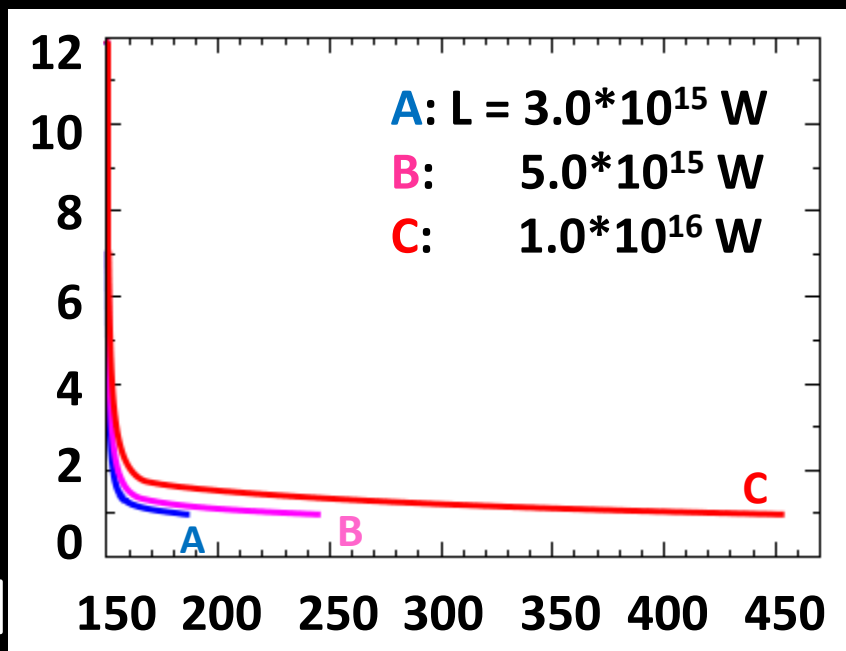


I : 放射強度, B : プランク関数
 τ : 光学的厚さ, κ : 吸収係数
 r_{rad} : 放射面半径

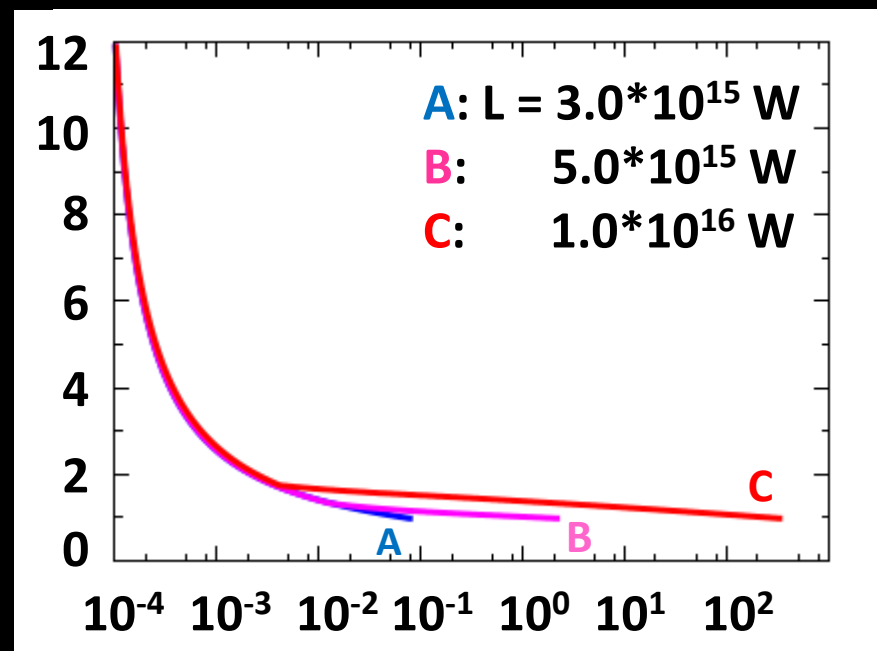
温度・圧力分布

- ガニメデ ($P_d = 10 \text{ Pa}$, $T_d = 150 \text{ K}$)

衛星中心からの距離
[r_G]



温度 [K]

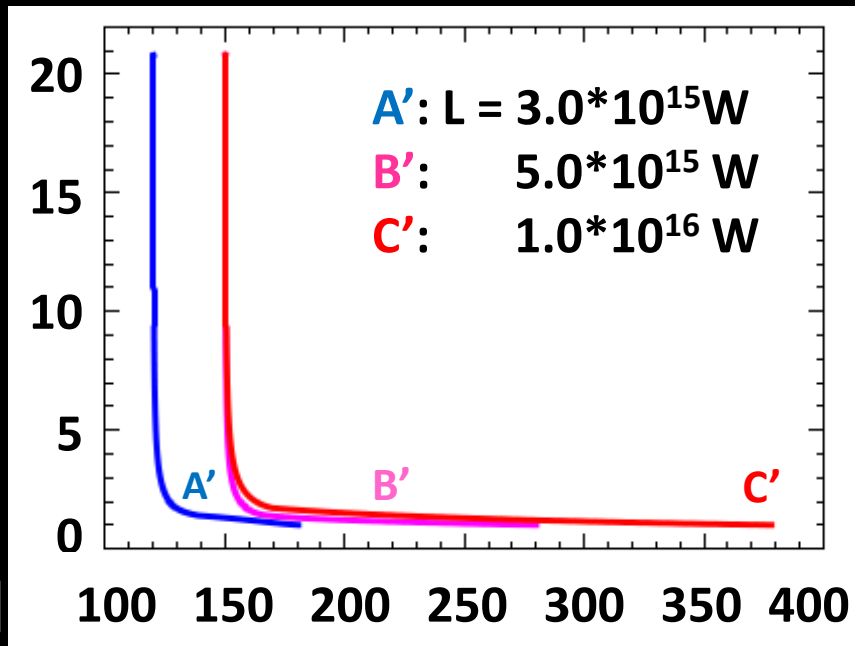


圧力 [bar]

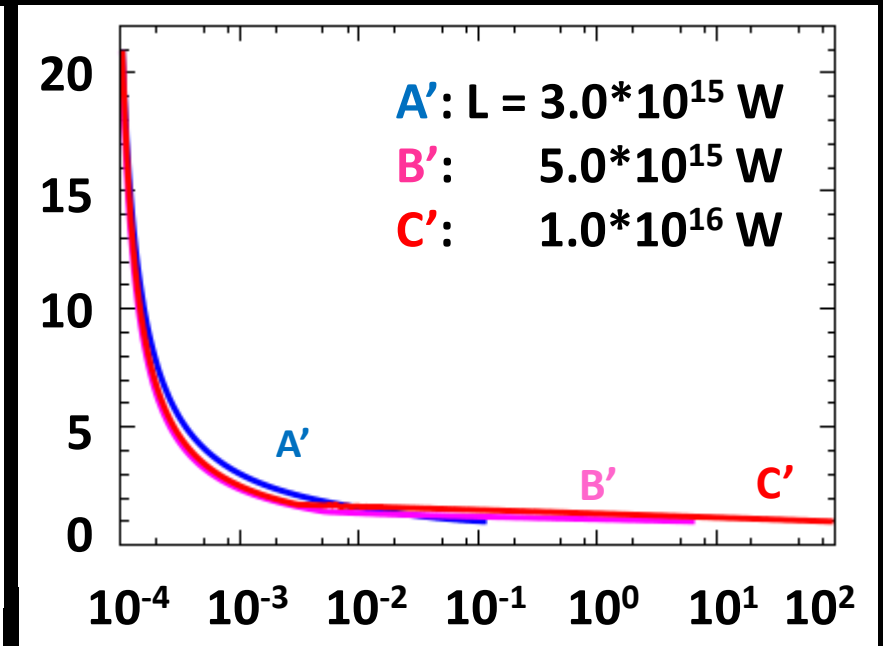
温度・圧力分布

- カリスト($P_d = 10 \text{ Pa}$, $T_d = 120 \text{ K}$)

衛星中心からの距離
[r_c]



温度 [K]

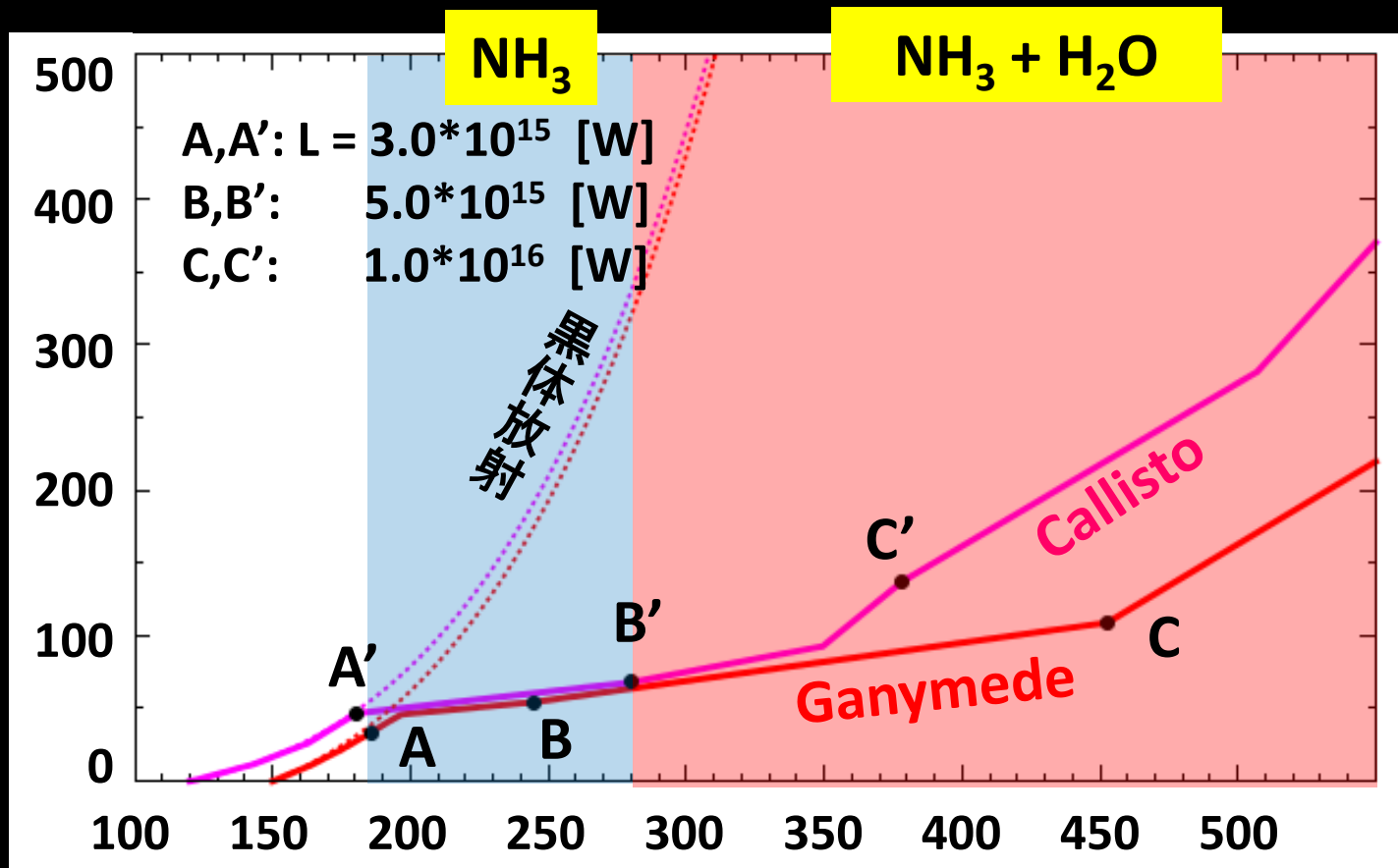


圧力 [bar]

地表面温度と大気放射量の関係

大気上端の放射フラックス

[W/m²]



地表面温度 [K]

ルミノシティと集積時間の関係

- ルミノシティ(衛星の熱放射)と集積エネルギー

$$L = h(t) \frac{GM(t)\dot{M}(t)}{r(t)}$$

h : 集積エネルギー解放が熱放射に分配される割合

\dot{M} : 集積率

- 仮定

- 集積エネルギーがすべて熱放射に分配される

- $h(t) = 1$

- 集積率一定

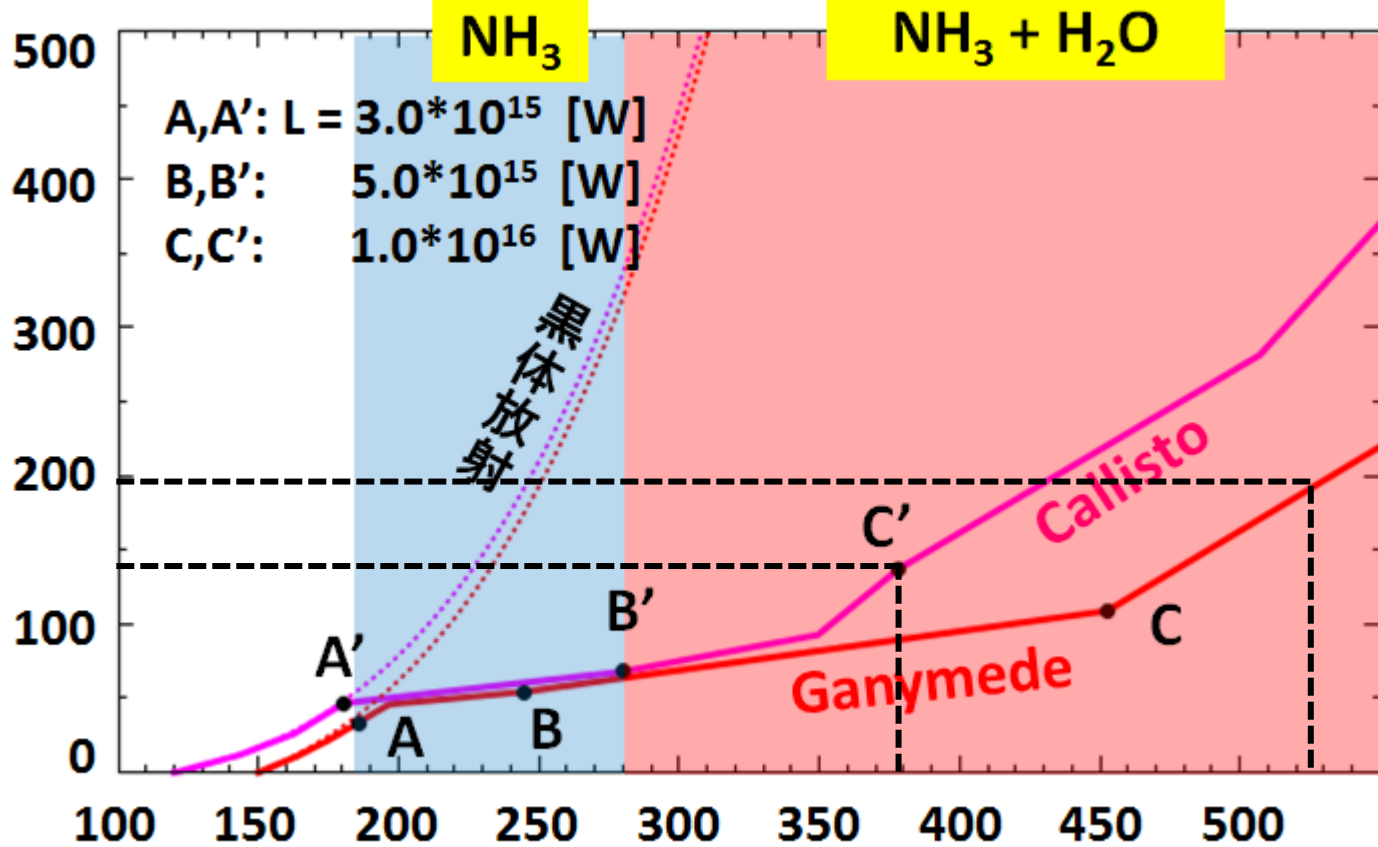
- $\dot{M}(t) = \frac{M_{\text{Satellite}}}{t_{\text{acc}}}$

- t_{acc} : 集積時間

衛星	$t_{\text{acc}} = 10^6 \text{ yr}$ に相当するルミノシティ [10^{16} W]
ガニメデ	1.76
カリスト	1.02

大気上端の放射フラックス

[W/m²]



地表面温度 [K]

衛星	$t_{acc} = 106$ yr に相当する ルミノシティ [10^{16} W]
ガニメデ(G)	1.76 = 200 [W/m ²]
カリスト(C)	1.02 = 145 [W/m ²]

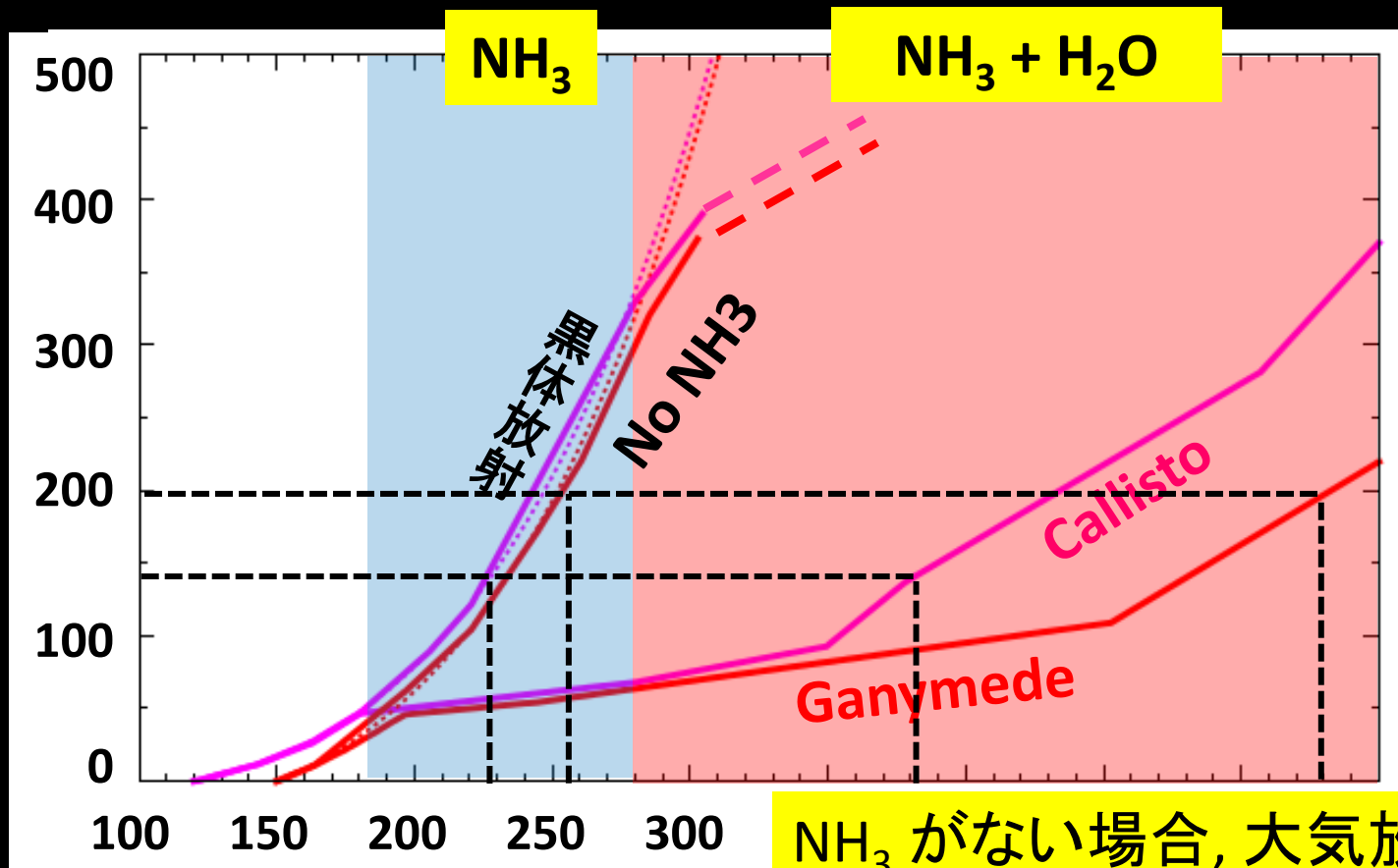
巨大氷衛星は光学的に厚い大気を保持？

- ガニメデやカリストの材料物質にはNH₃ は含まれない？

地表面温度と大気放射量の関係

大気上端の放射フラックス

[W/m²]



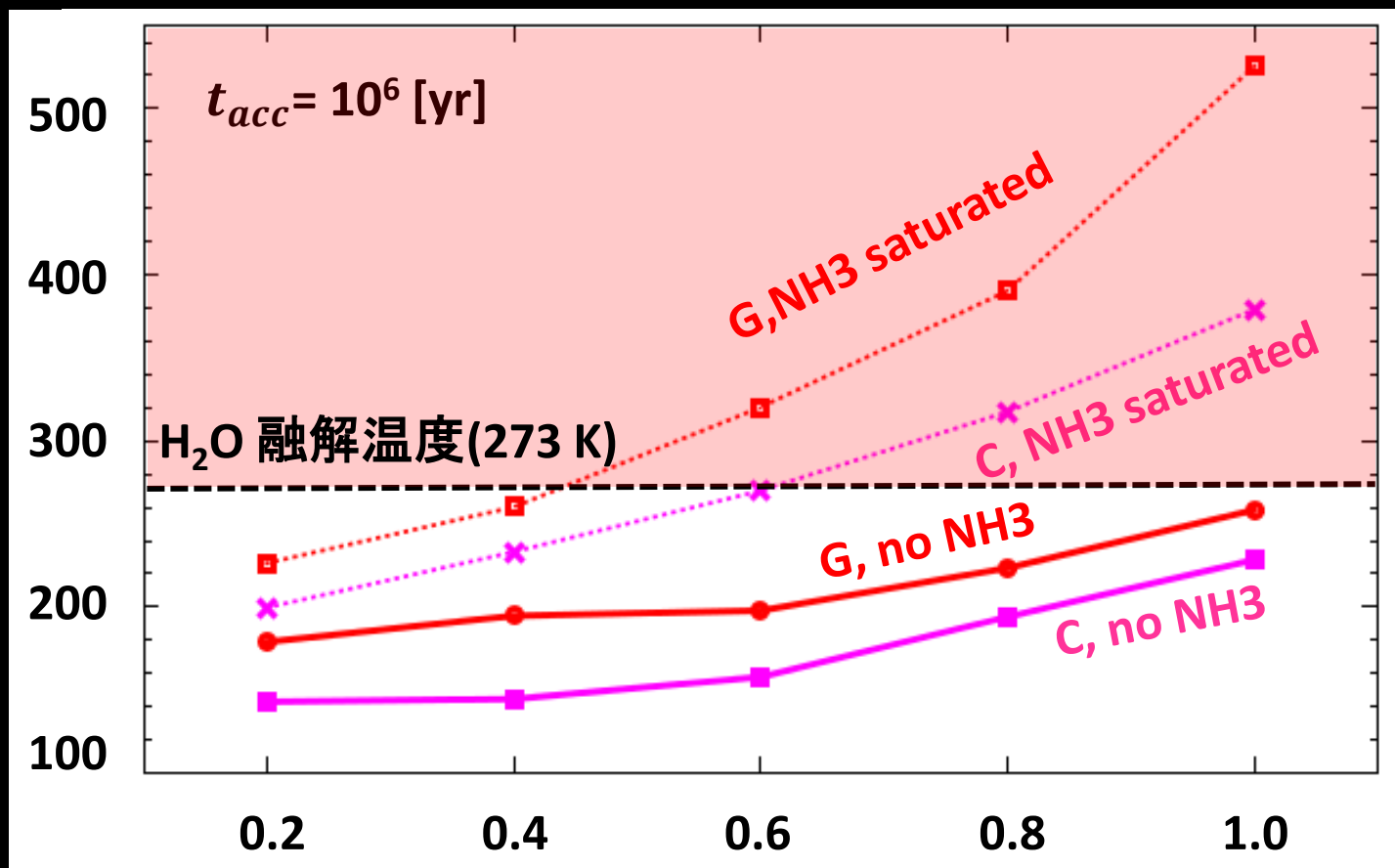
地表面温

NH₃ がない場合, 大気放射量が増大する

- スケールハイトが大きい
- 吸収分子が少ない

集積成長中の巨大氷衛星

地表面温度 [K]



質量 [$M_{\text{Satellite}}$]

まとめ

- 巨大氷衛星の原始大気の構造は材料物質中の NH_3 量に強く依存する
 - ガニメデ・カリストの材料物質に NH_3 が含まれない場合大気の保温効果は効かない
 - 一方, 少しでも NH_3 が含まれると原始大気の保温効果は強くなる可能性がある
 - NH_3 量は内部の分化度にも強く依存する
 - NH_3 が含まれず, 集積時間が比較的長い場合 ($\sim 10^6$ yr) 大気の保温効果により分化しない可能性がある