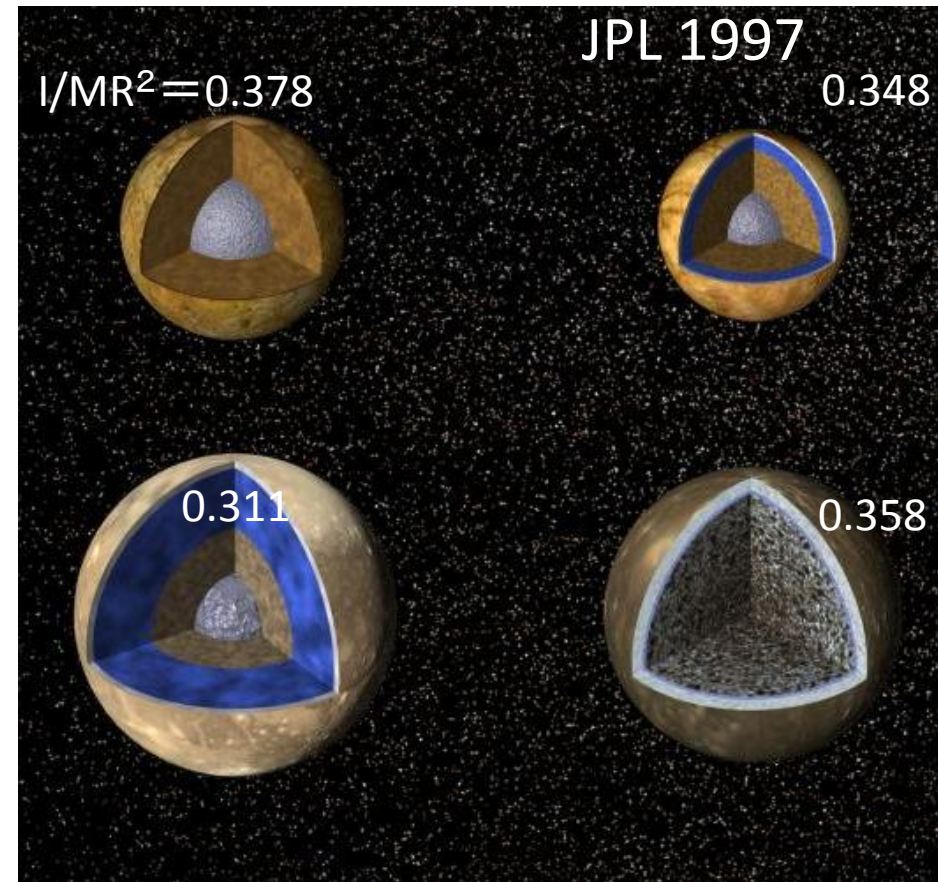


# 氷衛星形成論への 内部進化論からのコメント

倉本 圭

# カリストとタイタンは未分化ではない

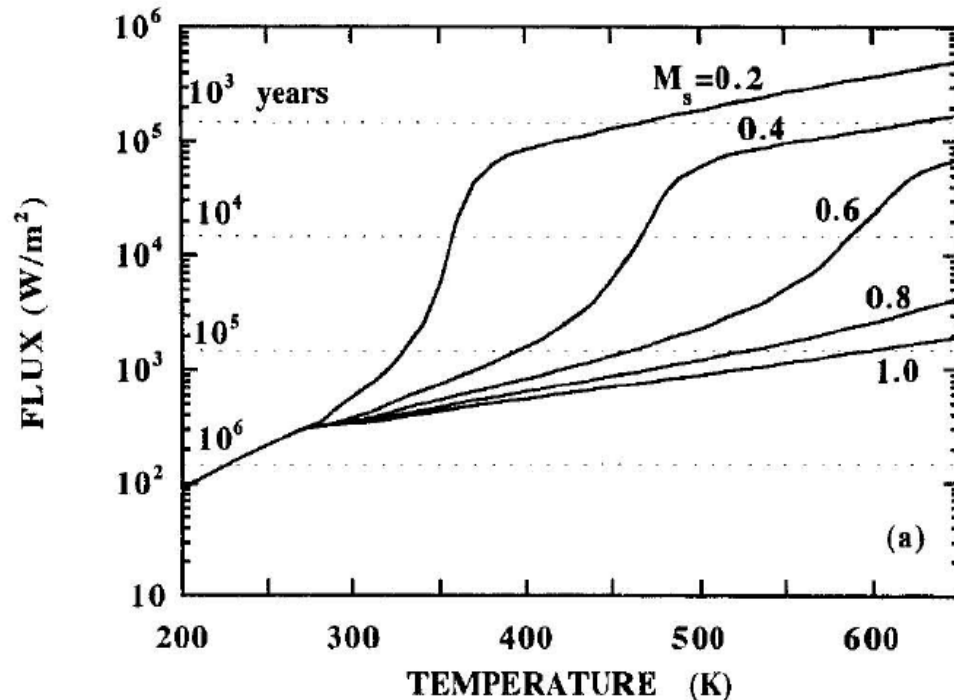
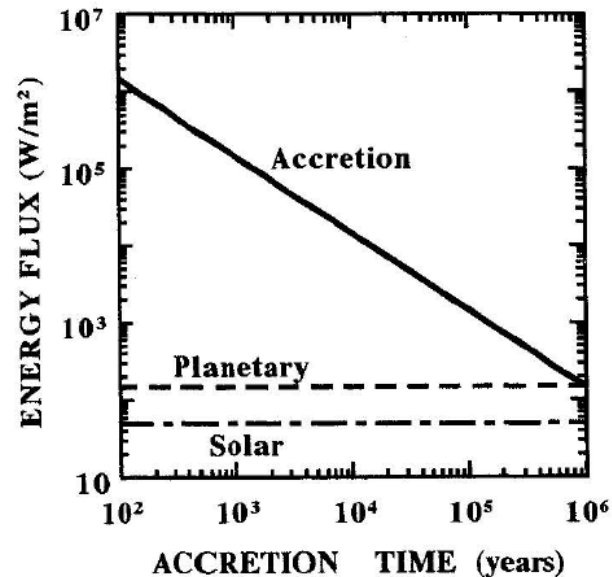
- 未分化説は慣性能率因子の値から来ている
- カリストの速報値は0.4だった. もし本当なら未分化.
- しかし改定値は0.4未満で、分化を示唆している
- ガニメデよりも値が大きいのは確か。ガニメデの現在の分化状態が集積期に達成されたか疑問。
  - 金属が溶けるほど集積加熱可能？ (High Speed Collision?)
- 原材料物質が含水ケイ酸塩 + 氷だとすればガニメデの初期構造は現在のカリストほぼ一緒でもよい



Anderson et al., 1996a,b, 1998a, b

# 分化状態からの 集積時間の制約は危うい

- 集積時間  $> 10^5$  yr なら氷未融解?
- Kuramoto and Matsui (1994) に依っている
  - 氷物質の蒸発による原始大気の保温効果を見積もった
  - 吸収物質に  $H_2O$  しか考慮していない
  - $NH_3$  を含めると  $10^6$  yr に伸びる
  - 真空中集積モデルなのでガス中集積の場合は要再検討



# タイタンの大気とその起源

# タイタンの大気

- 組成

N<sub>2</sub> (95%), CH<sub>4</sub> (5%)

平均分子量 約28

VoyagerではN<sub>2</sub>が精度よく計れず、Arが多い可能性が考えられていた

- 地表面気圧, 気温

1.5気圧, 94 K

- 特徴

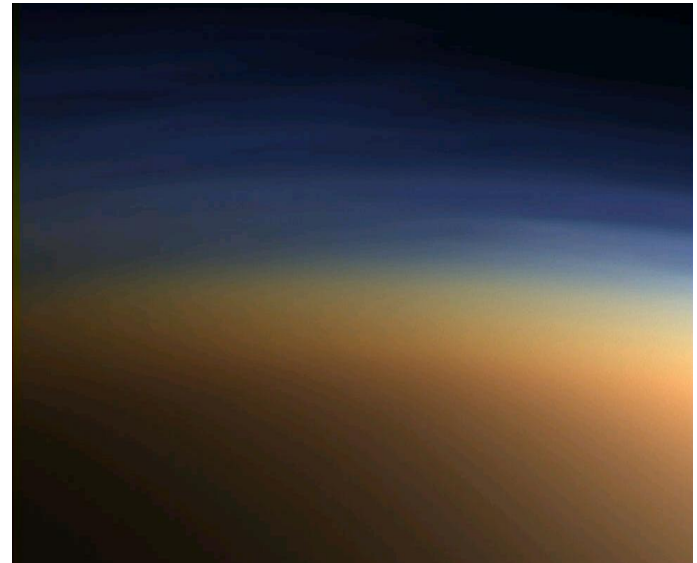
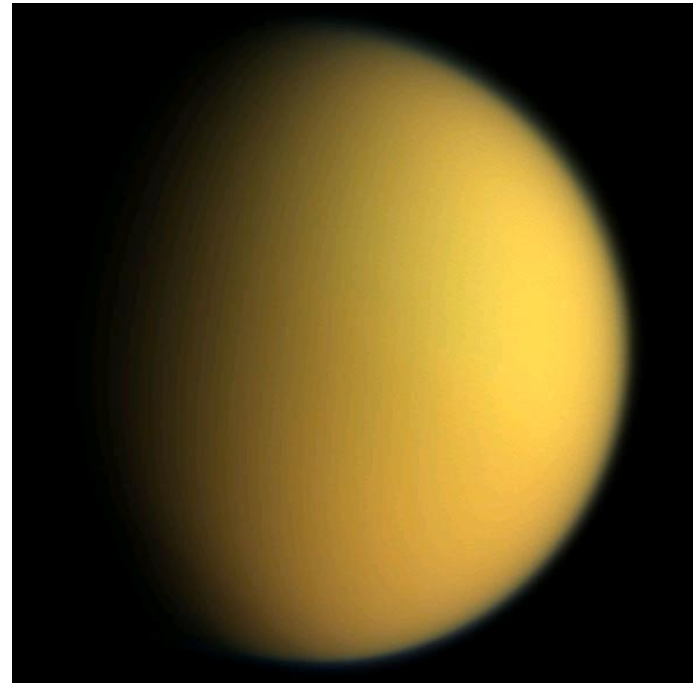
- 霞で全球が覆われている

- Titan tholin (ソリン): 高分子有機物

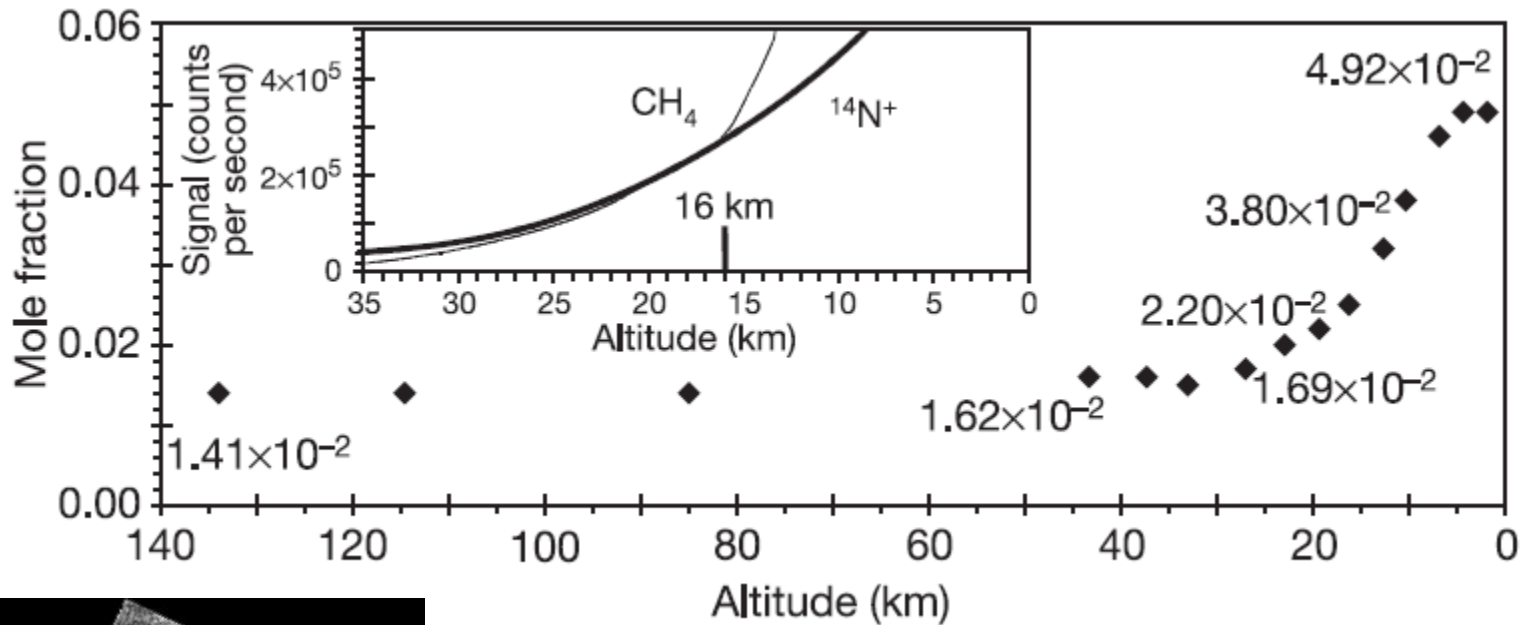
- Hが流出している ( $\sim 10^{10}$  H-atom cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

- CH<sub>4</sub>の光分解起源

- 10<sup>7</sup>yrで全大気CH<sub>4</sub>消費

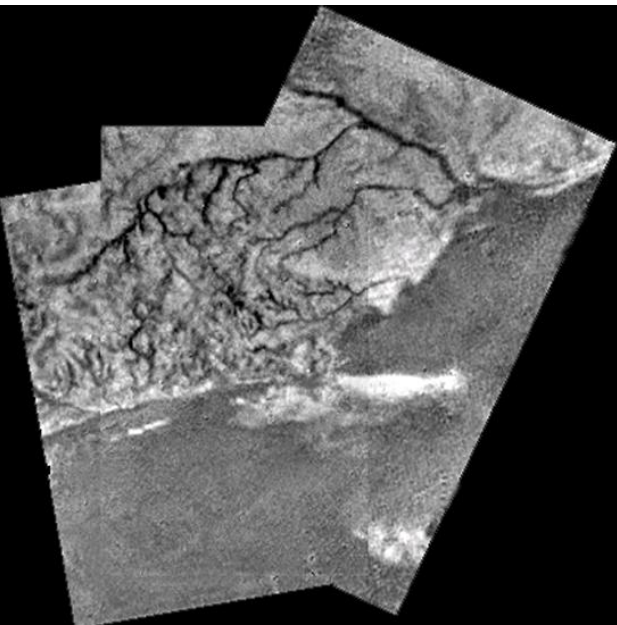


# メタンの高度分布



Niemann+ (2005)

- 上層ほどメタン量が少ないのは大気対流に伴うメタン凝結のため
- タイタンでは地球表層の水循環に似たメタン循環が起きている



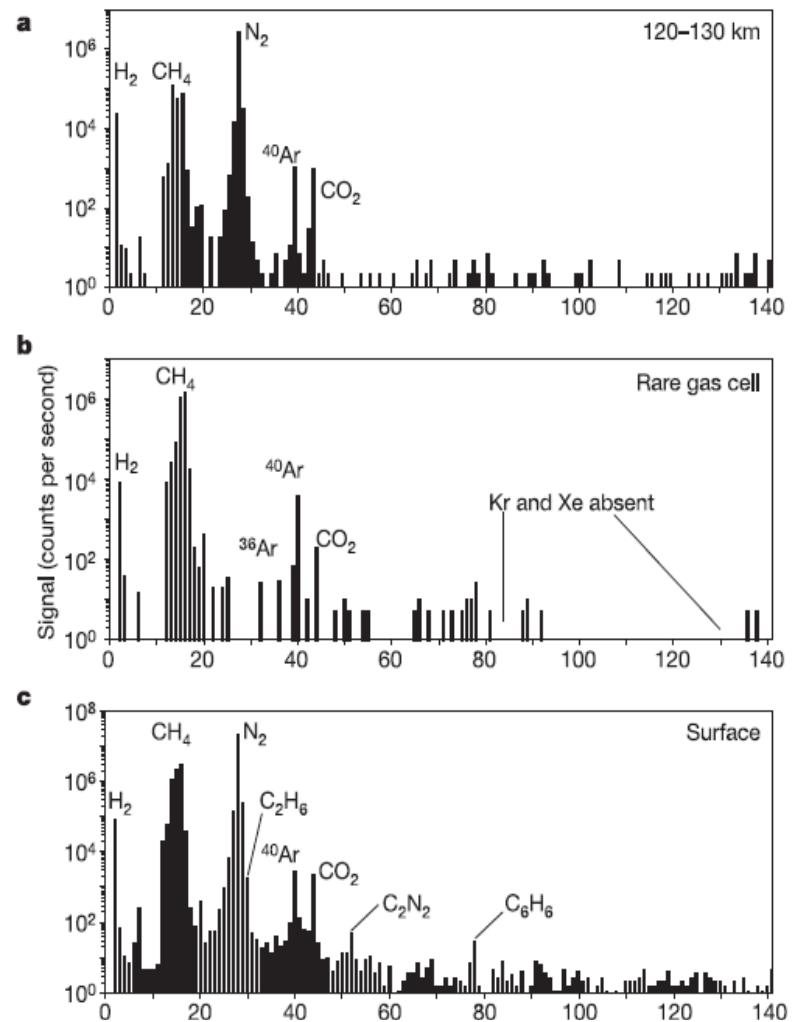
# タイタン大気組成の特徴

## 始原的な希ガスの欠乏

- KrやXeは検出限界以下(混合比 $10^{-8}$ 以下)
- $^{36}\text{Ar}$ 欠乏 (天体質量比でも地球の約半分)
- 初期大気の流失を示唆

## 放射壊変起源の希ガスの存在

- 連続脱ガスの存在を示唆



**Table 1 | GCMS determination of given ratios**

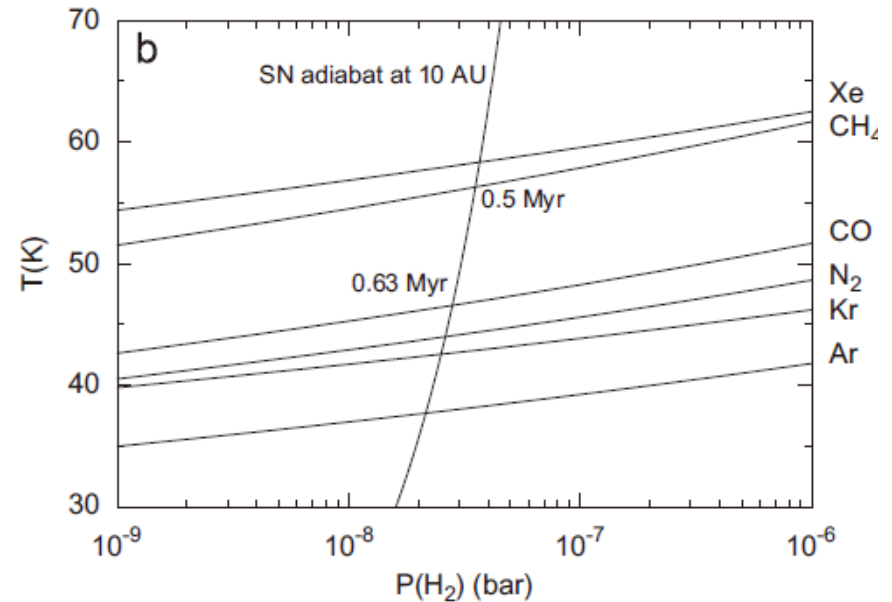
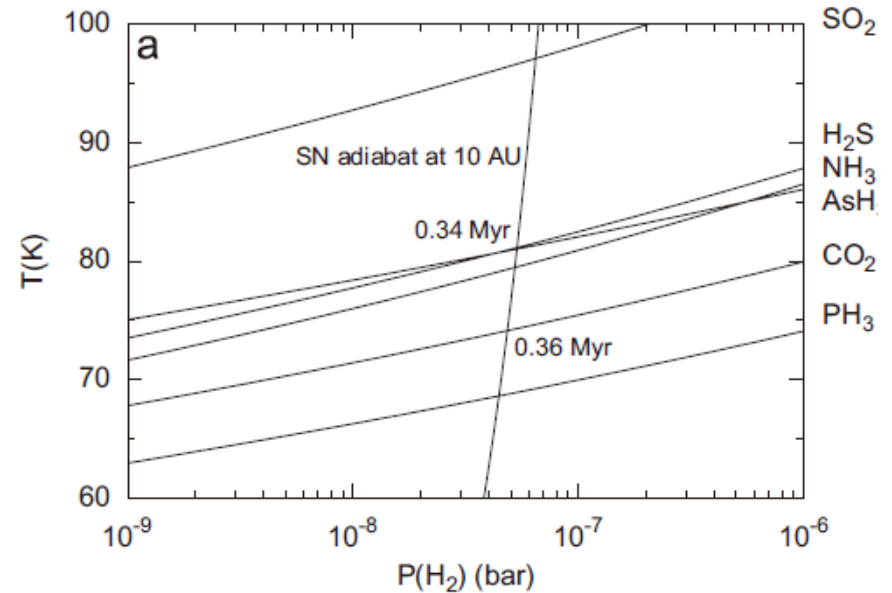
Ratio	GCMS	Altitude for GCMS calculations (km)	Titan/Earth
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	$183 \pm 5$	40.9-35.9	0.67
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	$82.3 \pm 1$	18.2-6.14	0.915
D/H	$(2.3 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	124.9-66.8	1.44
$^{36}\text{Ar}/(\text{N}_2 + \text{CH}_4)$	$(2.8 \pm 0.3) \times 10^{-7}$	75-77 (rare-gas cell)	$7.0 \times 10^{-3}$
$^{40}\text{Ar}/(\text{N}_2 + \text{CH}_4)$	$(4.32 \pm 0.1) \times 10^{-5}$	18 (to surface)	$3.61 \times 10^{-3}$

Niemann+ (2005)



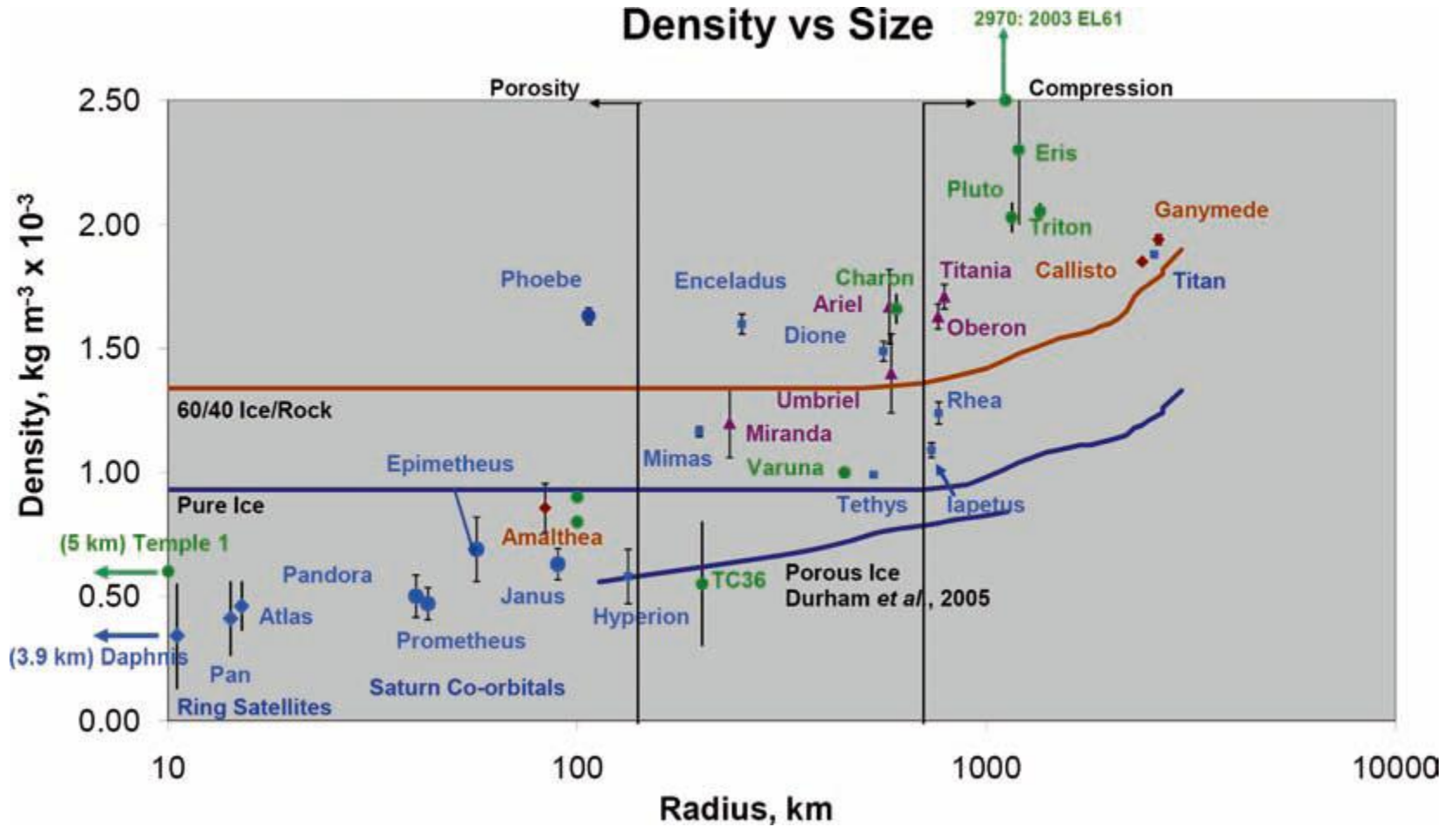
# ミッシングXe問題

- $N_2$  や  $CH_4$  が直接凝縮起源 (クラスレート氷起源) とすると大量のXeがタイタンに取り込まれる. しかしXeは見つかっていない.
- タイタン材料物質?
  - 原始惑星系円盤 → 周惑星惑星円盤
  - 集積期・初期の揮発性物質の挙動の理解が重要



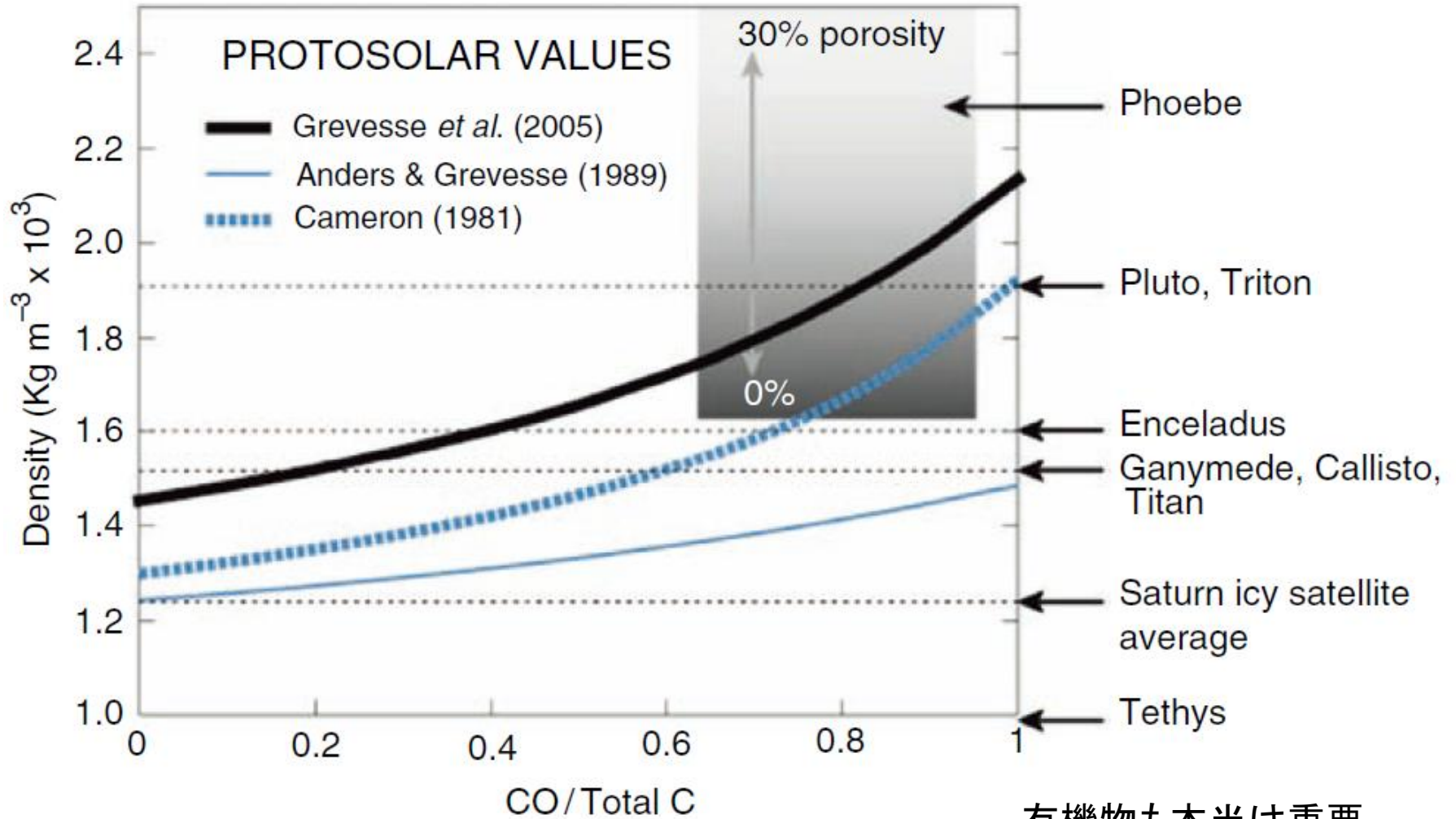


# Satellite Density



Johnson and Estrada (2009)

# C-O chemistry



有機物も本当は重要

# タイタンの起源

- 熱い起源論
- タイタンは集積期に大規模に氷が融解し、岩石コアとH<sub>2</sub>Oマントルに分化する
$$\Delta T = \frac{GM}{CR} \approx 3000 \text{ K}$$
- e.g. Kuramoto and Matsui (1994)
- 冷たい起源論
- タイタンは集積期には分化せず、後に放射壊変熱、潮汐熱、小天体重爆撃などの作用で分化する
- e.g Barr et al. (2010)

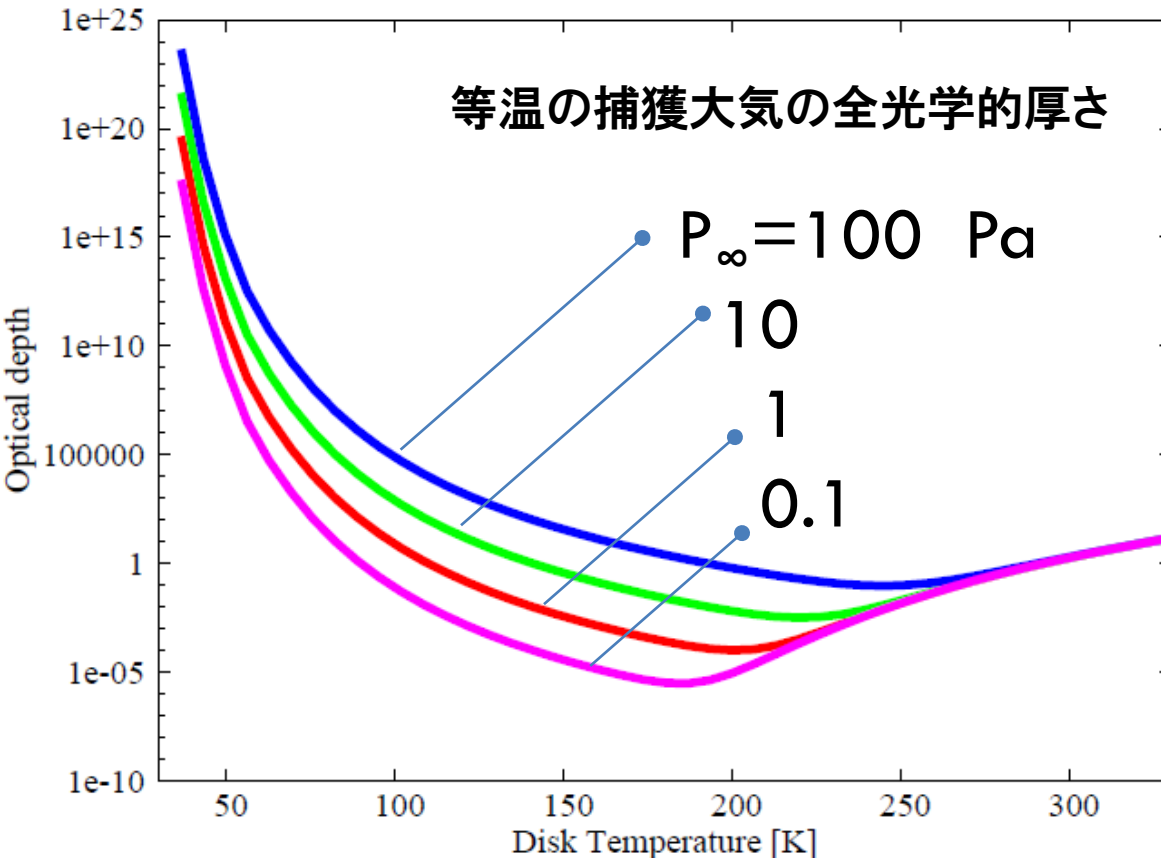
## 周土星円盤における集積時間

復元円盤 (closed system) なら  $10^2$ - $10^3$  yr Coradini et al. 1989

希薄円盤 (open system) なら  $10^4$ - $10^5$  yr Canup and Ward, 2006

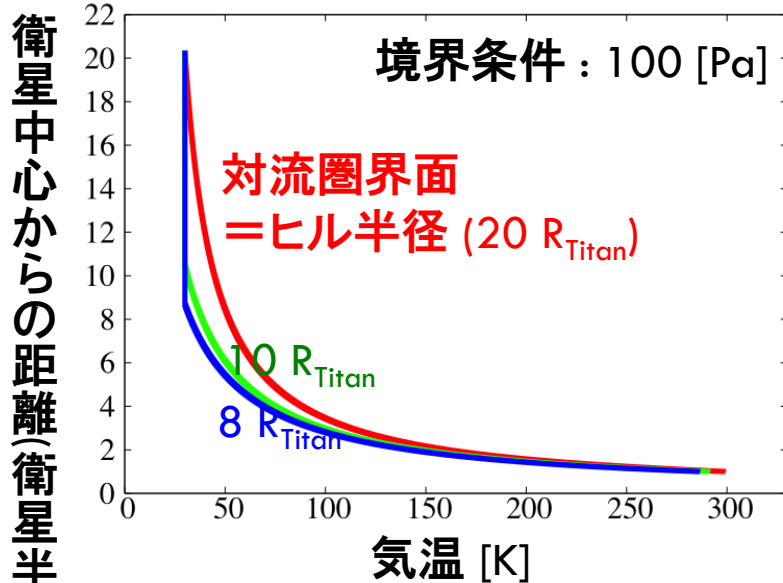
# 薄い円盤内での捕獲大気

$$\ln \left( \frac{P_s}{P_\infty} \right) = \frac{\mu}{kT} \frac{GM}{R} = 20 \left( \frac{T}{50\text{K}} \right)^{-1}$$



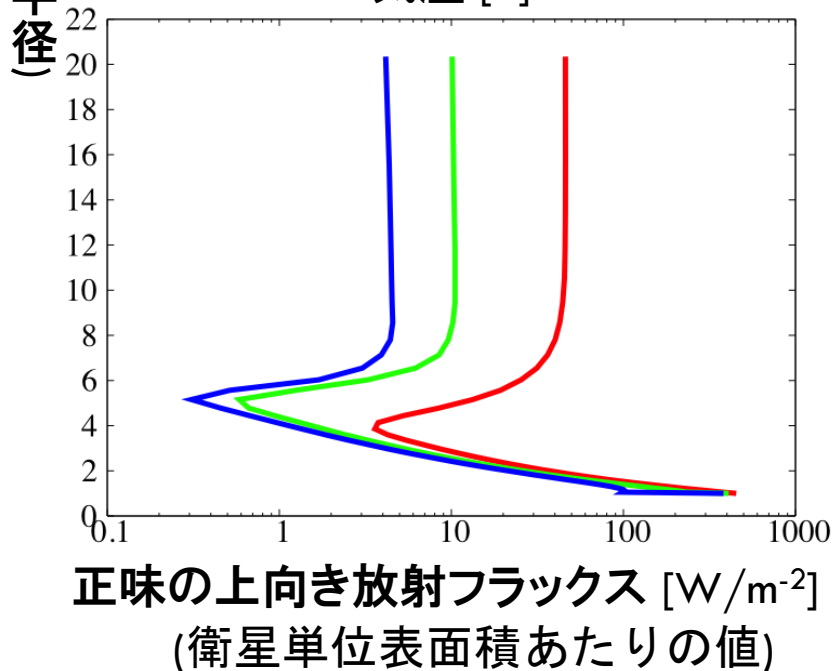
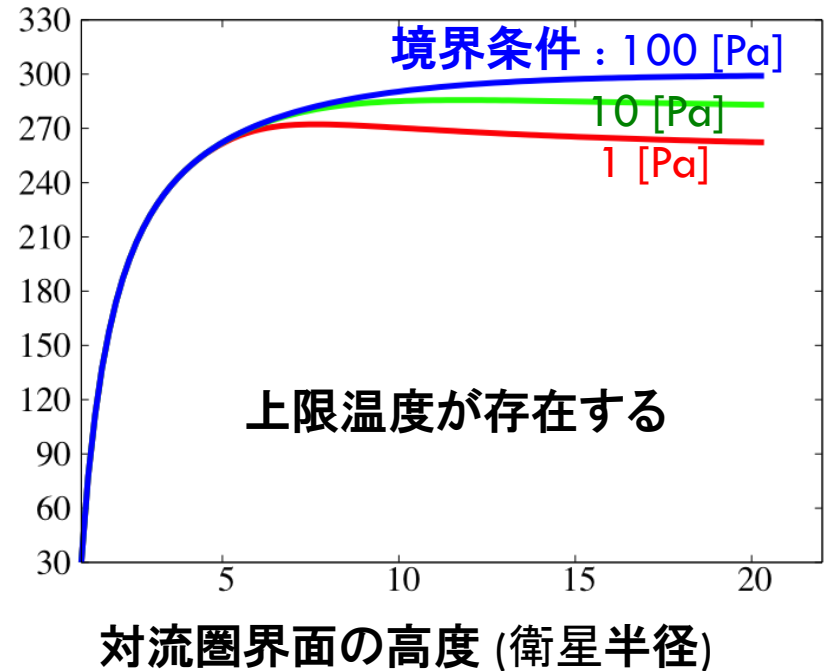
- 厚い: 周円盤圧力が1 Paとしても地表面で $5 \times 10^8 \text{ Pa}$
- 不透明: 水素ガスのopacityは小さいが、光学的厚さは十分に1を超える
- 200~250K以上の温度下では水蒸気の吸収が利く
- 捕獲大気の保温効果のために集積エネルギーが蓄積する可能性あり
- ヒル半径は $20R_{\text{titan}}$ , Bondi半径は $10R_{\text{titan}}$  at 100 K

# 原始大気の温度構造

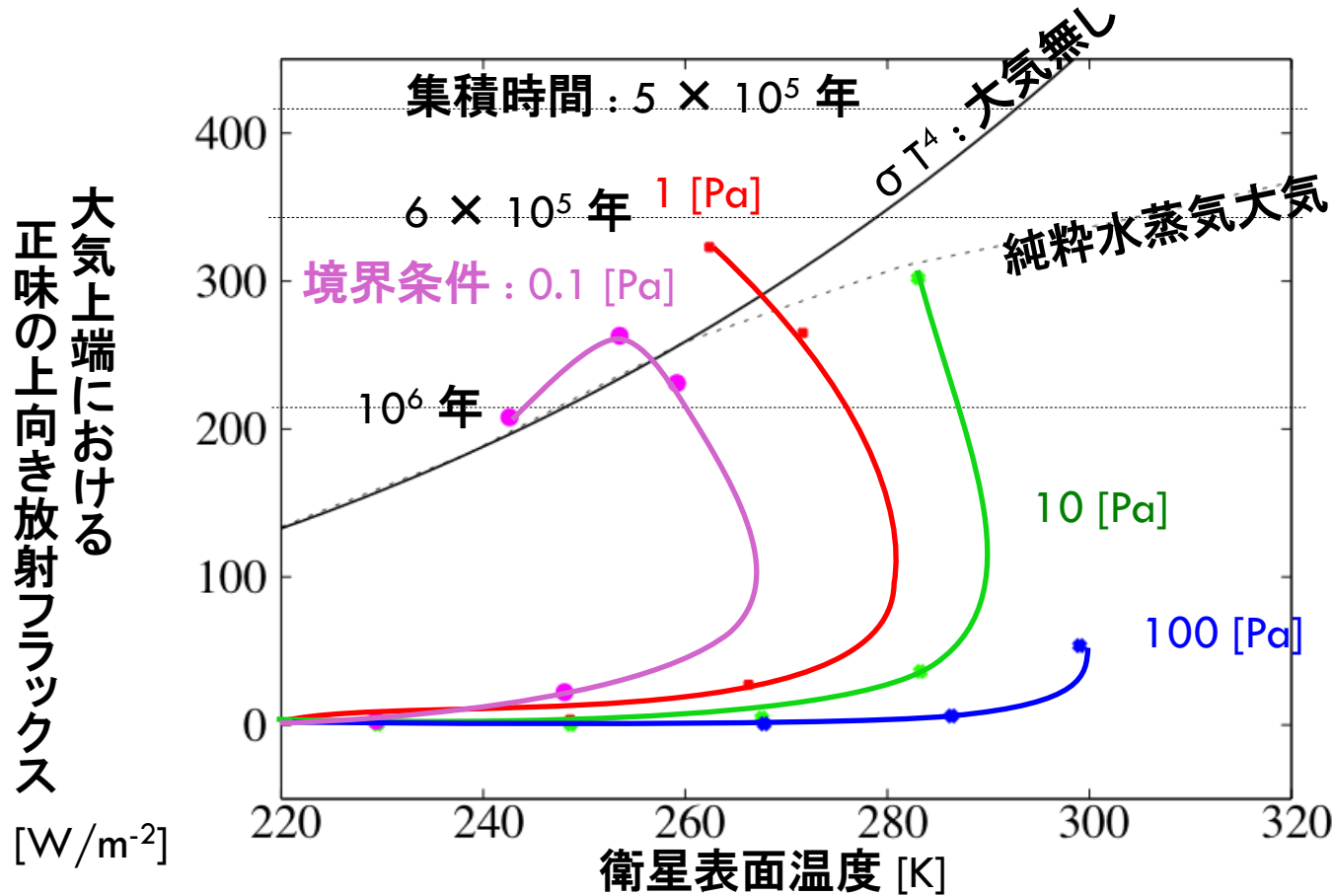


基本的に対流圏が厚くなるほど  
地表面温度は高い

大気下端(衛星表面)の温度 [K]



# 捕獲大気の放射特性と大気流出



- 射出限界の存在: 円盤条件によるが約300W/m<sup>2</sup>
- 集積エネルギーフラックスが射出限界を上回ると, 表面温度が上昇し, 氷融解と静水圧平衡の破れ(大気流出)が起きると考えられる
- 高温状態への遷移: 集積時間  $\leq 60$  万年 at  $P_\infty = 1$  Pa

# タイタンの熱い起源論

- 希薄円盤において形成しても、タイタンは熱い起源をもつ可能性がある
  - 集積時間 < 60 万年
  - 静水圧平衡が破れて、大気流出が起こり、原始大気は水蒸気に富む組成に変化する
  - 地表と蒸気圧平衡の関係にある水蒸気大気は強い保温効果を持つ  
Kuramoto & Matsui (1994).
  - 集積期に分化
- 大気の起源
  - 大気流出によって非凝結性の揮発性成分が選択的に失われる
  - $N_2$ は他の水溶性分子起源
  - 低い $Ar/N_2$ 比と調和
- 円盤・他衛星組成への影響

