

## Constraints on gas giant satellite formation from the interior states of partially differentiated satellites

Amy C. Barr, Robin M. Canup  
*Icarus* 198 (2008) 163-177



担当: 洪 鵬 (東大・杉田研M2)

PIA01802 (NASA/JPL)

2010/10/21 衝突研究会 第18回論文紹介セミナー

## 本論文の位置づけ

1. Canup & Ward, 2006, *Nature*
  - "Gas-starved" disk model, 時代: 集積期
2. Barr & Canup, 2008, *Icarus*
  - "Gas-starved" model に則った衛星集積モデル
    - 対象: カリスト、リア、ガニメデ, 時代: 集積期
3. Barr & Canup, 2010, *Nat. Geosic.*
  - LHB impact model
    - 対象: カリスト、ガニメデ, 時代: LHB
4. Barr et al., 2010, *Icarus*
  - 2と3のモデルをタイタンに応用
    - 時代: 集積 ~ LHB

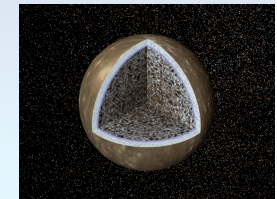


## 要旨

- 氷と岩石が混合した内部状態を持つ氷衛星
  - 形成時から現在まで未分化な状態を保存
    - 集積加熱 + 放射性物質壊変熱 < 衛星が分化する温度
- ↓
- 氷衛星の形成時期に制約を与えることが可能!
  - » パラメータ: 集積時間  $\tau_{acc}$ , 円盤温度  $T_d$
  - » 小さいインパクトを仮定 (表面付近のみ集積加熱)
  - » 短寿命放射性元素 ( $^{26}\text{Al}$ ) のみ考慮
- カリスト (最も外側のガリレオ衛星、部分的に分化)
  - » 集積時間 > 0.6 Myr, CAI形成から 4 Myr 以降に集積完了
- リア (土星の中型衛星、部分的に分化)
  - » CAI形成から 2 Myr 以降に集積完了
- 円盤の散逸時間 → 星周円盤の観測結果と調和的

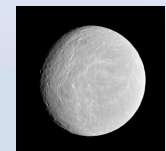
## 未分化な氷衛星

- カリスト (半径: 2410 km, 最も外側のガリレオ衛星)
  - 未分化な内部
    - 古い地表面 & 重力場観測 (Anderson et al., 2001)
  - 分化している外側
    - ~ 300 km の氷地殻 (Anderson et al., 2001)
    - 内部海が存在 (Zimmer et al., 2000)
      - 地下 50 ~ 200 km に
      - 数十 ~ 数百 km の厚さで存在 (木村, 2008)
- リア (半径: 765 km, 土星系で2番目に大きい衛星)
  - 未分化な内部と分化した外側
    - 重力場より推定された氷地殻の厚さ
      - 46 ± 24 km ~ 158 ± 23 km
      - (Anderson & Schubert, 2007) (less et al., 2007)



Callisto (PIA01478, NASA/JPL)

問題設定を簡単にするため  
本論文では内部海を無視



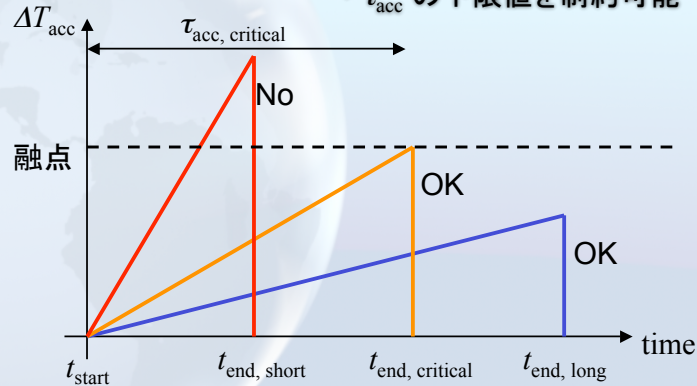
Rhea

(PIA12648, NASA/JPL/Space Science Institute)

# 未分化になるための条件

- 集積加熱 + 放射性物質壊変熱 < 氷の融点

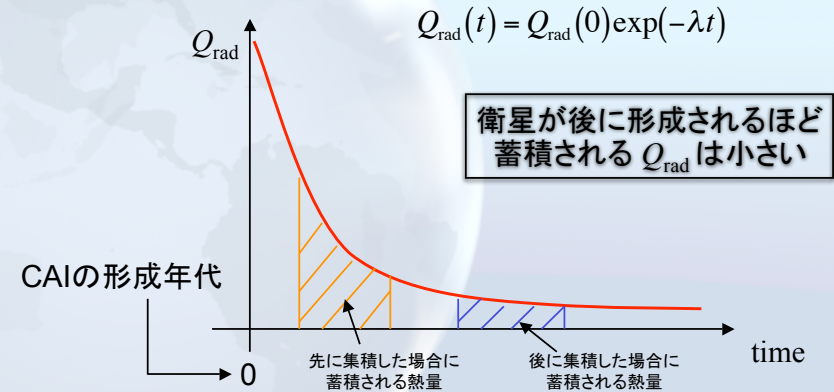
- 集積による昇温  $\Delta T_{acc}$  は集積時間  $\tau_{acc}$  に依存  
→  $\tau_{acc}$  の下限値を制約可能



# 未分化になるための条件

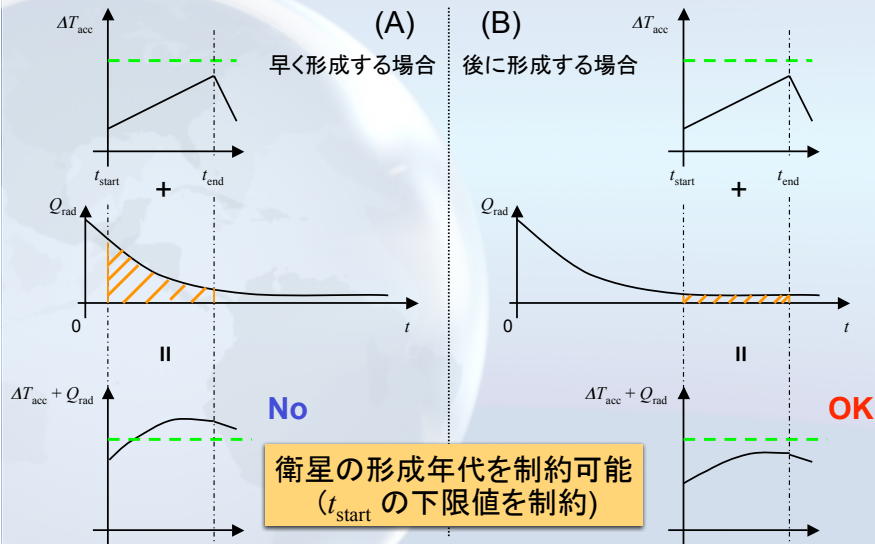
- 集積加熱 + 放射性物質壊変熱 < 氷の融点

- 壊変熱  $Q_{rad}$  は太陽系の初期ほど大きい



# 未分化になるための条件

- 集積加熱 + 放射性物質壊変熱 < 氷の融点



# これまでの研究

- 集積熱を全て保存したら... (重力結合エネルギー  $E_g$  vs 氷の潜熱  $L_w = 3 \times 10^5$  J/kg)
  - カリストは必ず分化する:  $E_{g, Callisto} = 2 \times 10^6$  J/kg >  $L_w$
  - リアは分化しないが、壊変熱を加味すると分化しうる  
 $E_{g, Rhea} \sim 10^5$  J/kg
- $^{26}\text{Al}$  &  $^{60}\text{Fe}$  だけで加熱したら... (McKinnon, 2006)
  - カリストはCAI形成から 2.6 - 3 Myr以降に集積完了
- 最小質量円盤モデルに則った集積モデル (Squyres et al., 1988)
  - リアは  $\sim 10^3$  yr で集積しても分化しない
  - 問題点
    - Impactor自体の温度を無視
    - 放射壊変熱を考慮せず
    - 最小質量円盤モデルの妥当性: 短い  $\tau_{acc}$  → カリストは必ず分化
- 集積熱と壊変熱を両方考慮した集積モデルはない

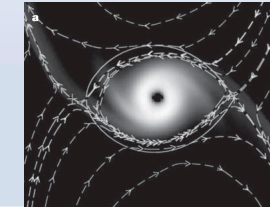
# 本論文の目的

- 集積モデルを用いて、氷衛星の熱史から **衛星の形成時期と集積時間** に制約を与える。
  - 新規な点
    - 境界条件に **Gas-starved disk model** を採用
    - **集積加熱と放射性物質壊変熱** の両方を考慮
- 注意すべき点
  - Impactor は小さいと仮定
    - 衝突による加熱は地表面付近のみ
  - 集積直後の時期までしか議論できない
    - 対流、伝導による熱輸送は無視
    - 短寿命放射性核種のみ考慮

# 衛星集積時の環境

~ Subnebula model の変遷 ~

- (従来) 最小質量円盤モデル (Lunine & Stevenson, 1982)
  - **高い円盤密度、高温、短い集積時間** ( $10^3 - 10^4$  yr)
    - 問題点: カリスト、タイタンは必ず分化 → 観測と矛盾
    - 衛星は現在と同じ位置で形成
      - **大きい Impactor**
        - ▶ 典型的サイズ、300 - 500 km (Mosqueira & Estrada, 2003)
- (現在) Gas-starved disk model (Canup & Ward, 2006: 以降CWモデル)
  - Solar nebulaからのゆっくりとしたinflow
  - **低い円盤密度、低温、長い集積時間** ( $10^5 - 10^6$  yr)
    - 衛星は外側で集積 → 内側へ移動
    - 衛星系の質量分布を良く再現
      - **小さな Impactor**
        - ▶ 1 m for Rhea
        - ▶ ~ O(1) km or less for Callisto



# 集積加熱の見積もり

$$\bar{\rho} C_p (T - T_d) \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\dot{M} u_i^2}{4\pi r^2} - \sigma_{SB} (T^4 - T_d^4)$$

● **地表面での昇温 = 衝突加熱 - 放射冷却**

[ 衛星のパラメータ ]

[ 円盤のパラメータ ]

$\bar{\rho}$  : 平均密度

$\sigma_{SB}$  : Stefan-Boltzmann 定数

$C_p$  : 比熱

$u_i^2 = v_{esc}^2 + v_\infty^2$  : 衝突速度

$T = T(t)$  : 地表面温度

$v_{esc}^2 = \frac{2GM(t)}{r(t)}$  : 脱出速度

$r = r(t)$  : 半径

CWモデルで得られた値を使う

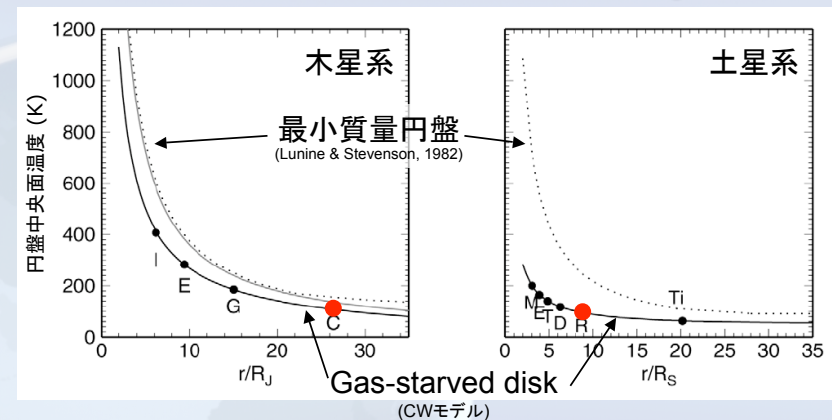
$v_\infty = \frac{v_{esc}}{2}$  : 無限遠方での相対初速度

$\dot{M} = \frac{M}{\tau_{acc}}$  : 集積率

$\tau_{acc}$  : 集積時間 (フリーパラメータ)

$T_d$  : 円盤温度 (Impactor温度)

# 衛星集積時の環境 ~ 円盤温度 $T_d$ の見積もり ~



● **パラメーター  $T_d$  の取りうる範囲**

- 上限: 最小質量モデル、下限: CWモデル + ガス惑星による gap 形成
  - カリスト: 70 K ~ 165 K (標準値: 100 K)
  - リア: 70 K ~ 250 K (標準値: 95 K)

## 集積加熱の見積もり ~ 含まれる近似 ~

$$\bar{\rho} C_p (T - T_d) \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\dot{M} u_i^2}{4\pi r^2} - \sigma_{SB} (T^4 - T_d^4)$$

- 周囲の円盤は光学的に厚い (Semenov et al., 2003)
- 球対称近似
- 一定の集積率 : 大きな衛星による重力擾動 ≧ 背景粒子による擾動
- **Impactor は小さい** → 地表面付近のみ加熱される
- 拡散と対流による熱輸送は無視 ↖ 後ほど議論

- 拡散が効く空間スケール ~  $\sqrt{\left(\frac{\kappa}{2.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}}\right) \left(\frac{\tau_{\text{acc}}}{10^7 \text{ yr}}\right)} \leq 30 \text{ km}$

- 対流の開始時間 >  $3 \times 10^6 \text{ yr}$  for Rhea  
 ~  $10^8 \text{ yr}$  for Callisto

(Zaronek & Parmentier, 2004)

## 放射性物質壊変熱の見積もり

$$\Delta T_r(r, t) = \frac{1}{C_p} \int_{t_f(r)}^t m_r q_{26}(t) dt$$

$q_{26}(t)$  : 単位質量当たりの発熱量  
 $m_r$  : 岩石の割合  
 $\lambda_{26}$  : 壊変定数  
 $t_f(r)$  : 半径  $r$  の層が形成された年代

$$= \frac{m_r q_{26}(0)}{C_p \lambda_{26}} [\exp(-\lambda_{26} t_f(r)) - \exp(-\lambda_{26} t)]$$

- 半径  $r$  の地点での昇温 : 時間  $t$  は CAI 形成時を 0 とする
- $^{26}\text{Al}$  のみを考慮 : **短寿命核種の中では圧倒的に発熱量が多い**  
 -  $^{60}\text{Fe}$  の 100 倍以上
- 集積した後も融けないか? → **最大発熱量も考慮**

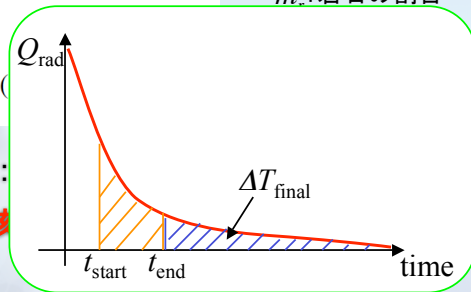
$$\Delta T_{r, \text{final}}(r) = \frac{1}{C_p} \int_{t_f(R_s)}^{\infty} m_r q_{26}(t) dt = \frac{m_r q_{26}(0)}{C_p \lambda_{26}} \exp(-\lambda_{26} t_f)$$

## 放射性物質壊変熱の見積もり

$$\Delta T_r(r, t) = \frac{1}{C_p} \int_{t_f(r)}^t m_r q_{26}(t) dt$$

$q_{26}(t)$  : 単位質量当たりの発熱量  
 $m_r$  : 岩石の割合

$$= \frac{m_r q_{26}(0)}{C_p \lambda_{26}} [\exp(-\lambda_{26} t_f(r)) - \exp(-\lambda_{26} t)]$$



- 半径  $r$  の地点での昇温 :
- $^{26}\text{Al}$  のみを考慮 : **短寿命核種**  
 -  $^{60}\text{Fe}$  の 100 倍以上
- 集積した後も融けないか? → **最大発熱量も考慮**

$$\Delta T_{r, \text{final}}(r) = \frac{1}{C_p} \int_{t_f(R_s)}^{\infty} m_r q_{26}(t) dt = \frac{m_r q_{26}(0)}{C_p \lambda_{26}} \exp(-\lambda_{26} t_f)$$

## 氷の融点

- $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{NH}_3$  の凝縮曲線 (Leliwa-Kopystynski et al., 2002)

$$T_m(P, X) \approx T_o + AP + BP^2 - CX - DX^2$$

$X$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) :  $\text{NH}_3$  の含有率

- 衛星内部の圧力 (均質な密度を仮定)

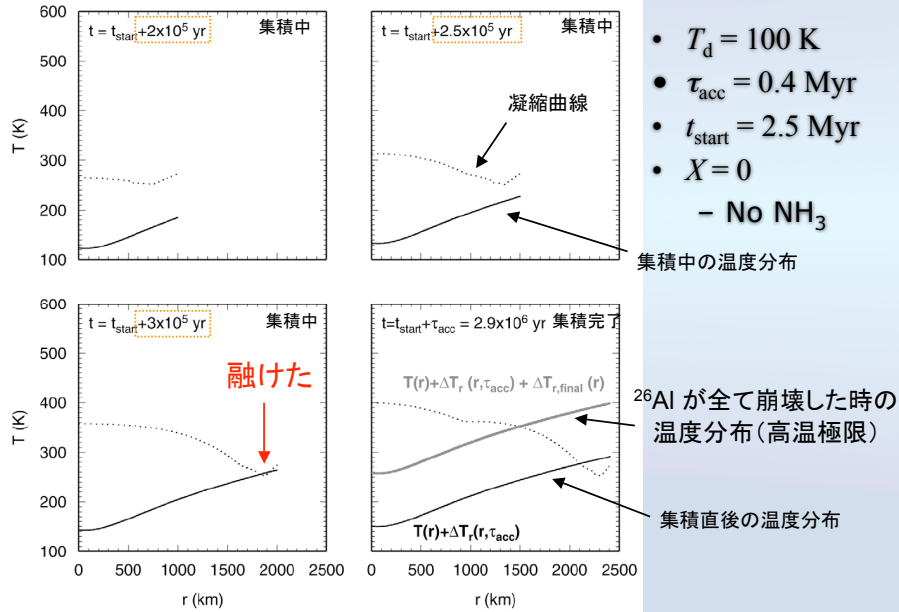
$$P(r, t) = \frac{2\pi}{3} G \bar{\rho}^2 (r_{\text{max}}^2(t) - r^2)$$

Ice properties

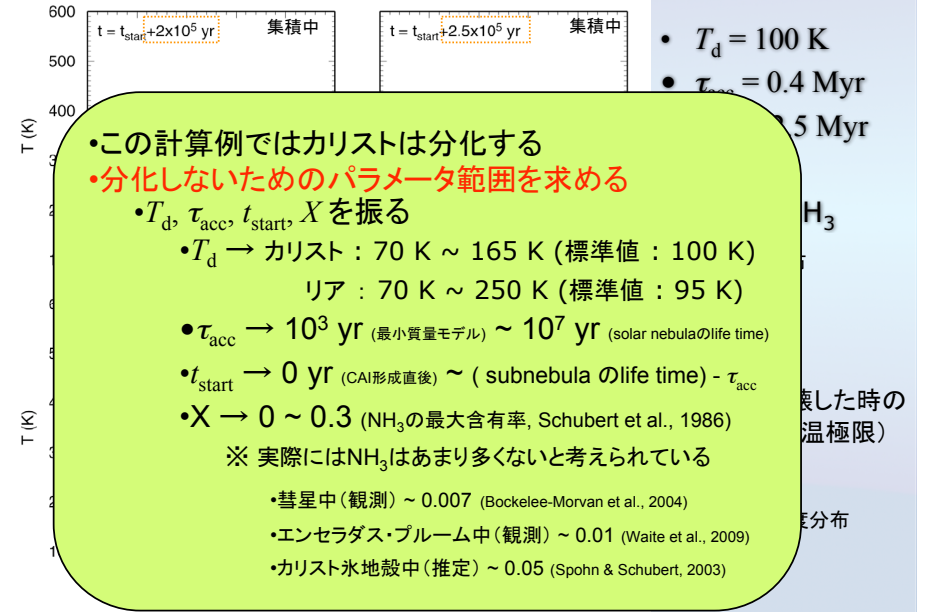
(Hobbs, 1974)

Ice phase	Pressure range	$T_o$ (K)	$A$ (KPa $^{-1}$ )	$B$ (KPa $^{-2}$ )
Ice I	$P \leq 209 \text{ MPa}$	273.2	$-7.95 \times 10^{-8}$	$-9.6 \times 10^{-17}$
Ice III	$209 \text{ MPa} < P < 344 \text{ MPa}$	247.7	$2.38 \times 10^{-8}$	0
Ice V	$344 \text{ MPa} < P < 626 \text{ MPa}$	242.5	$4.9 \times 10^{-8}$	0
Ice VI	$626 \text{ MPa} < P < 2150 \text{ MPa}$	190.3	$1.54 \times 10^{-7}$	$-3.43 \times 10^{-17}$
Ice VII	$P > 2240 \text{ MPa}$	149.9	$9.14 \times 10^{-8}$	0

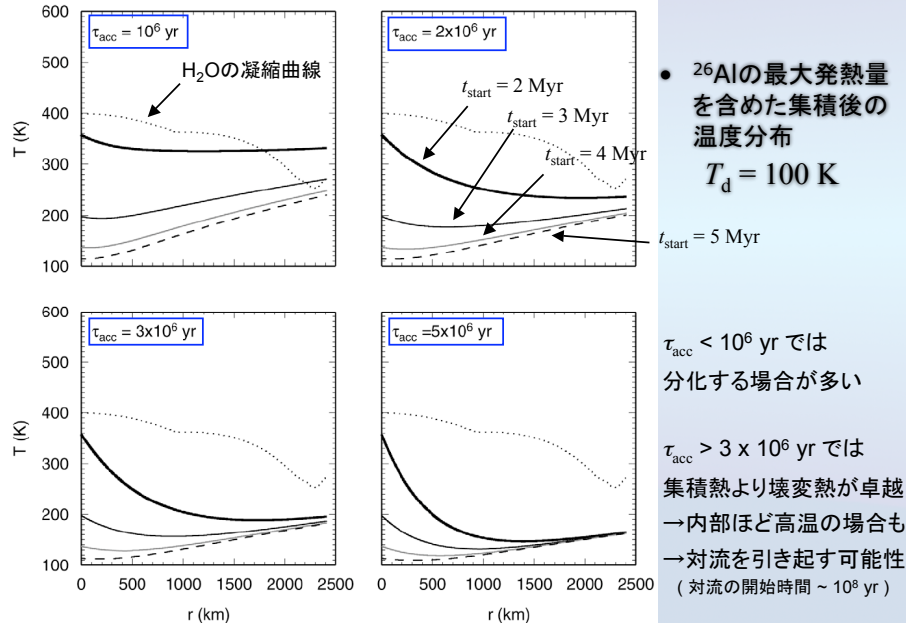
## 結果:集積中のカリストの温度分布の一例



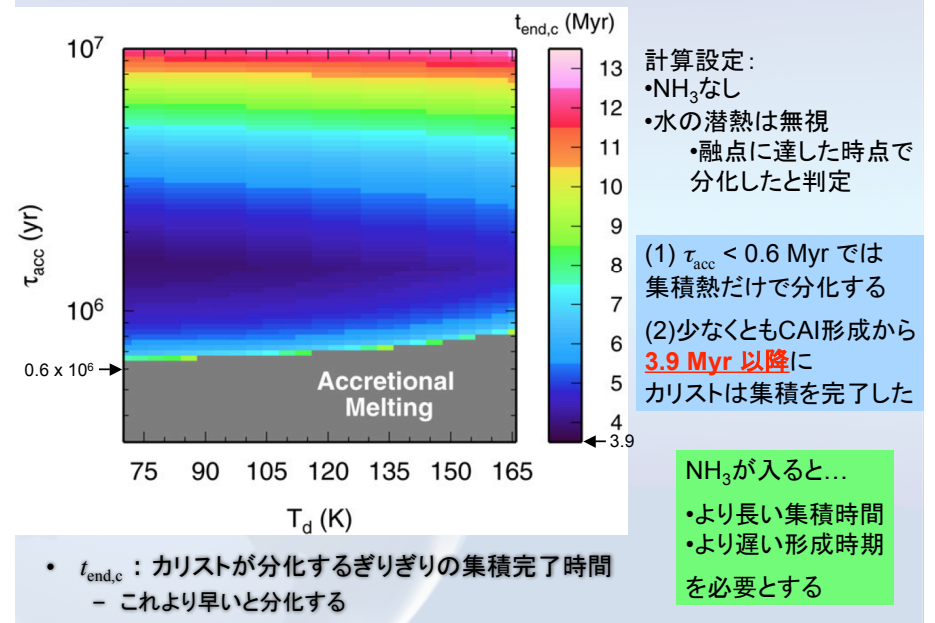
## 結果:集積中のカリストの温度分布の一例



## カリストの熱史 ~ 集積時間、集積開始時間 依存性 ~

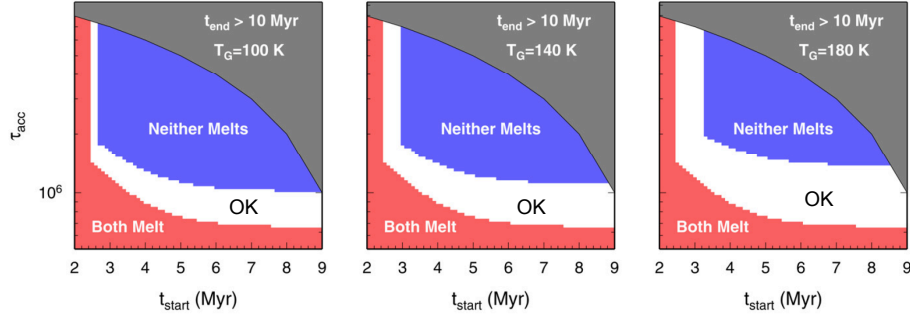


## カリストが分化しないパラメータ範囲



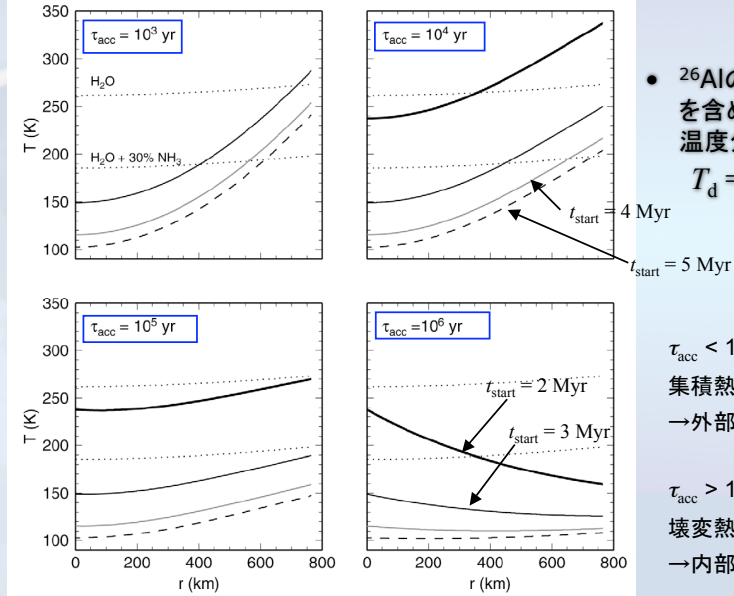
$T_d = 100\text{ K}$  : カリスト軌道での円盤温度  
 $T_G$  : ガニメデ軌道での円盤温度

## ガニメデとカリストの作り分け



- 白い領域 : ガニメデは分化して、カリストは未分化な領域  
 -  $T_G$  上がるほど領域は広がる
- ガニメデとカリストを作り分けるパラメータ範囲が存在  
 - 分化度の違いは始源的である可能性がある

## リアの熱史 ~ 集積時間、集積開始時間 依存性 ~

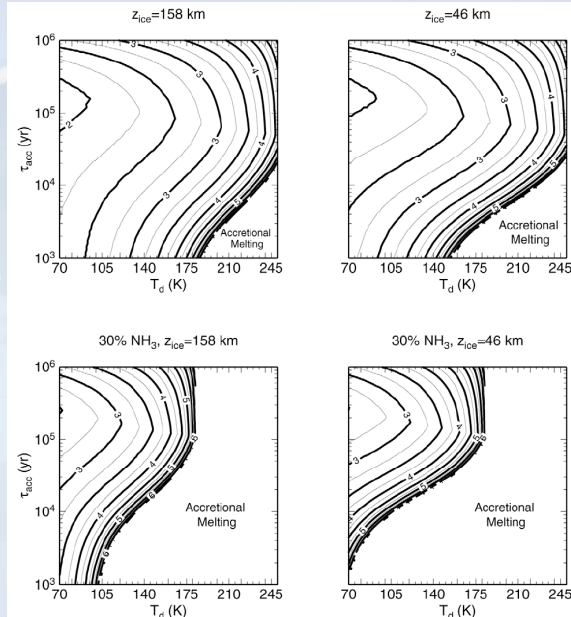


•  $^{26}\text{Al}$ の最大発熱量を含めた集積後の温度分布  
 $T_d = 95\text{ K}$

$\tau_{\text{acc}} < 10^5\text{ yr}$  では  
 集積熱が卓越  
 → 外部ほど高温

$\tau_{\text{acc}} > 10^6\text{ yr}$  では  
 壊変熱が卓越  
 → 内部ほど高温

## リアが分化しないパラメータ範囲



計算設定:  
 • 水の潜熱は無視

等高線:  $t_{\text{end,c}}$  (Myr)  
 $Z_{\text{ice}}$ : 氷地殻の厚さ

少なくともCAI形成から  
**1.9 Myr 以降**に  
 リアは集積を完了した

NH<sub>3</sub>が入ると...

- より長い集積時間
  - より遅い形成時期
  - より低い円盤温度
- を必要とする

## 議論: 衝突による加熱

- 今回の計算では"小さな" impactor と近似  
 ~ 1 m for Rhea, 4 km - 800 m for Callisto, 30 - 6 m for Ganymede
  - 計算過程
    - » 外からの供給率 ~ 粒子と衛星の衝突によって失われる率
    - » 粒子同士の衝突率 ~ 粒子と衛星の衝突率
  - 粒子は必ず合体すると仮定 → impactor size の最大値を与える
- 遅い衝突速度  
 $u_i < 0.5\text{ km/s}$  for Rhea,  $u_i < 2.0\text{ km/s}$  for Callisto

• 低速度 → 衝突による大気形成は起きない (Pierazzo et al., 1997)

• shock heating が効く深さ  $\delta_{\text{heat}}$  vs 拡散が効く深さ  $\delta_{\text{cool}}$

- リアとガニメデでは  $\delta_{\text{heat}} < \delta_{\text{cool}}$

(Gault & Heitowitz, 1963; O'Keefe & Ahrens, 1982)

- カリストでは  $\delta_{\text{heat}} > \delta_{\text{cool}}$

• 衝突による加熱が内部まで効く可能性がある

## まとめ

- CW model に則った衛星集積モデル
  - 集積加熱 と 短寿命放射性元素の壊変熱 を考慮
  - 小さな impactor 近似
    - カリストの集積時間は 0.6 Myr 以上である
    - カリストはCAI形成から ~ 4 Myr 以降に集積を完了した
      - 平均的な星周円盤の life time ~ 3 Myr
      - Solar nebula の消失は  
CAI形成から 4 Myr 以降であった可能性を示唆
  - 集積後のカリストの熱史については不明な点が残る
    - 長寿命放射性元素 → 対流が起こるはず
      - » 対流によって熱を逃がせなければ、カリストは分化してしまう
      - » 圧密の効果 → 対流を抑制
    - Solid-state convection ?