

# 微惑星の熱史と内部物質への影響

脇田茂<sup>1</sup>

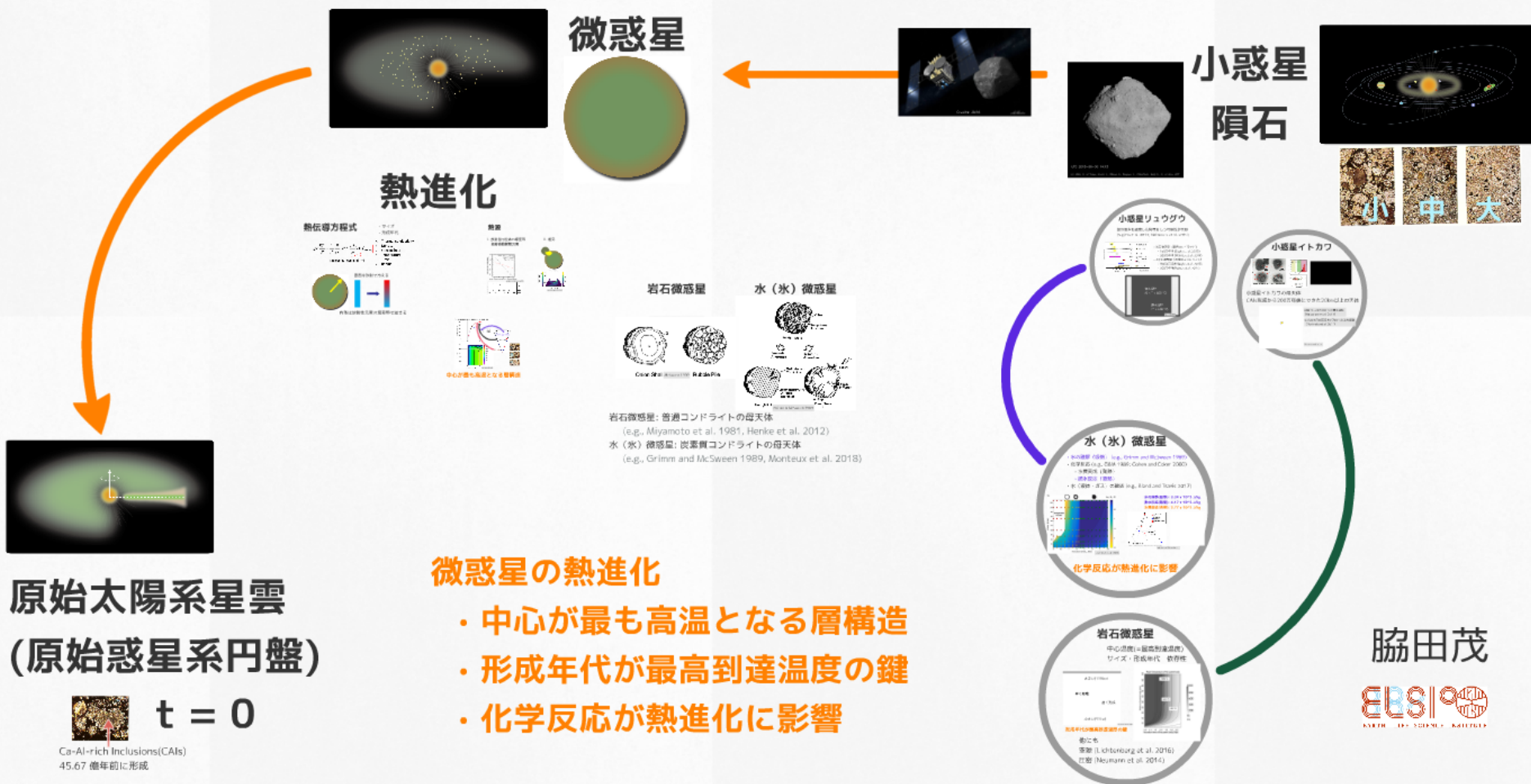
<sup>1</sup> 東京工業大学 地球生命研究所

初期太陽系の姿を明らかにするための重要な鍵として、小惑星の観測・隕石の分析、そして微惑星の熱史がある。過去の太陽系に存在していた微惑星の熱史を隕石は記録しており、多くの隕石の飛来元は小惑星となっている。そのため、小惑星の観測結果で現在の姿を理解すること、隕石の分析結果から経験温度とその時期を知ることが、現在から過去に遡る形で微惑星の理解につながってくる。本講演では、過去から現在の太陽系へと至るため、微惑星の熱史を調べることで、隕石や小惑星となる天体内部の物質が経験してきた過程をお話したい。

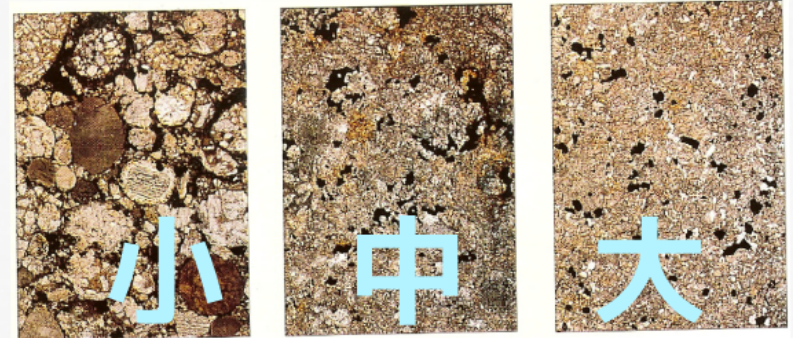
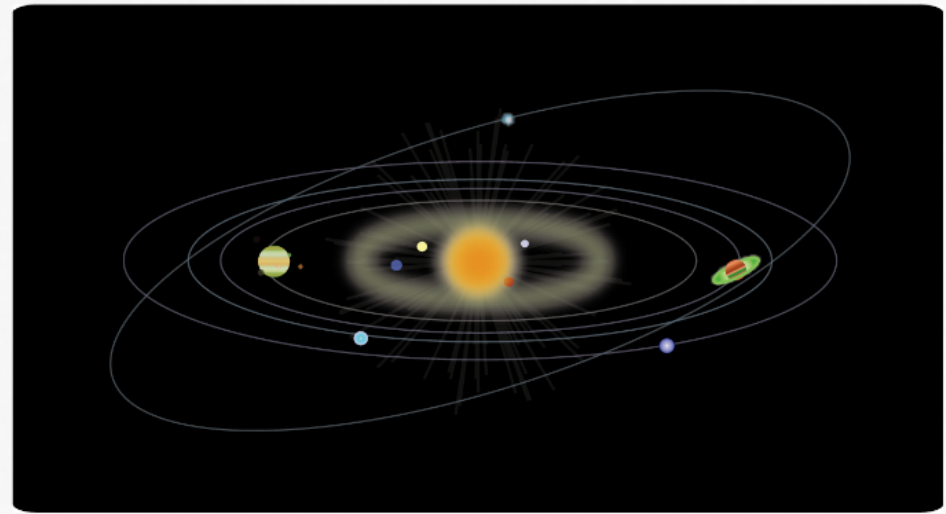
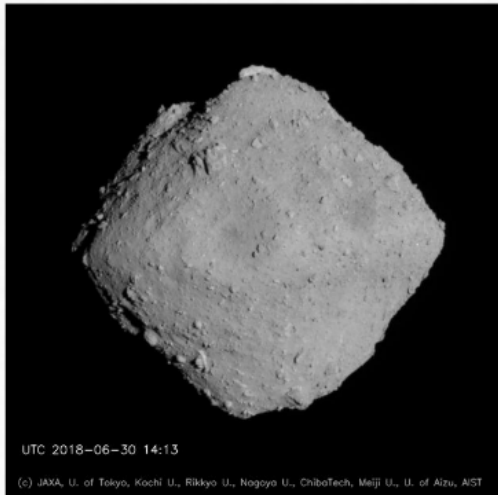
小惑星や隕石に様々な型があるように、微惑星もそうであったと思われる。ここでは、岩石のみの岩石微惑星と氷と岩石から構成されている氷微惑星の2つに大別してみる。それらの熱進化を調べる際には、短寿命放射性元素である<sup>26</sup>Al(半減期72万年)が主な熱源となる (e.g., Urey 1955, Gail et al. 2014)。球対称を仮定した微惑星内部の温度構造は熱伝導方程式を解くことで得ることができ、中心がもっとも高く表面に向かうほど低くなる層構造となることがわかる (e.g., Miyamoto et al. 1981, McSween 1999)。また、微惑星の形成年代が早い(古い)ほどに熱源である<sup>26</sup>Alの量が増え、遅い(若い)ほど減ることになる。微惑星が到達可能な最高温度の違いに反映されるため、形成年代は熱進化では重要な鍵となる。一方、微惑星の最高到達温度は、30km以上の天体であればほとんど変化がない。探査機はやぶさが持ち帰った小惑星イトカワの微粒子は、分析の結果から800度を経験していたことなどがわかった (e.g., Nakamura et al. 2011)。イトカワ微粒子の経験温度等を達成することが可能であるイトカワ母天体は、微惑星の熱史を解くことで太陽系初期から200万年後に形成された半径20km以上の岩石微惑星であることがわかった (Wakita et al. 2014)。

一方、水(氷)微惑星の熱進化では、氷(水)の存在により熱史が複雑となる。水と氷の反応によって水質変成が起こり、内部では含水鉱物が生成される (Grimm and McSween 1989, Wakita and Sekita 2011, Monetoux et al. 2018)。しかし、更に温度が上昇した場合には、脱水反応が生じることになる。これらの化学反応は、前者が発熱反応となり温度上昇を促進させ、後者や氷の融解は温度上昇を抑制することになる。このように水(氷)微惑星の熱進化では化学反応が重要となる。探査機はやぶさ2によって小惑星リュウグウの表面物質が明らかになりつつあり、部分的に脱水した物質を持つ可能性も示唆されている (Sugita et al. 2019, Nakamura et al. 2019)。岩石微惑星と水(氷)微惑星の中間に位置すると考えると (e.g., Fujiya et al. 2012, Doyle et al. 2015)、リュウグウの母天体が形成された年代を推測することが可能となる。

# 微惑星の熱史と内部物質への影響

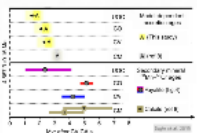


# 小惑星 隕石

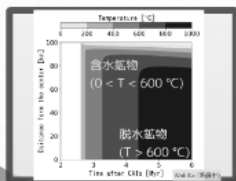


## 小惑星リュウグウ

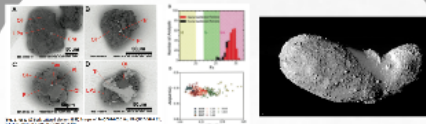
部分脱水を経験した物質をもつ可能性が示唆  
(Sugita et al. 2019; Nakamura et al. 2019)



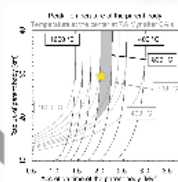
- ・岩石微惑星 (普通コンドライト)
  - ・180万年後 (Doyle et al. 2015)
  - ・200万年後 (Wakita et al. 2014)
- ・水(氷)微惑星 (炭素質コンドライト)
  - ・約250万年後 (Doyle et al. 2015)
  - ・300万年後 (Fujiya et al. 2012)



## 小惑星イトカワ



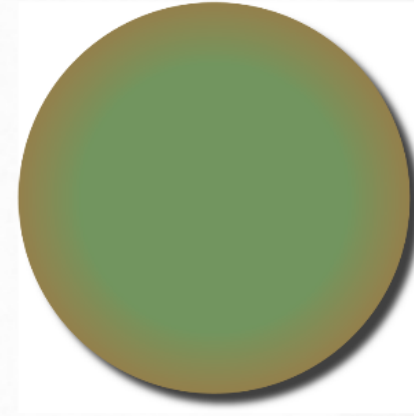
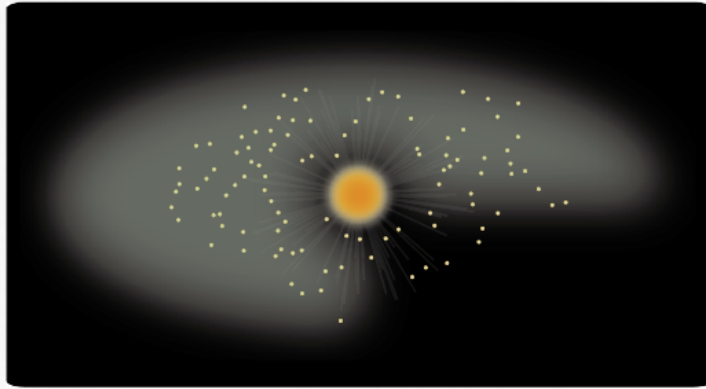
小惑星イトカワの母天体  
CAIs形成から200万年後にできた20km以上の天体



800 °C 以上1000 °C 未満を経験  
(Nakamura et al. 2011)  
CAIsから760万年後に700 °C 以上を経験  
(Yurimoto et al. 2011)

Wakita et al. 2014

# 微惑星

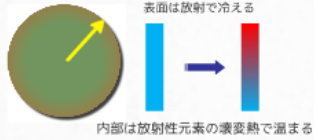


# 熱進化

## 熱伝導方程式

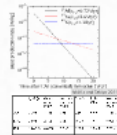
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + f_{\text{radioactive}}$$

- ・サイズ
- ・形成年代
- K: Thermal conductivity
- $\rho$ : Density
- c: Specific heat
- T: Temperature
- t: Time
- r: Radius

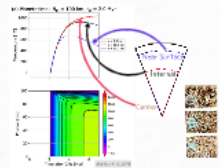
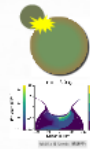


## 熱源

I. 放射性同位体の衰変熱  
短寿命放射性元素

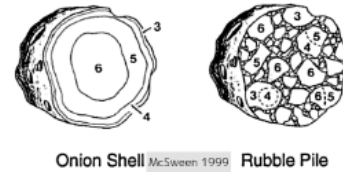


II. 衝突

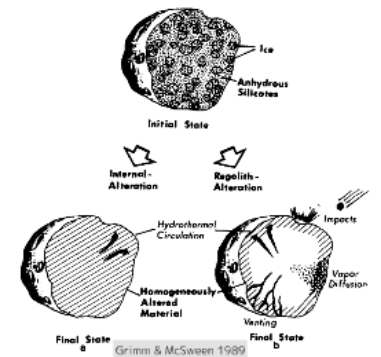


中心が最も高温となる層構造

## 岩石微惑星



## 水（氷）微惑星



岩石微惑星: 普通コンドライトの母天体

(e.g., Miyamoto et al. 1981, Henke et al. 2012)

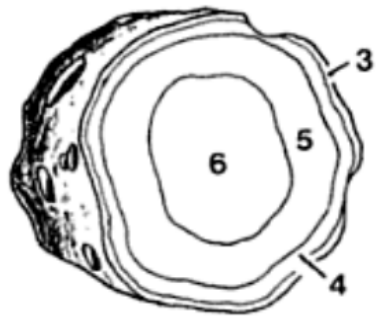
水（氷）微惑星: 炭素質コンドライトの母天体

(e.g., Grimm and McSween 1989, Monteux et al. 2018)



# 岩石微惑星

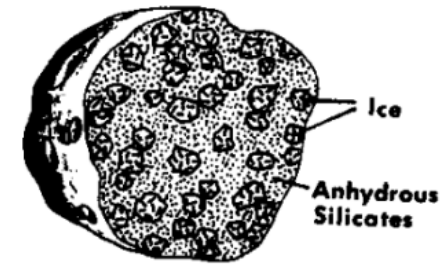
# 水（氷）微惑星



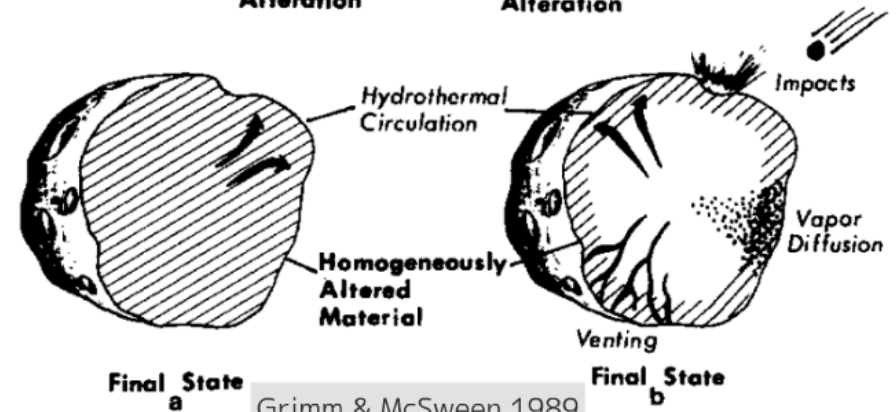
Onion Shell McSween 1999



Rubble Pile



Initial State



Final State a

Grimm & McSween 1989

Final State b

岩石微惑星：普通コンドライトの母天体

(e.g., Miyamoto et al. 1981, Henke et al. 2012)

水（氷）微惑星：炭素質コンドライトの母天体

(e.g., Grimm and McSween 1989, Monteux et al. 2018)

# 熱進化

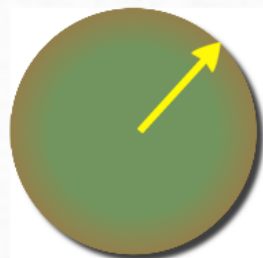
## 熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + f_{\text{Heating}}$$

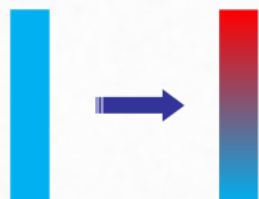
Radiogenic heating of  $^{26}\text{Al}$

- ・ サイズ
- ・ 形成年代

$K$  : Thermal conductivity  
 $\rho$  : Density  
 $c$  : Specific heat  
 $T$  : Temperature  
 $t$  : Time  
 $r$  : Radius



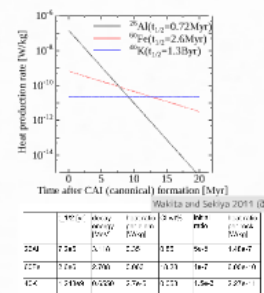
表面は放射で冷える



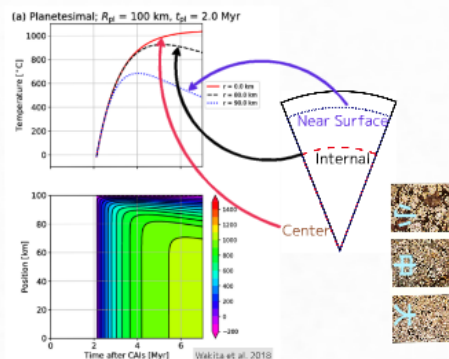
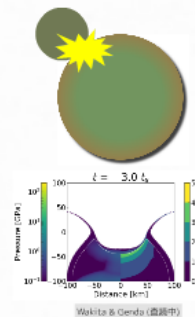
内部は放射性元素の壊変熱で温まる

## 熱源

### I. 放射性同位体の壊変熱 短寿命放射性元素



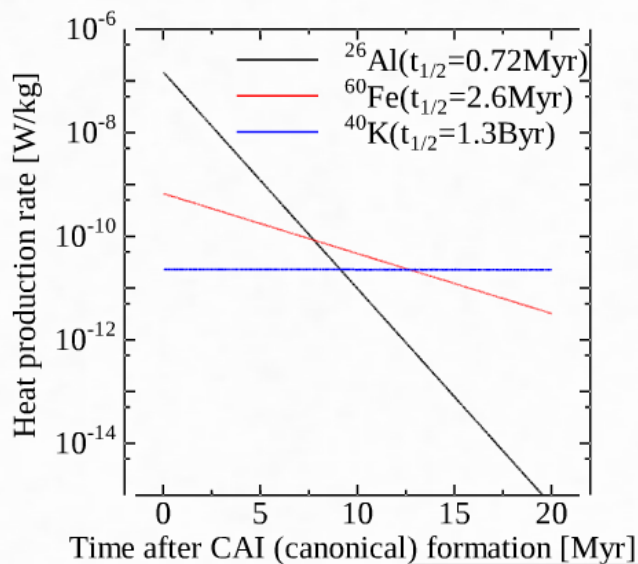
### II. 衝突



中心が最も高温となる層構造

# 熱源

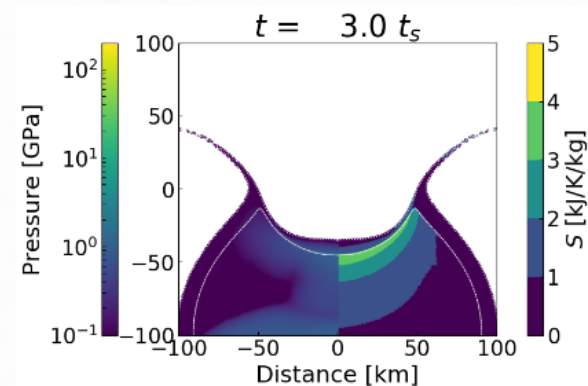
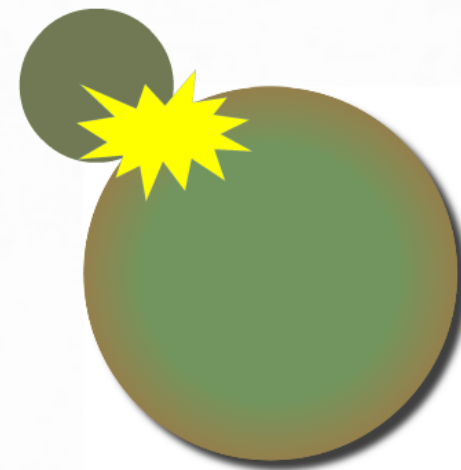
## I. 放射性同位体の壊変熱 短寿命放射性元素



Wakita and Sekiya 2011 (改)

	t <sub>1/2</sub> [yr]	decay energy [MeV]	heat ratio per elem [W/kg]	CI wt%	initial ratio	heat ratio per rock [W/kg]
<sup>26</sup> Al	7.2e5	3.118	0.35	0.85	5e-5	1.48e-7
<sup>60</sup> Fe	2.6e6	2.708	0.063	18.28	1e-7	6.00e-10
<sup>40</sup> K	1.248e9	0.6550	2.7e-5	0.053	1.5e-3	2.27e-11

## II. 衝突



Wakita & Genda (査読中)

# 熱伝導方程式

- サイズ
- 形成年代

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + f_{\text{Heating}}$$

Radiogenic heating of  $^{26}\text{Al}$

$K$  : Thermal conductivity

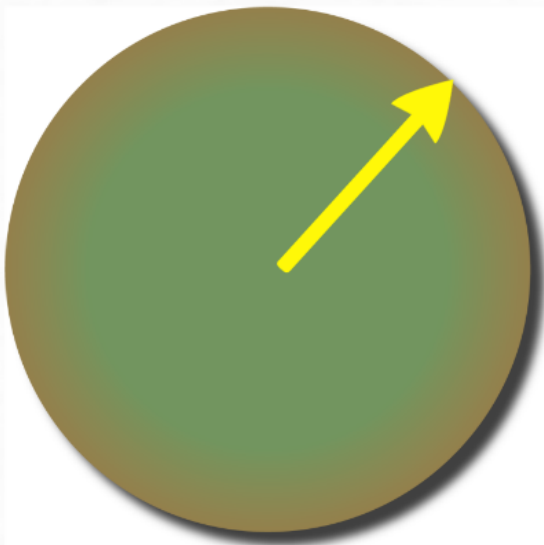
$\rho$  : Density

$c$  : Specific heat

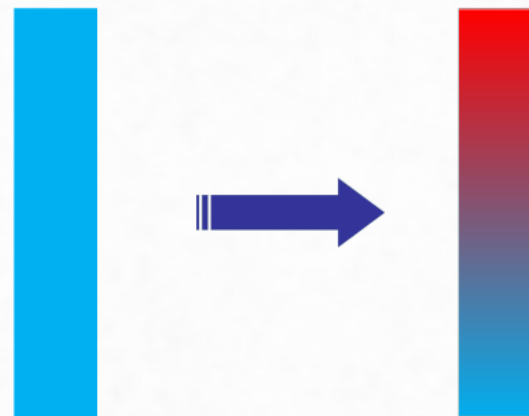
$T$  : Temperature

$t$  : Time

$r$  : Radius



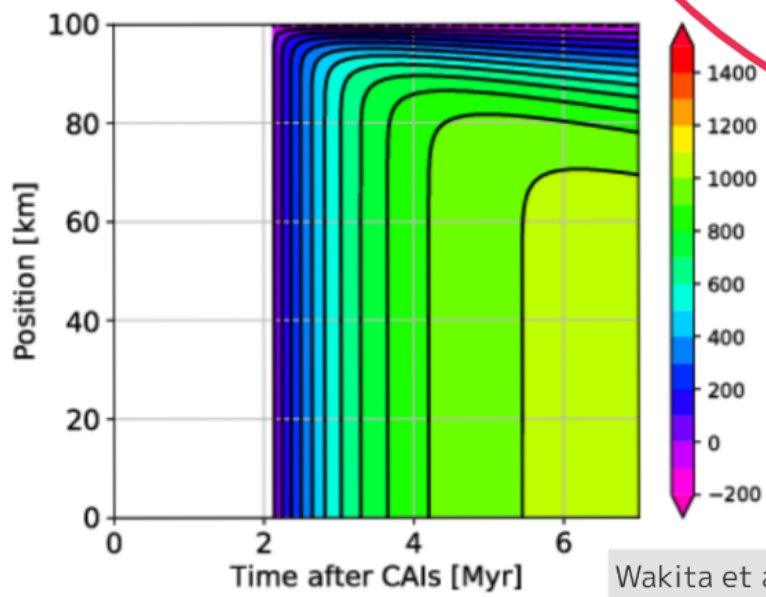
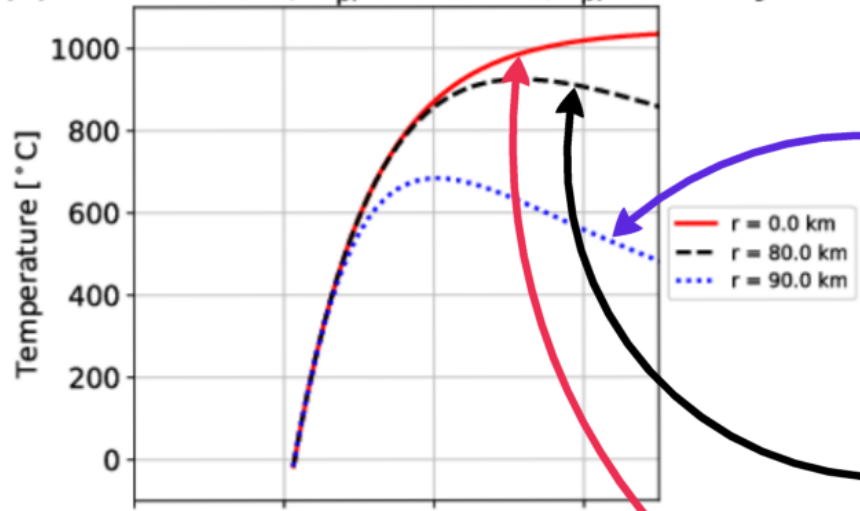
表面は放射で冷える



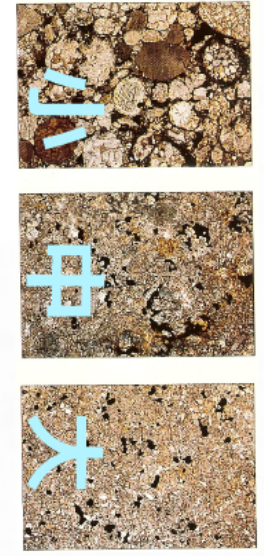
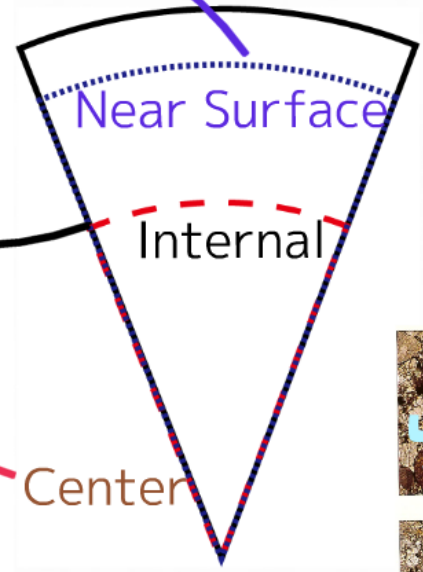
内部は放射性元素の壊変熱で温まる



(a) Planetesimal;  $R_{pl} = 100$  km,  $t_{pl} = 2.0$  Myr



Wakita et al. 2018

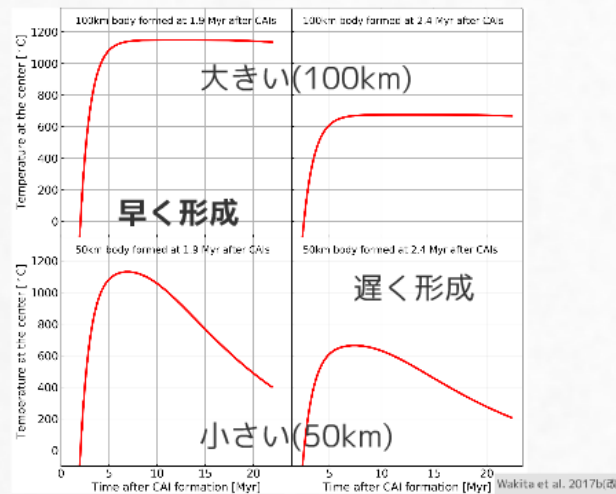


# 中心が最も高温となる層構造

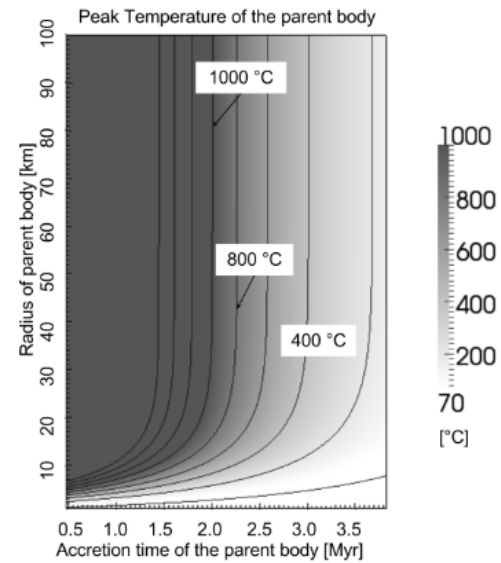
# 岩石微惑星

中心温度(=最高到達温度)

サイズ・形成年代 依存性



形成年代が最高到達温度の鍵

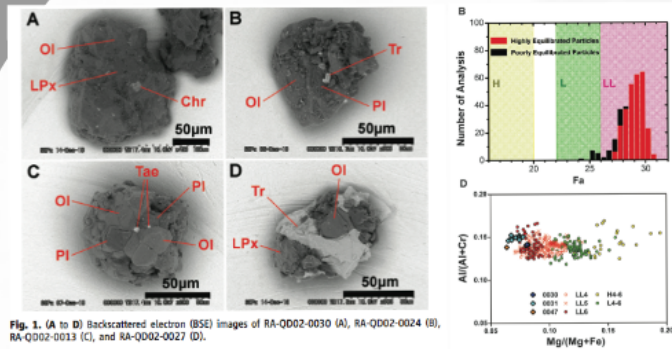


他にも

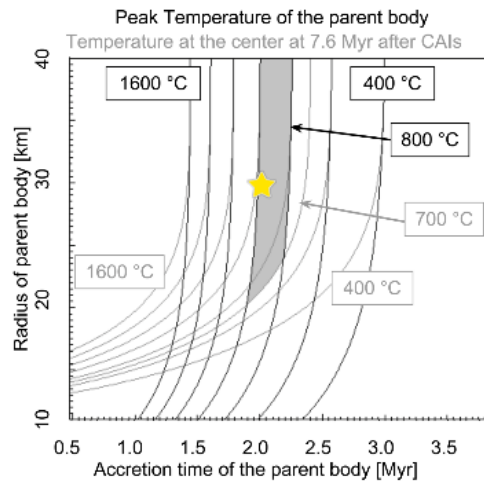
空隙 (Lichtenberg et al. 2016)

圧密 (Neumann et al. 2014)

# 小惑星イトカワ



小惑星イトカワの母天体  
 CAIs形成から200万年後にできた20km以上の天体



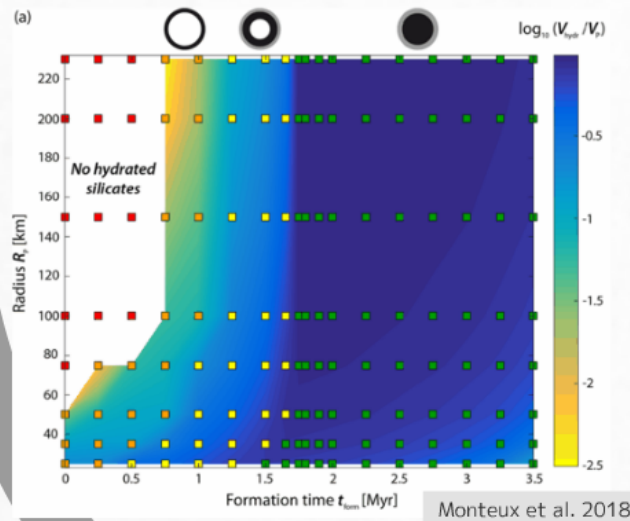
800 °C 以上1000 °C未満を経験  
 (Nakamura et al. 2011)

CAIsから760万年後に700 °C以上を経験  
 (Yurimoto et al. 2011)

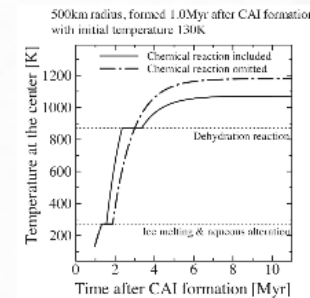
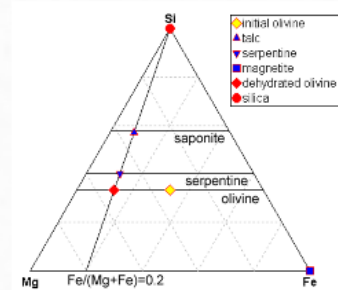
Wakita et al. 2014

# 水（氷）微惑星

- 氷の融解（吸熱） (e.g., Grimm and McSween 1989)
- 化学反応 (e.g., G&M 1989; Cohen and Coker 2000)
  - 水質変成（発熱）
  - 脱水反応（吸熱）
- 水（液体・ガス）の輸送 (e.g., Bland and Travis 2017)



氷の潜熱(吸熱):  $3.34 \times 10^5$  J/kg  
 脱水反応(吸熱):  $4.17 \times 10^5$  J/kg  
 水質変成(発熱):  $2.77 \times 10^5$  J/kg

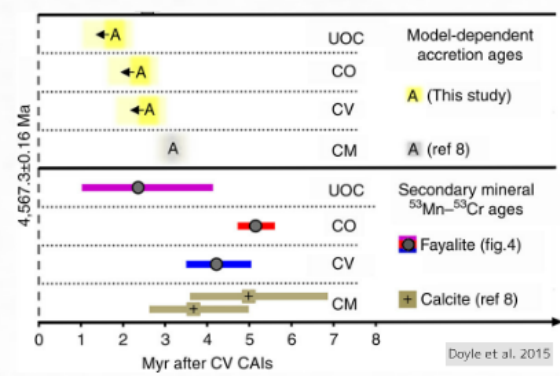


化学反応が熱進化に影響



# 小惑星リュウグウ

部分脱水を経験した物質をもつ可能性が示唆  
 (Sugita et al. 2019; Nakamura et al. 2019)



- 岩石微惑星（普通コンドライト）
  - 180万年後 (Doyle et al. 2015)
  - 200万年後 (Wakita et al. 2014)
- 水(氷)微惑星（炭素質コンドライト）
  - 約250万年後 (Doyle et al. 2015)
  - 300万年後 (Fujiya et al. 2012)

