

# 冥王星の黒いクジラ模様を 生み出したカロン形成巨大衝突

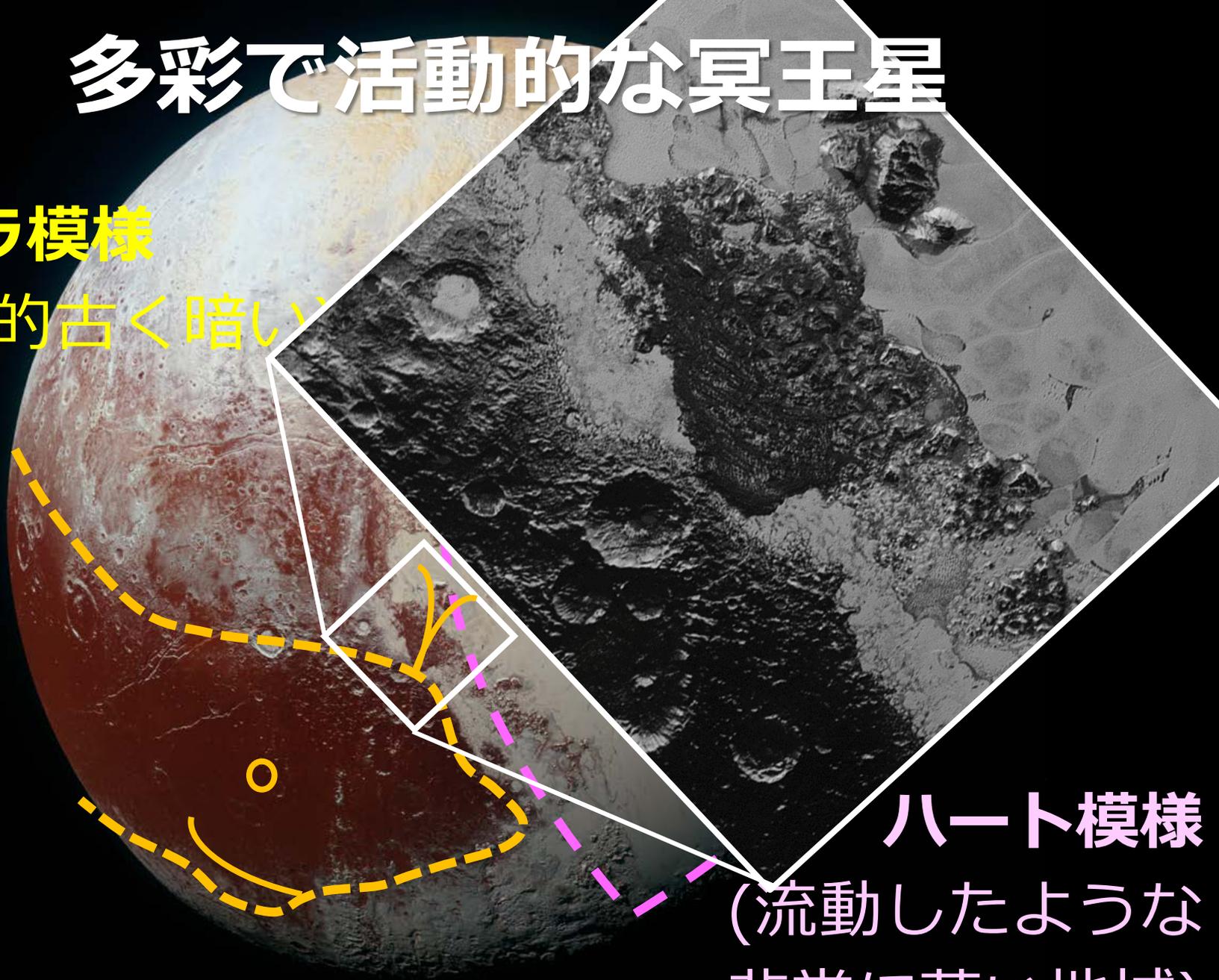
関根康人<sup>1</sup>, 玄田英典<sup>2</sup>  
鎌田俊一<sup>3</sup>, 舟津太郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大学、<sup>2</sup>東京工業大学、<sup>3</sup>北海道大学

# 多彩で活動的な冥王星

クジラ模様

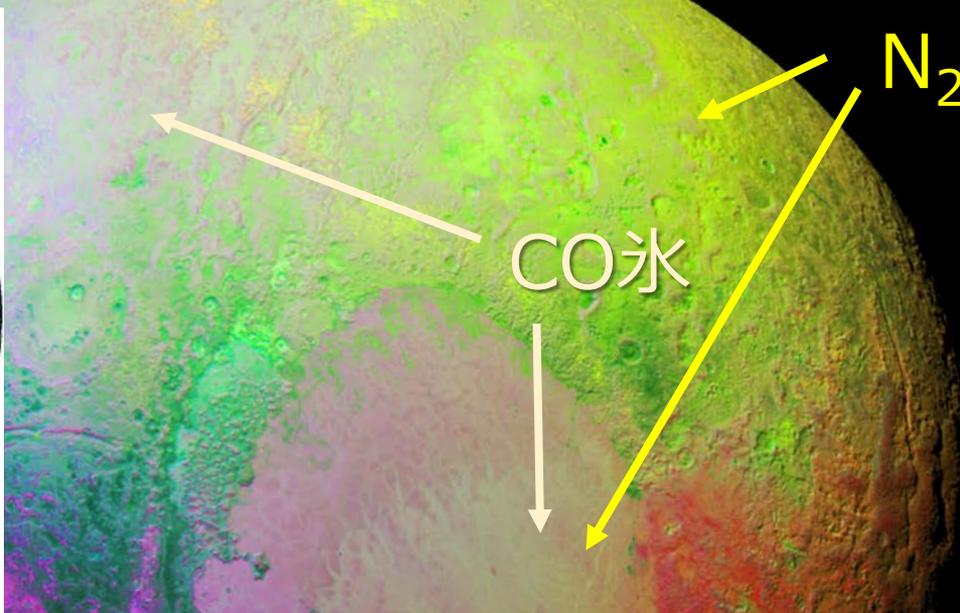
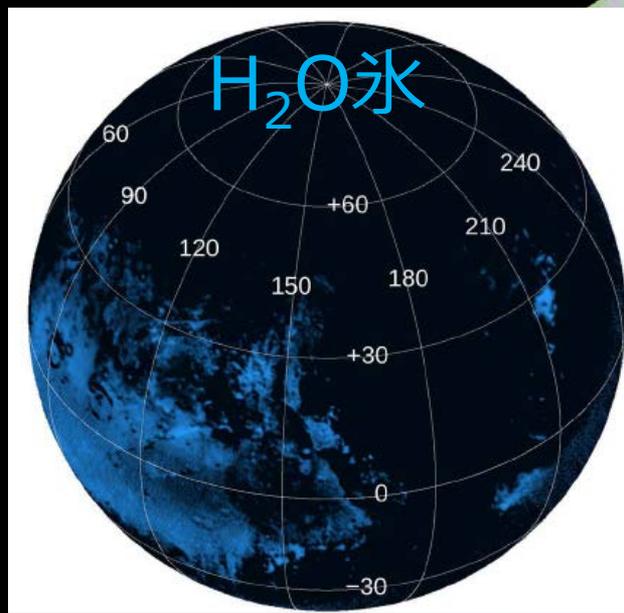
(比較的古く暗い)



ハート模様

(流動したような非常に若い地域)

# 多彩で活動的な冥王星



H<sub>2</sub>O地殻(基盤岩)上に  
多様な氷のベニヤ

赤道域にはH<sub>2</sub>Oが多い  
・クジラ・明るい場所も

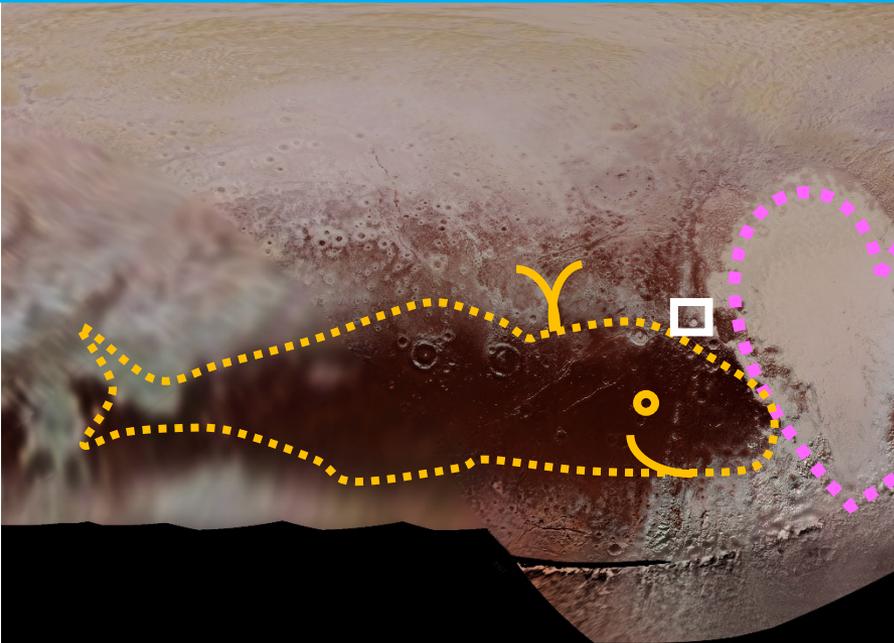
CH<sub>4</sub>氷

# 多彩で活動的な冥王星

- 大気： $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ の大気化学反応と散逸
- 生成した“ヘイズ (エアロゾル)”で覆われる
- ヘイズは全球的に分布している
  - ←  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  ベニヤ氷から補充される

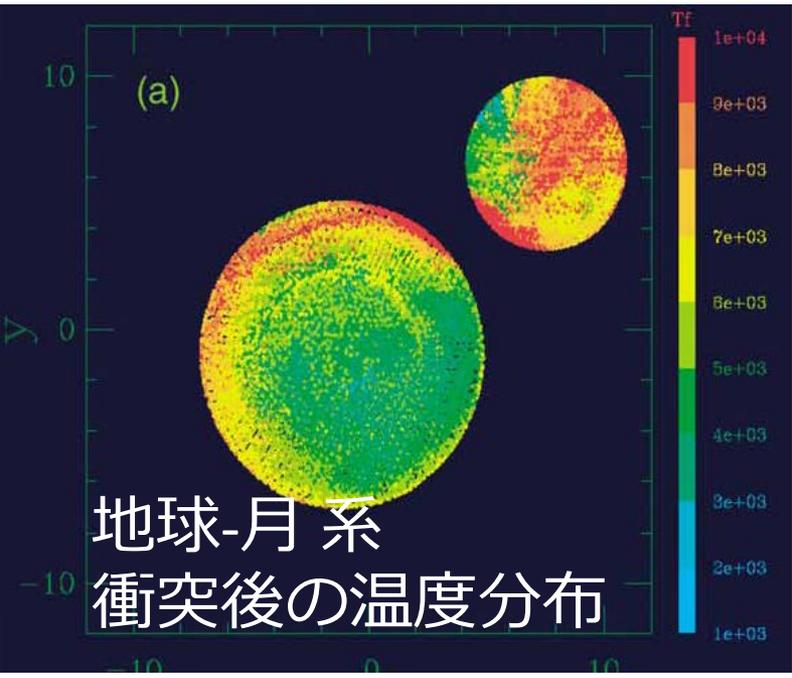
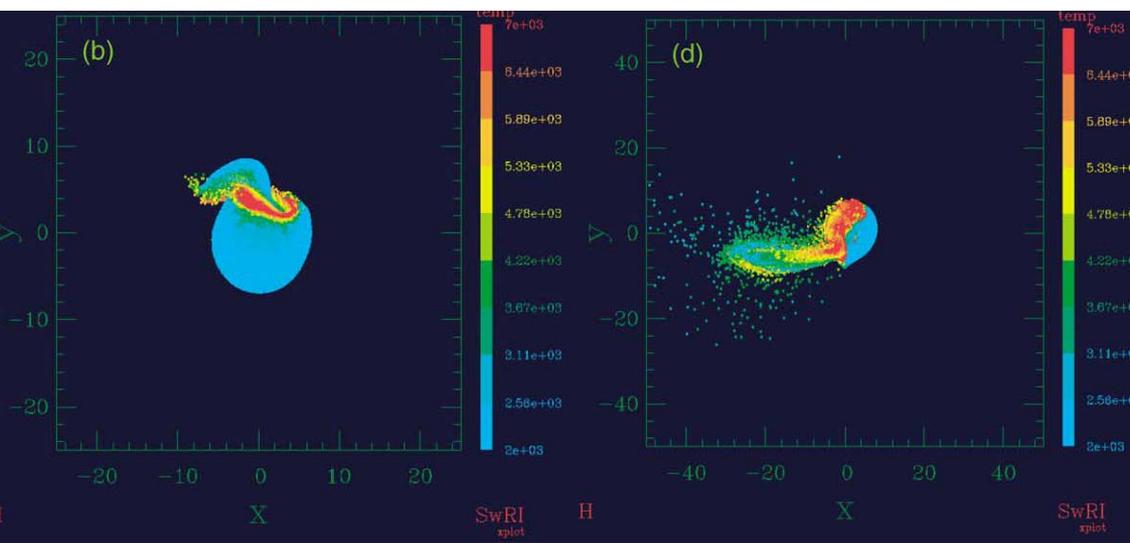
# 赤道域にクジラ？

- 赤道域に延びる褐色物質の起源は？
- 冥王星の表層進化とどんな関係？
- 赤道域：暗い氷地殻、明るい領域にもH<sub>2</sub>O  
→ 従来の有機物エアロゾルでは説明不可



# アイディア：カロン形成巨大衝突でできた？

- 巨大衛星カロン(冥王星の~10wt%) 密度~2 g/cm<sup>3</sup>  
⇔ 地球-月系 (月は地球の~1 wt%)
- 巨大衝突形成説 (Canup 2005): しかし物質的証拠はない  
⇒ 残留熱で彗星組成氷が融解し有機物合成？



地球-月形成：巨大衝突 (Canup 2006)

# アイディア：カロン形成巨大衝突でできた？

- 彗星組成氷が融解して有機物合成？

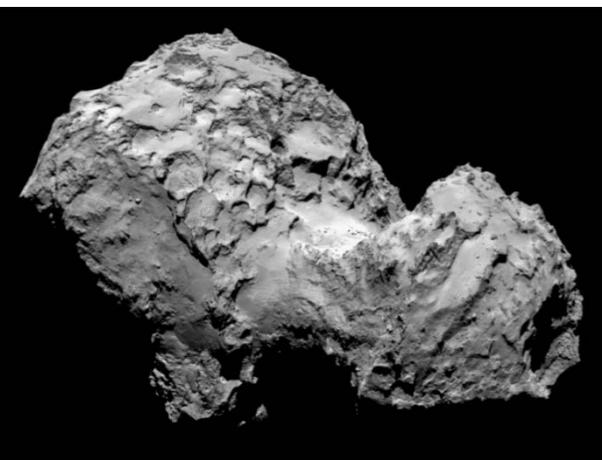
分子雲でのイオン反応, 表面反応で有機分子 (彗星組成)

(HCHO, NH<sub>3</sub> → 高分子有機物 @>90°C) (Cody et al. 2011; Kebukawa et al., 2013)

着陸機フライエによる質量分析(Goesmann et al. 2015)



Name	Formula	Molar mass (u)	MS fraction	Relative to water
Water	H <sub>2</sub> O	18	80.92	100
Methane	CH <sub>4</sub>	16	0.70	0.5
Methanenitrile (hydrogen cyanide)	HCN	27	1.06	0.9
Carbon monoxide	CO	28	1.09	1.2
Methylamine	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	31	1.19	0.6
Ethanenitrile (acetonitrile)	CH <sub>3</sub> CN	41	0.55	0.3
Isocyanic acid	HNCO	43	0.47	0.3
Ethanal (acetaldehyde)	CH <sub>3</sub> CHO	44	1.01	0.5
Methanamide (formamide)	HCONH <sub>2</sub>	45	3.73	1.8
Ethylamine	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	45	0.72	0.3
Isocyanomethane (methyl isocyanate)	CH <sub>3</sub> NCO	57	3.13	1.3
Propanone (acetone)	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	58	1.02	0.3
Propanal (propionaldehyde)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CHO	58	0.44	0.1
Ethanamide (acetamide)	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>	59	2.20	0.7
2-Hydroxyethanal (glycolaldehyde)	CH <sub>2</sub> OHCHO	60	0.98	0.4
1,2-Ethanediol (ethylene glycol)	CH <sub>2</sub> (OH)CH <sub>2</sub> (OH)	62	0.79	0.2





# 研究のねらいと経緯



7/14 : 冥王星フライバイ

7/15 (水)

13:31

冥王星への巨大衝突で赤道域に横に延びた加熱領域はできますかね？



できるかもねー。

15:11

有機合成実験して加熱領域での温度を制約しますから、衝突計算して衝突条件サーチしてくれませんか？



17:57

OK牧場 😊

20:25



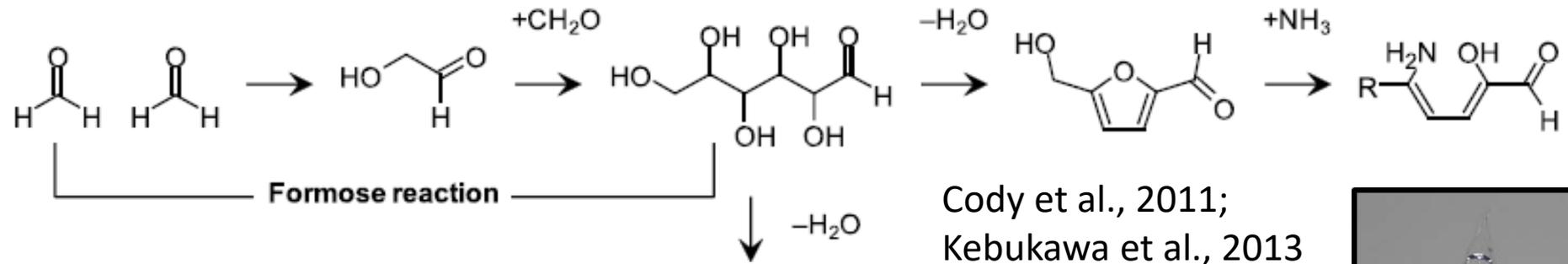
# 有機合成実験

- 彗星組成を模した水溶液を加熱 (Cody et al. 2011; Kebukawa et al., 2013)

出発物質：HCHO, NH<sub>3</sub> (1%), CH<sub>2</sub>OHCHO (0.5%)

← 彗星組成可溶成分 (ロゼッタ探査 + 望遠鏡) (Bockelee-Morvan et al. 2004; Goemann et al. 2015)

## \* 炭素質隕石中の有機合成反応 \*

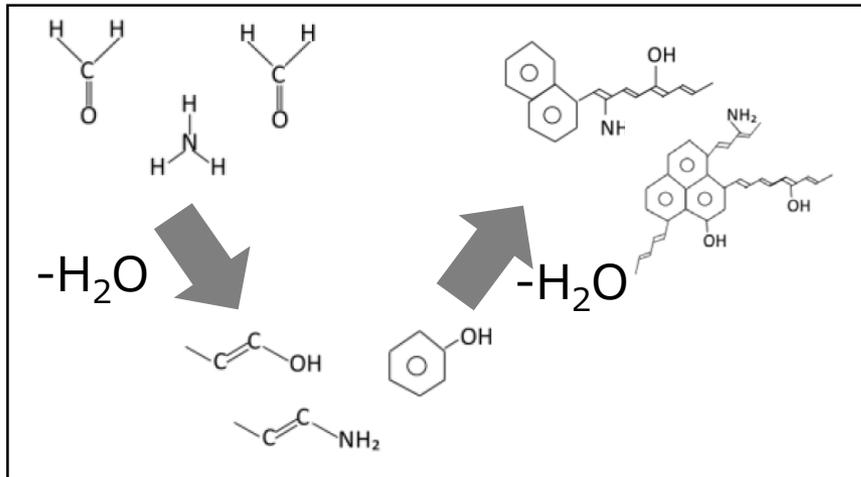


温度：4°C、25°C、50°C、100°C (200°C)

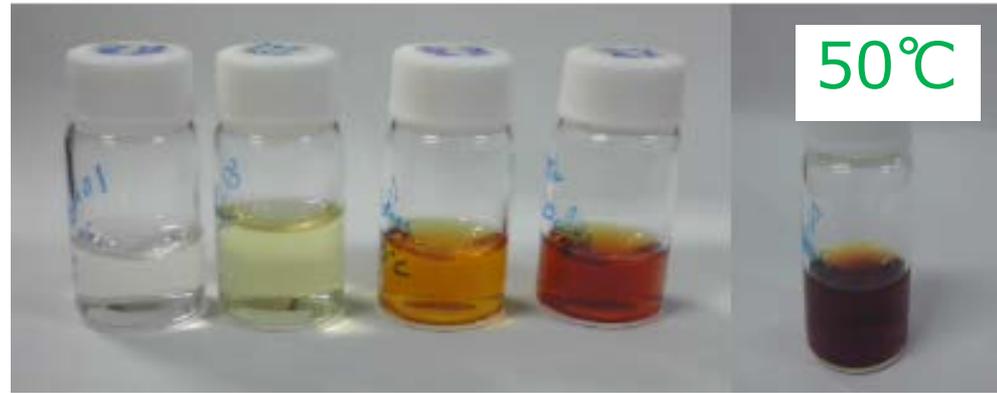
加熱時間：10分 ~ 2880時間



# 実験結果：紫外分光分析



反応前 20 時間 240 時間 550 時間 2880 時間

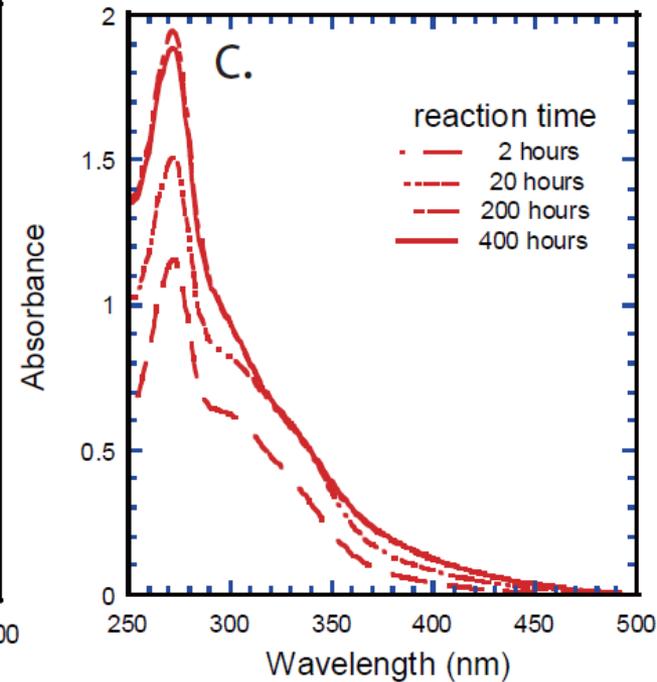
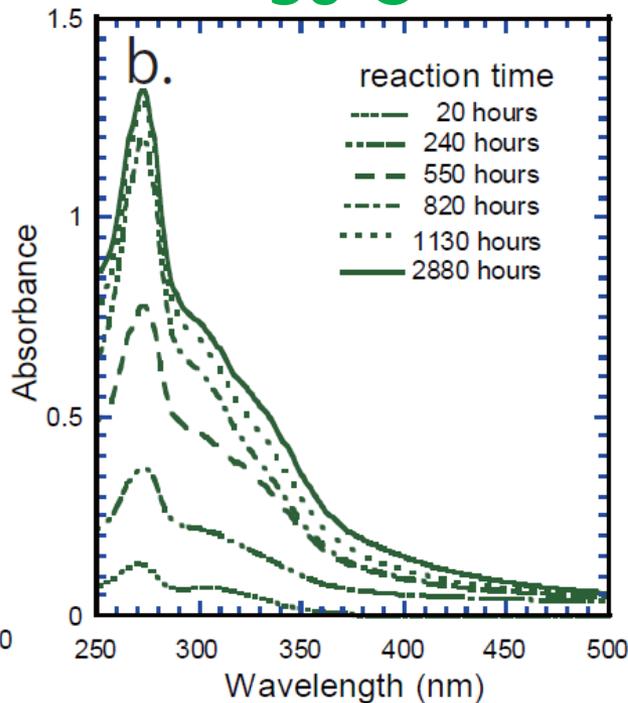
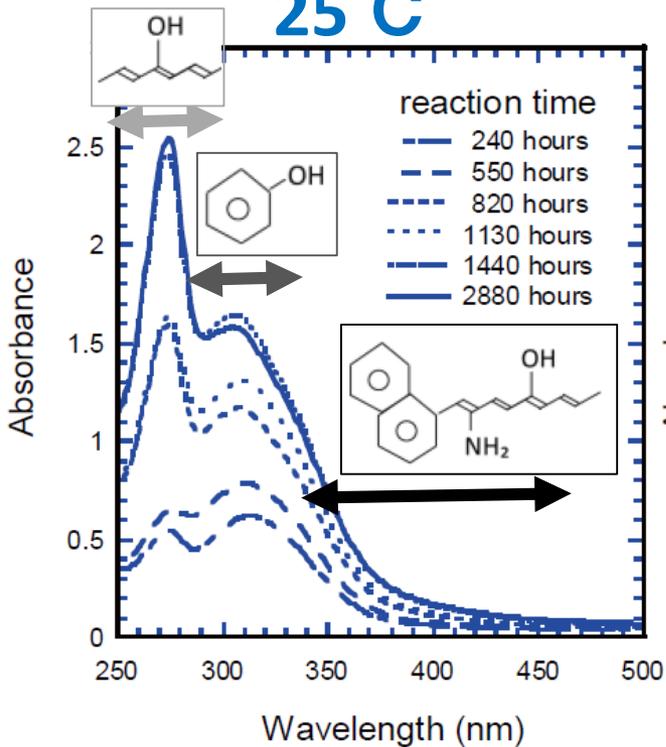


$50^\circ\text{C}$

$25^\circ\text{C}$

$50^\circ\text{C}$

$100^\circ\text{C}$

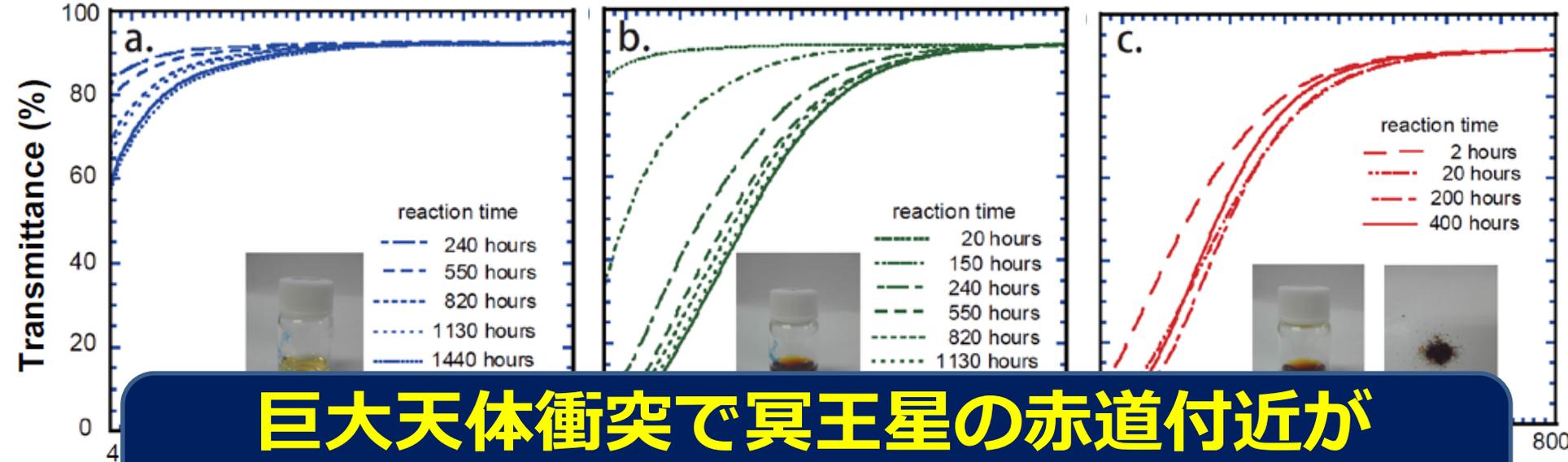


# 実験結果：可視透過率

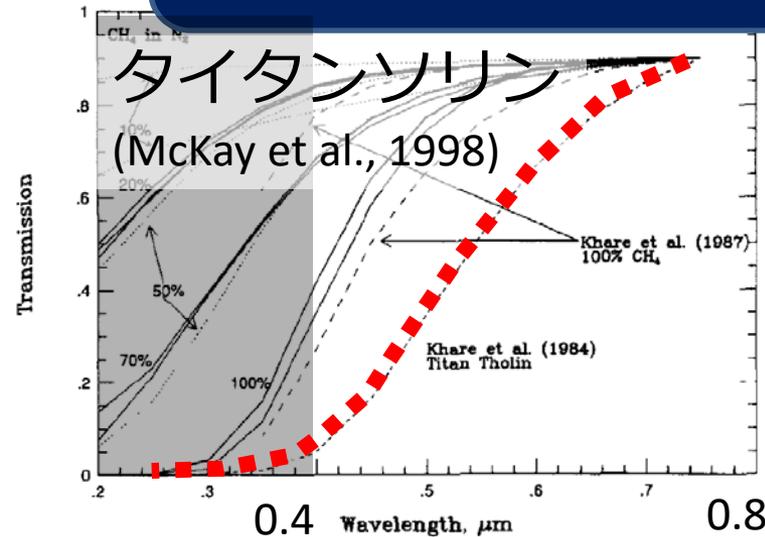
25°C

50°C

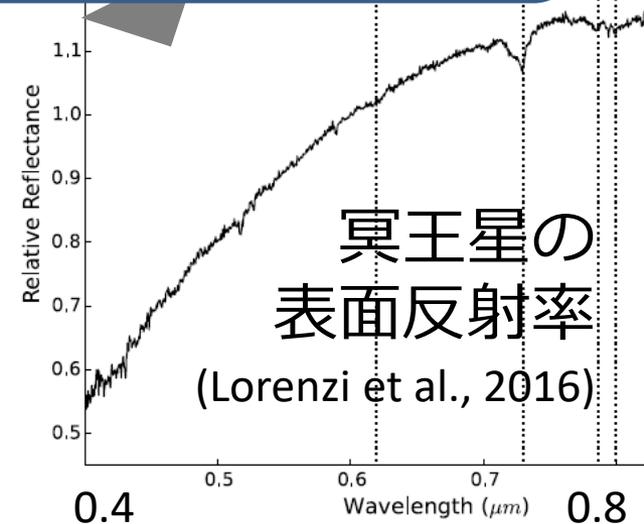
100°C



巨大天体衝突で冥王星の赤道付近が十分に加熱 (>50°C) されるか？



褐色領域のスペクトル (Grundy et al. 2016, Protopapa et al. 2016) と矛盾はない



# 数値シミュレーション

## ▶ 標準SPH法

▶ 氷と岩石の未分化天体  
氷 : 岩石 = 2:8 (質量)

## ▶ 状態方程式 :

H<sub>2</sub>O: 5-Phase EOS  
(Senft & Stewart 2008)

basalt : M-ANEOS  
(Melosh 2007)

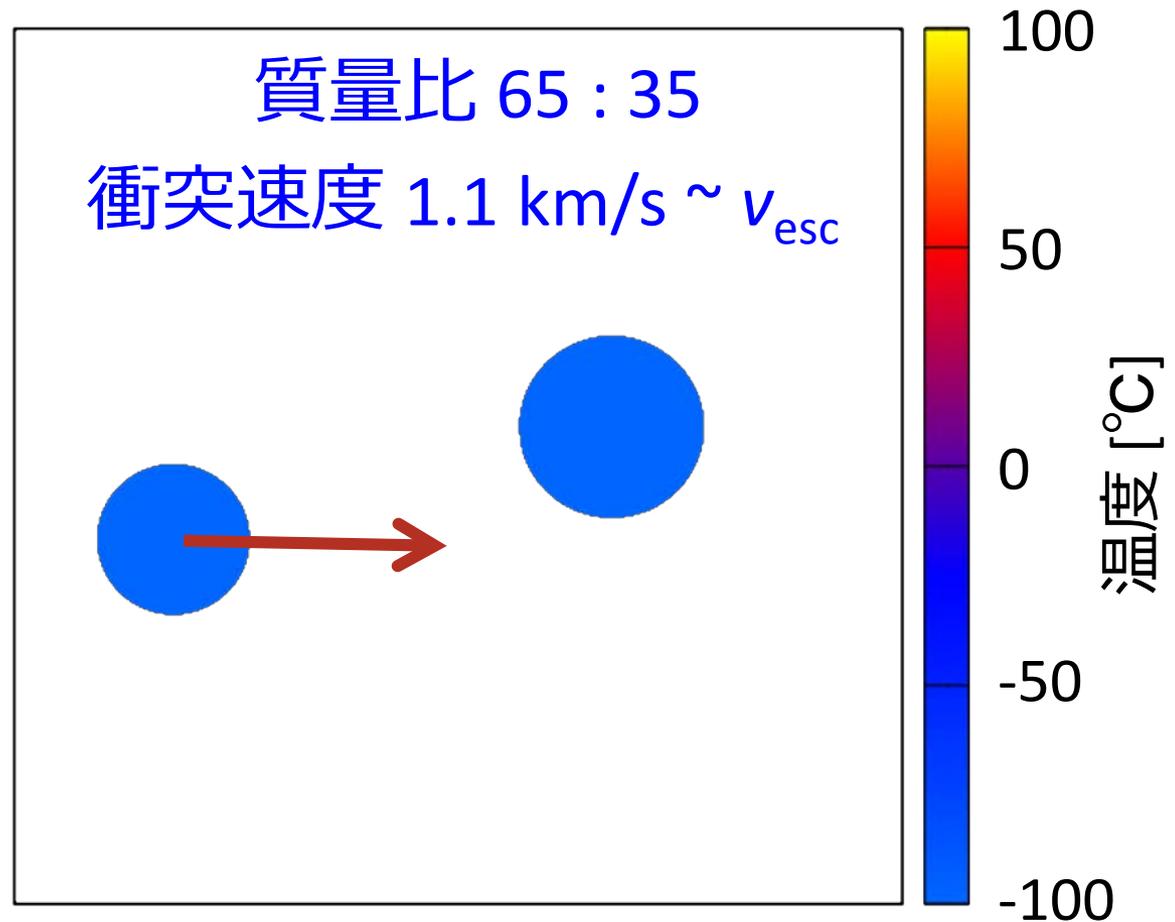
## ▶ 初期温度 :

$$T_0 = 150 \text{ K} = -123^\circ\text{C}$$

## ▶ 角運動量:

$$L_{\text{tot}} \sim L_{\text{P-C}}$$

## ▶ 10万粒子の計算



# 数値シミュレーション

## ▶ 標準SPH法

▶ 氷と岩石の未分化天体  
氷 : 岩石 = 2:8 (質量)

## ▶ 状態方程式 :

H<sub>2</sub>O: 5-Phase EOS  
(Senft & Stewart 2008)

basalt : M-ANEOS  
(Melosh 2007)

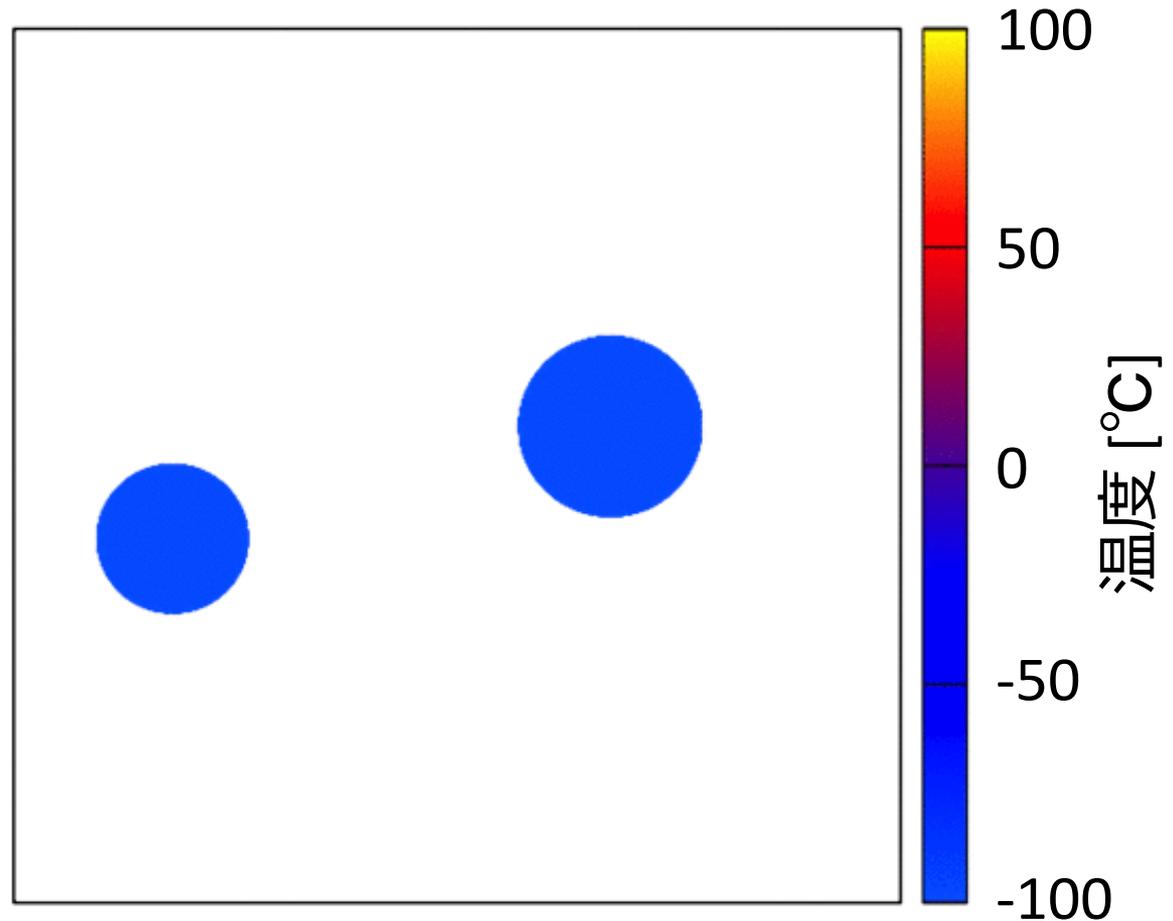
## ▶ 初期温度 :

$$T_0 = 150 \text{ K} = -123^\circ\text{C}$$

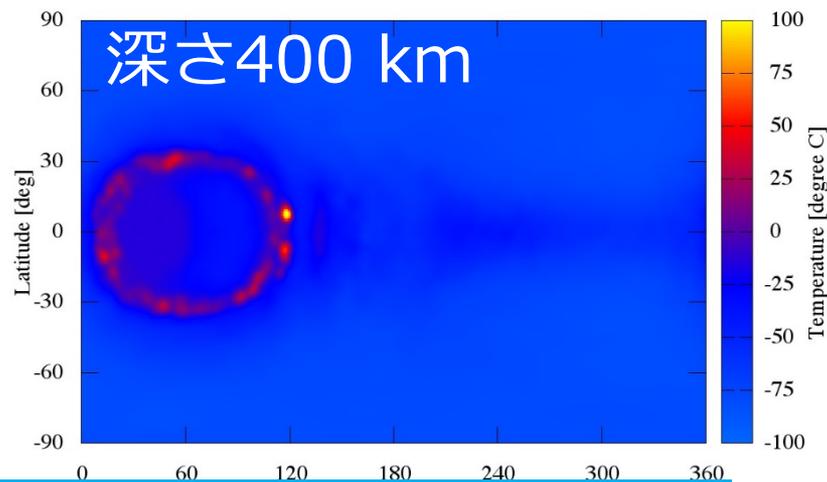
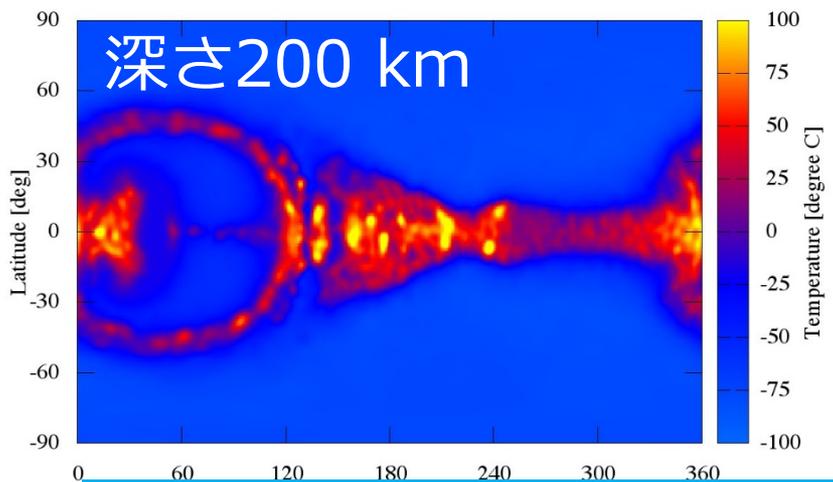
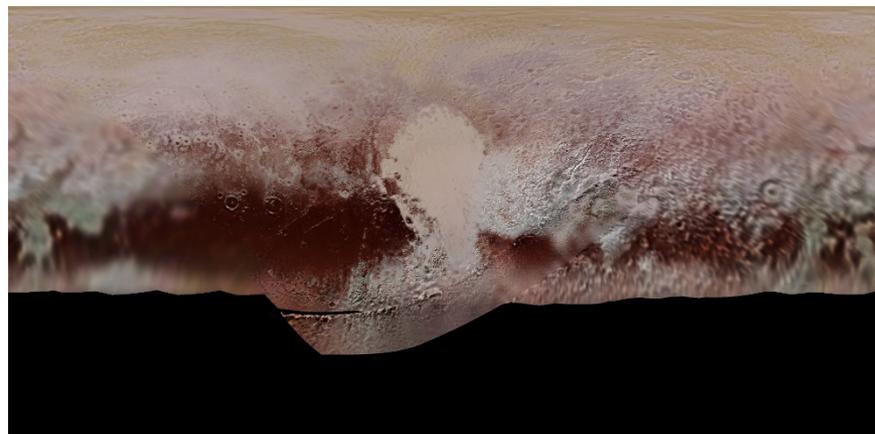
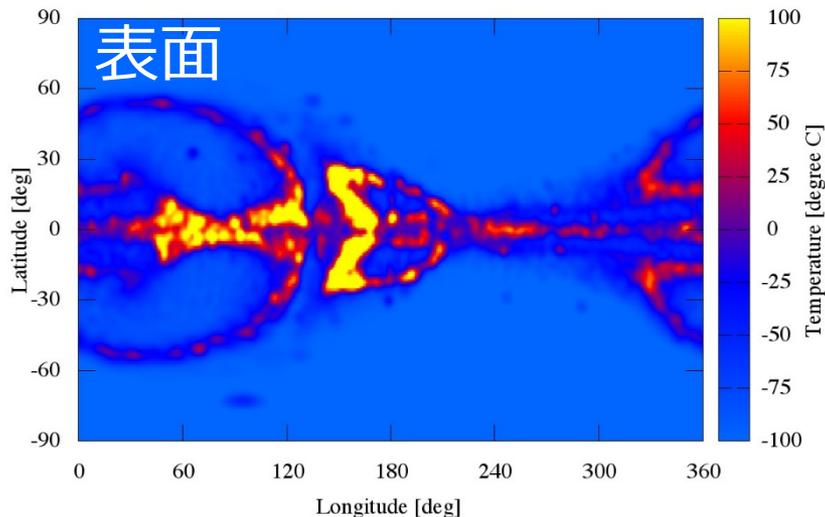
## ▶ 角運動量:

$$L_{\text{tot}} \sim L_{\text{P-C}}$$

## ▶ 10万粒子の計算



# 衝突後の冥王星の温度分布



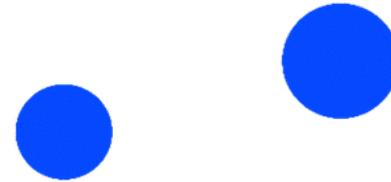
冷却時間 > 1000年：十分な反応起きる

# 氷と岩石の割合

氷 : 岩石 = 5:5



氷 : 岩石 = 2:8



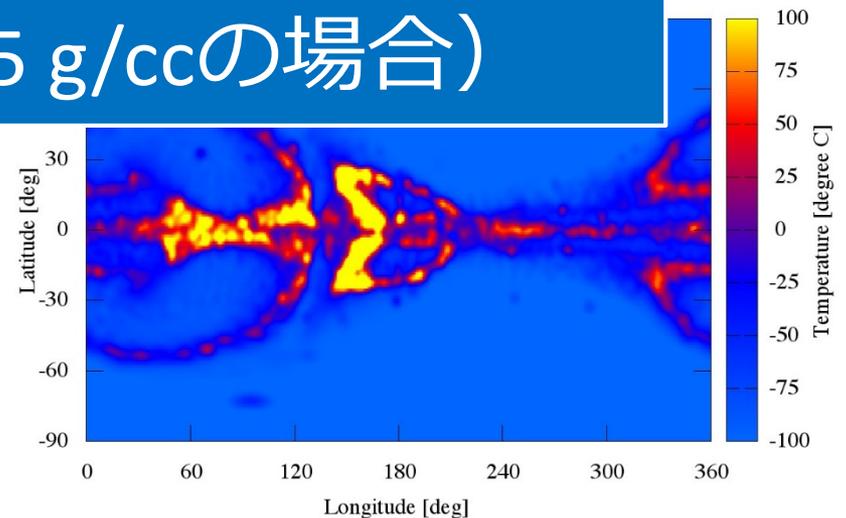
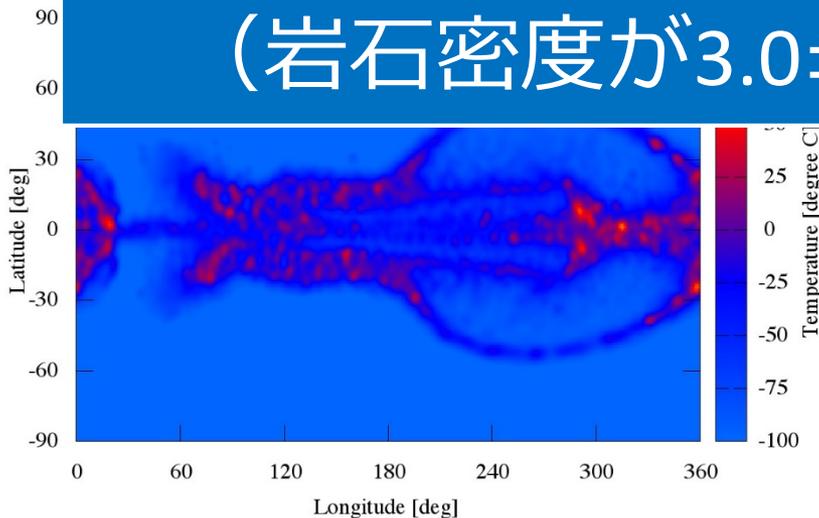
比熱  
氷 2 J/g K  
岩石 1 J/g K

百廿九ノ末

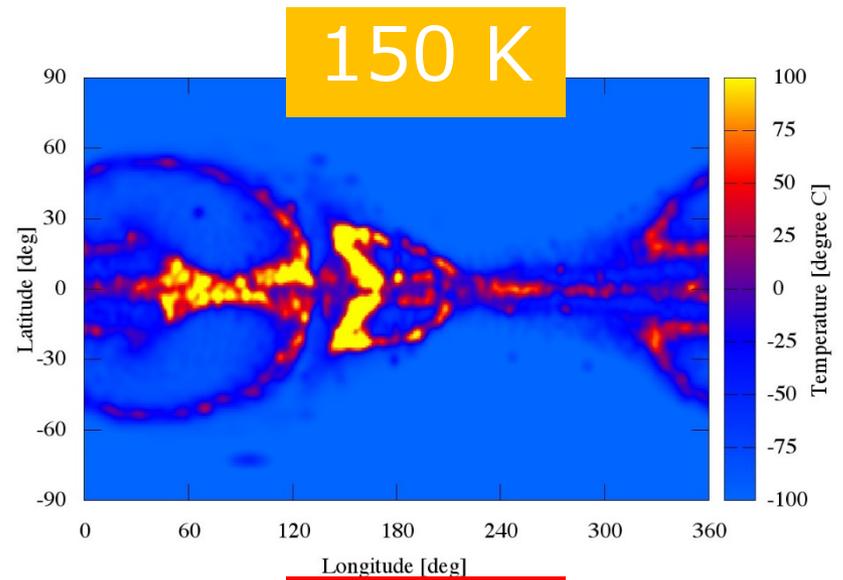
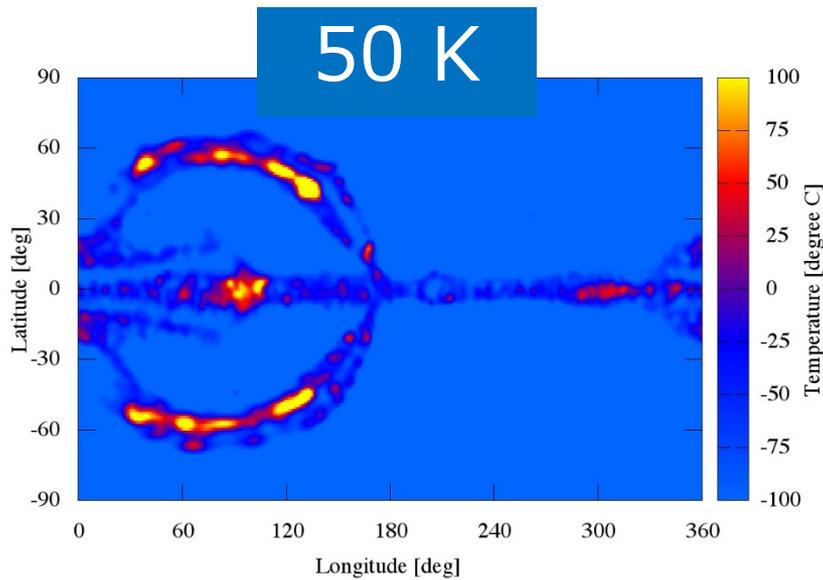
冥王星の平均密度 : 1.86 g/CC (Stern et al. 2015)

→ 岩石の割合 **65-80 wt%**

(岩石密度が $3.0 \pm 0.5$  g/ccの場合)



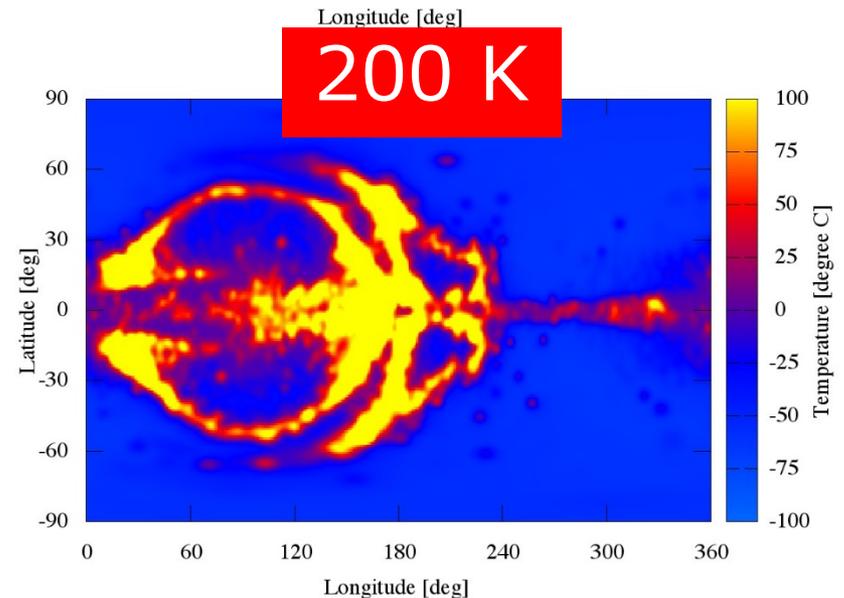
# 衝突前の冥王星の温度



現在の冥王星軌道での  
表面平衡温度は約 50K

内部が**150-200 K**が望ましい

分化してしまうとカロンの  
大きさや密度説明できない  
(Canup, 2012)



13:31

冥王星の画像データ解析と熱史計算  
誰かできますかね？



鎌田君は一？

15:11

既読  
17:57

鎌田くん、冥王星の画像解析と熱史  
計算してくれないでしょうか？



既読スルーかよ？  
(激怒😡)

23:11

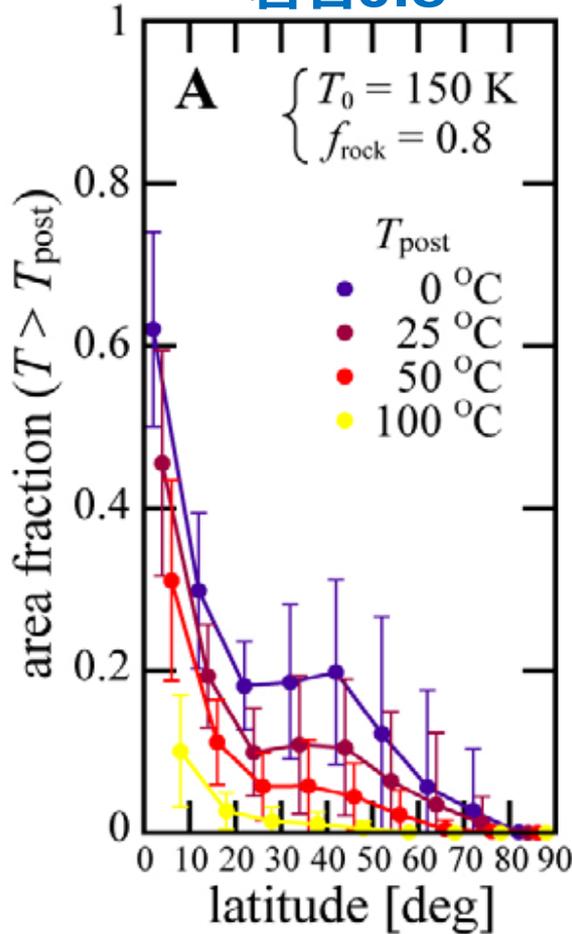


わかりました。

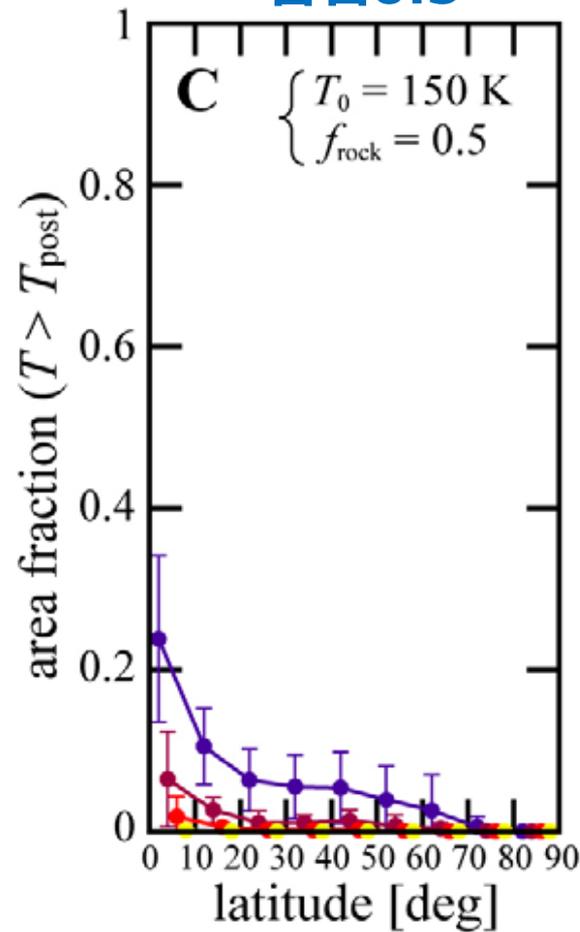
23:13

# 数値シミュレーション結果

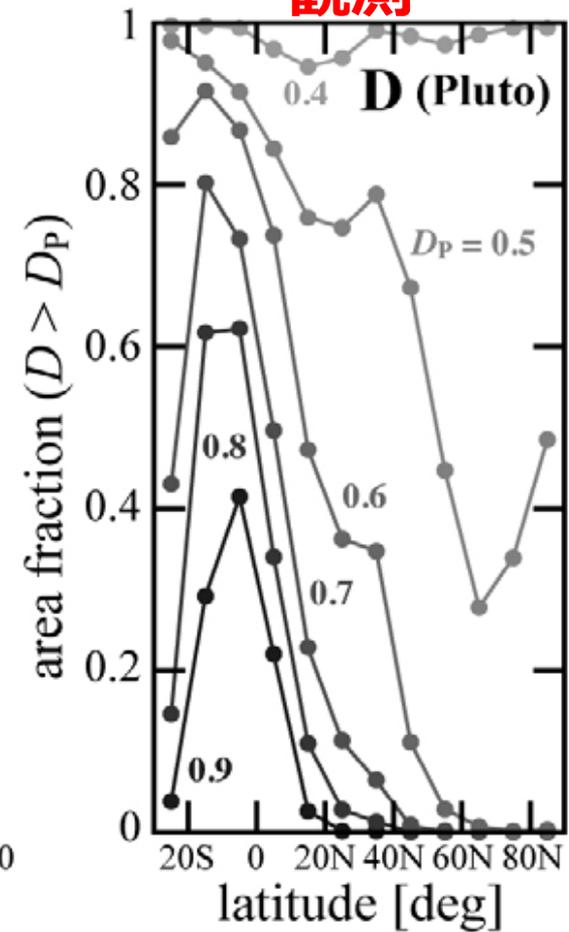
岩石0.8



岩石0.5



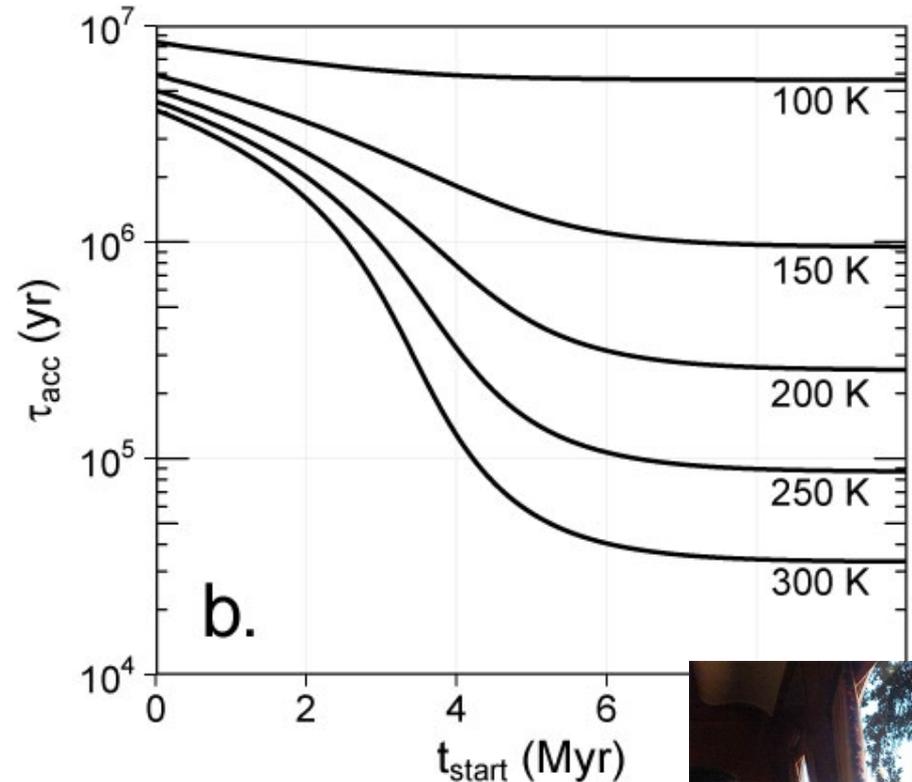
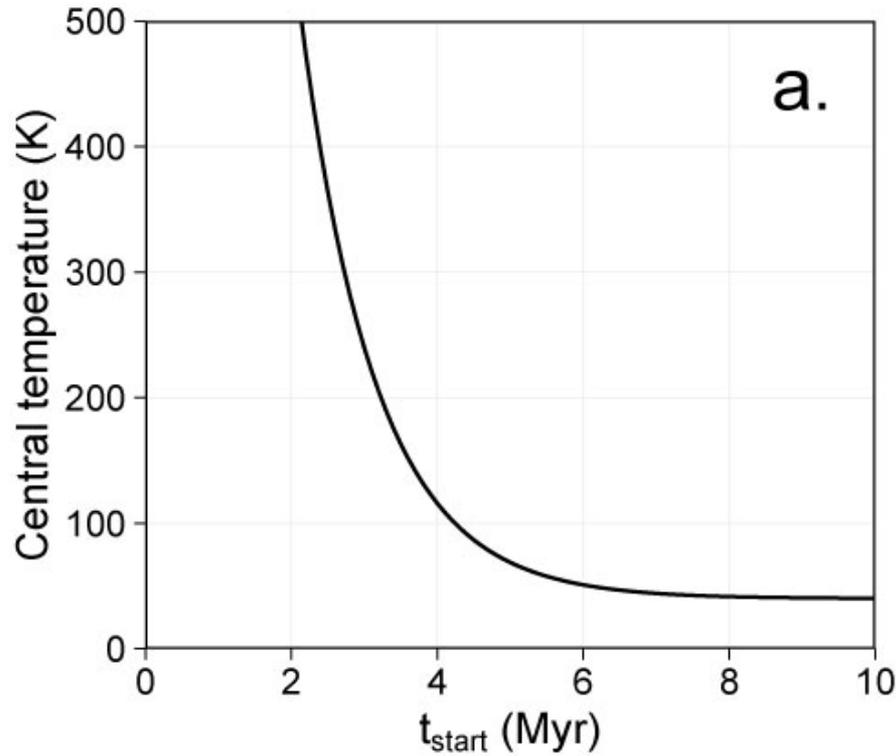
観測



- 50°Cの加熱領域が赤道に長く広がる
- 冥王星が岩石に富むこととも調和的
- 大気の凝結と正のフィードバック？

# 議論：冥王星形成の時期と時間

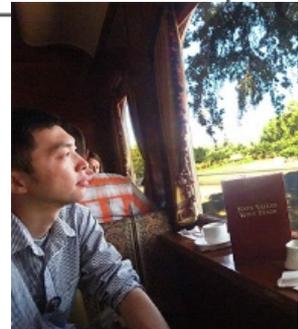
- 集積加熱モデルでの計算：微小天体近似 (Barr & Canup 2008)



形成時期: CAIs後,  $\sim 4$  Myrs 以降に形成

形成時間:  $\sim 0.1$ – $1$  Myrs  $\leftrightarrow$  最小質量モデル  $> 10$  Myrs

$\Rightarrow$  厚い円盤 and/or 内側で形成して移動?



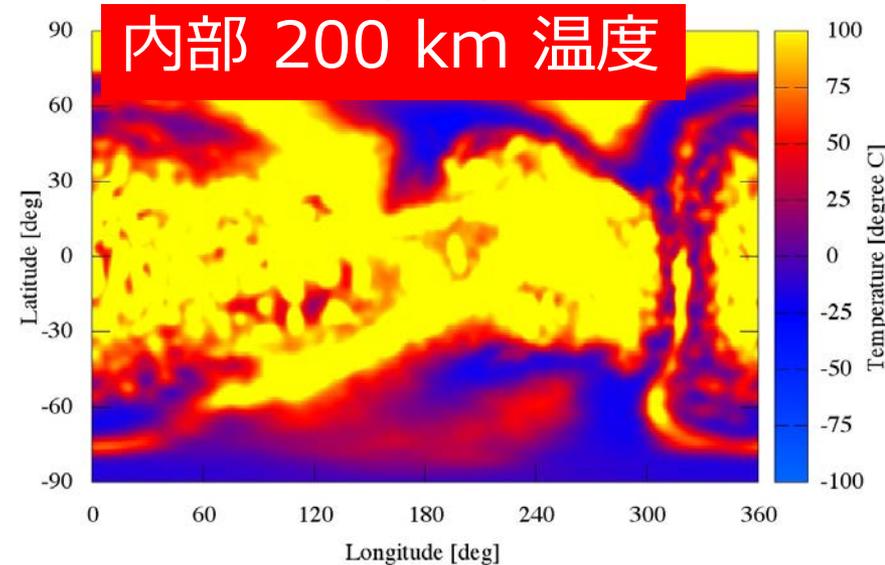
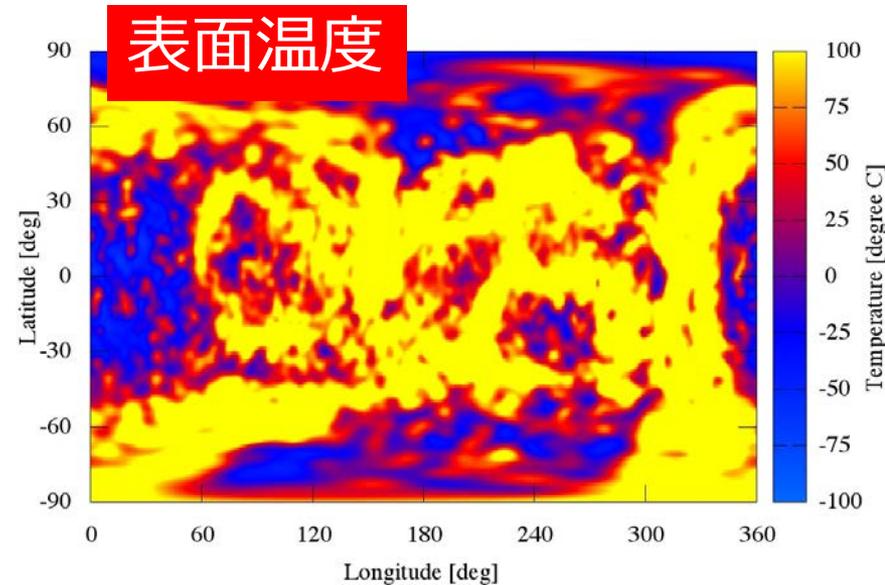
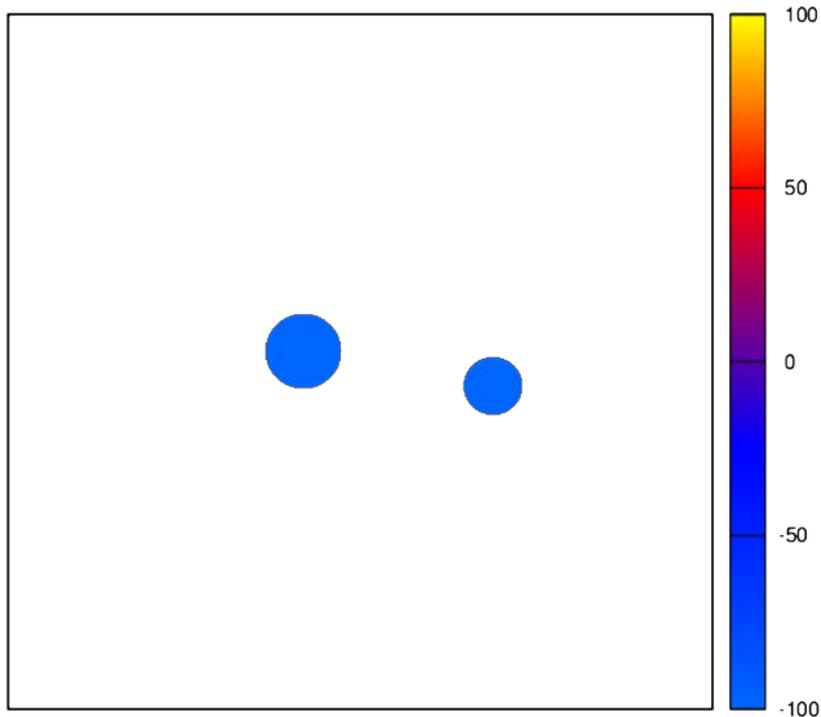
# 少し高速で衝突した場合

衝突速度  $2 v_{\text{esc}} = 2 \text{ km/s}$

衝突角度 15 deg

初期温度 150 K

氷 : 岩石 = 2:8



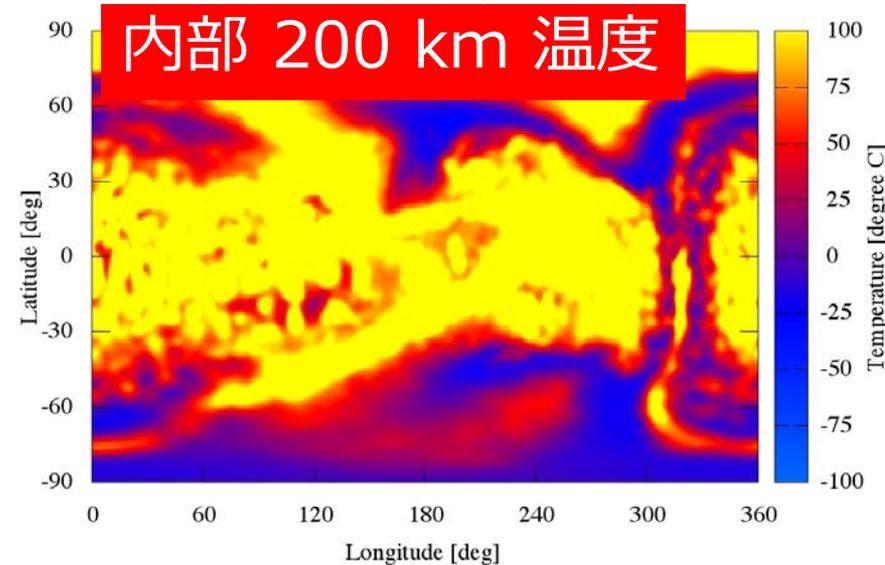
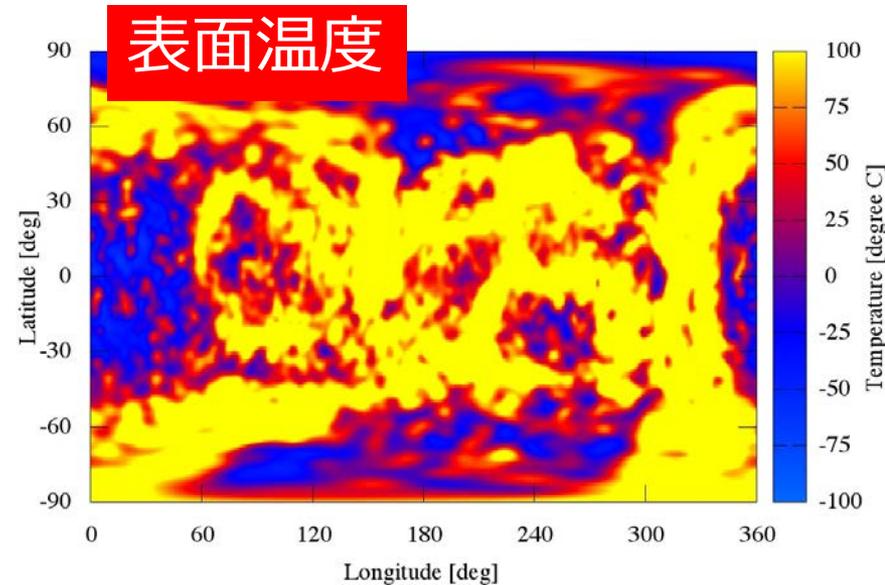
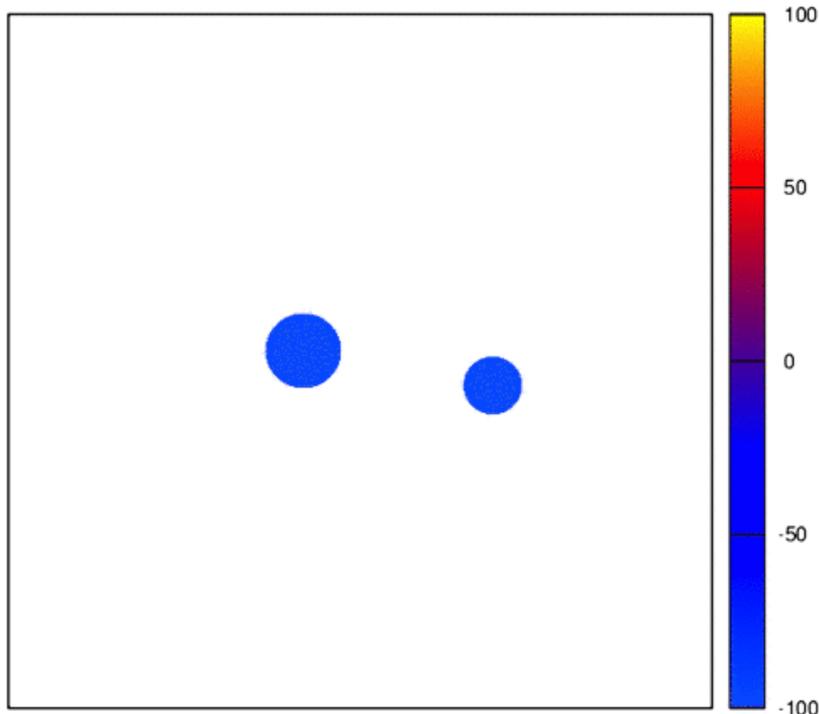
# 少し高速で衝突した場合

衝突速度  $2 v_{\text{esc}} = 2 \text{ km/s}$

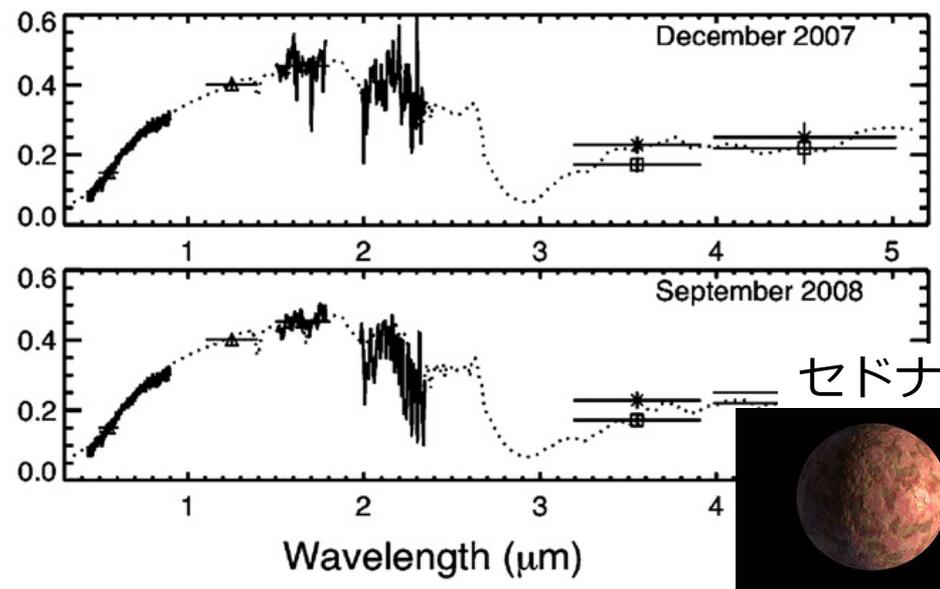
衝突角度  $15 \text{ deg}$

初期温度  $150 \text{ K}$

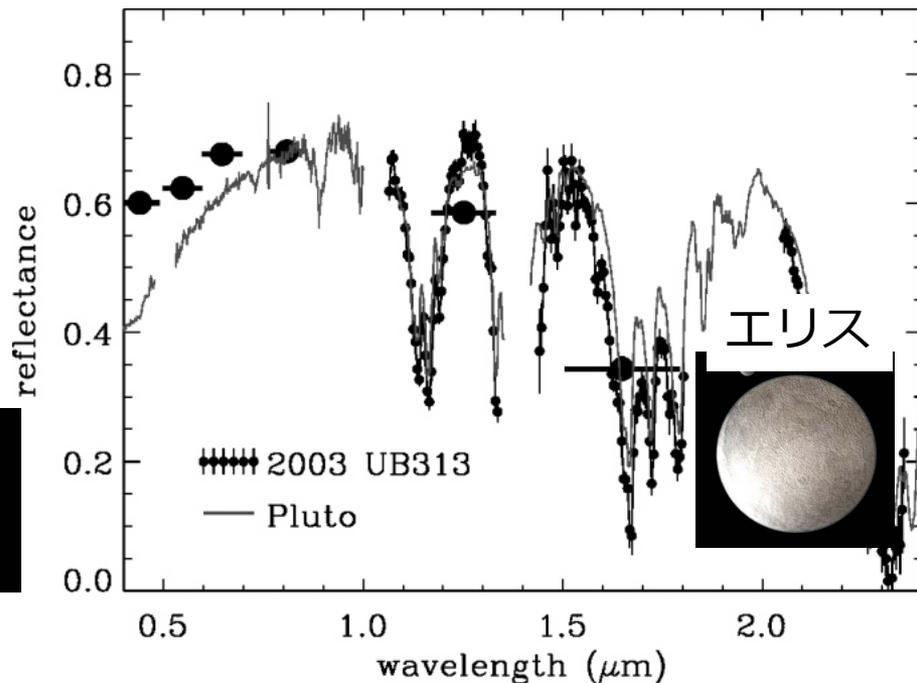
氷 : 岩石 = 2:8



# 議論：大型 TNOs の表層色多様性



全球的に暗褐色のセドナ (Barucci et al., 2008)  
同様に暗褐色のマケマケ (Lorenzi et al., 2015)



明るいエリス (Brown et al., 2005)

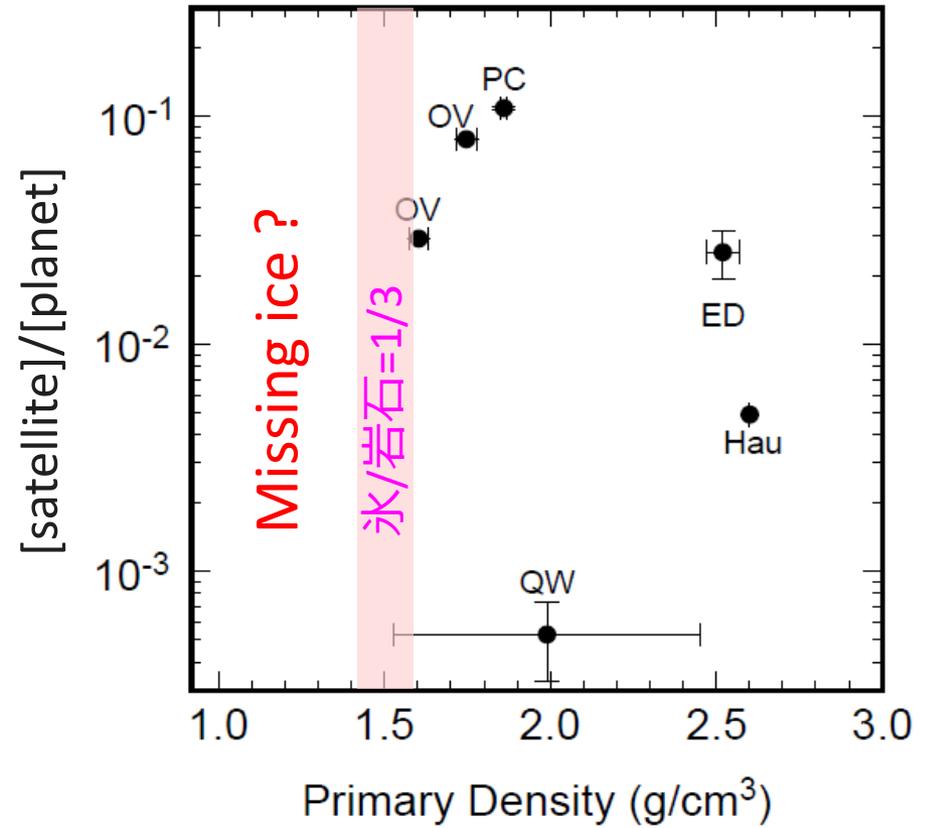
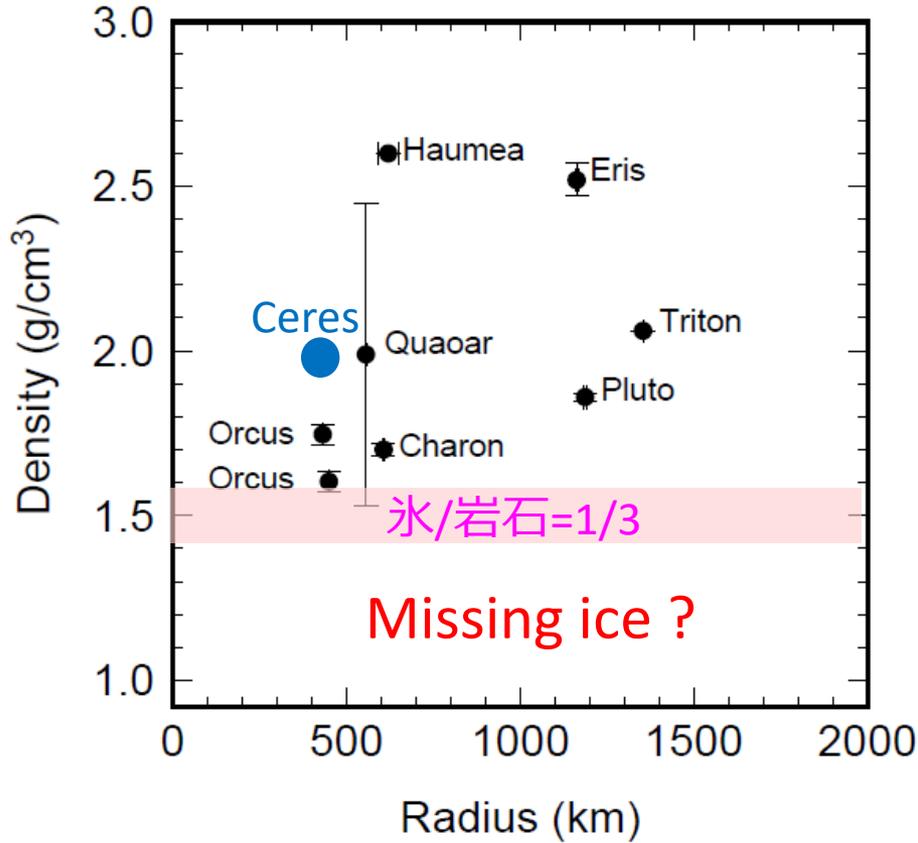
- 従来の考え: 有機物(ソリン)? 多様性を説明不可

**頻繁する巨大衝突  $\leftrightarrow$  厚い円盤 and/or 惑星移動**

(Levison et al., 2008; Pires et al.,)

$\Rightarrow$  TNOs 色の違いは巨大衝突の確率論的多様性?

# 議論：大型 TNOs の密度多様性



- 衛星をもつ岩石質なものは巨大衝突? (Barr & Schwamb 2016)

Missing ice/TNOs 岩石 ⇒ 巨大衝突の破片 (小型TNOs)?  
 微惑星 + 原始惑星 × 原始惑星 + 破片?

衝突・軌道計算 ↔ 実験 ↔ 小型TNOs観測

# まとめ

## • 実験からの制約

~50°Cの加熱領域が 1000時間 (数か月) 維持

## • 数値シミュレーションからの示唆

- ①  $V_{\text{escape}} \times 1$ , 温度 150 K  $\Rightarrow$  カロンとクジラを両方説明
- ②  $V_{\text{escape}} \times 2 \Rightarrow$  全体が加熱されて、クジラも衛星もできない

**①十分ありうる:クジラ = 冥王星巨大衝突の証拠**

## • 外縁天体へ応用

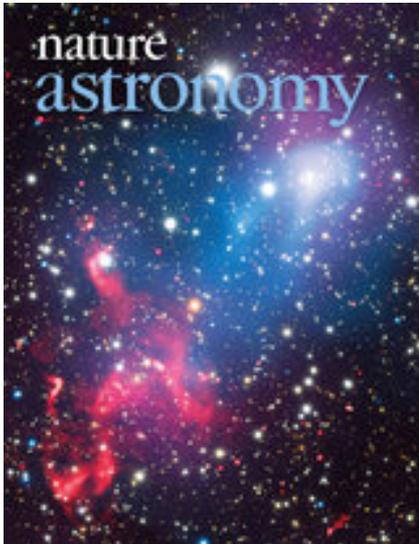
②も十分ありうる条件 マケマケ、セドナ?

**大型外縁天体の表層/密度多様性は巨大衝突起源?**

**観測とモデルによる新しい描像を提案可能?**

# The Charon-forming giant impact as a source of Pluto's dark equatorial regions

Yasuhito Sekine<sup>1\*†</sup>, Hidenori Genda<sup>2†</sup>, Shunichi Kamata<sup>3</sup> and Taro Funatsu<sup>1</sup>



来週1月31日にオンライン版  
が発表予定

volume 1, issue 2