

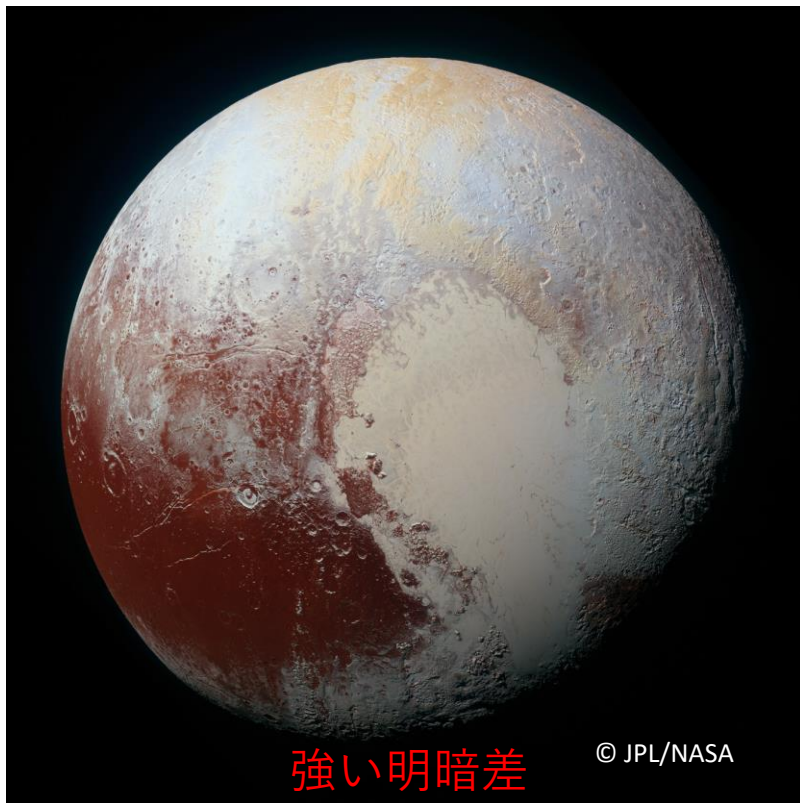
冥王星表面の 氷の昇華と凝結による 反射率分布の変化

松井 弥志 木村 淳

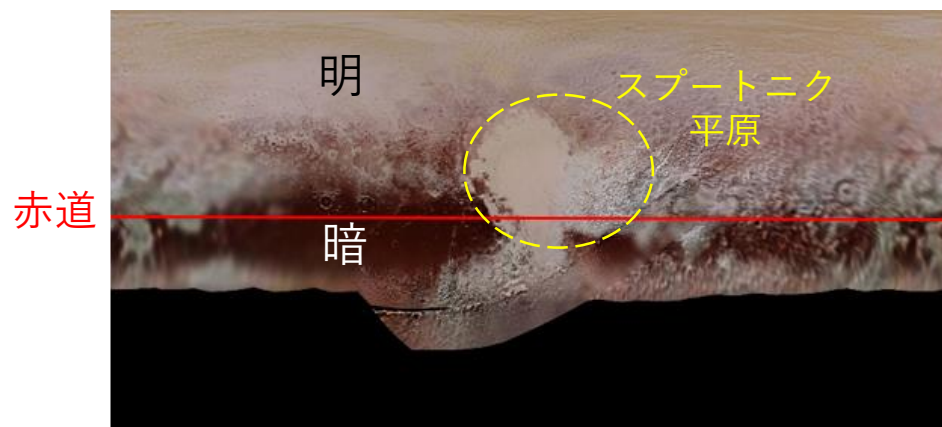
大阪大学

冥王星

●2015年 探査機 New Horizons による観測



- ・ 明るい物質 H_2O , N_2 , CH_4 , CO の氷 (Grundy+ 2016)
- ・ 暗い物質は有機物 (ヘイズ) (Grundy+ 2018)
- ・ 場所ごとの氷の量の差 → 反射率の差

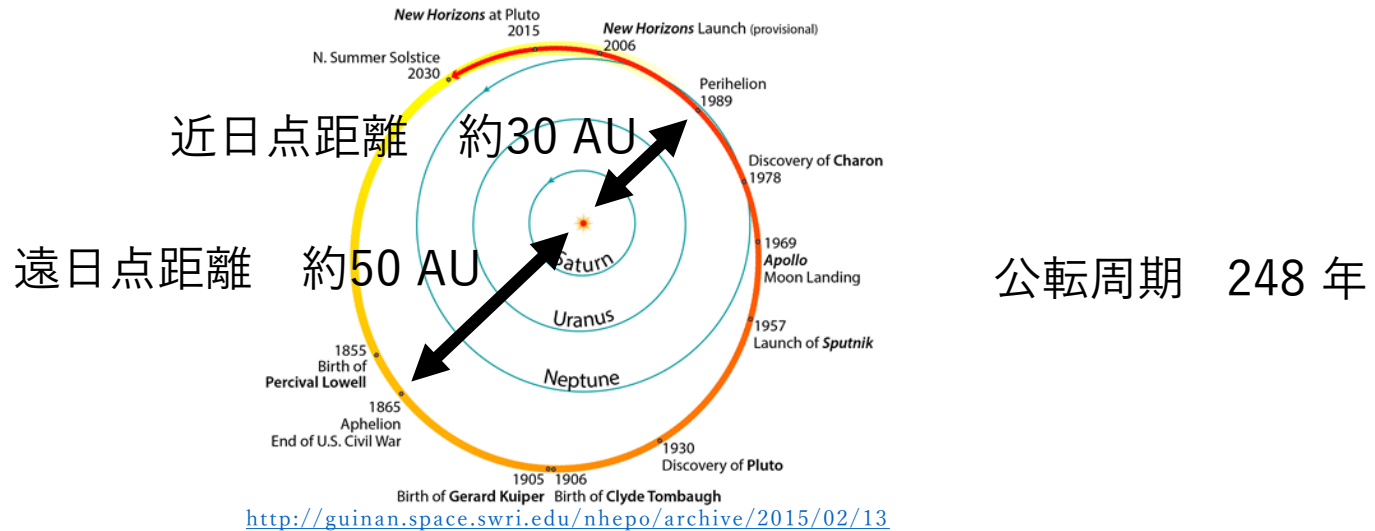


衝突地形由来のスプートニク平原を除くと
全球的に低緯度が暗く、中高緯度が明るい傾向

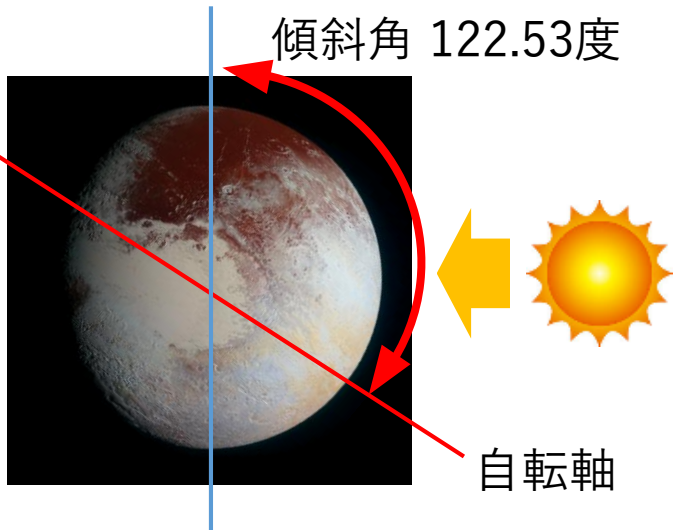
なぜ緯度によって反射率が異なるのか？

冥王星

●公転



●自転



- 自転周期 6日9時間
- 自転軸傾斜角変化 102~126度 (300万年周期)
(Dobrovolskis & Harris 1983)

自転軸の大きな傾き
→ 緯度・季節による日射の大きな違い
高緯度：季節変化大 日変化小
低緯度：季節変化小 日変化大
現在は北半球の夏

先行研究



イアペタス (土星衛星)

●他の氷天体の先行研究

- ・ 日射による H_2O 氷の昇華 → 反射率の低下
木星衛星の H_2O 氷 (Spencer 1987)
土星衛星イアペタスの H_2O 氷 (Kimura+ 2011)

●冥王星の場合

- ・ N_2 主成分の約1 Paの大気(Singer & Stern 2015)
昇華・凝結により N_2 、 CH_4 氷の分布が変化(Forget+ 2017)
- ・ 自転軸傾斜角が大きい
→ 緯度や季節による日射量の変化が大きい

→ N_2 、 CH_4 氷の昇華による反射率低下？

+

大気の凝結による反射率上昇？

昇華・凝結量が緯度ごとに異なる？



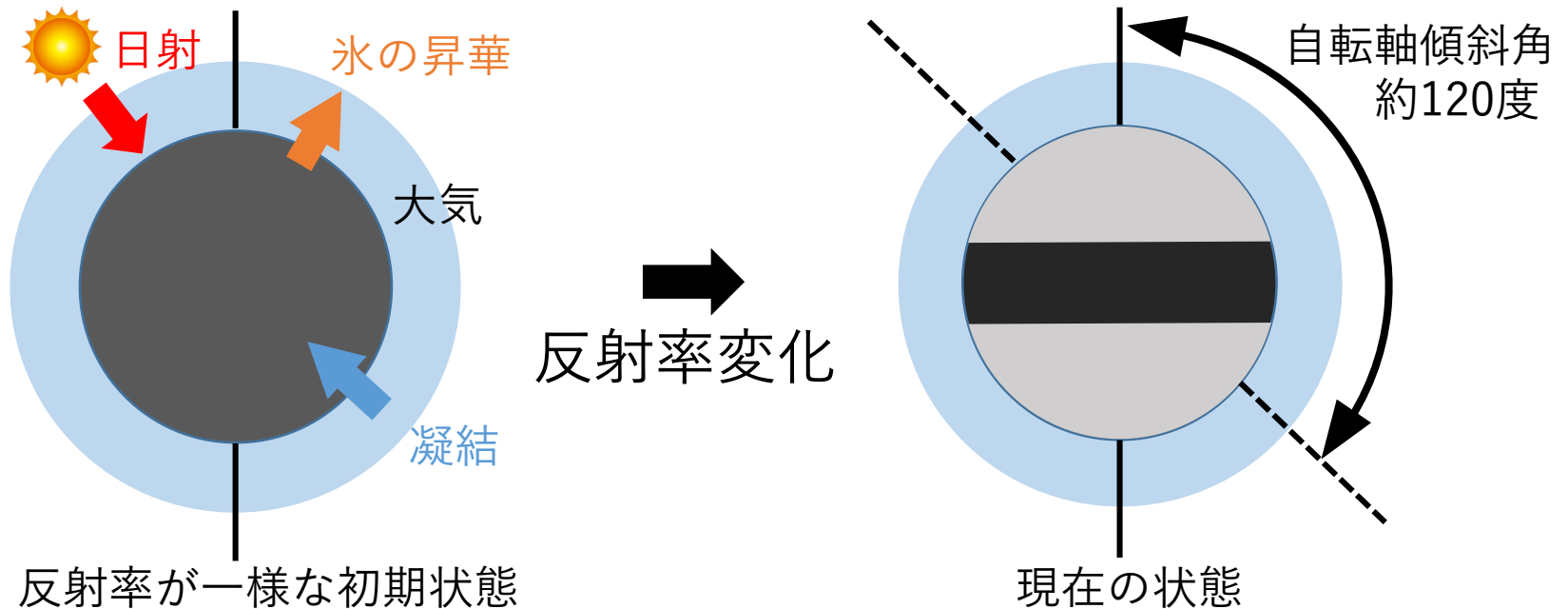
冥王星

冥王星での氷の昇華と凝結による
反射率変化の定量的評価は行われていない

目的

● アイデア

- ・ 氷の昇華・凝結による反射率変化が冥王星でも起こりうる？
- ・ 緯度ごとの日射の違いから反射率分布を説明できる？



- 目的 : 日射の変化に伴う冥王星表面の氷のふるまいと反射率の変化を定量的に考察し、反射率分布の成因を探る
- 手法 : 氷の表層-大気間昇華凝結モデルを構築し、数値シミュレーションを行う

反射率変化モデルを構築

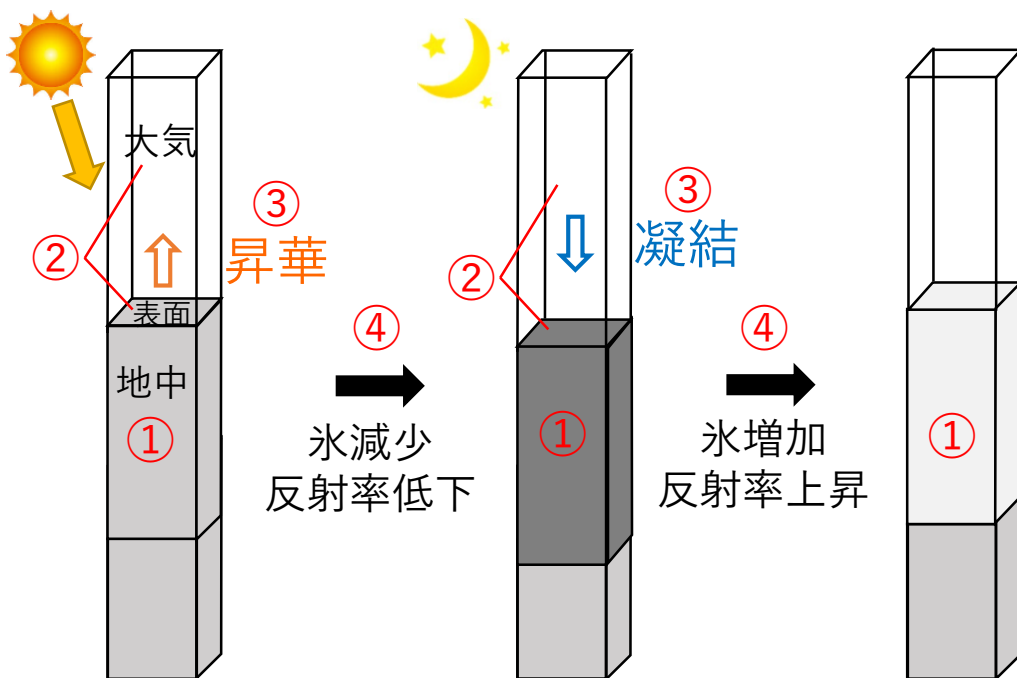
明るい氷と暗い非氷物質が均質に混ざっている表面状態を仮定

反射率

$$A = \frac{V_{ice}}{V} A_{ice} + \frac{V - V_{ice}}{V} A_{dark} \quad (\text{Kimura+ 2011})$$

V [m³]: 全体の体積 V_{ice} [m³]: 氷の体積 $A_{ice} = 0.9$: 氷の反射率 $A_{dark} = 0.1$: 非氷物質の反射率

氷と非氷物質の反射率にそれぞれの体積比をかけて求める



混合深さ: 1 cm

月のレゴリスの厚さを基準に、微小隕石衝突フラックスを冥王星にスケール

① 氷と非氷物質の体積比 → 反射率



② 反射率と日射量 → 表面・大気温度



③ 温度 → 昇華・凝結量



④ 微小隕石衝突などにより一定の深さまで均一に混合



①へ

計算式

● 表面温度

日射、赤外放射、内部からの熱流、昇華潜熱によって与えられるエネルギー

$$\text{表面温度変化 [K]} \quad \Delta T = \frac{1}{S\Delta r \cdot \rho C} \left[\underbrace{\left\{ (1-A) \left(\frac{K}{D^2} \right) \cos i \right\}}_{\text{日射}} \underbrace{- \varepsilon \sigma T^4}_{\text{赤外放射}} \underbrace{+ k \frac{\partial T}{\partial r}}_{\text{熱流}} \underbrace{S\Delta t - L\rho v}_{\text{昇華潜熱}} \right]$$

S [m²]: 表面積 r [m]: 半径方向の距離 ρ [kg/m³]: 密度 C [J/kg·K]: 比熱 A : 反射率 D [AU]: 太陽からの距離
 K [W/m²]: 太陽定数 i [度]: 日射角 ε : 放射率 k [J/m·s·K]: 熱伝導率 σ [W/m²K⁴]: シュテファンボルツマン定数 L [J/kg]: 潜熱

● 昇華

表面温度における飽和蒸気圧と表面大気圧の差

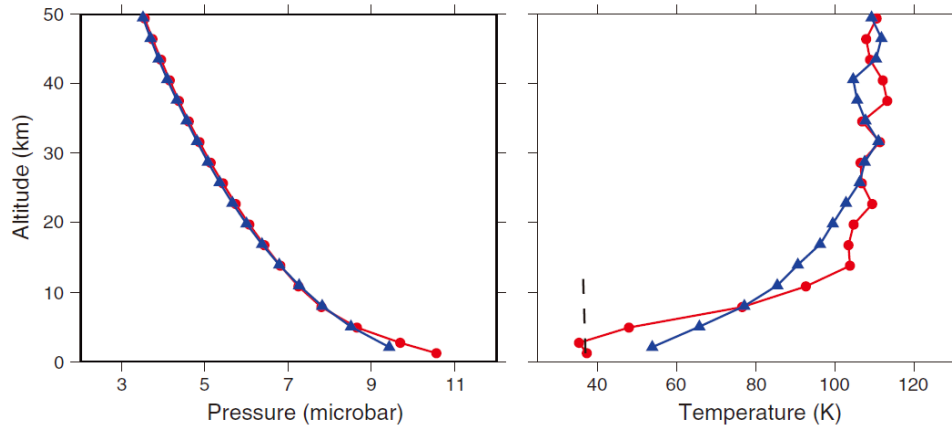
$$\text{昇華量 [m}^3\text{]} \quad v = \frac{\Delta t \cdot S (P_{sub} - P_0)}{\rho} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \quad (\text{Ivanov \& Muhleman 1999})$$

P_{sub} [Pa]: 蒸気圧 P_0 [Pa]: 表面大気圧 R [J/mol·K]: 気体定数 M [kg/mol]: モル質量

昇華した氷は瞬間的に全球大気に平均化されると仮定

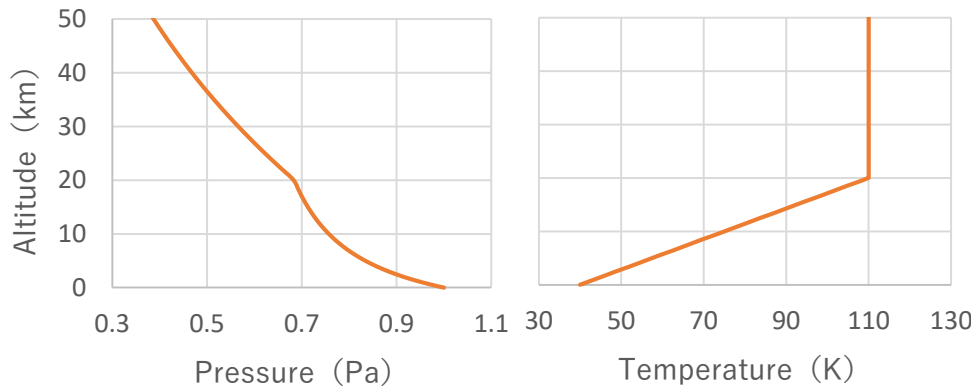
大気温度 & 凝結モデル

● 大気圧と大気温度の観測値 (Gladstone+ 2017)



表面付近では
高度が上がるほど温度も上昇
(メタンやヘイズによる日射吸収)

● 計算に用いた値



・ 温度

高度20 km以上 : 110 K
高度20 km以下 : 表面温度から
高度に比例して上昇

・ 圧力

$$P = P_0 e^{-\frac{Mg}{RT_a}z}$$

g : 重力加速度
 T_a : 大気温度
 z : 高度

● 凝結 凝固点と大気温度の差 $T_g [K]$: 凝固点 $M_a [kg]$: 大気量 $L [J/kg]$: 潜熱

$$\text{凝結量 [m}^3\text{]} \quad \Delta m = \frac{C(T_g - T_a)M_a}{L\rho} \quad (\text{Forget+ 2017})$$

凝結した氷は瞬間的に表面に沈着すると仮定

初期条件・パラメータ

大気の主成分である N_2 のモデル、大気にわずかに含まれる CH_4 のモデル

- ・ 全球一様な反射率を持つ状態から開始
- ・ 全球を緯度15度ずつ12の緯度帯に分割
- ・ 各緯度帯での日射量変化を用いて反射率を変化させる

● 初期反射率

$A_i = 0.5, 0.8$ 氷と非氷物質の体積比

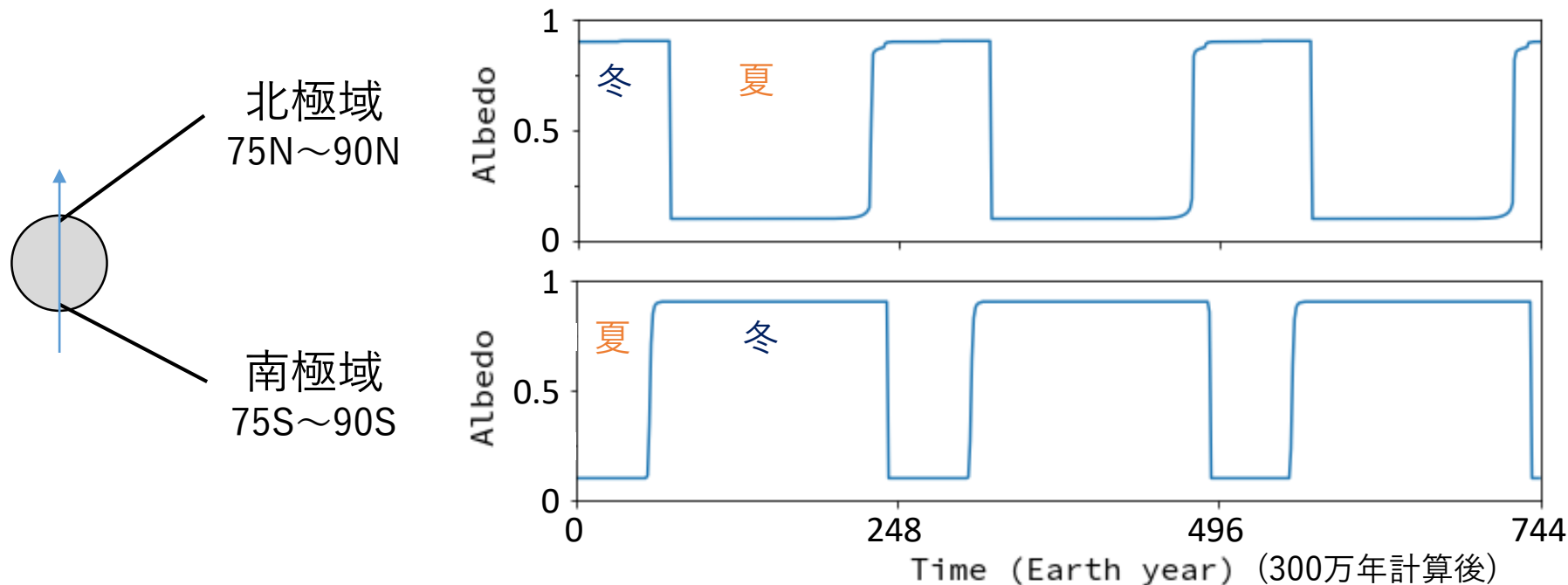
● 熱慣性

$TI = \sqrt{\rho C k}$ [$J/s^{1/2} \cdot m^2 \cdot K$] = 10, 100, 1000 表層の空隙率
 ρ : 密度 C : 比熱 k : 熱伝導率
 観測値はない
 例) 氷: 2000 木材: 300
 水: 1500 雪: 150

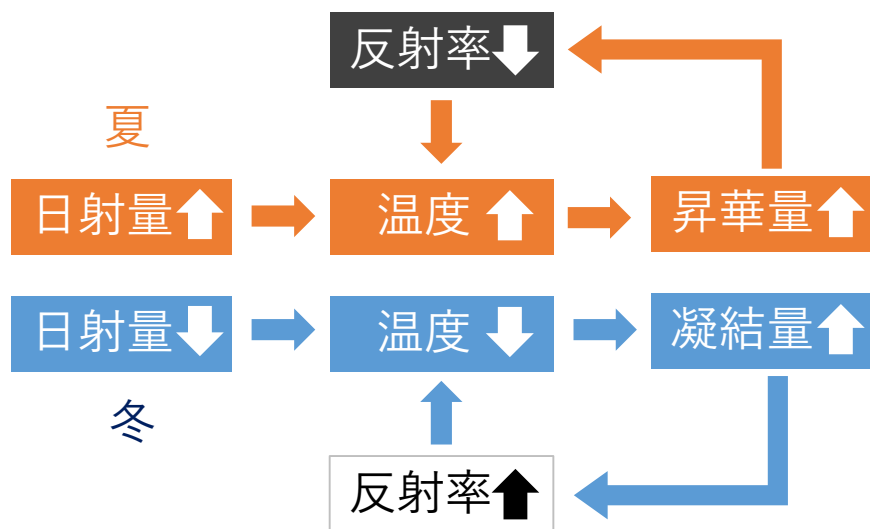
		初期反射率 A_i	
		暗い ←	→ 明るい
熱慣性 TI	表面温度 変わりやすい	● $A_i = 0.5$ $TI = 10$	● $A_i = 0.8$ $TI = 10$
	↑ ↓	● $A_i = 0.5$ $TI = 100$	● $A_i = 0.8$ $TI = 100$
	変わりにくい	● $A_i = 0.5$ $TI = 1000$	● $A_i = 0.8$ $TI = 1000$

N₂モデルの結果：3冥王星年間の反射率変化

A_i = 0.8
T_I = 10



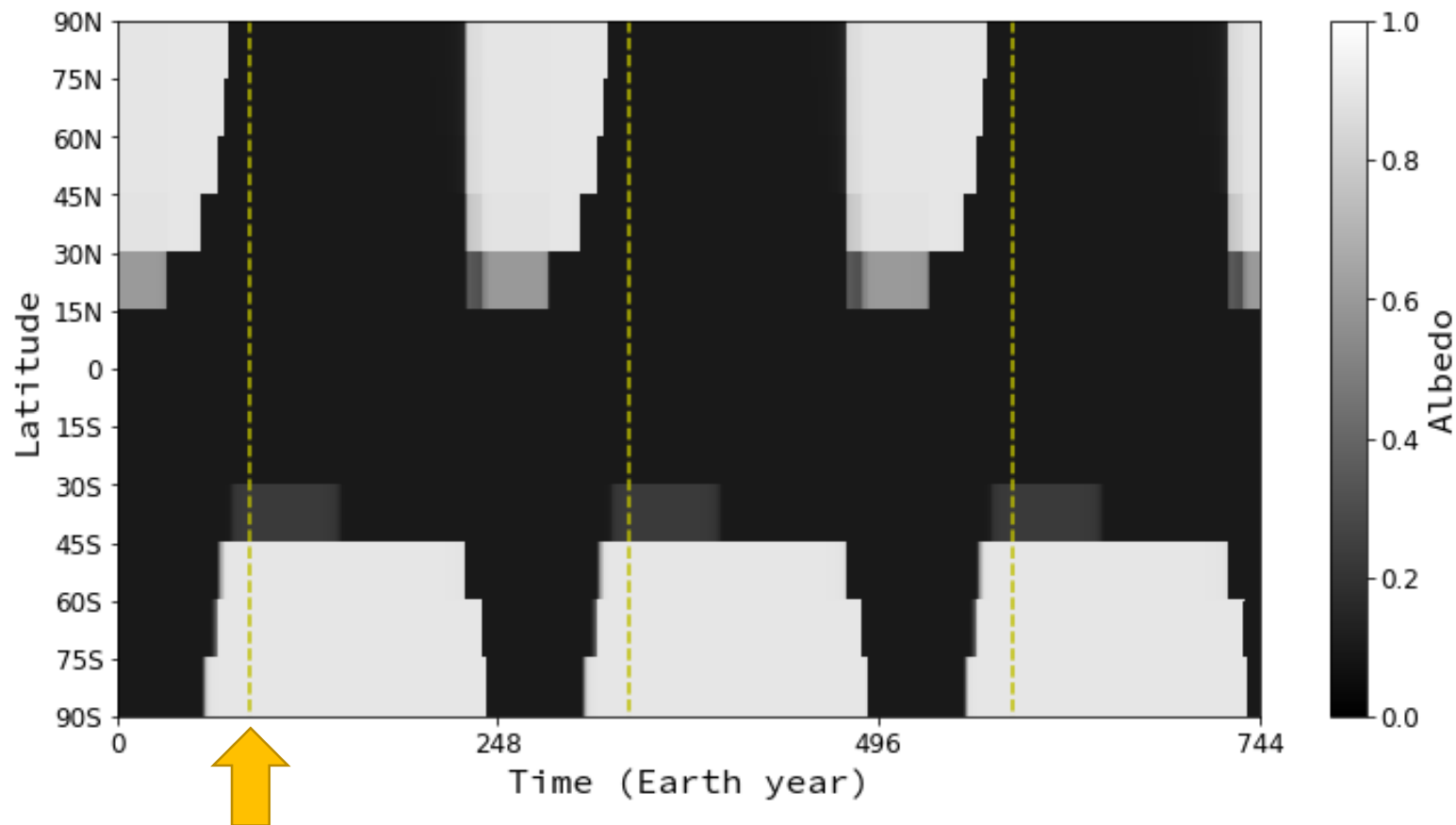
● 反射率変化の正のフィードバック効果



- ・ 緯度によって異なる変化
- ・ フィードバック効果により、季節変化に伴い大きく上下

N₂モデルの結果：3冥王星年間の反射率分布と変化

A_i = 0.8
T_I = 10



観測時(2015年)と同じ軌道上の位置・季節

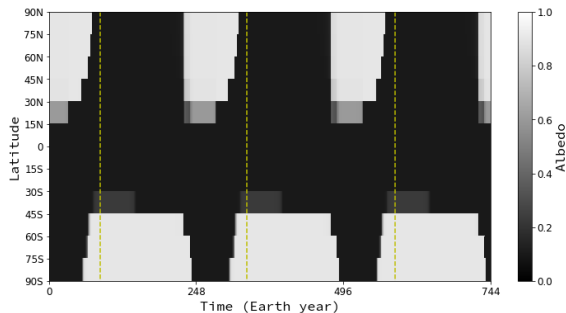
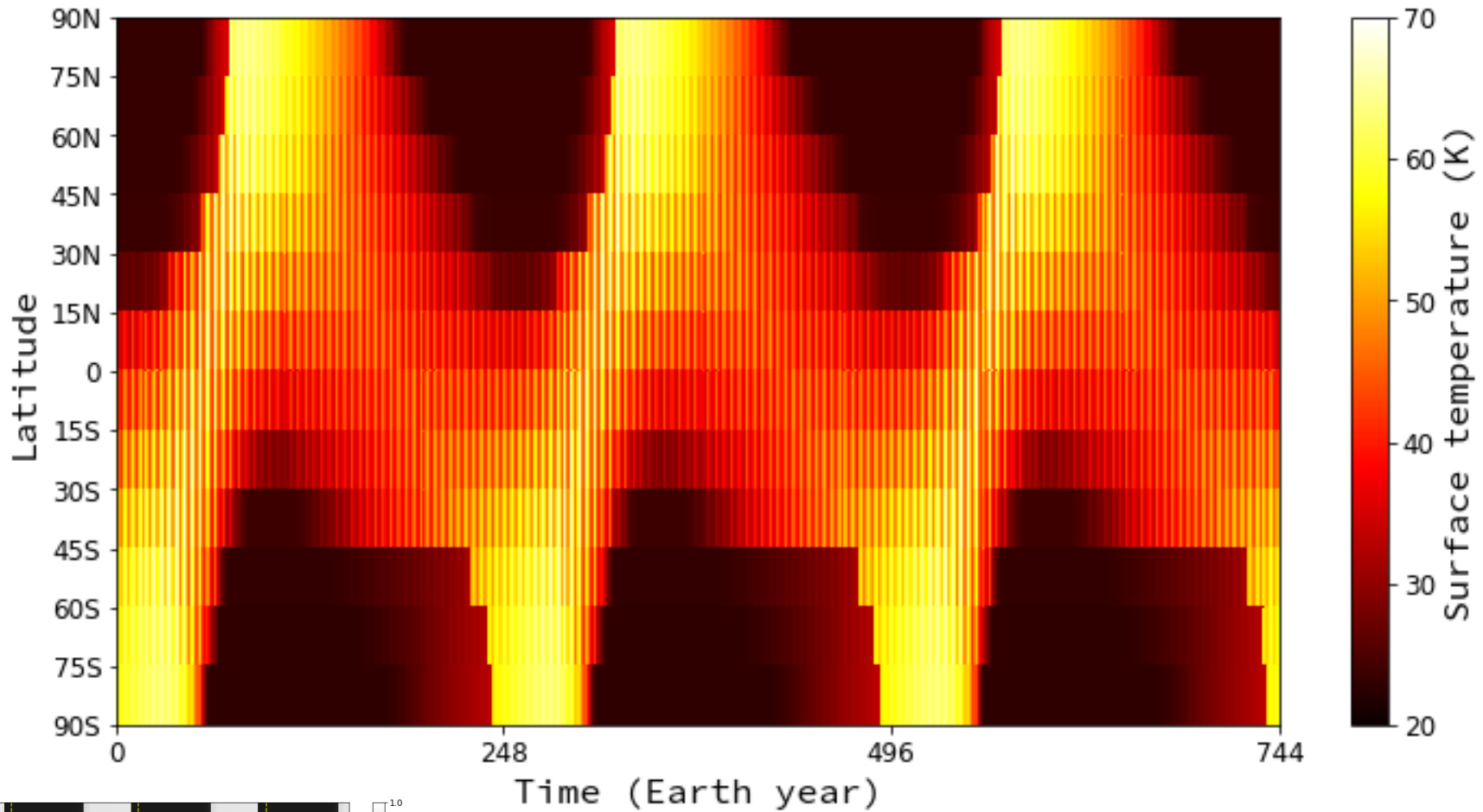
- ・ 季節変化に伴い北半球、南半球の中高緯度が明るくなる
- ・ 低緯度は暗いまま維持される
- ・ 観測時と同じ季節では北半球は暗くなる

} 観測と調和的
→ 観測と合わない

N₂モデルの結果：表面温度分布と変化

Ai = 0.8

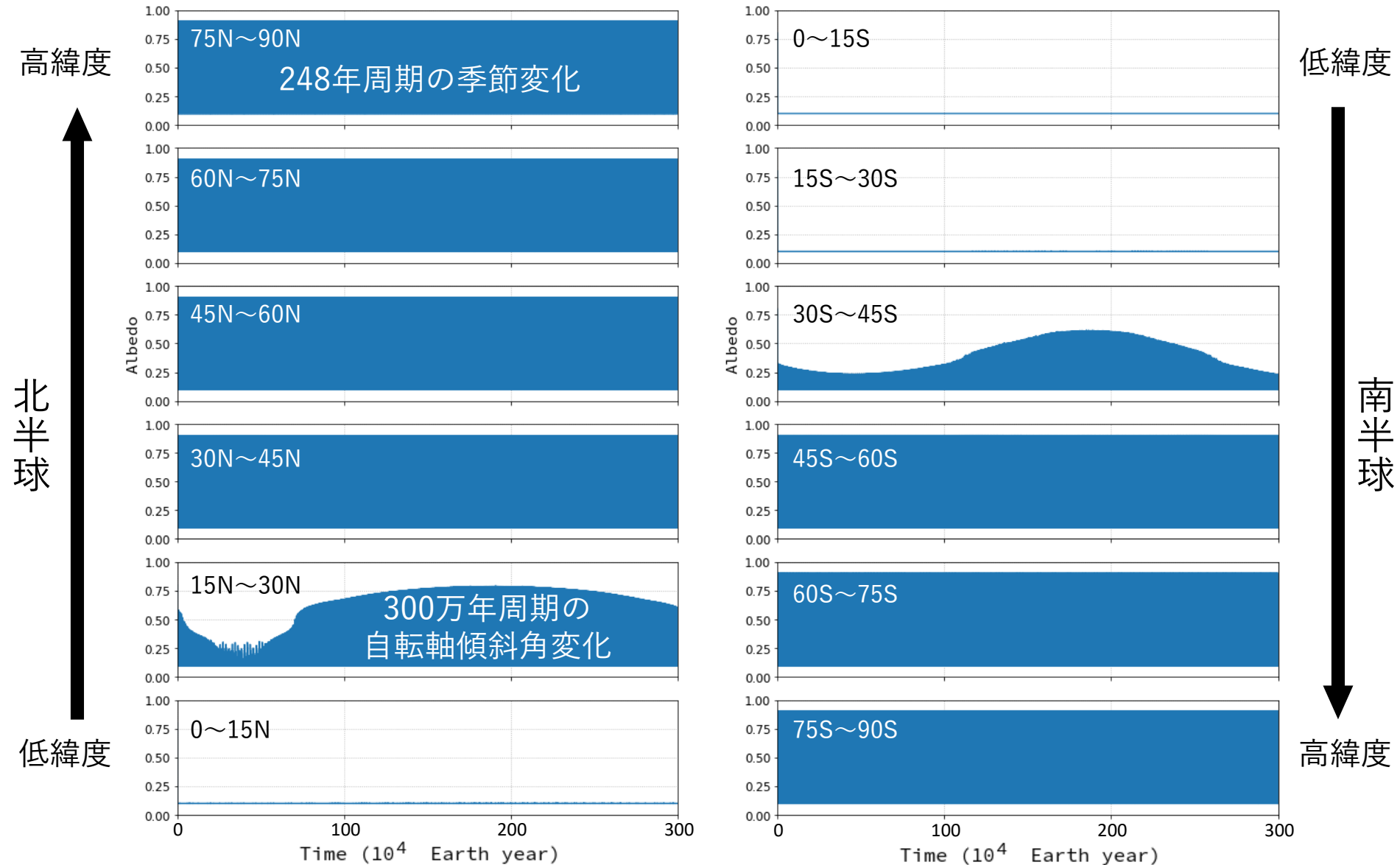
TI = 10



日射、反射率の変化に伴い20~70 Kの範囲で変化
→ 昼面の観測値 38~55 K と調和的 (Gladstone+ 2016)

N₂モデルの結果：300万年間の反射率変化

Ai = 0.8
TI = 10



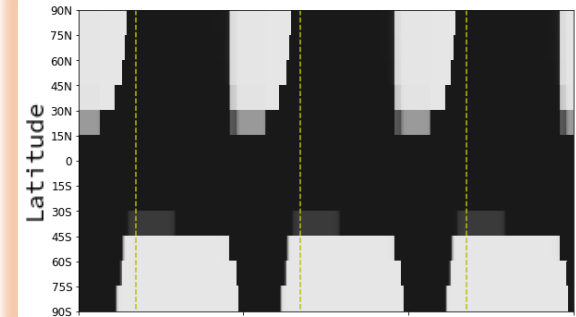
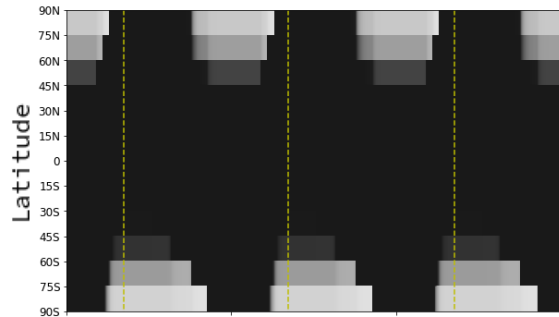
300万年スケールで周期的な変化

N₂モデルの結果まとめ

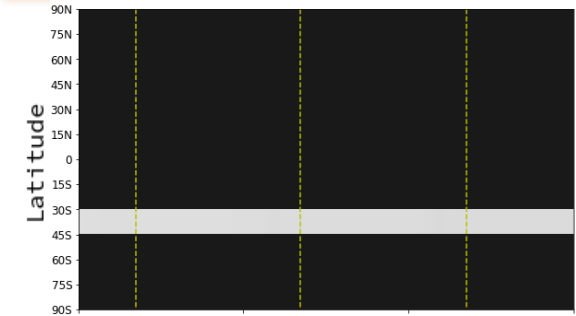
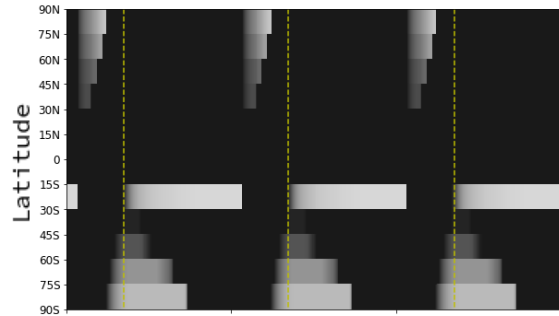
初期反射率 $A_i = 0.5$

$A_i = 0.8$

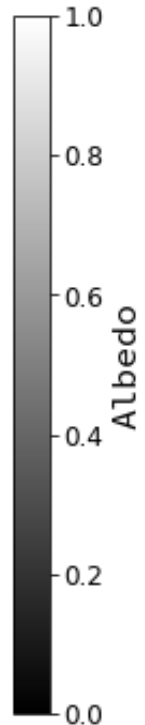
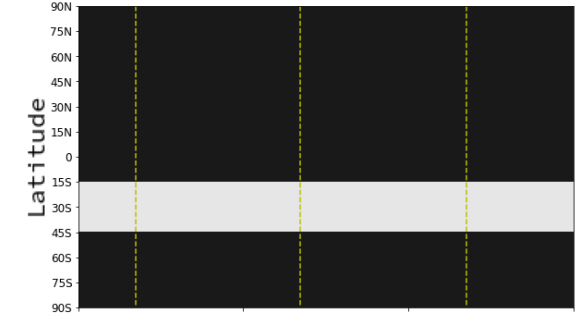
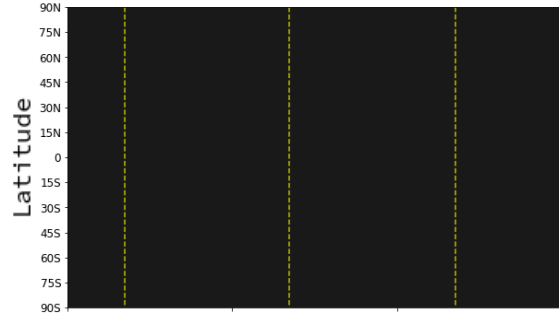
熱慣性
 $TI = 10$



$TI = 100$



$TI = 1000$



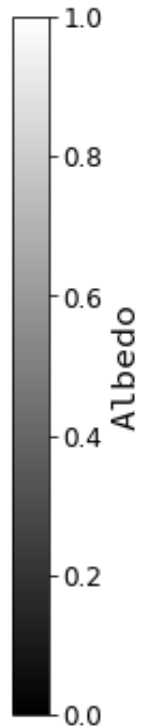
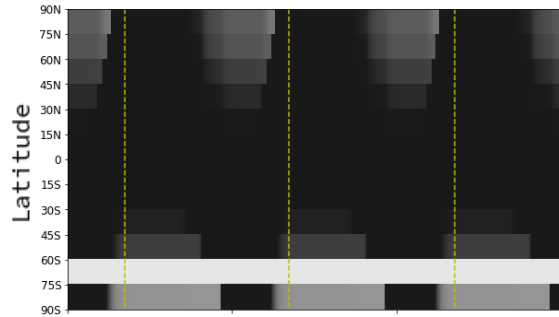
- 熱慣性が大きい場合、季節変化せず北半球が暗いまま維持される → 観測と合わない
- 明るくなる範囲は $A_i=0.8$ 、 $TI=10$ の場合が最も観測に近い
- すべての条件で、観測時と同じ季節では北半球が暗くなる → 観測と合わない

CH₄モデルの結果まとめ

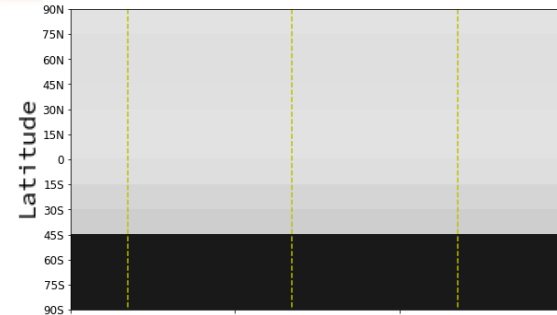
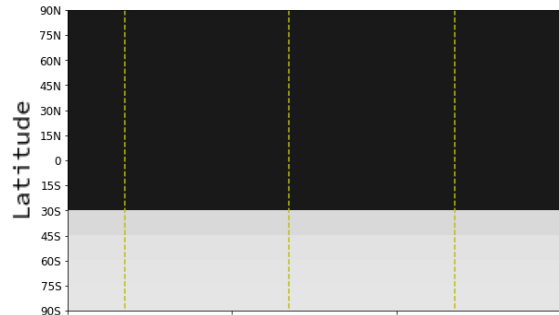
初期反射率 $A_i = 0.5$

$A_i = 0.8$

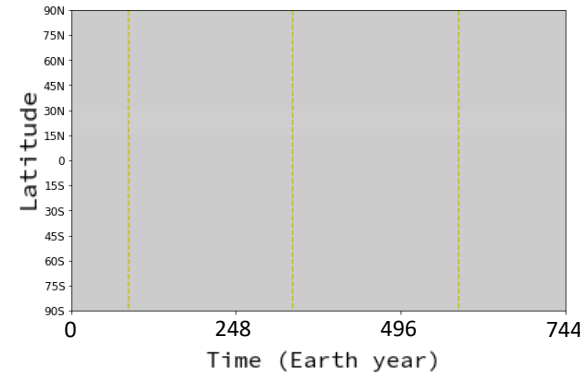
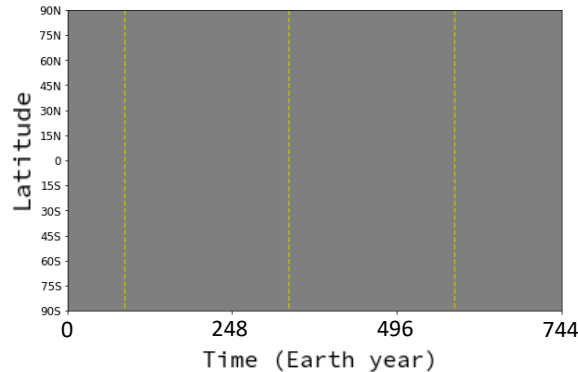
熱慣性
 $TI = 10$



$TI = 100$



$TI = 1000$



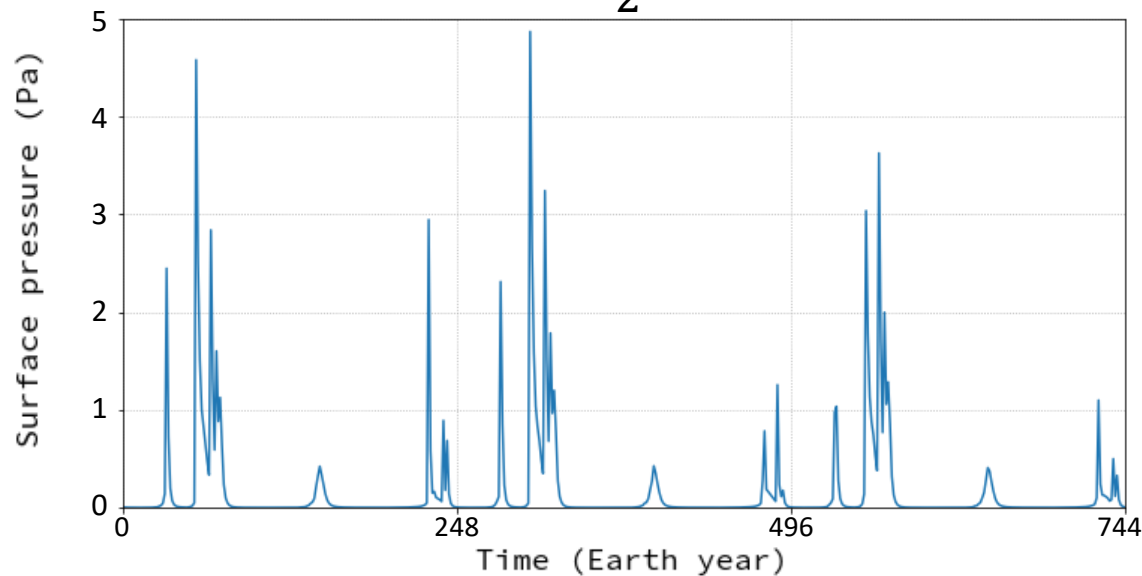
- N₂より凝固点が高く、季節変化しにくい
- 熱慣性大きい場合は緯度方向の明暗差が生まれにくい → 観測と合わない
- N₂モデルと同じく、 **$A_i=0.8$ 、 $TI=10$** の場合が最も観測に近い

結果：表面大気圧変化

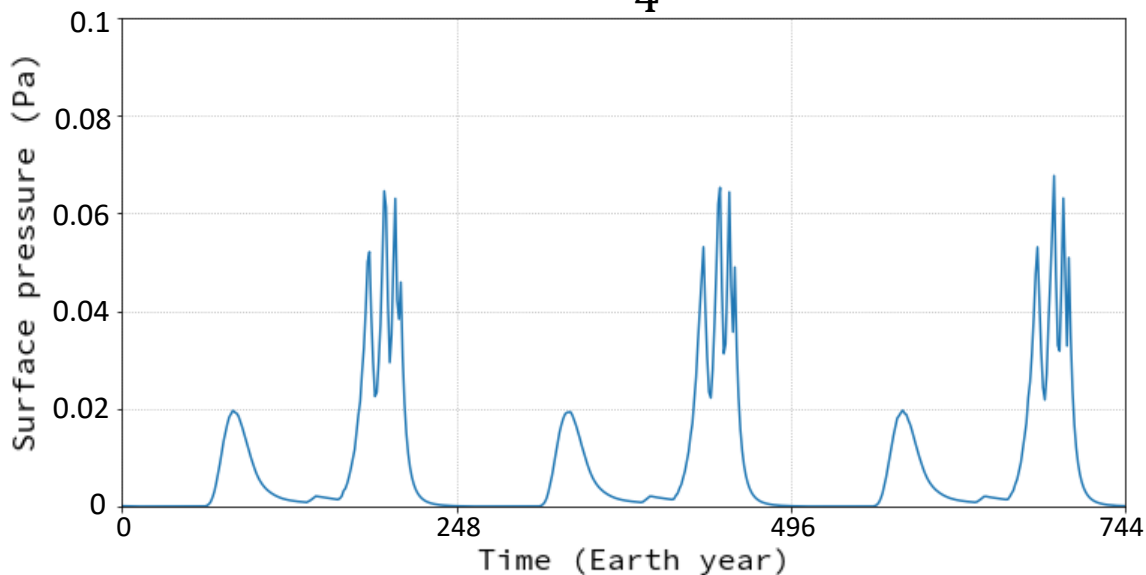
$A_i = 0.8$

$TI = 10$

N_2



CH_4



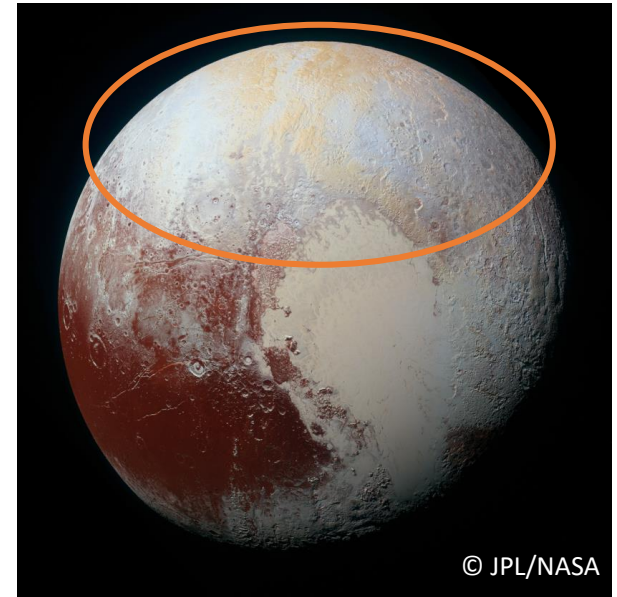
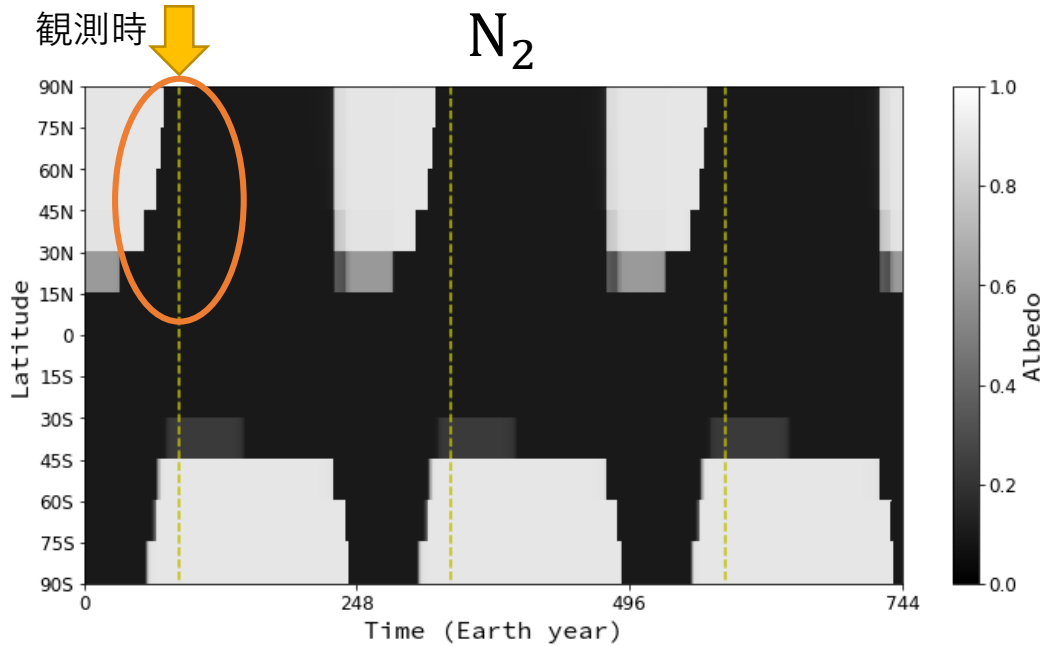
昇華・凝結に伴い変化

N_2 ：数 Paの大気形成

CH_4 ：凝結しやすく大気量少ない

→ 観測 (1 Pa, 90%以上 N_2)と調和的
大気-表層間で大規模な N_2 循環

議論：観測とのずれ



- どの条件でも観測時の季節（北半球の夏）では北半球から N_2 氷が枯渇
- しかし観測では、北半球の日射量大きいにもかかわらず N_2 氷が分布
→ N_2 氷の昇華を抑え、長期間保持する何らかのプロセス？

例えば ● N_2 氷と CH_4 氷の共存

CH_4 氷によって高い反射率が維持され、 N_2 氷が保持される？

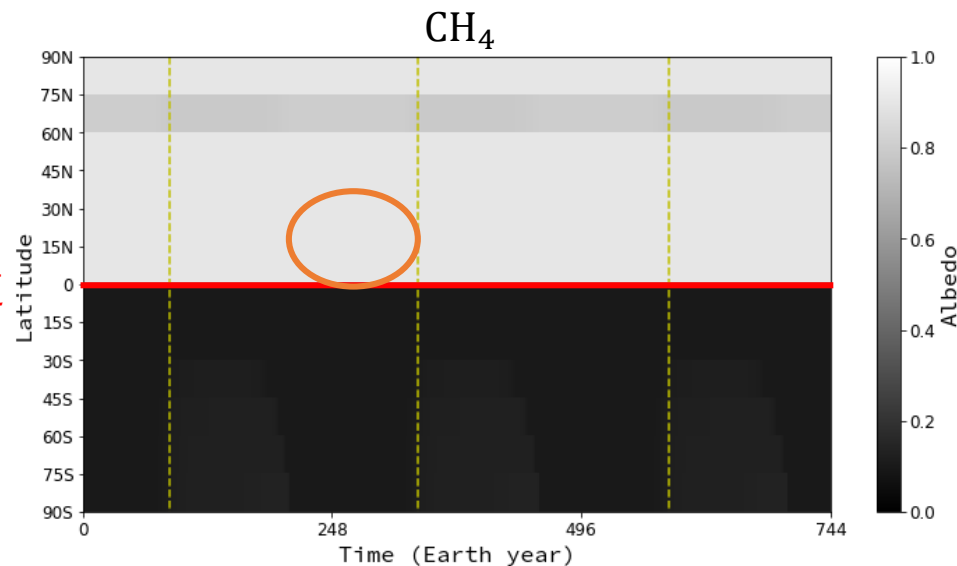
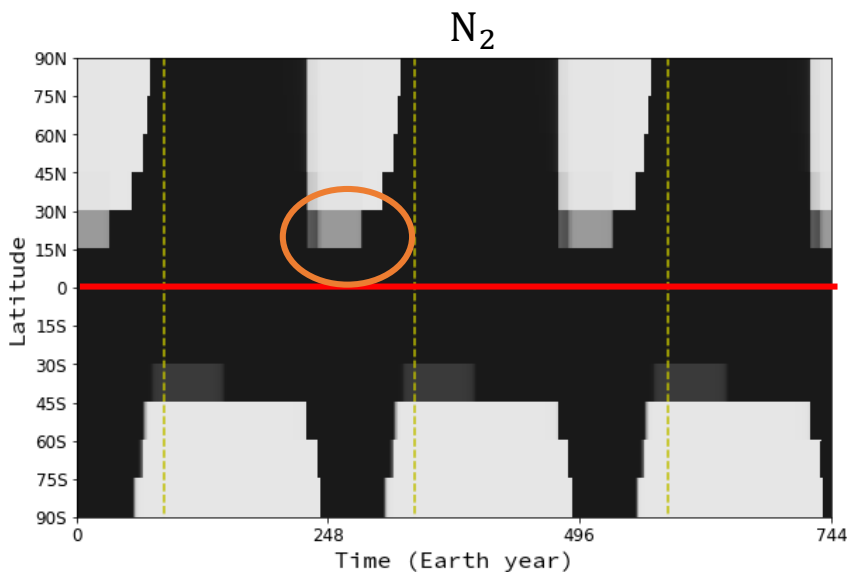
● 水平方向の大気圧差

昇華すると周囲より表面大気圧高くなり、さらなる昇華を抑える？

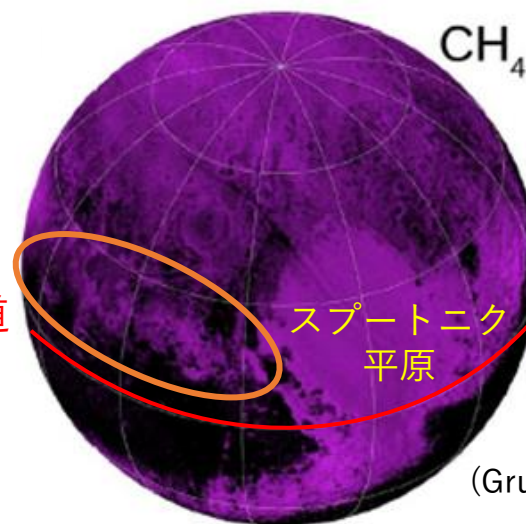
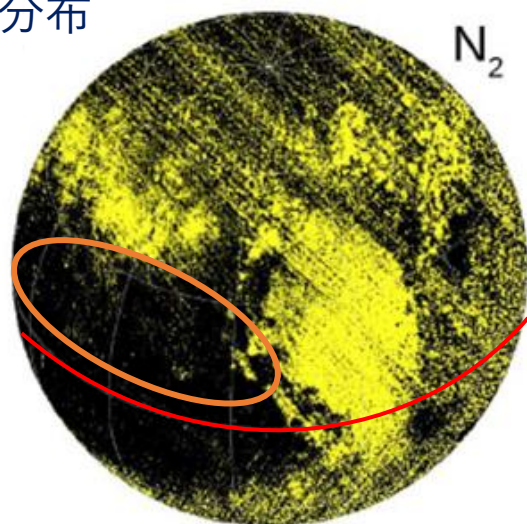
議論：氷分布の観測との比較

$A_i = 0.8$

$TI = 10$



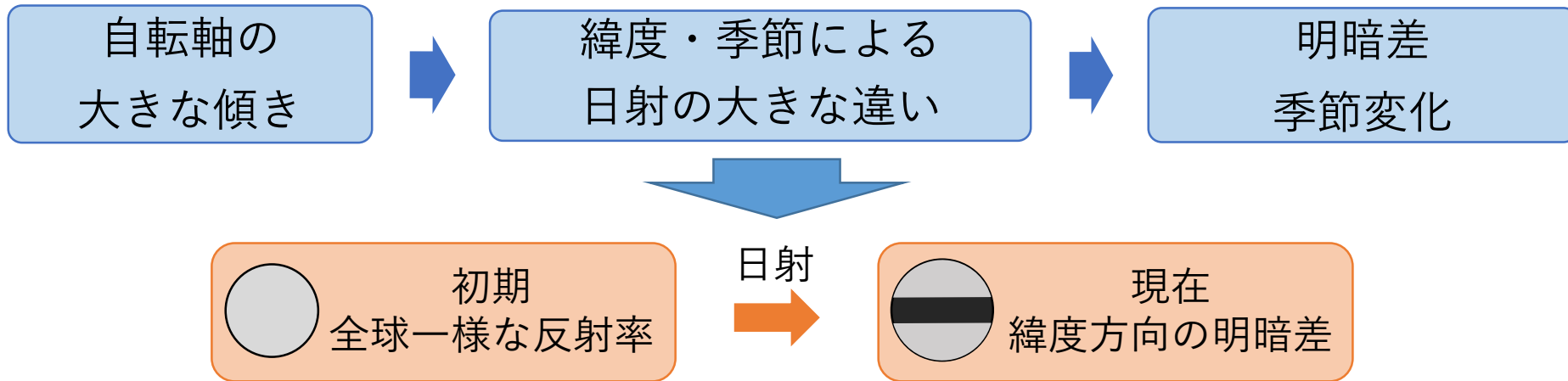
● 観測された氷分布



CH_4 は N_2 に比べより低緯度側にも広がっている → 観測と調和的

議論：現在の反射率分布に至るプロセス

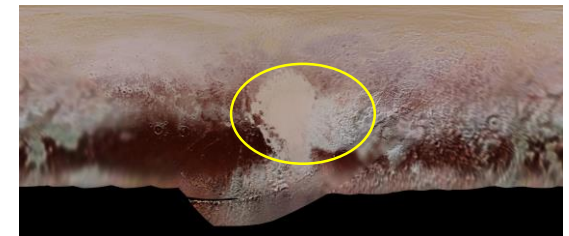
● 反射率分布変化



- ・ N_2 、 CH_4 共に初期反射率が高く、熱慣性が小さい条件が最も観測に近い
→ 表層の氷が非氷物質よりも有意に多く、空隙率が高い条件が必要

● スプートニク平原

- ・ 巨大衝突で形成された盆地に N_2 の氷が堆積
表面大気圧が高く優先的に凝結 (Bertrand & Forget 2016)



→ 経度方向、地形を考慮すれば本研究のモデルで再現可能？

まとめ

- 観測により冥王星表面には強い明暗差が存在することが明らかに
→ 緯度方向の明暗差に着目しその成因を探る
- 日射、温度、大気圧、氷の昇華量、凝結量、反射率がカップリングする反射率変化モデルを構築し、数値シミュレーションを行った
- 自転軸が大きく傾いていることによって、緯度や季節による日射の大きな違いが生まれ、緯度ごとの明暗差や反射率の季節変化が生まれている可能性がある
- 反射率分布には、表層の空隙率に強く依存する熱慣性や、氷と非氷物質の割合によって決まる初期反射率が大きく影響しており、初期反射率が高く、熱慣性が小さい条件で観測に近い反射率分布が得られた

展望

- ◆数年～数十年後に観測し反射率分布が変化していれば、季節変化していることを実証できる
- ◆本モデルは、軌道要素などを変えれば他の氷天体に応用可能