

The background of the slide features two celestial bodies. On the left is a smaller, lighter-colored body with a smooth, slightly irregular surface. On the right is a larger, darker, reddish-brown body with a heavily cratered and textured surface, resembling Mars or a large asteroid. The text is overlaid on these images.

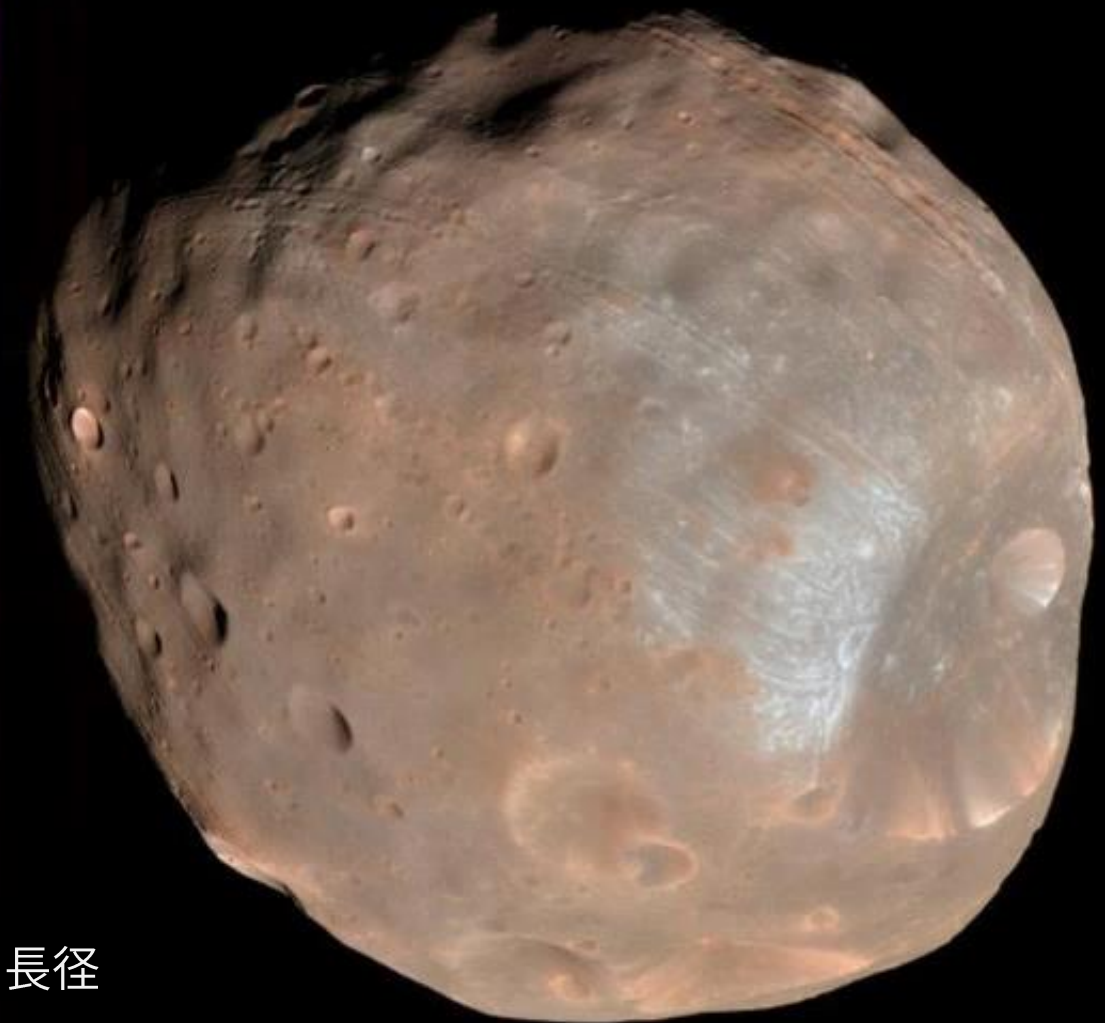
円盤状原始火星大気による 衛星前駆天体の捕獲と衛星軌道進化

Feb. 08, 2018

宇宙理学専攻
惑星宇宙グループ・倉本鎌田研究室

松岡 亮／Matsuoka Ryo

フォボス
直径 26 km



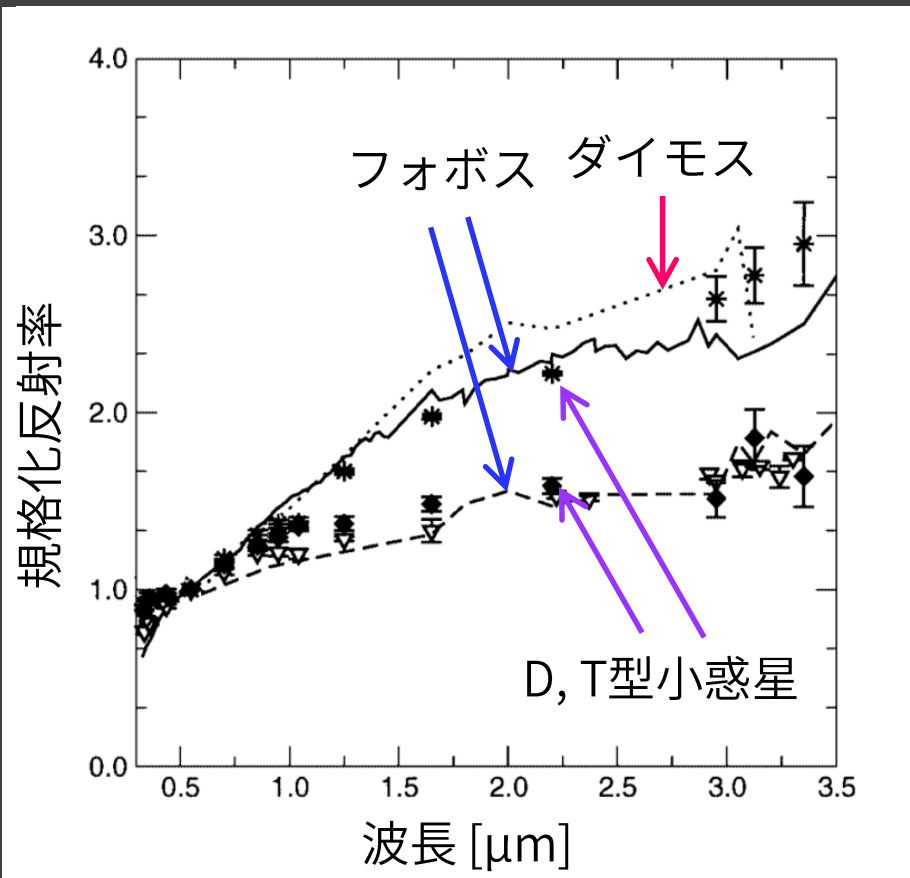
ダイモス
直径 15 km



※ 直径はいずれも近似楕円体の長径

火星の衛星と小惑星の類似性

火星の衛星のスペクトルやアルベド (< 0.1) , 密度 (P: 1.9 g/cm^3 , D: 1.5 g/cm^3) は始原始的炭素質小惑星 (特にD型・T型) に似ている
…小惑星捕獲起源説 (捕獲説) を支持



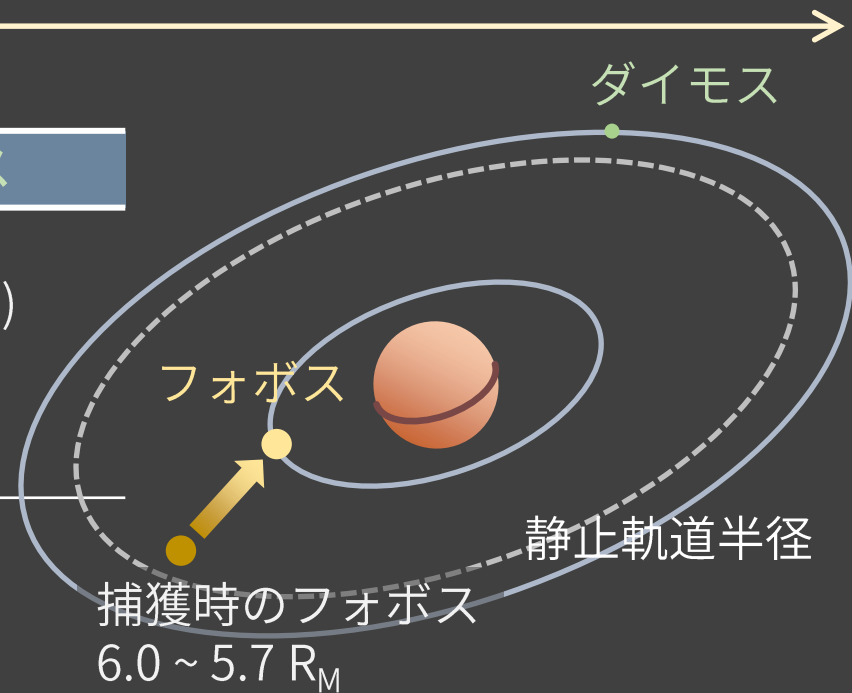
火星の衛星と小惑星の可視-
近赤外反射スペクトル
点が小惑星, 線が火星衛星
Rivkin+ (2002)

火星や地球型惑星に水を供給した天体 (水カプセル天体) が衛星として残されている？

MMX (Martian Moon eXploration) :
2024年打ち上げ予定 (JAXA)

衛星の軌道と抗力捕獲の先行研究

	フォボス	ダイモス
軌道長半径 [km]	9375.0 ($2.76 R_M$)	23458.0 ($6.92 R_M$)
軌道離心率	0.01511	0.00024
軌道傾斜角 [deg]	1.0756	1.7878



真円で赤道面に沿う整った軌道

→ 捕獲後に**軌道エネルギーの散逸**が起きたことを示唆

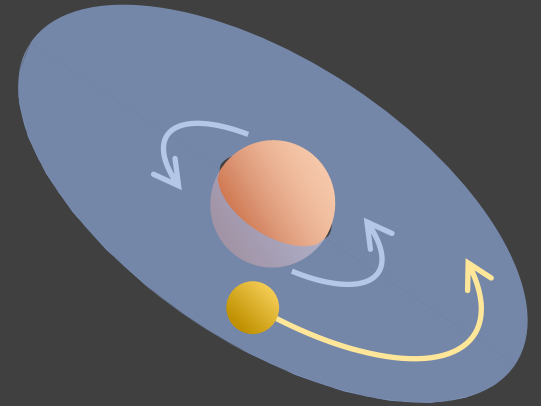
原始太陽系星雲と接続した，**球対称・非回転大気**による抗力捕獲と軌道進化 (Hunten 1979; Sasaki 1990)

○ 衛星軌道は真円になる

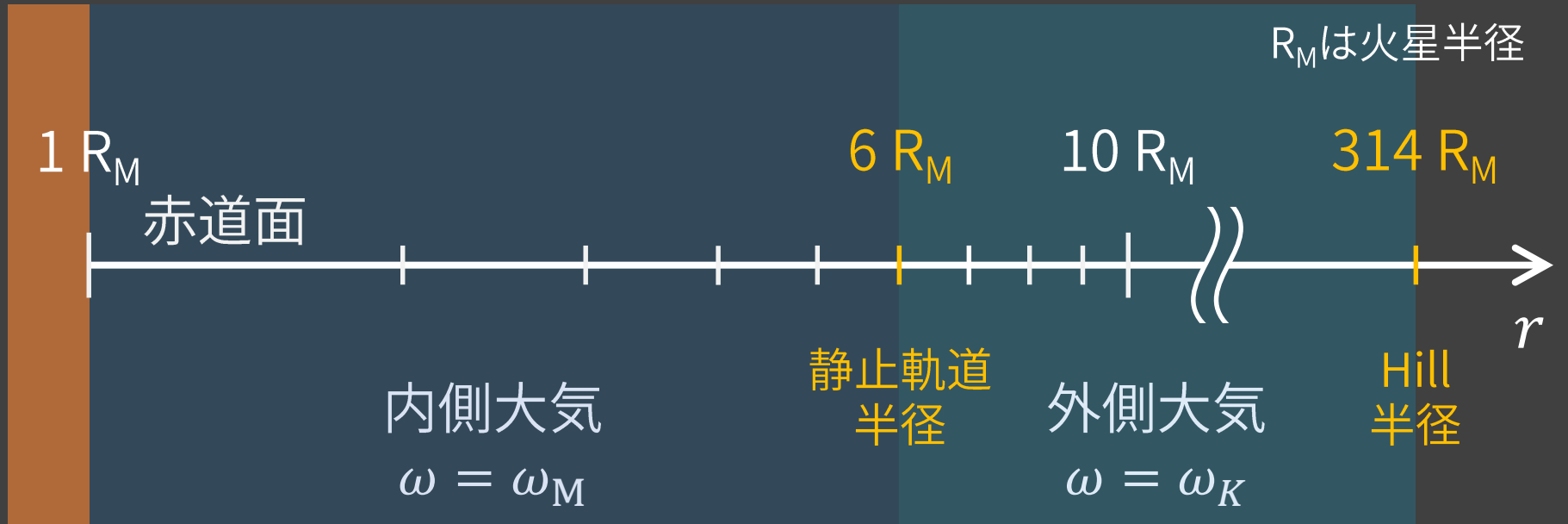
△ 傾斜角は下げられない，常に抗力が働き衛星が落下する

円盤状大気の可能性と本研究の目的

- 星雲ガスが元々持っていた角運動量
+ 火星の自転
→ 大気の回転を引き起こし、円盤状大気を成す可能性がある
- 衛星と大気との速度差が小さい
→ 衛星落下を抑制すると予想
- 平板化した密度分布
→ 傾斜角低下を引き起こすと予想
- 円盤状大気モデルを構築し、円盤状大気との相互作用による捕獲・衛星軌道進化が、火星の衛星の軌道特徴を再現するかを調べる



円盤状大気モデルでの仮定

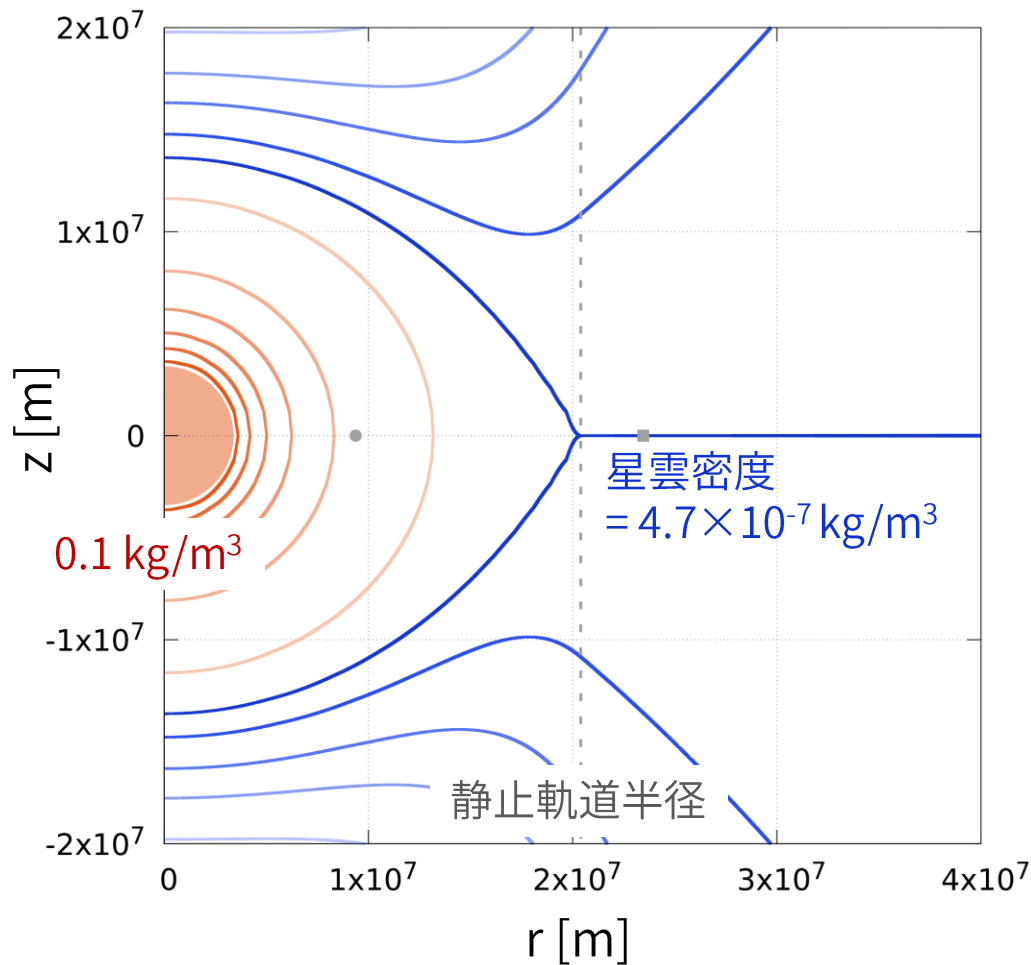


- 原始太陽系星雲（林モデル, Hayashi+ 1985）との接続を想定： $T = 200 \text{ K}$, $p_\infty = 0.33 \text{ Pa}$, $\mu = 2.34$

大気の色速度構造に関する仮定…静止軌道半径の内外で異なる

- 内側：地表面摩擦がよく効く → 火星自転角速度 ω_M で回転
- 外側：遠心力がよく効く → Kepler角速度 ω_K で回転

円盤状大気の密度場



- 遠心力・重力・圧力勾配の
つり合いを考慮
- 速度場・密度場を各軌道計
算に与える

円盤状大気の子午線断面の
等密度線（円筒座標系）

色が薄くなるごとに
暖色系：1/10 倍
寒色系：1/√2 倍

軌道計算の設定（共通・捕獲）

本研究では「**捕獲計算**」と「**衛星軌道進化計算**」を実施

共通設定

- 数値スキーム：リープフロッグ法＋RK4（抗力項）
- 時間ステップ： 10^{-5} yr
- 天体半径：10 km（フォボスを想定）
- 天体密度： 1.85 g/cm^3 （フォボスを想定）
- 抗力係数 C_D ：1.0
- 大気の人エカットオフ ($r, |z| < r_H$)

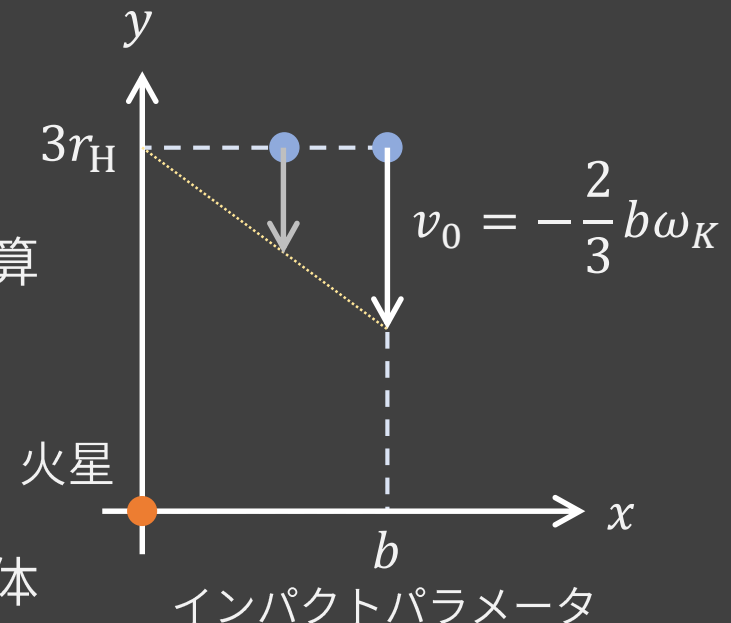
捕獲計算

- Hill圏外からの微惑星の捕獲を確かめる計算
- 制限三体問題（2次元Hill方程式）

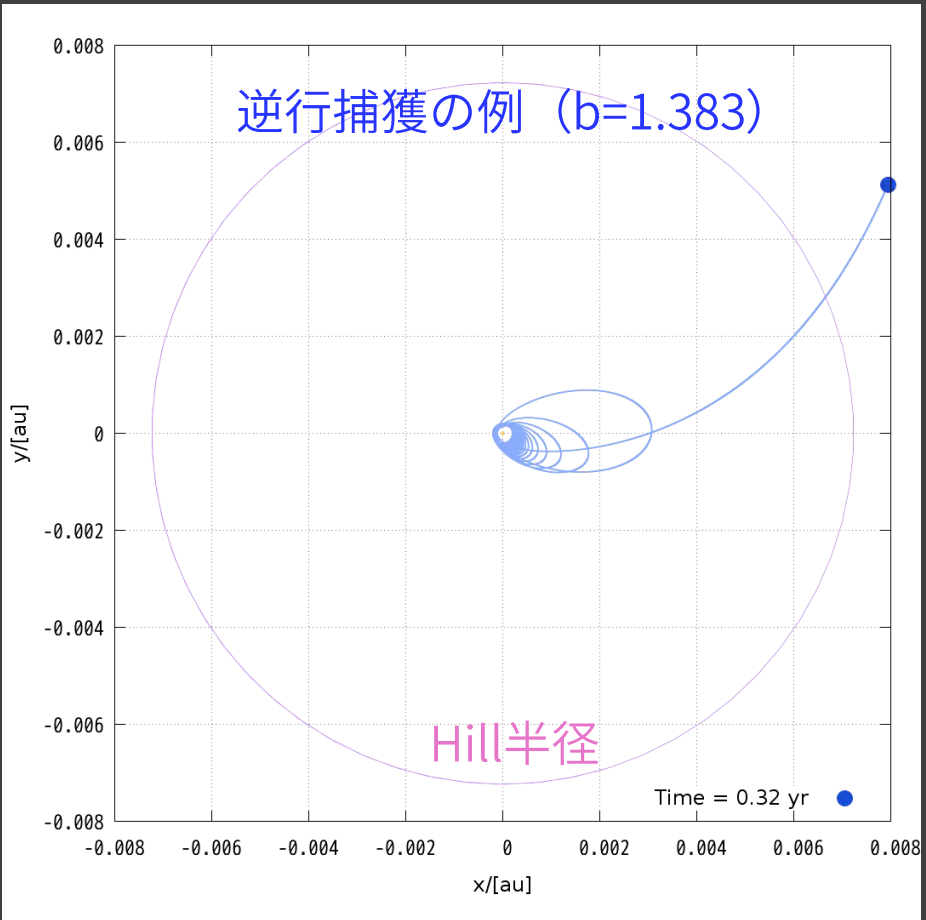
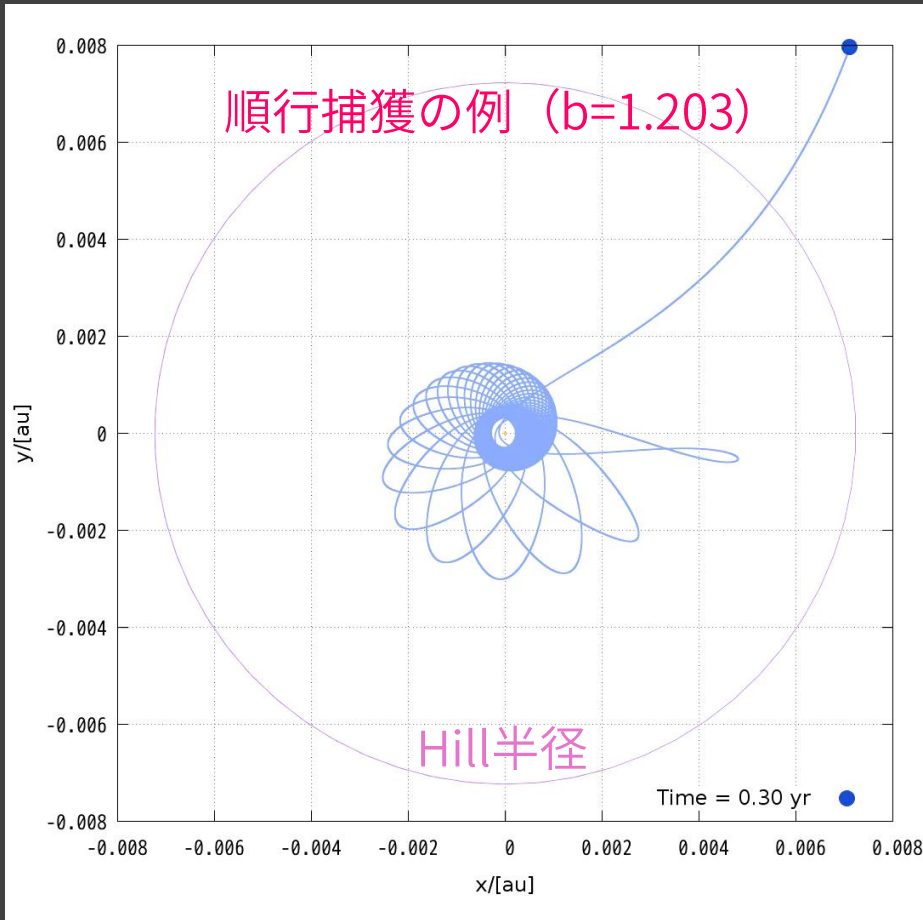
$$\ddot{x} - 2\omega_K \dot{y} - 3\omega_K^2 x = F_{g,x} + F_{D,x}$$

$$\ddot{y} + 2\omega_K \dot{x} = F_{g,y} + F_{D,y}$$

- 初期条件：周太陽離心率・傾斜角が0の天体
- インパクトパラメータを $0 \sim 3 r_H$ まで与える

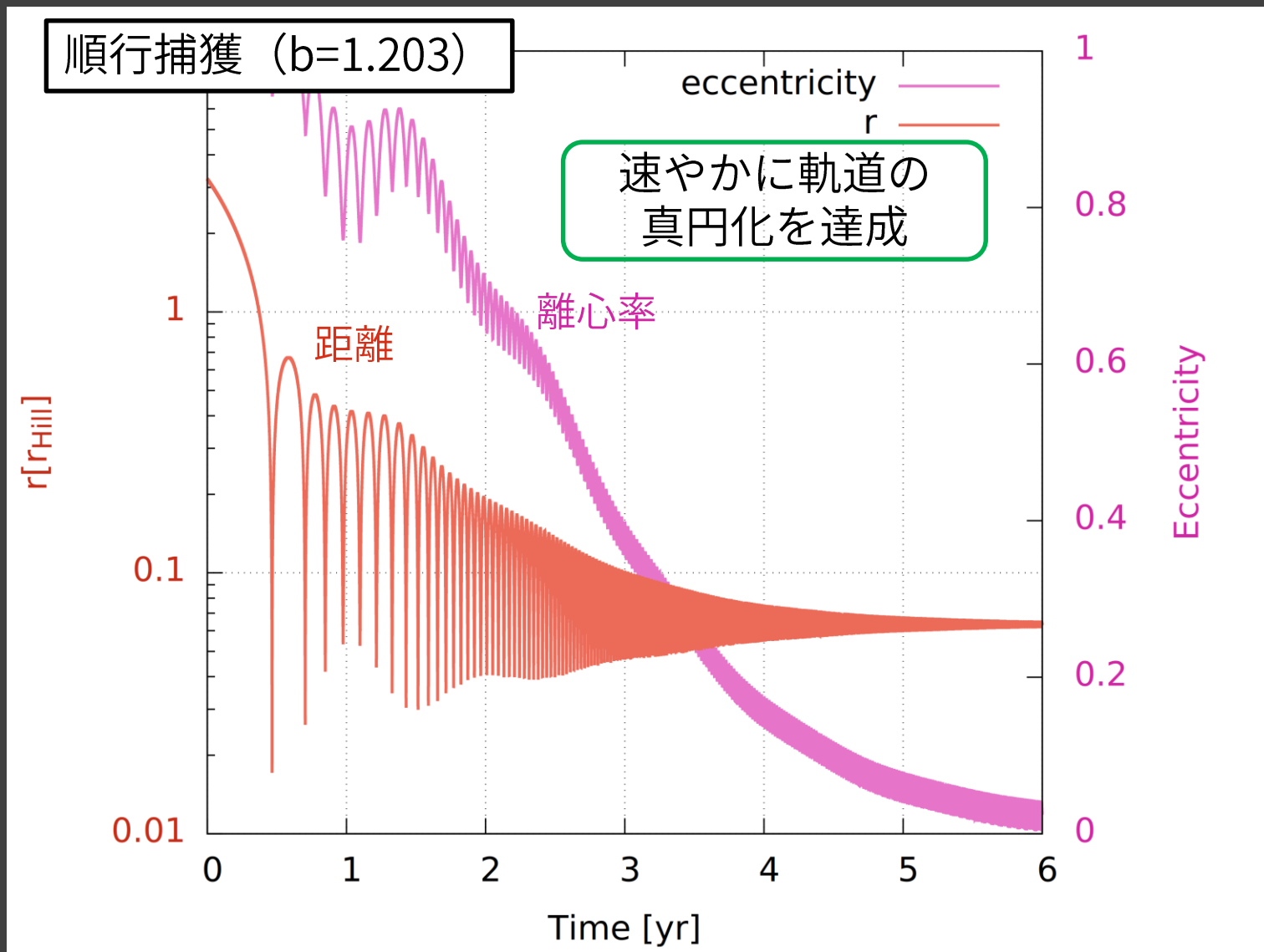


結果（捕獲実験）

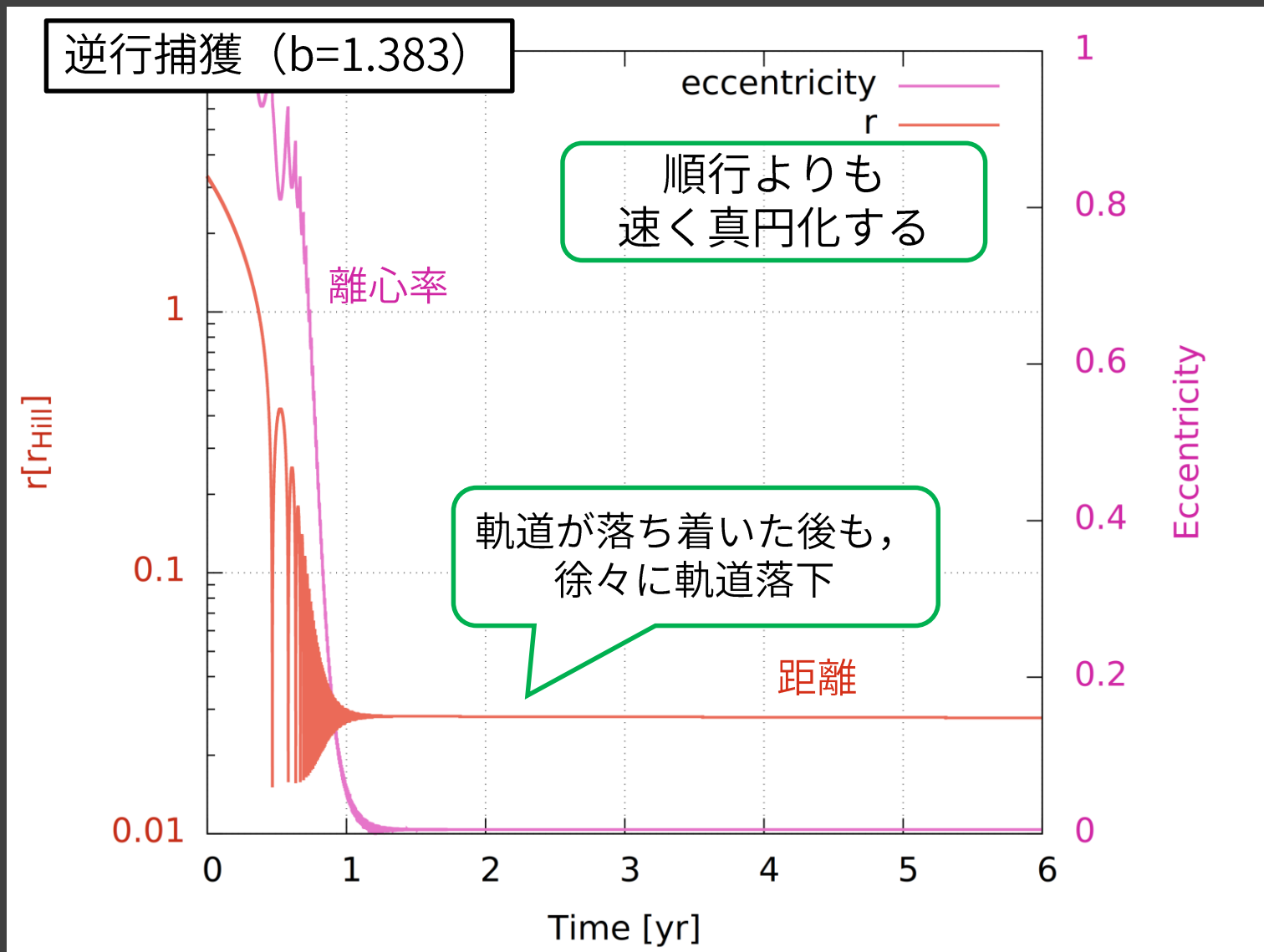


動画：www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~matryo/rigaku/Mthesis

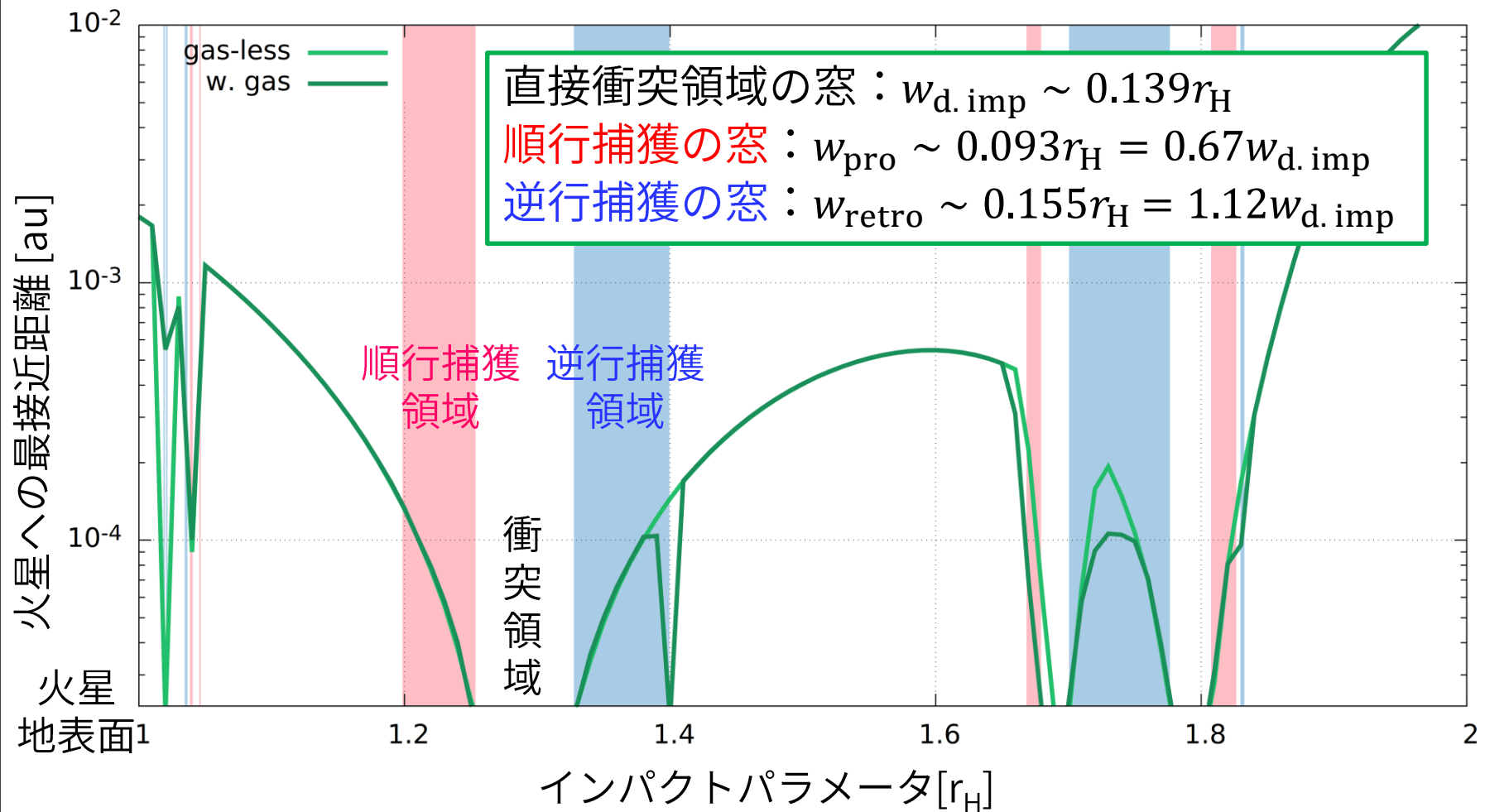
結果（捕獲実験）



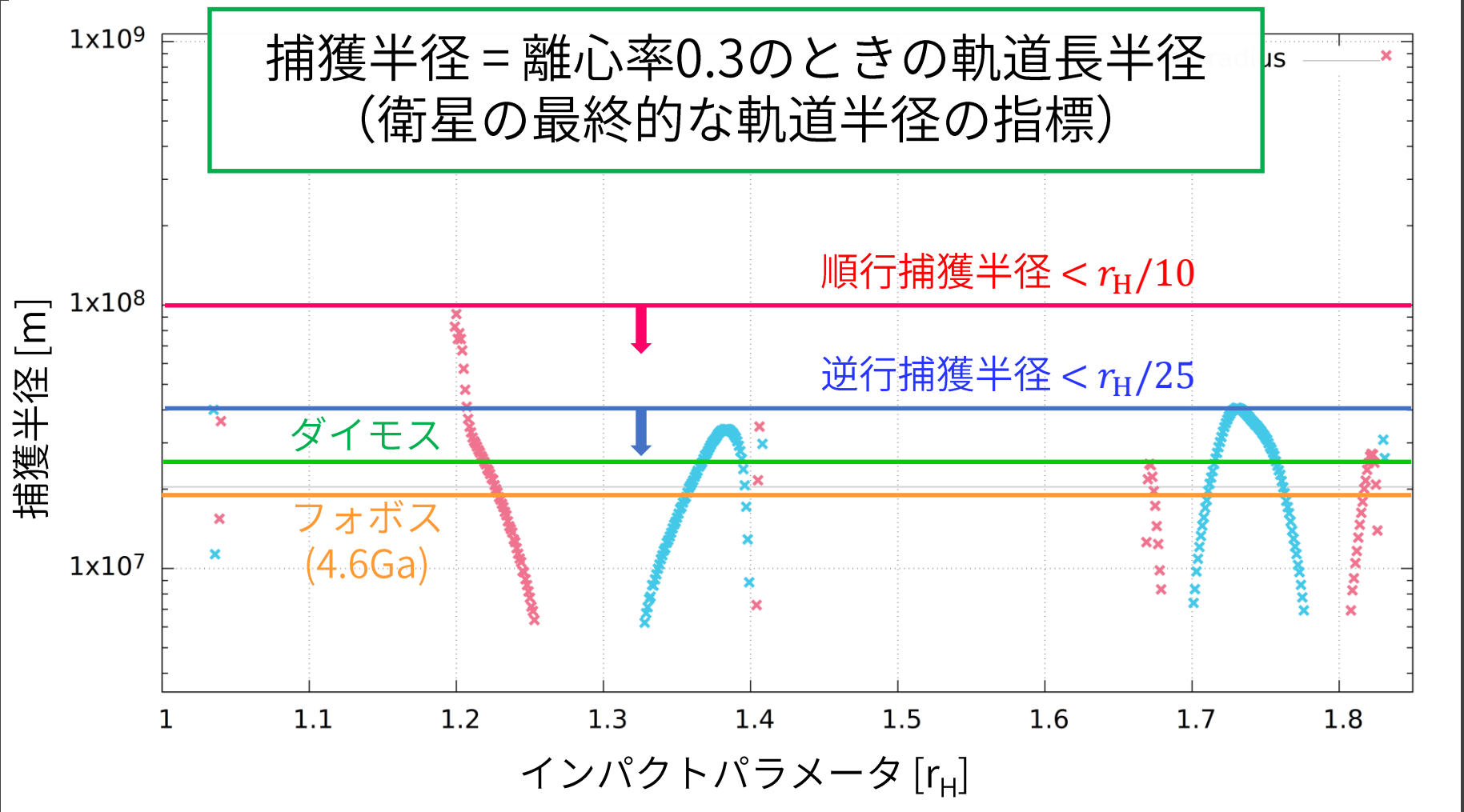
結果（捕獲実験）



結果（捕獲実験：捕獲率）



結果（捕獲実験：捕獲半径）



軌道計算の設定（衛星軌道進化）



- 円盤状大気の下での衛星の傾斜角低下と衛星落下を調べる計算
- 二体問題（火星・衛星），初期離心率は0（初速度は軌道半径で決まる）

$$\ddot{x} = F_{g,x} + F_{D,x}, \quad \ddot{y} = F_{g,y} + F_{D,y}, \quad \ddot{z} = F_{g,z} + F_{D,z}$$

傾斜角進化実験

- 軌道半径 20,060 km（= 5.9 R_M ，内側大気），40,000 km（外側大気）
- 初期傾斜角は2.5～30度まで2.5度毎に与える

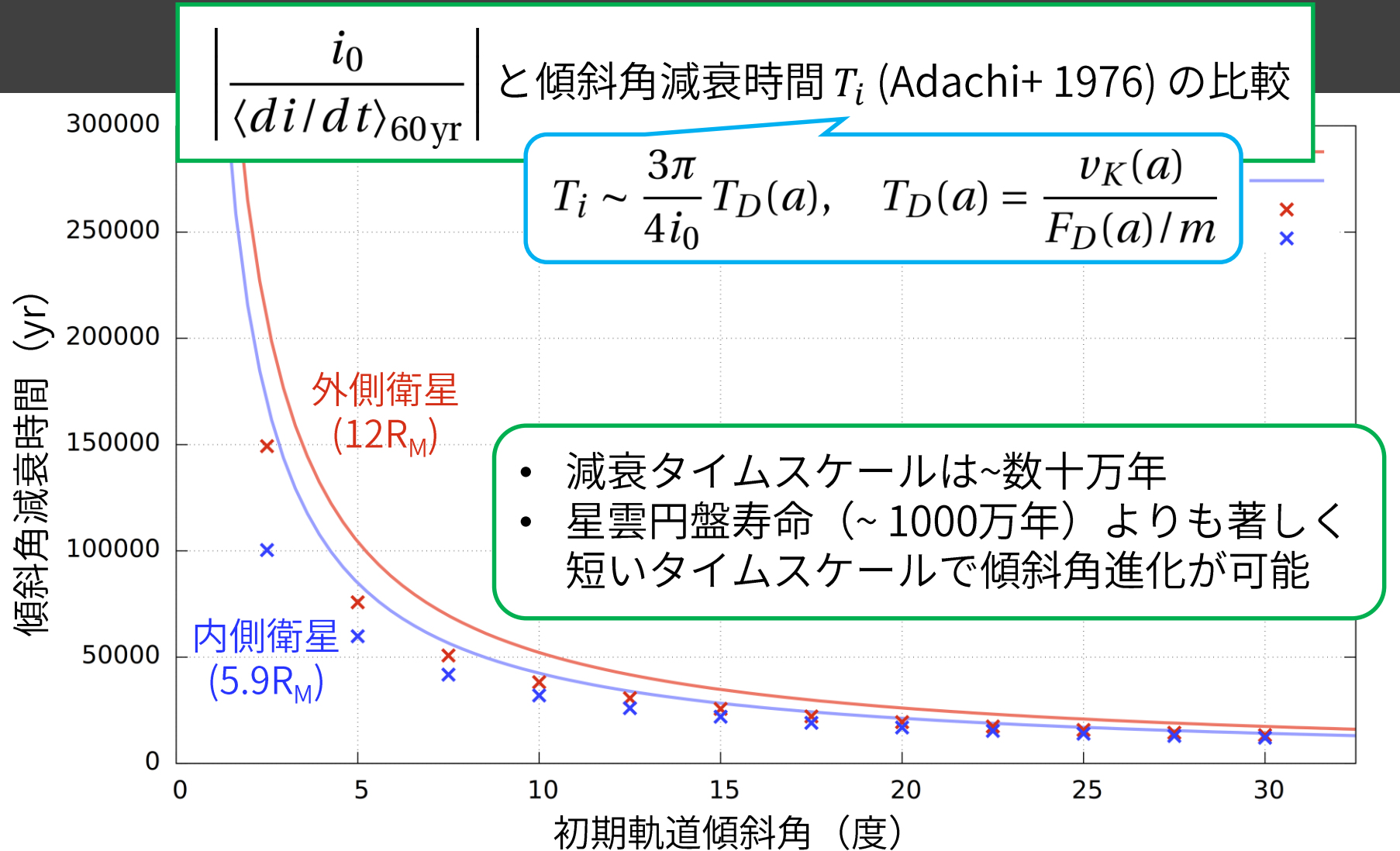
衛星落下実験（逆行衛星）

- 初期軌道半径は 5,000～100万 km（内・外側大気領域を含む）を与える

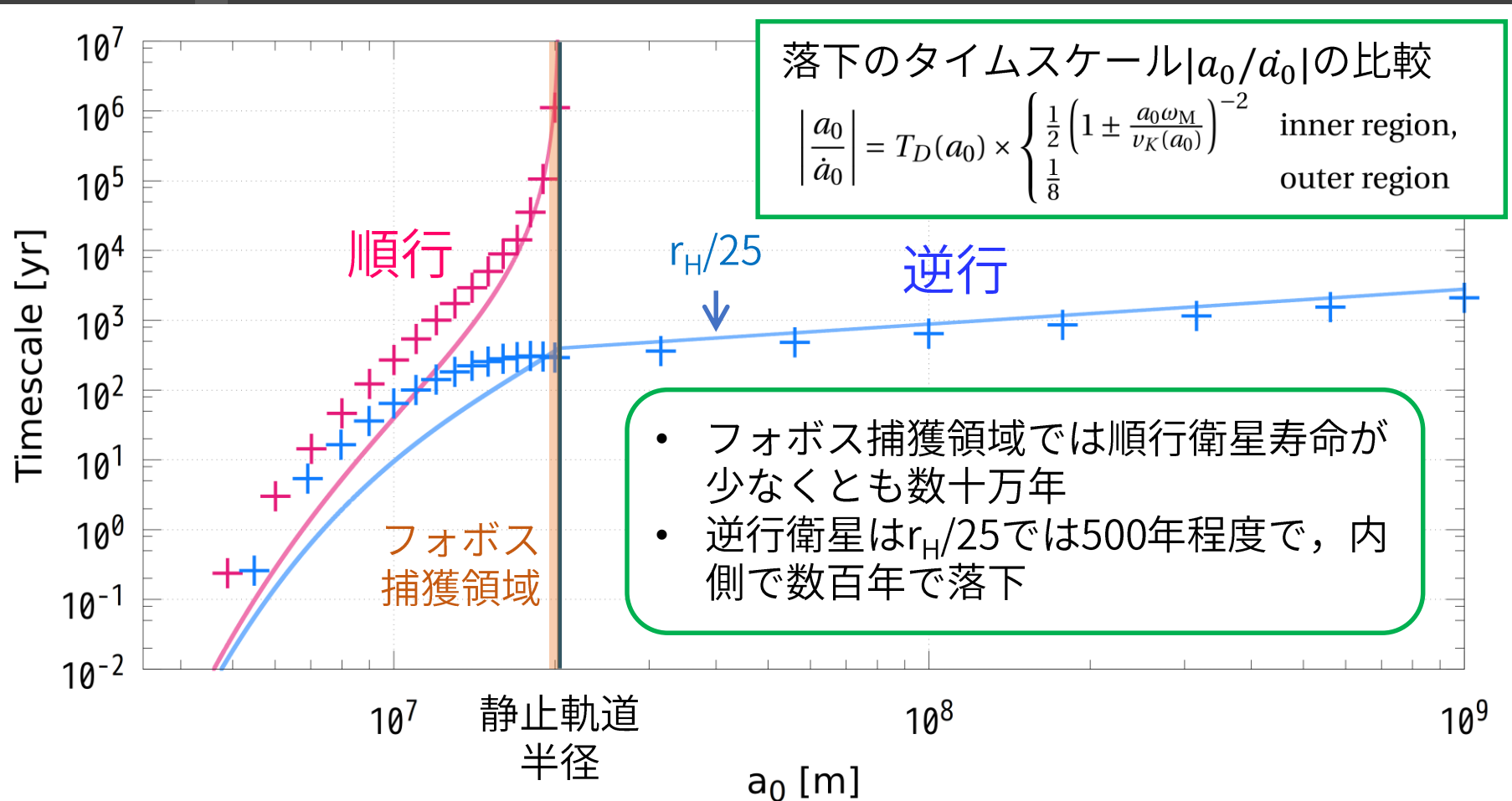
衛星落下実験（順行衛星）

- 初期軌道半径は 5,000～20,000 km（内側大気領域）を与える

結果（軌道進化：傾斜角）



結果（軌道進化：衛星落下）



結果

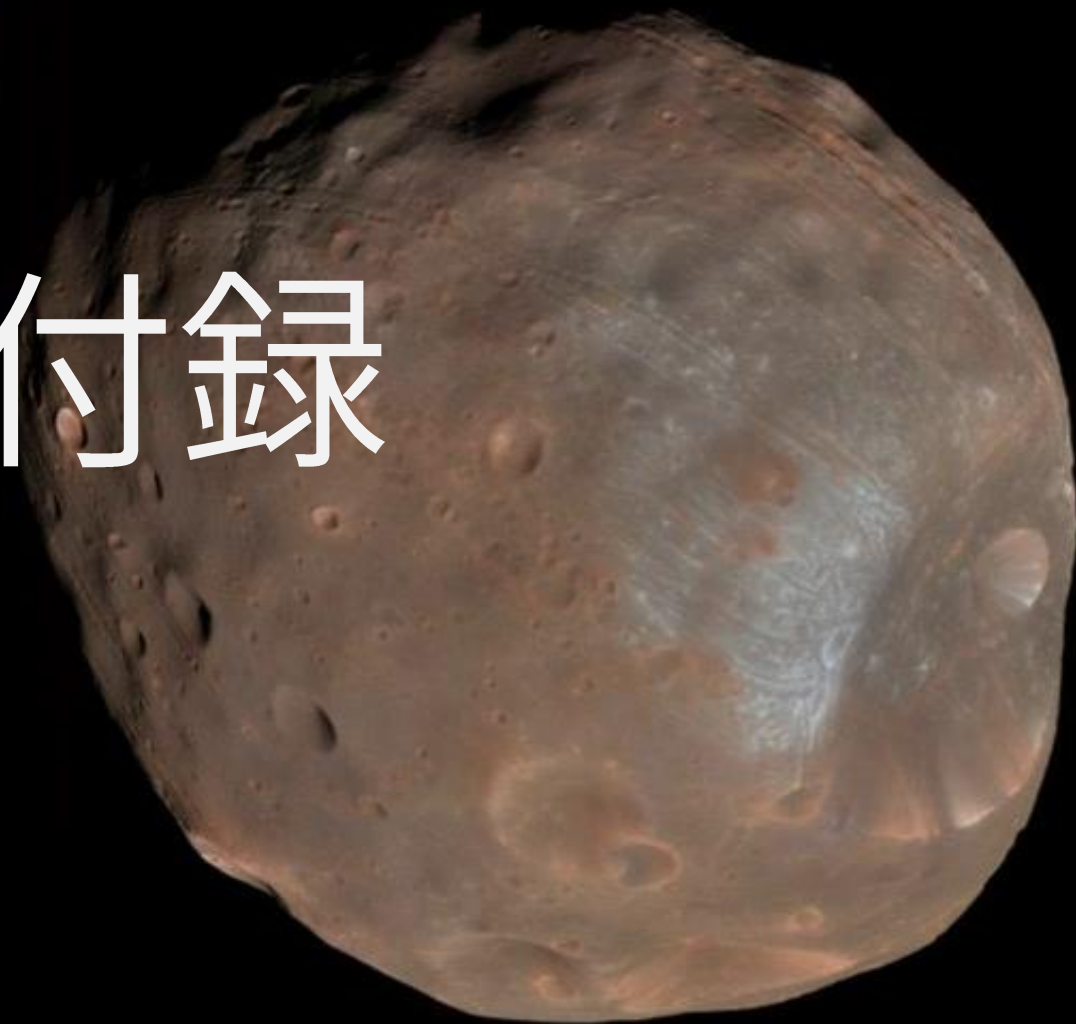
- 順行衛星としての捕獲は、直接衝突と比較してさほど珍しくない (~67%) イベントである。
→ 順行捕獲は可能である。
- 円盤状大気は外側領域・静止軌道近傍の内側領域における衛星落下を抑制する。
- 円盤状大気は離心率と傾斜角の低下を引き起こす。
- 捕獲半径はフォボスとダイモスで想定される位置をカバーする。
→ フォボスとダイモスの軌道特徴を説明。
- 逆行衛星の寿命は、円盤寿命と比較して著しく小さい (< 1000 yr) ことが示唆された。
→ 火星に逆行衛星が存在しないことと調和。

まとめ

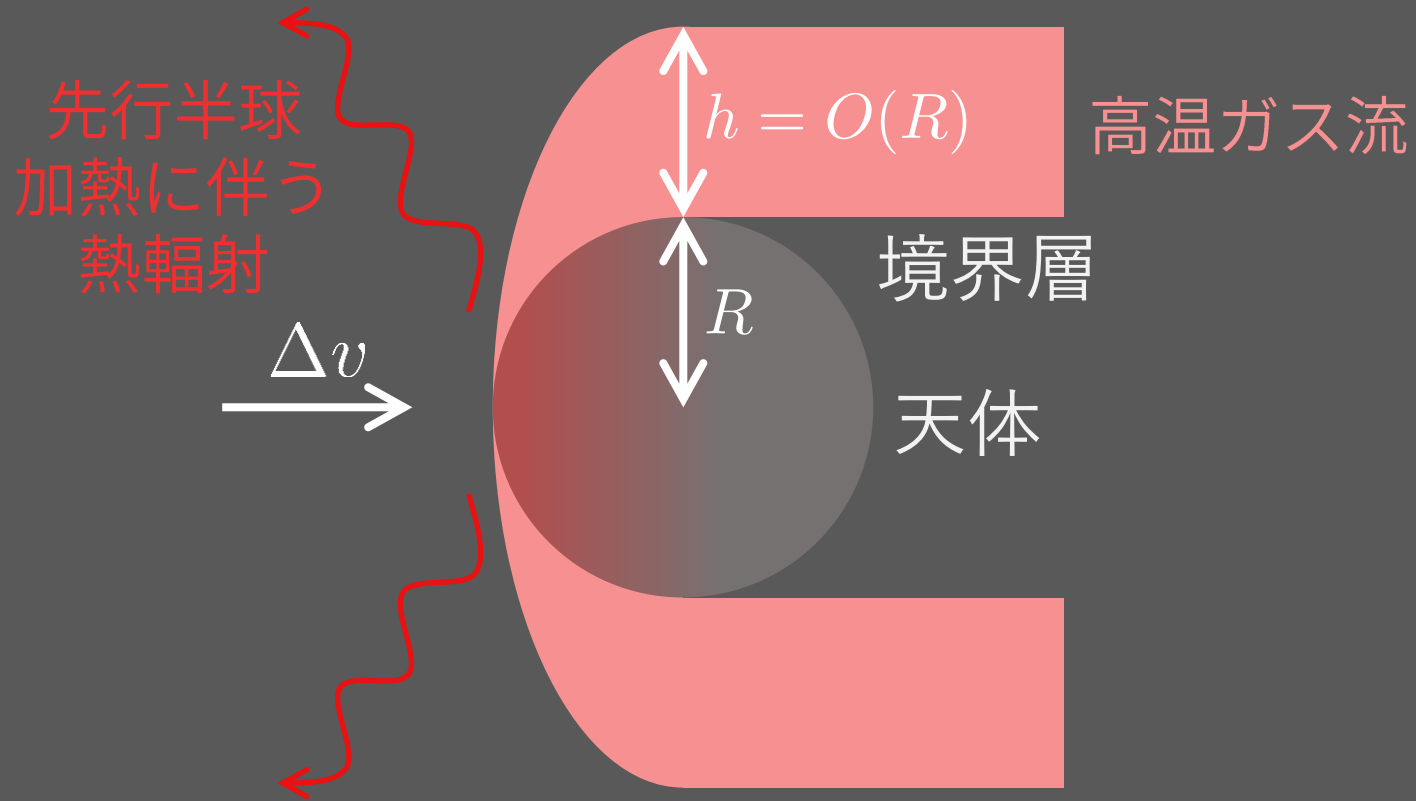
- 衛星の落下の阻害と軌道傾斜角進化が期待できる円盤状大気のモデルを構築した.
- 円盤状大気の下での軌道計算を実施し，捕獲と衛星の軌道進化が起こるかどうかを調べた.
- 円盤状大気が，順行衛星の落下を抑制し，離心率と傾斜角の低下を起こすことを確かめた.
- 捕獲位置と短い傾斜角減衰時間と真円化時間，順行衛星落下の抑制は，現在の火星の衛星の軌道特徴を再現する.
- このような捕獲が起これば，軌道エネルギー散逸に伴う空力加熱の地質学的証拠（水質変成岩体・氷成分の枯渇）が探査で見出せるかもしれない.



付録



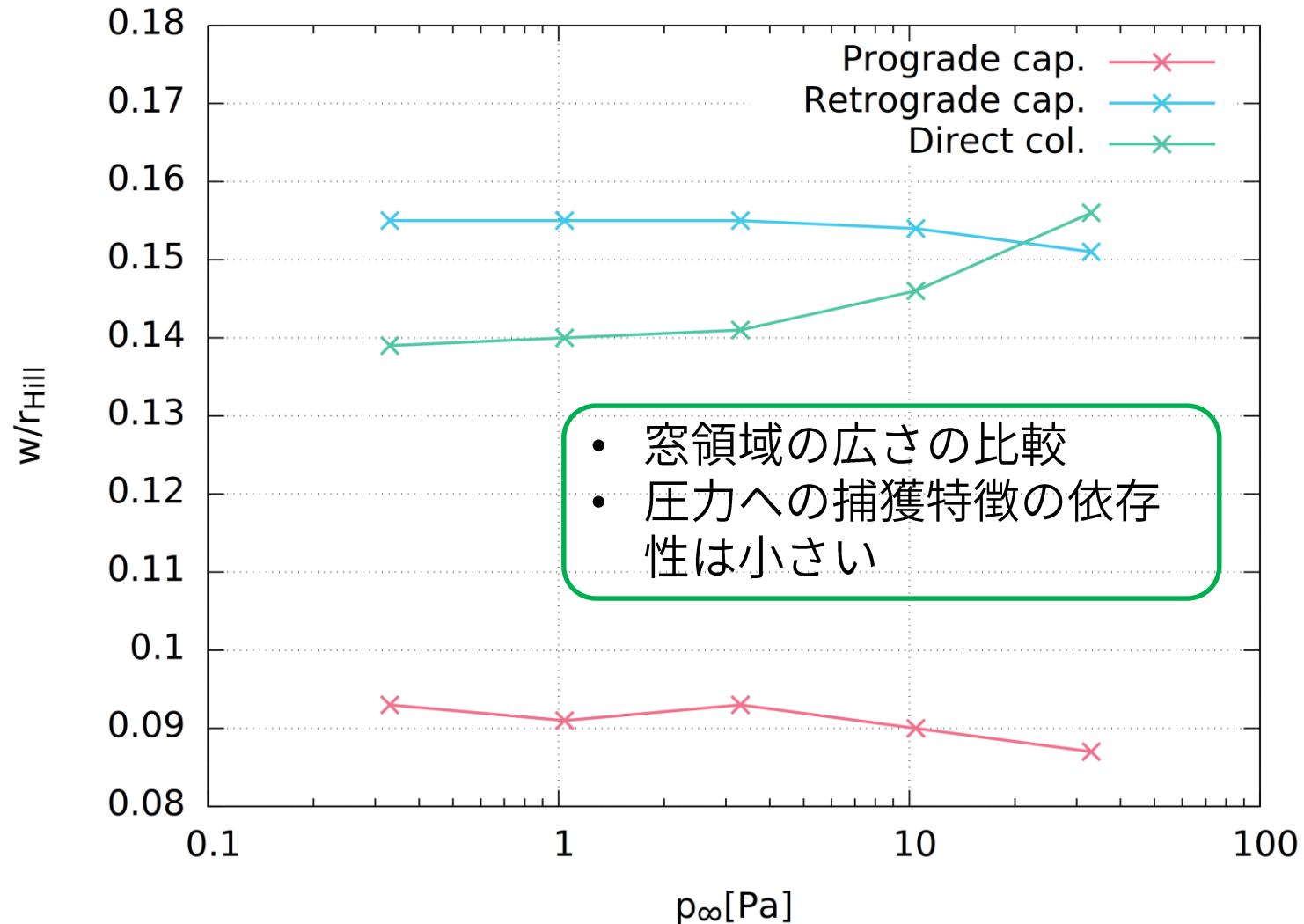
熱収支モデル



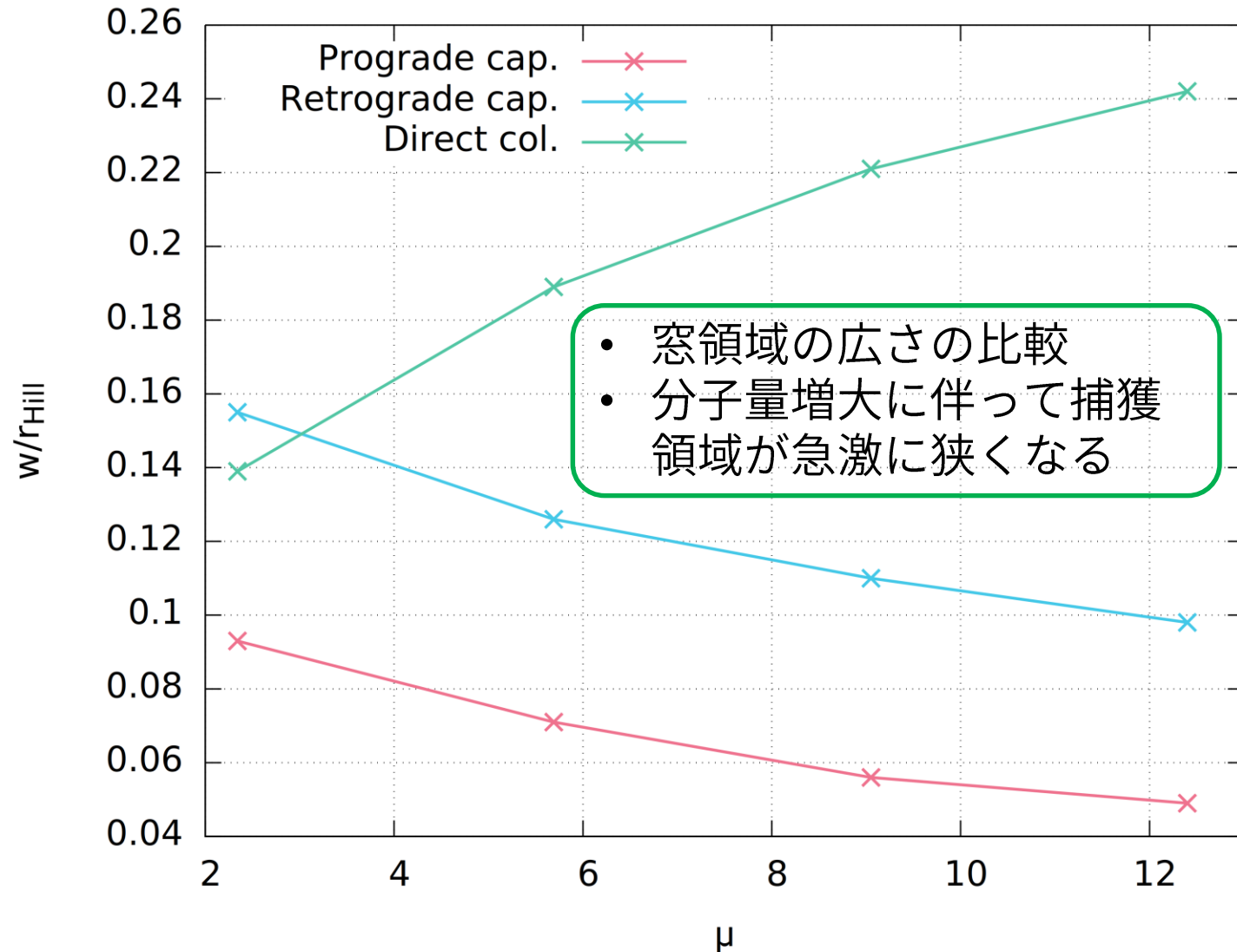
本モデルでは熱輻射の寄与が小さいため無視し，境界層厚を R とすると， H_2 大気内での温度上昇は以下に従う：

$$\Delta T \sim \Delta v^2 \times 1.166 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{kg/J}$$

結果（捕獲実験：円盤パラメータ依存性）



結果（捕獲実験：円盤パラメータ依存性）



結果（捕獲実験：円盤パラメータ依存性）

