小天体周りの
浮遊ダストについて

ダストはどこ(の天体)にでもある

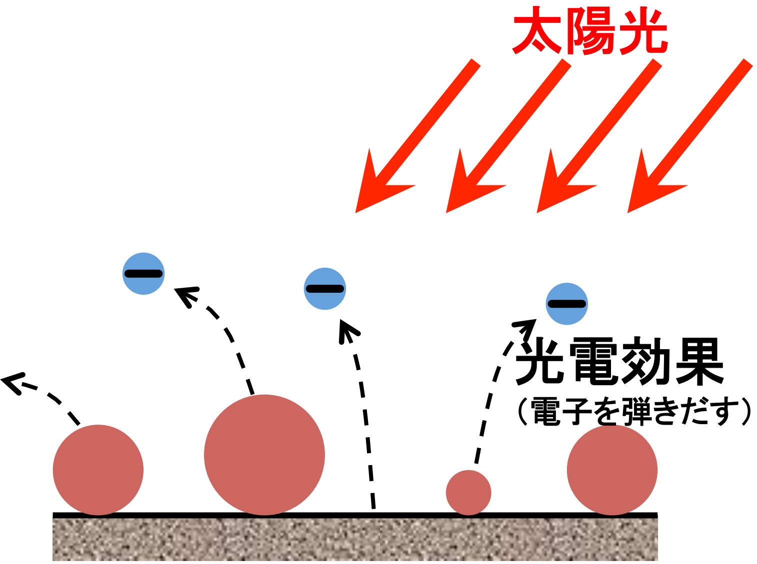
- 小天体上で常に作られている
  - いわゆる天体衝突
  - マイクロインパクトによる岩石の破壊
  - ダストの集積
- 小天体から常に失われている，らしい
  - Itokawaは表面は常に更新されている
  - 惑星間塵の起源のひとつ？
- 失われずとも水平に移動することもある
  - ポンドなどの表層地形
  - 表層付近に浮遊していると衛星本体にとって脅威

ダスト浮遊のメカニズム

小天体は重力が小さいため，何らかのきっかけがあればダストは失われる

- 天体衝突，それに伴う振動やダスト流
- 惑星や太陽の潮汐に伴う破壊や振動
- 自噴（彗星活動）
- 光電効果によるダストの浮遊
- 太陽光圧，太陽風，太陽磁場

光電効果によるダストの浮遊



大気を持たず伝導性が悪い天体の表面が太陽光を受けると，電子がはじき出され，正に帯電する

天体表面の微粒子は地面と反発し，跳び上がる

特徴的なサイズ

＞100µm	動かない
100～10µm	少し跳びあがる
10～1µm	大きく飛びあがる
＜1µm	重力を振り切る

はやぶさ回収試料

ダスト浮遊モデル（Colwell et al., 2005）

- ダストの電荷＝（光電効果）－（電子の再吸収）－（太陽風電子）
- 小天体上空の電場

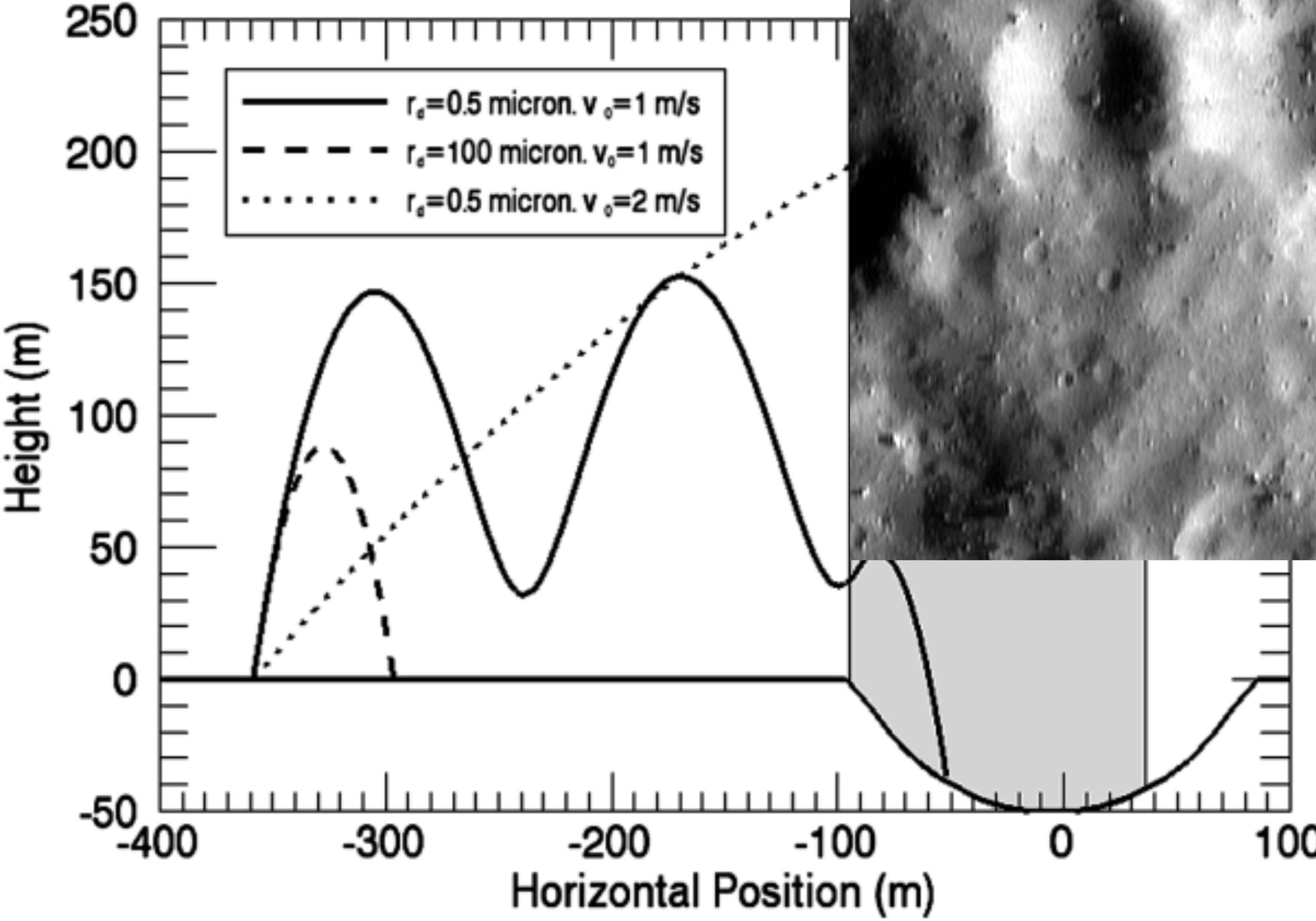
$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad \lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2} \quad \text{Debye length}$$

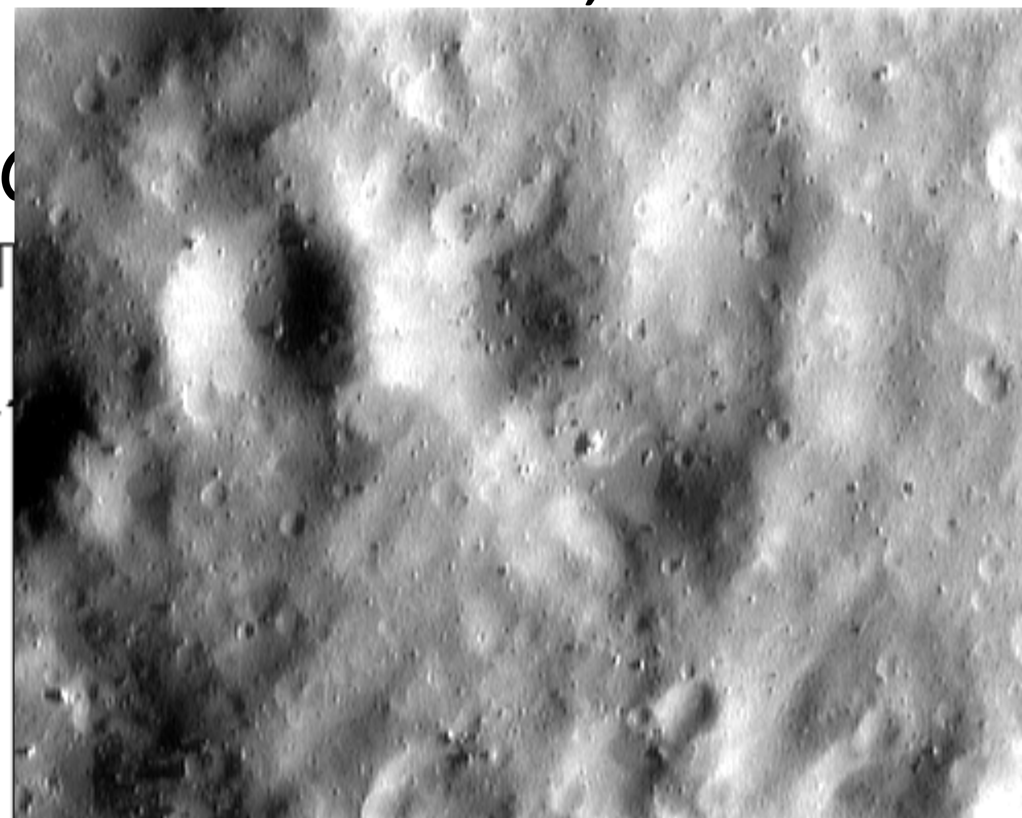
- ダストの運動方程式

$$\frac{du}{dt} = \frac{Q_d}{m_d} E(z) - g(z)$$

ダスト浮遊モデル（Colwell et al., 2005）

- Eros の場合，0.5μm





ダストの運動を記述する方程式群（鉛直1次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d} E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad E_0 = 2\sqrt{2}\,\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{pe} - I_e - I_{sw}$$

特徴的長さ（デバイ長）

$$\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2}$$

ダストの運動を記述する方程式群

（鉛直1次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d}E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad E_0 = 2\sqrt{2}\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{pe} - I_e - I_{sw}$$

特徴的長さ（デバイ長）

$$\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2}$$

太陽紫外線による光電効果

$$I_{pe} = \begin{cases} \pi r_d^2 e I_{ph0} & \text{for } \phi_\mathrm{d} \le 0 \\ \pi r_d^2 e I_{ph0} \exp\left(\dfrac{-e\phi_d}{k_B T_{pe}}\right) & \text{for } \phi_\mathrm{d} > 0 \end{cases}$$

粒子の電荷と電位の関係

$$\phi_d = 4\pi\varepsilon_0 r Q$$

光電効果による電流と光電電子のエネルギー

$$I_{ph0} = \int_0^{\lambda_1} F(\lambda)\chi(\lambda)d\lambda \sim 2.8\times10^{13}\left(\frac{d}{1\mathrm{AU}}\right)^{-2} [\text{電子}/\mathrm{m^2s}]$$

$k_B T_{pe} \sim 2.2\ \mathrm{eV}$ (for lunar regolith by Willis et al., 1973)

ダストの運動を記述する方程式群
（鉛直1次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d}E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad E_0 = 2\sqrt{2}\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{pe} - I_e - \boxed{I_{sw}}$$

特徴的長さ（デバイ長）

$$\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \big/ n_{pe,0} e^2}$$

太陽風電子の打ち込み

$$I_{sw} = \begin{cases} \pi r_d^2 e n_{sw} \sqrt{\dfrac{8k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \exp\left(\dfrac{e\phi_d}{k_B T_{sw}}\right) & \text{for } \phi_\mathrm{d} \le 0 \\ \pi r_d^2 e n_{sw} \sqrt{\dfrac{8k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \left(1 + \dfrac{e\phi_d}{k_B T_{sw}}\right) & \text{for } \phi_\mathrm{d} > 0 \end{cases}$$

粒子の電荷と電位の関係

$$\phi_d = 4\pi\varepsilon_0 r Q$$

太陽風電子のエネルギーと密度

$$k_B T_{sw} \sim 10\ \mathrm{eV}$$

$$n_{sw} \sim 5\times10^6 \left(\frac{d}{1\mathrm{AU}}\right)^{-2} 個/\mathrm{m}^3$$

(e.g., Mendis et al., 1981)

ダストの運動を記述する方程式群
（鉛直１次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d} E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad E_0 = 2\sqrt{2}\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{pe} - I_e - I_{sw}$$

特徴的長さ(デバイ長)

$$\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2}$$

光電電子の再撃ち込み

$$I_e = \begin{cases} \pi r_d^2 e n_{pe} \sqrt{\dfrac{8 k_B T_{pe}}{\pi m_e}} \exp\left(\dfrac{e\phi_d}{k_B T_{pe}}\right) & \text{for } \phi_d \le 0 \\ \pi r_d^2 e n_{pe} \sqrt{\dfrac{8 k_B T_{pe}}{\pi m_e}} \left(1 + \dfrac{e\phi_d}{k_B T_{pe}}\right) & \text{for } \phi_d > 0 \end{cases}$$

粒子の電荷と電位の関係

$$\phi_d = 4\pi\varepsilon_0 r Q$$

光電電子のエネルギーと密度

$k_B T_{pe} \sim 2.2\ \mathrm{eV}$ (for lunar regolith by Willis et al., 1973)

$$n_{pe} = n_{pe,0}\left(1 + z \Big/ \left(\sqrt{2}\lambda_D\right)\right)^{-2} \qquad n_{pe,0} = 2 I_{ph0} \sin(i_s) / v_{pe} \qquad v_{pe} \sim 8.8 \times 10^5\ \mathrm{m/s}$$

ダストの運動を記述する方程式群
（鉛直1次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d} E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad E_0 = 2\sqrt{2}\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = \boxed{I_{pe}} - I_e - \boxed{I_{sw}}$$

特徴的長さ（デバイ長）

$$\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2}$$

光電効果と太陽風電子の打ち込みがバランスする場合

$$\pi r_d{}^2 e I_{ph0} \exp\left(\frac{-e\phi_d}{k_B T_{pe}}\right) = \pi r_d{}^2 e n_{sw} \sqrt{\frac{8 k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{e\phi_d}{k_B T_{sw}}\right)$$

$I_{ph,0}$とn_{sw}は共に日心距離の2乗に逆比例する

→ϕ_dは太陽からの距離に依らず一定（1.78V）

地表面電位Φは次のバランスで決まる

$$I_{ph0} \exp\left(\frac{-e\Phi_s}{k_B T_{pe}}\right) = n_{sw} \sqrt{\frac{k_B T_{sw}}{2\pi m_e}} \left(1 + \frac{e\Phi_s}{k_B T_{sw}}\right)$$

→Φ_s=4.39V

ダストの運動を記述する方程式群（鉛直1次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d} E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad E_0 = 2\sqrt{2}\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = \boxed{I_{pe}} - \boxed{I_e} - I_{sw}$$

特徴的長さ（デバイ長）

$$\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2}$$

光電効果と光電電子の打ち込みがバランスする場合

$$\pi r_d^{\,2} e I_{ph0} = \pi r_d^{\,2} e n_{pe,0} \sqrt{\frac{8 k_B T_{pe}}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{e\phi_d}{k_B T_{pe}}\right) \quad \text{at surface}$$

$n_{pe,0}$は$I_{ph,0}$に比例する　$n_{pe,0} = 2 I_{ph0} \sin(i_s) / v_{pe}$

→ϕ_dは太陽からの距離に依らず一定（-1.79V）

実際には，太陽風電子の打ち込みもあるため，ダストの電位は -2.55V から1.78Vの間で変化する

ダストの運動を記述する方程式群
（鉛直1次元モデル）

運動方程式

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{Q_d}{m_d}E(z) - g(z)$$

電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad \boxed{E_0} = 2\sqrt{2}\frac{\Phi_s}{\lambda_D}$$

粒子の電荷

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{pe} - I_e - I_{sw}$$

特徴的長さ（デバイ長）

$$\boxed{\lambda_D} = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \big/ n_{pe,0} e^2}$$

デバイ長の日心距離依存性

$n_{pe,0}$は$I_{ph,0}$に比例し，日心距離の２乗に逆比例する

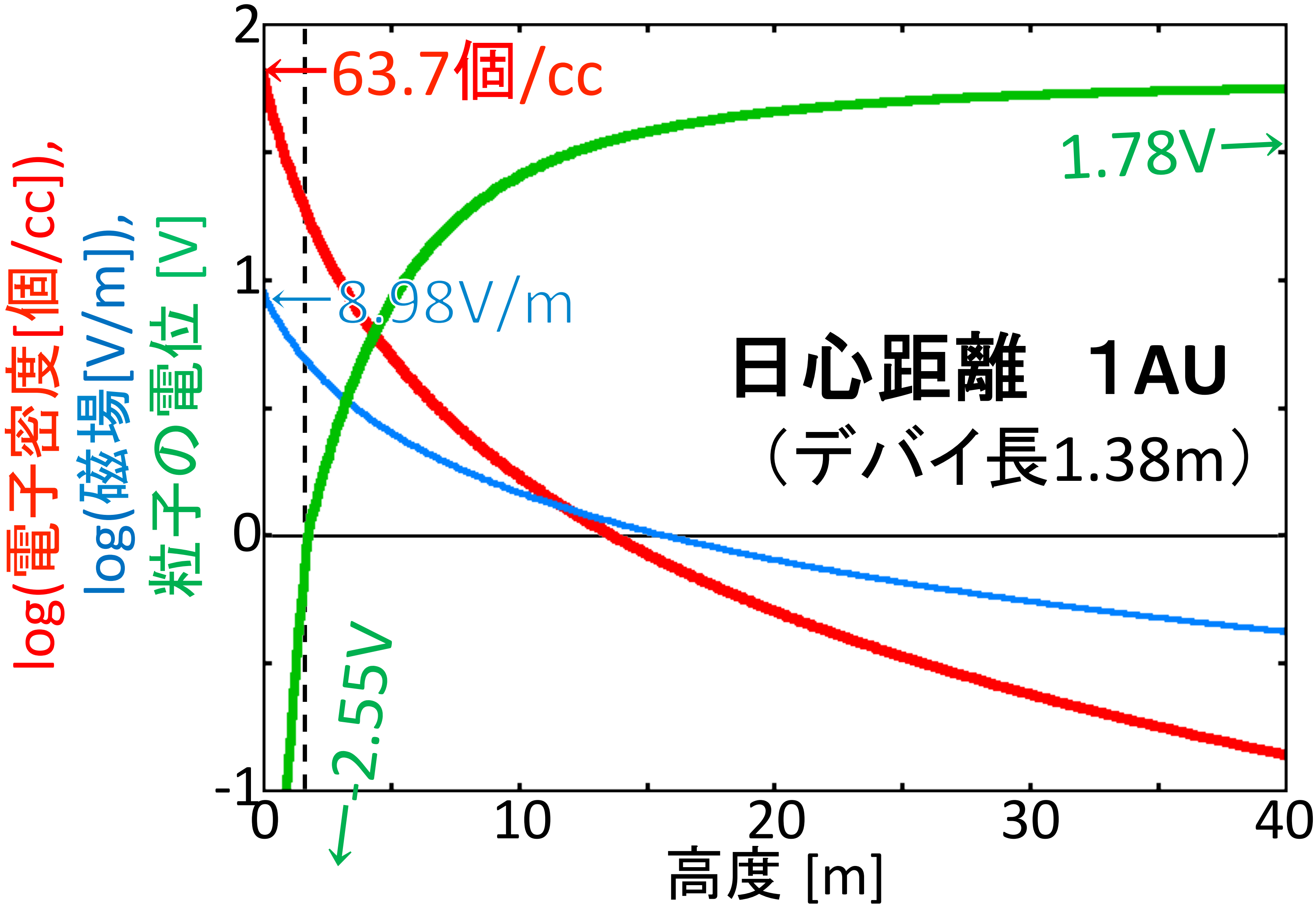
→デバイ長は太陽からの距離に比例する

$$\lambda_D = 1.38 \times \left(\frac{d}{1\mathrm{AU}}\right) \ [\mathrm{m}]$$

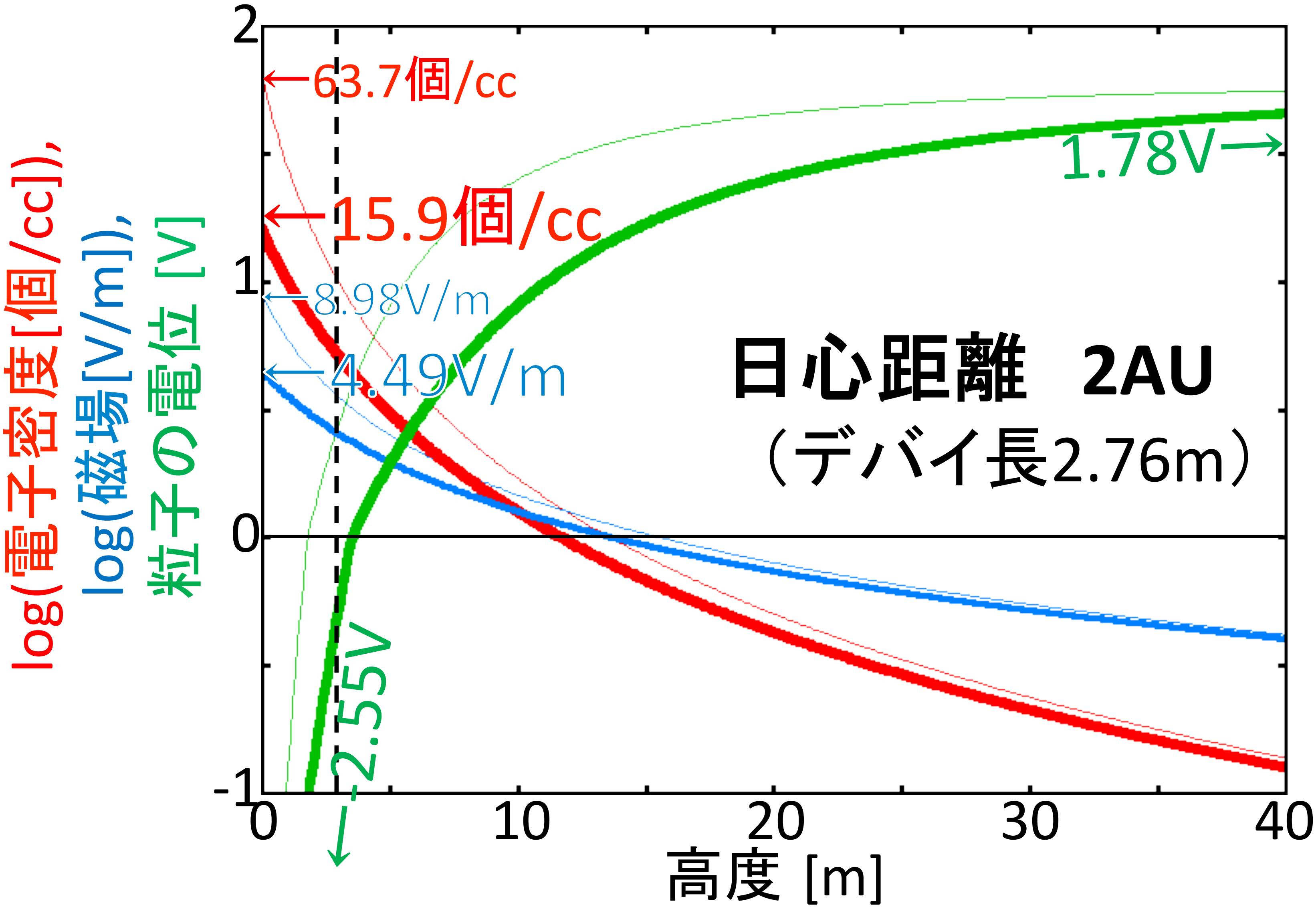
→天体表面での電場強度は日心距離に反比例する

$$E_0 = 9.00 \times \left(\frac{d}{1\mathrm{AU}}\right)^{-1} \ [\mathrm{V/m}]$$

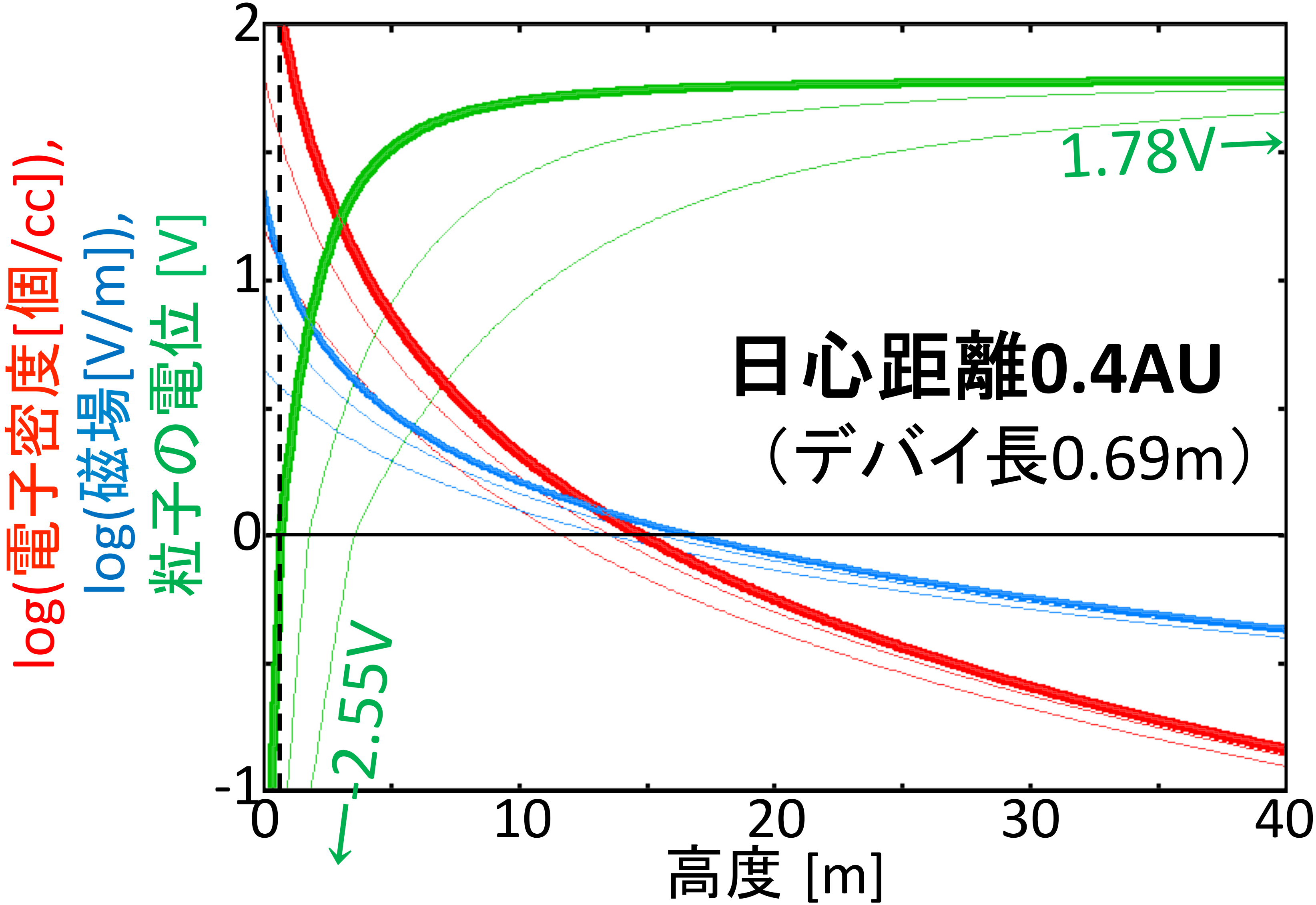
天体上空での磁場の強さや粒子の電位



天体上空での磁場の強さや粒子の電位



天体上空での磁場の強さや粒子の電位



ダスト浮遊モデル（Colwell et al., 2005）

- ダストの電荷＝
（光電効果）－（電子の再吸収）－（太陽風電子）
- 小天体上空の電場

$$E(z) = E_0 \Big/ \left(1 + z \Big/ \sqrt{2}\lambda_D\right) \qquad \lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 k_B T_{pe} \Big/ n_{pe,0} e^2} \quad \text{Debye length}$$

- ダストの運動方程式

$$\frac{du}{dt} = \frac{Q_d}{m_d} E(z) - g(z)$$

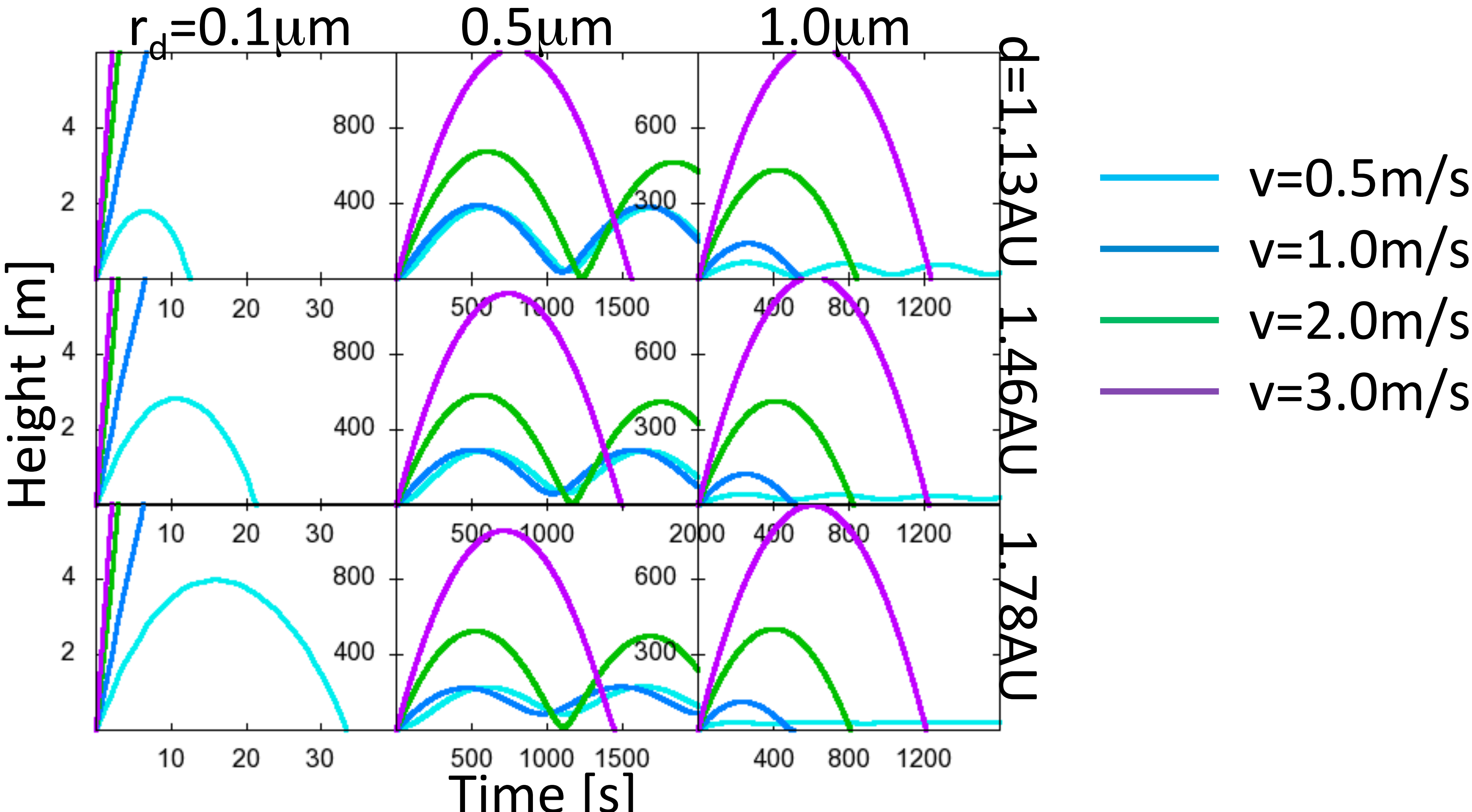
以上は微分系。解くには初期条件と境界条件が必要

- 初期条件（速度）はよくわからない
- 境界条件（光電効果の効率）も実はよくわかっていない

EROS の場合

軌道長半径1.458AU，離心率0.223

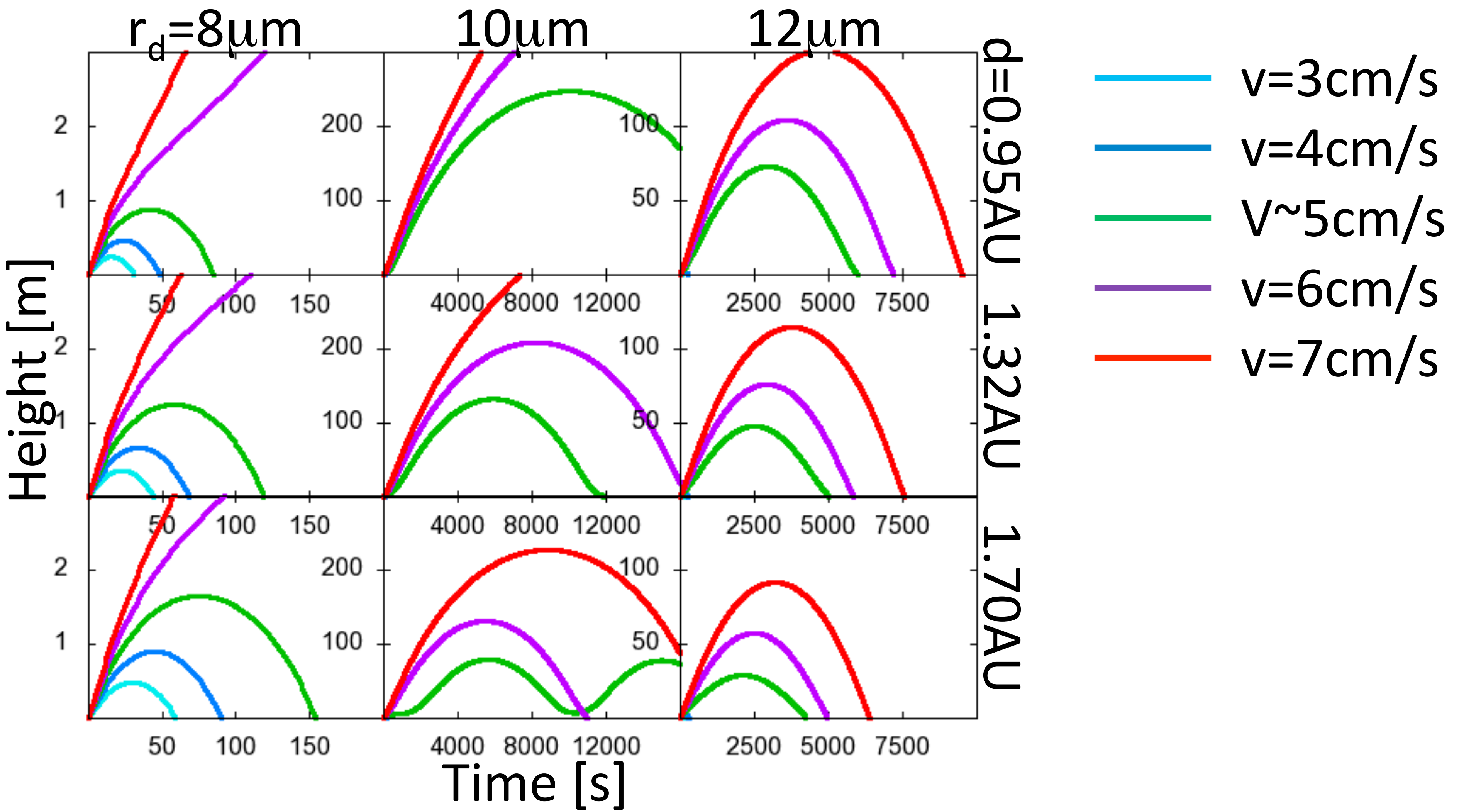
天体半径　11200m，表面重力加速度 0.0059m/s^2



ITOKAWA の場合

軌道長半径1.1324AU，離心率0.28

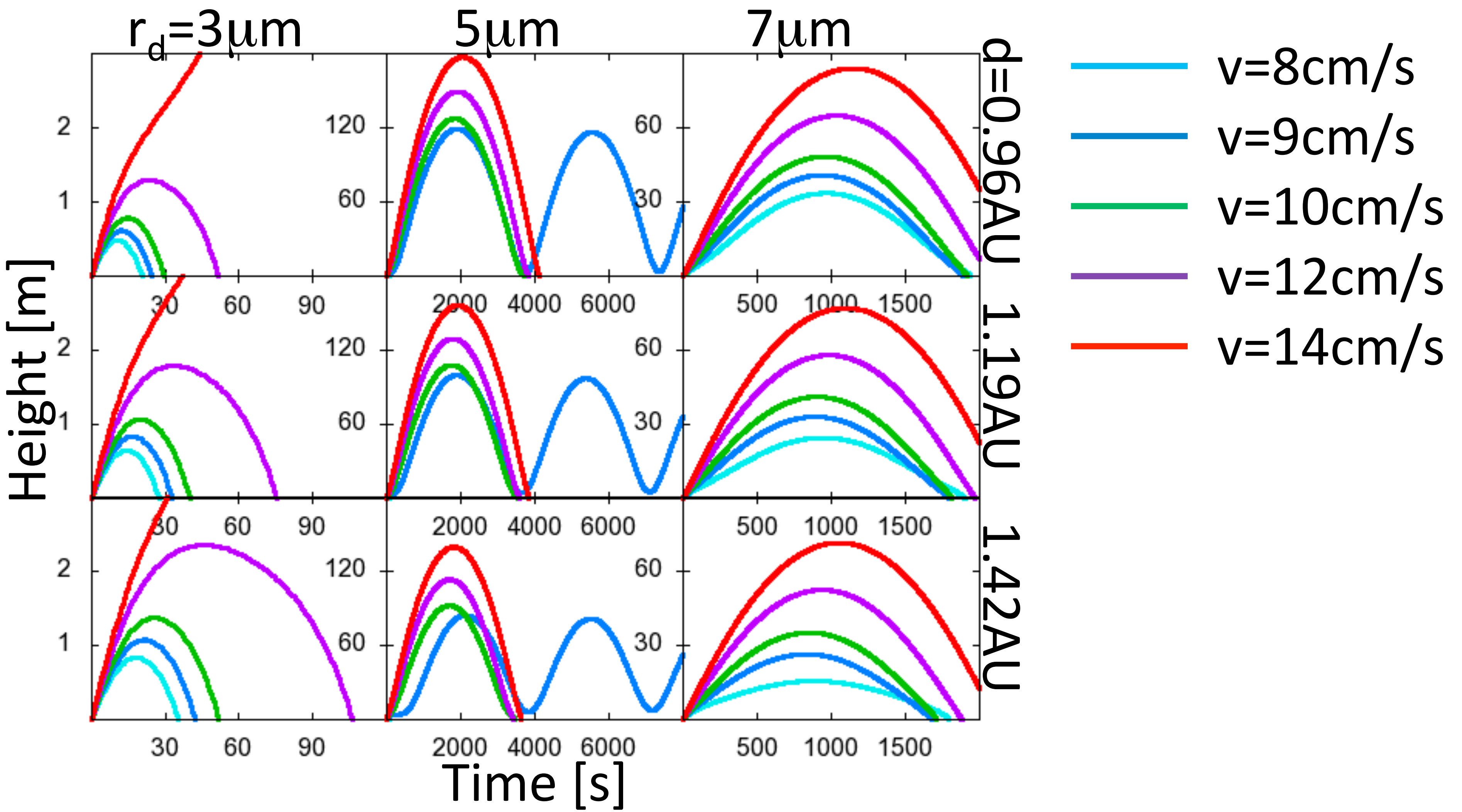
天体半径　　165m，表面重力加速度 0.00008m/s^2



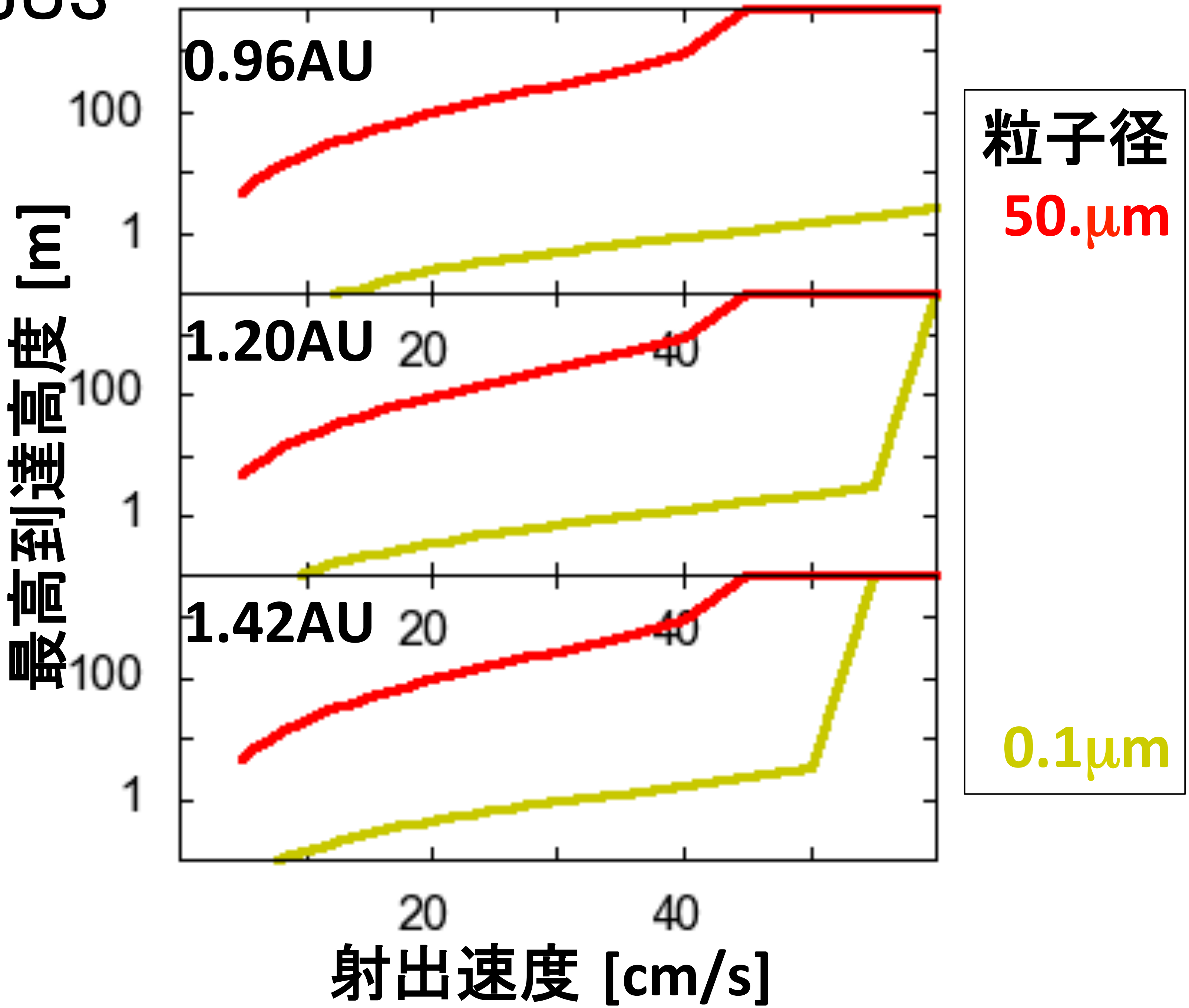
1999JU3の場合

軌道長半径1.189AU，離心率0.190

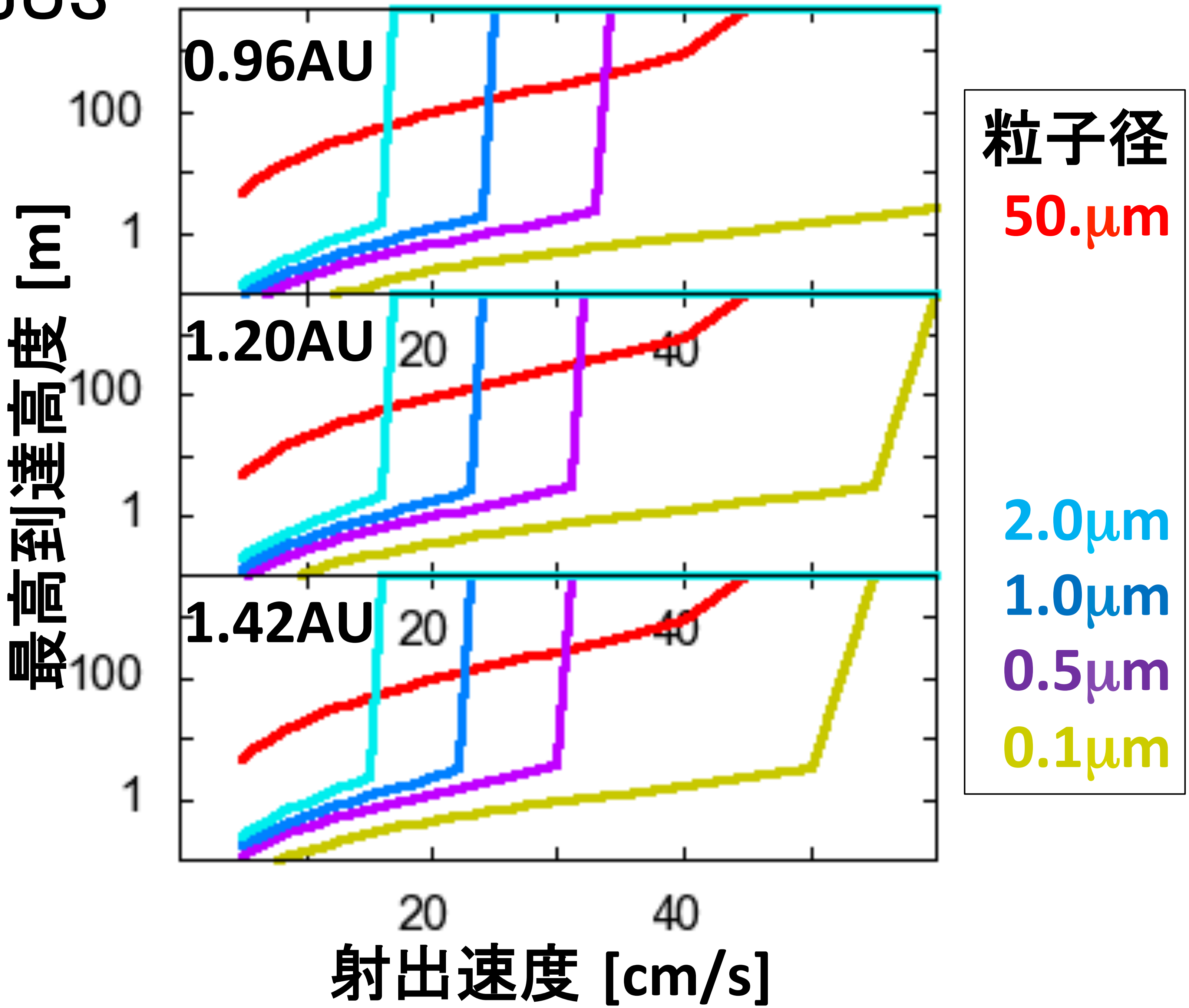
天体半径　　461m，表面重力加速度 0.00029m/s^2



1999JU3
の場合

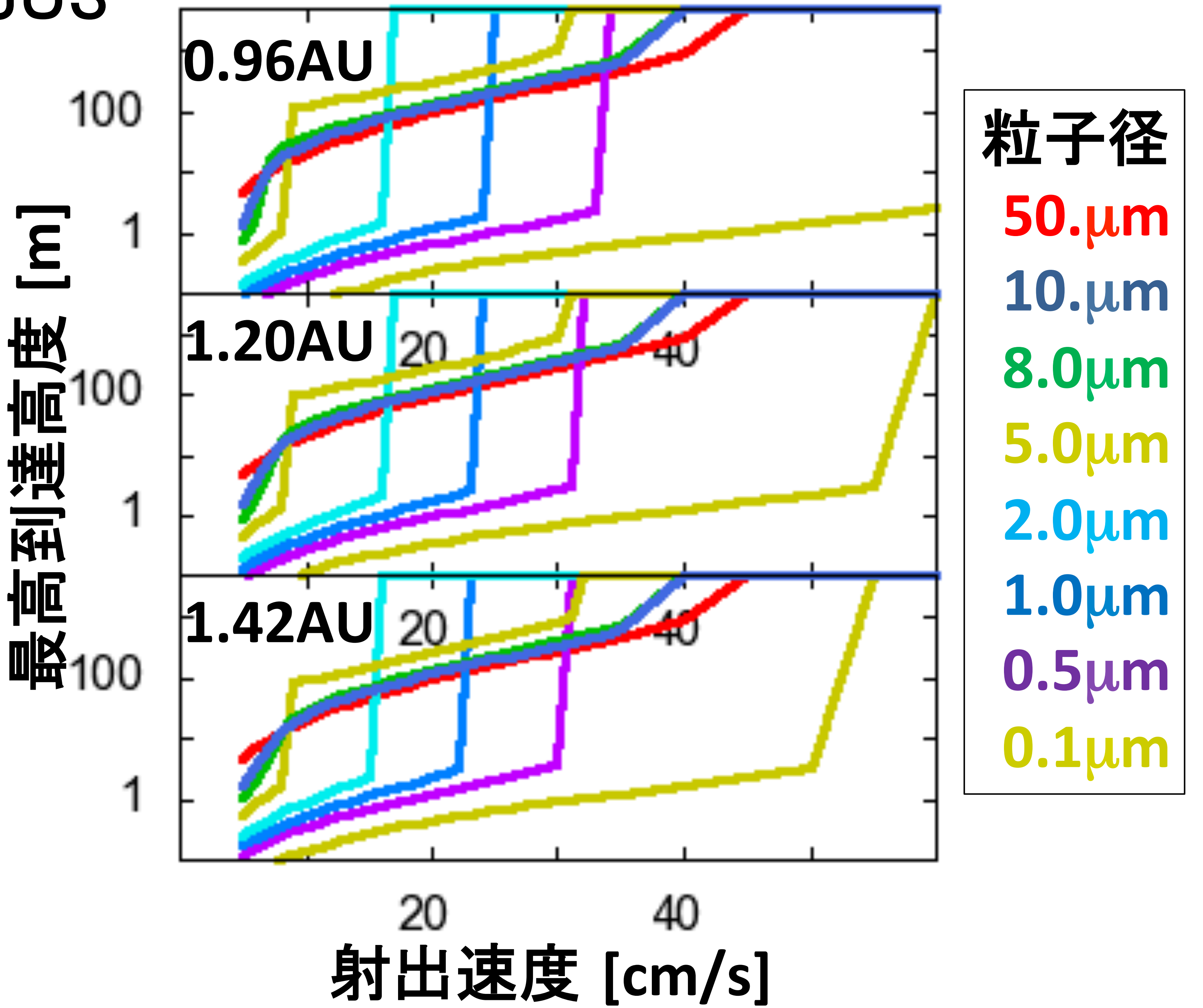


1999JU3
の場合



最高到達高度 [m]
0.96AU
1.20AU
1.42AU
100
1
20
40
射出速度 [cm/s]
粒子径
50.μm
2.0μm
1.0μm
0.5μm
0.1μm

1999JU3
の場合



0.96AU
1.20AU
1.42AU
100
1
20
40
最高到達高度 [m]
射出速度 [cm/s]
粒子径
50.μm
10.μm
8.0μm
5.0μm
2.0μm
1.0μm
0.5μm
0.1μm

議論

- 地表面電位は，太陽からの距離に依らない
  - 紫外線，太陽風ともに距離の2乗で減衰するため両者がバランスする電位は距離に依らない
- デバイ長は太陽からの距離に比例する
  - 光電効果で放出される電子の運動量は太陽からの距離に依存するため，構造が変化する
- ダストの運動は，デバイ長を越えられるか否かで決まる
  - デバイ長を越えられないダストは落下する
  - デバイ長を越えられたダストの運動パターンは，以下の3種類に分類される
    - ✓ 放物軌道で落下
    - ✓ 上空で振動し長時間浮遊し続ける
    - ✓ 重力を振り切って脱出

議論

- ダストの運動は，デバイ長を越えられるか否かで決まる
  - デバイ長を越えられないダストは落下する
    - ✓ プラズマ電子の再吸収で負に帯電するため，加速的に地面に落下する
  - デバイ長を越えられたダストの運動パターンは，以下の3種類に分類される
    - ✓ 放物軌道で落下
      - 重力が強い場合
      - 落下速度が速すぎて戻れない場合
    - ✓ 上空で振動し長時間浮遊し続ける
      - 重力と，地表面との電気的反発がバランスする場合
    - ✓ 重力を振り切って脱出
      - 電気的反発が重力に勝る場合
      - IDPの起源になるのではないか

議論

- ダストの運動の違いは，重力と日心距離の違いを反映
    - Eros は重力が強く，太陽から遠い
    - Itokawaは天体サイズが小さいので重力が小さく，重力加速度の減衰も早い
    - 1999JU3はErosとItokawaの中間的性質を持つ（？）
    - 天体のサイズ･位置とラフネスに関係がありそう
- **脱出速度がわからない**

  →実験･観測などで押さえる必要

観測方法

- ダストの射出速度がわからない（ので知りたい）
  - ただし，射出速度は一意に決まらないだろう
    - そもそも初期電荷が何で決まるのか（静電気，光電効果，破壊…）は，まだよくわかっていない
- 地表面に残されているダストのサイズ分布を測る
  - どこまで小さなダストが残されているのか
- **IDPのサイズ分布を測る**
  - **小惑星のサイズ分布との関係**
- 上空のダストの分布を測る
  - サイズ毎の高度分布または運動量分布
  - ある高度に存在する確率は，モデルから計算可能
  - 観測値と計算結果との比較
  - LIDAR観測ができれば望ましいが，視野を横切る光線を射出し，反射光の分布を見るのでも良い