

ダストの合体成長による 周惑星円盤内での微衛星形成

芝池諭人¹, 奥住聡¹, 佐々木貴教², 井田茂¹

(1. 東京工業大学, 2, 京都大学)

衛星系研究会 2017/1/26

太陽系内の衛星



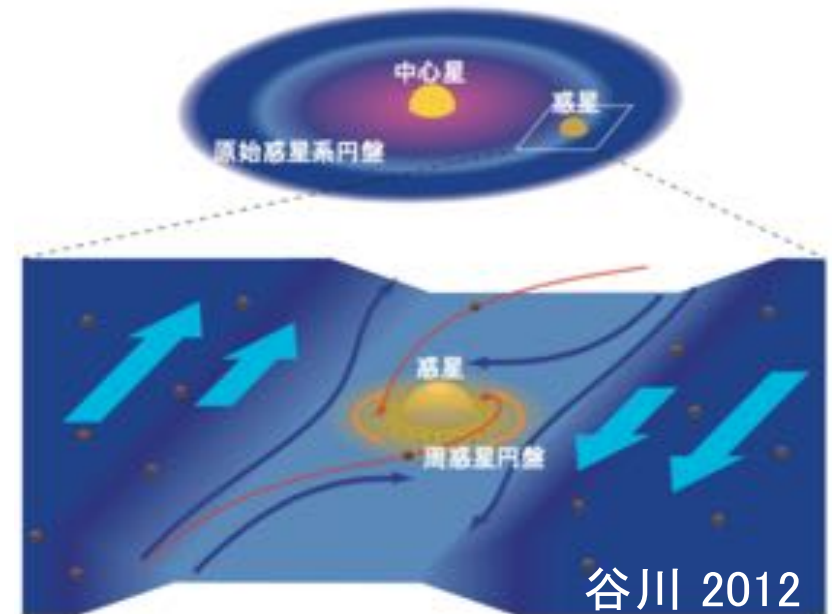
- 氷と岩石からなる。
- 同じ軌道面に並んでいる



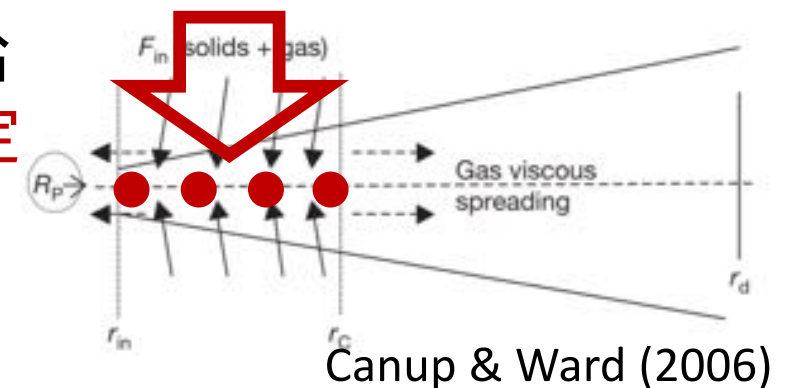
周惑星円盤でできた

周惑星円盤での衛星形成

- 木星型惑星に集積するガスは、惑星の周囲にガス円盤を作る
→ **周惑星円盤**と呼ぶ
- 木星型惑星の規則衛星の形成は、周惑星円盤内で行われた



- ✓ Canup & Ward (2006), Sasaki et al. (2010)
- 周惑星円盤上空からガスとダストを供給
→ **その場ですぐに微衛星になると仮定**
- 微衛星が合体成長して衛星形成



本当に微衛星は形成されるのか？

研究の概要

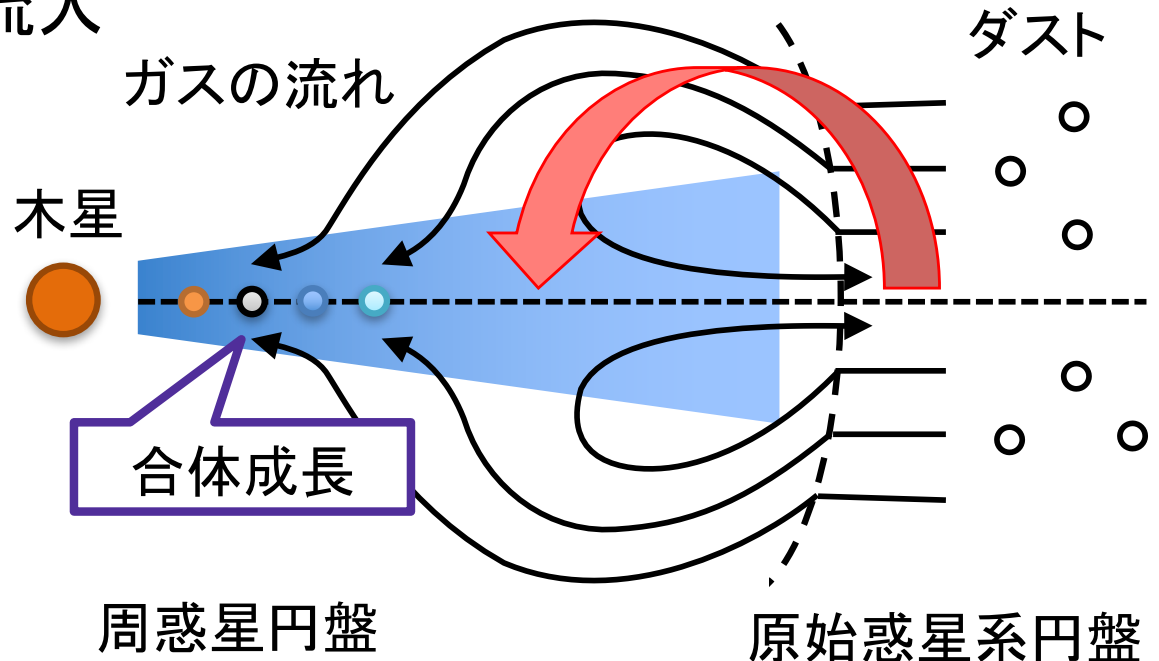
✓ 目的

周惑星円盤でのダストの落下と合体成長を調べて
ダストが微衛星まで成長できるか検証する

- 木星からの距離 r におけるダストのサイズ、面密度を計算
- 周惑星円盤へのダスト・ガス流入量を変化させる

✓ 仮定

- **定常** → 周惑星円盤の形成途中段階は今回は考えない
- ダストはガスと共に流入

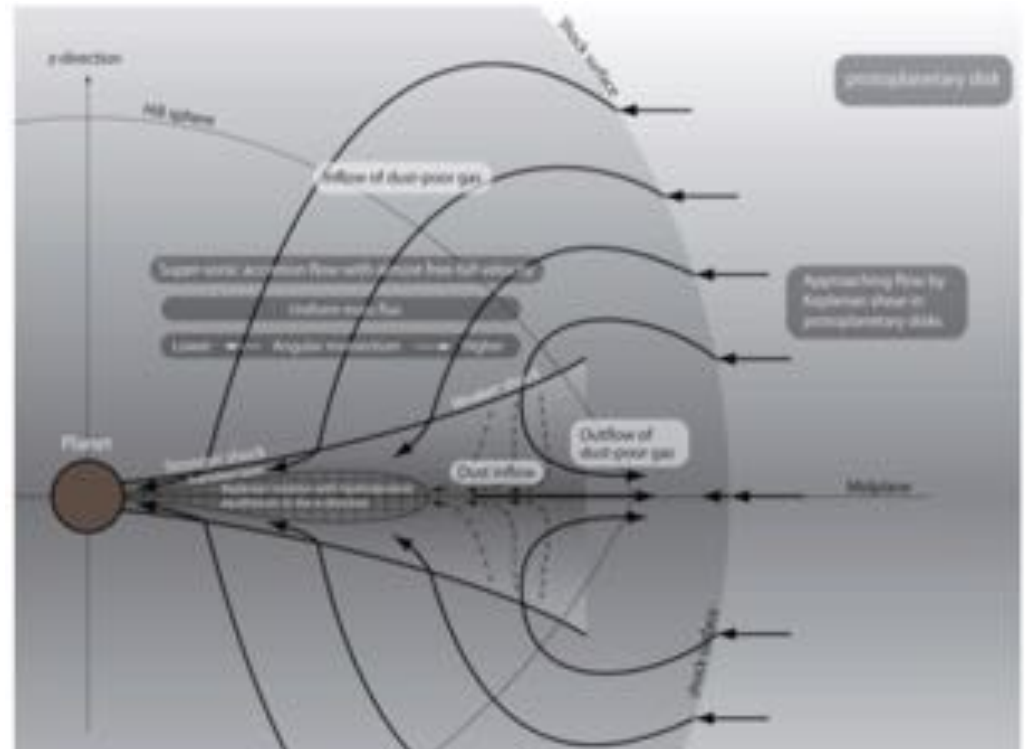


周惑星円盤のモデル

✓ ガス流入モデル:

Tanigawa et al. (2012)のガス集積計算の結果に基づく

- $\dot{M}_{\text{gas}} = 1.4 M_J/\text{Myr}$
← 林モデルPPD + 木星
周りのギャップ
(Kanagawa et al. 2015)
- $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 M_J/\text{Myr}$
← “Gas-starved disk”
モデルに相当 (Canup
& Ward 2002)
- $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.014 M_J/\text{Myr}$



(Tanigawa et al. 2012)

周惑星円盤のモデル

- ✓ 原始惑星系円盤からのガス流入のある、粘性降着円盤
 - 乱流による粘性: α モデル ($\alpha = 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$)
 - 熱源は粘性加熱のみ

$$\sigma T^4 = \frac{9}{8} \nu \Sigma_g \Omega_K^2 g(\tau) \quad g(\tau) = \left(\frac{3}{8} \tau + \frac{1}{4.8 \tau} \right)$$

τ : Rosseland mean optical depth

(Nakamoto & Nakagawa 1994)



$$T = \left(\frac{3GM_{\text{cp}}\dot{M}_{\text{gas}}}{8\pi\sigma_{\text{SB}}r^3} \right)^{\frac{1}{4}}$$

- ✓ $g(\tau) = 1$
= 最小見積もり
(= 鉛直方向等温)

- ✓ 温度はファクターで大きくなりうる
($10^{-2} \lesssim \tau \lesssim 10^2 \rightarrow 1 \lesssim g(\tau)^{1/4} \lesssim 3$)

周惑星円盤のモデル

✓ CPDの赤道面温度

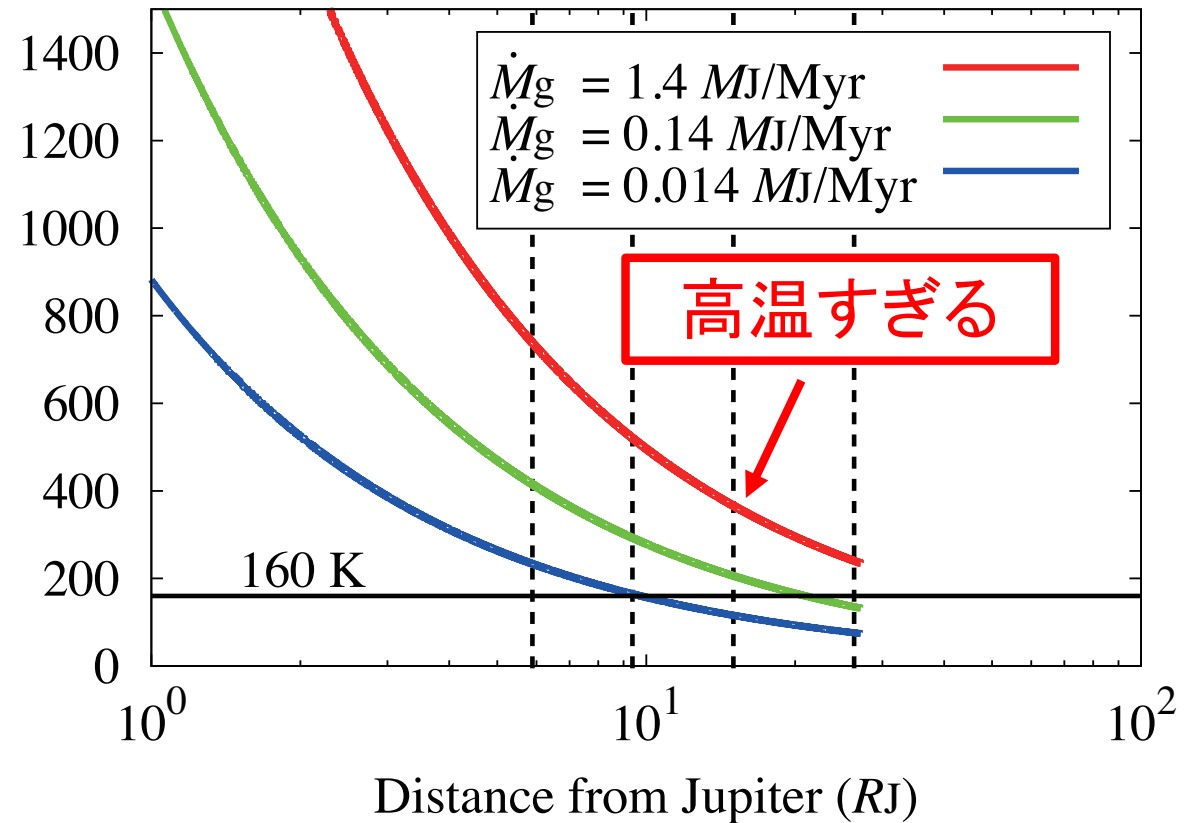
- 粘性加熱, 最小見積もり (i.e. 鉛直方向等温)
- $\dot{M}_{\text{gas}} = 1.4, 0.14, 0.014 M_J/\text{Myr}$

赤道面温度:

$$T = \left(\frac{3GM_{\text{cp}}\dot{M}_{\text{gas}}}{8\pi\sigma_{\text{SB}}r^3} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Temperature (K)

- ✓ 温度は \dot{M}_{gas} にのみ依存

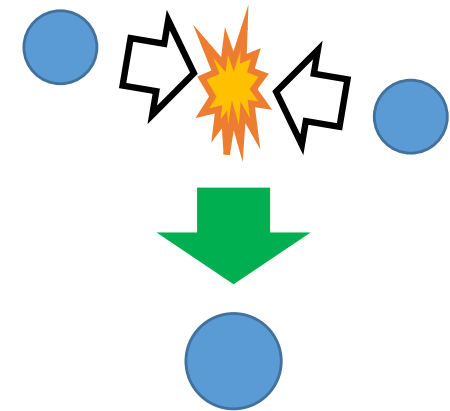


$\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14, 0.014 M_J/\text{Myr}$ をパラメーターとする

ダストの合体成長

✓ 仮定

- 代表サイズ(ピーク質量のダスト)
- 完全合体
- コンパクトダスト
- ガス流入領域の最も外側に流入
($r = 27R_J$)



✓ 赤道面でのダストの合体成長

- 連続の式

$$\dot{M}_d = 2\pi r |v_r| \Sigma_d$$

- 直接合体成長

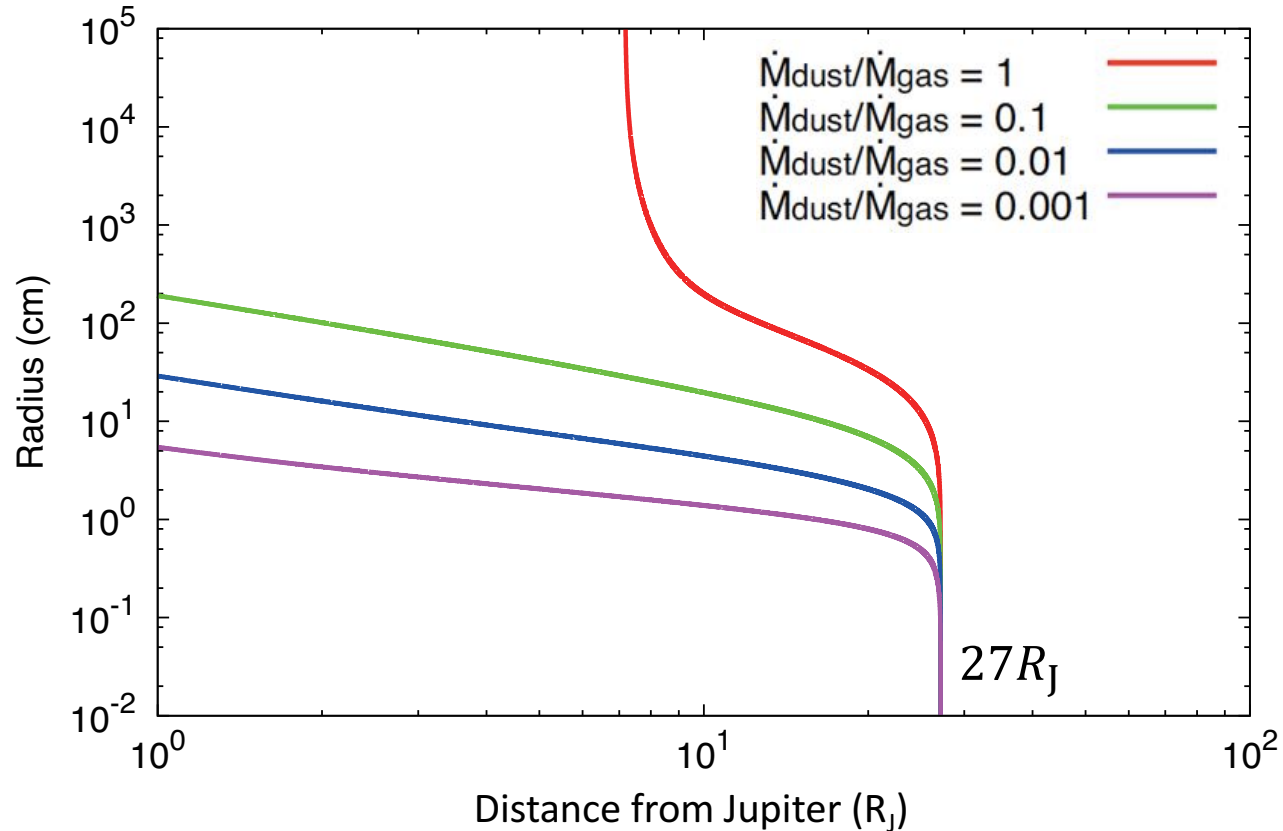
$$\cancel{\frac{\partial m_d}{\partial t}} + v_r \frac{\partial m_d}{\partial r} = \frac{2\sqrt{\pi} R_d^2 \Delta v_{dd}}{H_d} \Sigma_d$$

2式を連立して解く
 $m_d(r)$, $\Sigma_d(r)$

(Sato et al. 2016)

ダスト半径の進化

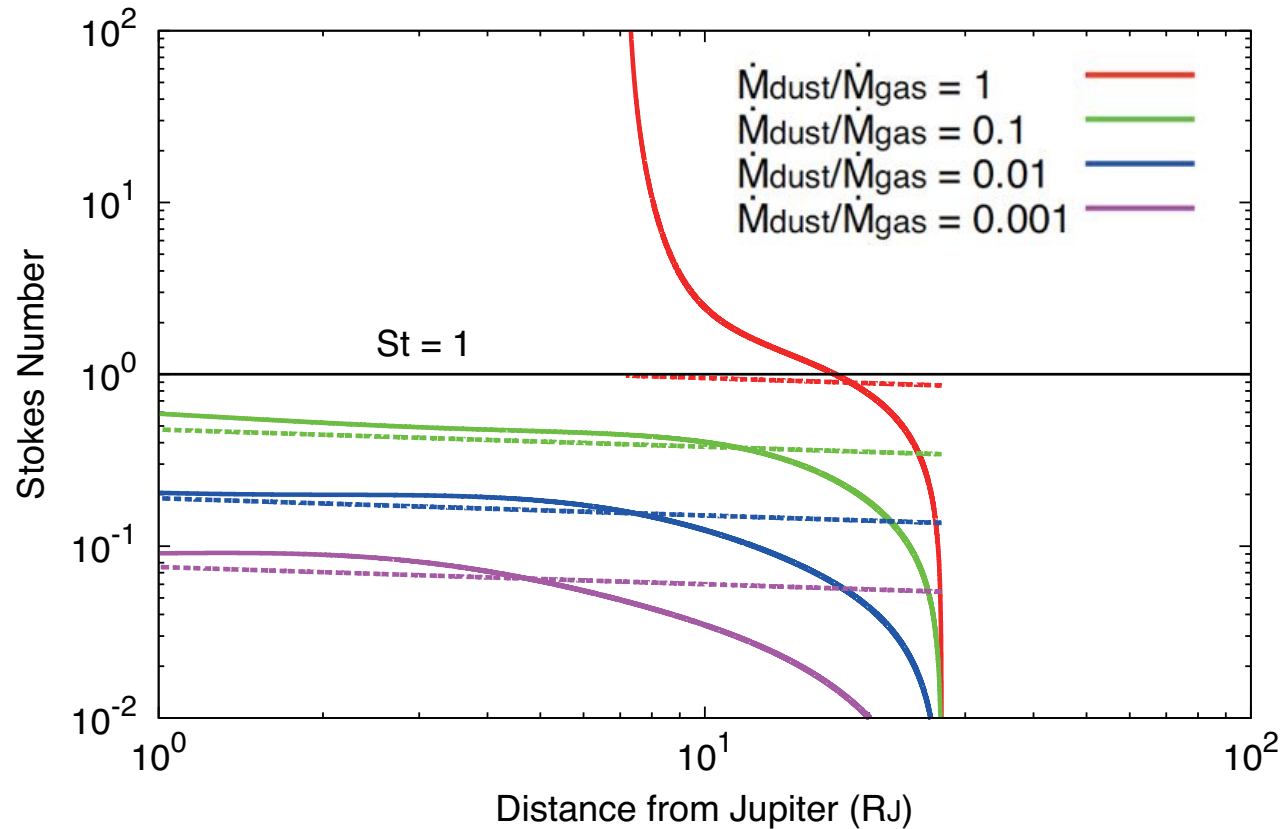
$$\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 M_J / \text{Myr}, \alpha = 10^{-4}$$



1. CPD の $r = 27R_J$ にダスト流入
2. その場で急成長
3. ドリフト開始
4. ドリフトが止まって微衛星に成長するか、そのままドリフト押して木星に落ちる

ストークス数の進化

$$\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 M_J / \text{Myr}, \alpha = 10^{-4}$$



- ✓ $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}$ が高いとストークス数も大きい.
- ✓ $St > 1$ の時に微衛星が形成.

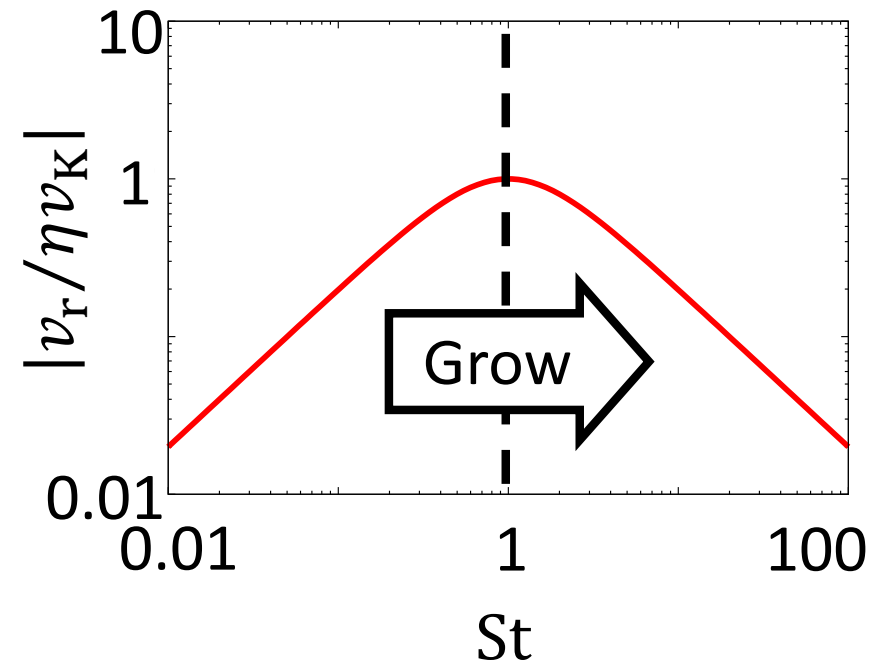
微衛星形成の条件

- ストークス数 St (\equiv サイズ)
ガス内でのダストの運動を決める
 $St = (\text{制動時間}) / (\text{公転周期})$
- ダスト落下速度は $St = 1$ の時に最大

$$St = \frac{8}{3C_D} \frac{\rho_{\text{int}} R_d}{\rho_g \Delta v_{\text{dg}}} \Omega_K$$

C_D : Re_p に依存する係数

Re_p : 粒子レイノルズ数



$St = 1$ を超えないと微衛星は形成されない

ダスト/ガス流入質量フラックス比の影響

✓ $f = 1$ のときのみ微衛星形成.

✓ $r \rightarrow 0$ の時、ストークス数は...

$$\text{St} \approx 0.95 \left(\frac{\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}}{1} \right)^{2/5} \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{1/5} \left(\frac{T}{280\text{K}} \right)^{-2/5} \left(\frac{M_{\text{cp}}}{1M_{\text{J}}} \right)^{2/5} \left(\frac{r}{10R_{\text{J}}} \right)^{-2/5}$$

→ St は $(\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}})^{2/5}$ に比例

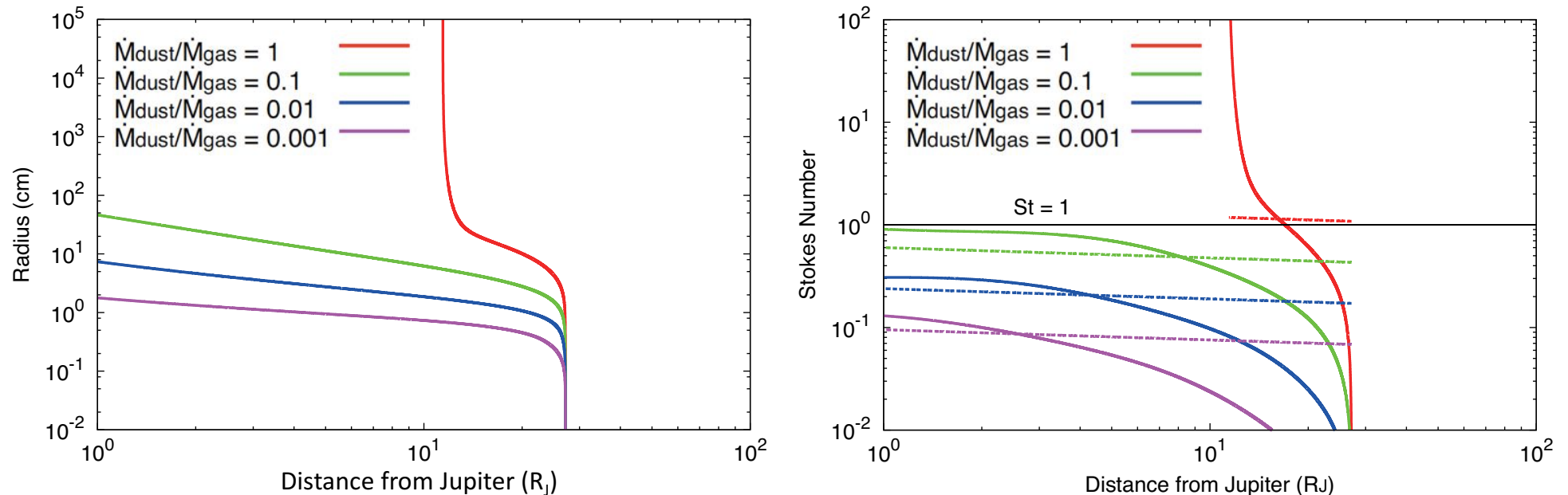
← \dot{M}_{gas} (i.e. Σ_{gas}) が高いとき、ガス抵抗が大きい

← \dot{M}_{dust} (i.e. Σ_{dust}) が高いとき、衝突率も高い.

- C_D を定数とする(=0.5).
- $\Delta v_{\text{dd}} \approx \Delta v_{\text{dg}} \approx v_r$

ガス流入質量フラックスの影響

$$\dot{M}_{\text{gas}} = 0.014M_J/\text{Myr}, \alpha = 10^{-4}$$



✓ ダスト半径の進化は、 $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14M_J/\text{Myr}$ のときより低い

✓ しかしストークス数の進化はあまり変わらない

→ $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} = 1$ のときのみ微衛星形成

ガス流入質量フラックスの影響

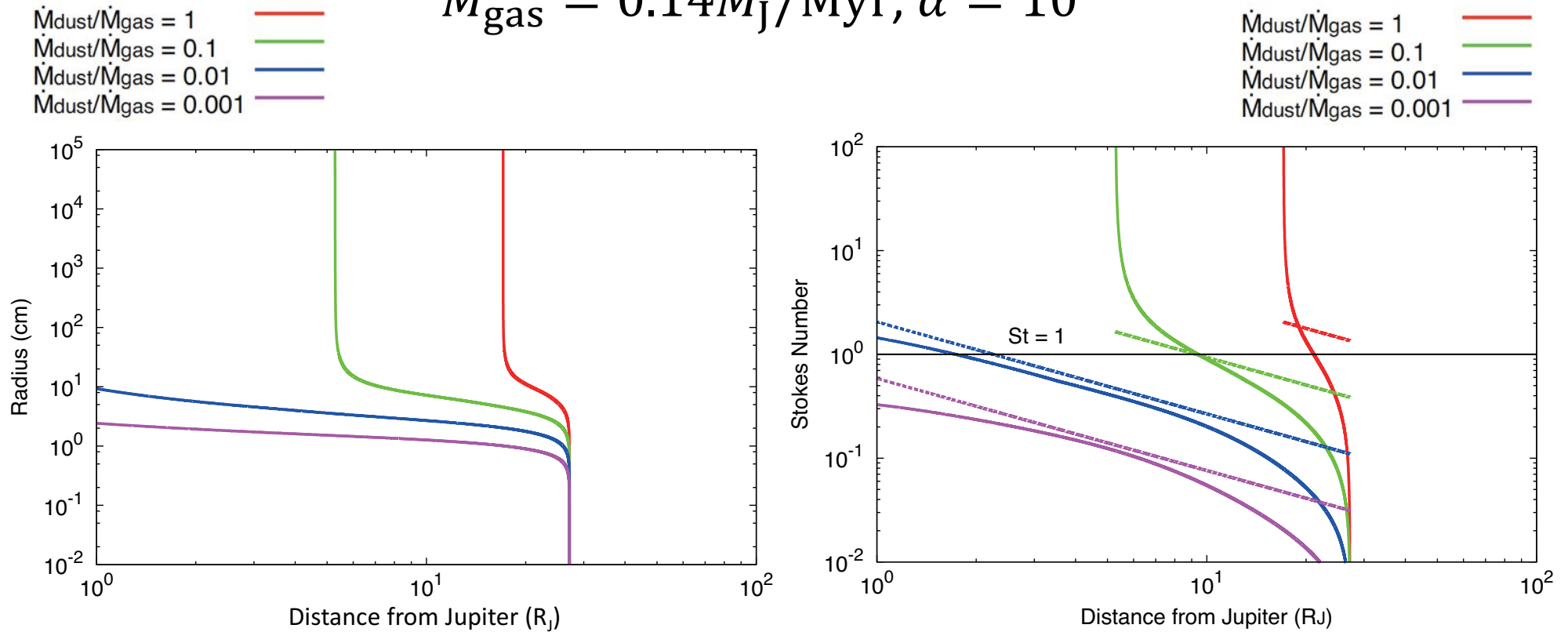
- ✓ ダストガス流入質量フラックスが変わらなると、微衛星形成の結果は変わらない
- ✓ 近似では...

$$\text{St} \approx 0.95 \left(\frac{\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}}{1} \right)^{2/5} \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{1/5} \left(\frac{T}{280\text{K}} \right)^{-2/5} \left(\frac{M_{\text{cp}}}{1M_{\text{J}}} \right)^{2/5} \left(\frac{r}{10R_{\text{J}}} \right)^{-2/5}$$

- $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}$ を除くと、 T だけが \dot{M}_{gas} に依存 ($T \propto \dot{M}_{\text{g}}^{1/4}$).
→ $\text{St} \propto \dot{M}_{\text{gas}}^{-1/10}$
- St の \dot{M}_{gas} 依存性は弱く、結果も変わらない

乱流の影響

$$\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 M_J / \text{Myr}, \alpha = 10^{-2}$$



✓ ダスト半径の進化は、 $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 M_J / \text{Myr}$ のときより低い

✓ ストークス数の進化は $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 / \text{Myr}$ のときより高い

→ $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} = 1$ or 0.1 のとき微衛星形成

乱流の影響

- ✓ 乱流の強さが変わると、微衛星形成の結果も変わる
- ✓ 近似では...

$$\text{St} \approx 0.95 \left(\frac{\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}}{1} \right)^{2/5} \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{1/5} \left(\frac{T}{280\text{K}} \right)^{-2/5} \left(\frac{M_{\text{cp}}}{1M_{\text{J}}} \right)^{2/5} \left(\frac{r}{10R_{\text{J}}} \right)^{-2/5}$$

→ St は $\alpha^{1/5}$ に依存.

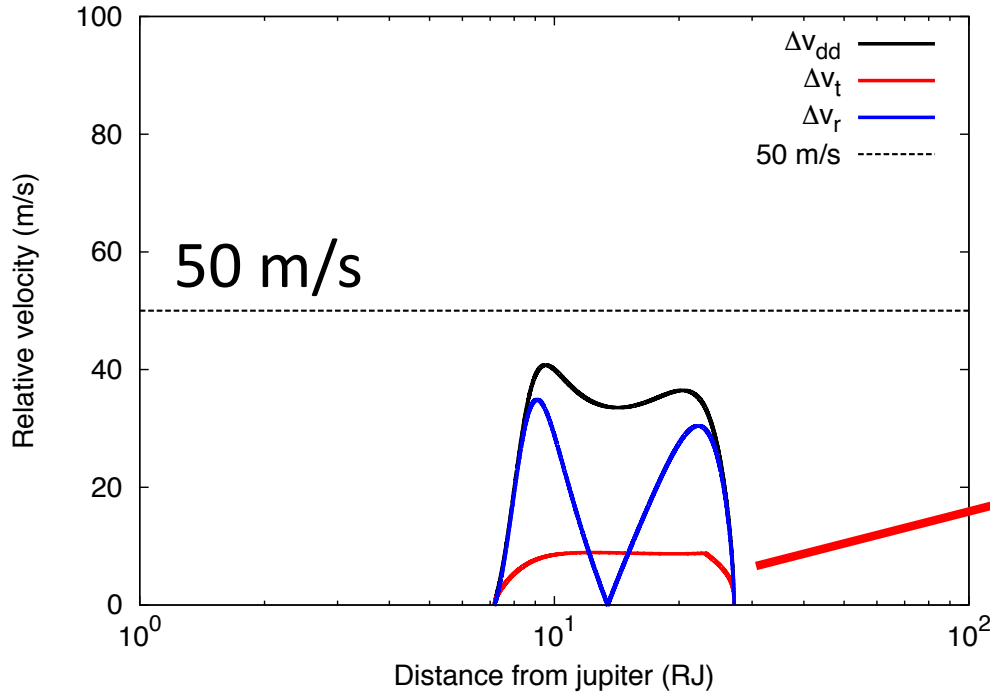
← 強い乱流はガス集積を促進し Σ_{gas} が減少する
($\Sigma_{\text{gas}} \propto \alpha^{-1}$).

→ Σ_{gas} が高いと、ガス抵抗が強くなる.

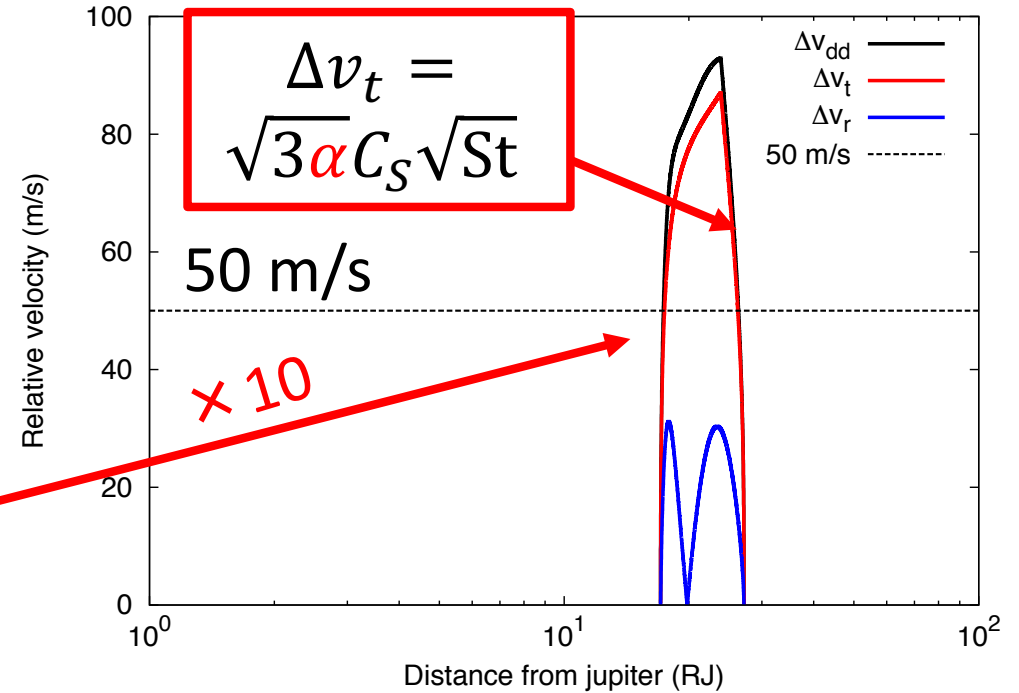
衝突速度の進化

- ✓ 氷ダストは 50 m/s 以上の衝突速度で、破壊が卓越してしまう (Wada et al. 2009).

$$\alpha = 10^{-4} \quad \dot{M}_{\text{gas}} = 0.14 M_J / \text{Myr}$$

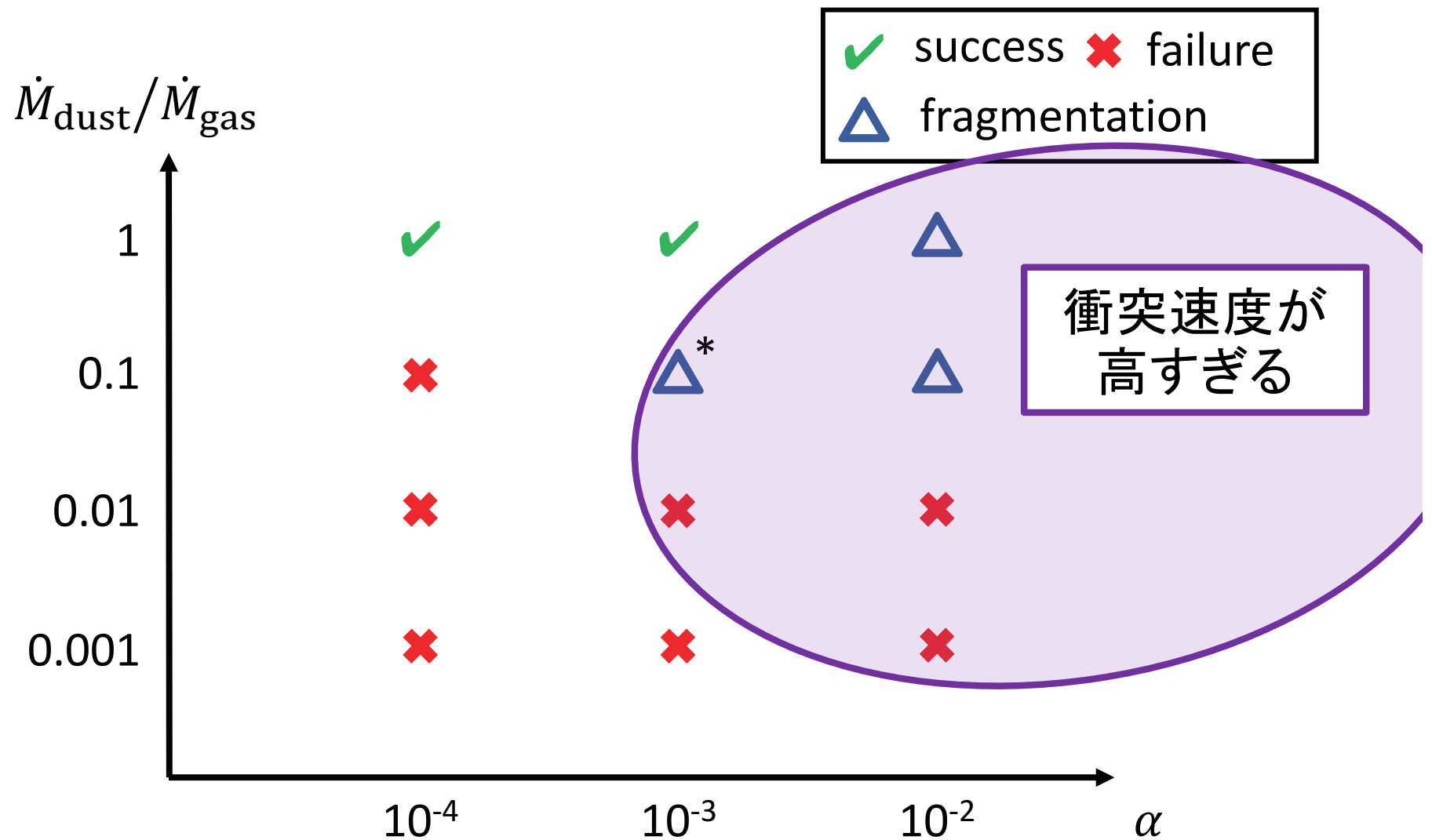


$$\alpha = 10^{-2}$$



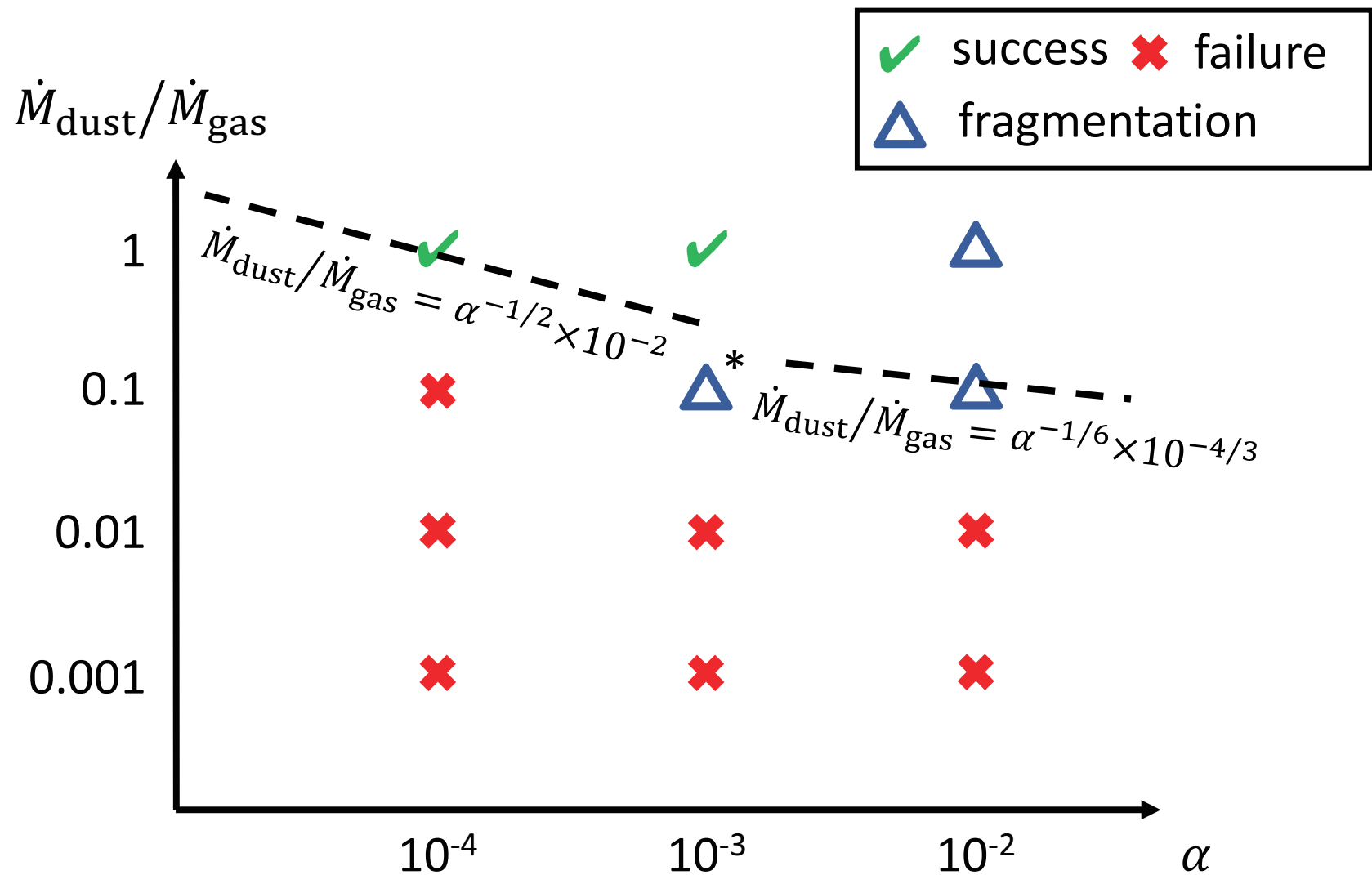
$\alpha = 10^{-2}$ のとき, 衝突速度は 50 m/s を超えてしまう。
 しかし, $\Delta v_t = \sqrt{\alpha} C_s \sqrt{St}$ ($St \sim 1$ のとき) (Ormel and Cuzzi 2007).
 → 微衛星形成はなんとか可能??

微衛星形成の成功条件



微衛星形成の成功条件は
 $\alpha < 10^{-2}$ and $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} \gtrsim 1$

微衛星形成の成功条件

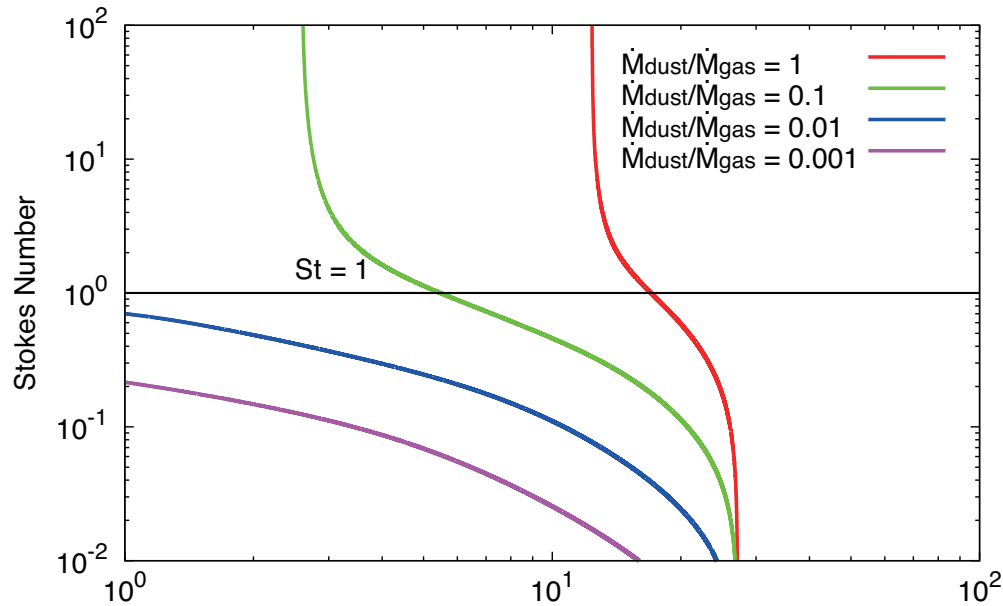


微衛星形成の成功条件は
 $\alpha < 10^{-2}$ and $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} \gtrsim 1$

惑星形成後期での微衛星形成の可能性

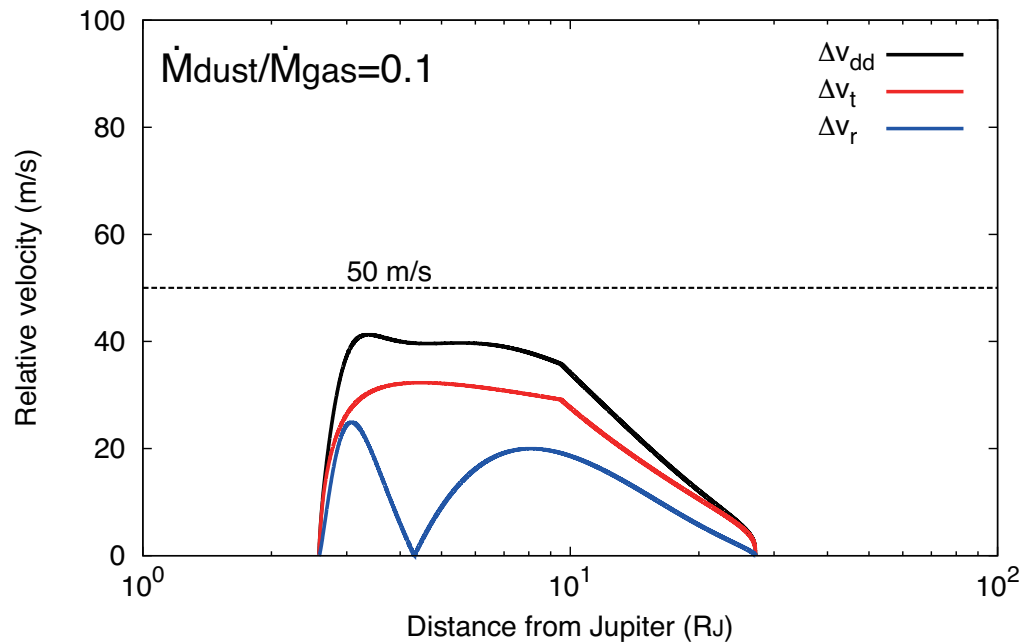
- ✓ $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} \gtrsim 1$ はロバストな微衛星形成の条件
→ かなり厳しそう
- ガスの流れを維持できないのでは
- ダストはギャップの淵にトラップされてしまう
 - 特にペブルはトラップされる
(0.1mm以下ならギャップ内に侵入可能 (Zhu et al. 2102))
- $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} \gtrsim 1$ という条件は
 - $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14M_{\text{J}}/\text{Myr} \rightarrow \dot{M}_{\text{dust}} \gtrsim 0.14M_{\text{J}}/\text{Myr}$
→ 落下してくるペブルの量くらい

$$\dot{M}_{\text{gas}} = 0.014 M_J / \text{Myr}, \alpha = 10^{-3}$$



✓ $\dot{M}_{\text{dust}} / \dot{M}_{\text{gas}} = 0.1$ でも
微衛星形成可能
(ただしかなり内側)

✓ 衝突速度も 50 m/s 以下
に抑えられる
(音速が $\dot{M}_g^{1/8}$ に比例)



↓
ガス流入が少ないと微衛星
形成には有利
→ 惑星形成後期 (?)

惑星形成後期での微衛星形成の可能性

- 後期にはガスの流入量が減る(深く広いギャップ, ガスの散逸)
(さらに光蒸発なら $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}$ も上がる)
- $\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} \gtrsim 1$ という条件は
 - $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.14M_{\text{J}}/\text{Myr} \rightarrow \dot{M}_{\text{dust}} \gtrsim 0.14M_{\text{J}}/\text{Myr}$
 - $\dot{M}_{\text{gas}} = 0.014M_{\text{J}}/\text{Myr} \rightarrow \dot{M}_{\text{dust}} \gtrsim 0.014M_{\text{J}}/\text{Myr}.$
 $\rightarrow \dot{M}_{\text{gas}}$ が小さければ \dot{M}_{dust} を小さくできる
- ただしドリフトしてくるペブルの量も時間と共に減少する(Sato et al. 2016).

まとめ

- ✓ ダストの合体成長とドリフトを計算して、周惑星円盤が形成できるか調べた
 - ピーク質量ダストのサイズと面密度分布を計算
 - ダストとガスの流入量、乱流の強さを変えた
- ✓ $r \rightarrow 0$ のとき、ストークス数は以下のように近似できる

$$\text{St} \approx 0.95 \left(\frac{\dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}}}{1} \right)^{2/5} \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{1/5} \left(\frac{T}{280\text{K}} \right)^{-2/5} \left(\frac{M_{\text{cp}}}{1M_{\text{J}}} \right)^{2/5} \left(\frac{r}{10R_{\text{J}}} \right)^{-2/5}$$

- ✓ 微衛星形成の成功条件は
$$\alpha < 10^{-2} \text{ and } \dot{M}_{\text{dust}}/\dot{M}_{\text{gas}} \gtrsim 1$$
- ✓ (惑星形成後期での微衛星形成の方が有利かもしれない)