

周惑星円盤へのダストの降着

～研究の目的～

- 観測されている系外惑星の多くがガス惑星
→ 惑星形成論においてガス惑星形成の理解は重要
(しかしその形成過程はあまり理解されていない。)
- 衛星はガス惑星形成の副産物 → ガス惑星形成を理解する手掛かり
- 原始惑星系円盤の進化とも関連

丸田有希人(九州大学) 谷川亨行(北海道大学)
町田正博(九州大学)

巨大ガス惑星

○特徴

- ・質量の大部分が水素やヘリウム
- ・地球の数百倍の質量
- ・太陽系内には木星と土星が存在

○形成過程

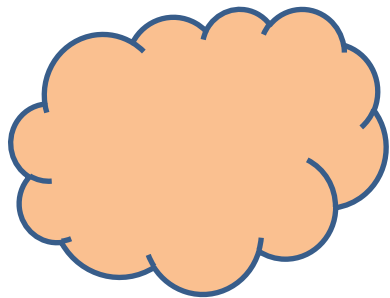
- ・自己重力不安定
- ・コア集積モデル



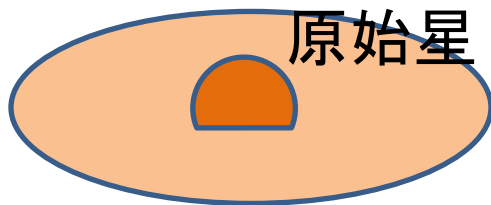
➡ まだ解明されていないが、今回は巨大ガス惑星の形成方法が
コア集積モデルであると考えて議論する

惑星、衛星形成過程

分子雲



10^5 AU

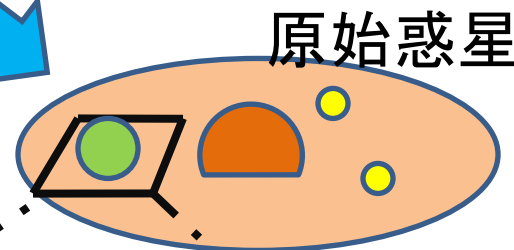


原始星

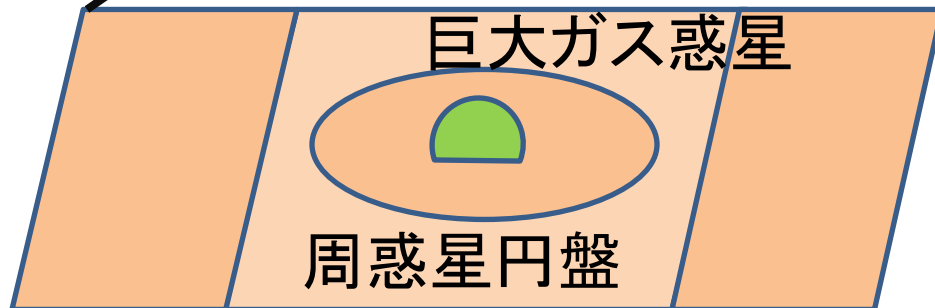
原始惑星系円盤



10^2 AU



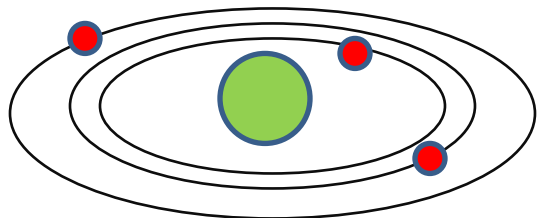
原始惑星



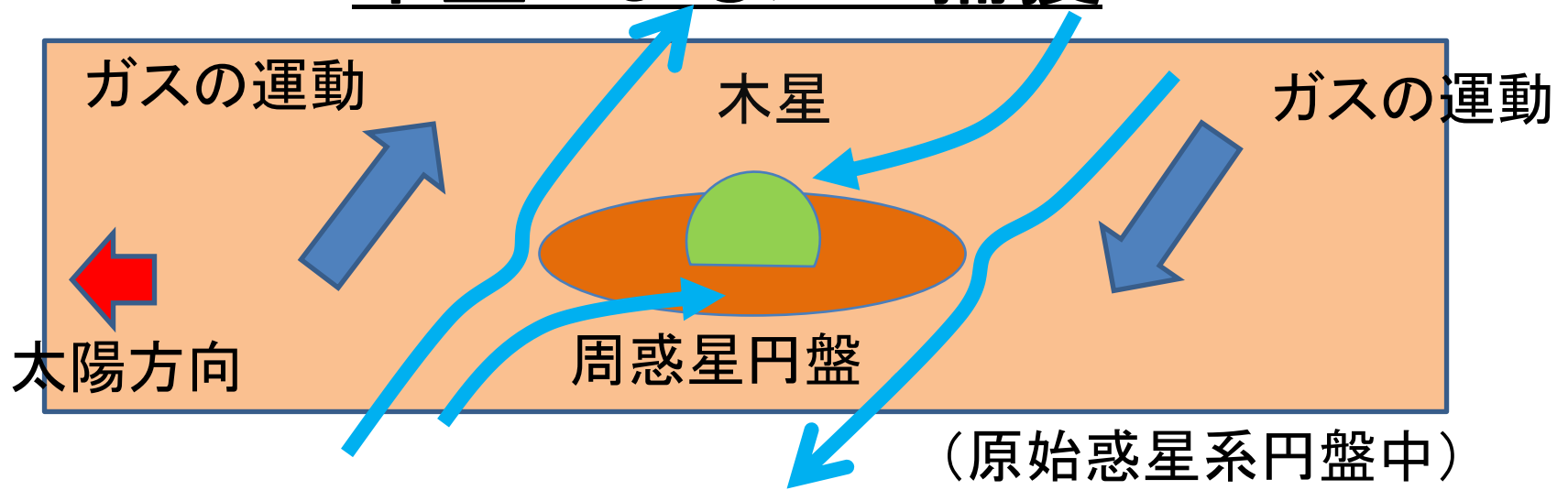
巨大ガス惑星

周惑星円盤

衛星



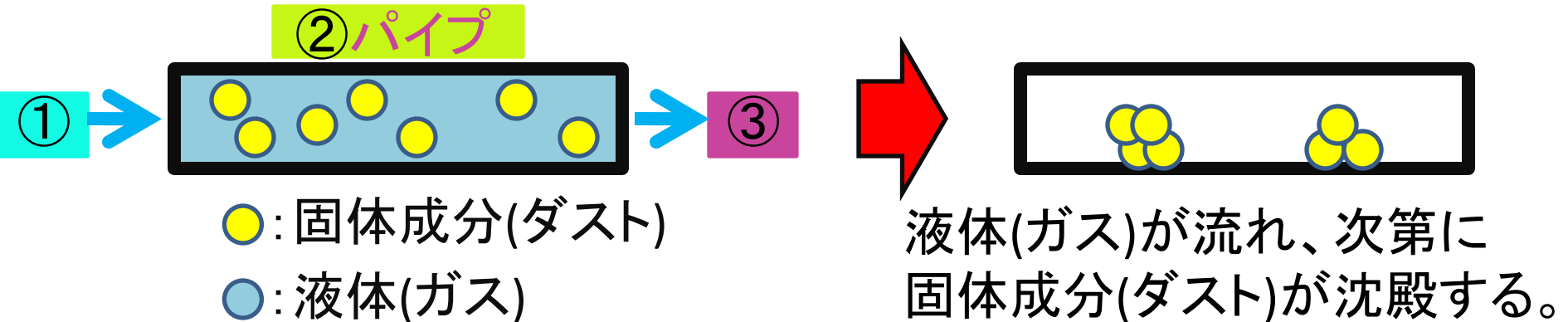
木星によるガス捕獲



・木星が差動回転するガス(ダストを含む)を捕獲

ガス(ダスト)の流れ

①原始惑星円盤 → ②周惑星円盤(パイプ) → ③木星



研究の内容

木星へのダスト降着を調べるための前段階として
2次元計算において

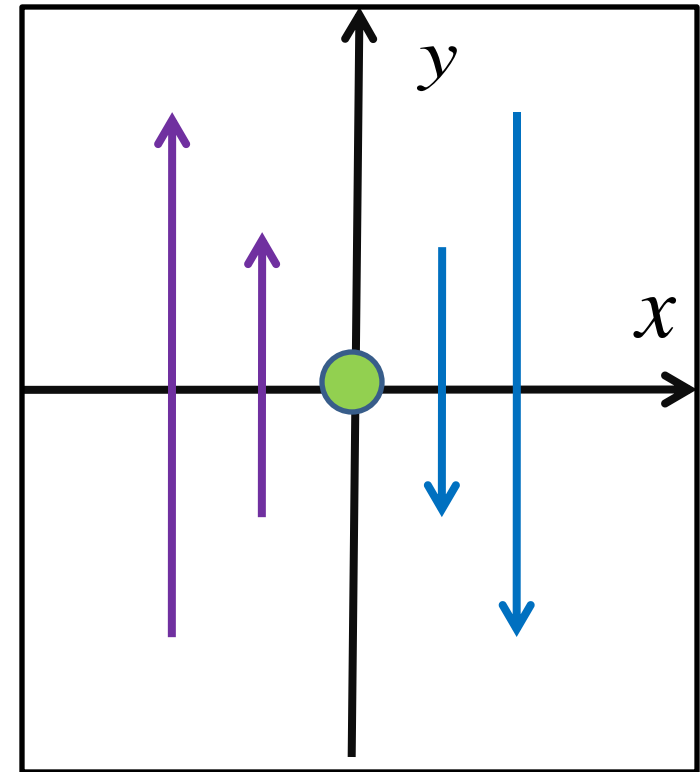
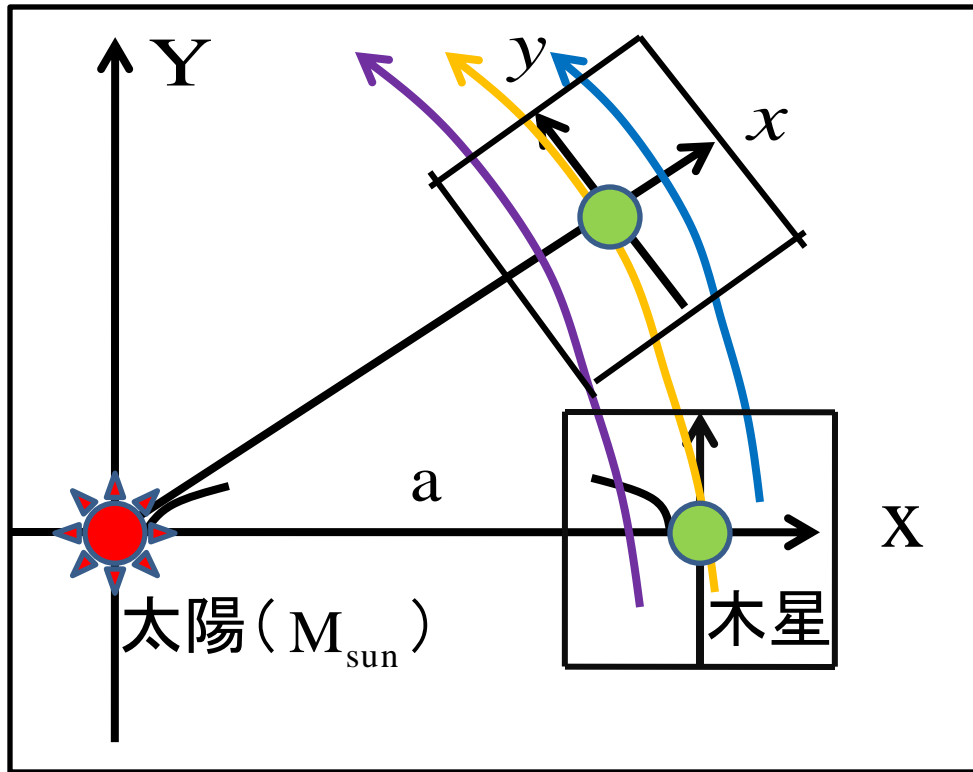
木星周辺にダストを流すと、ダストの軌道が
どのように変化するかを調べた

その中でも

- ①. ガス抵抗がない場合
- ②. ガス抵抗がある場合
($\rho_g = \alpha \tilde{r}^{-3}$ とした場合のテスト計算)
- ③. 流体計算により決定したガスの密度と
速度によるガス抵抗がある場合

の三つについて調べた

ヒル座標系の導入



ヒル座標系

- ・ヒル座標系を用いることで曲率を無視 (本来は $\Omega = \sqrt{GM_{\text{sun}}/a^3}$)
- ・木星の周辺だけを計算することで計算領域を縮小

➡ 計算効率の向上

基礎方程式

運動方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{GM_J}{r^3} x + 2\Omega v_y + 3x\Omega^2 (+ f_{drag,x}) \\ \frac{dv_y}{dt} = -\frac{GM_J}{r^3} y - 2\Omega v_x (+ f_{drag,y}) \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{GM_J}{r^3} z - \Omega^2 z (+ f_{drag,z}) \end{array} \right.$$

Ω : ケプラー角速度

M_J : 木星質量

r : 木星とダストの距離

f_{drag} : ガス抵抗力

規格化(無次元化)

距離: ヒル半径

時間: ケプラー時間

$$r_H = a \left(\frac{M_J}{3M_{\text{sun}}} \right)^{1/3}$$

$$\Omega^{-1} = \left(\frac{GM_{\text{sun}}}{a^3} \right)^{-1/2}$$

規格化した運動方程式

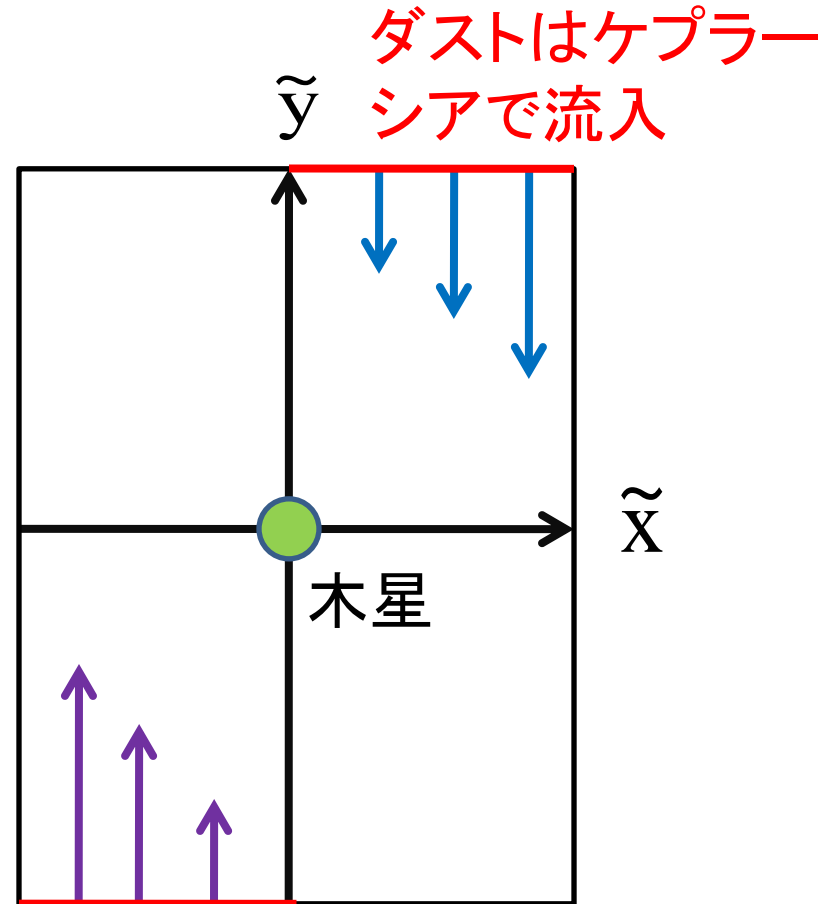
・規格化した運動方程式

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d\tilde{v}_x}{d\tilde{t}} = -\frac{3}{\tilde{r}^3} \tilde{x} + 2\tilde{v}_y + 3\tilde{x} + \tilde{f}_{drag,x} \\ \frac{d\tilde{v}_y}{d\tilde{t}} = -\frac{3}{\tilde{r}^3} \tilde{y} - 2\tilde{v}_x + \tilde{f}_{drag,y} \\ \frac{d\tilde{v}_z}{d\tilde{t}} = -\frac{3}{\tilde{r}^3} \tilde{z} - \tilde{z} + \tilde{f}_{drag,z} \end{array} \right.$$

初期条件

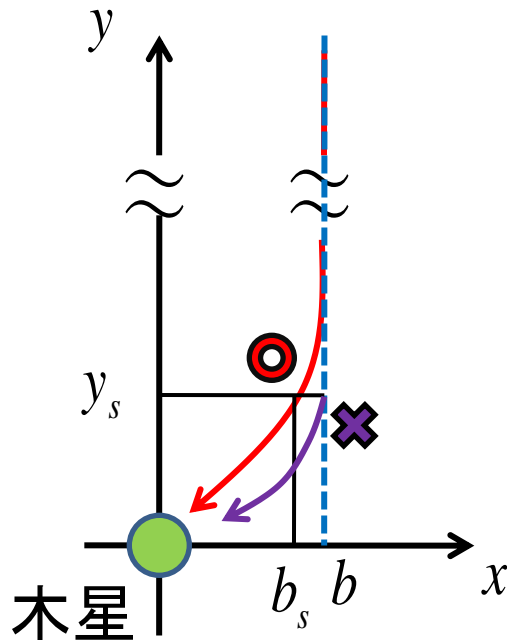
初期の位置について、
離心率はなく、 $z = 0$ (2次元)
と考えて

$$\left\{ \begin{array}{l} x_s = b \\ y_s = 100 \end{array} \right.$$



bの補正

エネルギーが保存することにより、初期の y_s に対応する b_s を求める。



$$b_s = \sqrt{b^2 - 8 / r_s}$$

したがって、粒子の初期の位置は

$$\begin{cases} x_s = b_s \\ y_s = 100 \end{cases}$$

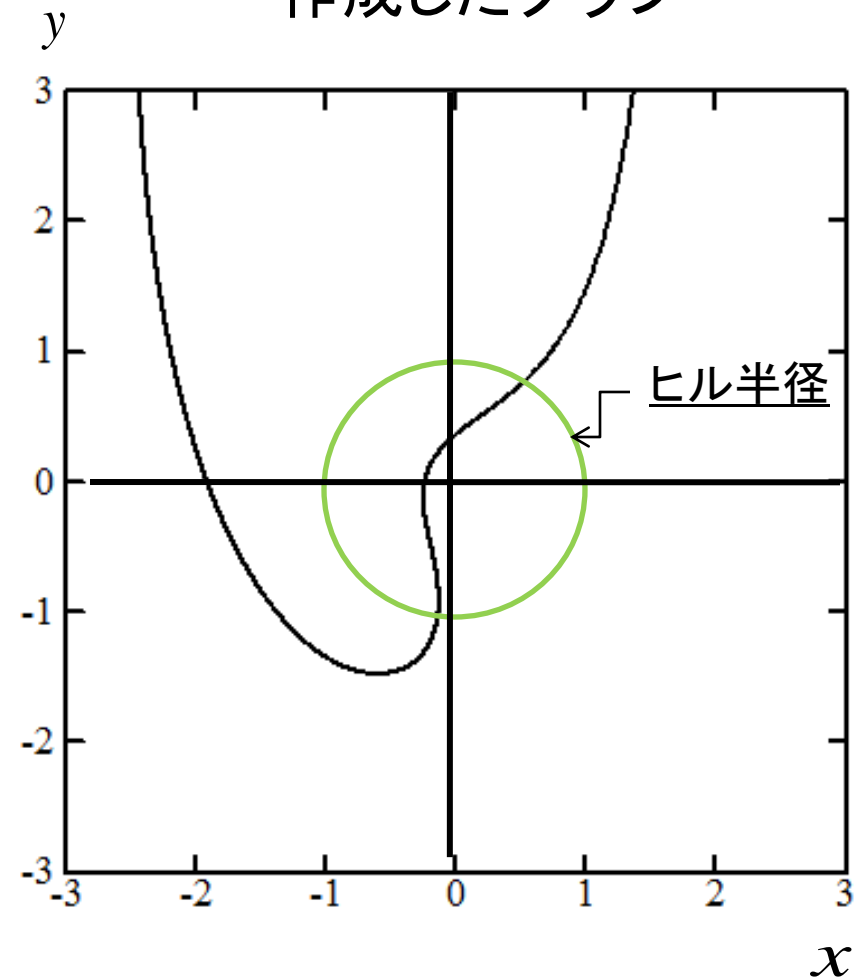
b の値によりダストの軌道が、どのように変化するかを8次のルンゲクッタ法を用いて数値シミュレーションを行い、グラフを作成した

結果①

～ガスがなく、抵抗を受けない場合～

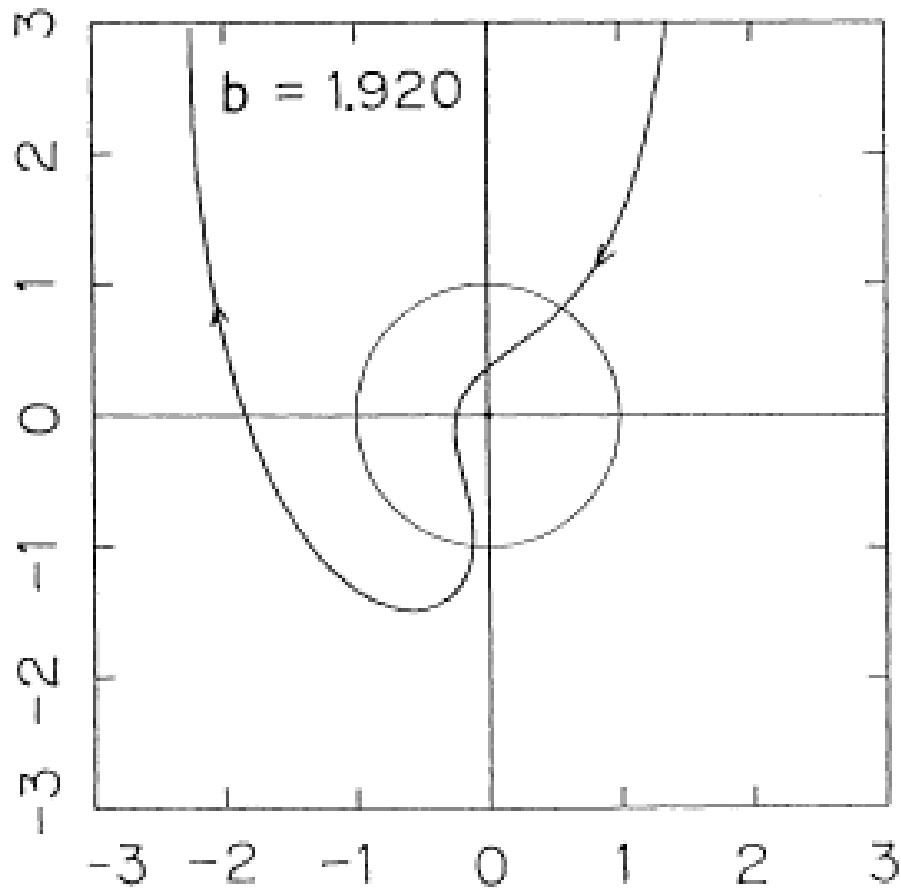
結果のグラフ①

・作成したグラフ



$(b = 1.92, y_s = 100)$

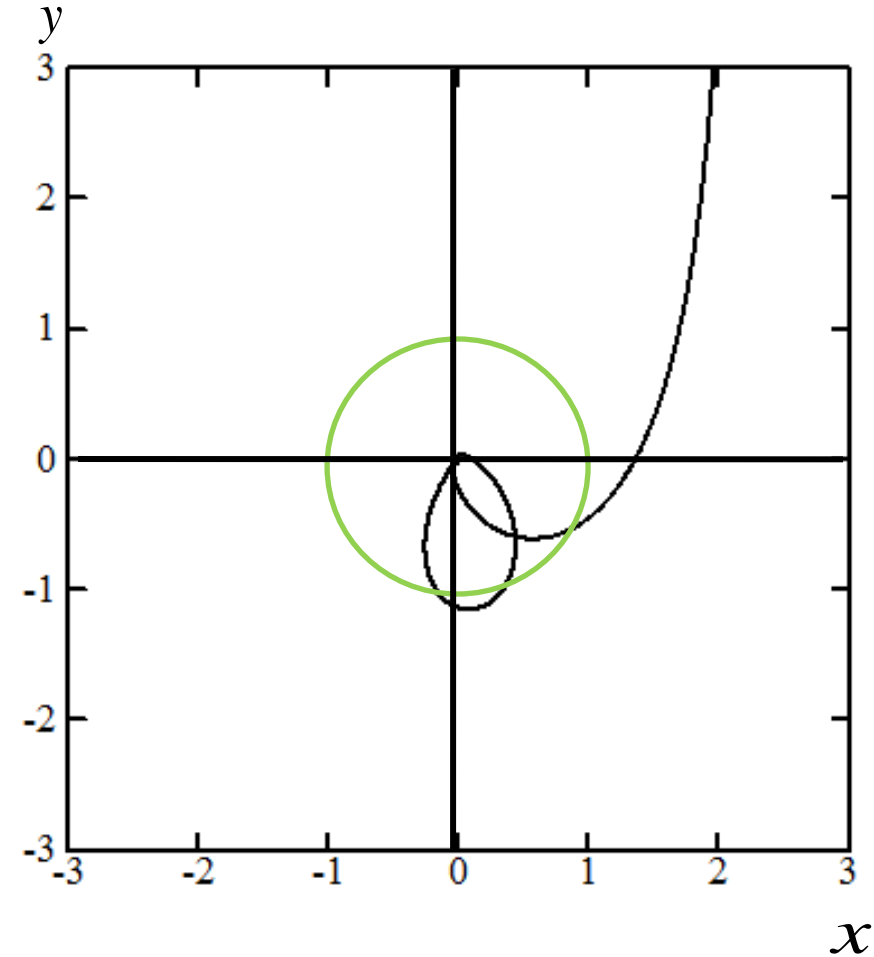
・論文から抜粋したグラフ



Ida & Nakazawa (1989), A&A, 224, 303

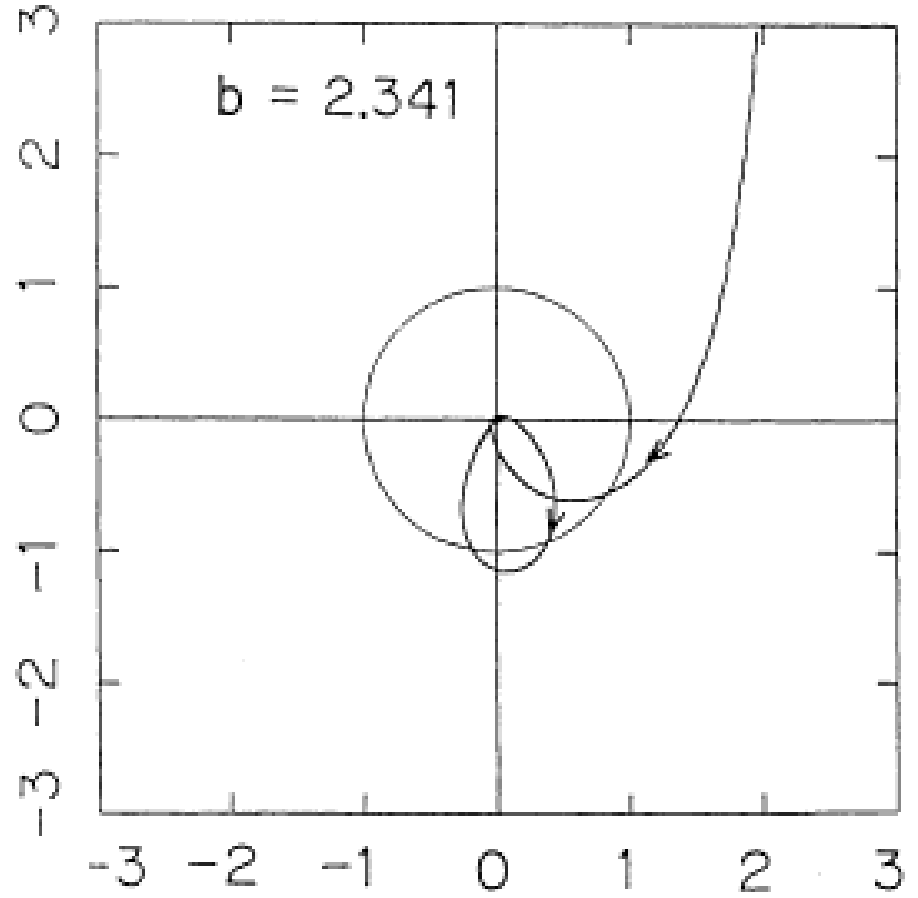
結果のグラフ②

・作成したグラフ



$(b = 2.341, y_s = 100)$

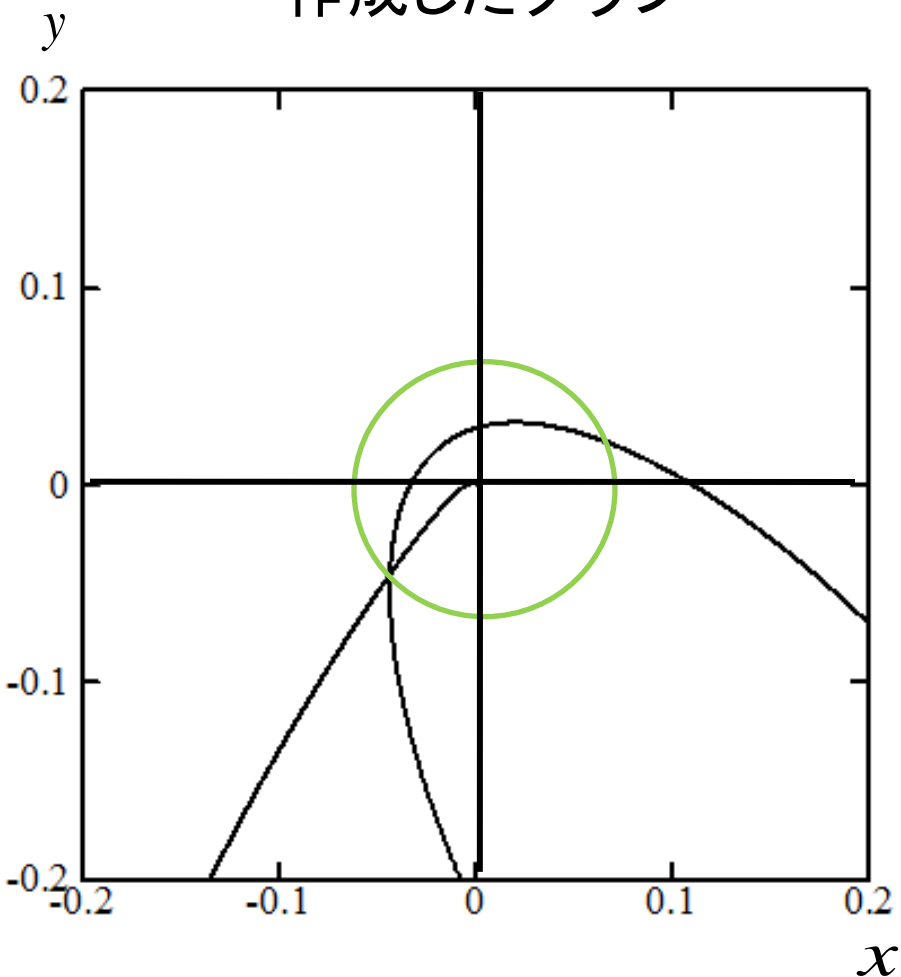
・論文から抜粋したグラフ



Ida & Nakazawa (1989), A&A, 224, 303

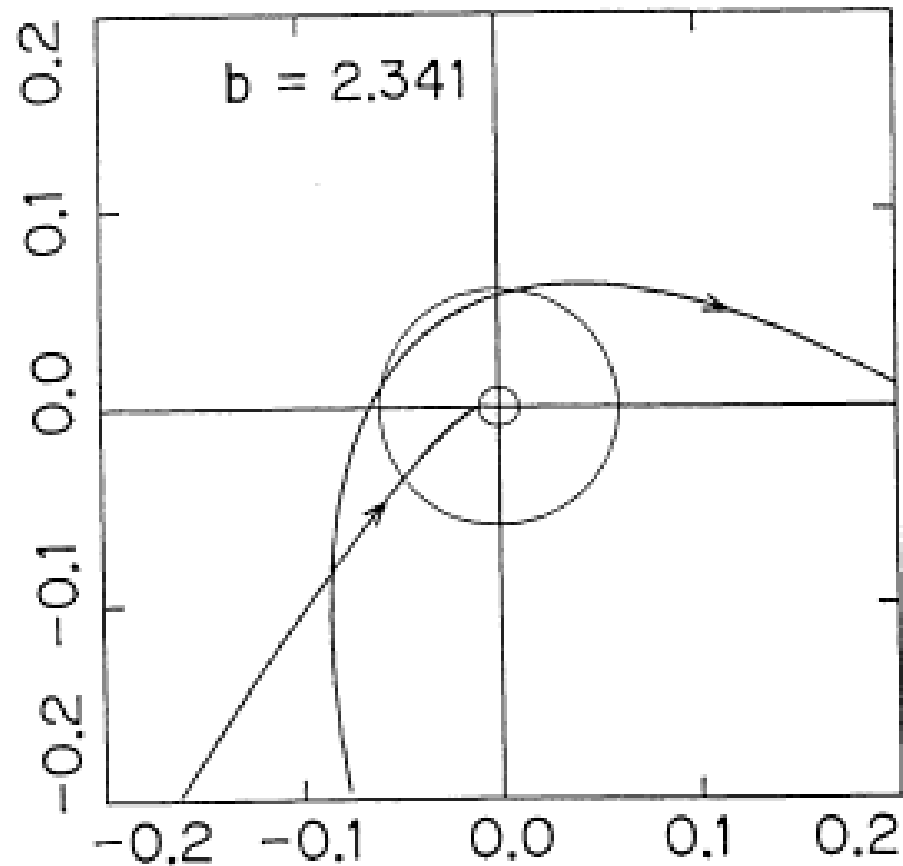
結果のグラフ③

・作成したグラフ



($b = 2.341, y_s = 100$)

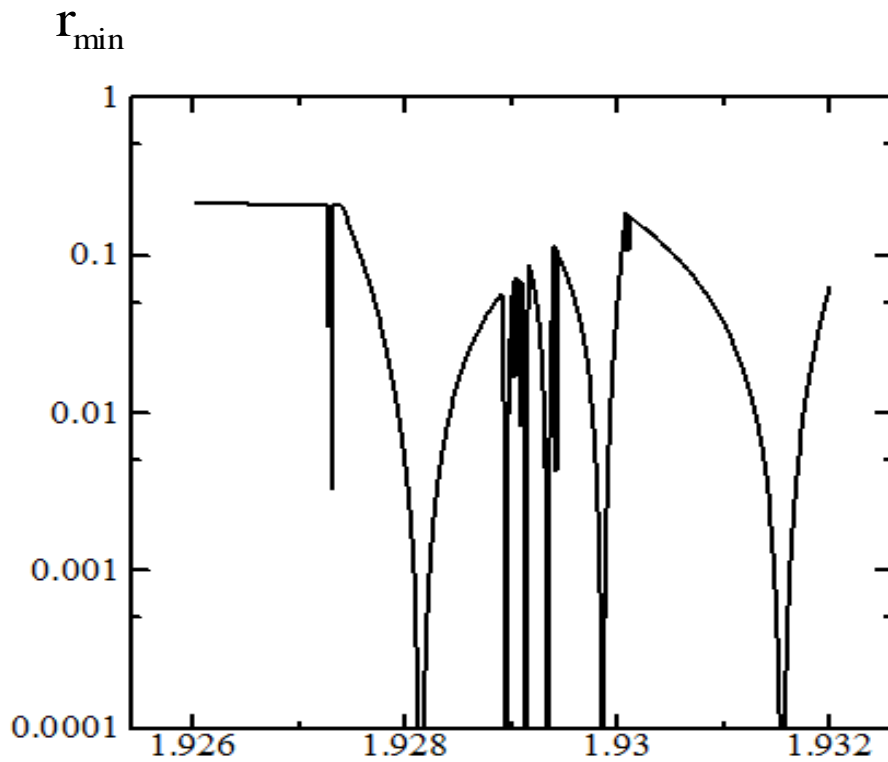
・論文から抜粋したグラフ



Ida & Nakazawa (1989), A&A, 224, 303

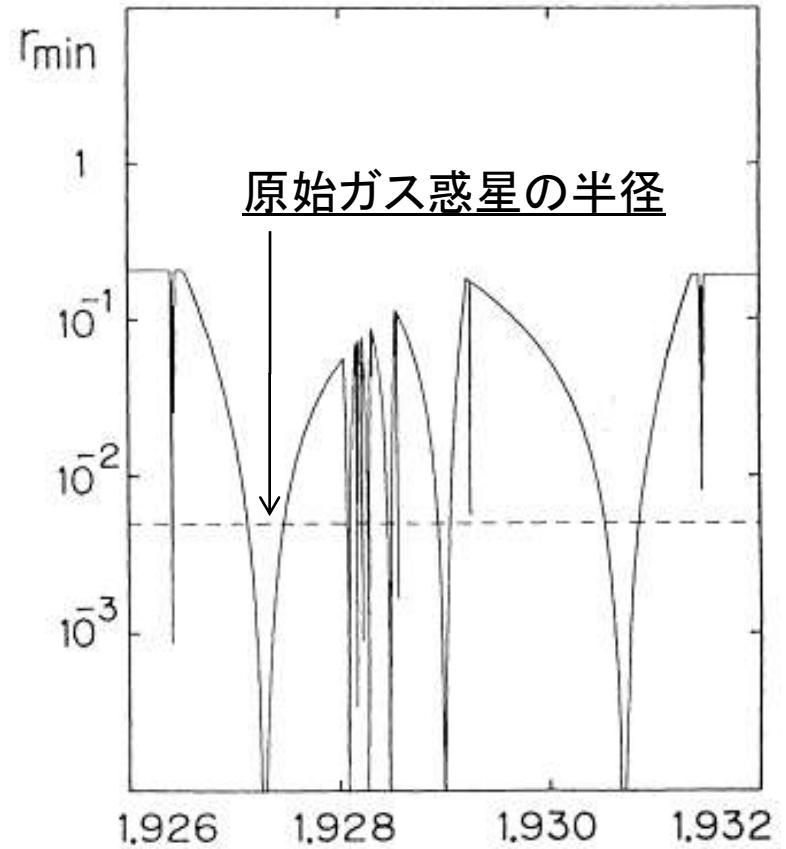
結果のグラフ④

bとrの最小値の関係



($y_s = 100$)

b



原始ガス惑星の半径

b

ヤコビエネルギー

- ・ヤコビエネルギー:ヒル座標系における保存量
- ・ヤコビエネルギーの式

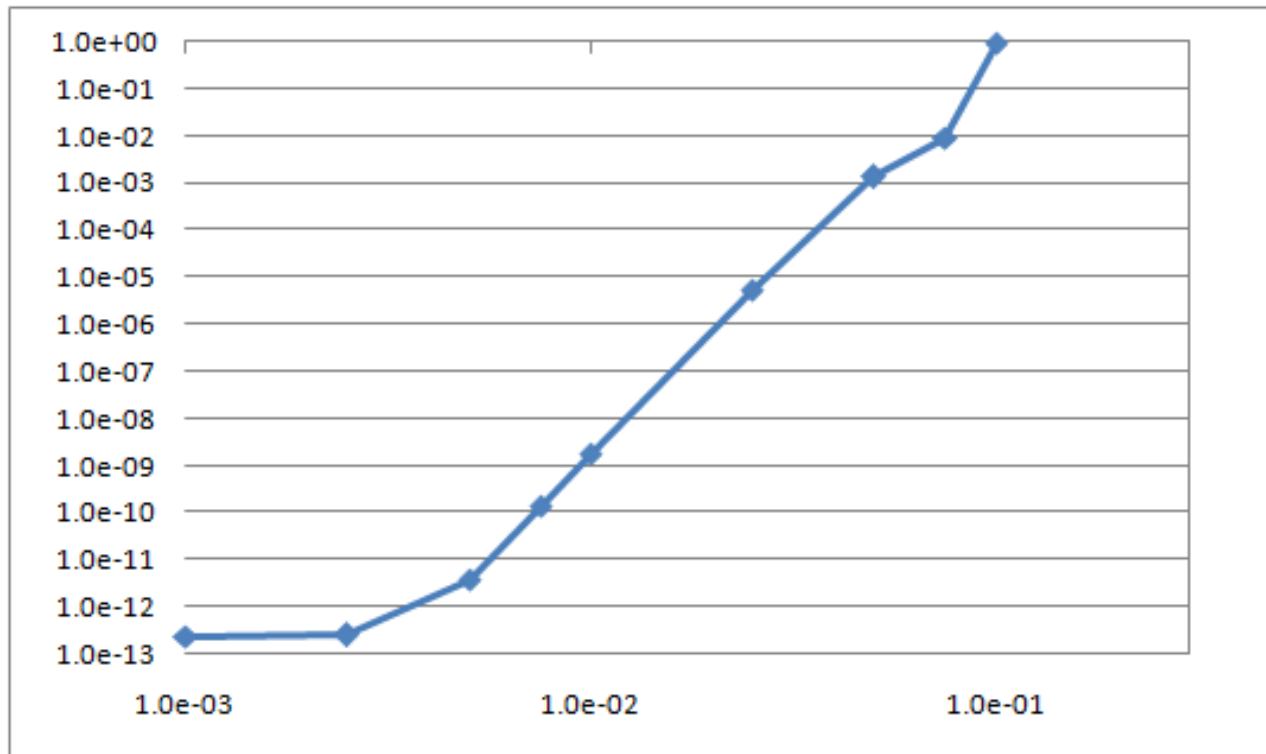
$$E = \frac{1}{2} v^2 + \left(-\frac{3}{2} x^2 + \frac{1}{2} z^2 - \frac{3}{r} + \frac{9}{2} \right)$$

結果のグラフ⑤

dtとヤコビエネルギーの関係

$\log_{10} \Delta E$

$$\left(\Delta E = \left| \frac{E_0 - E}{E_0} \right| \right)$$



$\log_{10} dt$

(ただし、 b, E_0 は一定)

結果②

～ガス抵抗力の影響を受ける場合(テスト計算)～

条件として、今回は微惑星のサイズは、半径 1m 、
密度、 $1.0 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ とした。

ガス抵抗

ガス抵抗の式 (Adachi et al (1976))

$$\vec{f}_{\text{drag}} = \frac{1}{2} C_D \pi r_p^2 \rho_g \mathbf{V}_{\text{rel}} \cdot \vec{\mathbf{V}}_{\text{rel}}$$

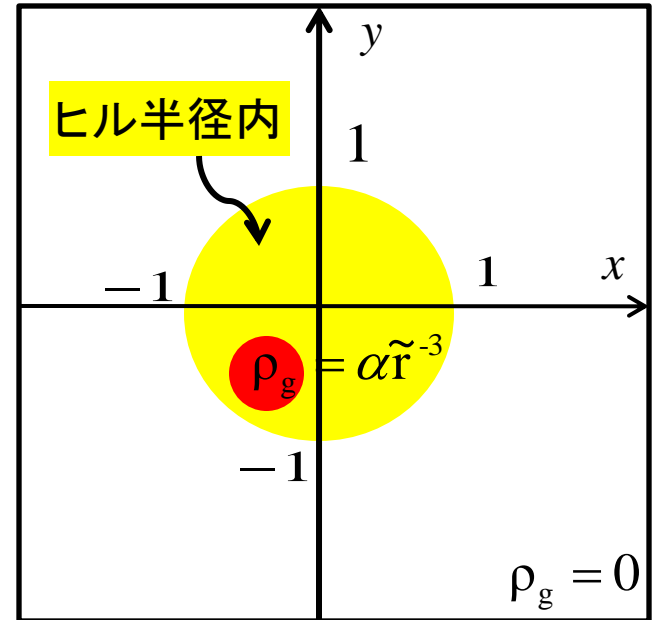
$$(\vec{\mathbf{V}}_{\text{rel}} = (\vec{\mathbf{V}}_{\text{Kep}} - \vec{\mathbf{V}}_{\text{gas}}))$$

テスト計算のため、変数を以下のように決めた

- C_D : ガス抵抗係数(1)
- r_p : 微惑星の半径(1m)
- ρ_g : ガス密度(= $\alpha \tilde{r}^{-3}$)

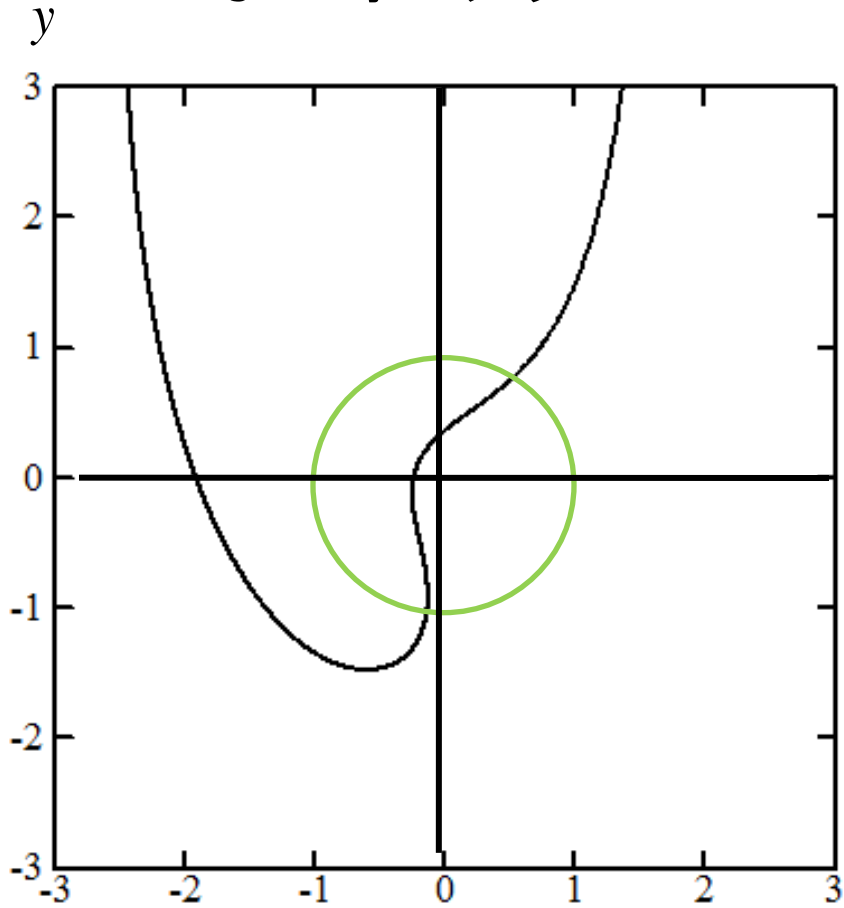
規格化すると、運動方程式中のガス抵抗の式は、

$$\frac{\vec{f}_{\text{drag}} / m_p}{r_H \Omega^2} = -\frac{3}{8} C_D \frac{\rho_g}{\rho_p} \tilde{r}_p^{-1} \tilde{\mathbf{V}}_{\text{rel}} \cdot \vec{\tilde{\mathbf{V}}}_{\text{rel}}$$



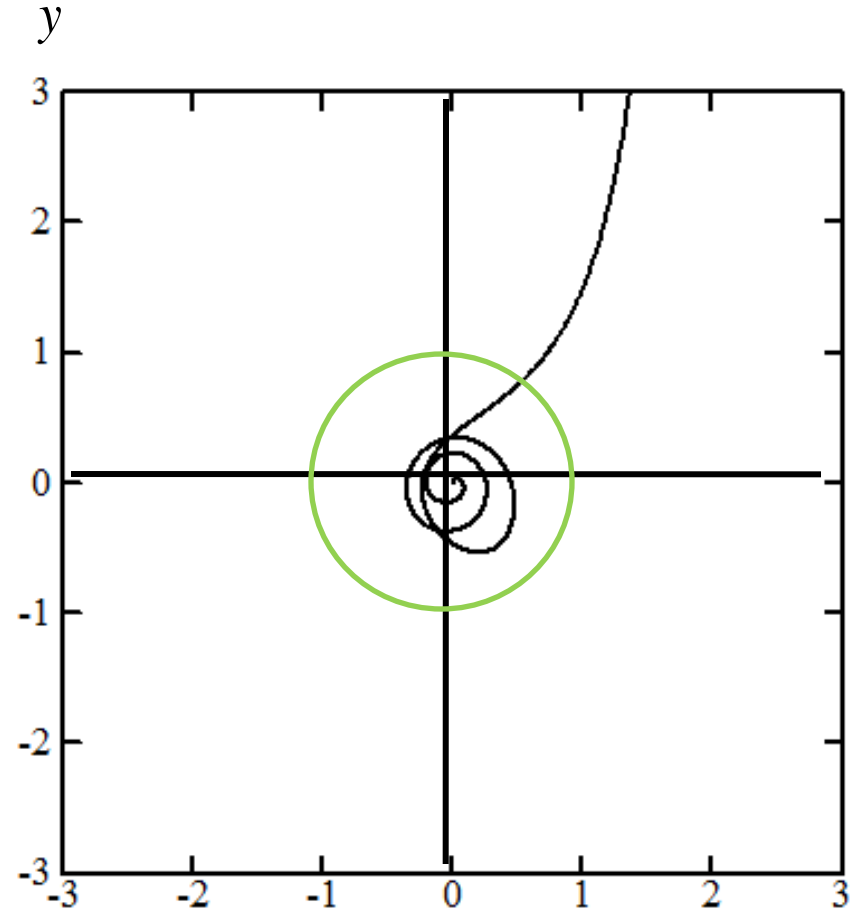
結果のグラフ①

・ガス抵抗の影響がない時のグラフ



($b = 1.92, y_s = 100$) x

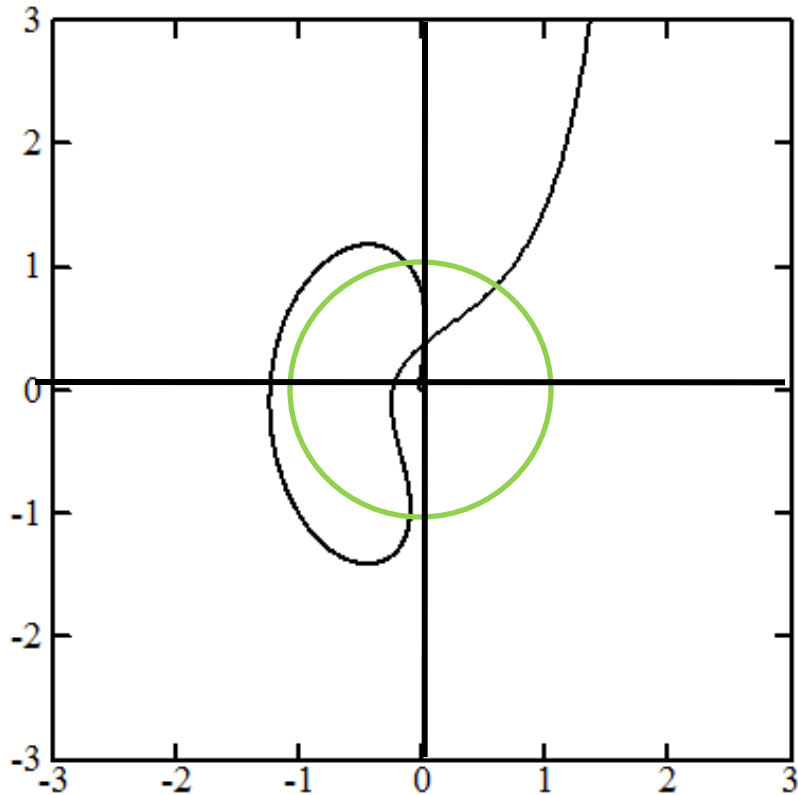
・ガス抵抗を導入したときのグラフ ($\alpha = 1.0 \times 10^{-3}$)



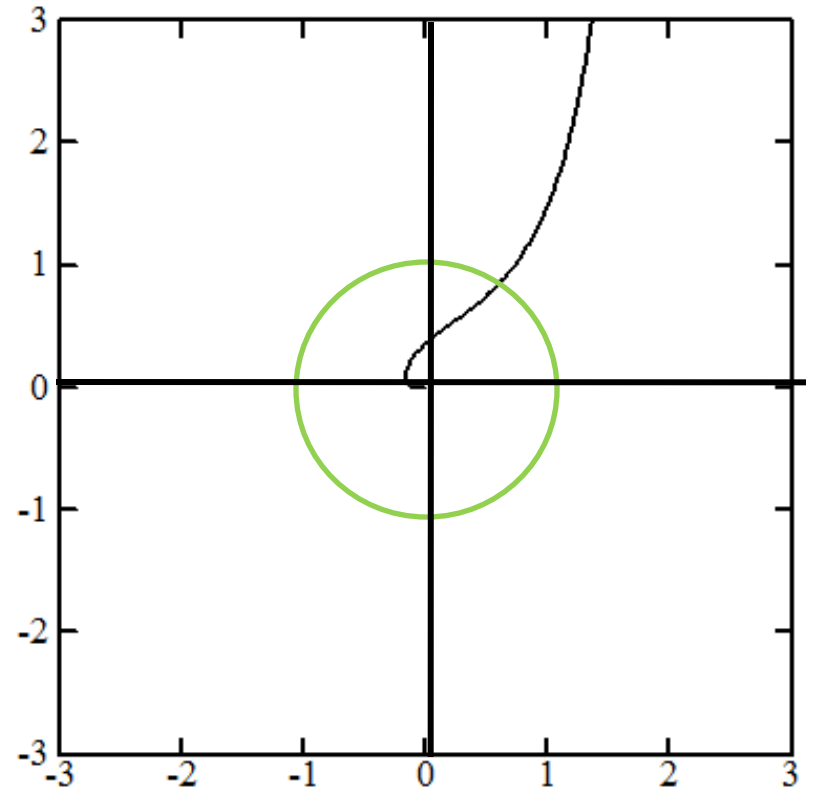
($b = 1.92, y_s = 100$) x

結果のグラフ②

・ガス抵抗を導入したとき
のグラフ ($\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$)

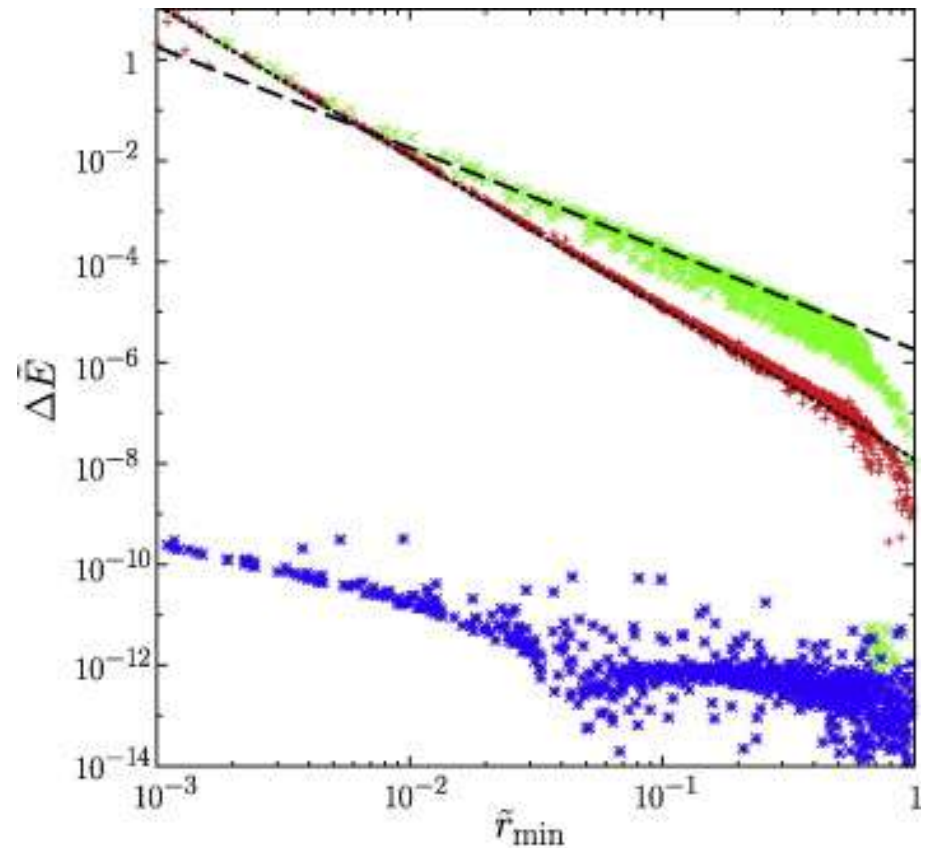
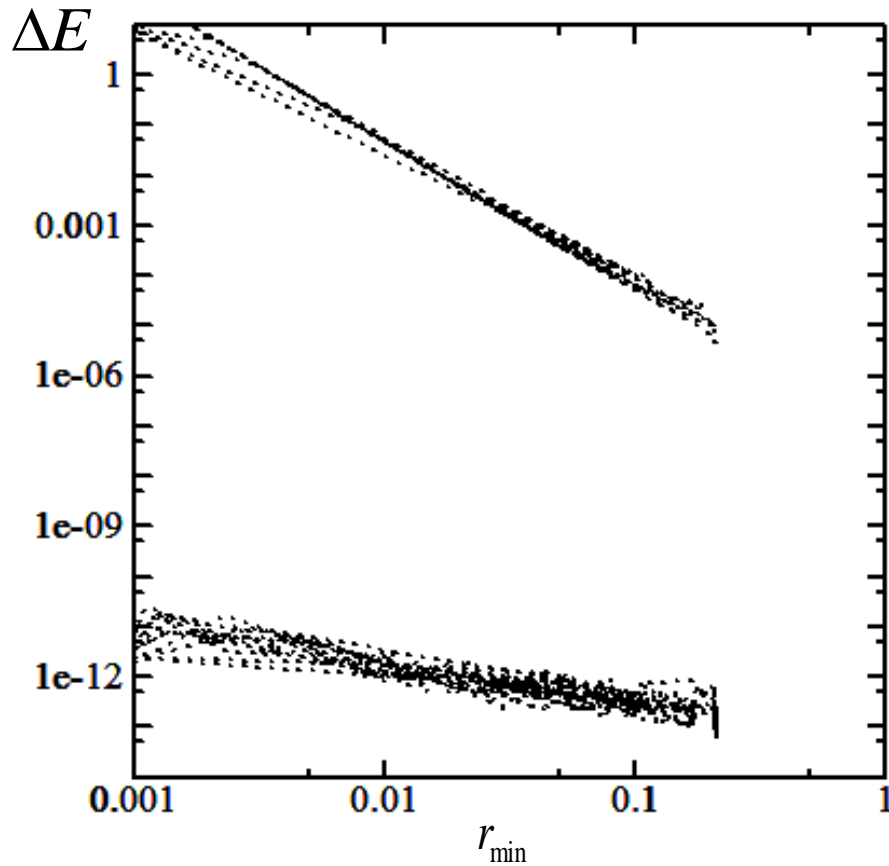


・ガス抵抗を導入したとき
のグラフ ($\alpha = 1.0 \times 10^{-2}$)



結果のグラフ③

ガス抵抗の影響下における、 $\Delta E (= E_0 - E)$ と r_{\min} の関係のグラフ

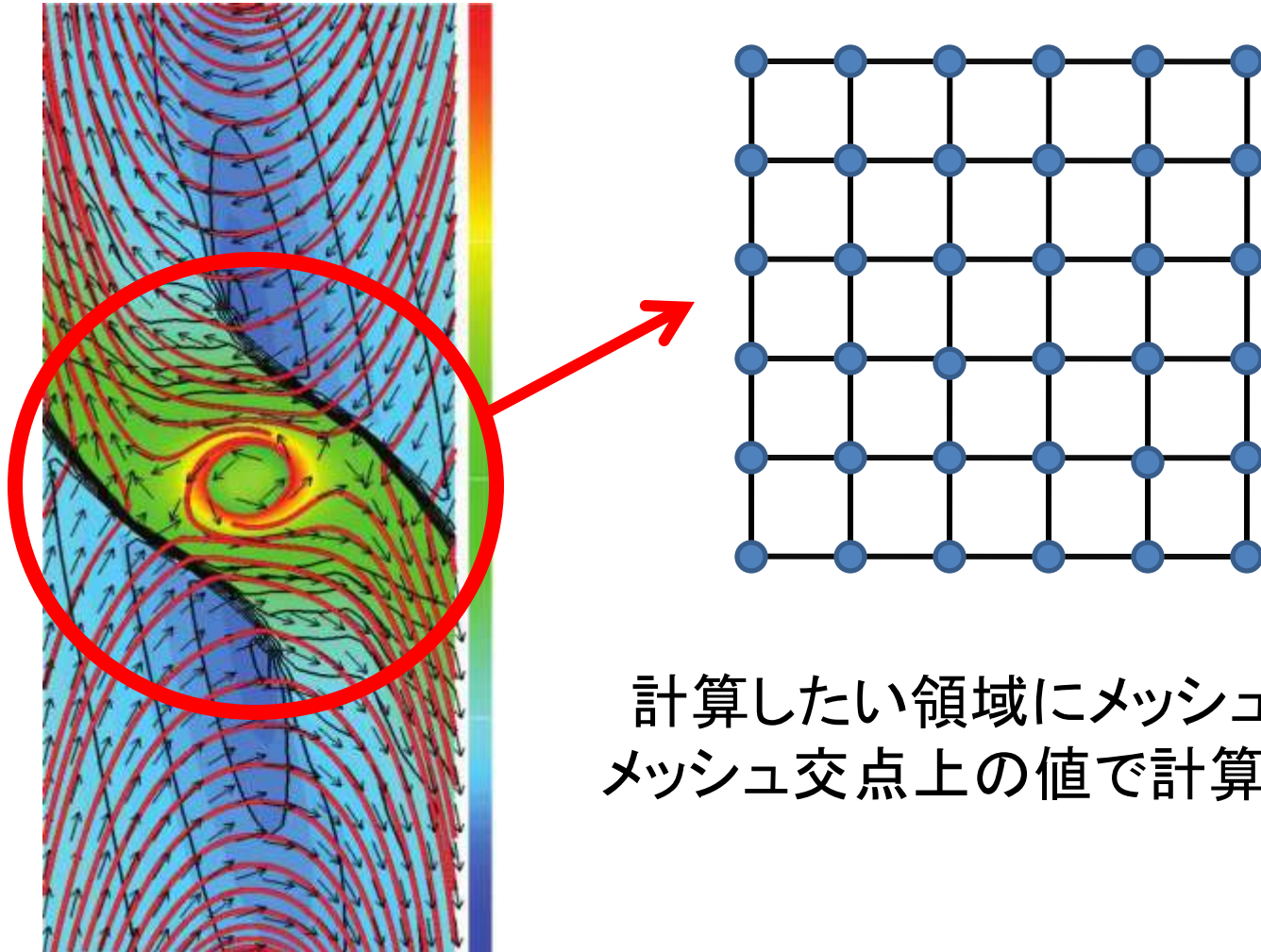


結果③

～流体計算により決定したガスの密度と
速度による、ガス抵抗がある場合～

流体計算について

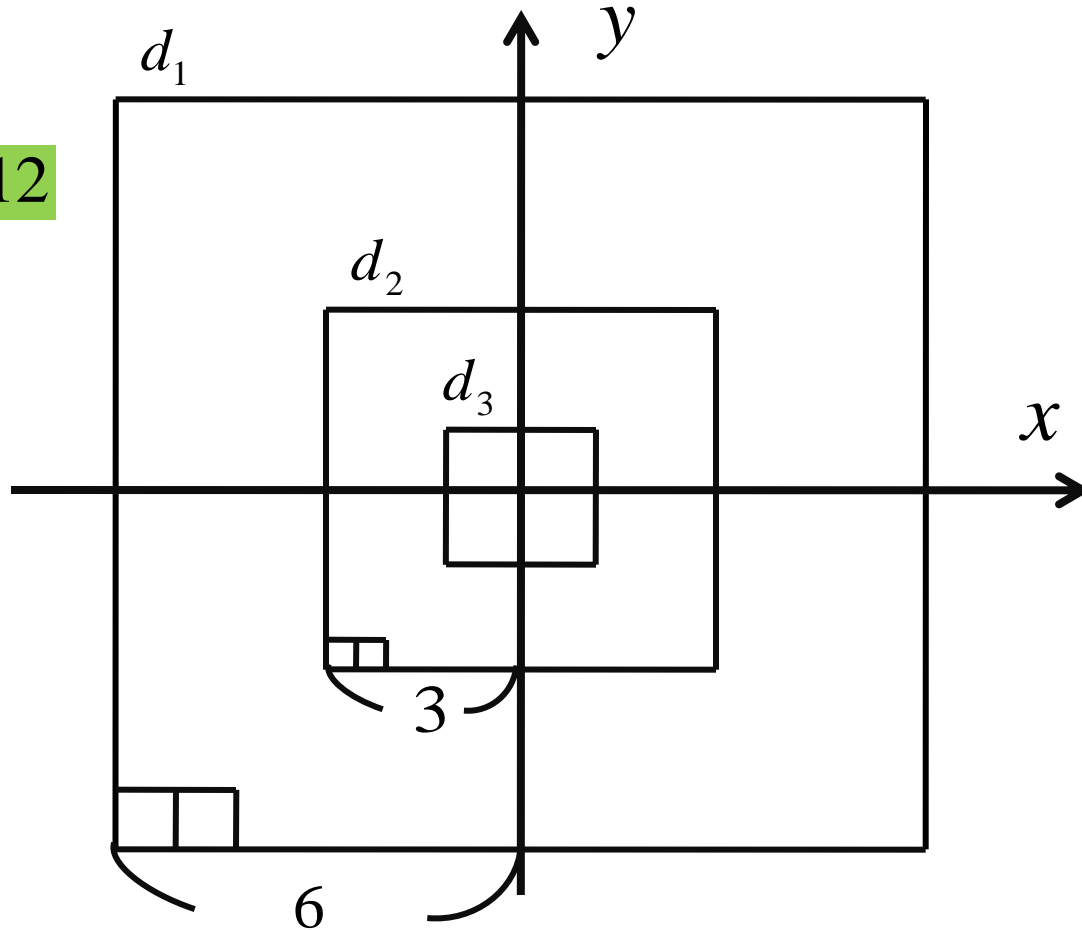
- ・流体は定常で、速度と密度は場所ごとに固定されている



計算したい領域にメッシュを張り、
メッシュ交点上の値で計算

多層格子法

$$d_x = 2^{1-x} \times 12$$



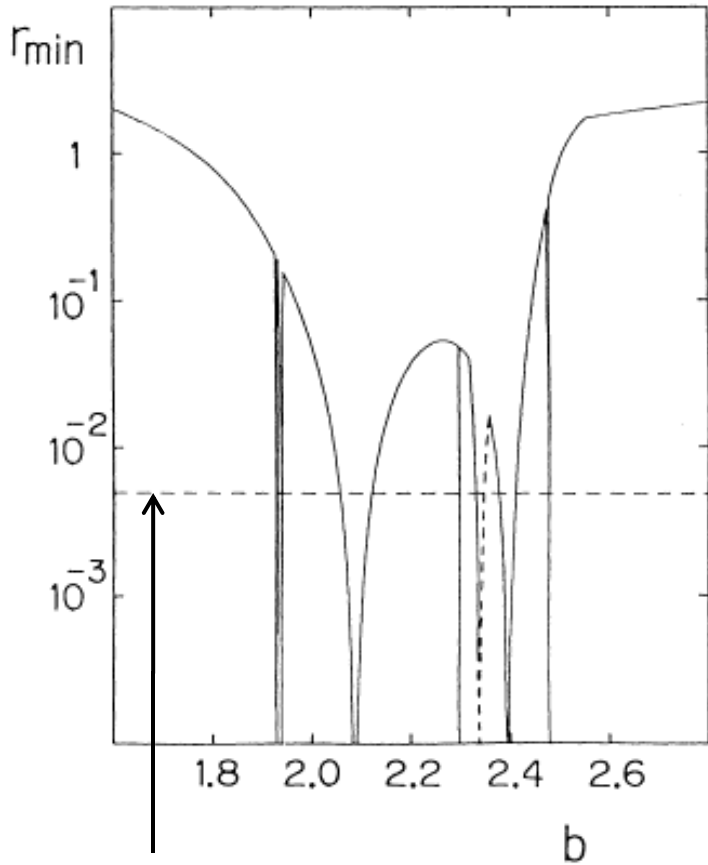
惑星付近だけ計算領域のメッシュを複数個重ねる。



惑星近傍のみ高解像度に計算

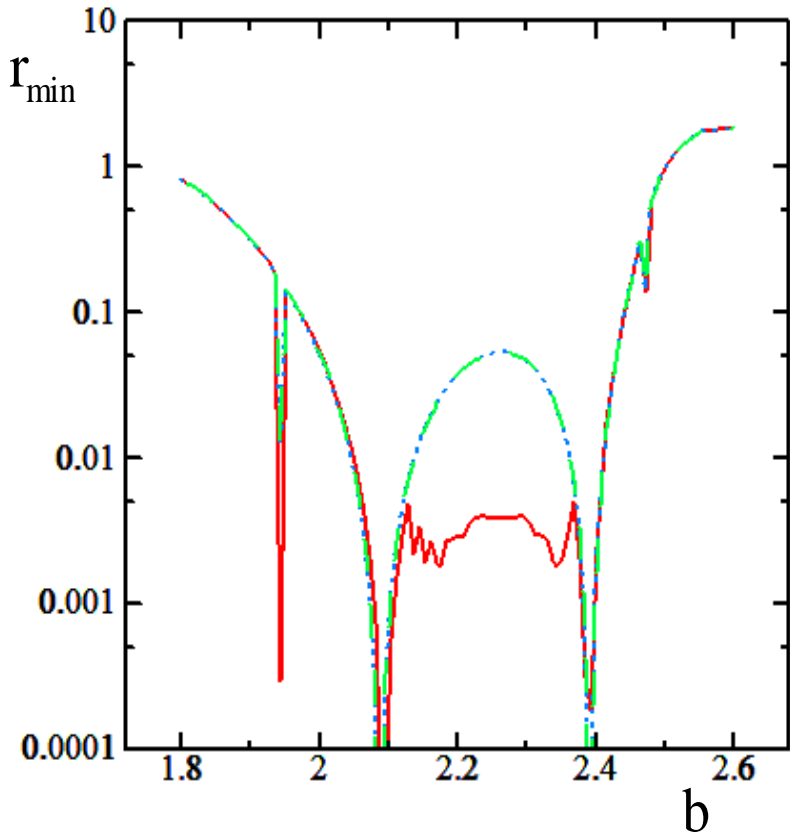
結果のグラフ①

bとrの最小値の関係



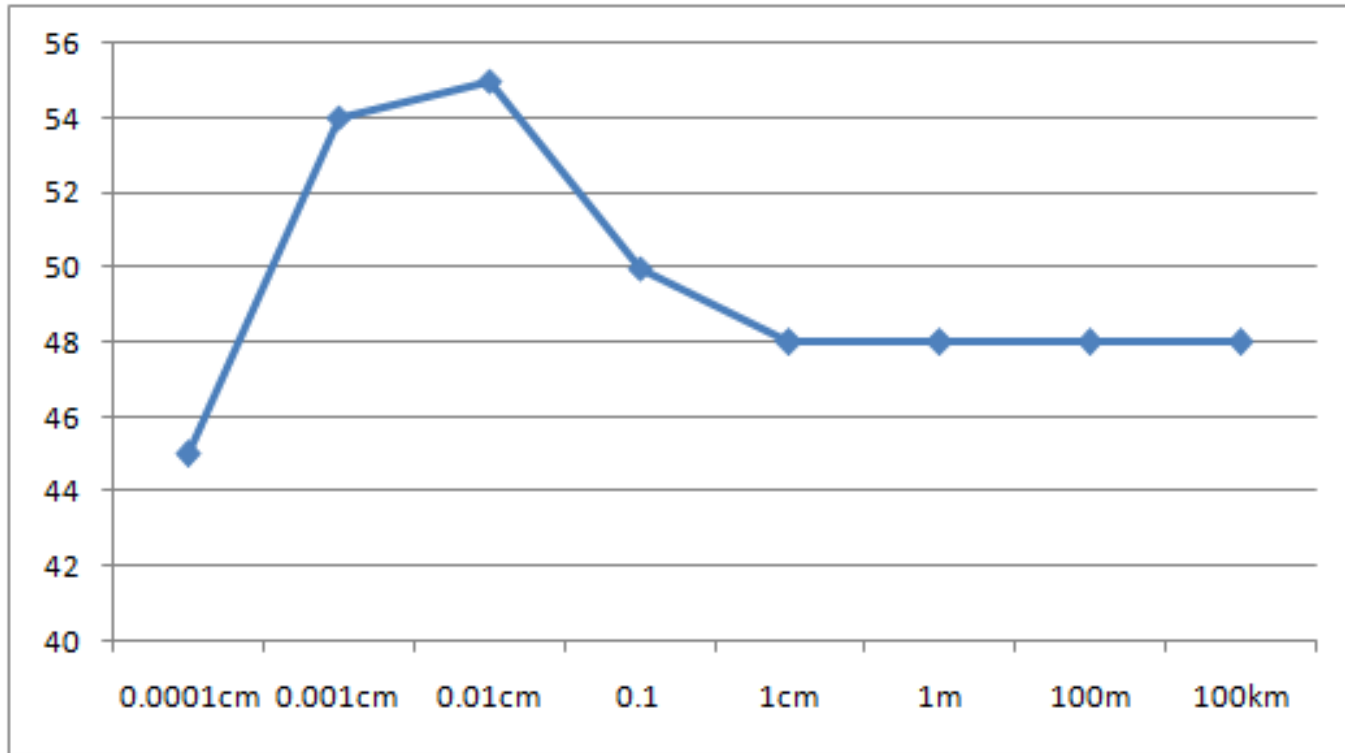
原始ガス惑星の半径

Ida & Nakazawa (1989), A&A, 224, 303



結果のグラフ②

N

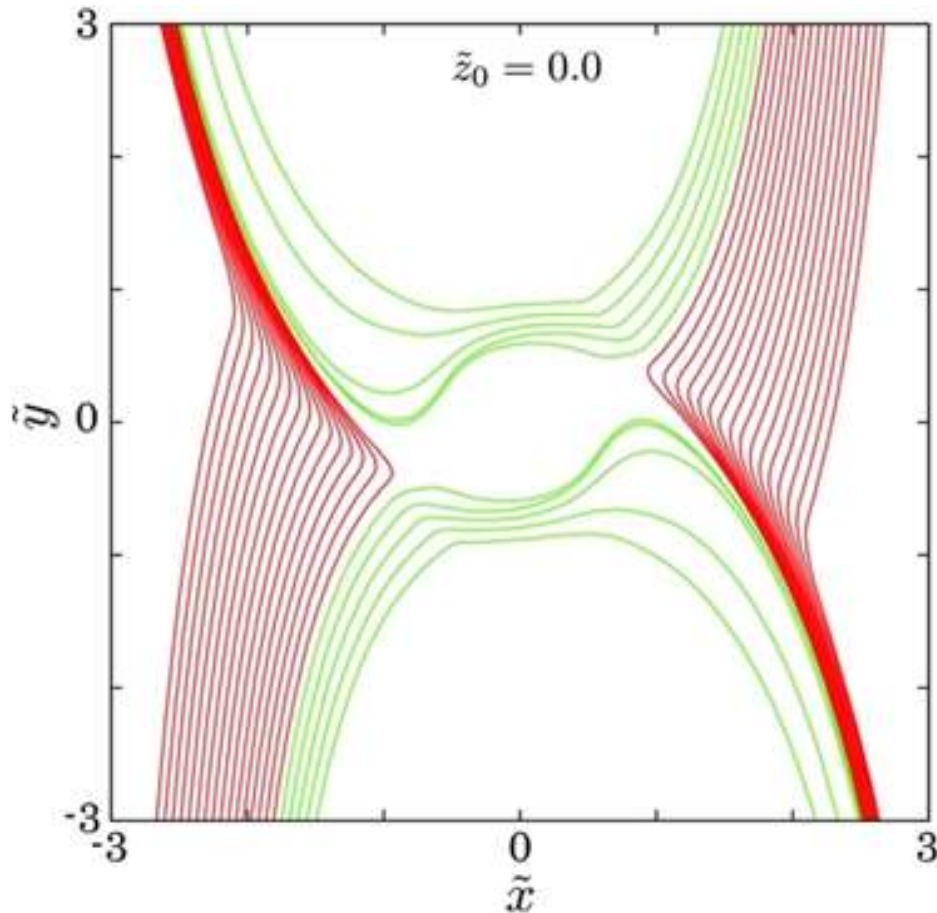


ダスト半径

N : 一定時間の間、ヒル圏内に
とらわれているダストの個数

$1.8 < b < 2.6$ (100個中)

赤道面 ($z=0$) でのガスの流れ



Tanigawa, Ohtsuki & Machida (2012)

結論

- ・ガスの影響がない場合、微惑星の軌道は先行研究のグラフとほとんど同じであることが確かめられ、また微惑星が木星に最も近づく距離においてもエネルギーが保存し、安定であることがわかった
- ・ガスによる抵抗がある場合、エネルギー散逸により、ガス惑星から微惑星が捕獲されることがわかり、 $\Delta E (= E_0 - E)$ と r_{\min} の関係のグラフが先行研究のグラフとおおよそ一致することがわかった
- ・テスト計算結果ではあるが、1 cm以上のサイズの微惑星(ダスト)はガス抵抗の影響をほとんど受けず、サイズが0.01cmより小さくなるとダストはガスと同じような運動をするようになり、惑星に捕獲されるダストの個数が減少しているのではないかと考えられる。

今後の取組み

- ・流体計算結果のデータをさらに精度よく補間して、より正確な軌道計算を行う
- ・微惑星(ダスト)の半径によってガス抵抗係数 C_D の値が変わるため、別で計算し、プログラムに組み込む
- ・微惑星のサイズごとの流入の様子をみて、どのように沈殿していくかなどを研究する