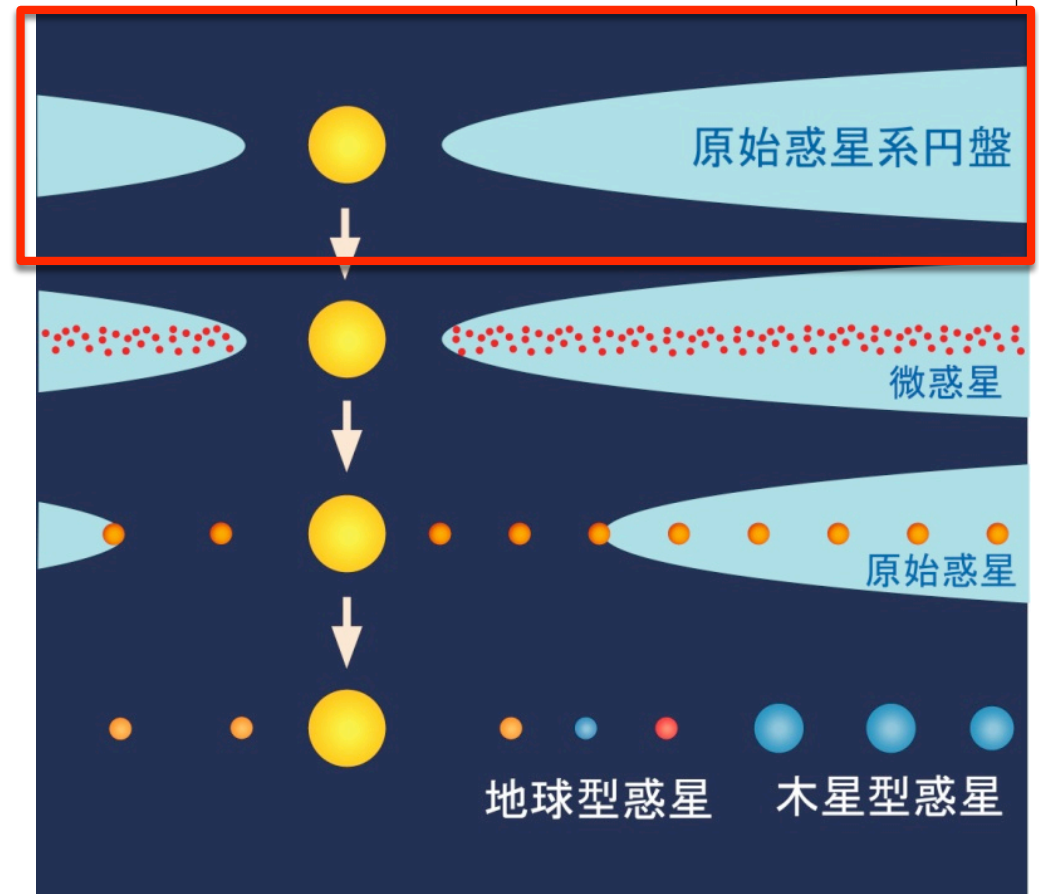


原始惑星系円盤初期における物質 の降着年代分布

惑星宇宙グループ 修士2年
安達 俊貴

惑星系形成論の概観

- 分子雲コアの収縮
- 原始惑星系円盤の形成
- 微惑星の形成
- 原始惑星の形成
- 地球型・木星型惑星の形成

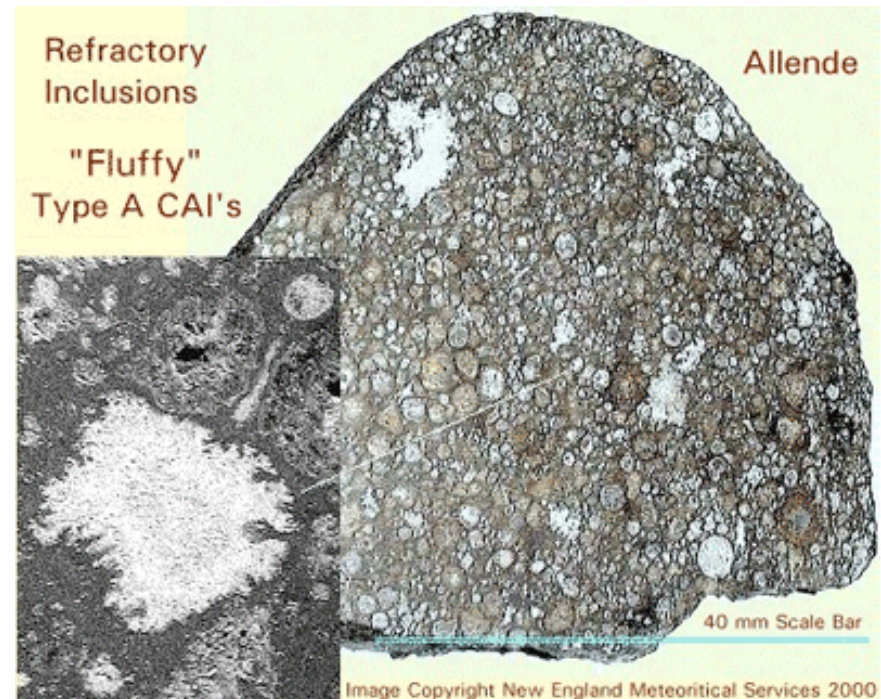


原始惑星系円盤とは

- 若い星(Tタウリ型星)を取り囲むガスと固体微粒子からなる円盤
- 惑星系形成の初期状態を決定
 - ガス・ダスト面密度, 温度など
- 理論的推定：標準モデル (Hayashi et al. 1985 など)
 - 現在の太陽系惑星配置から円盤面密度を推定
$$\Sigma = 1.7 \times 10^4 \left(\frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-3/2} \text{ kg/m}^2$$
- 円盤外縁部の観測 (Kitamura et al. 2002)
 - 円盤質量：0.01~0.1 Msolar
 - 面密度：100AU で 1~100 kg/m² 程度

隕石に見られる物質年代の違い

- 難揮発性包有物 (CAI)
 - 分子雲コア収縮開始
～数十万年で形成
- コンドルール
 - CAI 形成後～200万年間
断続的に形成
- 形成年代の違う物質が
混ざっている



http://eps.berkeley.edu/cig/depaolo/eps102/PPT4_Meteorites.html

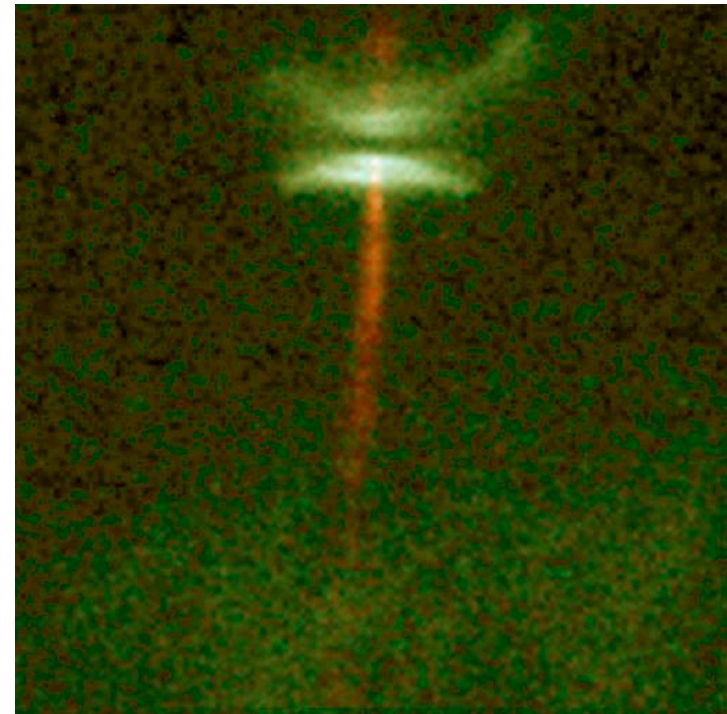
小天体に見られる物質の温度履歴

- CAI, コンドルール vs マトリクス
 - CAI, コンドルールは高温環境を経験して形成
 - マトリクスは比較的低温環境が起源
- 彗星 (Wild 第2彗星)
 - 彗星の起源はカイパーベルト(低温環境)
 - NASA のスターダスト計画(1999-2006)で彗星から放出された微粒子を捕獲
 - サンプルから高温環境下で生成された物質を発見

形成環境が違う物質はどのように混ざるのかが問題

先行研究

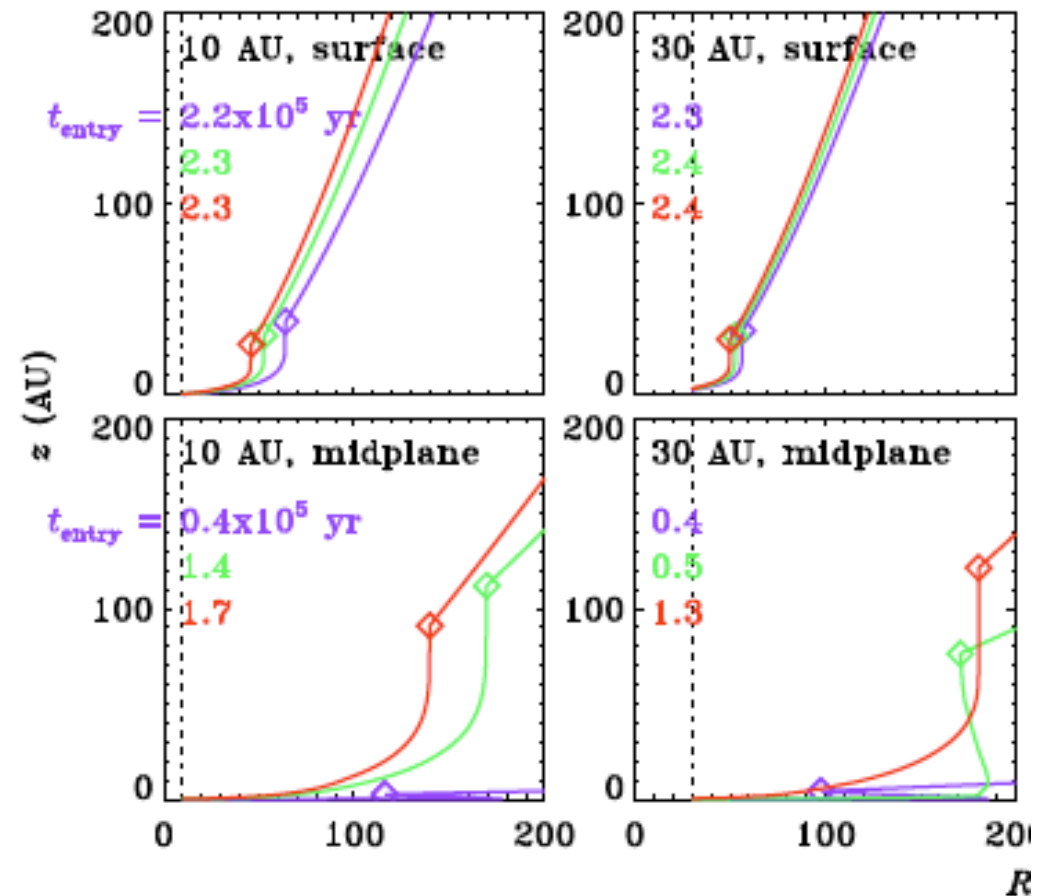
- X-wind モデル (Shu 2001 など)
 - 中心星近傍で形成された高温起源物質が双極流によって円盤全体に再配置
 - 定量的にはまだよくわかっていない
- ガスの粘性で輸送するモデル
 - Ciesla 2007 など
 - 降着終了後の定常円盤を仮定
- 円盤内の組成分布を知るためには, 円盤形成初期から物質移動を追う必要あり



<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/24/image/e/>

先行研究

- Visser et al. 2009:
 - 分子雲コアでの位置と円盤での位置を対応付け
 - 分子雲から円盤までの物質の移動を smoothed particle method で計算
 - 計算の近似精度の妥当性が不明



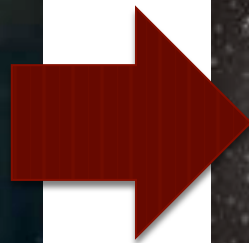
Visser et al. 2009 より

本研究の目的

- 円盤形成初期段階での物質配置過程の考察
 - 降着物質がいつ, どこに落ちて, どこに行くのかを追う
 - 降着時間 or 位置別要素濃度の時間変化
シミュレーション
- 最終的には, 原始惑星系円盤の初期状態を決定するための手がかりを得たい

原始惑星系円盤形成の アウトライン

- 分子雲ガスがコアの中心に落下
- 角運動量保存により中心星重力と遠心力が釣り合って円盤を形成



基礎方程式

- 年代成分, 降着位置成分を考えたガスの
動径 1 次元輸送方程式 (Morfill & Voelk 1984 より改変)

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{r} \left[r^{1/2} \frac{\sigma_{ji}}{\Sigma} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Sigma \nu r^{1/2} \right) \right]}_{\text{移流拡散項}} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\Sigma \nu r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\sigma_{ji}}{\Sigma} \right) \right]}_{\text{濃度拡散項}} + \underbrace{S_{ji}}_{\text{源泉項}}$$

Σ : 円盤ガス面密度

σ_{ji} : 年代 j 種, 降着位置 i 種のガス成分の面密度

ν : 乱流粘性係数 (α モデル: Shakura & Sunyaev 1973)

α 一定を仮定

$$\nu = \alpha c_{sd}^2 / \Omega_K$$

S : 源泉関数

基礎方程式

- 源泉項

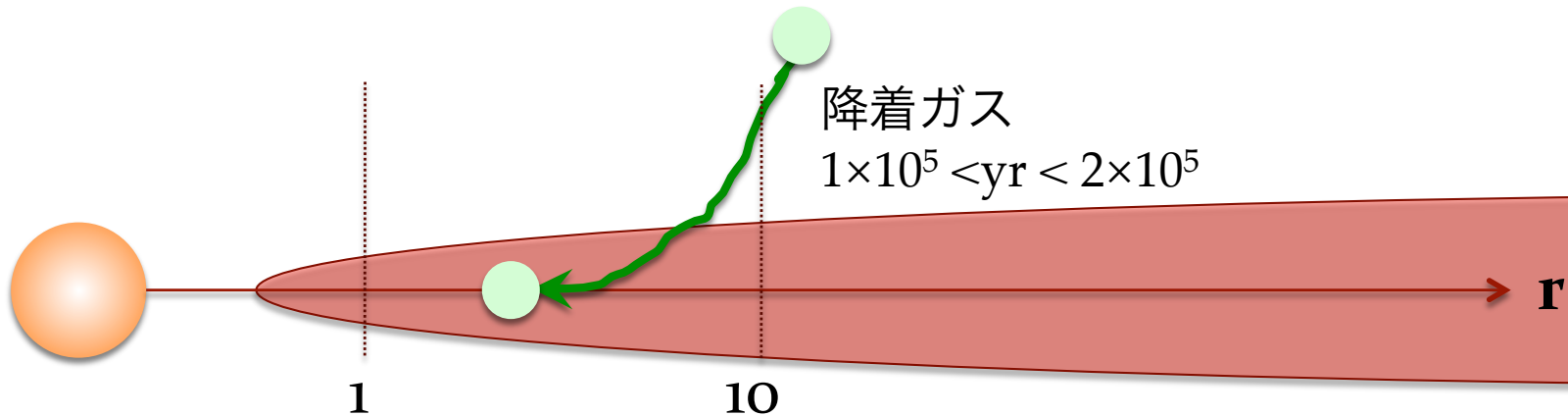
$$S_{j,i} = a_j b_i S, \quad S = \frac{\dot{M}}{4\pi r R_d} \left(1 - \frac{r}{R_d}\right)^{-1/2}$$

分子雲コアからの質量降着率
円盤半径

$$a_j = \begin{cases} 1 & \text{if } (j-1) \times 10^5 \text{ yr} \leq t < j \times 10^5 \text{ yr}, \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{if } r_i \leq r < r_{i+1} \\ 0 & \text{else,} \end{cases}$$

$r_i = (0.1, 1, 10, 100) \text{ AU}$
 例) $1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5$ 年の間に 5AU の位置に
 落ちてきたガス : $j=2, i=2$



利用したモデル

- 分子雲コアからのガス流入: Inside Out 収縮 (Shu 1977)

$$\dot{M} \sim c_{\text{sc}}^3 / G$$

- 円盤形成モデル:
Cassen & Moosman 1981

- 円盤温度は中心星からの放射加熱のみ考慮

$$T_d = 280 \left(\frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-1/2} \left(\frac{L_*}{L_\odot} \right)^{1/4} \text{ K}$$

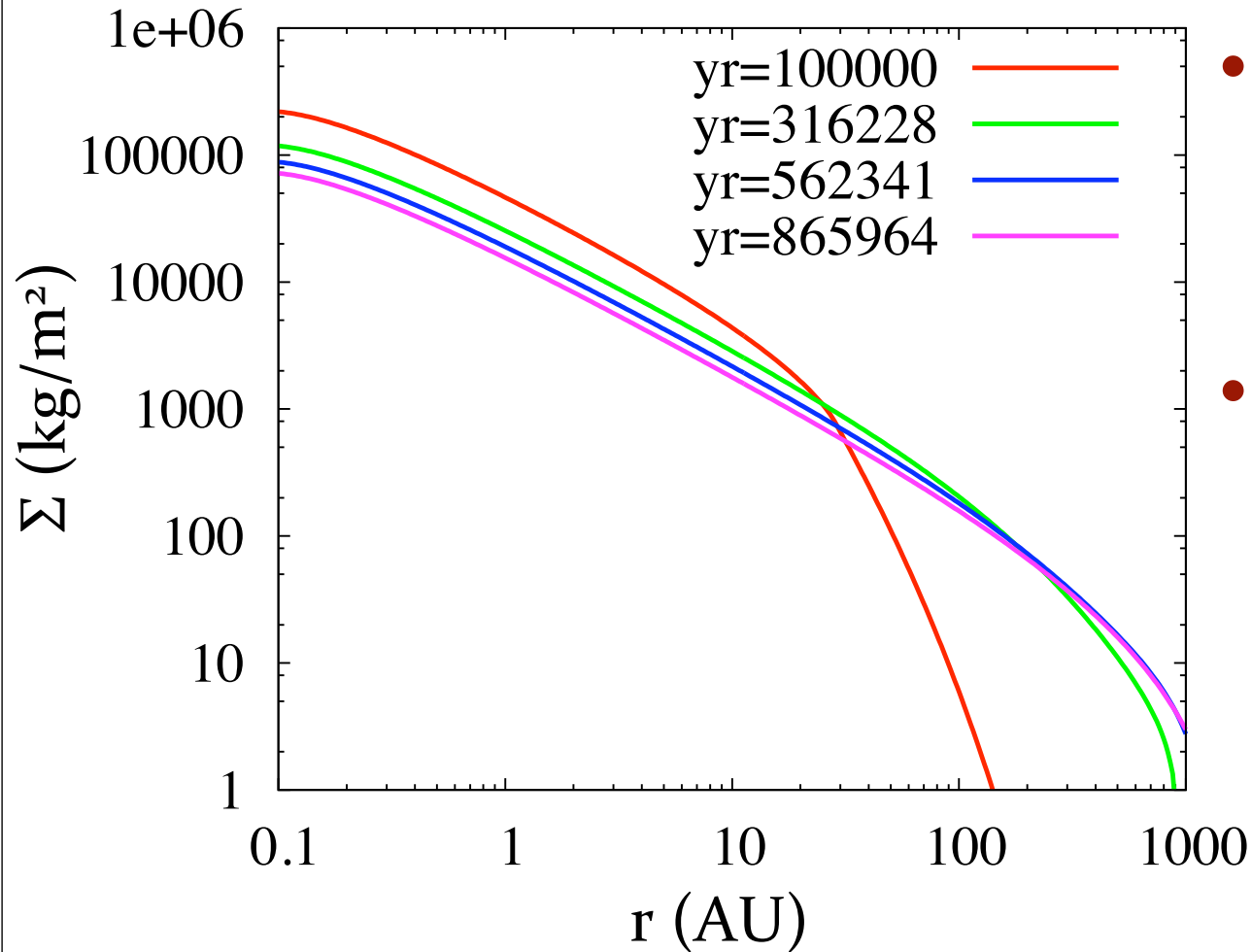
- 簡単のため $L^* = L_{\text{solar}}$

パラメータ

- 典型的な値を用いた
 - 今後パラメータスタディを行う予定

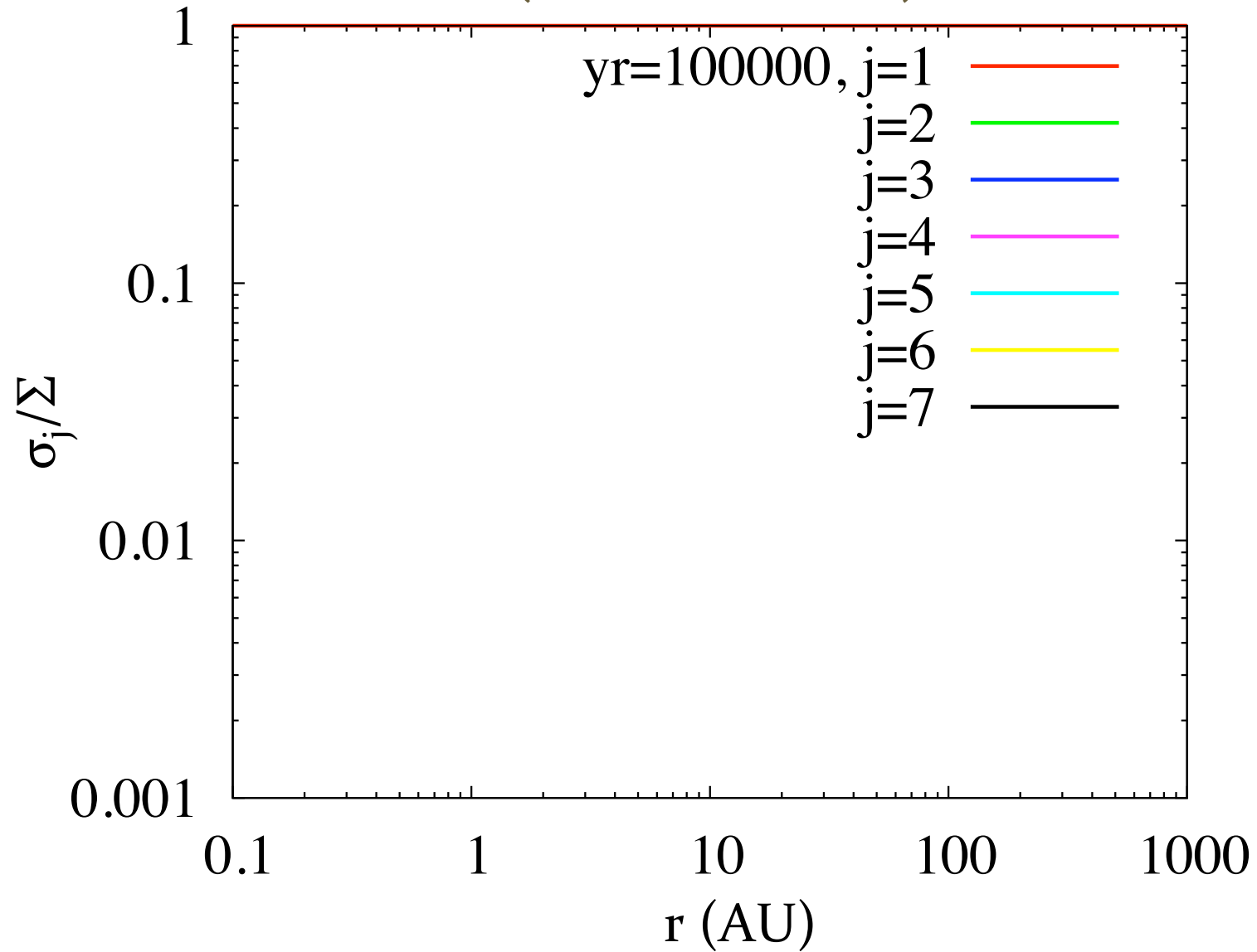
粘性パラメータ α	0.01
分子雲コア回転角速度 Ω_0	$1 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$
分子雲コア温度 T_0	15.0 K
分子雲コア質量 M_0	$1 M_{\text{sun}}$
中心星半径 R_{star}	$3 R_{\text{sun}}$

結果: 面密度分布

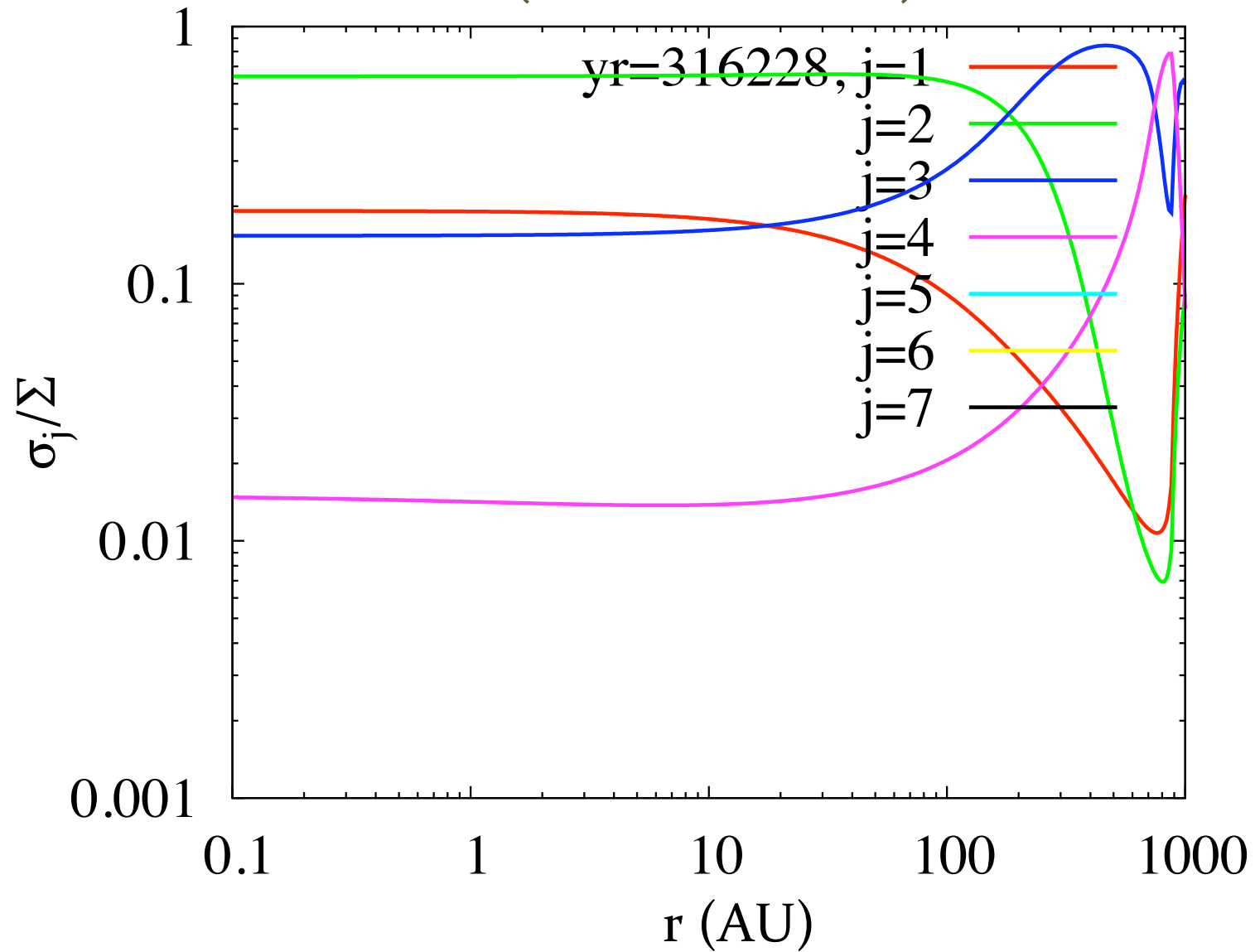


- 内側:
1AUにおける面密度は標準モデルと概ね一致
- 外側:
100AUにおける面密度は観測される最大のものと概ね一致

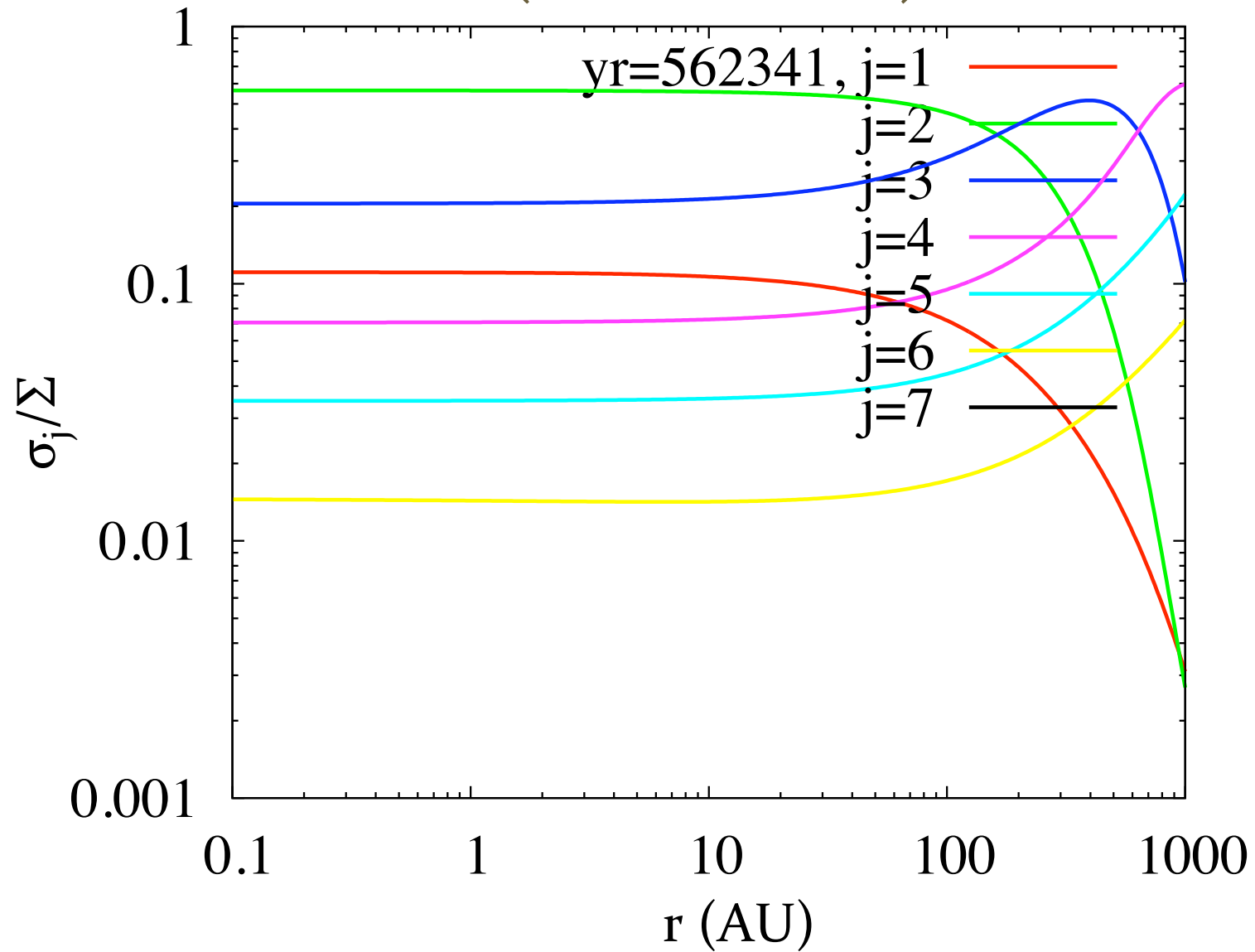
結果: 濃度(降着年代)



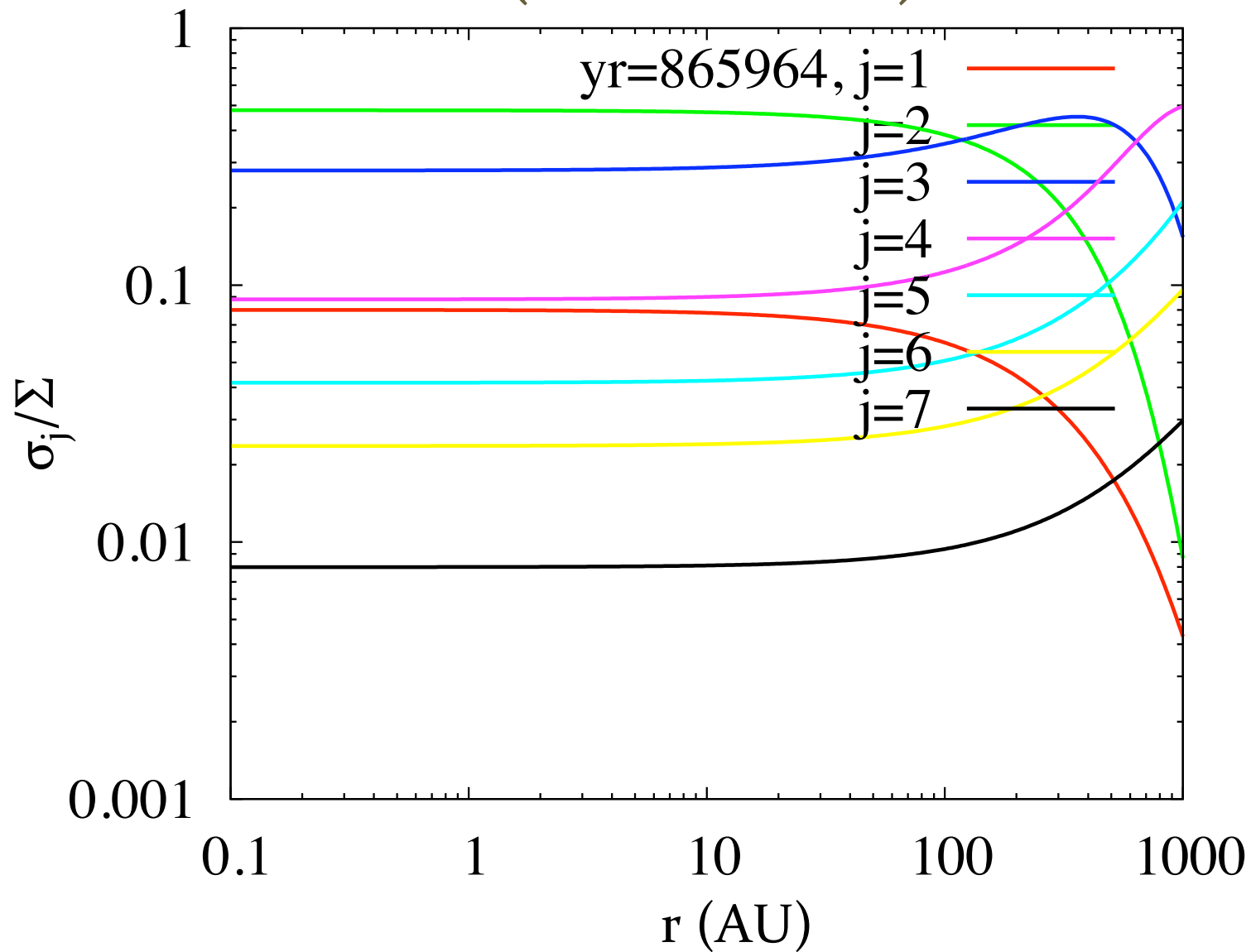
結果: 濃度(降着年代)



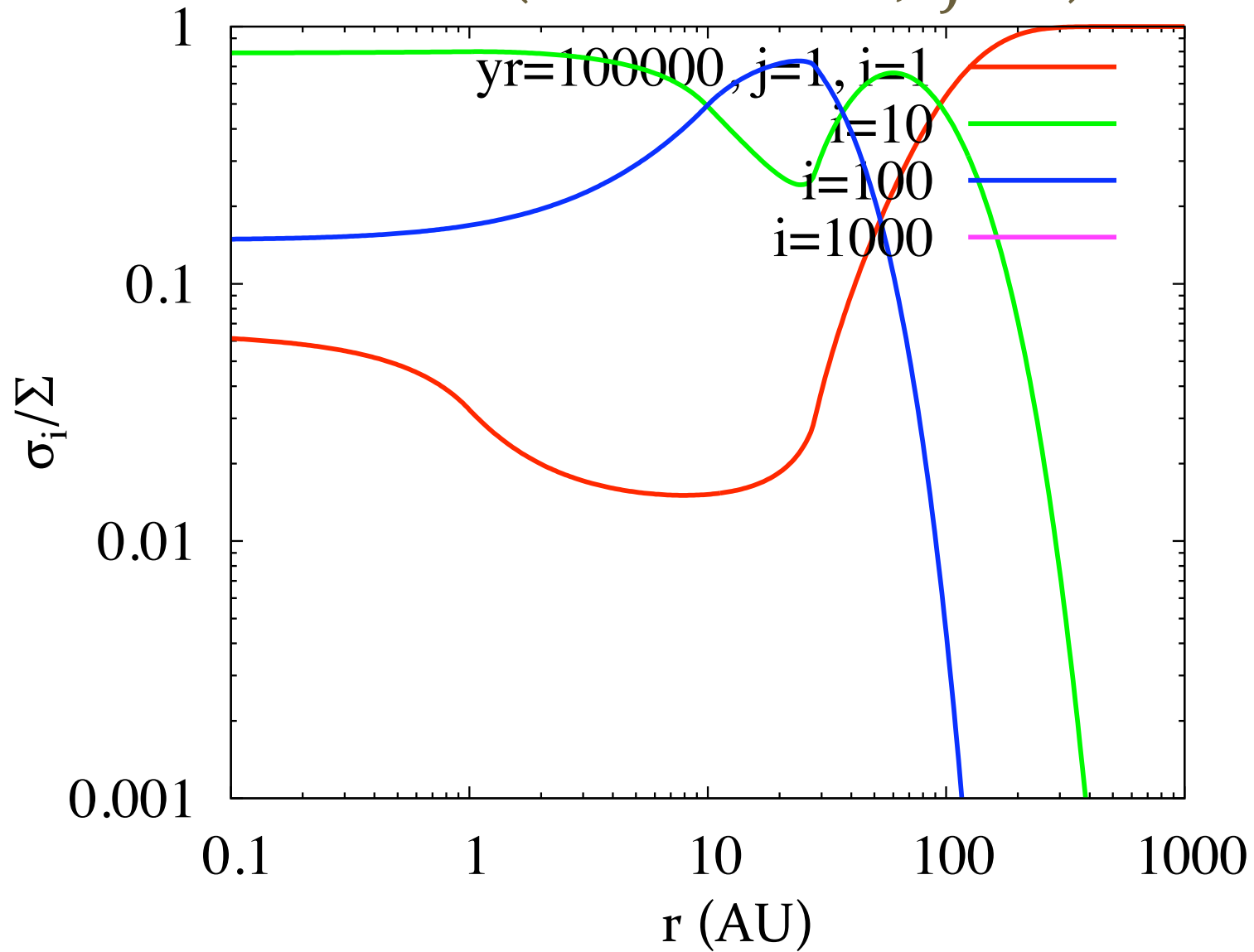
結果: 濃度(降着年代)



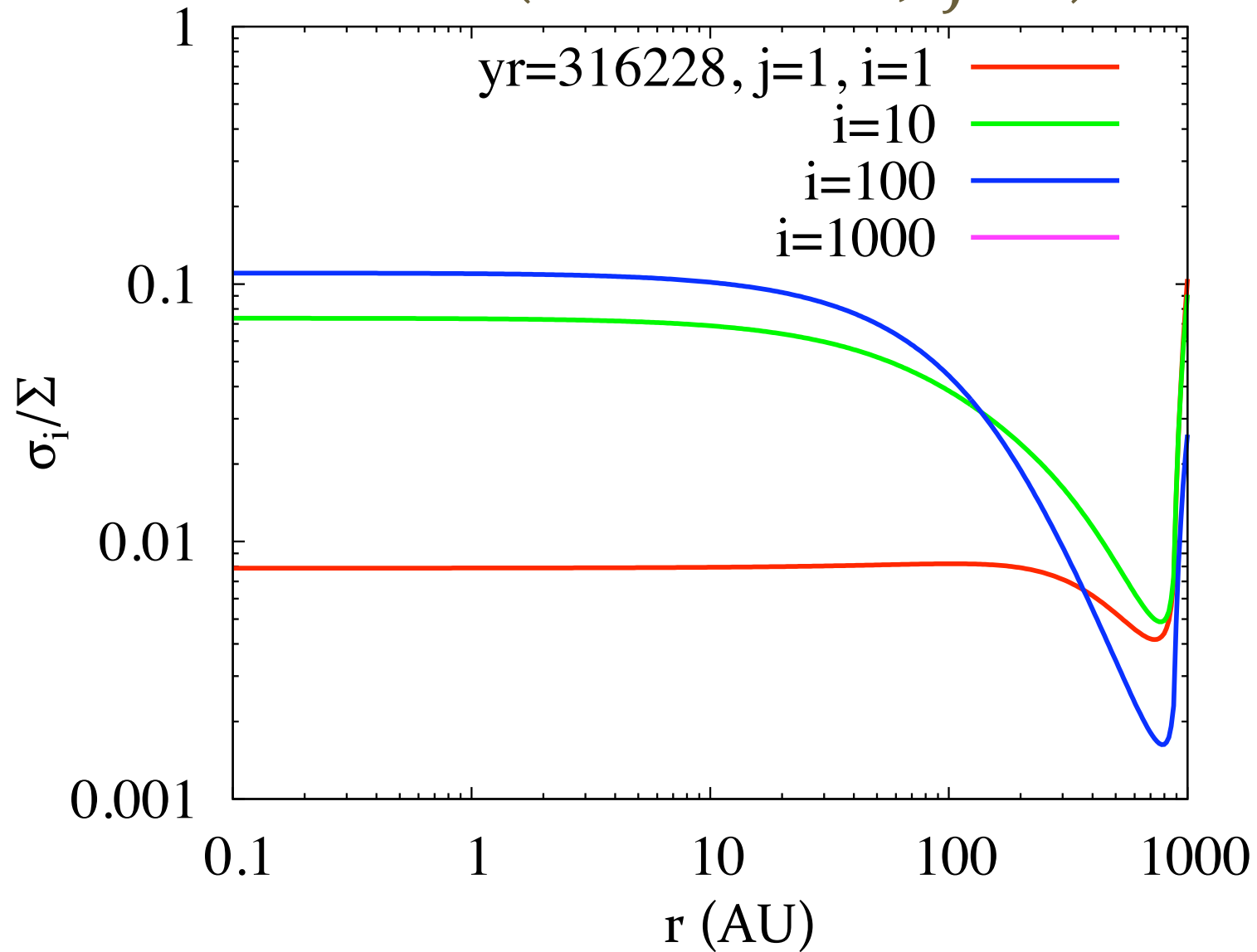
結果: 濃度(降着年代)



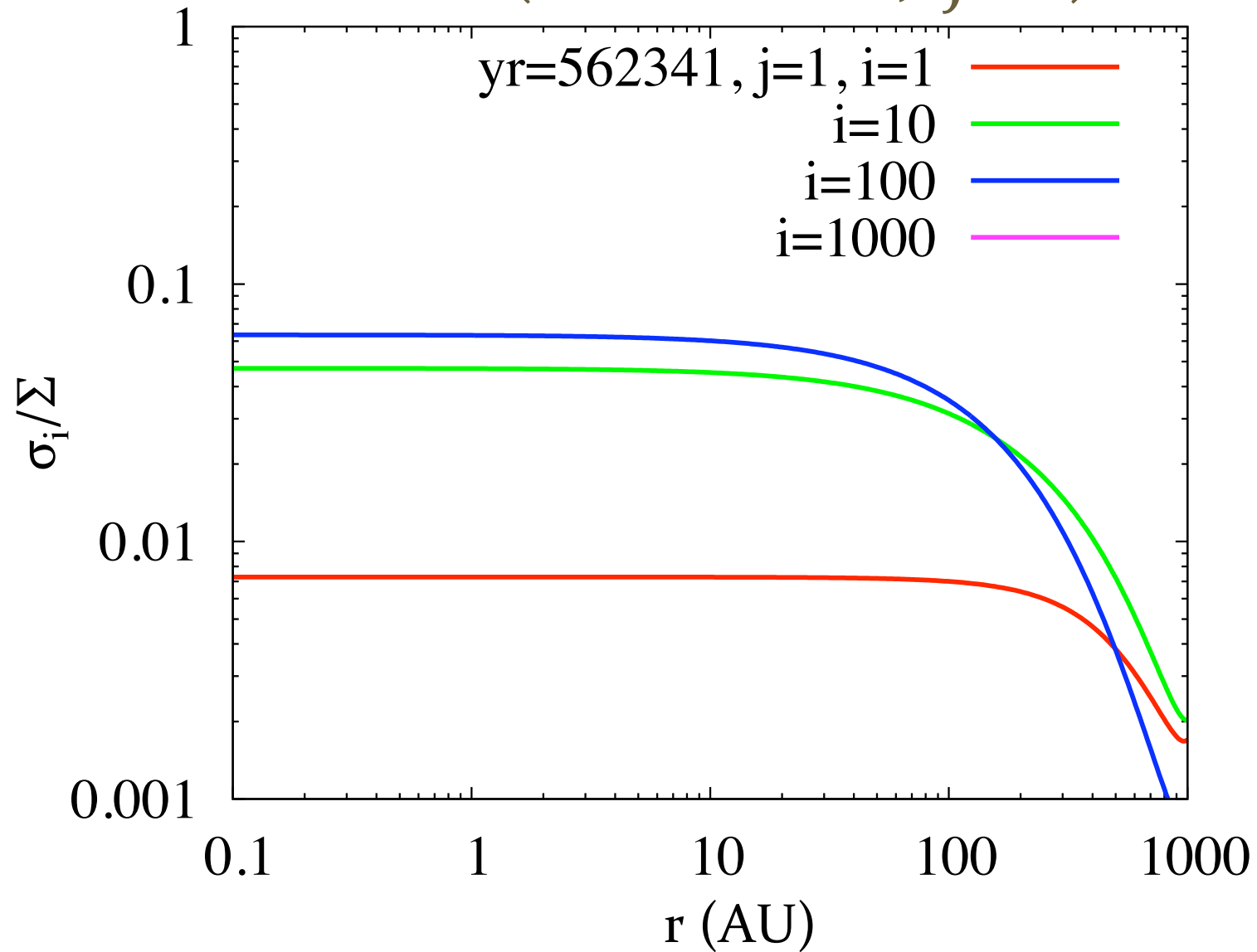
結果: 濃度(降着位置, $j=1$)



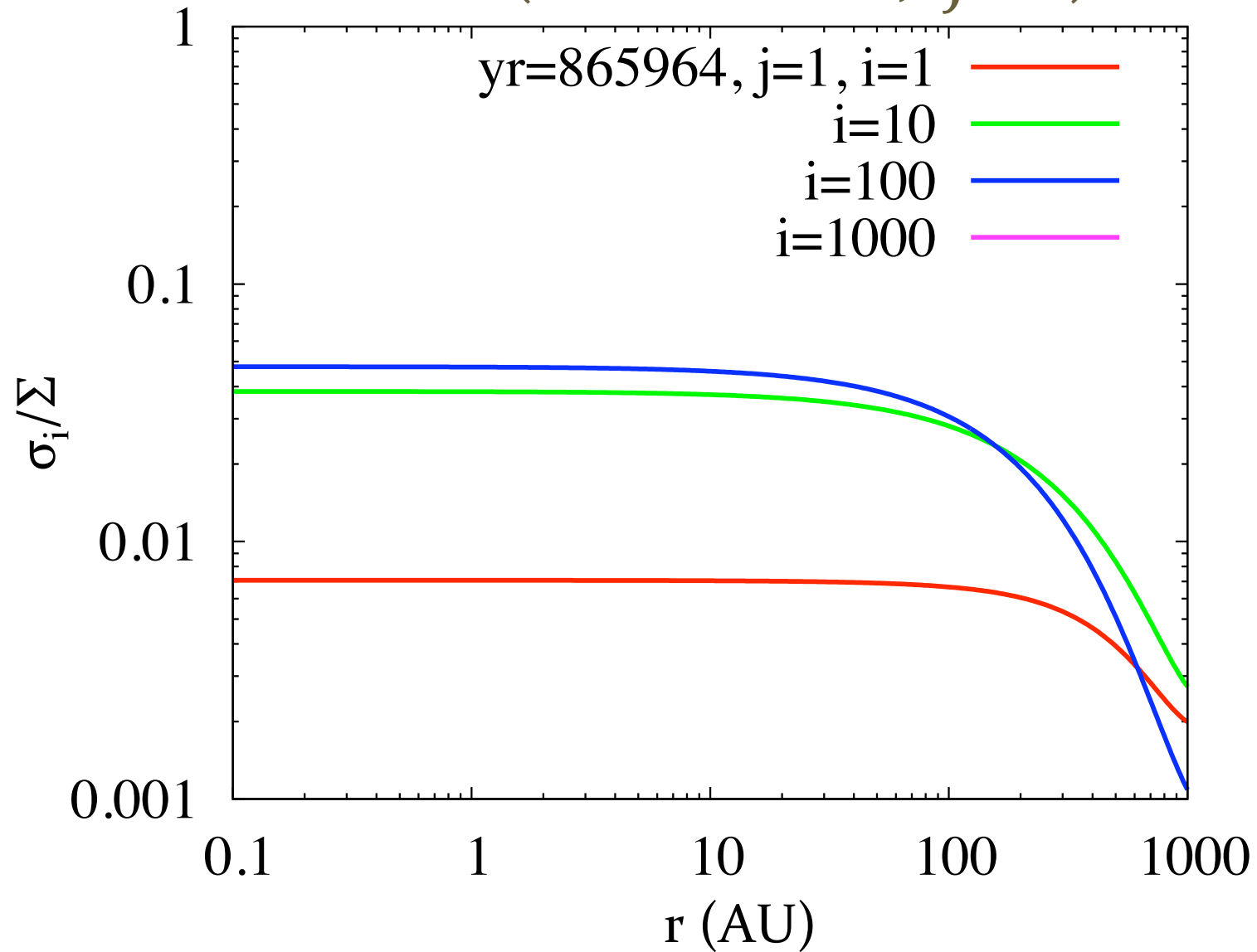
結果: 濃度(降着位置, $j=1$)



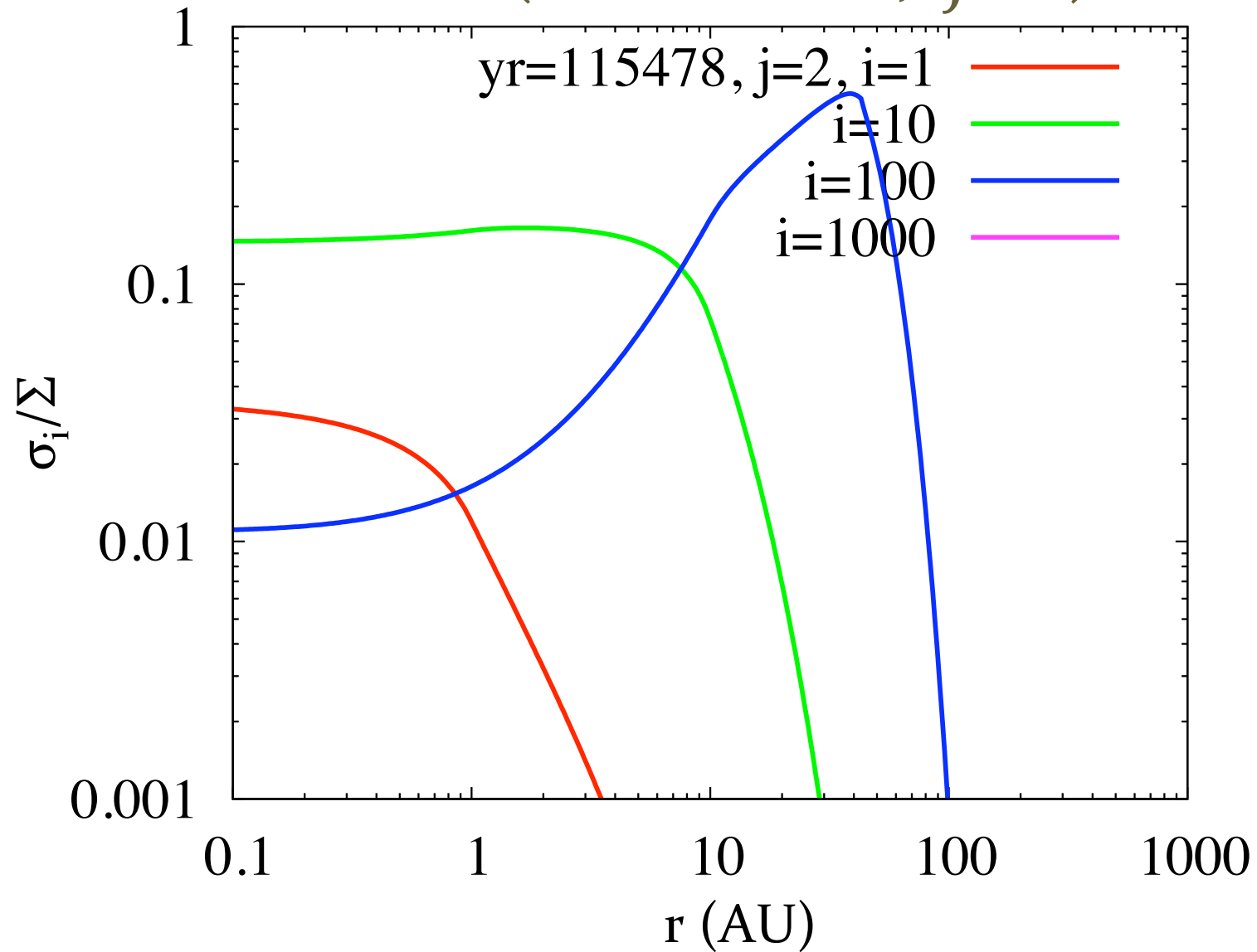
結果: 濃度(降着位置, $j=1$)



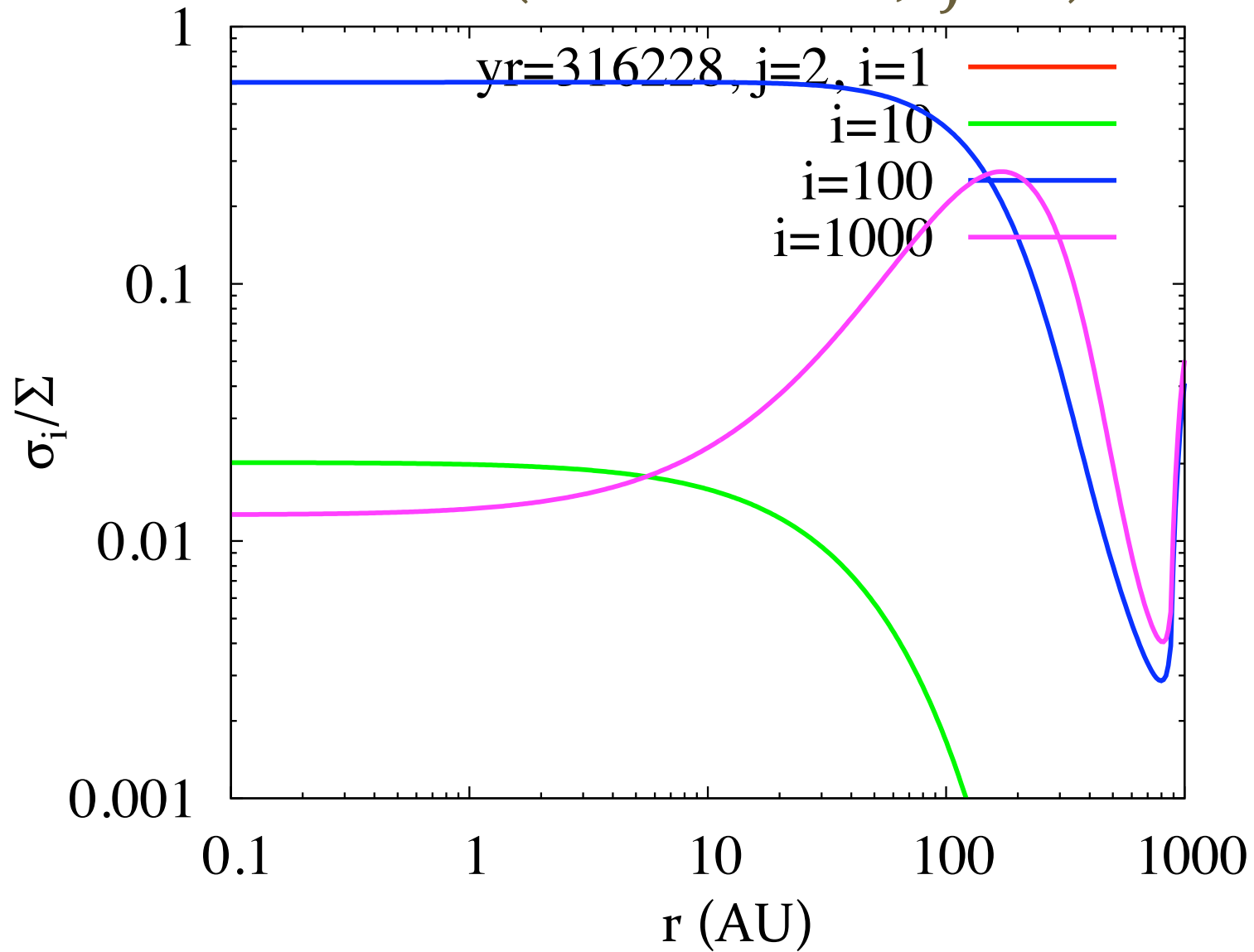
結果: 濃度(降着位置, $j=1$)



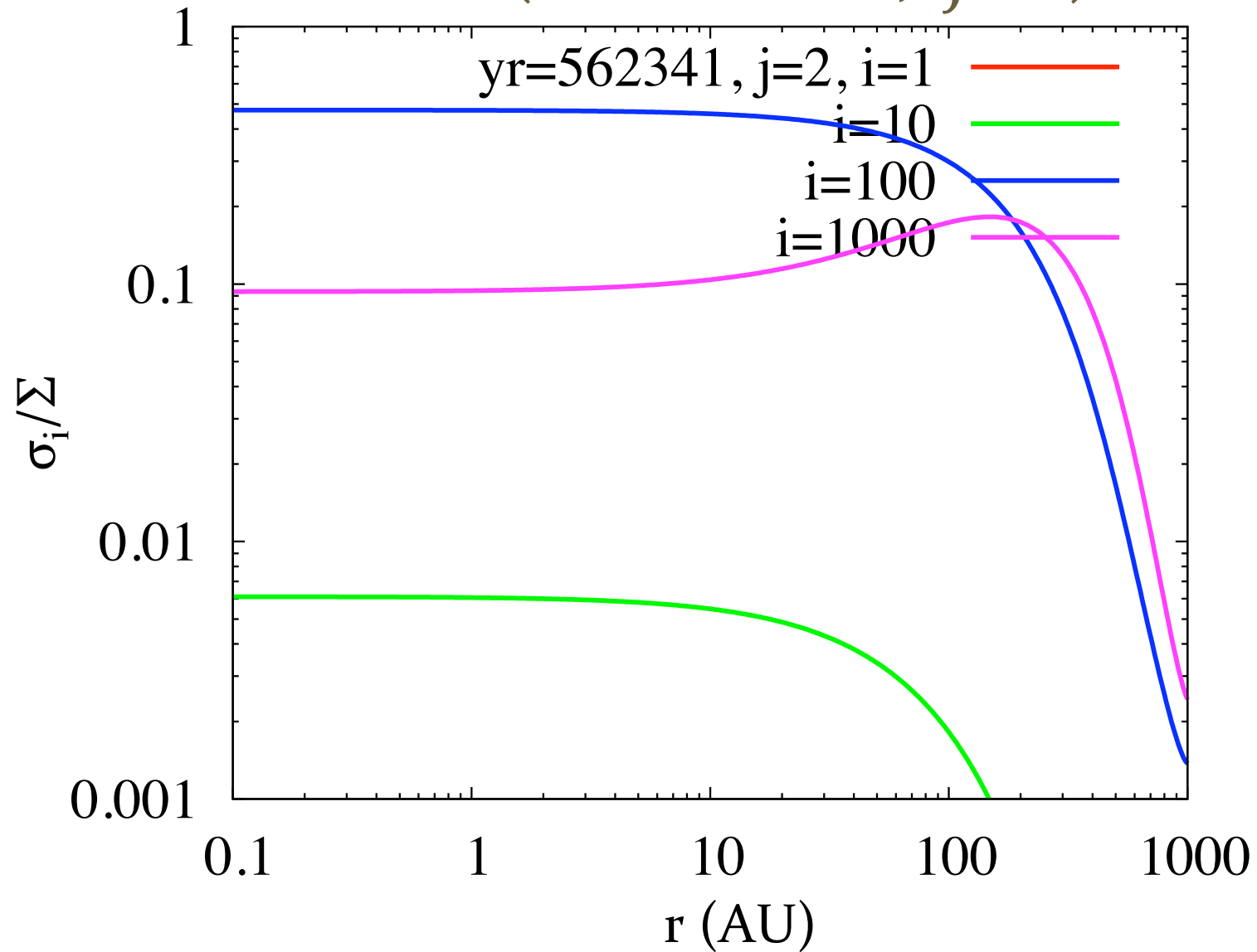
結果: 濃度(降着位置, $j=2$)



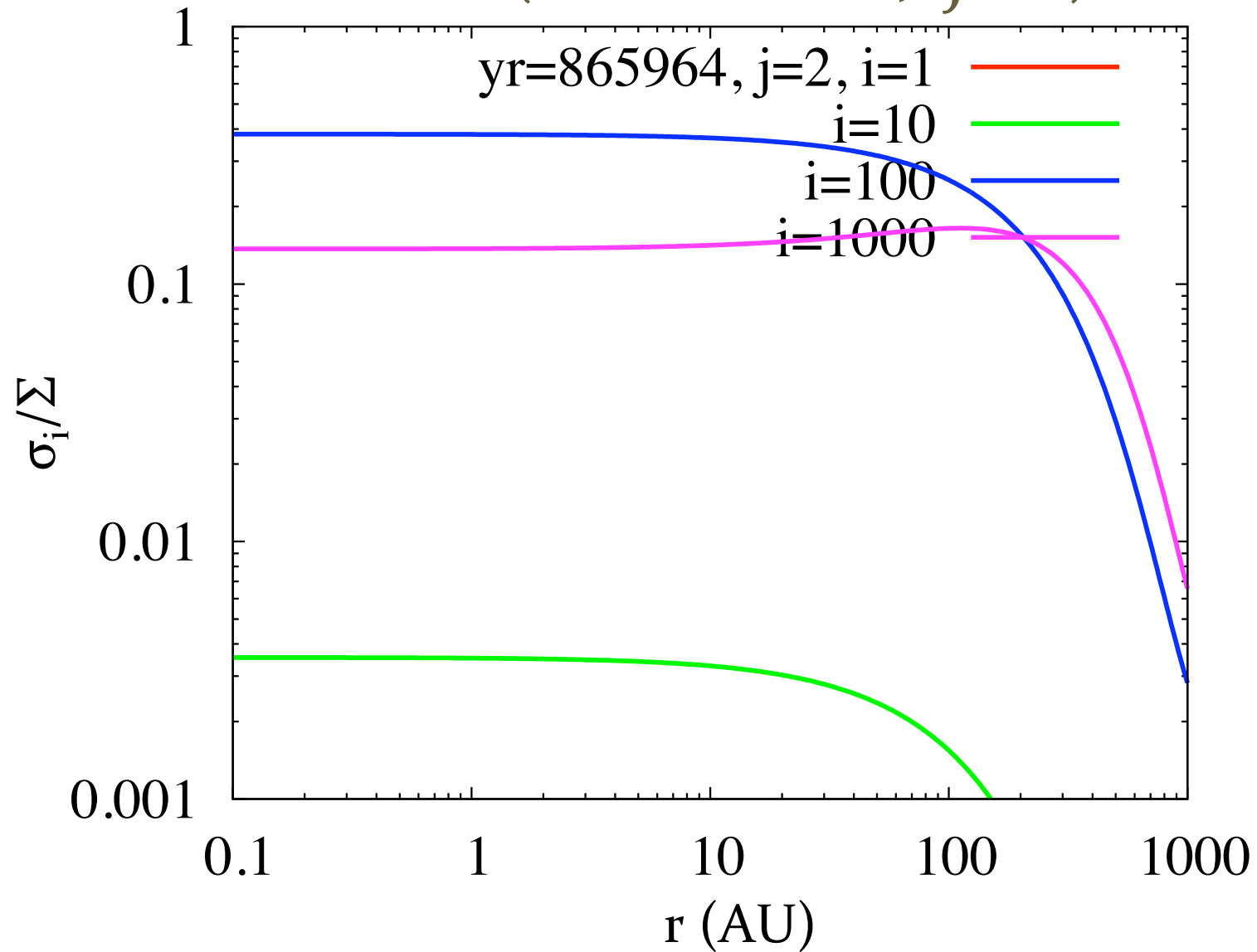
結果: 濃度(降着位置, $j=2$)



結果: 濃度(降着位置, $j=2$)



結果: 濃度(降着位置, $j=2$)



結果

- 年代:
 - 降着終了直後では, 分子雲収縮開始から 0.1~0.2Myr の間に落ちてきたものが面密度の約半分を占める
- 位置:
 - 中心星から 10~100AU の位置に落ちてきたものが小惑星帯, カイパーベルトの位置で卓越

パラメータ依存性の見込み

- α 依存性
 - 値を小さくすると粘性小
 - ガスの動径移動が小さくなる
 - 円盤内側($\sim 100\text{AU}$)での古い物質の割合が上がる可能性
- Ω_0 依存性
 - $R_d \propto \Omega_0^2$ の関係
 - Ω_0 小だと R_d 小
 - 古い物質はより中心星の近傍に落ちて濃度が減少する可能性

今後の展望

- パラメータスタディ
- 温度進化の組み込み
 - 粘性加熱を考慮
 - 現状では中心星からの放射のみ考慮
 - 重力エネルギー解放による中心星光度の変化を考慮
 - 現状では中心星光度が一定
- 物質がどのような温度履歴を受けるか調べる

まとめ

- 円盤形成初期段階での降着年代, 降着位置別の濃度進化を計算
 - 古い物質, 特に 10~100AU に落下した物質が比較的多く小惑星, カイパーベルト領域に存在
- パラメータの変化によって解がどのように変化するか調査する必要あり
- 物質移動の間の温度プロファイルを調べる必要あり

参考文献

- Cassen, P.; Moosman, A., On the formation of protostellar disks, 1981, *Icarus*, vol. 48, p. 353-376.
- Ciesla, F.J., Outward Transport of High-Temperature Materials Around the Midplane of the Solar Nebula, 2007, *Science*, Volume 318, Issue 5850, pp. 613-.
- Hayashi, C.; Nakazawa, K.; Nakagawa, Y., Formation of the solar system, *Protostars and planets II*, 1985, Tucson, AZ, University of Arizona Press, p. 1100-1153.
- Kitamura, Y.; Momose, M.; Yokogawa, S.; Kawabe, R.; Tamura, M.; Ida, S., Investigation of the Physical Properties of Protoplanetary Disks around T Tauri Stars by a 1 Arcsecond Imaging Survey: Evolution and Diversity of the Disks in Their Accretion Stage, 2002, *The Astrophysical Journal*, Volume 581, Issue 1, pp. 357-380.
- Shu, F.H., Self-similar collapse of isothermal spheres and star formation, 1977, *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 214, p. 488-497.
- Shu, F.H.; Shang, H.; Gounelle, M.; Glassgold, A.E., The origin of chondrules and refractory inclusions in chondritic meteorites, 2001, *The Astrophysical Journal*, 548:1029-50.
- Visser, R.; van Dishoeck, E. F.; Doty, S. D.; Dullemond, C. P., The chemical history of molecules in circumstellar disks. I. Ices, 2009, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 495, Issue 3, 2009, pp.881-897.
- 井田 茂, 系外惑星, 2007, 東京大学出版会, 204pp.