

# 降着率変動による原始惑星系円盤の 酸素同位体・化学組成進化

北海道大学 大学院理学研究科  
地球惑星科学専攻 修士2年

福井 隆

# 目次

---

## ○ 研究背景

- 惑星系形成論
- 残された課題
- 化学的・物質的な形成論へ

## ○ 円盤の酸素同位体・化学組成進化

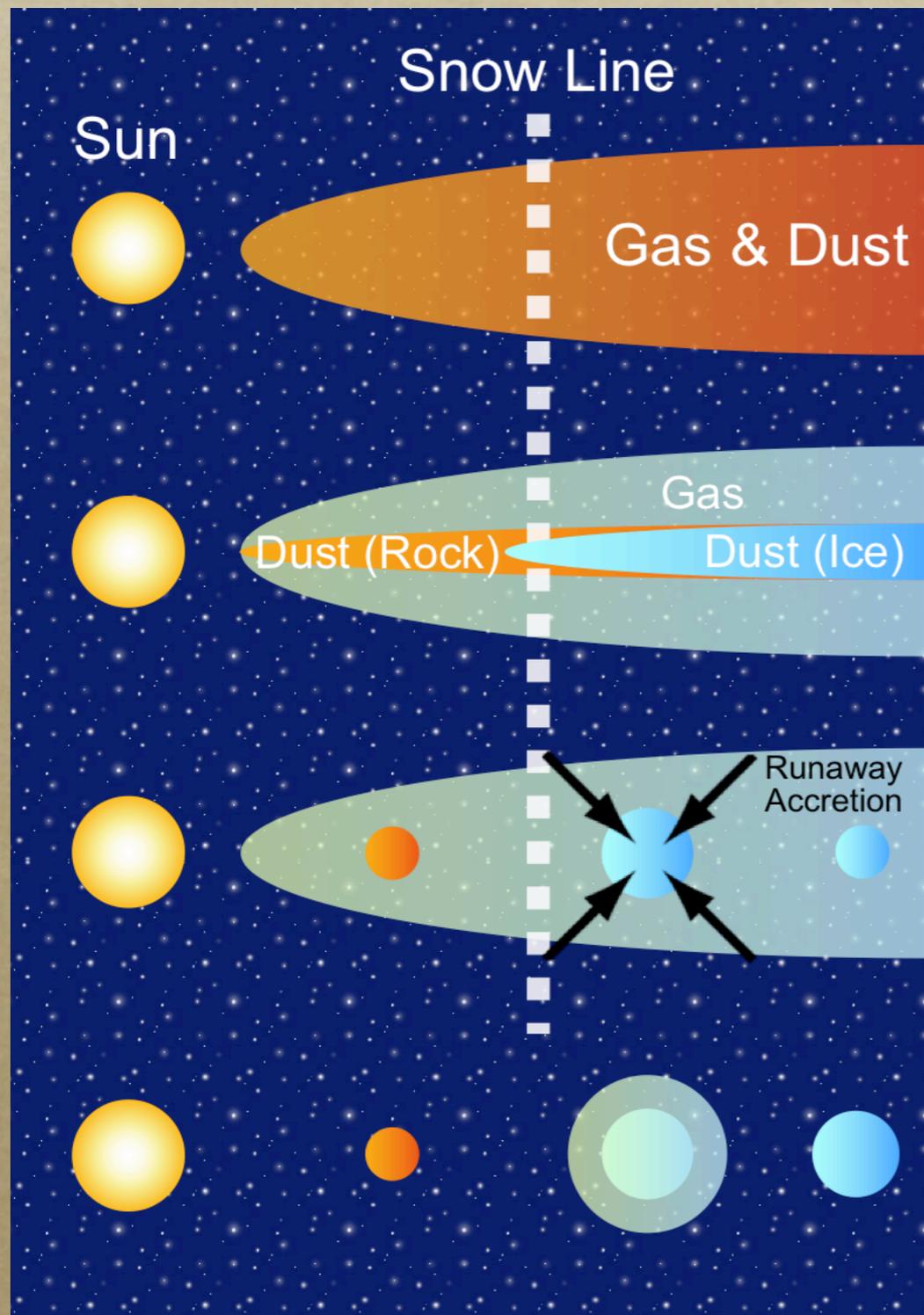
- 最低限隕石学
- 円盤組成変化の機構
- 酸素同位体組成の進化
- 酸化還元状態の進化

# 研究背景

# 惑星系形成論の略歴

- 1970 年頃
  - *Safronov* の著書
- 1980 年代
  - 標準モデル (京大・林グループ他)
  - 原始惑星系円盤発見
- 1995 年頃
  - 太陽系外に惑星発見
- 2005 年
  - 系外惑星の直接観測に成功

# 惑星系形成の標準モデル



- **太陽系の諸性質を再現**
  - 地球・木星・海王星型各タイプの形成
  - 惑星の配置
- **問題点もあったけど...**
  - ダスト落下問題
  - 微惑星形成問題
  - 海王星形成問題

# 残された課題

時間切れ...

- 。地球の全岩組成,  
その形成過程は？
- 。惑星原物質 (隕石)  
の組成, その形成  
過程は？

# 化学的・物質的な形成論へ

太陽系物質から読み取れる様々な情報を元に、それを  
統一的に説明できる円盤進化モデルを構築したい

- アプローチの方法
  - 化学的性質
  - 同位体的性質
  - 鉱物学的性質
  - ダスト成長過程

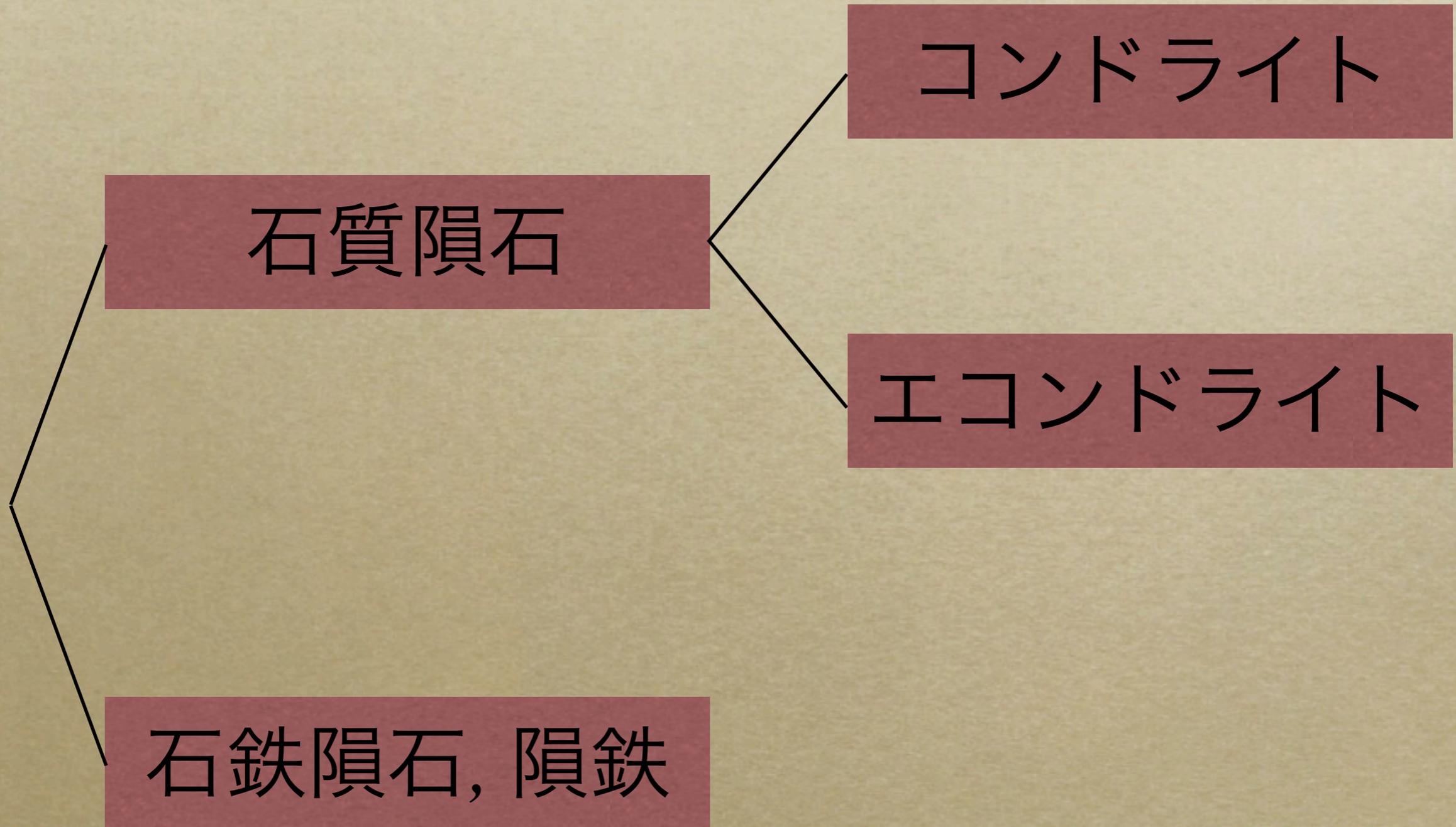
# 降着率変動による原始惑星系円盤の 酸素同位体・化学組成進化

---

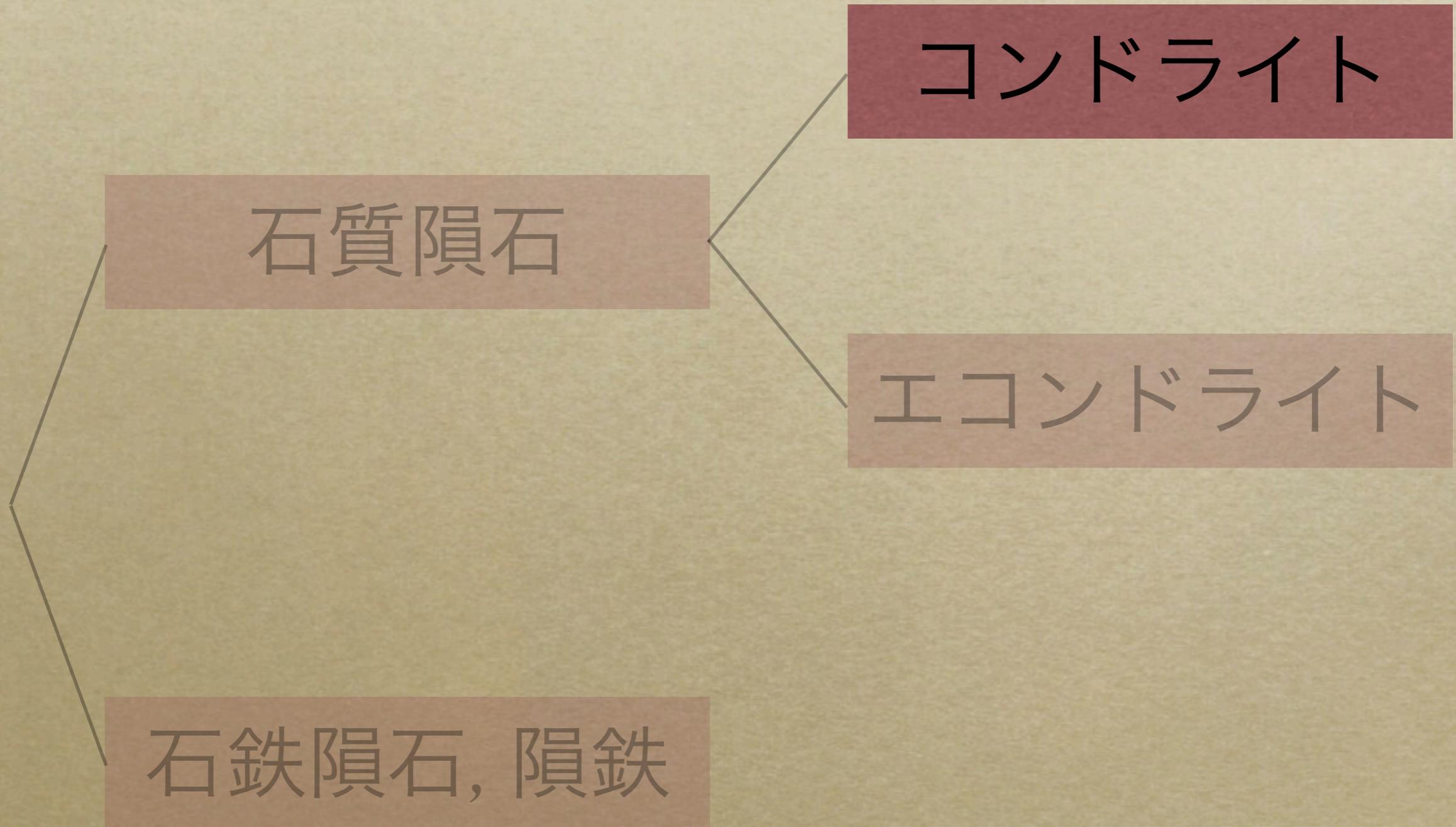
# 1. 最低限隕石学

---

# 隕石の分類

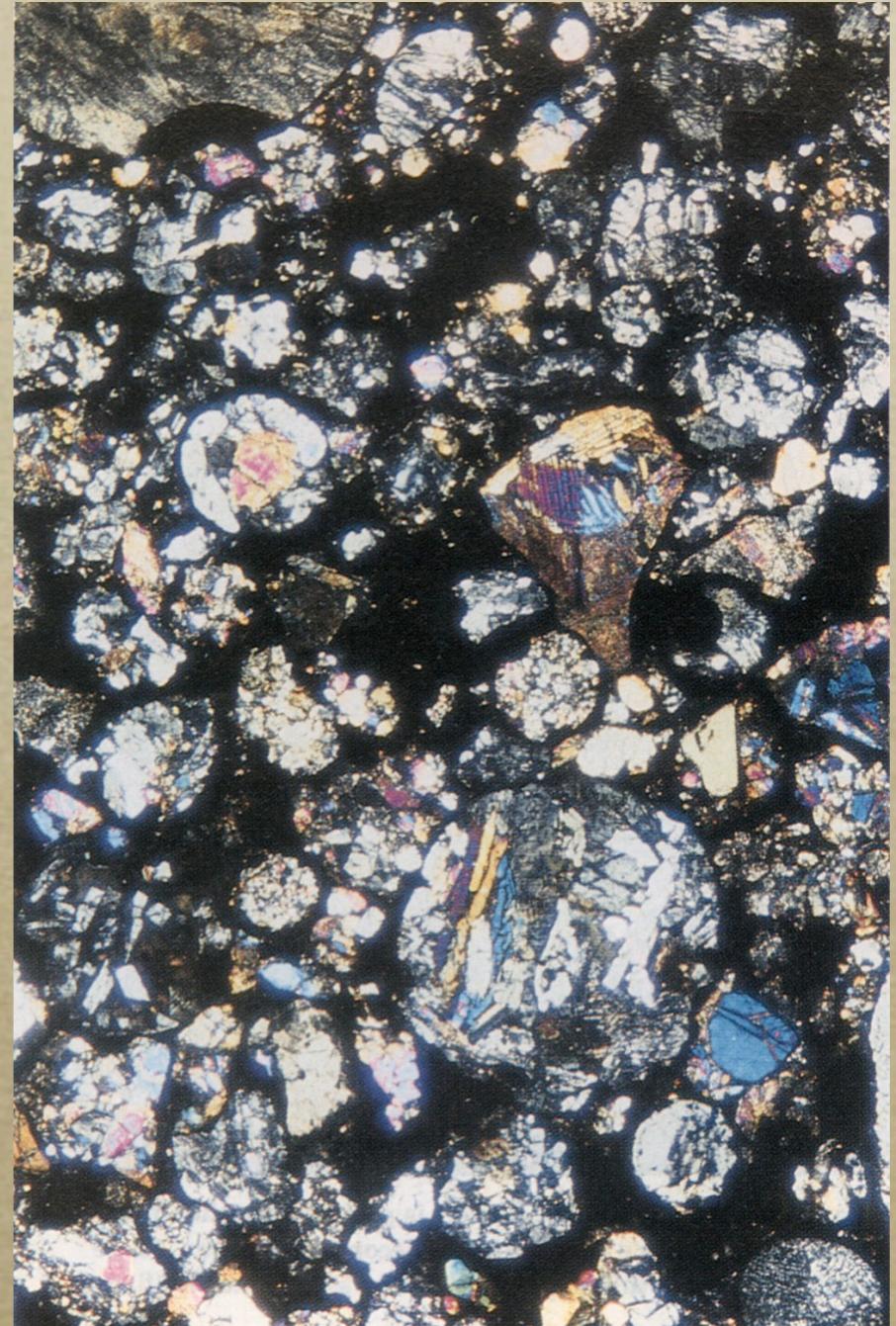


# 隕石の分類



# 始源的隕石コンドライト

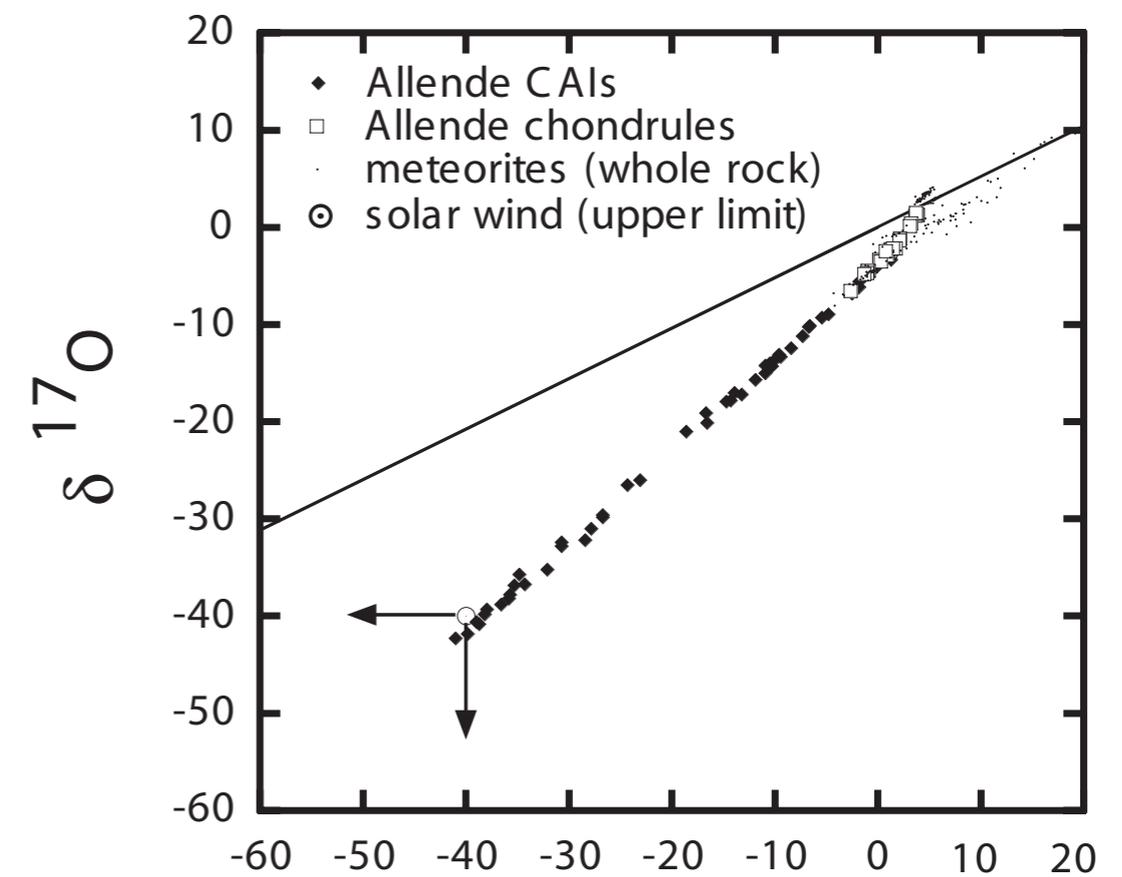
- 構成成分
  - マトリックス
    - 細粒シリケート
    - 金属鉄・硫化鉄
  - コンドリユール
    - 直径数 *mm* の球粒
    - 組成はシリケート
  - 高温鉱物 (後述)



[http://web.eps.utk.edu/Faculty/mcsween/  
displayimages/chondrite.htm](http://web.eps.utk.edu/Faculty/mcsween/displayimages/chondrite.htm)

# 酸素同位体の特徴

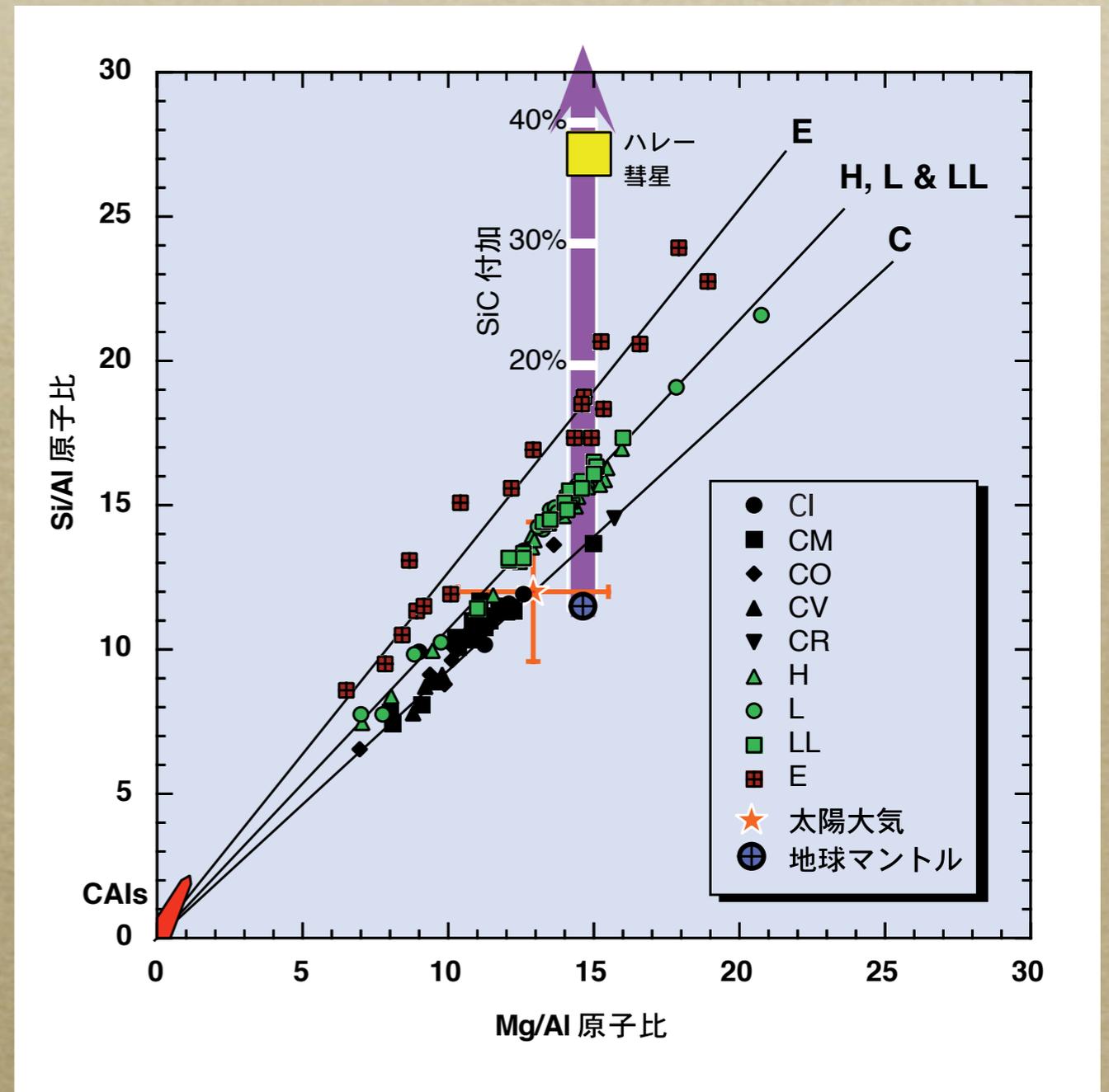
- 非質量依存分別 (傾き 1)
  - CAI (Ca Al rich Inclusion)
    - $^{16}\text{O}$  - rich
  - コンドリュール
    - $^{17,18}\text{O}$  - rich
- $^{16}\text{O}$ -rich 及び poor な 2 種類の reservoir が存在したことを示唆



$$\delta^{17,18}\text{O} \equiv \frac{\delta^{18}\text{O} \left( \left( \frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right) - \left( \frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}} \right)}{\left( \frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}}$$

# 酸化還元状態の特徴

- コンドライトタイプ毎に  $Mg : Si$  は同じ
- 円盤内縁から  $Si$  を還流させるとうまく説明できる
- $Si$  が最終的な残渣になるためには、還元的環境が必要



# これらの特徴が示すこと

---

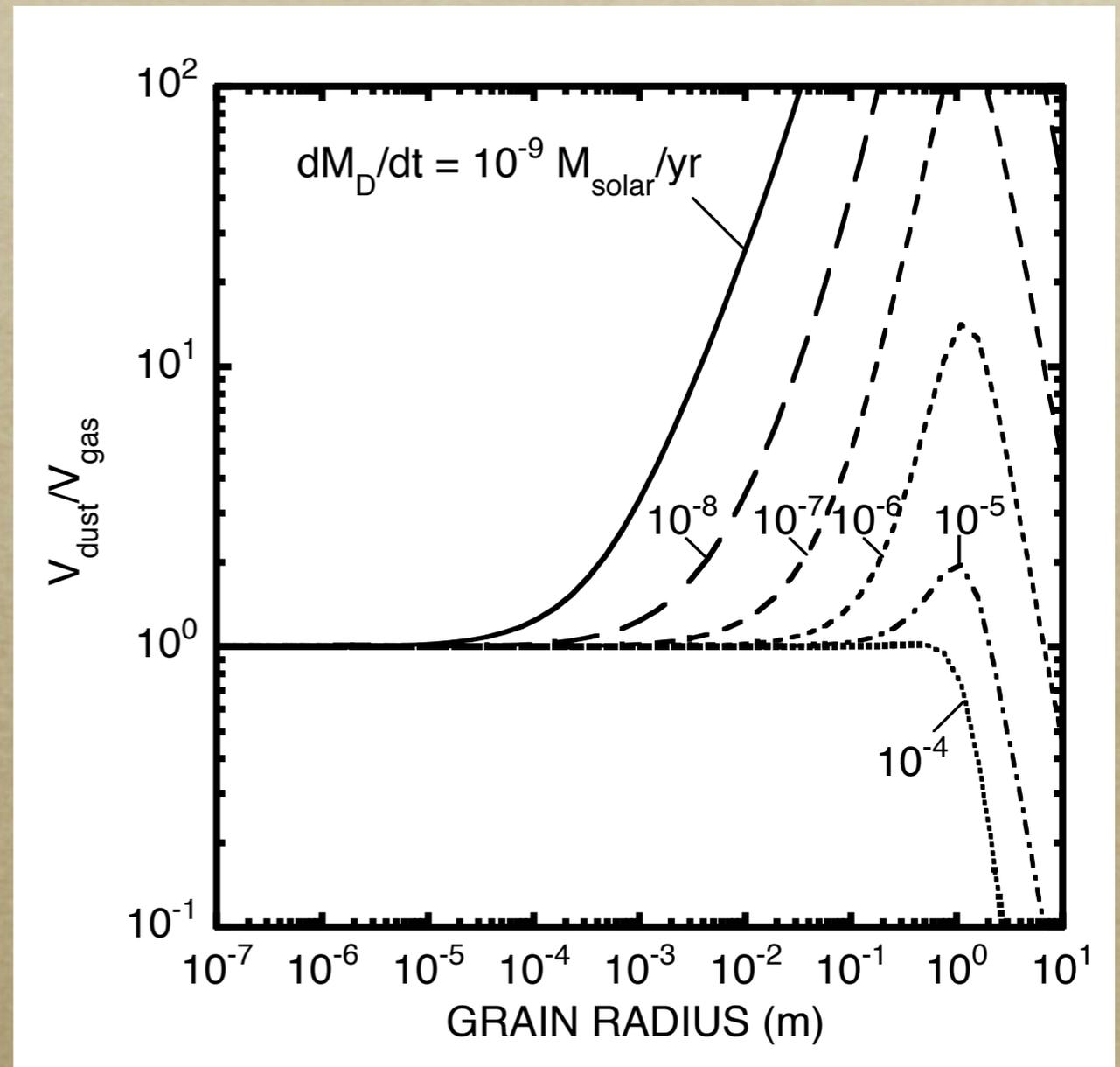
- 初期太陽系は時間的 (and / or) 空間的に, 化学組成・同位体組成が不均質
- 原始惑星系円盤の組成を変えるプロセスは？

## 2. 円盤組成変化の機構

---

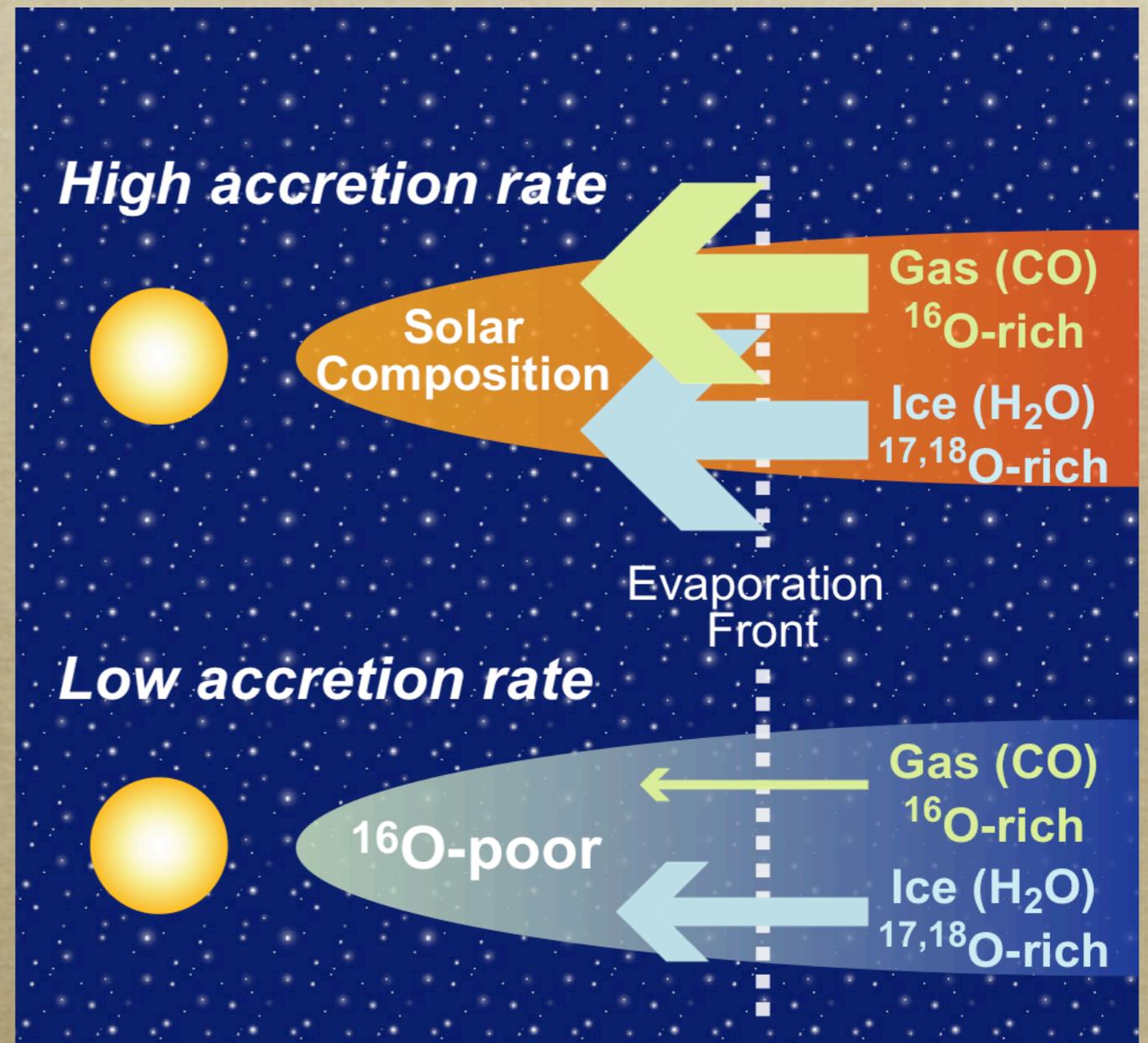
# ダスト・ガスの降着速度差

- ダストはガス抵抗を受け, ガスよりも速く動径移動 (< m サイズ)
- $V_{dust}/V_{gas}$  は降着率が小さくなるほど増加



# ダスト成分の濃集

- 。ダストの構成成分は周囲の温度が自身の融点を越えたところで蒸発
- 。ダスト・ガスの動径速度差によりダスト蒸気が濃集
- 。濃度は、速度差無しの場合 (= 分子雲組成) で規格化



# 気相中の移流拡散

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + v_r \frac{\partial c_i}{\partial r} - \frac{1}{\Sigma r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Sigma r D \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) = \frac{S_i}{\Sigma}$$

$c_i$  :  $i$  成分の濃度     $S_i$  :  $i$  成分の蒸発による湧出

$r$  : 中心星からの動径距離     $v_r$  : ガスの動径移動速度

$\Sigma$  : 円盤の面密度     $D$  : 拡散係数

- 。 右辺の湧出項は, 平衡状態のときに  $c_i$  が  $v_{dust} / v_{gas}$  に等しくなるように決める

# モデルの設定

- 面密度, 温度分布: 林モデル

$$T^H \simeq 2.8 \times 10^2 \left( \frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-1/2} \quad (\text{K})$$

$$\Sigma_g^H = 1.7 \times 10^3 \left( \frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-3/2} \quad (\text{g cm}^{-2})$$

- 円盤降着率, ダストサイズ: パラメータ
  - 降着率は時間とともに減衰

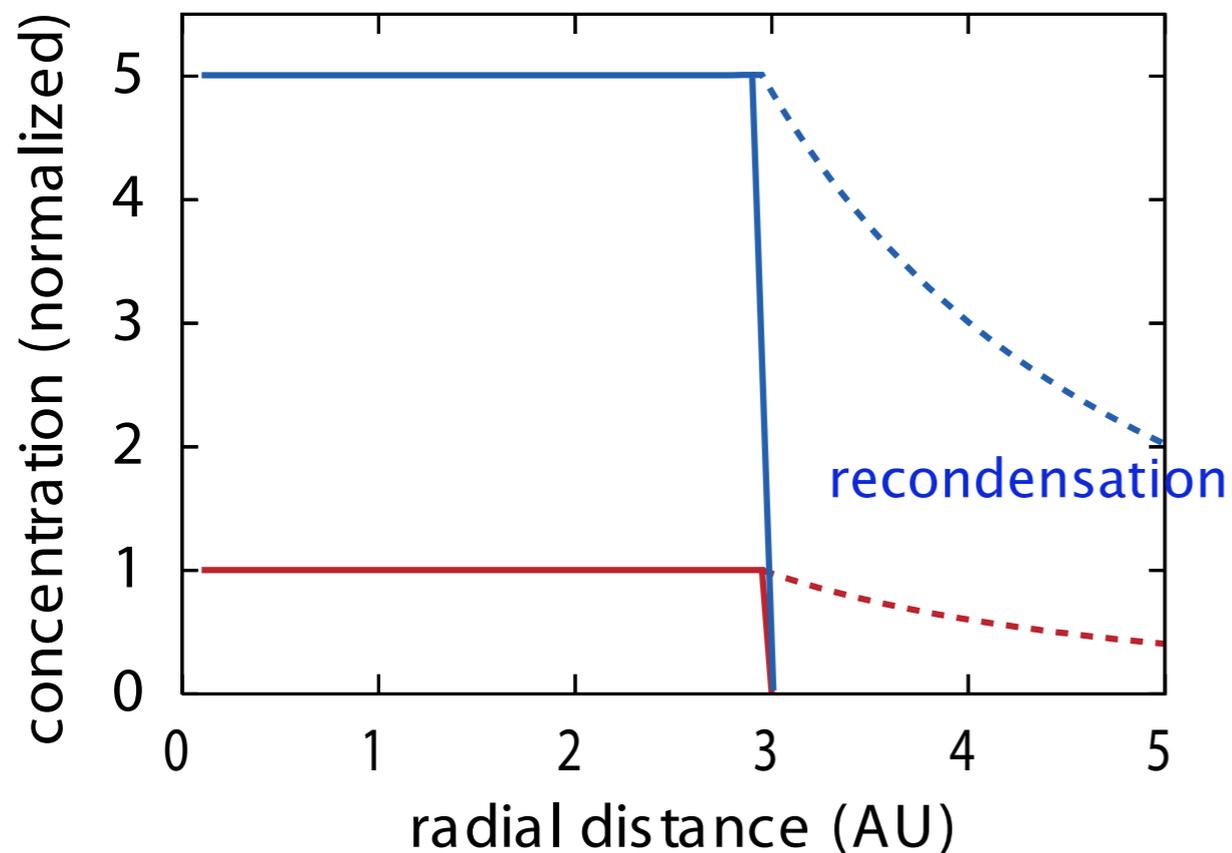
### 3. 酸素同位体組成の進化

---

# 分子雲における非質量依存分別

- 分子雲の  $C^{16}O$ ,  $C^{17,18}O$  の不均質
  - 紫外線による前期解離反応
    - $C^{16}O$  ... 存在度大, 反応は分子雲表層のみ
    - $C^{17,18}O$  ... 存在度小, 中心部でも反応
- 分子雲コア (中心部, 星形成領域)
  - $CO$  (gas) ...  $^{16}O$ -rich ( $\delta^{17,18}O_{MC} \sim -80 \text{ ‰}$ )
  - $O$  原子 ...  $^{16}O$ -poor ( $\delta^{17,18}O_{MC} \sim +120 \text{ ‰}$ )
    - $H_2O$  ice に取り込まれる

# 計算結果



分子雲における酸素存在度  
CO : H<sub>2</sub>O ice = 2:3  
(Yurimoto & Kuramoto, 2004)

- <sup>16</sup>O-rich な CAI と <sup>16</sup>O-poor なコンドリュール  
の差：約 50 ‰
- 水蒸気が数倍の濃集すれば説明可能
- 円盤降着率  $10^{-8} \sim 10^{-9}$   
太陽質量 / 年, ダストサイズ a few mm で可能

## 4. 酸化還元状態の進化

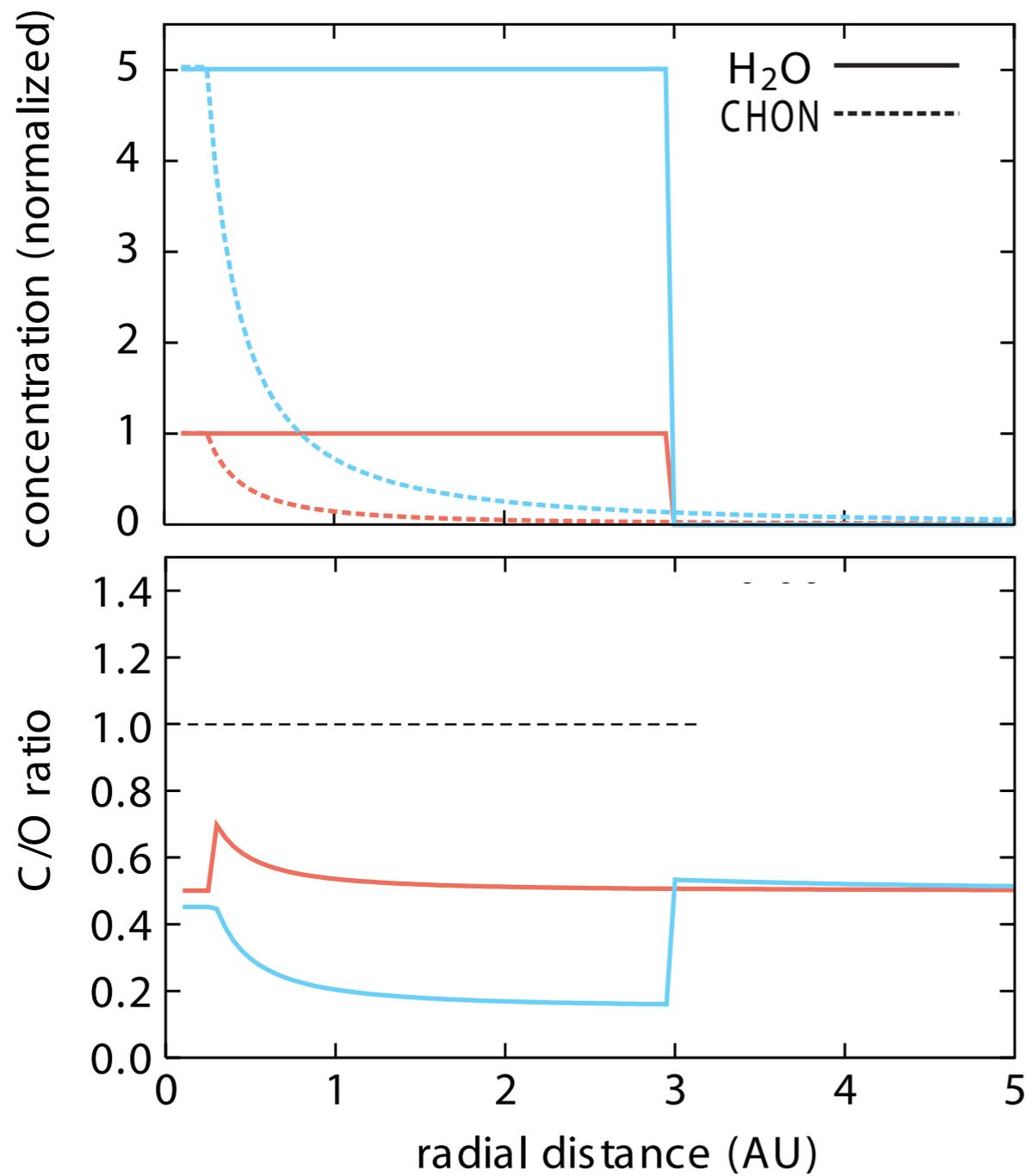
---

# 各 carrier への C, O の配分

	Silicate	Ice (H <sub>2</sub> O)	Gas (CO)	Organic material
O	1	3.5	1.5	~ 0
$\delta^{17,18}\text{O}$ (‰)	0	+25 ~ +170	-60 ~ -400	—
C	0	0	1.5	1.5

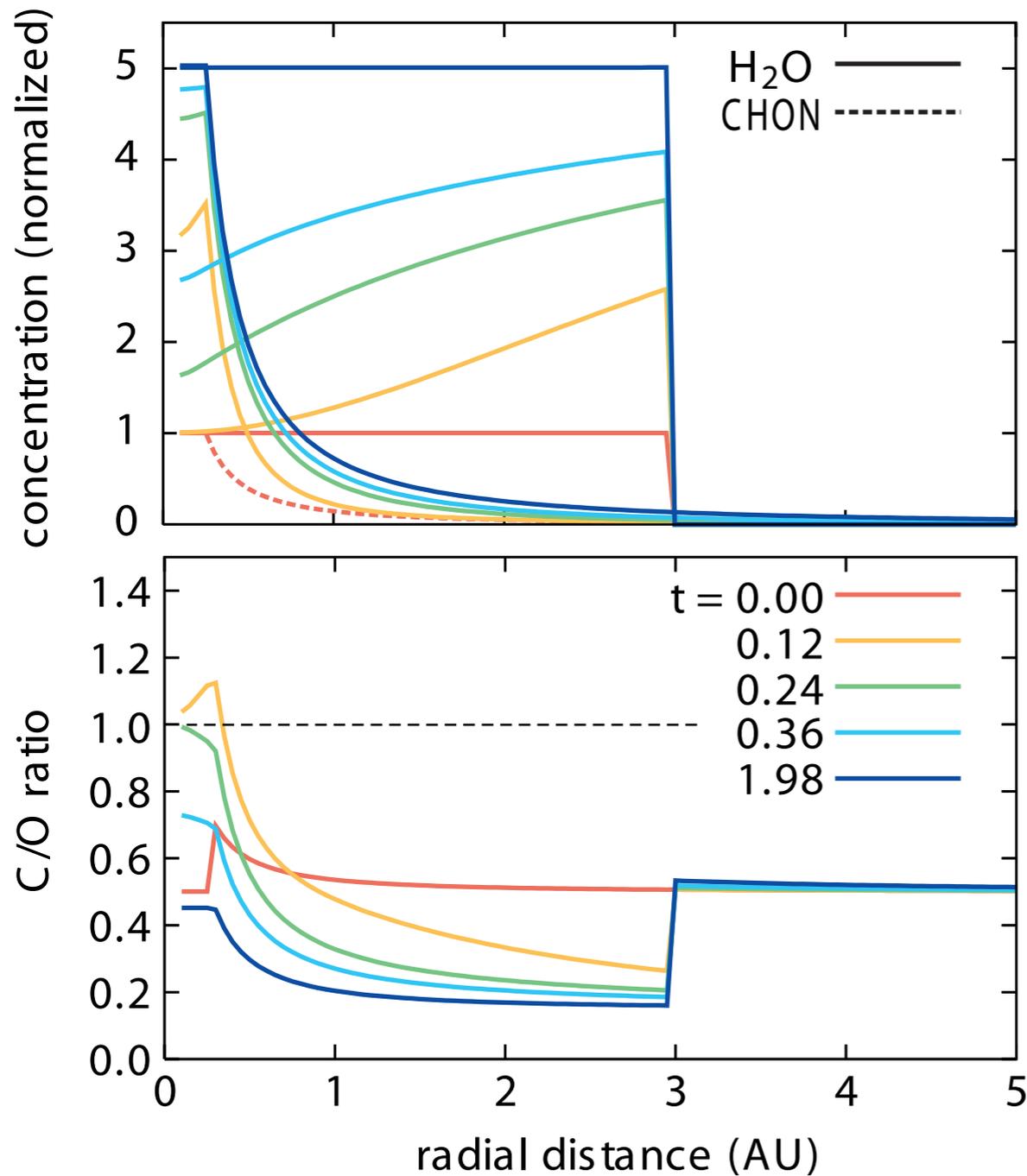
- 。本計算では, 有機物は 0.3 AU で蒸発
- 。シリケートの蒸発は考えない

# 定常的狀態では ...



- 。ダスト成分の濃集は起きるが、C/O比が1を超えることはない

# 降着率が急激に減少した場合



- 移流拡散のタイムスケールは,  
(inner disk 質量) /  
(accretion rate)
- ここでは,  $4 \times 10^6$  年
- 円盤最内縁部に, 一時的に還元的環境が形成

# まとめ

---

- 始源的隕石に見られる酸素同位体・酸化還元的な特徴を, 同一のプロセスにより統一的に説明できる (かも)
- 降着速度差によるダスト蒸気の濃集及びその移流拡散が重要