

# 宇宙におけるダストの破壊と スパッタリング

野沢 貴也

**国立天文台 科学研究部**

(自然科学機構連携プログラム「シミュレーションによる  
自然科学における階層と全体」プロジェクト研究員)

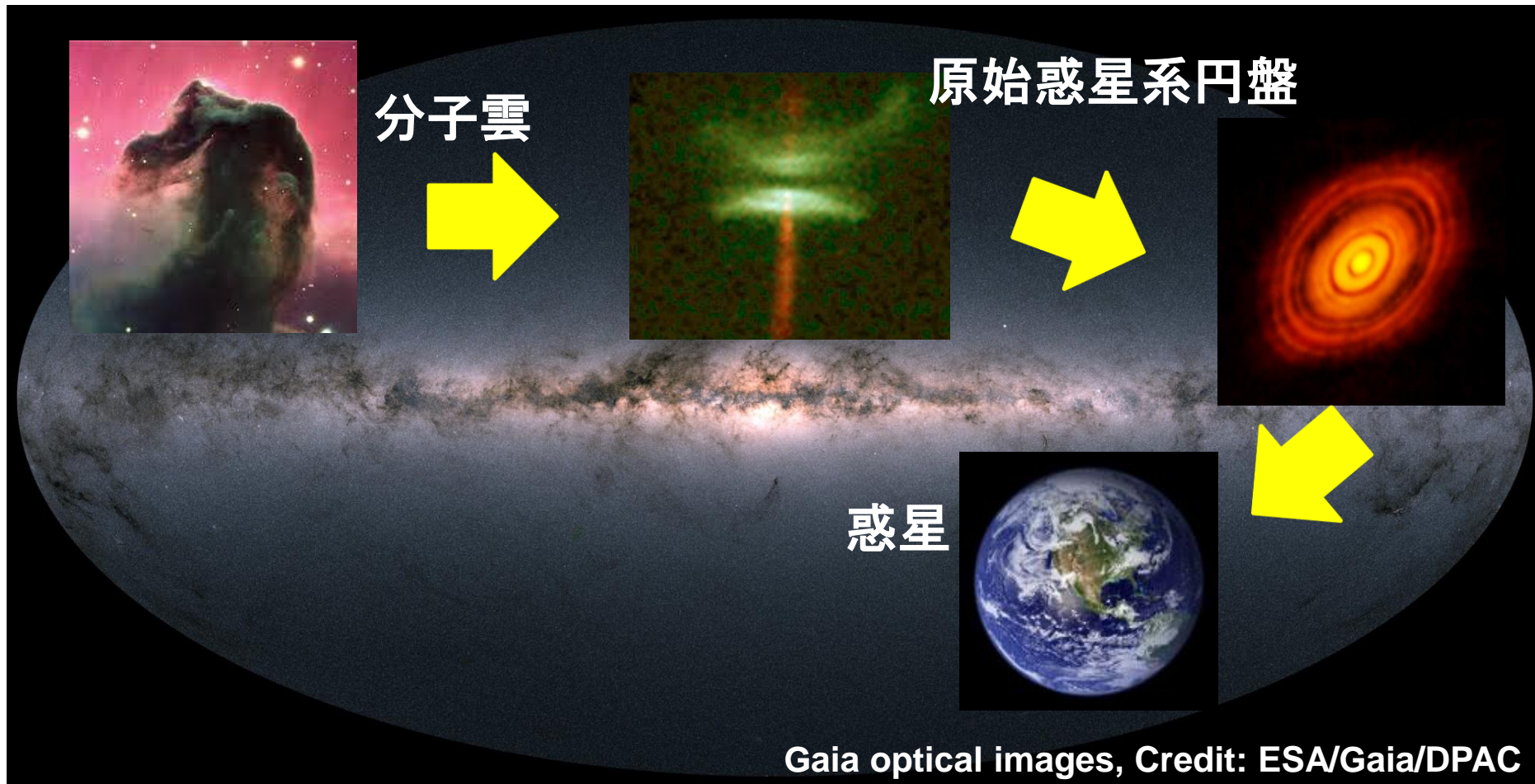
## 共同研究者

伊藤 篤史、高山 有道、石黒 静児 (核融合研)

富阪 幸治、小久保英一郎 (国立天文台)

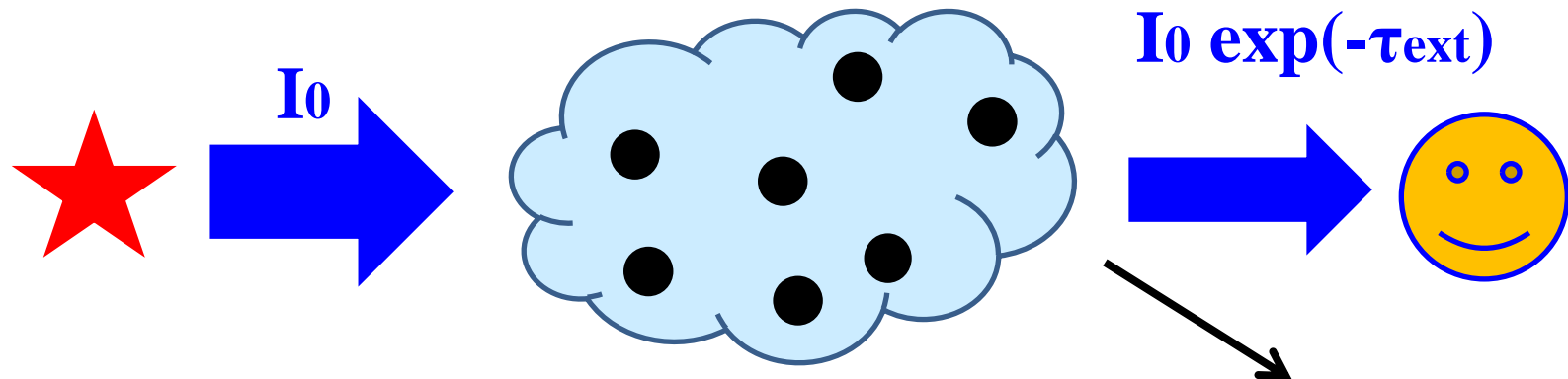
# 1-1. 星間ダスト(星間塵)

## 天の川銀河の可視光全天マップ



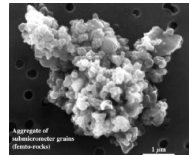
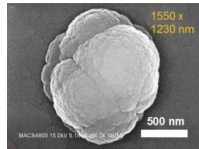
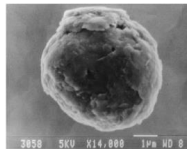
- ダストは星からの紫外可視光線を吸収し、赤外線を放射する
- 惑星の原材料 → ダストは宇宙固体物質進化の基本物質

# 1-2. 星間ダストの組成とサイズ



## ○ 星間ダストの組成

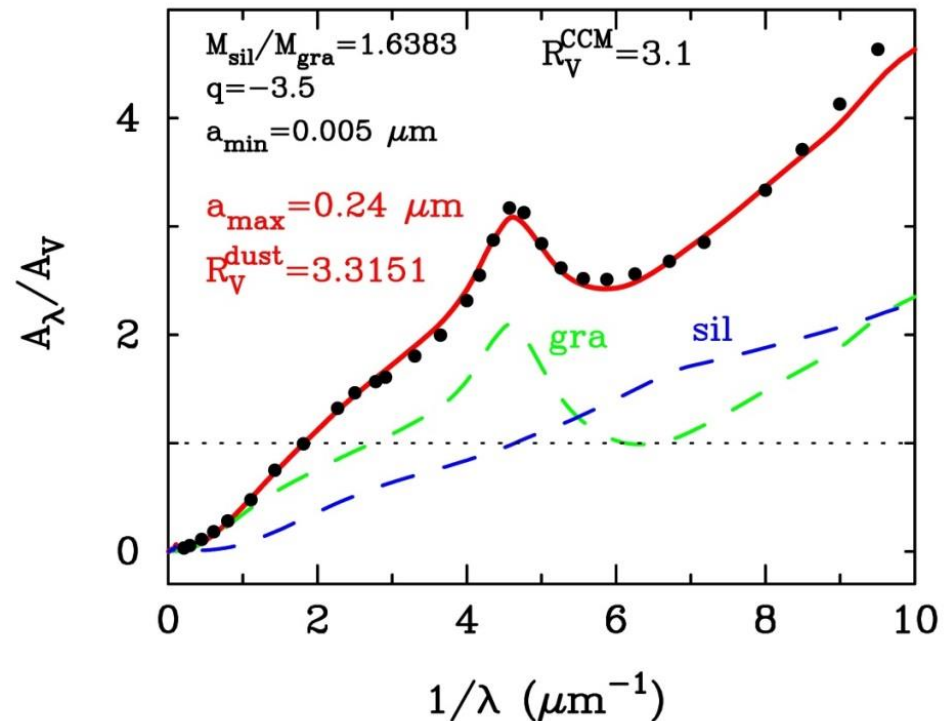
- 炭素質 (非晶質、グラファイト)
- ケイ酸塩 (シリケート)  
 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{MgSiO}_3$ , ...



## ○ 星間ダストのサイズ

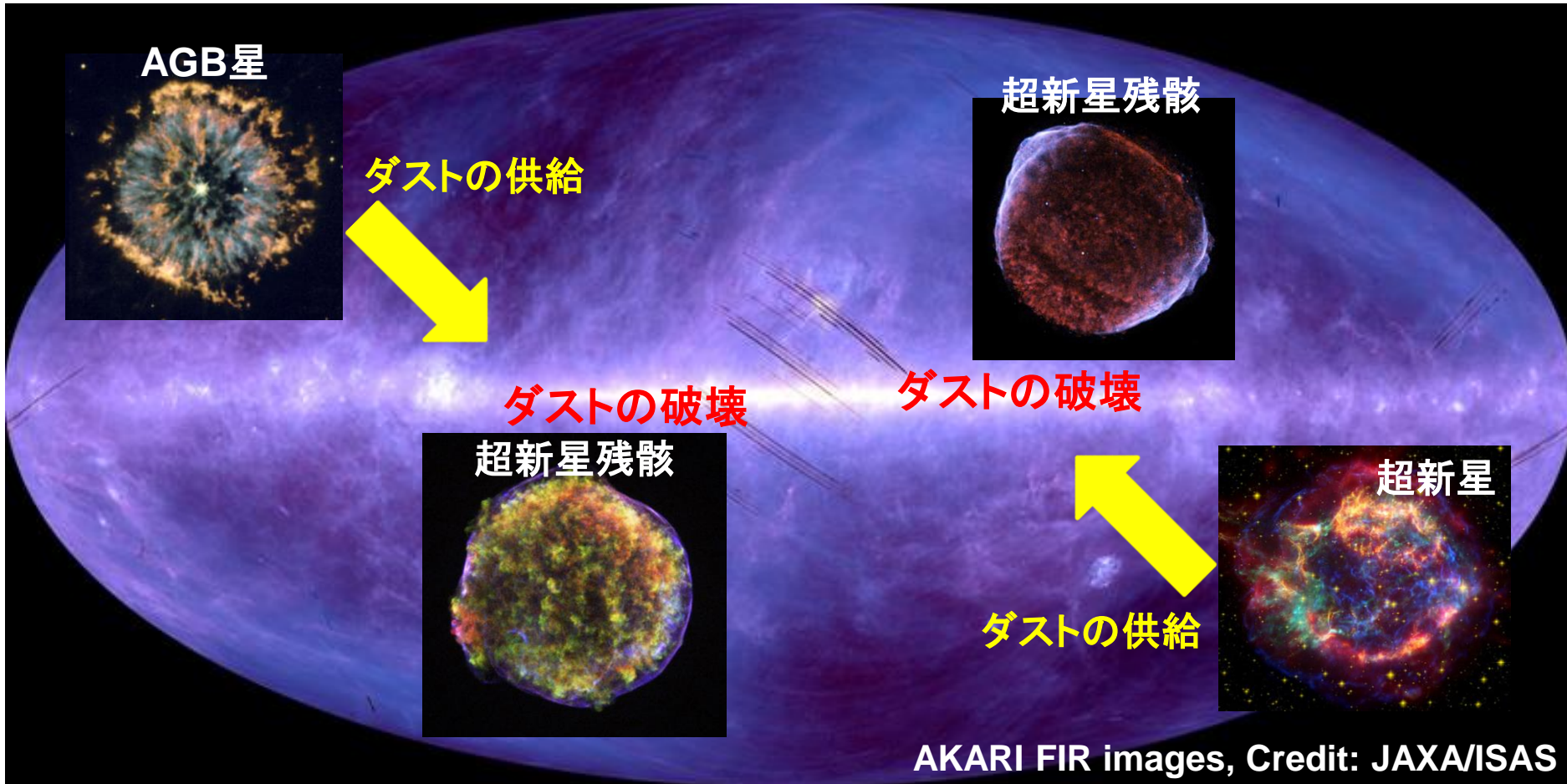
- 半径  $a = 0.001\text{-}0.3 \mu\text{m}$

天の川銀河の平均の減光曲線



# 1-3. 星間ダストの進化

天の川銀河系のダスト-ガス質量比:  $M_{\text{dust}}/M_{\text{gas}} \sim 0.01$



AKARI FIR images, Credit: JAXA/ISAS

星間ダストの進化は、AGB星や超新星などでの形成と星間衝撃波による破壊とのバランスで決定される



# 1-4. 星間ダストの供給と破壊

## ○ 星 (AGB星・超新星)からの星間ダストの供給率

$$\frac{dM_{\text{dust}}}{dt} \approx 0.01 \left( \frac{\phi_{\text{sf}}}{4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \left( \frac{f_{\text{AGB-SN}}}{0.3} \right) \left( \frac{f_{\text{gas,ejected}}}{0.75} \right) \left( \frac{f_{\text{dust,form}}}{0.01} \right) M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

星形成率=星の消失率
星がAGB星・超新星となる割合
AGB星・超新星から放出されるガスの割合
ダストが凝縮する割合



AGB星  
0.004 Msun/yr



超新星  
0.006 Msun/yr

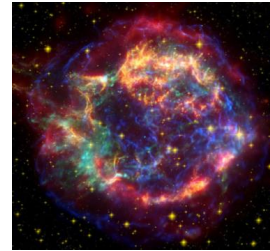
## ○ 超新星の衝撃波による星間ダストの破壊効率

$$\frac{dM_{\text{dust}}}{dt} \approx -0.06 \left( \frac{R_{\text{SN}}}{0.01 \text{ yr}^{-1}} \right) \left( \frac{M_{\text{gas,swept}}}{2000 M_{\odot}} \right) \left( \frac{D_{\text{ISM}}}{0.01} \right) \left( \frac{f_{\text{dust,dest}}}{0.3} \right) M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

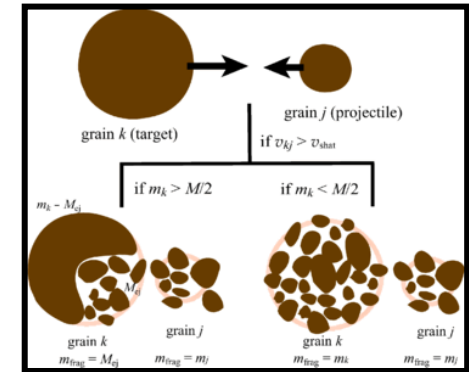
超新星が起こる頻度
衝撃波が掃くガスの質量
星間空間でのダストとガスの質量比
ダストが破壊される割合

星間ダストの破壊効率は供給率を上回る  
 → 星間ダストの量は時間とともに減少するはず

# 2-1. ダストの破壊過程



## 破碎 (shattering)



Hirashita & Yan (2009)

## ○ 蒸発 (昇華, evaporation)

→ (大質量) 星のごく近傍のみ

※ 高温プラズマ中でもダストは蒸発しない

→ ガス密度が非常に低いため

→ ダストの温度は高々100K程度

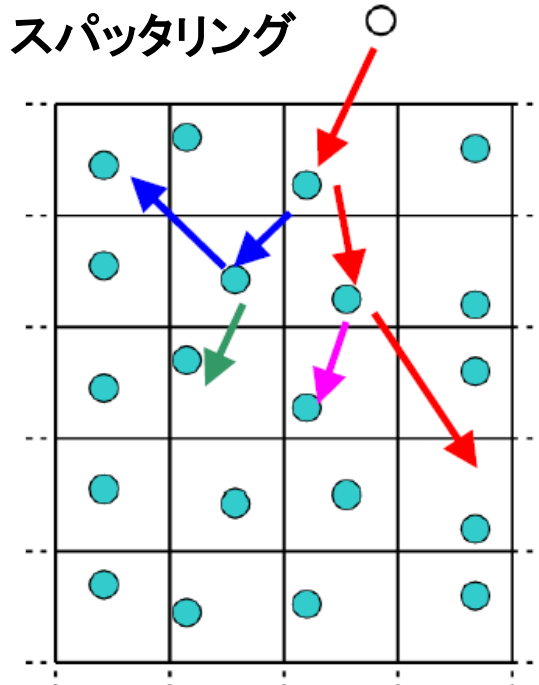
## ○ 破碎 (衝突破壊, shattering)

→ ダストの総量を変えない

## ○ スパッタリング (sputtering)

高エネルギーのイオンの衝突により、  
固体表面の原子がはじきだされる

## スパッタリング



# 2-2. スパッタリングイールドとダストの破壊

## ○ スパッタリングイールド $Y(E)$ :

入射イオン一個の衝突あたりに  
固体から放出される原子の数

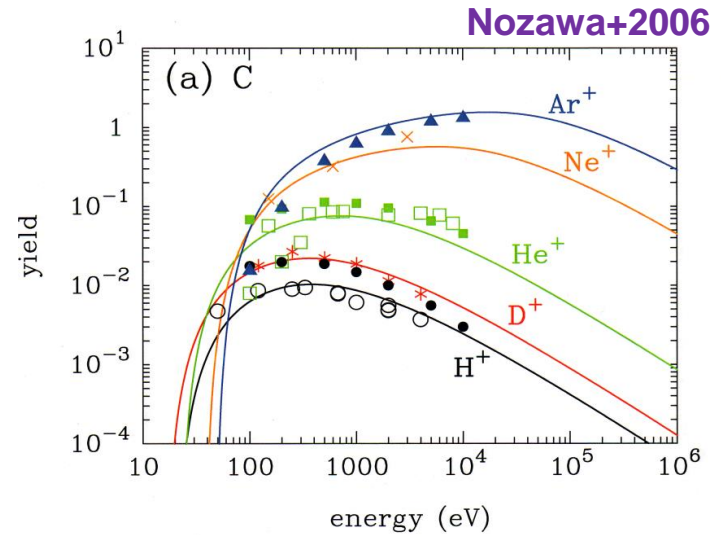
→ 主に実験によって導出される

## ○ 理論公式 (Bohdansky 1984)

$$Y_i^0(E) = 4.2 \times 10^{14} \frac{S_i(E)}{U_0} \frac{\alpha_i(\mu_i)}{K\mu_i + 1} \left[ 1 - \left( \frac{E_{\text{th}}}{E} \right)^{2/3} \right] \left( 1 - \frac{E_{\text{th}}}{E} \right)^2,$$

## ○ スパッタリングによる球形ダストの半径 (a) の減少率

$$\begin{aligned} \frac{dV_d}{dt} &= 4\pi a^2 \frac{da}{dt} = -\pi a^2 \frac{4\pi a_0^3}{3} \sum n_i \langle v_i Y_i \rangle \\ \frac{da}{dt} &= -\frac{1}{4} \Omega n_H \sum A_i \langle v_i Y_i \rangle = 10^{-6} \left( \frac{n_H}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \mu\text{m yr}^{-1} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$



# 2-3. 現実的なスパッタリングイールドに向けて

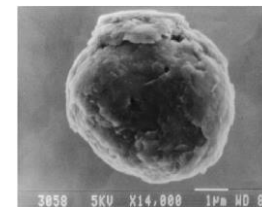
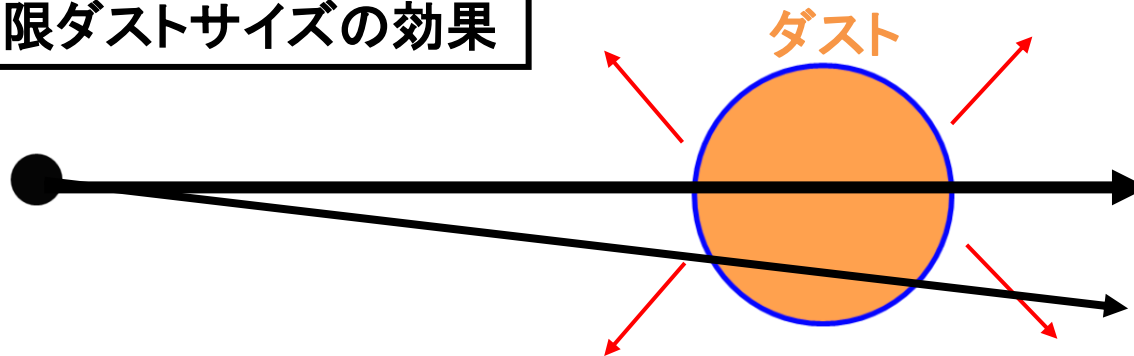
## 実験のターゲット物質

- バルク物質 (数cm以上)
- 主に結晶質の物質
- 滑らかな表面構造
- 物質内に空隙なし

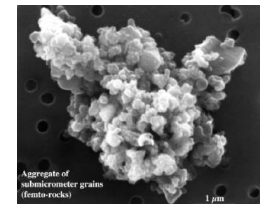
## 実際の宇宙ダスト

- 有限サイズ (数 $\mu\text{m}$ 以下)
- 主に非結晶質の物質
- 荒い表面構造
- 物質内に空隙あり

有限ダストサイズの効果



© Amari, S.



© Messenger, S.



# 2-4. 共同研究の開始と研究体制

自然科学研究機構連携プログラム  
「シミュレーションによる自然科学における階層と全体」

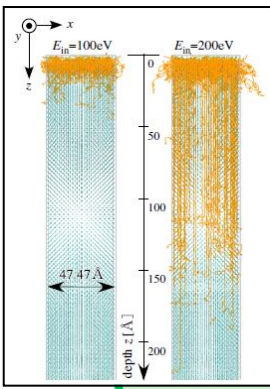
国立天文台



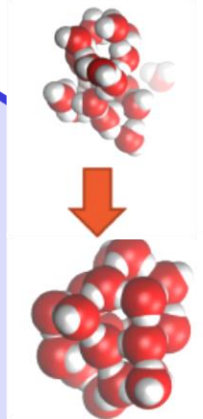
星間ダストの進化  
惑星形成  
ダストの観測的影響

宇宙ダスト

3050 5KV X14,000 1µm WD 8  
1550 x 1230 nm  
500 nm



スパッタリングによるダスト破壊



分子形成とダスト形成

核融合科学研究所

分子科学研究所

# 3-1. 研究目的

## 研究目的

3次元シミュレーションによって、スパッタリングによる星間ダストの破壊効率を再評価する

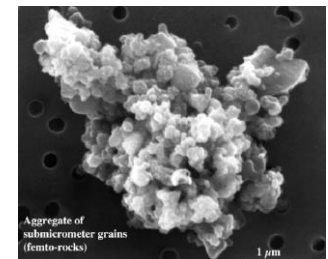
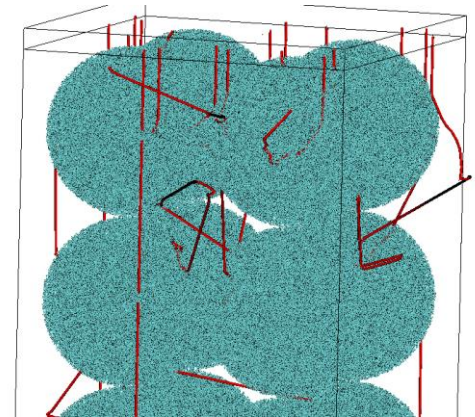
### ○ 計算コード: BDOG (核融合研 伊藤篤史さん)

二対衝突近似(BCA)、3Dシミュレーション



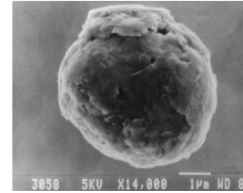
### ○ 非晶質炭素のスパッタリング計算

- 従来の結果との比較
- 物質密度の依存性
- 表面構造の依存性



# 3-2. スパッタリングの計算モデル

## ○ 計算のモデル



Low density  
graphite:  
1.7-1.85 g/cm<sup>3</sup>

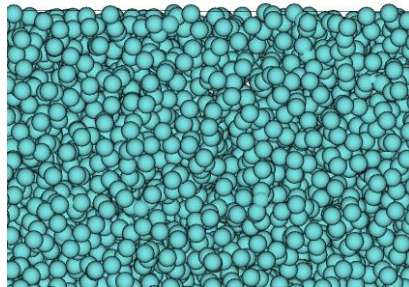
- ターゲット: C (非晶質炭素)

物質密度: 2.2, 2.0, 1.85, 1.7, 1.5, 1.3, 1.15 g/cm<sup>3</sup>

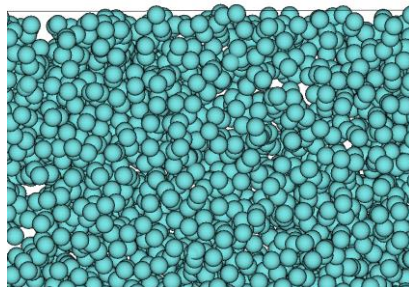
**標準** **隕石中で発見** **空隙の多いダストに対応**

- 入射イオン: H<sup>+</sup> を 10<sup>6</sup> 発入射

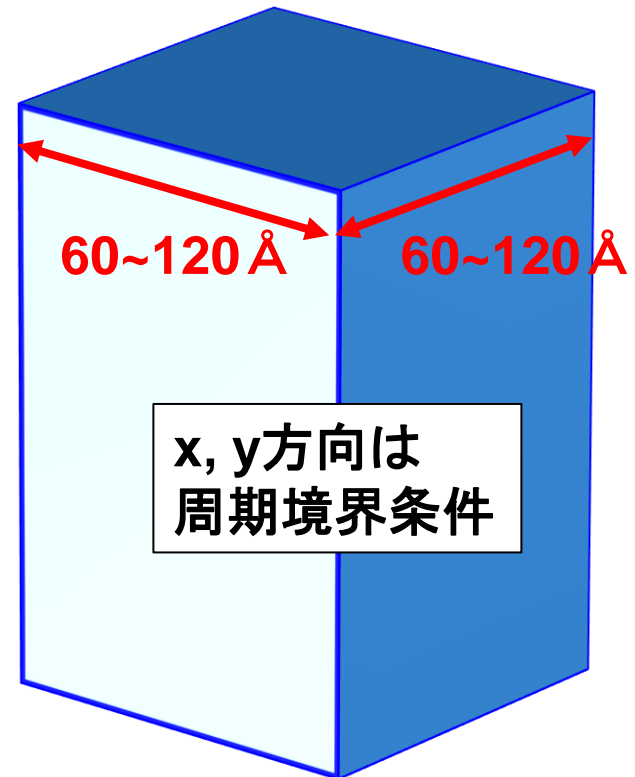
2.2 g/cm<sup>3</sup>



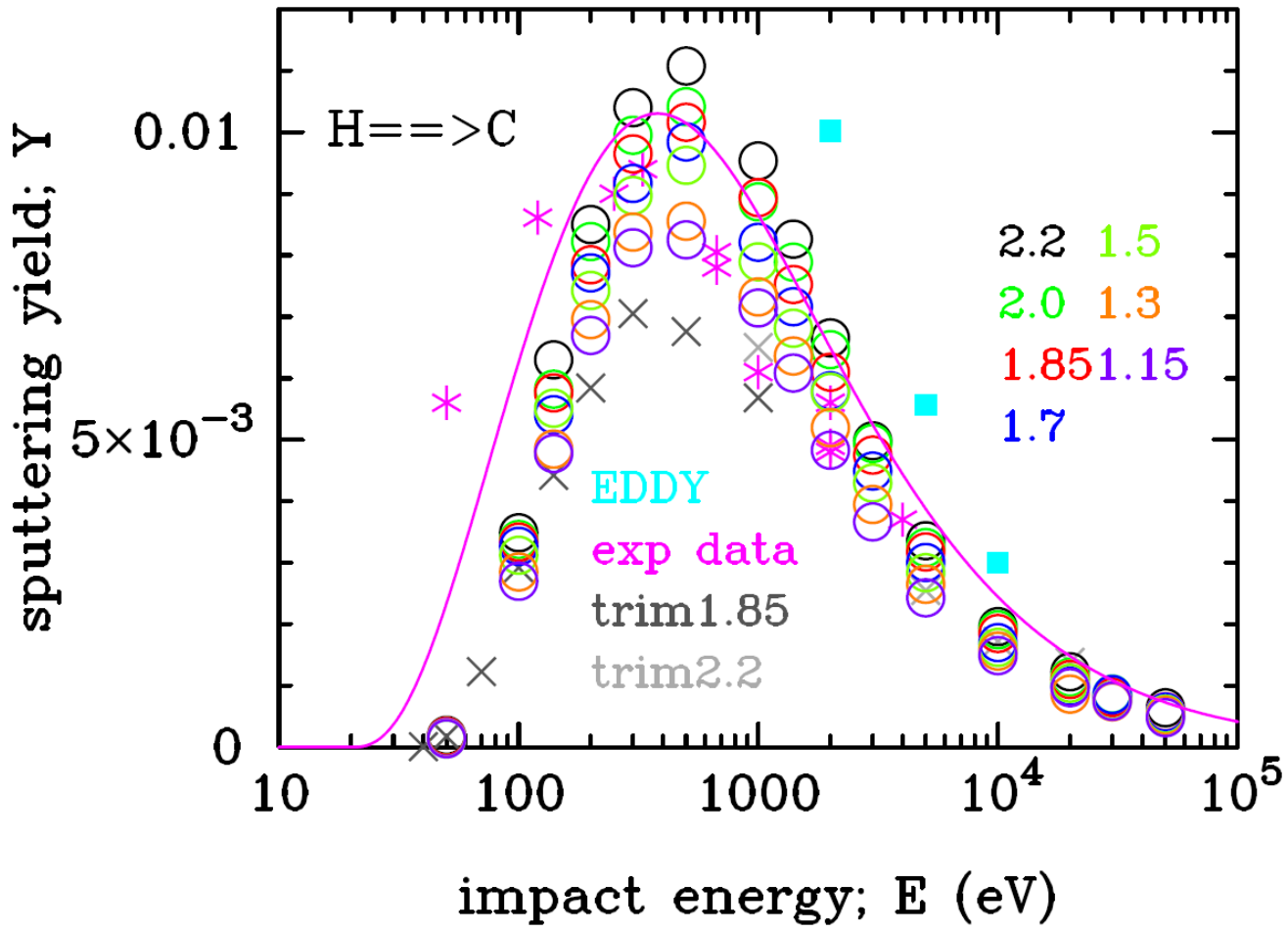
1.15 g/cm<sup>3</sup>



z = 2000  
~30000 Å

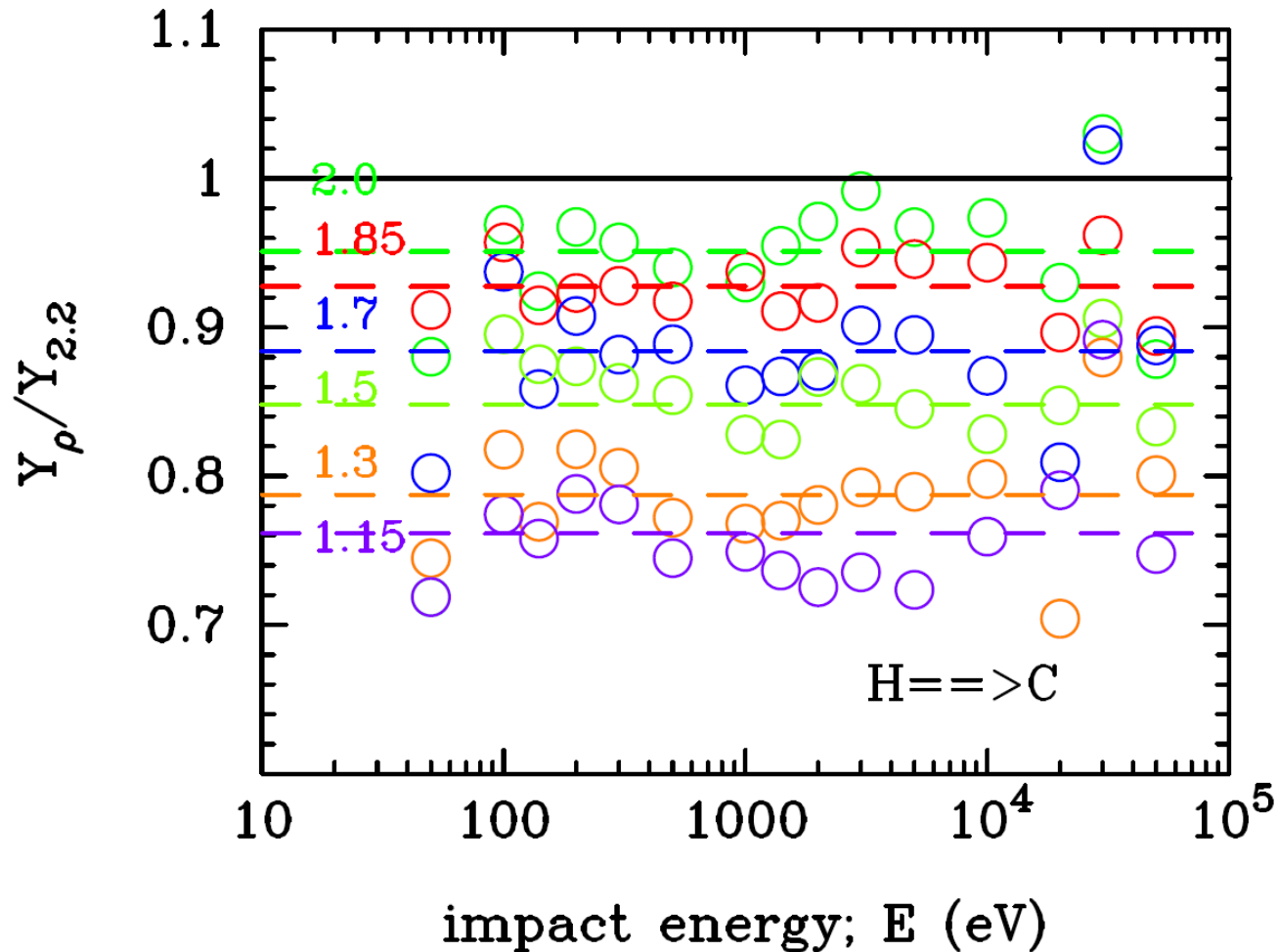


# 4-1. 計算結果：炭素物質密度の依存性(1)



スパッタリングイールドのエネルギー依存性や値は他の計算コードや地上実験の結果とよく一致する

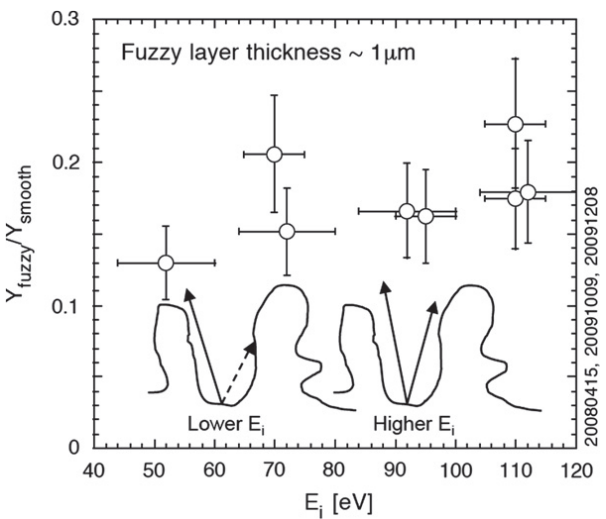
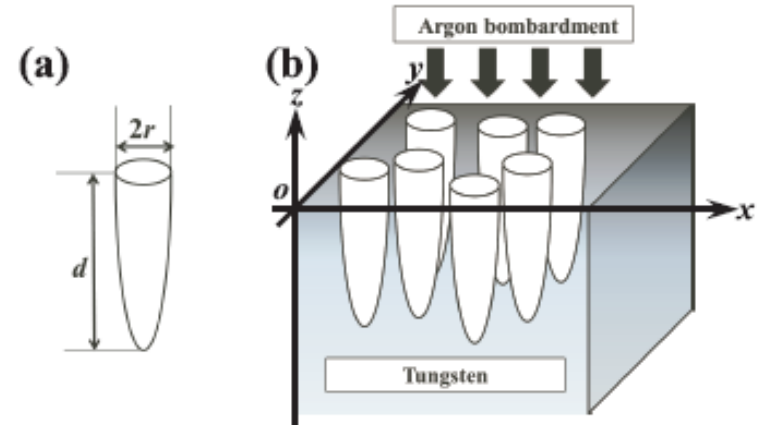
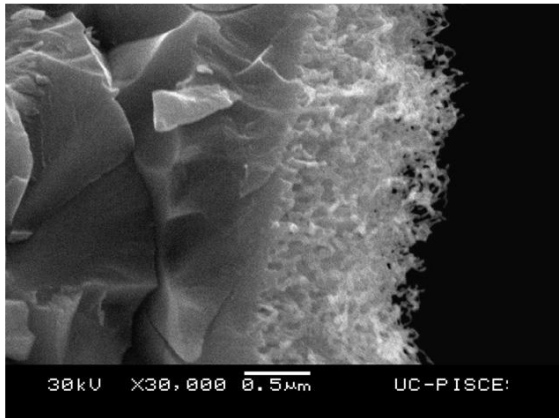
## 4-2. 計算結果：炭素物質密度の依存性(2)



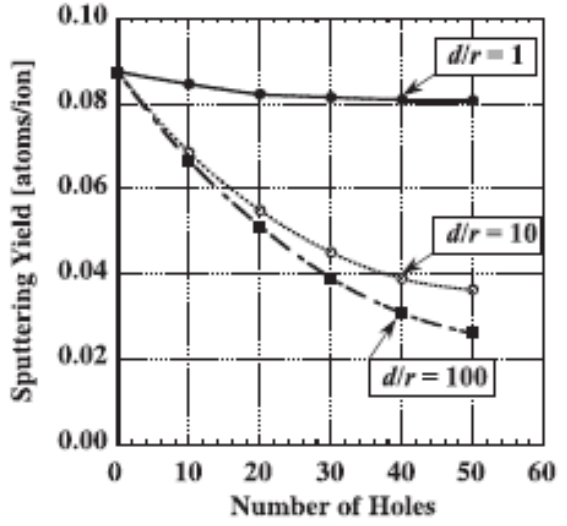
**密度が低いほどスパッタリングイールドは低くなる**  
**→ 密度が半分になるとイールドは20%ほど減少**



# 5-1. スパッタリングの表面構造の効果



Nishijima et al. 2011

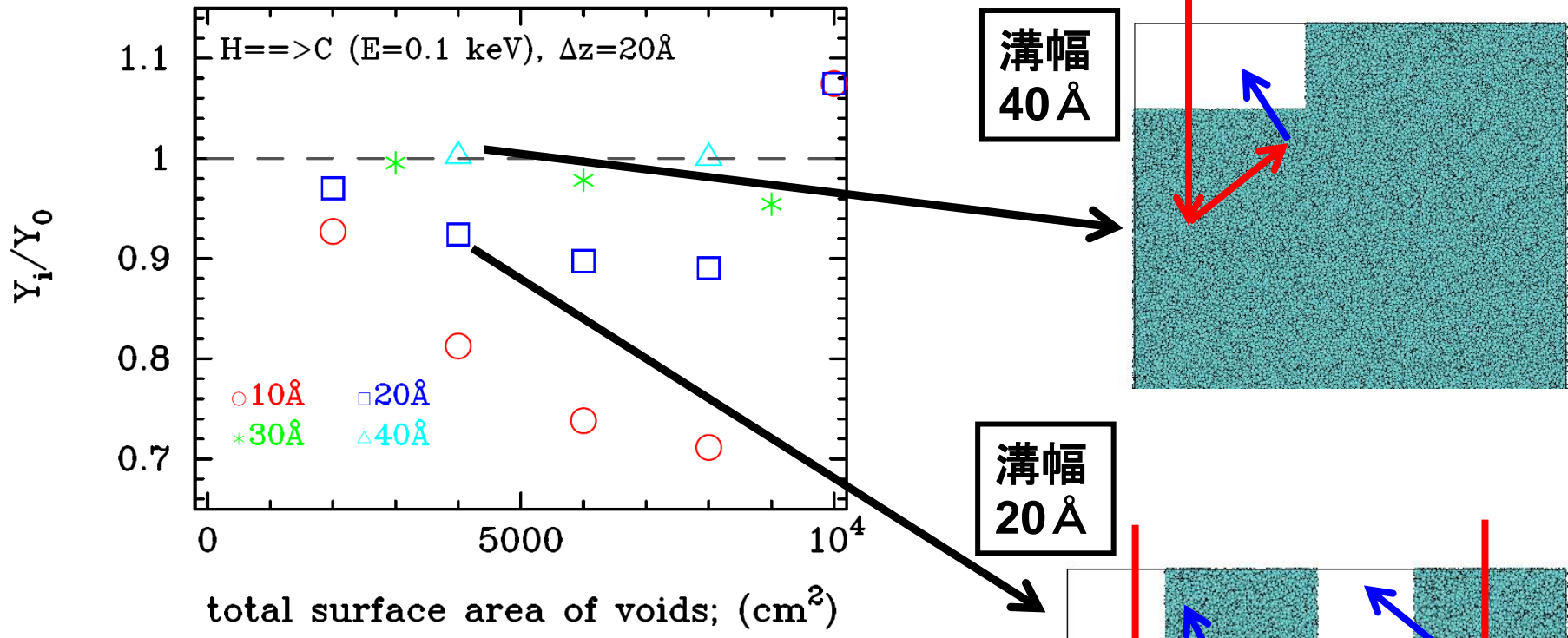


Nakamura et al. 2016

ターゲット物質表面に微細な構造があると、放出された原子の再捕獲が起こり、実効的にスパッタリングイールドが下がる

# 5-2. スパッタリングの表面構造の依存性(1)

非晶質炭素ターゲットの表面に様々な幅と深さの溝を設定して計算

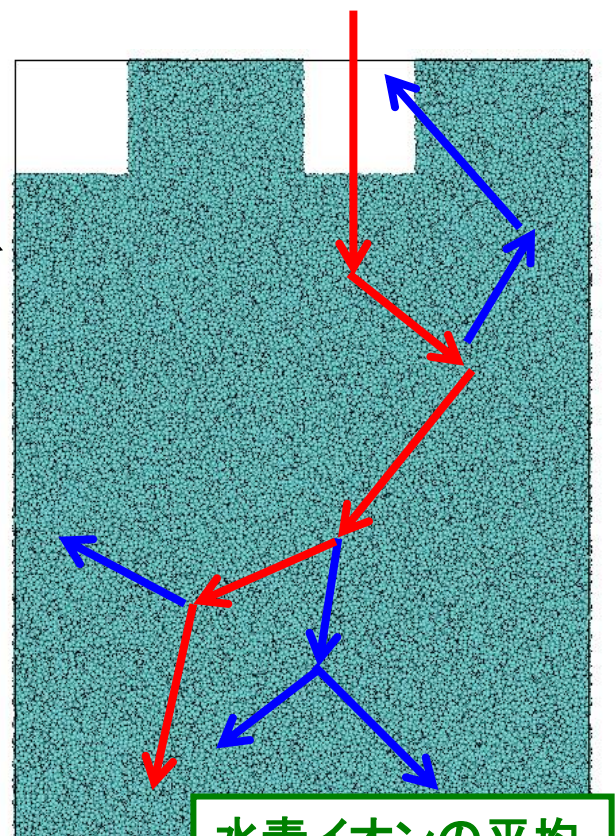
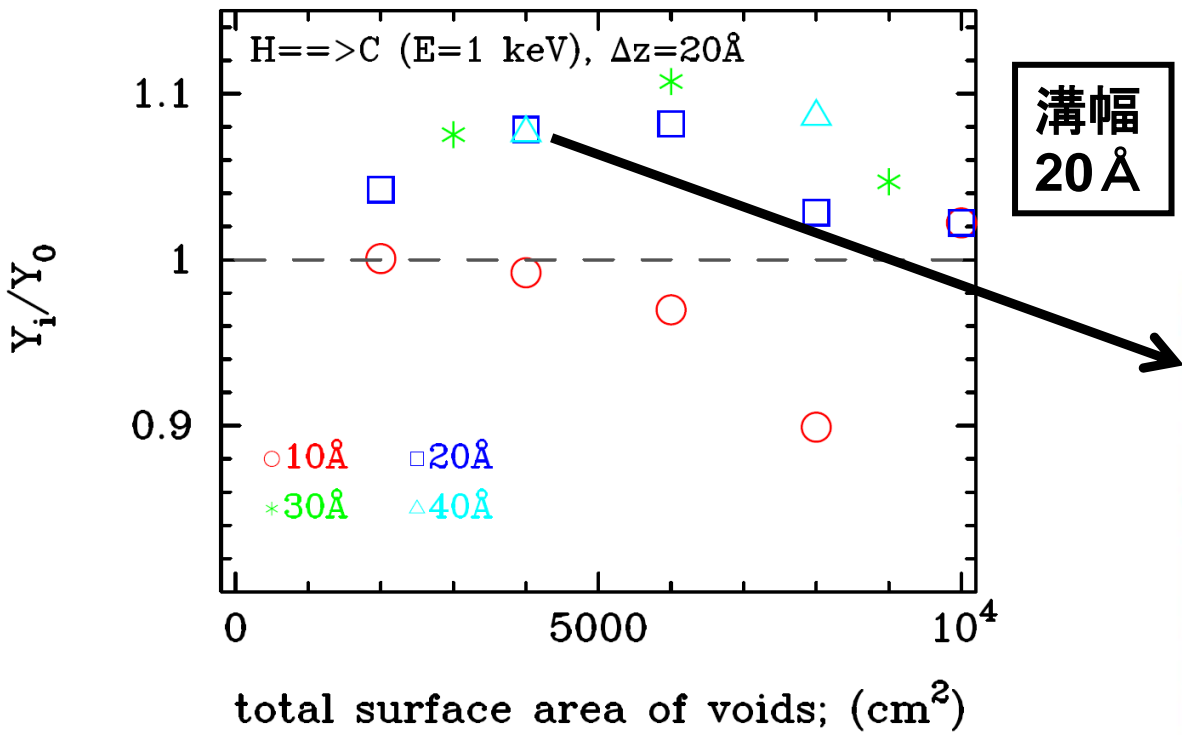


- 溝の幅が狭いほどスパッタリングイールドは減少する
- 溝があることによって放出されにくくなるものと放出されやすくなるものがある

水素イオンの平均到達深さ:  
40 Å @0.1 keV

# 5-3. スパッタリングの表面構造の依存性(2)

非晶質炭素ターゲットの表面に様々な幅と深さの溝を設定して計算



- 入射水素イオンの平均到達深さは、溝の深さよりも十分に大きい
- 入射エネルギーが高い場合、溝の幅が大きいとスパッタリングイールドは増加する

水素イオンの平均到達深さ:  
300 Å @1 keV

# 本発表のまとめ

## ○ 本連携研究の目的

### スパッタリングによる宇宙ダスト破壊効率の再評価

- ダストの形成・破壊を伴う星間ダストの進化(国立天文台)
- スパッタリングの物理と最先端の計算手法(核融合研)

## ○ これまでの連携研究の成果

### 3次元シミュレーションによる非晶質炭素質物質の スパッタリング計算

- スパッタリングイールドの物質密度・表面構造依存性

## ○ 今後の連携研究の展開

- **ダスト有限サイズの効果**、結晶構造による依存性
- シリケートダストのスパッタリング計算