

テーマ

天体内部の空隙率が衝突破壊に与える影響

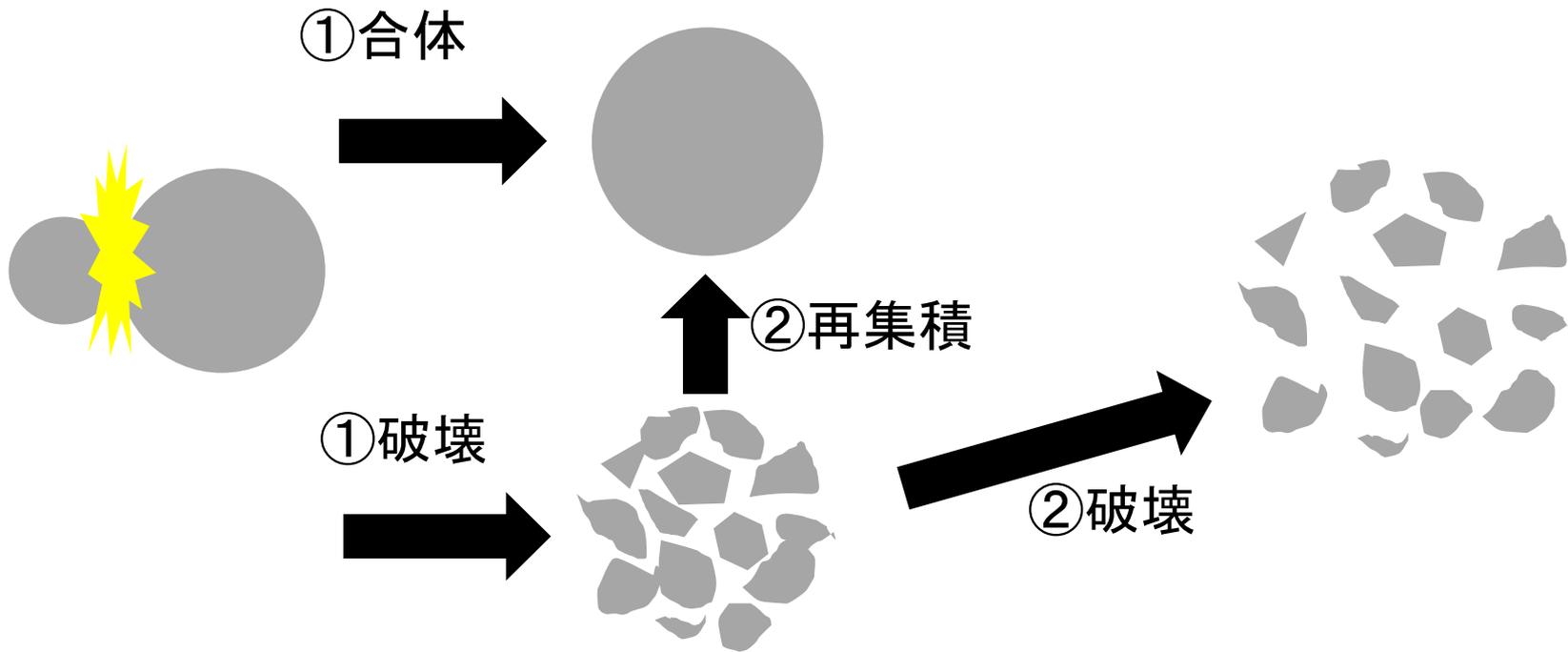
参考論文

Fragment properties at catastrophic disruption threshold:

The effect of the parent body's internal structure

羽倉 幸一 (東大新領域)

1. 背景：衝突破壊



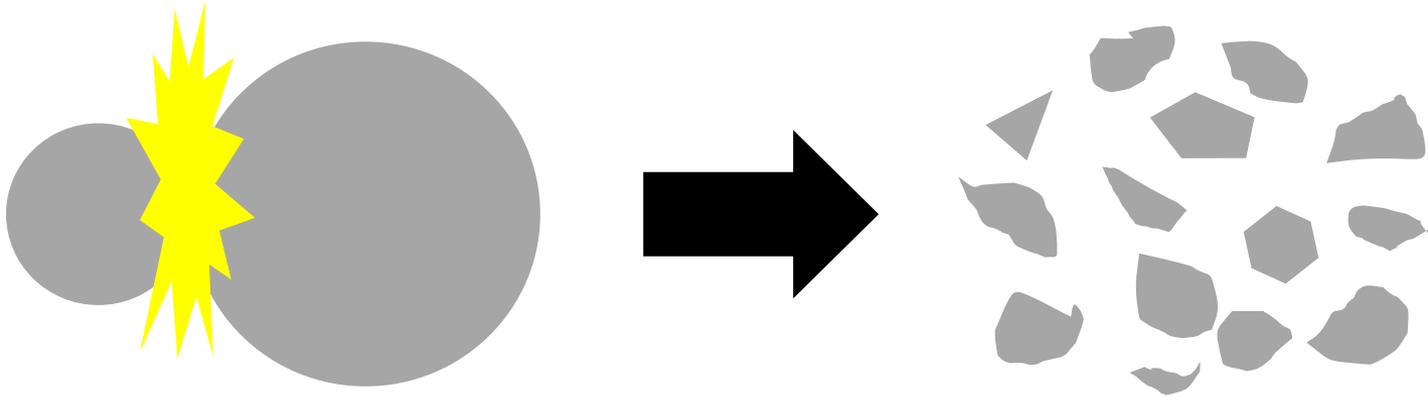
①衝突破壊が起こる条件

$$\sigma_{\text{tensile, shear}}(\text{応力}) > Y_{\text{tensile, shear}}(\text{強度})$$

②再集積する条件

$$V_{\text{escape}}(\text{脱出速度}) > V_{\text{fragment}}(\text{破片速度})$$

1. 背景：衝突破壊の程度とその評価



- エネルギー分配率（衝突破壊の程度を決める）

$$E_{\text{天体衝突}} = E_{\text{粉碎・塑性変形}} + E_{\text{圧密}} + E_{\text{破片運動}} + (E_{\text{熱}})$$

- 本論文では、空隙がエネルギー分配の割合にどのような影響を与えているかを調べた

⇒ Q_D^* を評価指標とし、どれだけ破壊されているかを調べた

1. 背景: Q_D^*

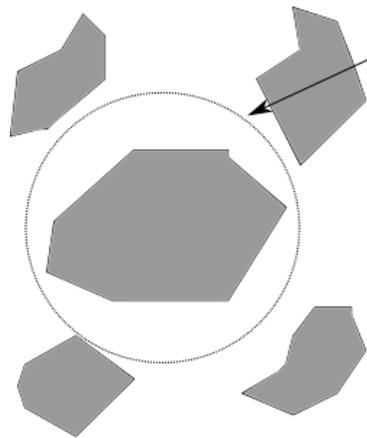
- エネルギー密度 Q

$$Q = \frac{m_p v_p^2}{2M_T}$$

m_p : プロジェクトイルの質量, M_T : ターゲットの質量,
 v_p : プロジェクトイルの速度

- Q_D^* : 最大破片がちょうどターゲットの質量の半分になる時のエネルギー密度
- 最大破片を考慮するに当たって、ターゲットの大きさが

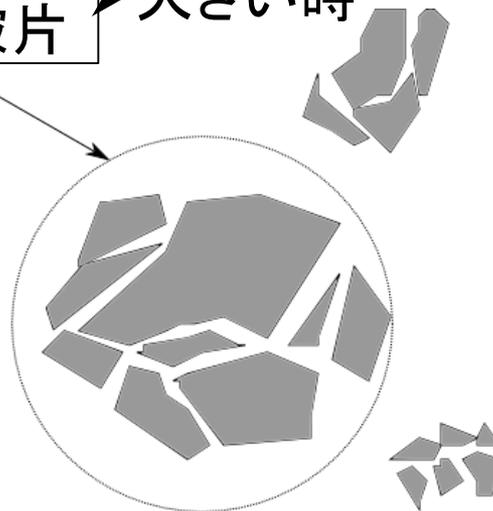
➤ 小さい時



重力が小さいため、再集積されない。(強度支配域)

最大破片

➤ 大きい時



破壊された後、再集積される(重力支配域)

1. 背景：始原天体

- 太陽系始原天体は形成初期には非常に大きな空隙率を持つと考えられている
- 微惑星では、空隙率が99%を超えるものがあると考えられている (T.Suyama et al., 2008)
- 観測によると、彗星では空隙率86%を持つ天体まで存在している (G.J.Consolmagno et al., 2008)

⇒ 太陽系形成初期の間に始原天体は非常に空隙が高かったと考えられる

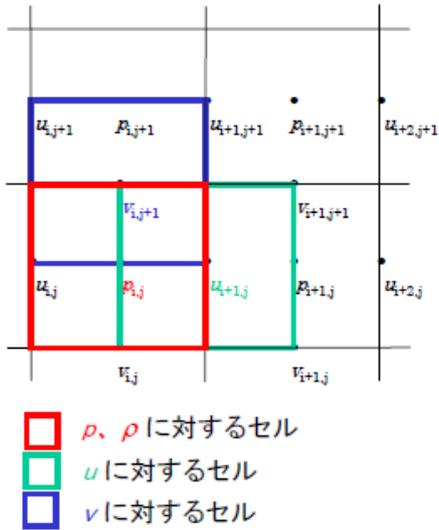
⇒ 空隙が衝突破壊にどのような影響を与えているかを考察する必要がある

2. 目的

- SPH法を用いて、空隙の有無が Q_D^* にどのように影響を与えるかについて調べる
- 各ターゲットの Q_D^* と衝突速度、材料強度の関係

3.手法:数値計算

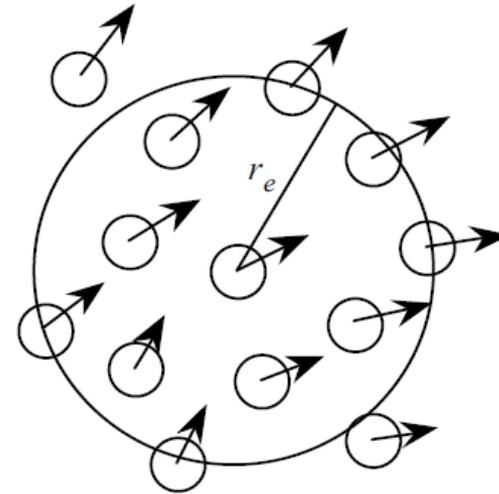
● 格子法



長所: 少ない格子で高分解能を実現し、効率的に計算できる

短所: 界面の変形が大きいと格子のゆがみが大きくなり計算が破たんする

● 粒子法



長所: 界面の大変形を扱うことが容易

複雑な格子生成作業が必要ない

短所: 計算コストが大きい

3.手法:SPH法

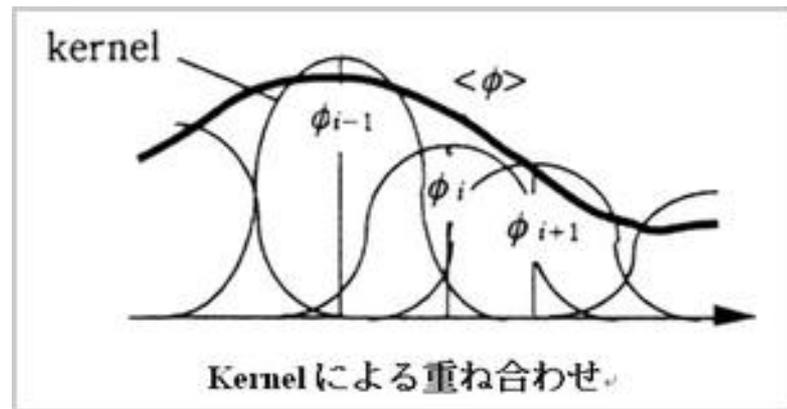
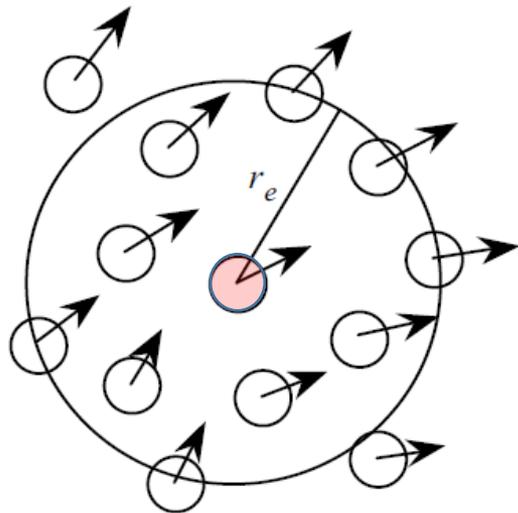
SPH = Smoothed Particles Hydrodynamics

●銀河系の衝突や天体の形成などの宇宙物理学におけるシミュレーションのために提案された手法(Lucy, 1977)

➤ 物理量 Φ の離散化式

$$\Phi(x) = \sum_{j \in N} m_j \frac{\Phi_j}{\rho_j} W(x_j - x, h)$$

$W(x,h)$:カーネル関数、 h :カーネルの空間変数



3.手法:SPH法

基礎方程式

$$\begin{aligned} \text{質量保存則:} & \quad \frac{D\rho_{\kappa}}{Dt} = -\rho \frac{\partial v_{\kappa\lambda}}{\partial x_{\lambda}} \\ \text{運動量保存則:} & \quad \frac{Dv_{\kappa}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{\kappa\lambda}}{\partial x_{\lambda}} \\ \text{エネルギー保存則:} & \quad \frac{De}{Dt} = -\frac{P}{\rho} \frac{\partial v_{\kappa}}{\partial x_{\kappa}} + \frac{1}{\rho} S_{\kappa\lambda} \dot{\epsilon}_{\kappa\lambda} \\ \text{フックの法則:} & \quad \frac{DS_{\kappa\lambda}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\epsilon}_{\kappa\lambda} - \frac{1}{3} \delta_{\kappa\lambda} \dot{\epsilon}_{\nu\nu} \right) + S_{\kappa\lambda} \Omega_{\lambda\nu} + S_{\lambda\nu} \Omega_{\kappa\nu} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\kappa\lambda} = S_{\kappa\lambda} - P\delta_{\kappa\lambda}$$

$$\dot{\epsilon}_{\kappa\lambda} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{\kappa}}{\partial x_{\lambda}} + \frac{\partial v_{\lambda}}{\partial x_{\kappa}} \right)$$

$$\Omega_{\kappa\nu} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{\kappa}}{\partial x_{\lambda}} - \frac{\partial v_{\lambda}}{\partial x_{\kappa}} \right)$$

$$P = P(\rho, e)$$

ρ : 密度, σ : 応力, v : 速度, x : 位置, e : 内部エネルギー, S : 偏差応力, P : 圧力, μ : せん断弾性率, $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度, Ω : 回転テンソル

3. 手法 : SPH法

●空隙を考慮に入れるに当たって、
状態方程式の圧力 $P(\rho, e)$ に膨張パラメータ α を加える

$$\left(\alpha = \frac{\rho_s}{\rho}\right)$$

ρ : 空隙のある物質の密度,
 ρ_s : 空隙のない物質の密度

$$\text{圧力: } P(\alpha, \rho, e) = \frac{1}{\alpha} P(\rho, e)$$

$$\text{空隙率: } 1 - \frac{1}{\alpha}$$

基礎方程式と圧力 P を満たすように各変数を更新する。

3.手法:ターゲット条件

- 空隙のないターゲット:玄武岩(密度:2.7g/cm³)
- 空隙のあるターゲット:軽石(密度:1.3g/cm³)
- 衝突速度 3km/s,5km/s
- 衝突角度45°
- 半径0.3cm,3m,0.3km,1km,10km,100km
- SPH粒子数 2×10^5 個
- 強度

	降伏強度(dynes/cm ³)	引っ張り強度(dynes/cm ³)
玄武岩	3.5×10^{10}	3.2×10^8
玄武岩(強度:弱)	1.0×10^8	3.3×10^7
軽石	3.5×10^{10}	3.5×10^7
軽石(強度:高)	3.5×10^{10}	3.5×10^8

4. 結果: Q_D^* とターゲットサイズの関係

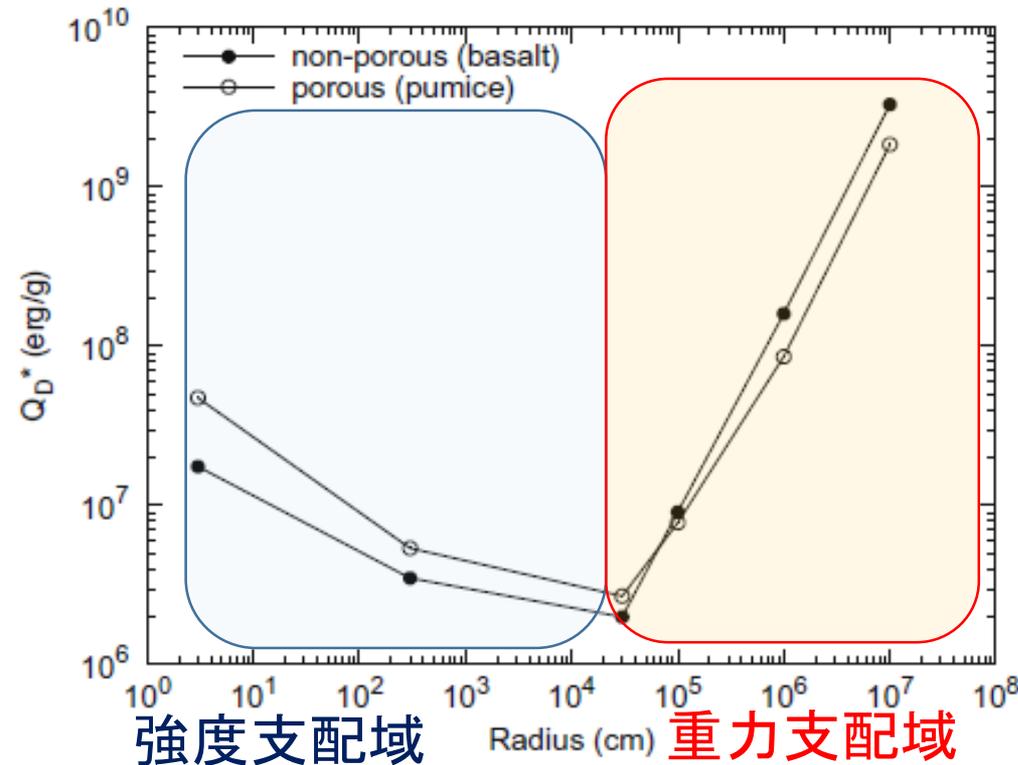


図1: ターゲットサイズと Q_D^* の関係

数値計算の結果は、ある大きさ（半径=300m）で挙動が変わる。左側を強度支配域、右側を重力支配とする。

● 強度支配域

サイズ大 $\Rightarrow Q_D^*$ 小

\Rightarrow ターゲットサイズが大きくなるとひずみ速度が小さくなる (Housen & Holsapple, 1999)

● 重力支配域

サイズ大 $\Rightarrow Q_D^*$ 大

\Rightarrow 物質が破壊された後、物質が再集積されて分散量が少ない (Benz & Asphaug, 1999)

4. 結果: Q_D^* と空隙の関係

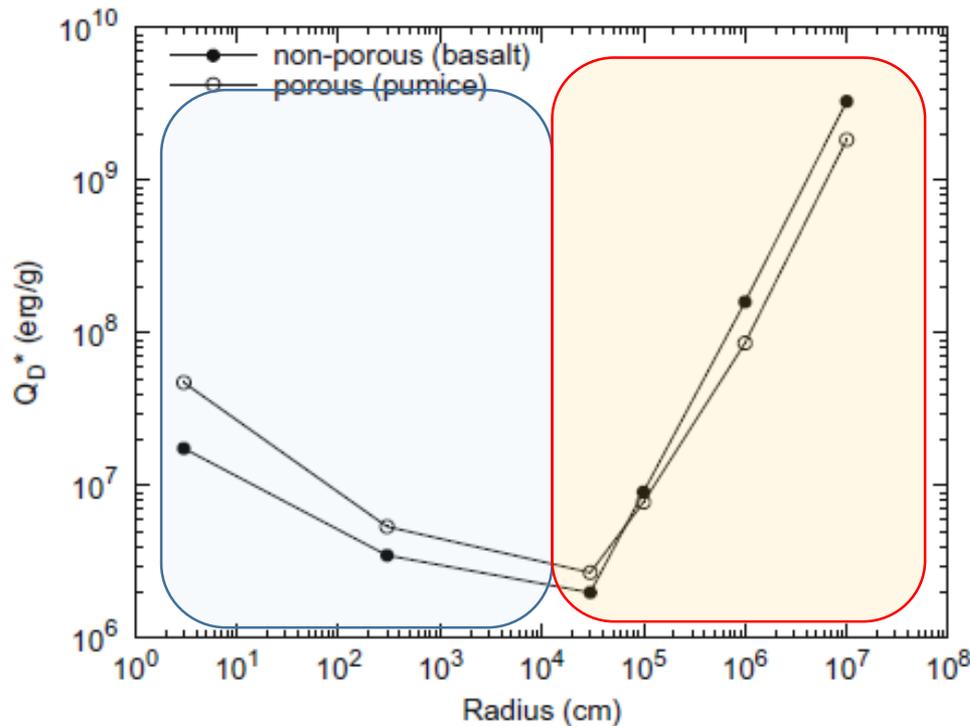


図1: ターゲットサイズと Q_D^* の関係

● 強度支配域

Q_D^* (空隙有) > (空隙無)

⇒空隙の存在によって、圧密によるエネルギー損失が大きいから

● 重力支配域

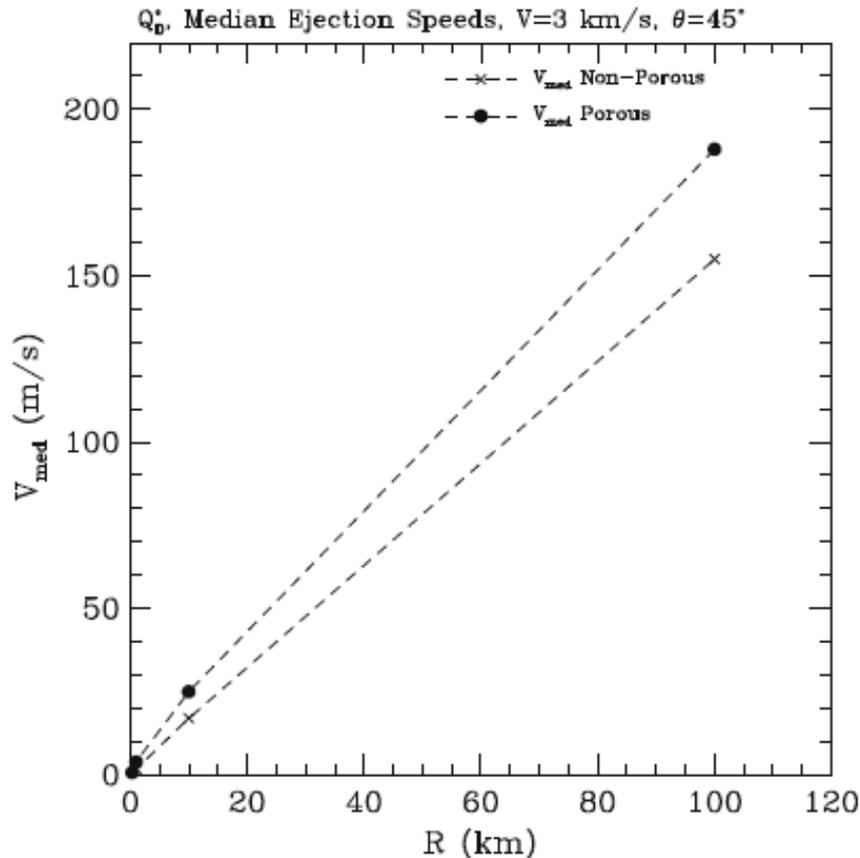
Q_D^* (空隙有) < Q_D^* (空隙無)

①ターゲットの密度が低いと、再集積の効率が悪い

∵重力が弱くなる

②せん断強度は空隙のある物質の方が小さい

4. 結果：イジェクタ速度と空隙の関係



$V(\text{空隙無}) < V(\text{空隙有})$

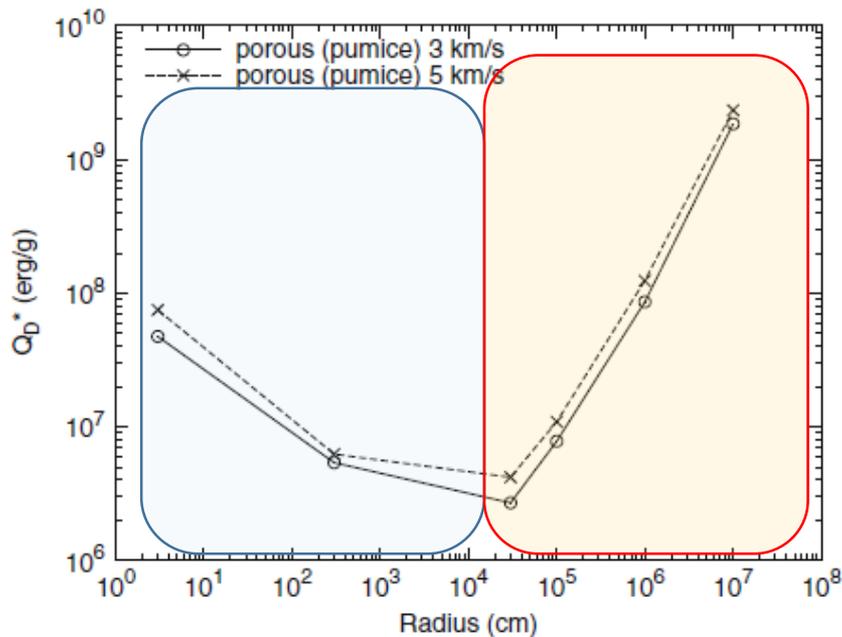
● 空隙が有る物質への衝突破壊に必要なエネルギー量が大きい

⇒空隙が無い物質の方がイジェクタの運動エネルギーに多く分配されていることがわかる。
⇒脱出するイジェクタ量が変わるため、再集積された破片のサイズに影響を与える。

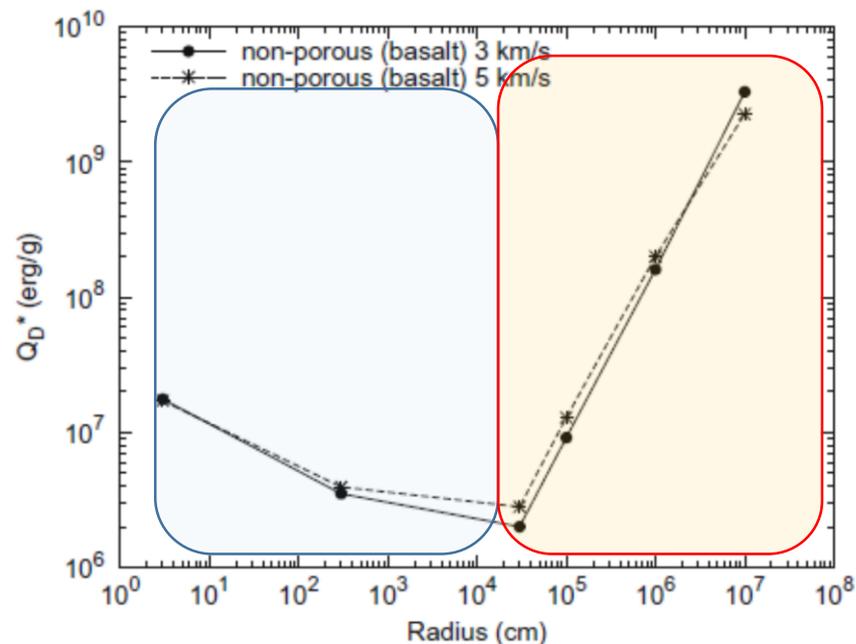
図2: ターゲットのサイズとイジェクタの放出速度の関係

4. 結果: Q_D^* と衝突速度の関係

● 軽石 (空隙あり)



● 玄武岩 (空隙なし)



空隙の有無に関わらず、

$Q_D^*(5\text{km/s}) > Q_D^*(3\text{km/s})$

⇒ 低速度の方が運動効率が良いため (Benz & Asphaug, 1999)

4. 結果: Q_D^* と材料強度の関係

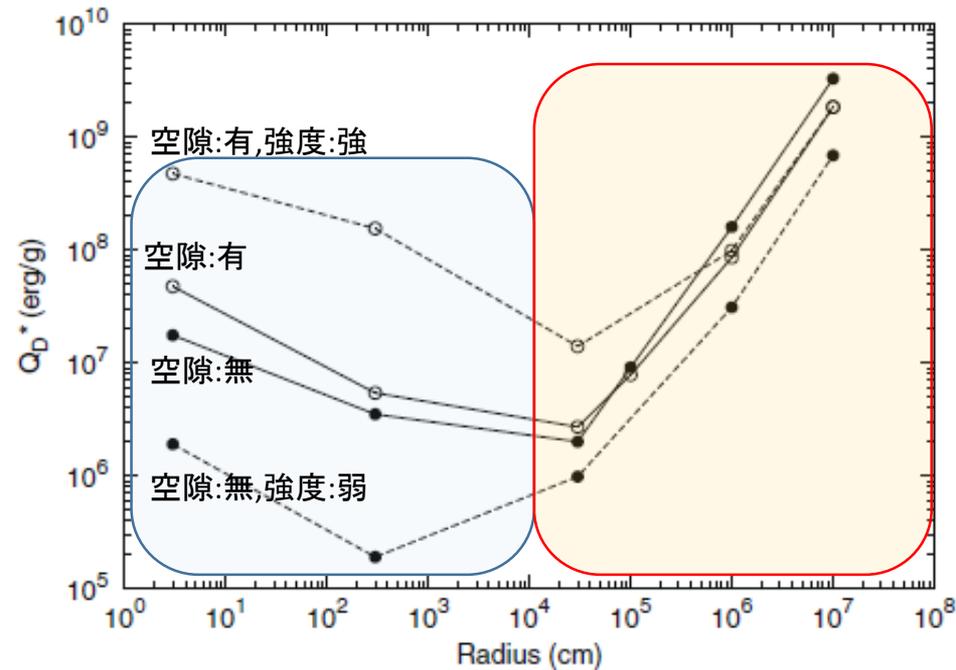


図3: 材料強度を変えた時のターゲットサイズと Q_D^* の関係

● 強度支配域

材料強度が変わっても空隙が Q_D^* を大きくする効果は変わらない。

● 重力支配域

重力支配域では、空隙の有無だけで物質の破壊しやすさを決められない

5.まとめ

- SPH法を用いて、空隙の有無が衝突破壊にどのような影響を与えたのかを調べた。

- 空隙の有無と Q_D^* の関係

- 強度支配域

$$Q_D^*(\text{空隙有}) < Q_D^*(\text{空隙無})$$

- 重力支配域

$$Q_D^*(\text{空隙有}) > Q_D^*(\text{空隙無})$$

- 強度を考慮した空隙の有無と Q_D^* の関係

- 強度支配域

材料強度が変わっても空隙が Q_D^* を大きくする効果は変わらない

- 重力支配域

空隙の有無だけで物質の破壊しやすさを決められない