

衝突破壊強度 Q^*_D の サイズ依存性とは？

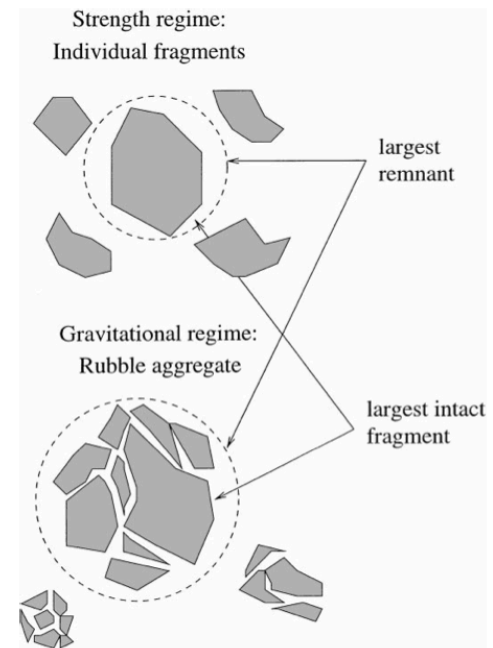
Catastrophic Disruptions Revisited
Benz and Asphaug, 1999

はじめに

- 太陽系の進化において、衝突は重要である
 - 小惑星族や星間塵、他の小惑星、連星etc...
- 衝突は3つのタイプに分けられる
 - クレーター形成 (cratering)
 - 天体の全体には影響せず、クレーターを形成
 - 粉砕 (shattering)
 - 天体を破片に粉砕
 - 分散 (dispersing)
 - 破片が脱出速度を超える

エネルギー密度 Q (エネルギー/ターゲット質量)

- $Q = m_i v_i^2 / 2M_t$
- Q^*_S : 最大破片がちょうどターゲットの質量の半分になるときのエネルギー密度
- Q^*_D : (再集積した)最大破片がちょうどターゲットの質量の半分になるときのエネルギー密度
 - 強度支配域では...
 - $Q^*_S = Q^*_D$
 - 重力支配域では...
 - $Q^*_D > Q^*_S$



今回の論文

- smooth particle hydrodynamics (SPH)法を用いて、cmから数百kmサイズの玄武岩ターゲットと氷ターゲットにおける衝突をシミュレーションする
- Q_D^* を決定することを目的とする
- 物質強度と自己重力の効果を組み合わせる
 - ▣ 強度支配域、重力支配域、中間領域をすべてカバーする

玄武岩天体、あるいは氷天体の衝突をシミュレーションし、カタストロフィック衝突破壊強度 Q_D^* を決める

破片の特定

1. 一枚岩の破片を特定

- 質量、位置、速度、角運動量、慣性モーメントを得る

2. 50-100mを超えるターゲット

⇒ 一部は再集積

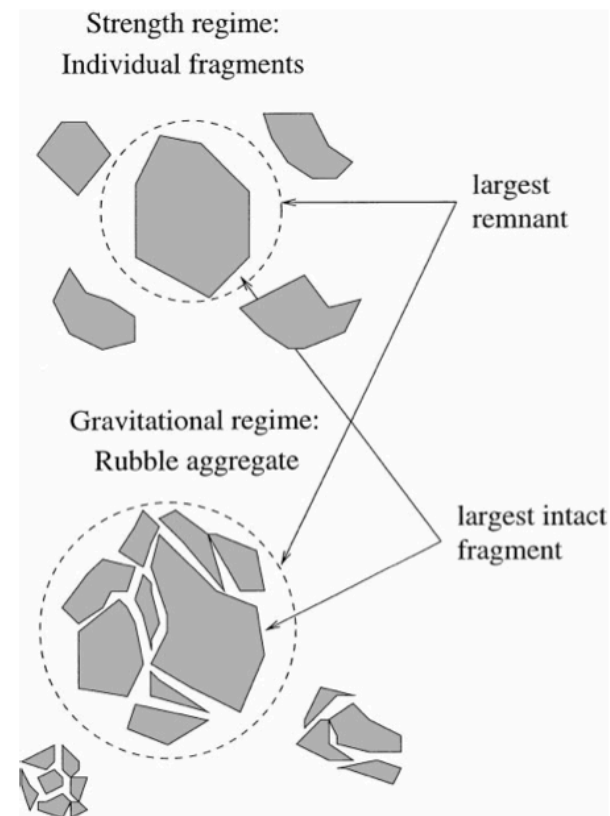
繰り返し

- ① 粒子、破片間にはたらく結合エネルギーを計算
- ② 結合されなかった粒子を取り除く

重力によって再集積した集合体の質量、位置、速度、角運動量、慣性モーメントを得る

■ 最大破片の特定

- 強度支配域: 一枚岩の破片
- 重力支配域: 一枚岩の破片の集合体



シミュレーション初期条件

- 半径 : 3cm, 3m, 1 km, 3km, 10km, 30km, 100km
- 物質 : 玄武岩, 氷
- 衝突角度 : 0° , 30° , 45° , 60° , 75°
- 衝突速度 : 氷 ; 0.5km/s, 3km/s, 玄武岩 ; 3km/s, 5km/s
- 合計480の異なるシミュレーション
- ターゲットを42,000個の粒子で再現
 - ▣ 最大破片の特徴を決めるのに十分
- 弾丸 : 3km/s, 5km/s ; 800個の粒子,
0.5km/s ; 7000個の粒子

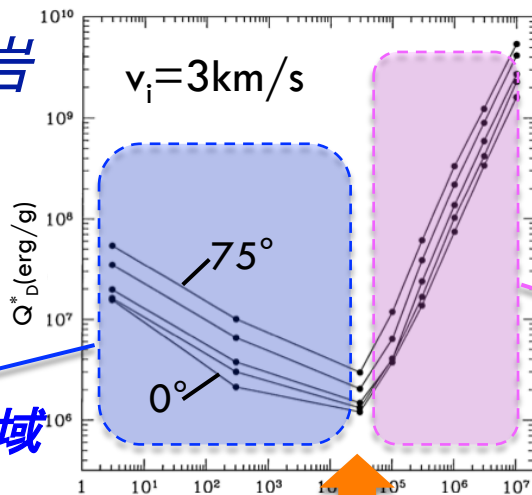
衝突破壊強度 Q_D^*

- Q_D^* は、 Q の異なる3つのシミュレーションを補間することによって得られる
 - $f_{\max} = M_{lr} / M_{pb}$; 0.3-0.7
(M_{lr} : 最大破片質量, M_{pb} : ターゲットの質量)
 - 多項式フィッティング: $f_{\max} = aQ^2 + bQ + c$
 - $f_{\max}(Q_D^*) = 0.5$

衝突破壊強度 Q_D^* の ターゲットサイズ依存性

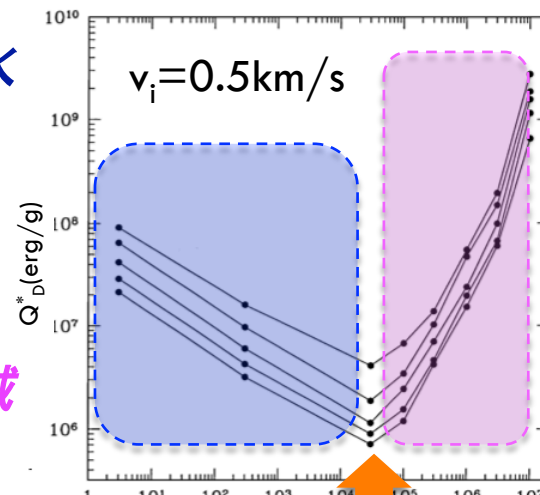
● 玄武岩

強度支配域

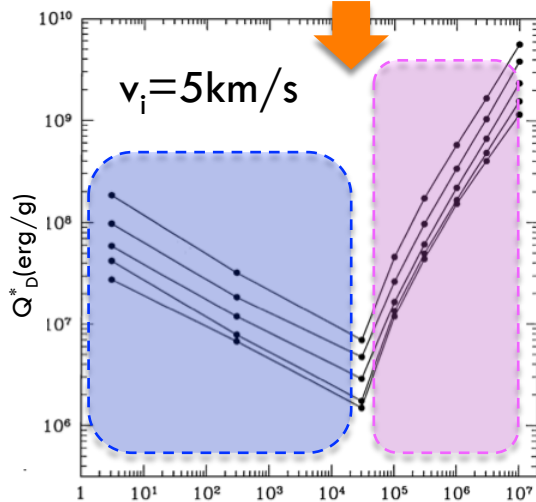


100m ~ 1km

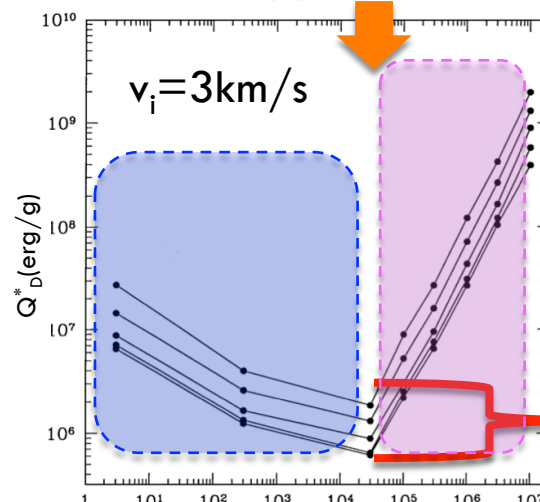
● 氷



100m ~ 1km



ターゲット半径 (cm)

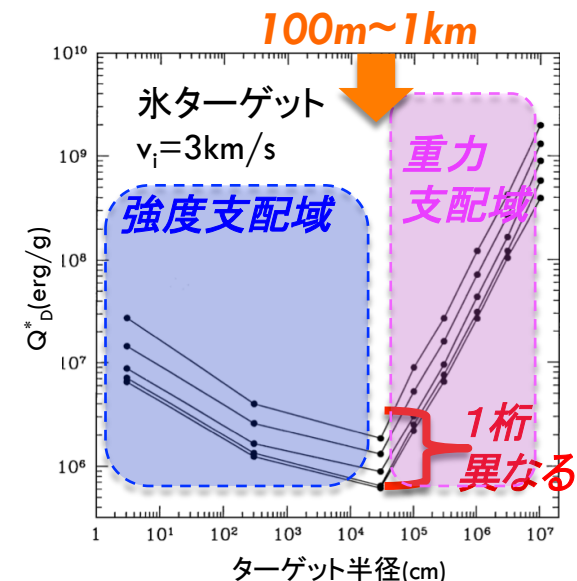


ターゲット半径 (cm)

1桁異なる

衝突破壊強度 Q_D^* の ターゲットサイズ依存性からわかること

- 強度支配域: サイズ大 $\Rightarrow Q_D^*$ 小
- 重力支配域: サイズ大 $\Rightarrow Q_D^*$ 大
 - ▣ その境界はターゲット半径 **100m~1km** のところ
- 同サイズにおいて Q_D^* は**衝突角度依存性**がある
 - ▣ 正面衝突は75°斜め衝突の約10倍壊れやすい
- 重力支配域における Q_D^* の増加の原因
 - ▣ Q_D^* 衝突ではかなり粉砕されてしまうが、分散はされない
 - 相対速度がアグリゲイトの脱出速度を超えないから



衝突角度に依存しない Q_D^*

- 等方的に弾丸がとんでくるとして...
 - 角度 α と $\alpha + d\alpha$ の間の角度の衝突の確率分布
 - $P(\alpha)d\alpha = 2\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha \quad 0 < \alpha < \pi/2$
 - $Q_D^* = \int_0^{\pi/2} 2Q_D^*(\alpha)\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha$
- フィットティング;

$$Q_D^* = Q_0 \left(\frac{R_{pb}}{1cm} \right)^a + B\rho \left(\frac{R_{pb}}{1cm} \right)^b$$

- R_{pb} : ターゲットの半径, ρ : 母天体の密度, Q_0, B, a, b : 定数
- $a(a < 0)$: 強度支配域
- $b(b > 0)$: 重力支配域

TABLE III
Fit Constants for Q_D^*

Material	v_{impact} (km/s)	Q_0 (erg/g)	B (erg cm ³ /g ²)	a	b
Basalt	5	$9.0 \cdot 10^7$	0.5	-0.36	1.36
Basalt	3	$3.5 \cdot 10^7$	0.3	-0.38	1.36
Ice	3	$1.6 \cdot 10^7$	1.2	-0.39	1.26
Ice	0.5	$7.0 \cdot 10^7$	2.1	-0.45	1.19

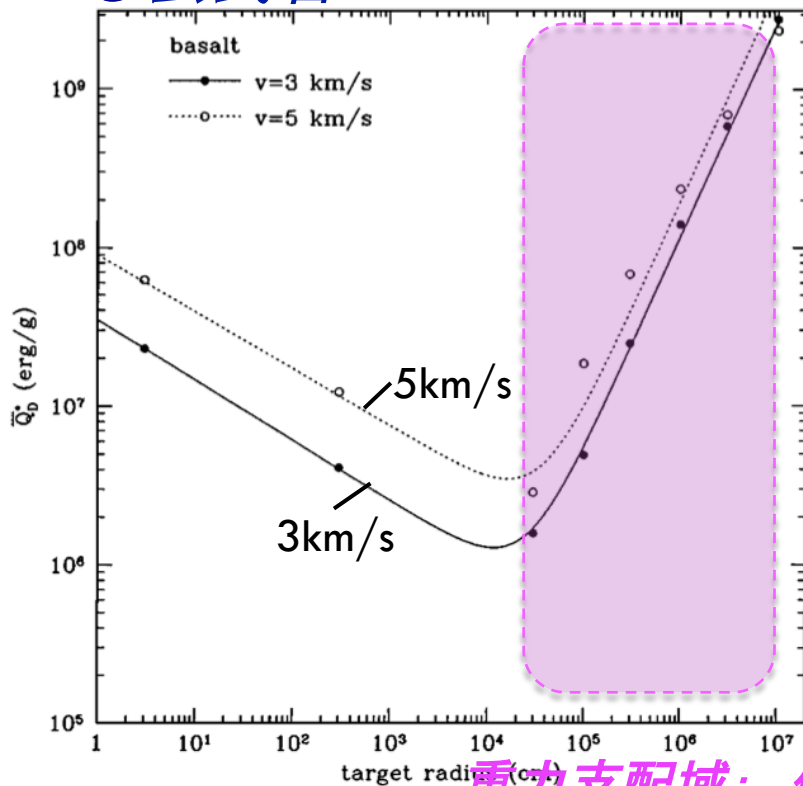
衝突角度に依存しない Q_D^*

$$Q_D^* = Q_0 \left(\frac{R_{pb}}{1\text{cm}} \right)^a + B\rho \left(\frac{R_{pb}}{1\text{cm}} \right)^b$$

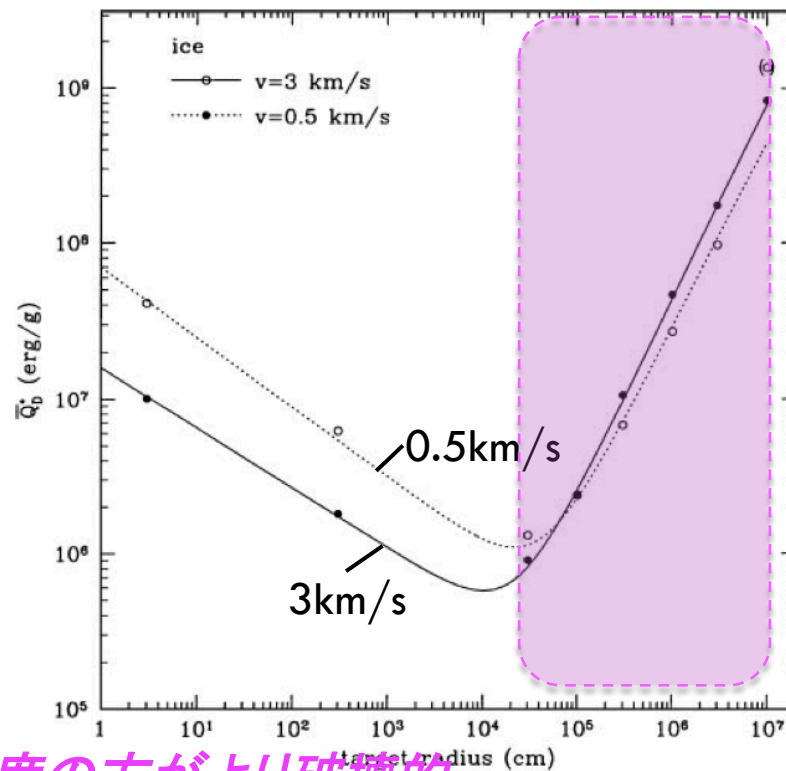
TABLE III
Fit Constants for Q_D^*

Material	v_{impact} (km/s)	Q_0 (erg/g)	B (erg cm ³ /g ²)	a	b
Basalt	5	$9.0 \cdot 10^7$	0.5	-0.36	1.36
Basalt	3	$3.5 \cdot 10^7$	0.3	-0.38	1.36
Ice	3	$1.6 \cdot 10^7$	1.2	-0.39	1.26
Ice	0.5	$7.0 \cdot 10^7$	2.1	-0.45	1.19

玄武岩



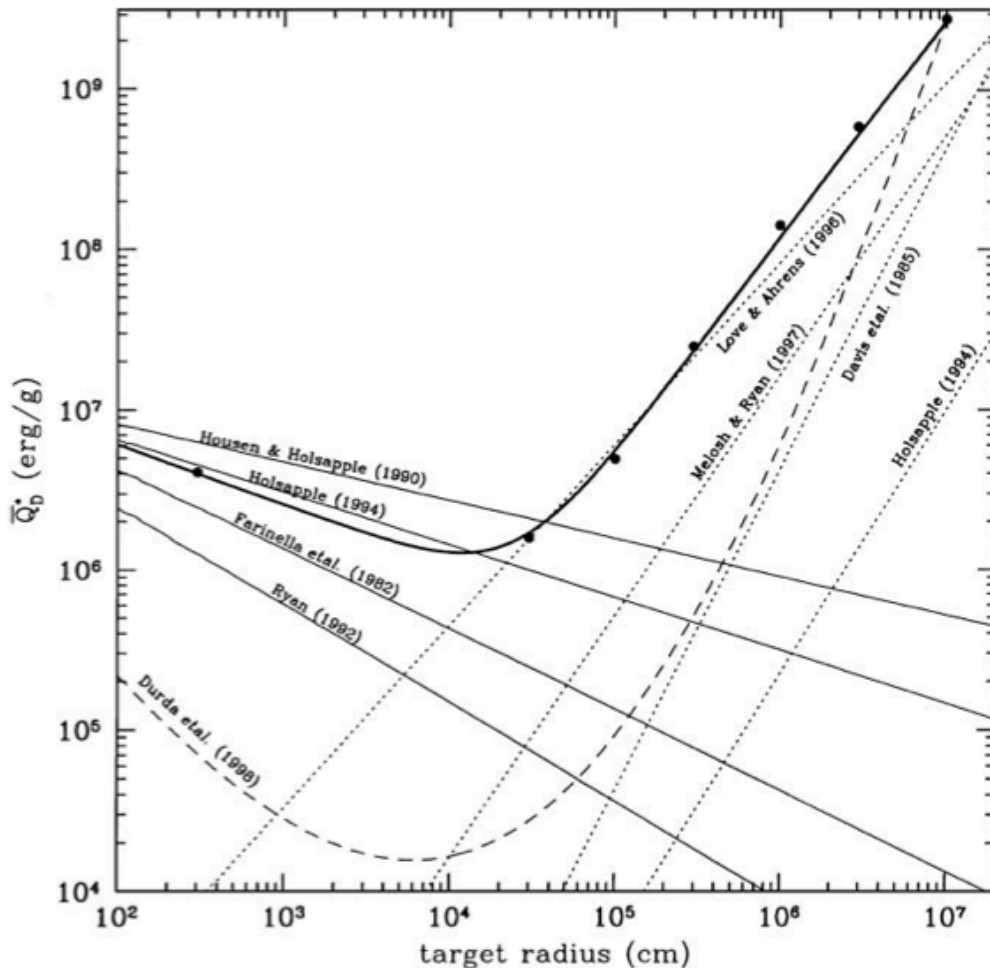
氷



重力支配域：低速度の方がより破壊的

⇒ 低速度衝突の方が運動移行効率が良いため

先行研究との比較



- 小さいサイズ範囲で、Holsapple 1994 とよく合う
- 大きいサイズ範囲では、どの結果よりも Q_D^* が大きい (壊れにくい)
- 強度支配域から重力支配域への移り変わりが、サイズの小さいところでみられる
- 100-200m のターゲットが最も弱い
 - Durda 1998 と同じ

最も弱い天体半径 R_{weak}

- ある物質について、最も Q_D^* が小さくなる半径 R_{weak} は

$$dQ_D^*/dR=0$$

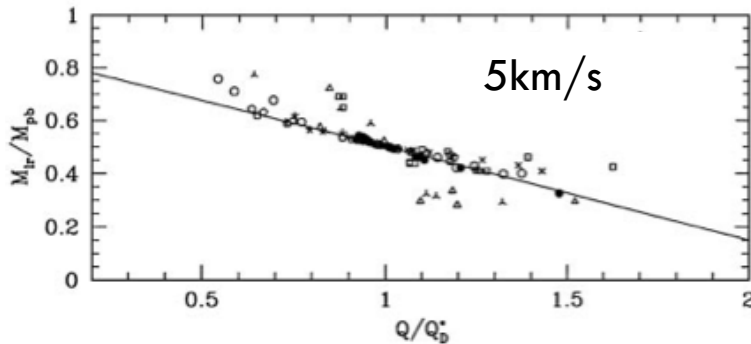
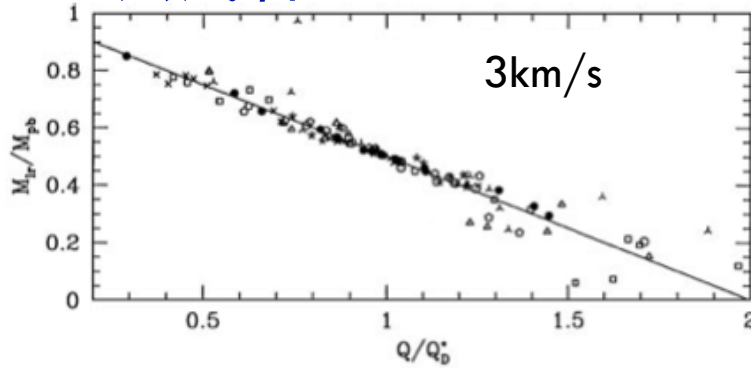
とすることによって得られる

Material	v_{impact} (km/s)	R_{weak} (m)
Basalt	5	163
Basalt	3	117
Ice	3	102
Ice	0.5	213

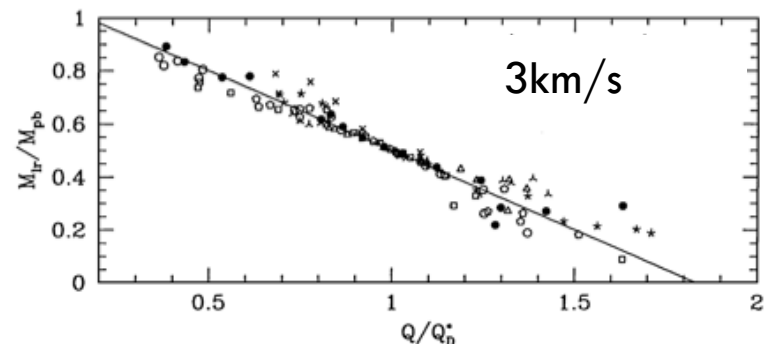
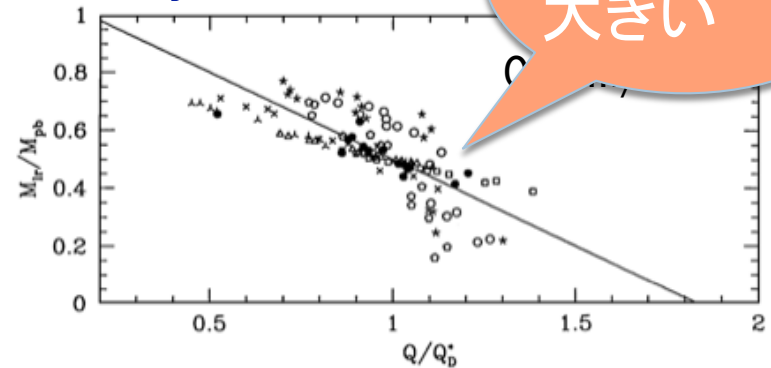
どれも
100~200m
先行研究と比べると小さい

最大破片質量(M_{lr})の エネルギー密度(Q)依存性

● 玄武岩



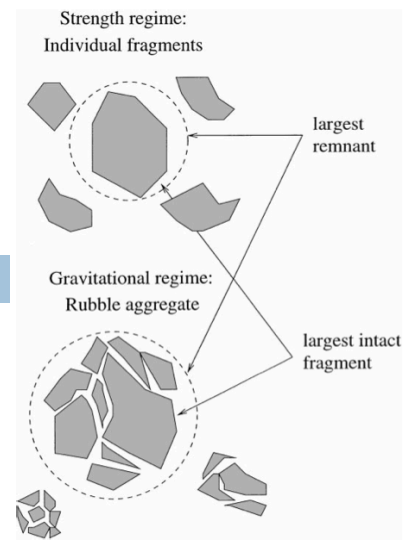
● 氷



ばらつきが
大きい

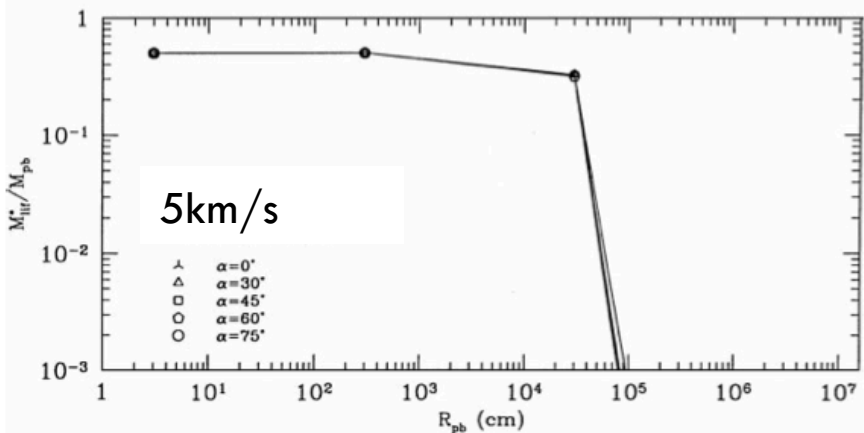
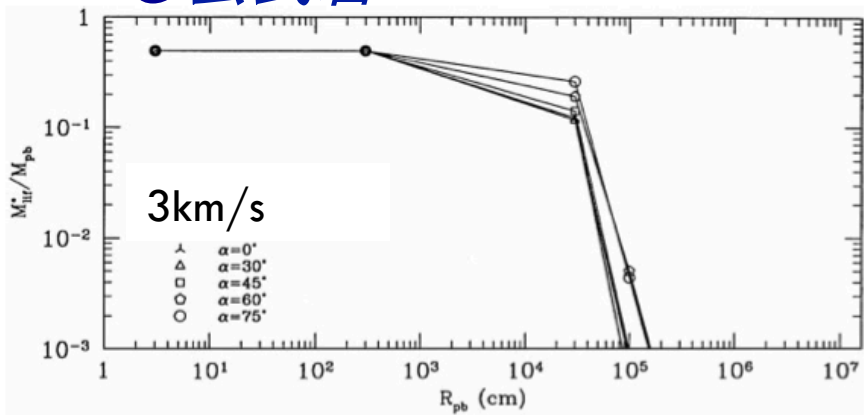
- 最大破片質量は Q に依存
- ターゲットサイズ、衝突角にはよらない

一枚岩の最大破片質量 M_{lif}^* のターゲットサイズ依存性

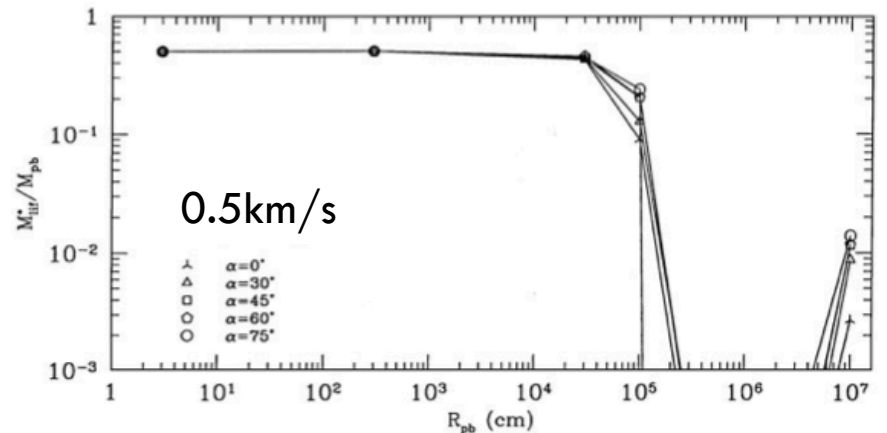
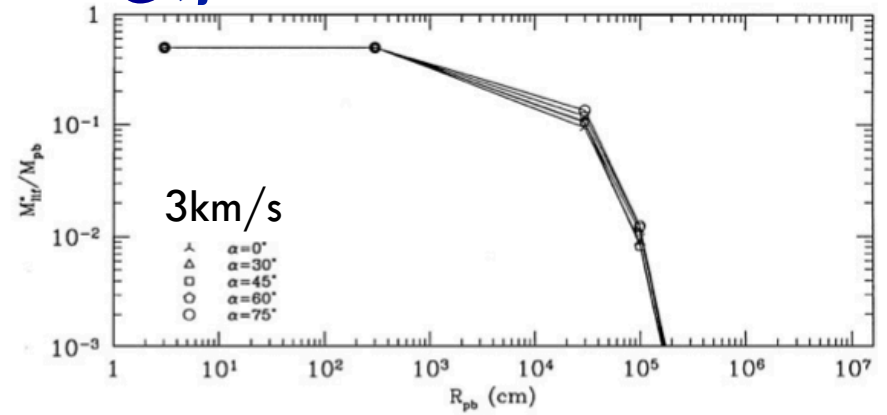


$M_{lif} = f(Q)$ をフィッティング $\Rightarrow M_{lif}^* = f(Q_D^*)$ とする

● 玄武岩



● 氷



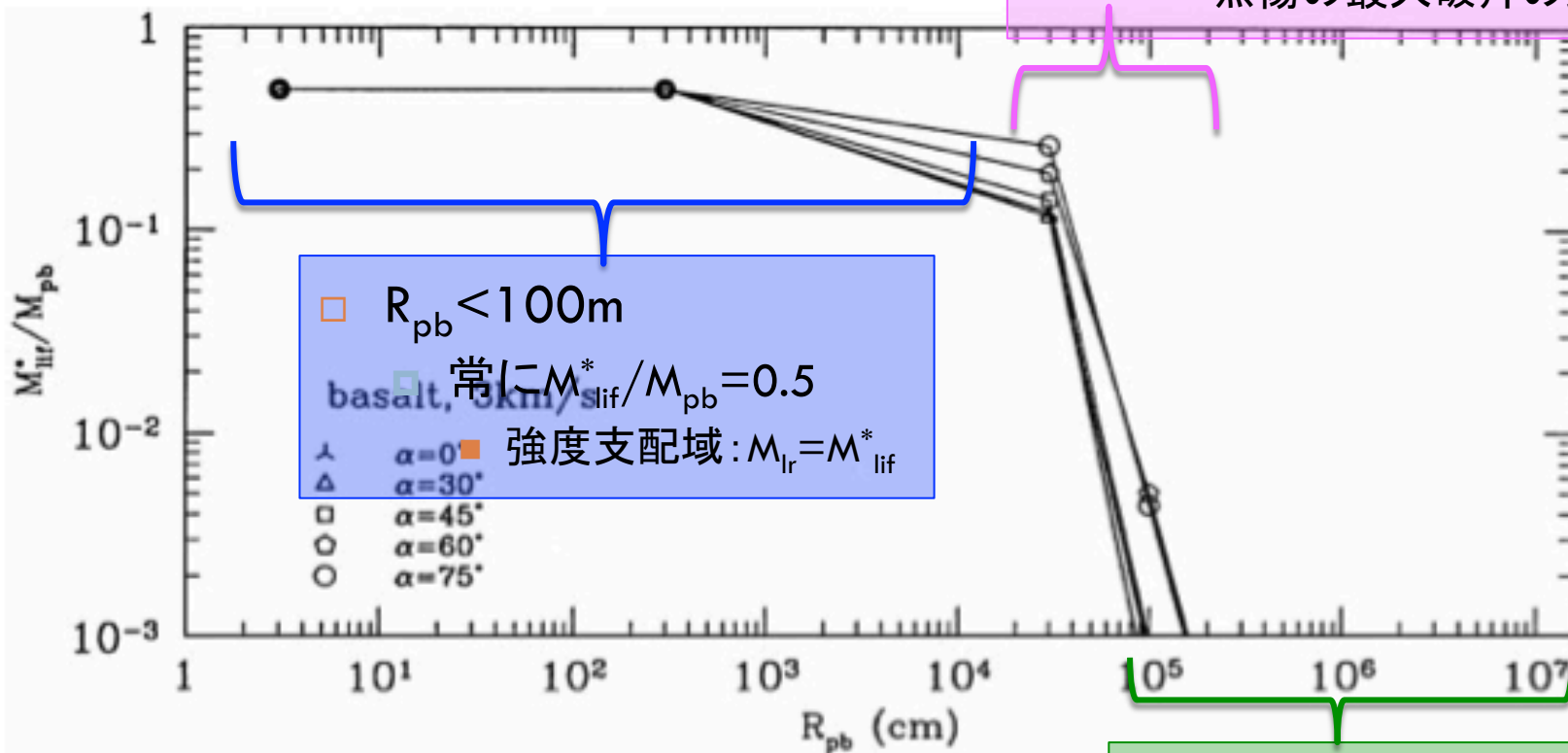
無傷の最大破片質量 M_{lif}^* の ターゲットサイズ依存性

無傷の最大破片質量: $M_{lif}^* = f(Q_D^*)$

□ $R_{pb} > \text{数}100\text{m}$

□ M_{lif}^*/M_{pb} は急激に下がる

■ 重力支配域: 最大破片は無傷の最大破片の集合体

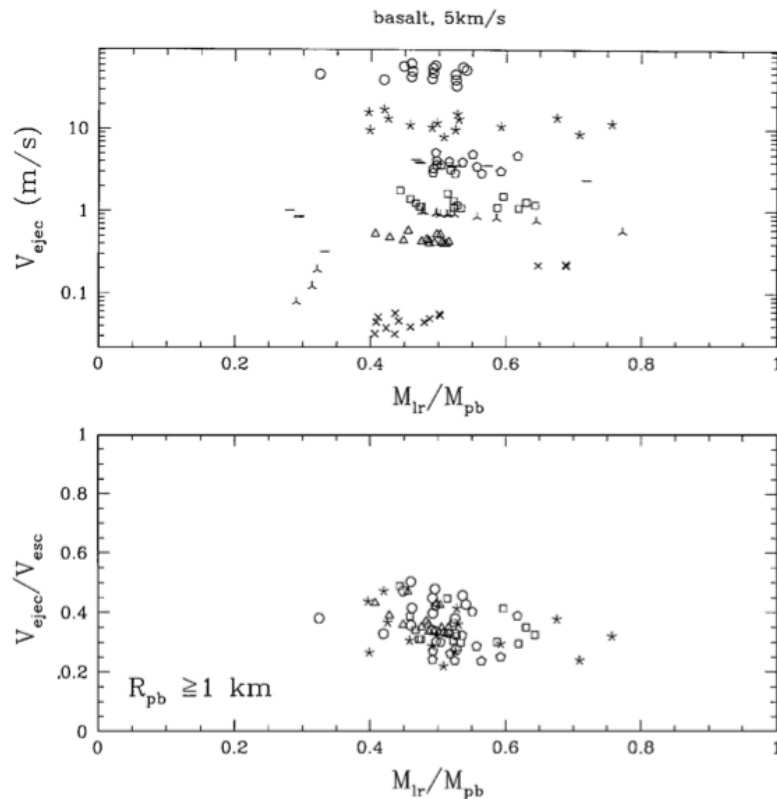


□ $1 < R_{pb} < 100\text{km}$

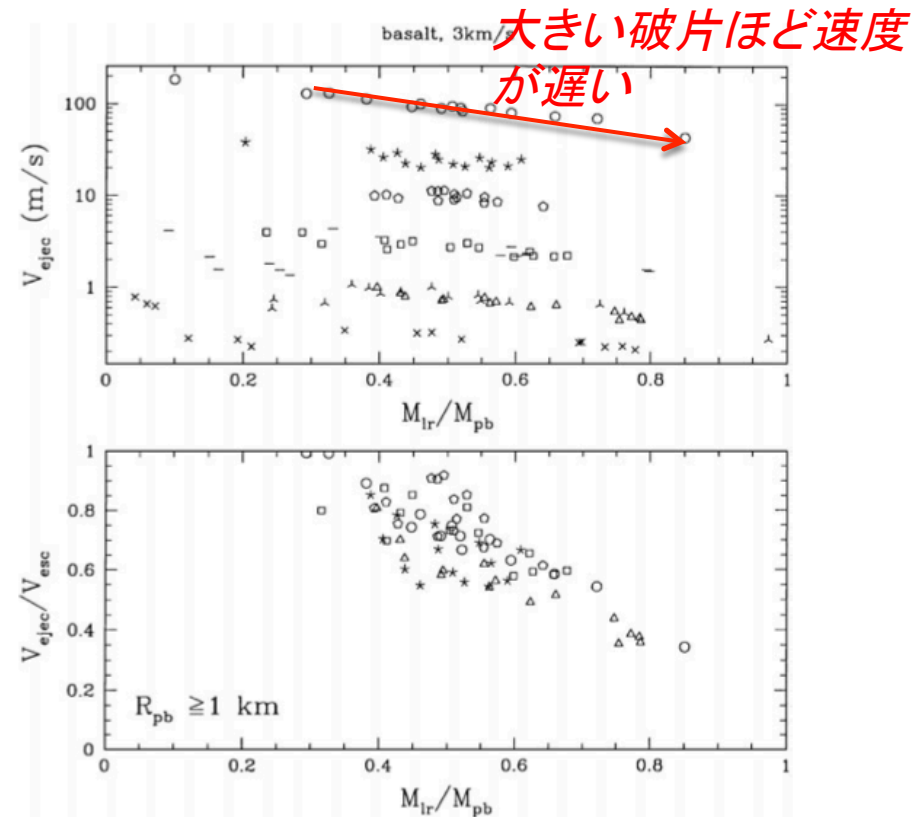
□ 重力によって再集積した破片の集合体

最大破片放出速度(玄武岩)

●玄武岩, 5km/s

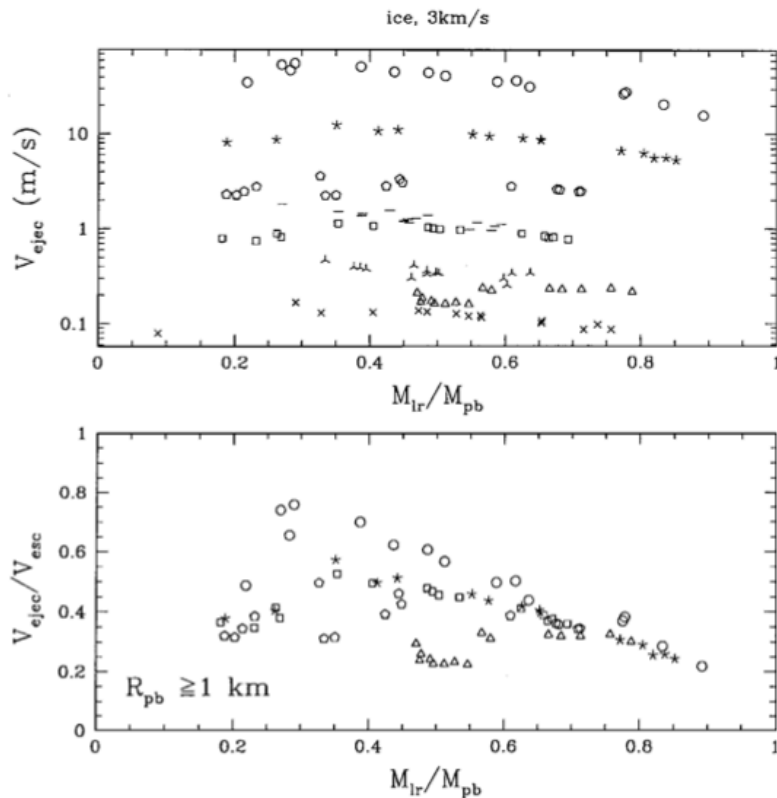


●玄武岩, 3km/s

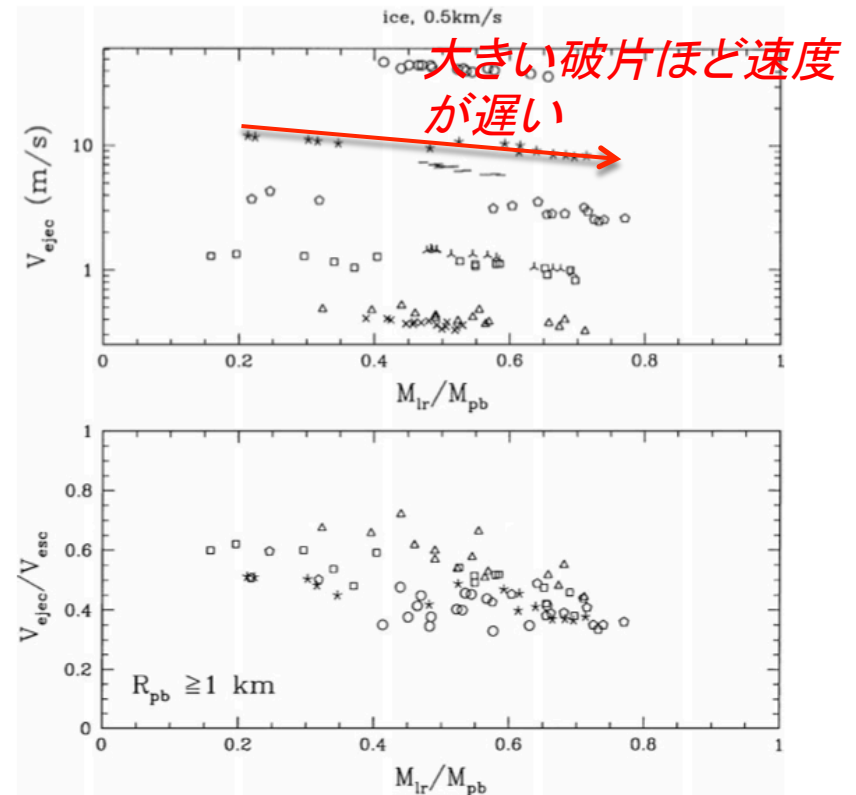


最大破片放出速度(氷)

●氷, 3km/s

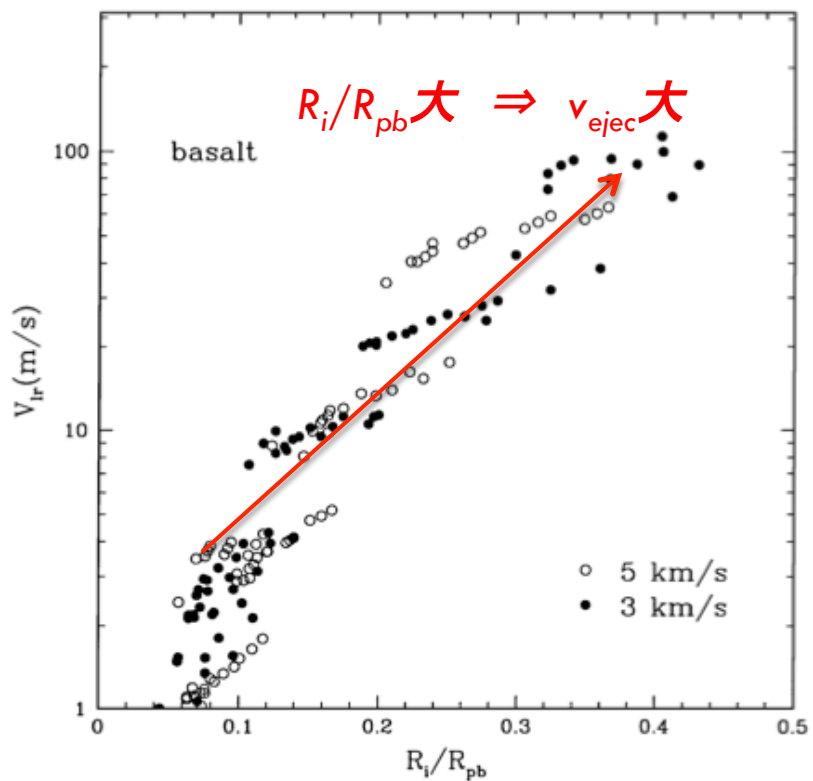


●氷, 0.5km/s

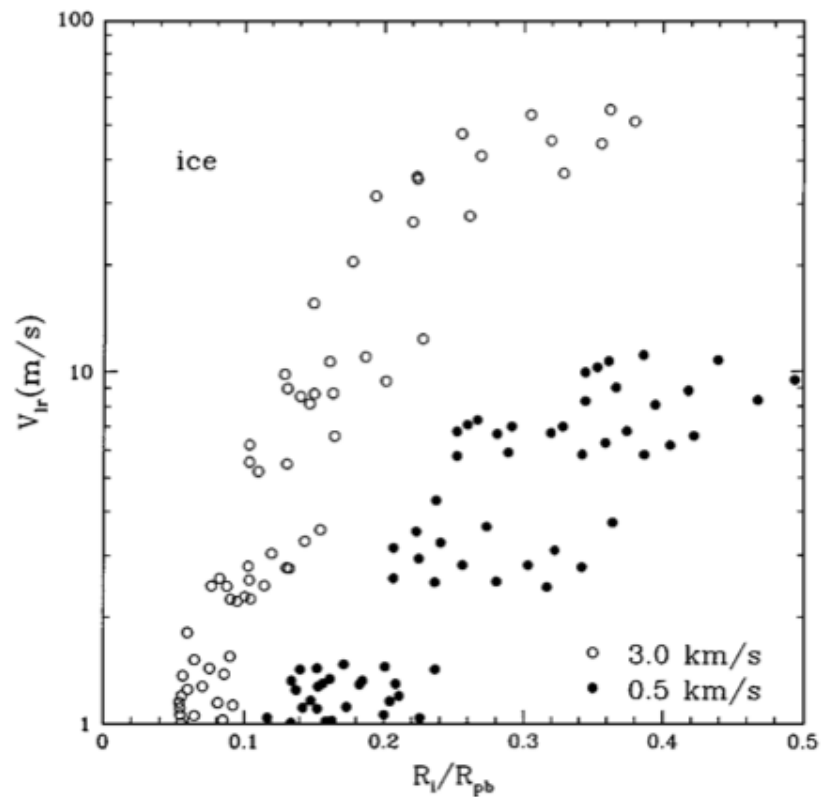


最大破片放出速度

●玄武岩

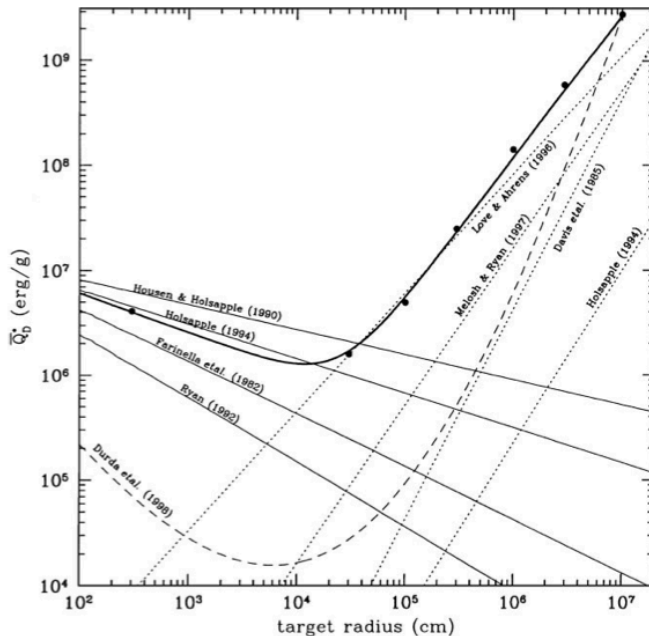


●氷



論文のまとめ & 問いの答え

- 強度支配域から重力支配域まで衝突破壊をシミュレーションした
- 太陽系において最も弱い天体：半径100-200m
 - これ以上の天体では重力支配
- 衝突破壊強度 Q_D^* は先行研究より大きい値を示した



問い「衝突破壊強度 Q_D^* の
サイズ依存性とは？」

- 強度支配域：サイズ大 \Rightarrow Q_D^* 小
- 重力支配域：サイズ大 \Rightarrow Q_D^* 大
 - その境界はターゲット半径
100m~200mのところ