

模擬ラブルパイル天体の衝突破壊 実験とCPS 実験実習の報告

荒川 政彦

神戸大学 大学院理学研究科
日本惑星科学会 衝突研究会

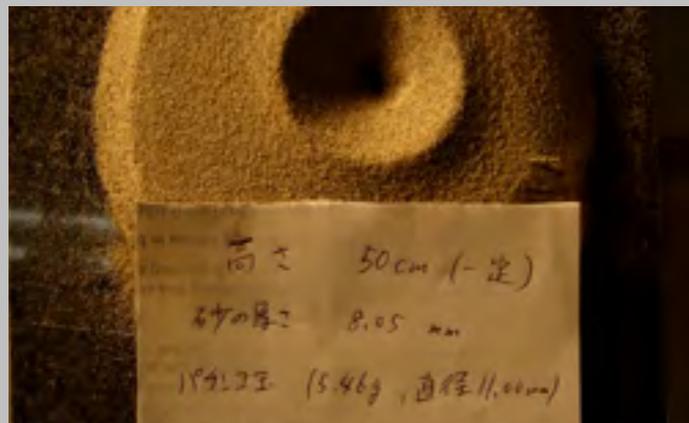
CPS実験実習とは

- 惑星科学研究センター（CPS）のサポートを受けて、日本惑星科学会・衝突研究会が開催する教育プログラム
- 惑星科学では実験分野の研究室が小規模で数も少ない。学生が学べる技術が偏っているとか教員の指導が行き届かないなどの問題が生じている。
- 学生教育の互助会として大学の壁を超えた仮想研究室が提案され、その一環としてこの集中講義式の実習プログラムが提案された。
- 講義，電子回路，真空実習，機械工作からなる基礎実習と研究に繋がる応用的な衝突実習から成る。

衝突研究会

Impact Research Group

Since 2007

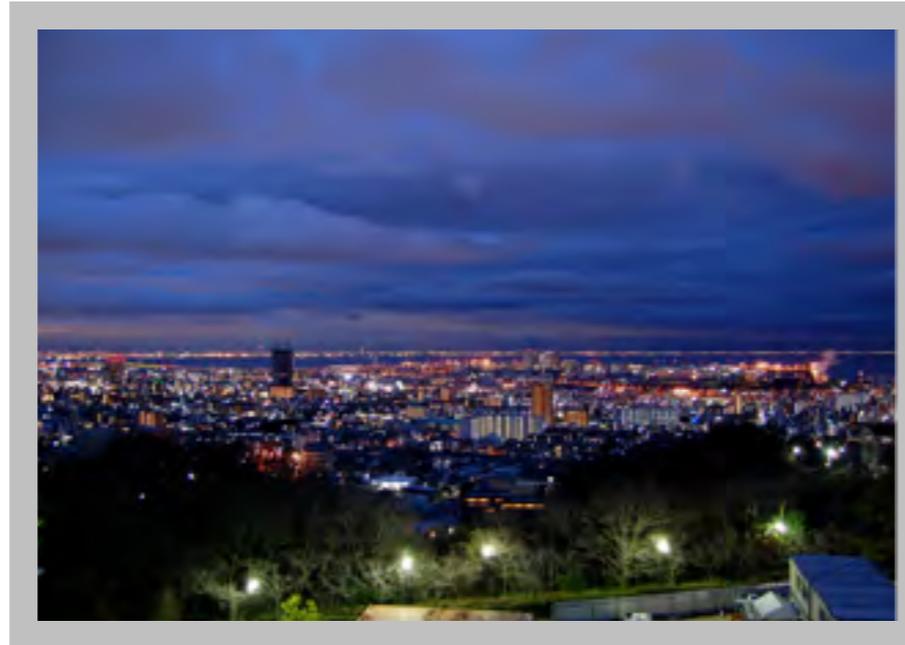


更新履歴

- ・ドメインを取得しました (2009.6.7)
- ・2009年度「天体の衝突物理の解明 (M)」の要旨集をアップしました (2010.1.7)

リンク

- ・日本惑星科学会 衝突研究会
- ・日本惑星科学会
- ・惑星科学研究センター (CPS)



衝突研究会とは

衝突研究会とは、日本惑星科学会の研究会として2007年に発足した研究グループです。地球・月などの太陽系の天体に起こる衝突現象に興味を持つ研究者が中心となり、大学間を横断した学生の教育と研究活動を行う主体として設立されました。我々は、太陽系の形成から現在にいたる46億年の歴史の中で起きた地球・月・惑星の形成とその進化に対する衝突の果たした役割を明らかにしたいと思っています。そのためには実験、理論・数値シミュレーション、惑星探査、地質調査などのあらゆる手法による研究が必要とされます。さらに、分野を越えた研究者の交流により、新しい手法の開発や研究テーマの創出を図っています。

世話人

中村昭子 (神戸大)

杉田精司 (東大)

門野敏彦 (阪大)

荒川政彦 (神戸大)

登録者

100名ほど

日本惑星科学会・衝突研究会の活動

教育	研究	惑星探査
<p>TV会議セミナー</p> <p>名阪神衝突研究会</p> <p>CPS衝突実験実習：基礎編</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国内教員・集中講義 	<p>全国共同利用施設の利用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・北大低温研・研究集会 ・阪大レーザー研共同利用 ・宇宙研共同利用 <p>科研費・共同研究</p> <p>CPS衝突実験実習：応用編</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国内共同実験 	<p>はやぶさ2支援</p> <ul style="list-style-type: none"> ・SCIサイエンス ・テーマ別研究 <p>次期衝突機探査検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小天体 ・惑星・衛星
<ul style="list-style-type: none"> ・外国人教員・集中講義 	<ul style="list-style-type: none"> ・海外共同実験 <p>科研費・国際共同研究</p>	

海外連携

Catastrophic Disruption 会議

基礎実習

神戸大で開催

日程	時間	内容	主担当
2月22日(月)	10:00-12:30	講義「衝突実験」	荒川, 門野
	13:30-18:00	実習「衝突実験」	荒川, 中村, 門野
2月23日(火)	9:30-11:30	実習「金属工作1」	工作技術センター
	13:00-17:30	実習「金属工作2, 3」	
2月24日(水)	9:00-11:50	講義「電子回路」	山田
	13:30-18:30	実習「電子回路I」	山田, 山下
2月25日(木)	9:00-12:00	講義「真空技術」	大野
	13:00-18:00	実習「真空技術」	
	19:00	懇親会	
2月26日(金)	9:00-12:00	実習「電子回路実習 II」	山田, 山下
	13:00-17:00	衝突実験実習報告会	



講義



電子回路



工作実習

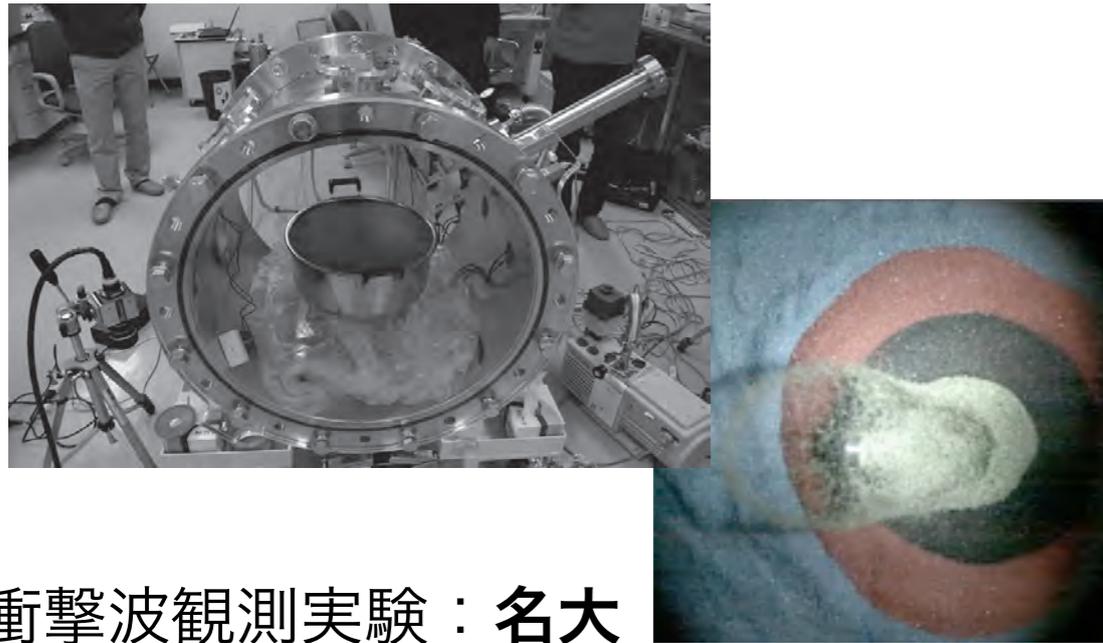


真空実習

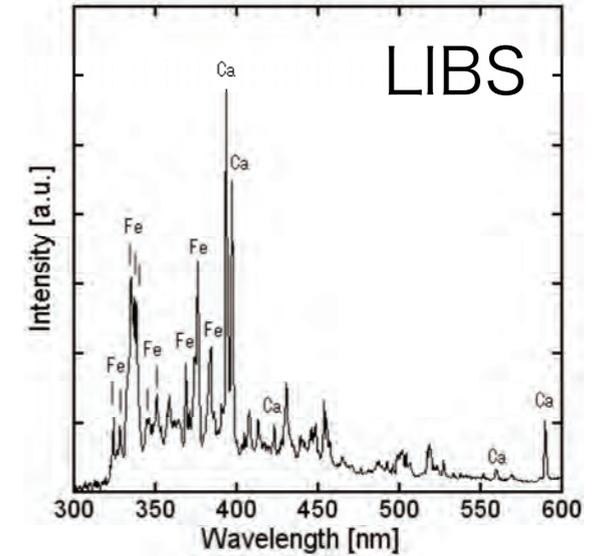
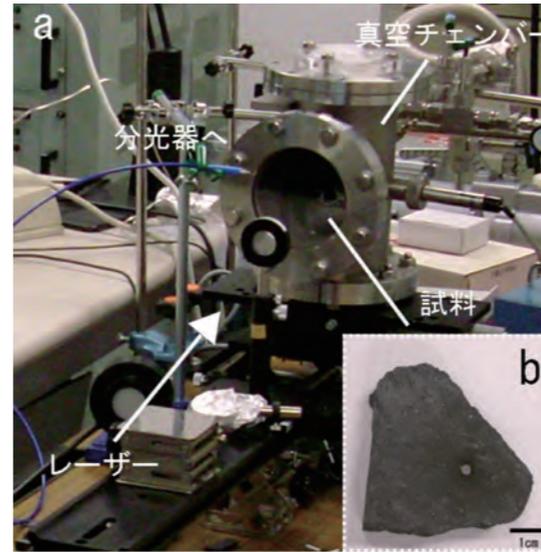
衝突実習

2泊3日

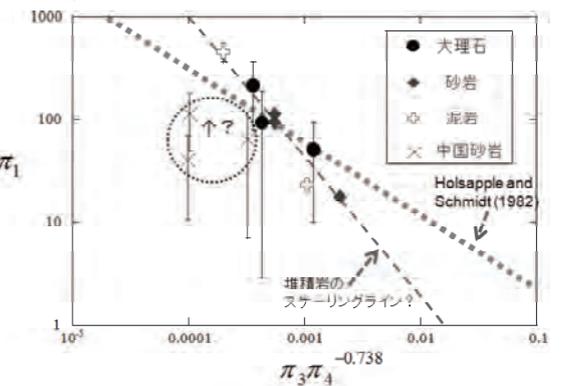
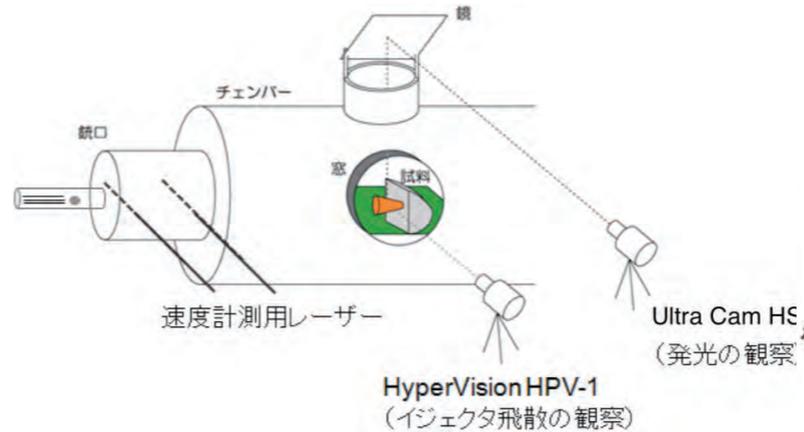
斜め衝突によるクレーター
形成実験：神戸大



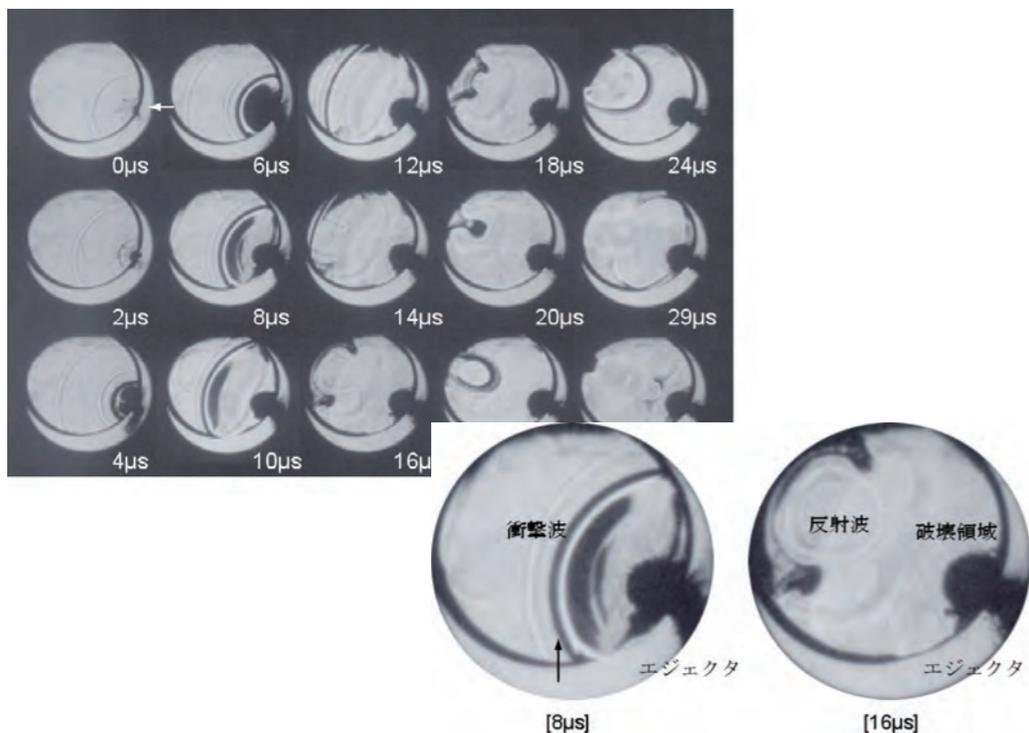
レーザーアブレーション実験：東大



岩石クレーター形成実験：
宇宙研



衝撃波観測実験：名大



- 2012年度も開催します。
- 興味がある学生がおりましたら、参加を呼びかけて頂ければと思います。
- 衝突実習に協力して頂ける研究室を捜しております。こちらも宜しくお願いいたします。

模擬ラブルパイル天体の 衝突破壊実験

2010以前 名古屋大 2011以降 神戸大

藤田幸浩¹, 荒川政彦², 寫生有理¹, 長谷川直³

1-名古屋大・環境 2-神戸大・理 3-JAXA/ISAS

研究背景

- 天体同士の衝突は太陽系において普遍的な現象

(惑星や衛星表面に見られるクレーターはかつて衝突があった痕跡
天体の進化過程は衝突破壊と再集積の繰り返し

→ 太陽系の起源を知るためには天体の衝突破壊現象の理解が不可欠

- 天体の衝突破壊

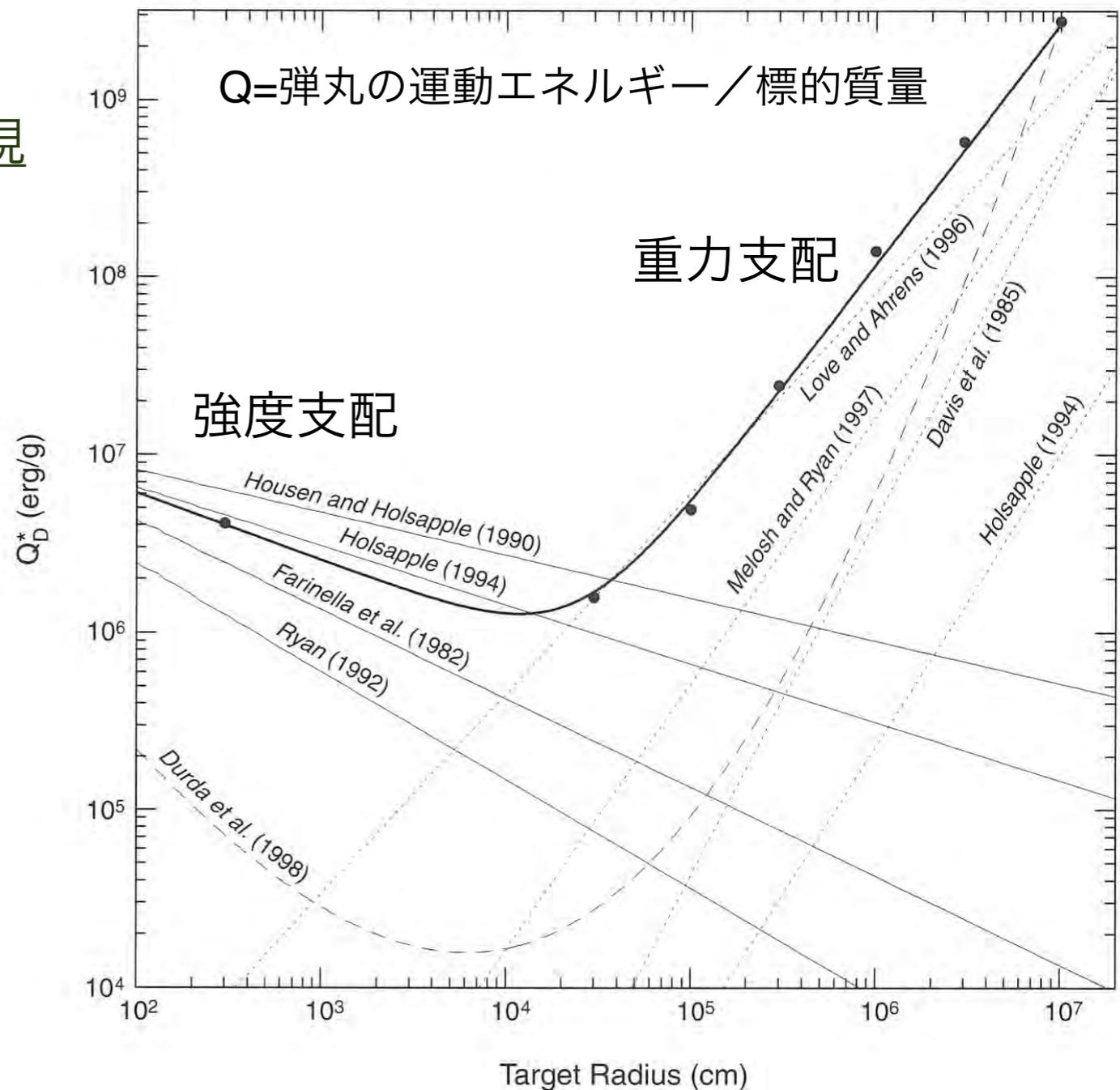
衝突破壊条件をこれらの組み合わせで表現

shattering : 物質の力学的な結合を切断
→ shattering強度 Q_s^*
($M_L/M_t=0.5$ になるときのQ)

dispersion : 質量の半分以上を散逸
→ 重力ポテンシャル

< Davis et al., (1979) >

$$Q_D^* = Q_s^* + \frac{4}{5} \pi \rho G R^2$$



研究目的

- 天体の進化過程とラブルパイル天体
衝突破壊と再集積

→ ラブルパイル天体が形成

(重力的に集まった複数の岩塊からなる天体
岩塊同士は結合力を持たない

ラブルパイル天体は太陽系の進化過程において普遍的に存在



ラブルパイル天体の衝突破壊強度 Q_D^* を知ることは重要な課題

<ラブルパイル天体の衝突破壊強度>

ラブルパイル天体は構成岩塊同士に力学的な結合を持たない →

$$Q_S^* = 0$$

$$Q_D^* = Q_S^* + \frac{4}{5} \pi \rho G R^2$$

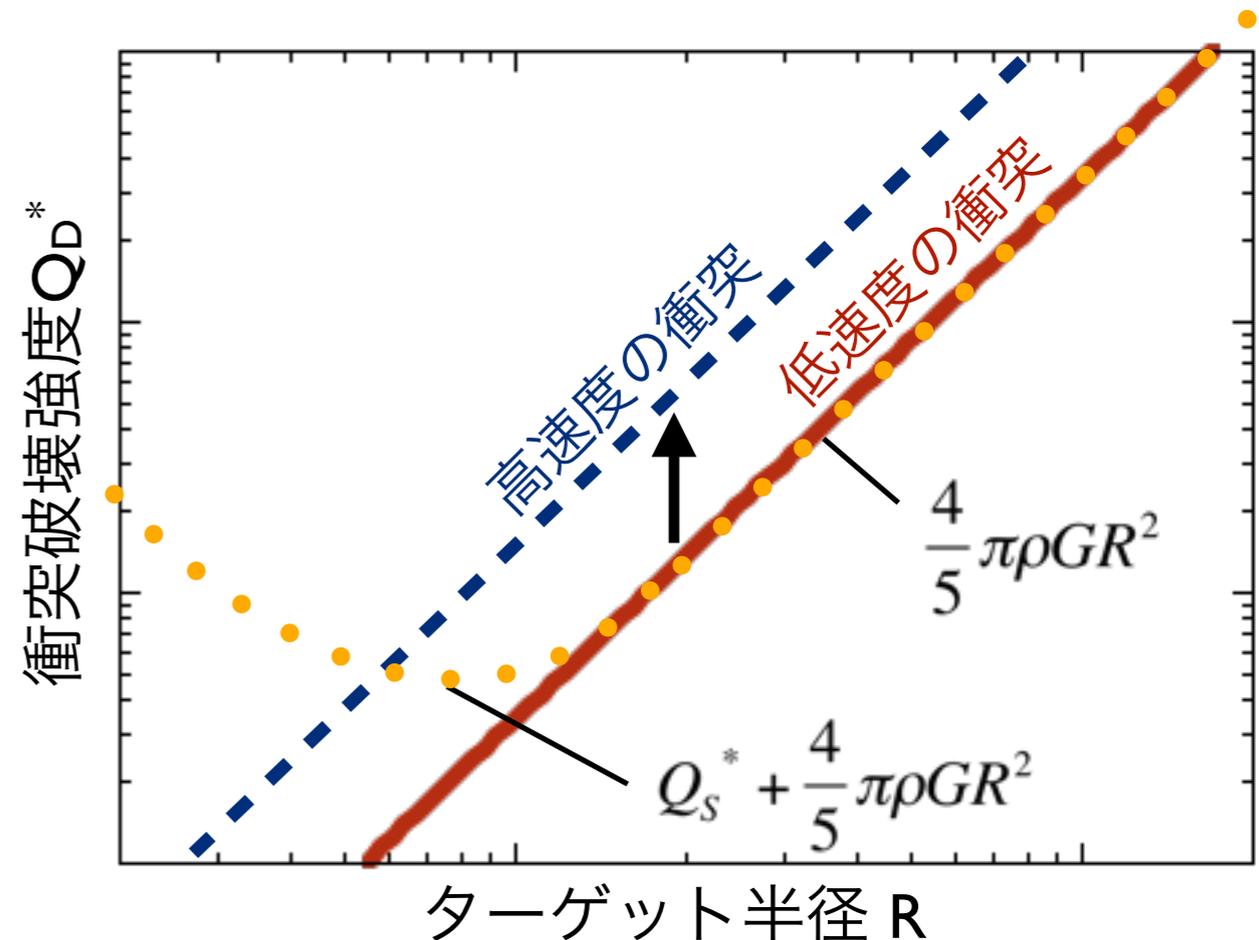
→ $Q_D^* \approx \frac{4}{5} \pi \rho G R^2$

重力ポテンシャルのみで決まる

しかし、高速度衝突の場合

構成岩塊の破壊によりエネルギーが散逸

→ $Q_D^* \geq \frac{4}{5} \pi \rho G R^2$



研究目的

< 高速度衝突における Q_D^* >

構成岩塊の破壊によるエネルギー散逸量 E_{loss}

$$E_{loss} = \sum m_c Q_c \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_c \text{ — 破壊した各構成岩塊に対する衝突エネルギー密度} \\ m_c \text{ — 破壊した構成岩塊の質量} \end{array} \right.$$

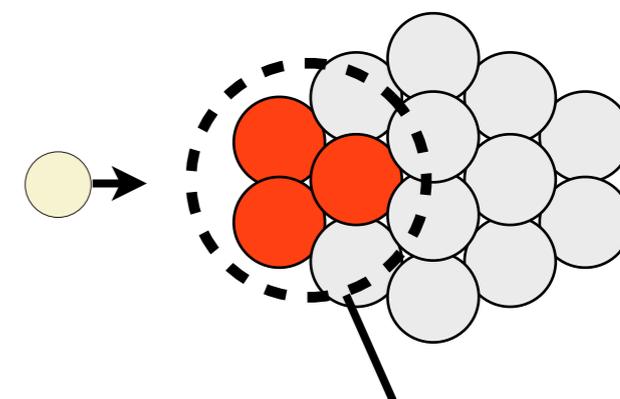
ラブルパイル天体を衝突破壊させるために必要なエネルギー E_D : E_{loss} + 重力ポテンシャル

$$E_D = \sum m_c Q_c + \frac{4}{5} \pi \rho G R^2 \left(M_t - \sum m_c \right) \quad \left\{ \begin{array}{ll} M_t \text{ — 天体の質量} & G \text{ — 万有引力定数} \\ \rho \text{ — 天体の密度} & R \text{ — 天体の半径} \end{array} \right.$$

よって、ラブルパイル天体の衝突破壊強度 Q_D^* は以下のようにかける

$$Q_D^* = \frac{\sum m_c Q_c}{M_t} + \frac{4}{5} \pi \rho G R^2 \frac{\left(M_t - \sum m_c \right)}{M_t}$$

➡ Q_D^* は破壊される構成岩塊の質量によって変化



構成岩塊の破壊によって
エネルギーが散逸

本研究では、ラブルパイル天体の Q_D^* を明らかにするために、構成岩塊の破壊で散逸されるエネルギー量が衝突速度によってどのように変化するかを実験的に調べた

実験方法

<試料の作成>

- ・単純なラブルパイルターゲット

構成岩塊：ガラスビーズ
個数：2~5 [個] (直列)
ビーズサイズ：10、16、25、30mm
ビーズ質量：1.6、6、19、34 [g]



- ・ラブルパイル天体を模擬したターゲット

※ガラスビーズ(ソーダライムガラス)：直径7 [mm]、質量 0.45 [g]

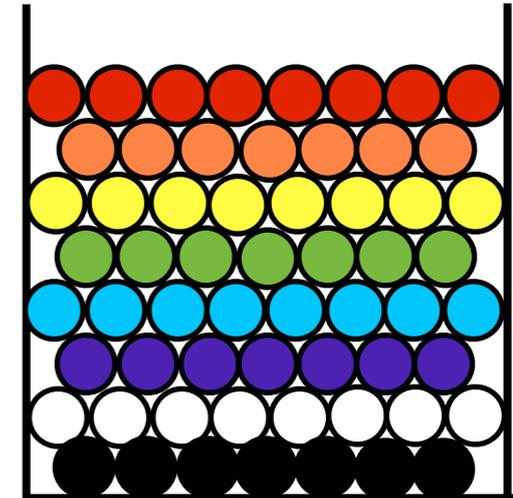
円筒ターゲット



紡錘形ターゲット



立方体ターゲット



質量：50 [g]
ビーズ個数：109 [個]
直径 40mm、高さ 30mm

質量：50 [g]
ビーズ個数：109 [個]
長軸 50mm、短軸 38mm

質量：550 [g]
ビーズ個数：1200 [個]
70mm×70mm×70mm

実験方法

<衝突実験>

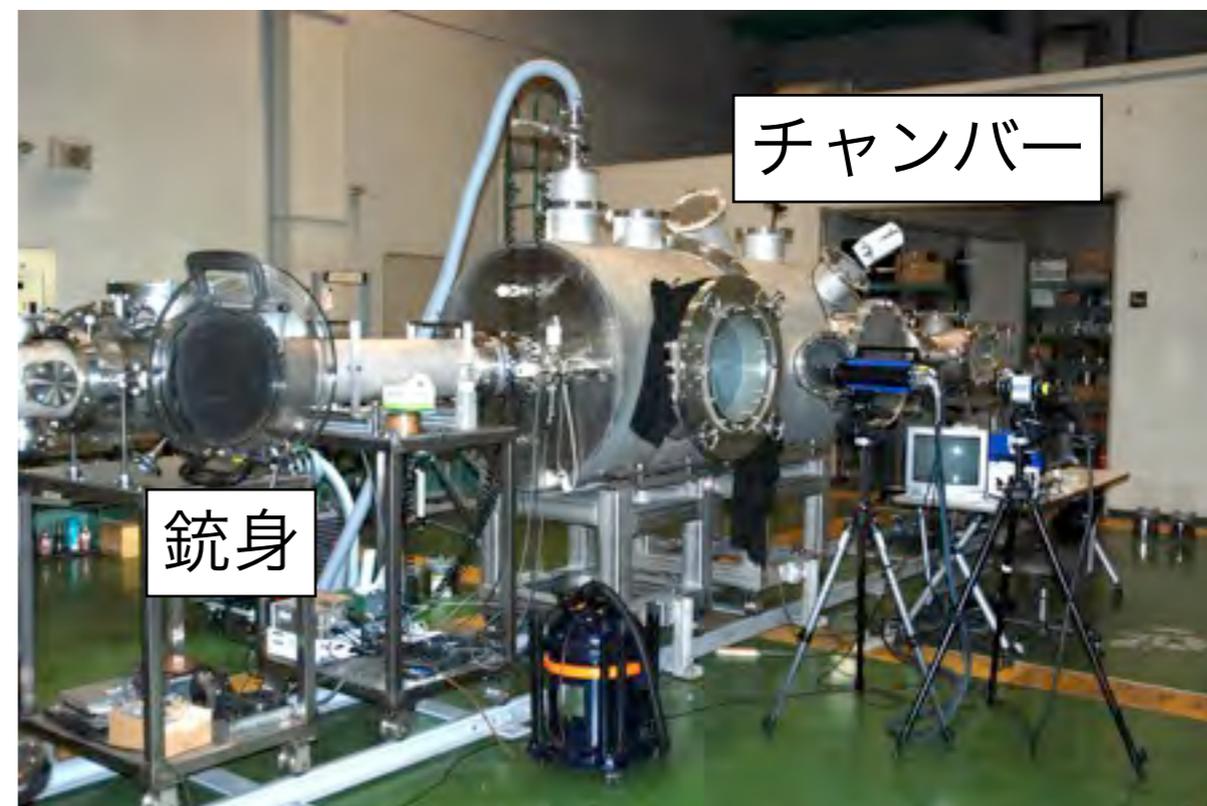
本研究の高速衝突破壊実験には二段式軽ガス銃を使用

・神戸大

- 弾丸：ナイロン球 - 154 [mg]、6.4 [mm]
- 速度：2 [km/s]
- 弾丸：ナイロン円柱 - 8[mg]
- 速度：4 [km/s]

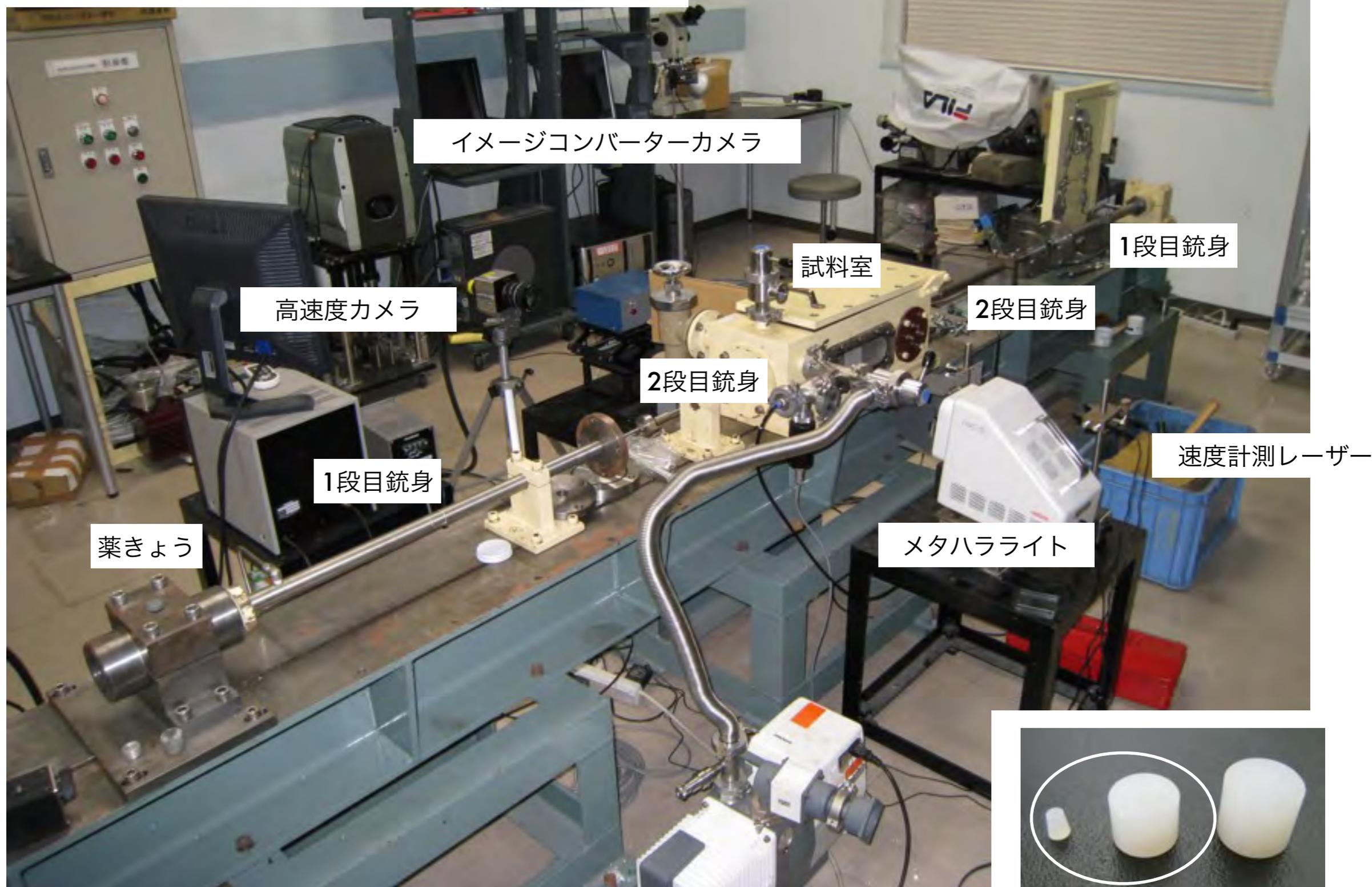
・宇宙研

- 弾丸：ナイロン球
 - 質量 - 219 [mg]
 - 直径 - 7.14 [mm]
- 速度：2 ~ 6.5 [km/s]



神戸大二段銃：ヘリウムガス使用

1.6mm 4km/s, 6.3mm 2km/s



弾丸：1.6, 6.3, 7.2 mm

実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 1

- 単純なラブルパイルターゲットを用いた実験
→ ラブルパイル天体の破壊の素過程を見る

構成岩塊：ガラスビーズ

個数：2~5 [個] (直列)

ビーズサイズ：10、16、25、30mm

ビーズ質量：1.6、6、19、34 [g]

16mm×2個



10mm×5個



$Q=5 \times 10^3$ [J/kg]



実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 1

- 単純なラブルパイルターゲットを用いた実験
 - ラブルパイル天体の破壊の素過程を見る
- 構成岩塊：ガラスビーズ
- 個数：2~5 [個] (直列)
- ビーズサイズ：10、16、25、30mm
- ビーズ質量：1.6、6、19、34 [g]

16mm×2個



10mm×5個



$Q=5 \times 10^3$ [J/kg]



実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 1

- 単純なラブルパイルターゲットを用いた実験
 - ラブルパイル天体の破壊の素過程を見る
- 構成岩塊：ガラスビーズ
- 個数：2~5 [個] (直列)
- ビーズサイズ：10、16、25、30mm
- ビーズ質量：1.6、6、19、34 [g]

16mm×2個



10mm×5個



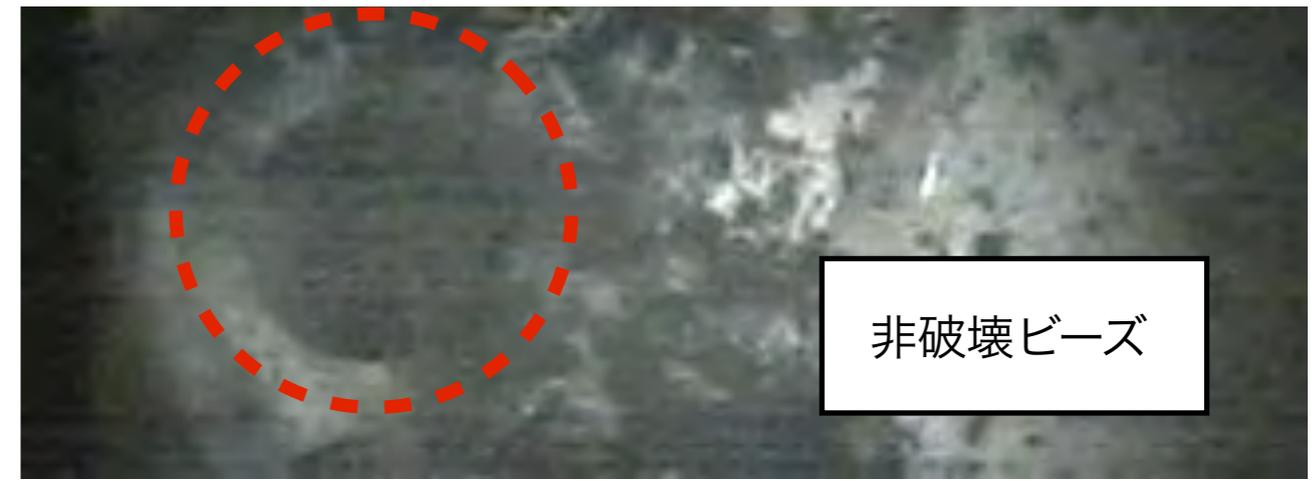
$Q=5 \times 10^3$ [J/kg]



実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 1

- ・ 単純なラブルパイルターゲットを用いた実験



$Q=5 \times 10^3$ [J/kg]



実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 2

- ・ 同質量の単体ガラス球に比べて細かくされにくい

16mm×2個 $Q=5\times 10^3$ [J/kg]

ex) $Q \sim 5\times 10^3$ [J/kg]

同質量の単体ガラス球： $M_L/M_t \sim 0.03$

→ $\left(\begin{array}{l} Q \sim 4.5\times 10^4$ [J/kg] \\ 後ろのビーズの最大破片： $M_L/M_c \sim 0.35$ \end{array} \right.

※ 単体ガラス球： $M_L/M_t \sim 0.002$



- ・ 非破壊ビーズの特徴

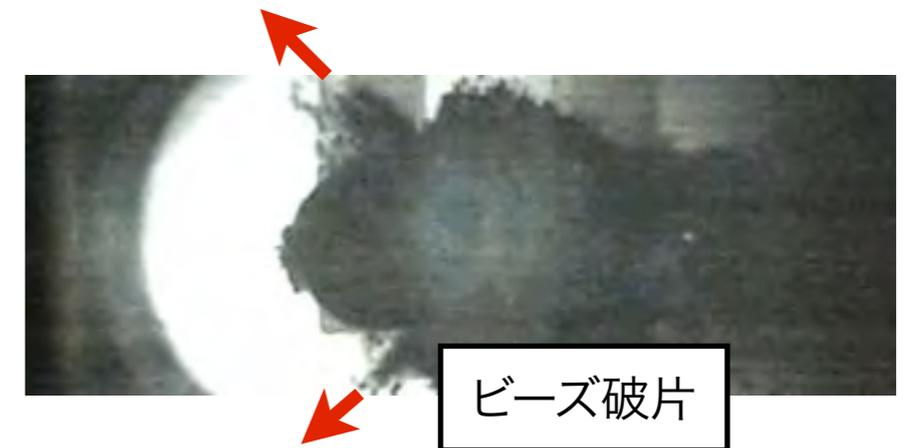
反対点でスポーリングが見られる

スポーリング速度： $V_{spal} = 13$ [m/s]

破壊されたビーズの破片速度に比べて低速

ビーズ破片速度： $V_{frag} = 50$ [m/s]

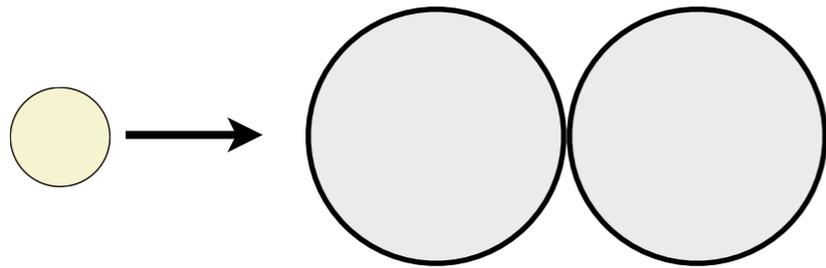
非破壊ビーズ速度： $V_c = 6$ [m/s]



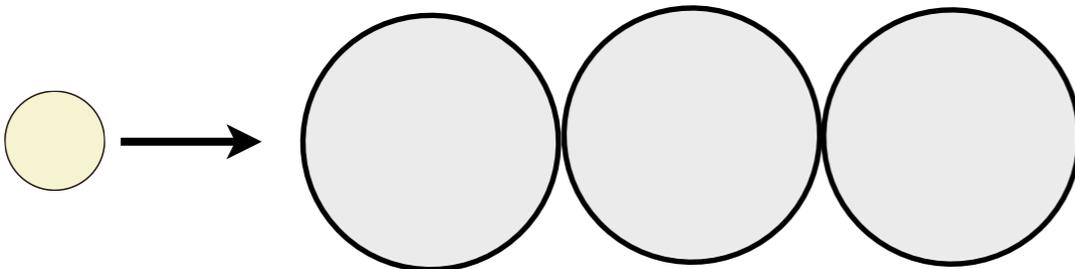
実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 3

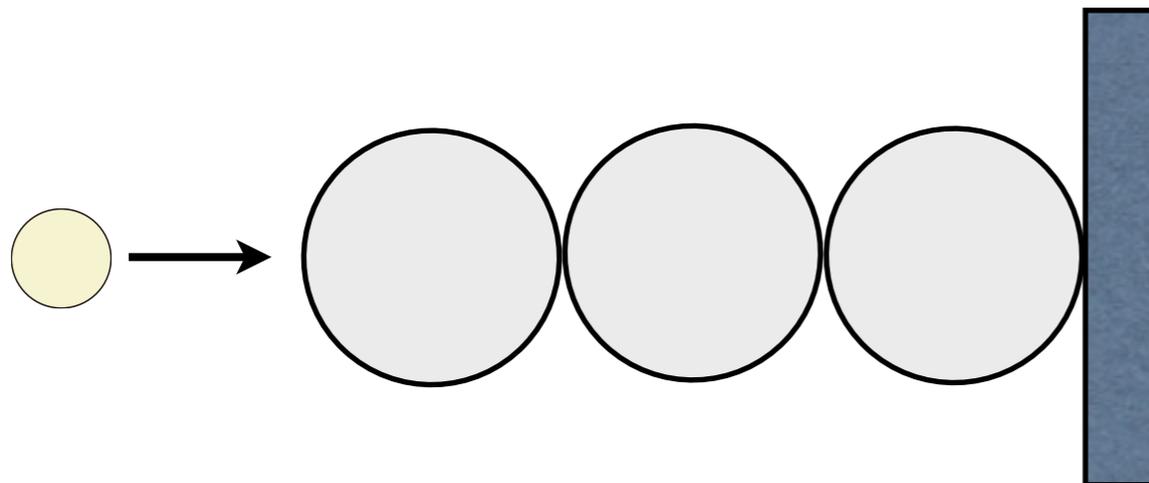
< case1 : ビーズ 2 個 >



< case2 : ビーズ 3 個 >



< case3 : ビーズ 3 個 + 壁 >



・ 2 個目のビーズの破壊程度を比較

ビーズ最大破片

case1 : $M_L/M_C = 0.35$

case2 : $M_L/M_C = 0.2$

case3 : $M_L/M_C = 0.09$

※ $V_{imp} = 2.5$ [km/s]



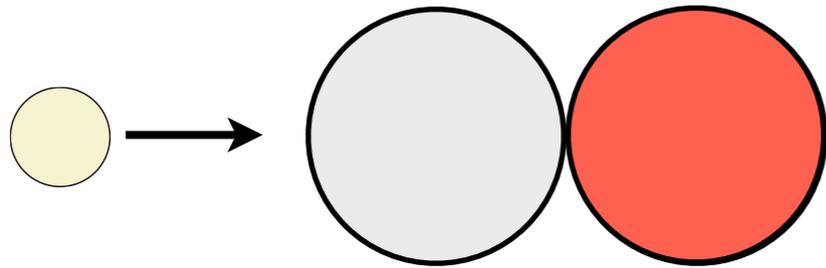
後ろに「もの」がある方がビーズを効率よく破壊できる

ターゲットの形状がビーズの破壊に影響すると考えられる

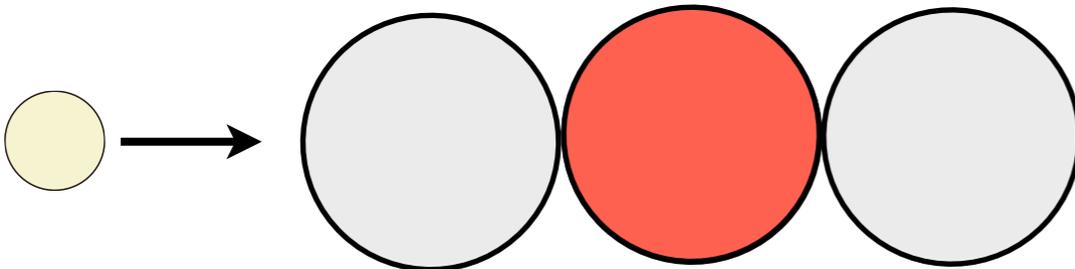
実験結果

ラブルパイルターゲットの破壊の特徴 - 3

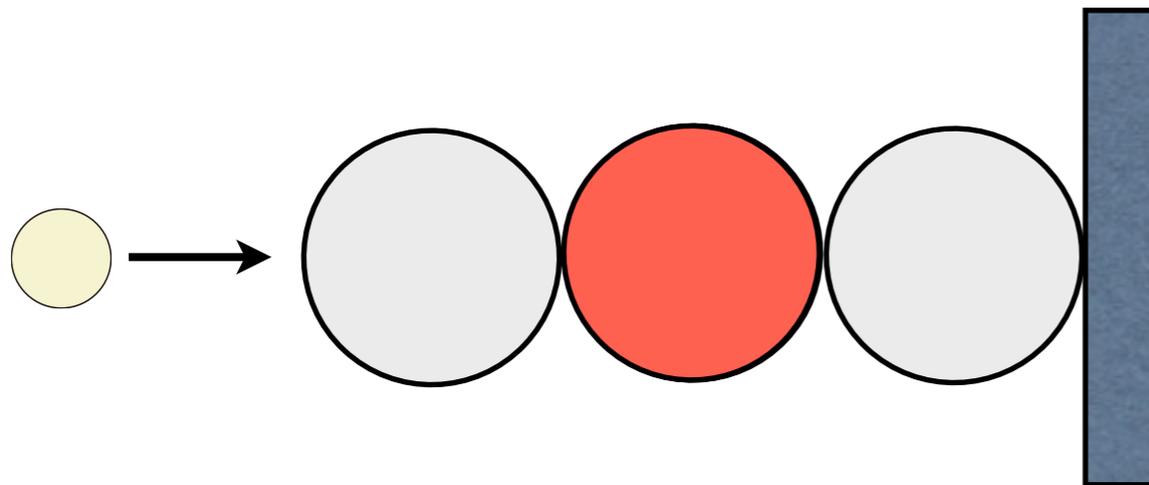
< case1 : ビーズ 2 個 >



< case2 : ビーズ 3 個 >



< case3 : ビーズ 3 個 + 壁 >



・ 2 個目のビーズの破壊程度を比較

ビーズ最大破片

case1 : $M_L/M_C = 0.35$

case2 : $M_L/M_C = 0.2$

case3 : $M_L/M_C = 0.09$

※ $V_{imp} = 2.5$ [km/s]

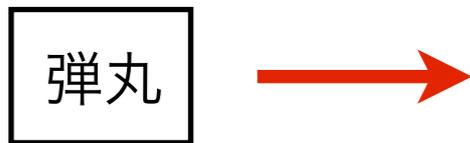


後ろに「もの」がある方がビーズを効率よく破壊できる

ターゲットの形状がビーズの破壊に影響すると考えられる

実験結果

ラブルパイル天体模擬ターゲットの破壊



実験結果

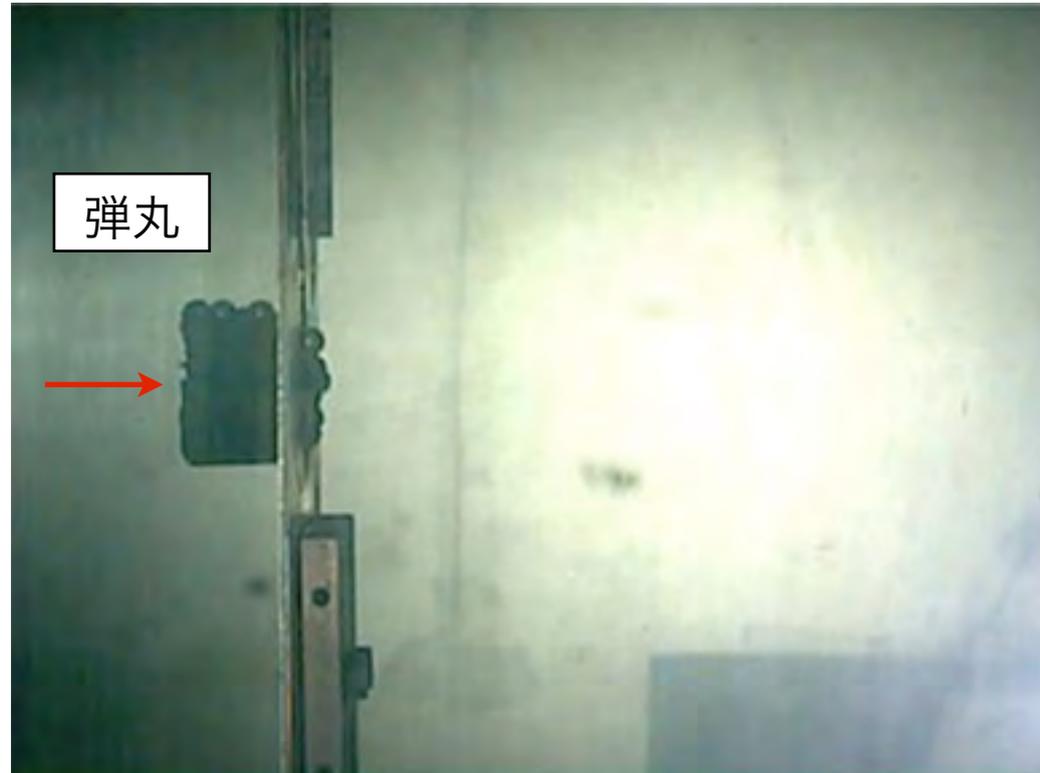
ラブルパイル天体模擬ターゲットの破壊



実験結果

ラブルパイル天体模擬ターゲットの破壊

1) 衝突前



2) 衝突の瞬間($t = 0 \mu\text{s}$)



3) $t = 8.5 \mu\text{s}$



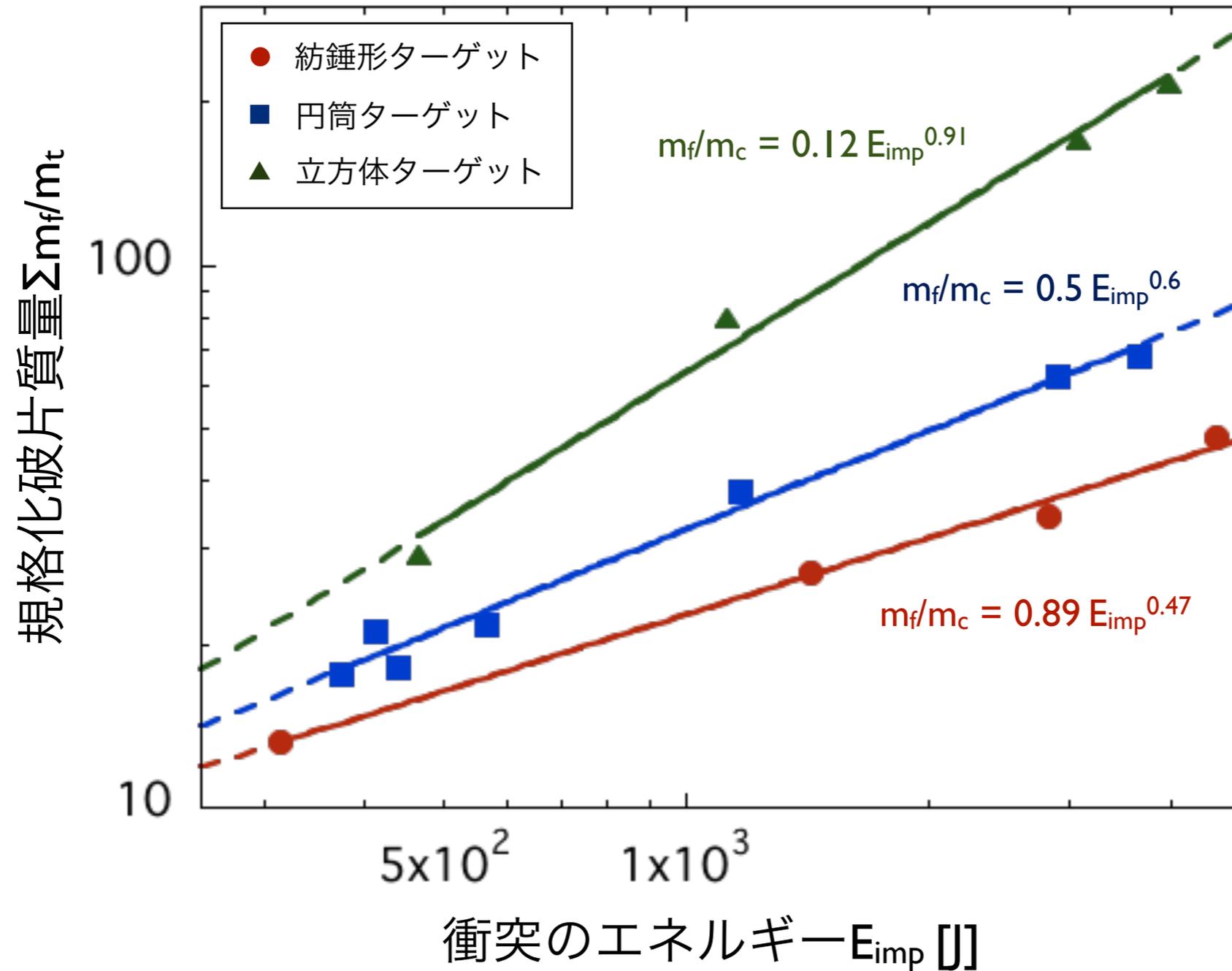
4) $t = 38.5 \mu\text{s}$



実験結果

構成ビーズの破壊 - 1

破壊されたビーズの破片質量を弾丸の運動エネルギーに対してプロット

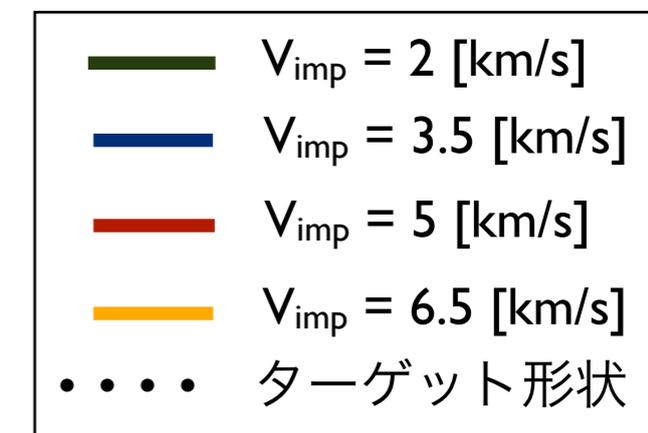
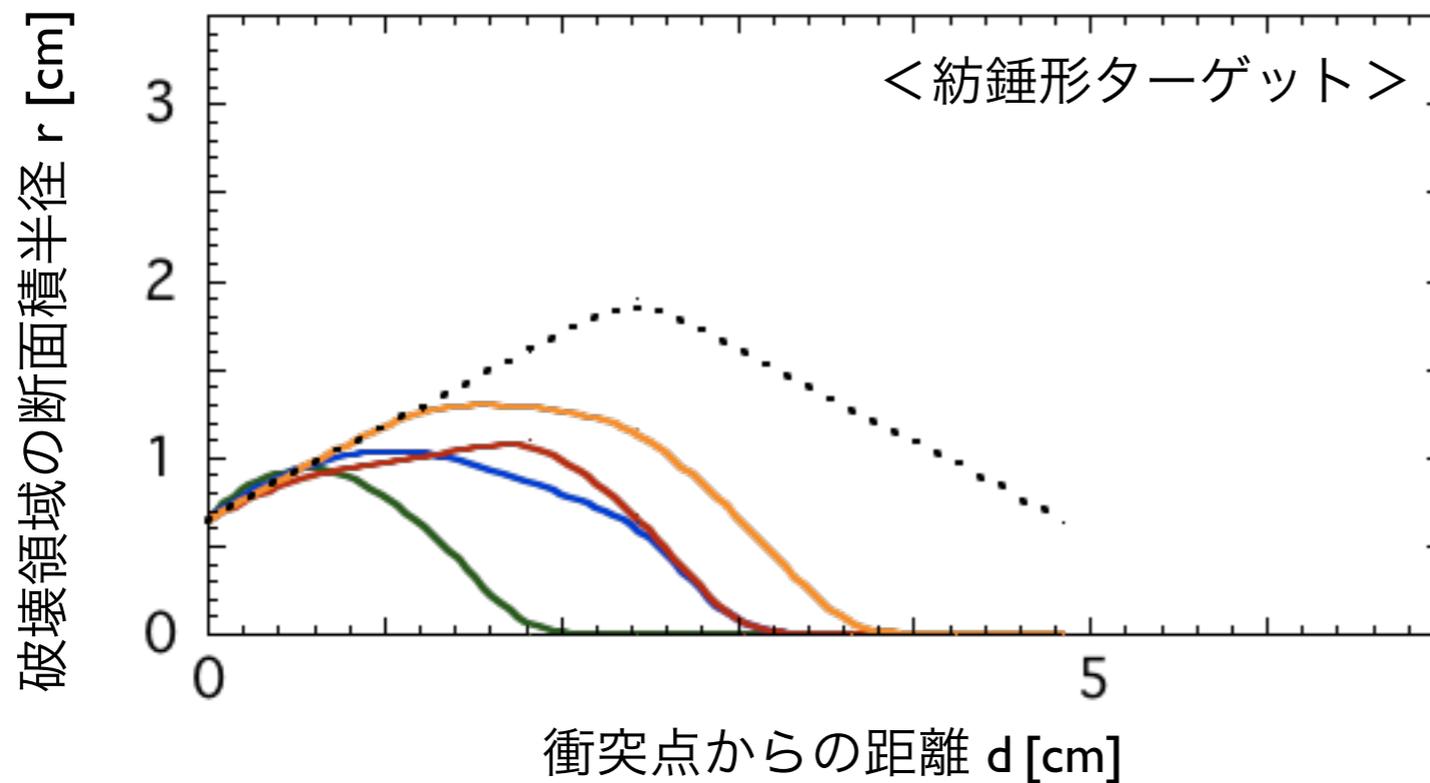
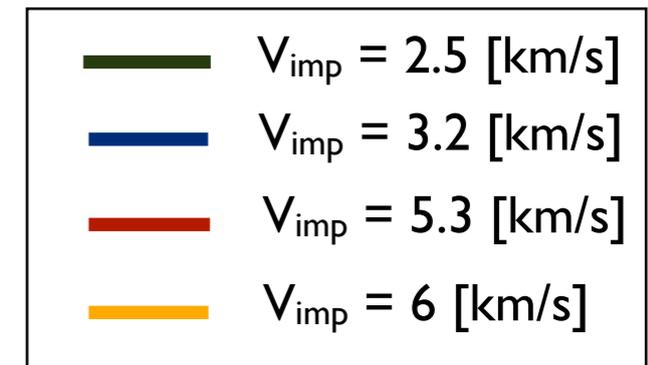
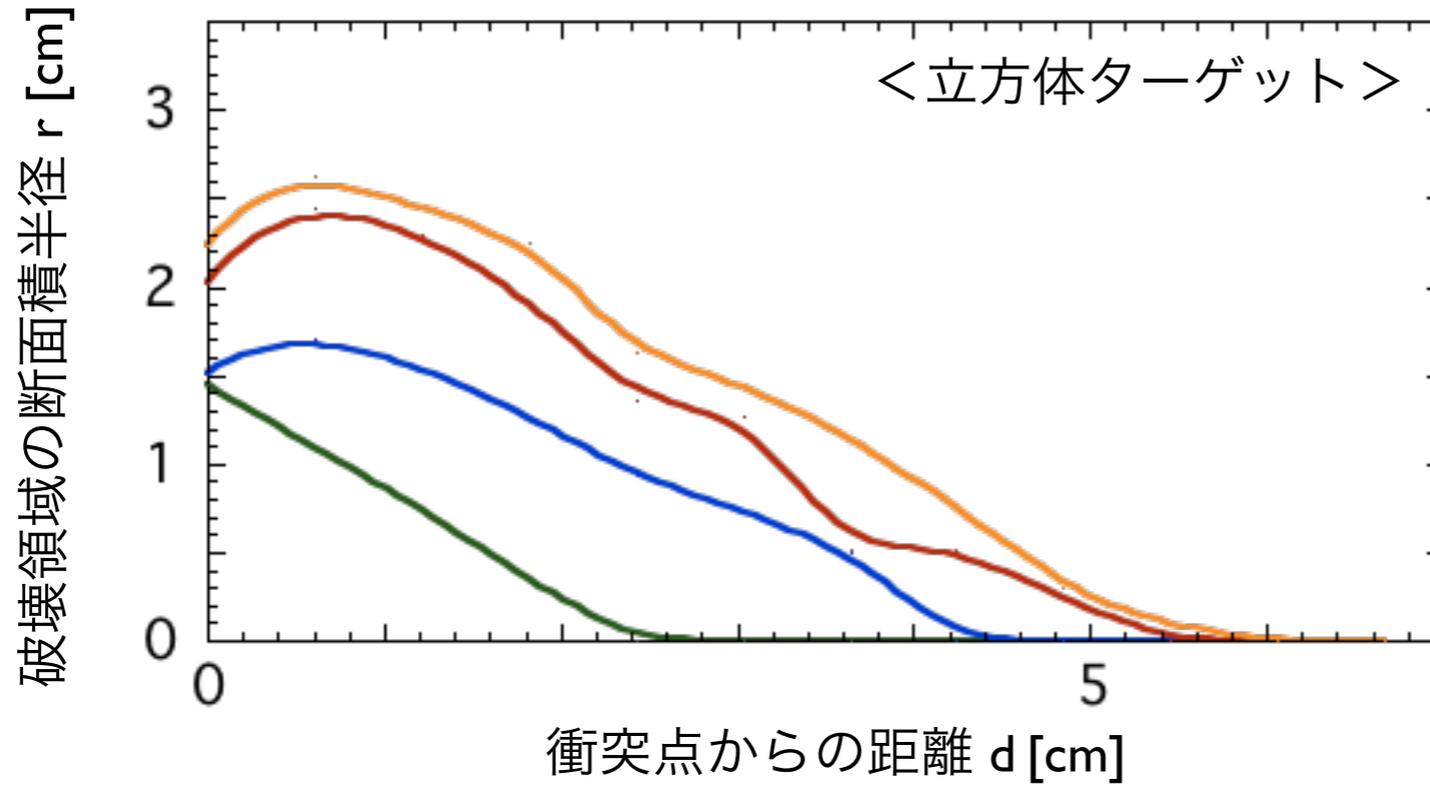


→ { 衝突のエネルギーが大きい程ほど壊されるビーズの質量も増加
さらに、ターゲットの形状やサイズによって破壊されたビーズ質量が異なる

実験結果

構成ビーズの破壊 - 2

ターゲット内部においてビーズが破壊された領域を図示



考察

<衝突破壊強度の見積もり>

- ・衝突エネルギーの分配

衝突において弾丸の運動エネルギーは以下のように分配されると考えられる

衝突のエネルギー
(弾丸の運動エネルギー)

=

構成ビーズの破壊により
散逸するエネルギー

+

ターゲットに残留する
エネルギー

$$\rightarrow E_{loss} = E_{imp} - E_{re}$$

残留エネルギー E_{re}

$$E_{re} = \sum K \cdot E_C \quad * K \cdot E_C - \text{構成岩塊の運動エネルギー}$$

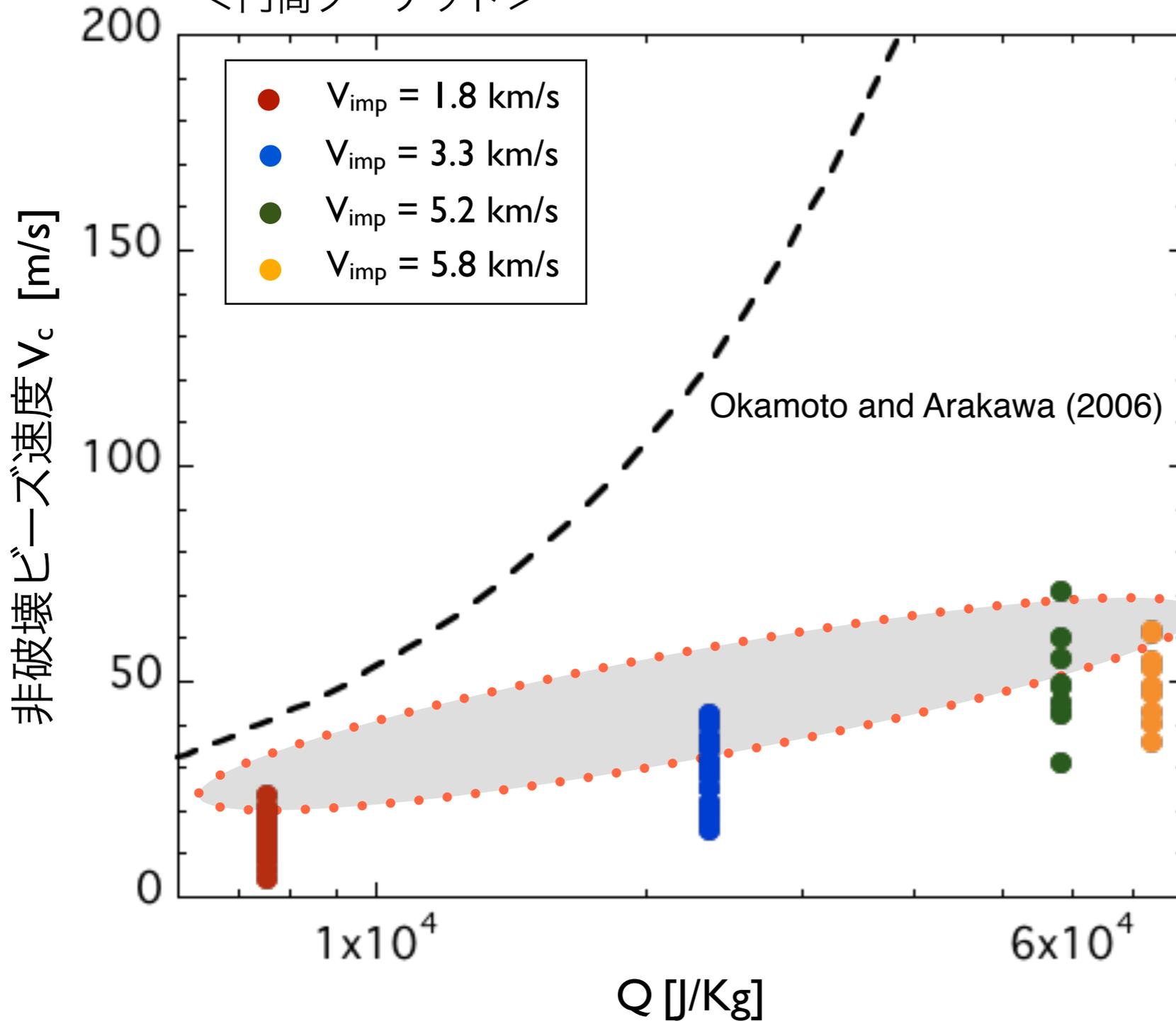
破壊されなかったビーズの運動エネルギーを計算し、衝突エネルギーと残留エネルギーの比較から、構成岩塊の破壊で散逸するエネルギーの割合を求める

考察

<衝突破壊強度の見積もり>

- ・非破壊ビーズの飛翔速度（二次元）と衝突エネルギーの関係

<円筒ターゲット>



衝突エネルギーの増加に比べて
非破壊ビーズの速度増加は小さい

非破壊ビーズ速度 V_c : 20~60m/s



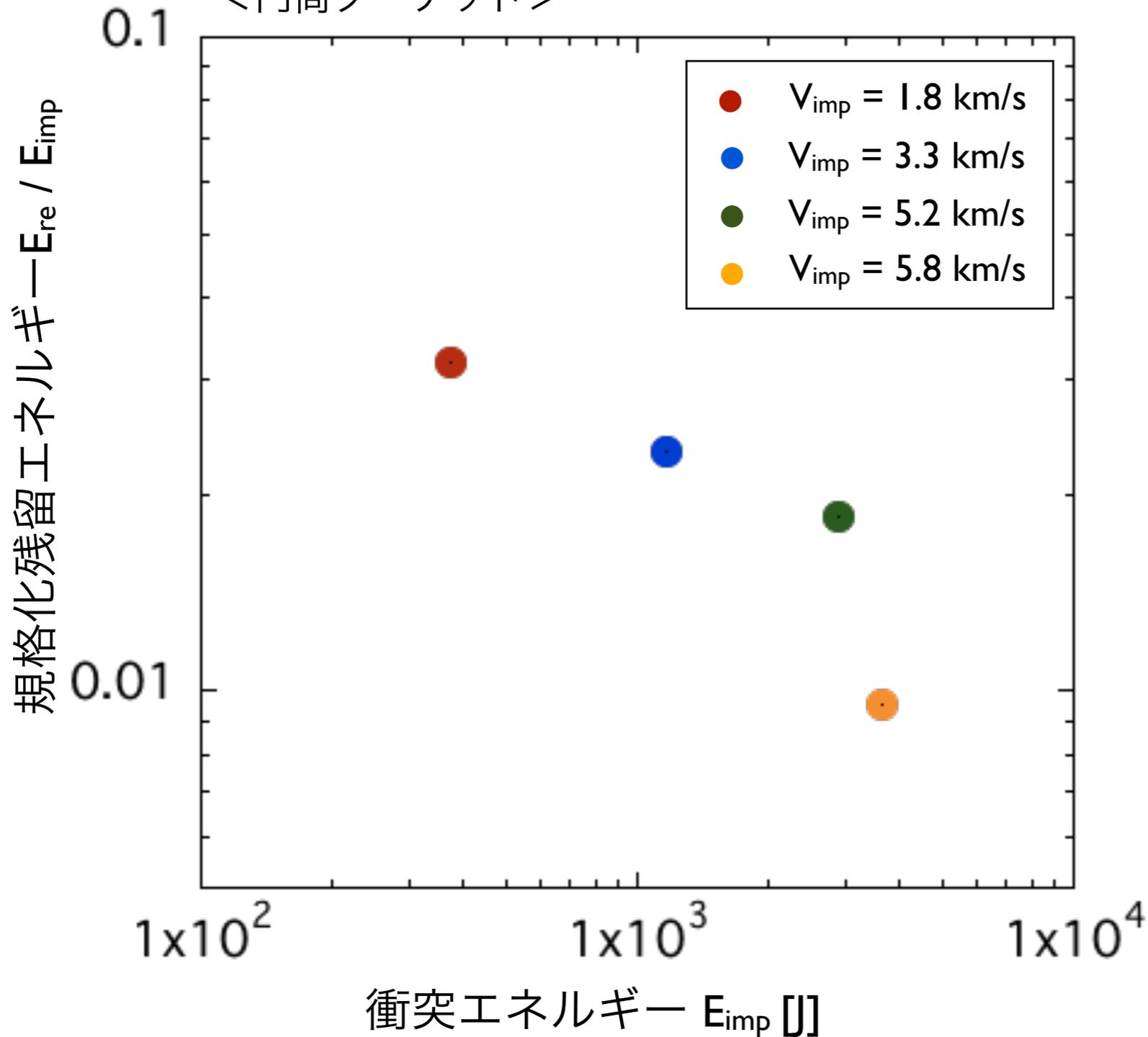
V_c を用いて運動エネルギーを計算
衝突エネルギーと比較

考察

<衝突破壊条件の見積もり>

- 衝突エネルギーと残留エネルギーの関係

<円筒ターゲット>



残留エネルギー

$$E_{re} = \frac{1}{2} V_c^2 (M_t - M_f)$$

左のグラフより

E_{re} は E_{imp} の数パーセント



衝突エネルギーの大部分は構成ビーズの破壊で散逸

考察

<衝突破壊強度の見積もり>

以上より、構成要素の破壊によるエネルギー散逸 E_{loss} は以下のようにかける

$$E_{loss} = (1 - f)E_{imp}, \quad f = \frac{E_{re}}{E_{imp}} \quad * f = 0.01 \sim 0.03$$

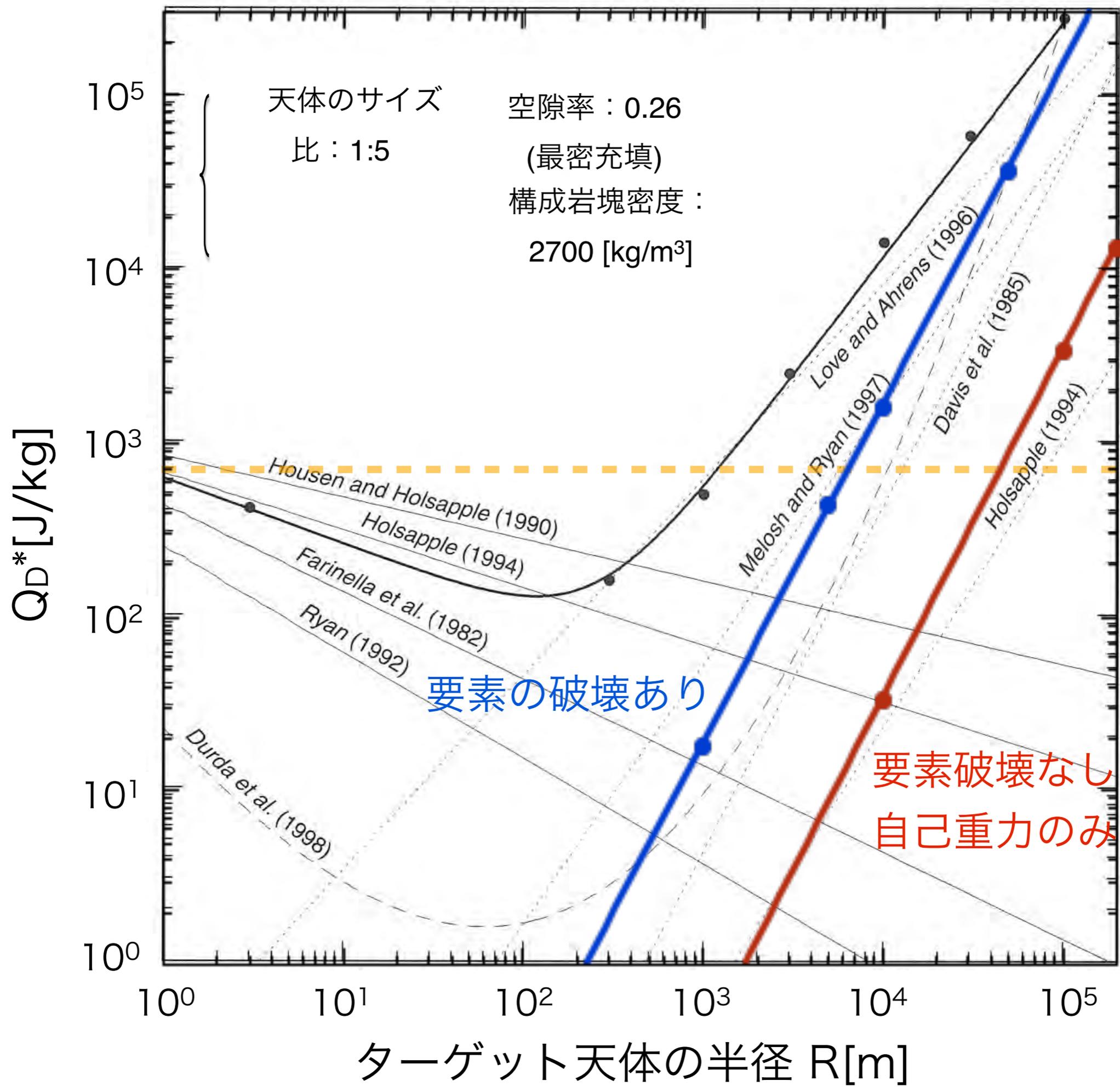


ラブルパイル天体の衝突破壊強度 Q_D^*

$$Q_D^* = (1 - f)Q + \frac{4}{5}\pi\rho GR^2 \left(1 - \frac{\sum m_f}{M_t}\right)$$

ラブルパイル天体の衝突破壊条件： $Q > Q_D^*$

$$f \cdot Q > \frac{4}{5}\pi\rho GR^2 \left(1 - \frac{\sum m_f}{M_t}\right)$$



まとめ

ラブルパイル天体の Q_D^* を明らかにするために、構成岩塊の破壊で散逸されるエネルギーの程度と非破壊の構成岩塊が持つ飛翔速度が衝突速度によってどのように変化するかを実験的に調べ、衝突破壊条件を見積もった

- 構成岩塊の破壊の程度は衝突速度が増加するほど大きくなり、また形状に依っても変化することが分かった
- 破壊されないビーズの速度から残留エネルギーを計算し、衝突エネルギーの分配率を求めた（エネルギー分配率： $f=0.01\sim 0.03$ ）
- ラブルパイル天体の高速度衝突破壊条件は f を用いると以下のように求められた

$$f \cdot Q > \frac{4}{5} \pi \rho G R^2 \left(1 - \frac{\sum m_f}{M_t} \right)$$

- 衝突破壊強度を用いて破壊の条件を見積もった結果、ラブルパイル天体は Q によって以下の3通りの破壊が起こることが分かった

- a) dispersionが起こらず、構成要素がわずかに破壊される
- b) 構成要素はあまり破壊されないがdispersionが起こる
- c) 構成要素の大部分が破壊され、かつdispersionが起こる