

粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究

保井 みなみ¹, 松榮 一真¹, 荒川 政彦¹, 辻堂 さやか¹
高野 翔太¹, 長谷川 直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

1. はじめに

探査機はやぶさで観測された小惑星イトカワのように、小惑星の表面は砂礫やボルダーなどで構成されたレゴリス層で覆われている。また、小惑星の表層地形は、天体衝突などの外的要因によって変化する。例えば、小惑星エロスに小さなクレーターが少ない理由は、他天体衝突によってエロス全体を揺さぶられ、クレーターの形状を支えるレゴリス層の構造が崩れるためと考えられている (Richardson *et al.*, 2005)。

これまでに外的要因による小天体表面の地形変化に関する理論的研究が数多く行われ、衝突励起震動が小惑星の表層地形進化を支配している重要なプロセスの1つであることが明らかになってきた (e.g., Asphaug and Melosh, 1993; Greenberg *et al.*, 1994, 1996)。一方で、理論的研究に必要な衝突励起振動の素過程について詳細に調べた実験的研究は少ない。McGarr *et al.* (1969)は、アポロ探査で行われた月震計データ解析に必要な基礎データを得るため、月表層を模擬した試料への衝突実験を行い、励起される加速度を実測した。しかし、彼らは加速度計の距離を変えて実験を行っていないため、加速度の伝播過程及び減衰過程については言及していない。また、Yasui *et al.* (submitted)では、直径 200 μm ガラスビーズを用いた低速度衝突実験 (衝突速度 100m/s) を行い、弾丸の種類と加速度計の設置距離を変化させて加速度の伝播過程と減衰過程を詳細に調べた。特に、ピーク加速度が弾丸の種類によらず、クレーター半径で規格化した加速度径距離とよい整合性を持つことを発見した。

本研究では、レゴリス層を模擬した石英砂を用いて、衝突速度を小惑星帯での平均衝突速度 (数 km/s) まで拡張し、励起される加速度の計測とその伝播過程及び減衰過程について詳細に調べた。

2. 実験方法

衝突実験は、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には、直径 4.7mm のポリカーボネート球を用い、衝突速度は 1.5-6.9km/s とした。標的試料には直径 500 μm の石英砂 (バルク密度は 1.48g/cm³, 安息角は 32°) を用いた。石英砂は直径 60cm、深さ 20cm のタライにすり切れいっぱいになるまで入れた。また、加速ガスによる振動を除去するために、タライを風除け箱で囲い、タライの下には防振材を置いた。

励起される加速度は一軸加速度センサー (日本アビオニクス製 SV1113、電荷感度は 5.47pC/m/s², 応答周波数は 0.5Hz-10kHz) を用いて測定した。加速度センサーは、1 回の実験で 3~4 個用いて、衝突点からの位置を変化させて深さ 2.5cm まで埋めて設置した。加速度計距離 x は 5.1~35.3cm である。加速度センサーの信号はチャージアンプを通して、A/D 変換速度 100kHz のデータロガーで記録した。

標的チャンバー内は 10Pa 以下に真空引きした。また、衝突の様子を 3 ないし 4 台の高速ビデオカメラで撮影 (撮影速度 600~125000fps) すると共に、高速ビデオカメラの画像を解析して弾丸の衝突時間を決定した。

3. 実験結果

図 1 は、5.2km/s で衝突させたときに観測された加速度の時間変化を示している。加速度計距離 x は 12、20、27cm で、クレーター半径が 10.2cm であることから、全ての加速度センサーはクレーターより外側に設置してある。全ての波形は単一のピークを示す単発波形で、加速度の立ち上がり時間は全て 3ms 以内であった。

得られた加速度波形から、波の伝播速度を示す最大加速度到達時間 t_{tr} 、波の減衰率を求めるための最大加速度 g_{max} 、波の持続時間を示す半値幅 h を調べた。それぞれの結果について、以下に詳細を示す。

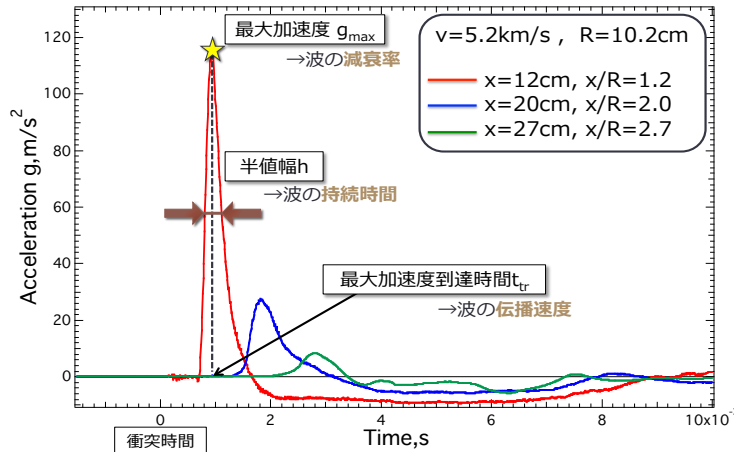


図 1 観測された加速度波形
(衝突速度 5.2km/s)

3.1. 最大加速度 g_{max}

最大加速度 g_{max} と加速度計距離 x の関係を示したのが図 2 である。今回は比較のため、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った衝突速度 200m/s の結果も示した。その結果、加速度計距離 x が大きくなると共に最大加速度が小さくなり、 x が同じ場合は衝突速度が大きくなるにつれて最大加速度が大きくなることがわかった。

さらに、クレーター半径 R で規格化した距離 x と最大加速度の関係を示したのが図 3 である。この図から、最大加速度と規格化距離の関係は衝突速度に依らず、 $g_{max} = 156 \pm 50(x/R)^{-2.95 \pm 0.5}$ と表され、最大加速度の減衰率は-2.95 となった。一方、ガラスビーズ標的の減衰率は-2.2 (Yasui et al., submitted) であることから、減衰率は標的物質によって変化することがわかった。

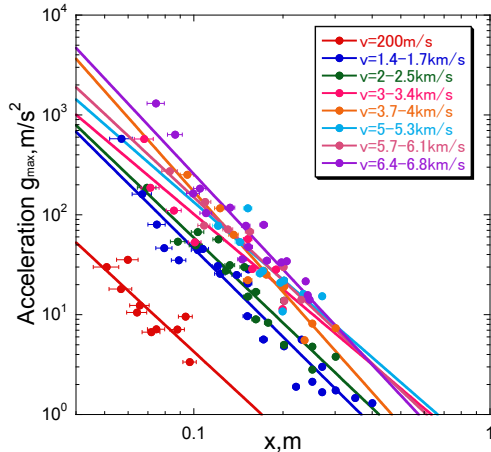


図 2 最大加速度と加速度計距離の関係

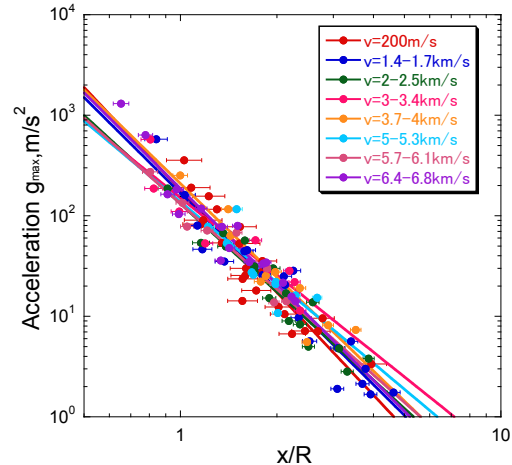


図 3 最大加速度と規格化距離の関係

3.2. 最大加速度到達時間 t_{tr}

最大加速度 g_{max} の到達時間の差 Δt (ピーク間時間) を計測し、加速度計間距離 Δx との関係から、石英砂中を伝播する波の速度を計測した。その結果を図 4 に示す。その結果、石英砂のピーク間時間 Δt は衝突速度によらずにほぼ 1 つの経験式で表されることがわかった。この経験式の傾きから伝播速度を求めた結果、 $56 \pm 10 \text{ m/s}$ となった。また、石英砂中を伝播する音速を S 波測定用の AE センサーを用いて計測すると約 50 m/s となることから、本研究で計測した波の伝播速度は S 波に近い速度で伝播していることが示唆された。

一方、Yasui *et al.* (submitted) が計測したガラスビーズの結果も図 4 に示す。ガラスビーズと石英砂を比較した結果、同じ加速度計間距離でもピーク間時間はガラスビーズの方が小さく、伝播速度も $106 \pm 6 \text{ m/s}$ となり石英砂より遅いことがわかった。このことから、最大加速度と同様、伝播速度にも標的物質依存性があることがわかった。

3.3. 半値幅 h

加速度波形のピークの半値幅 h を計測し、加速度計距離 x との関係調べた。その結果を図 5 に示す。半値幅 h は波の持続時間の指標となる。その結果、多少のばらつきはあるが、衝突速度や加速度計距離に依存せずほぼ一定となり、平均値 $0.7 \pm 0.5 \text{ ms}$ が得られた。また、ガラスビーズの半値幅と比較すると、ガラスビーズの半値幅の方が $0.2 \sim 0.6 \text{ ms}$ と少し小さくなる傾向が見られた (Yasui *et al.*, submitted)。

ここで、半値幅 h を決めるパラメータとして、クレーター形成時間、弾丸内の衝撃波通過時間、弾丸の貫入時間を計算した。その結果、それぞれの時間は $0.7 \sim 1.0 \text{ s}$ 、 $\sim 2 \mu\text{s}$ 、 $0.2 \sim 1.5 \text{ ms}$ となった。このことから、弾丸貫入時間と半値幅が桁で一致し、衝突励起振動の発生メカニズムには、弾丸の貫入が関係していることが示唆された。

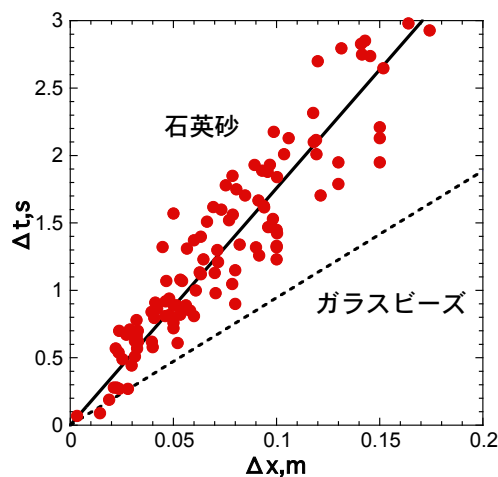


図 4 ピーク間時間と加速度計間距離の関係。実線が石英砂 (本研究)、点線がガラスビーズ (Yasui *et al.*, submitted) の結果を示す。

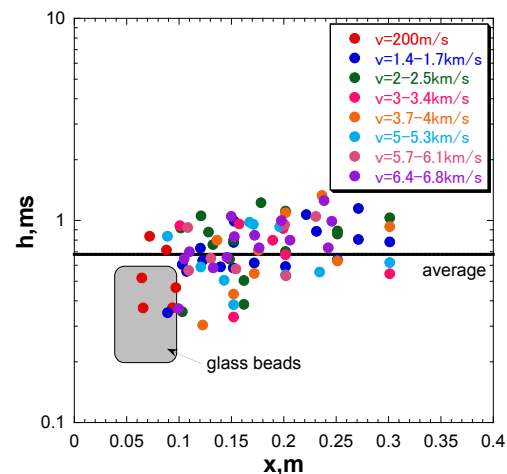


図 5 半値幅と加速度計間距離の関係。実線は石英砂 (本研究) の平均値を示す。グレーの領域がガラスビーズ (Yasui *et al.*, submitted) の結果を示す。

【参考文献】

- Asphaug and Melosh, *Icarus* 101, 144-164, 1993.
Greenberg et al., *Icarus* 107, 84-97, 1994.
Greenberg et al., *Icarus* 120, 106-118, 1996.
McGarr et al., *JGR* 74, 5981-5994, 1969.
Richardson et al., *Icarus* 179, 325-349, 2005.
Yasui et al., *Icarus*, submitted.