

平成 21年 5月 14日現在

研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2007～2008  
 課題番号： 19560089  
 研究課題名（和文） 飛翔体衝突による粉粒体のクレーター形成メカニズム及び力学的  
 支配因子の解明  
 研究課題名（英文） Analysis on Cratering Mechanism Subjected to Projectile Impact and  
 Mechanical Factors Governing It  
 研究代表者 西田 政弘（NISHIDA MASAHIRO）  
 名古屋工業大学 工学研究科 准教授  
 60282828

研究成果の概要： 飛翔体が粉粒体の表面に衝突した時のクレーター形成については未解明な点が多い。本研究では、種々の形状・材質の飛翔体が粉粒体の表面に衝突した際のクレーターのサイズおよびその条件について、主に実験により詳しく調べた。特にあまり調べられていない斜め衝突時の挙動について詳しく調べ、クレーターサイズや貫入条件についての実験式を提案した。さらに、飛翔体の形状がクレーター形成に与える影響について調べた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000円	570,000円	2,470,000円
2008年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000円	840,000円	3,640,000円

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学・機械材料・材料力学

キーワード： 粒粒体, 衝突, 貫入, 跳ね返り, 安息角, 密度比

## 1. 研究開始当初の背景

これまで、容器中に規則もしくは不規則充填させた粉粒体に飛翔体（速度25 m/s以下）が衝突する際の粉粒体の衝撃挙動および飛散挙動を、詳しく調べてきた。これらの結果を発表した学会での討論や学協会誌への原著論文の投稿の際に、得られた結果のうち、特にクレーター（粉粒体表面の小さな窪みも含む）の形状やそれに影響を与える因子について多くの質問を受け、注目度の高さを感じるようになった。地球物理学や粉体工学の分野で多くの研究が行われているため、「クレーター形成のメカニズムについて、これまでに主だった点は解明されている」と考えていたため、

これまでの自分の研究ではクレーターの形状についてあまり考察してこなかった。しかし、種々の議論を通して次第に未解明の点が分かってきた。そして、特に工学的応用を想定した研究は数が少ないことも分かってきた。

Sharmaは超低速衝突（1 m/s以下）時の粉粒体のクレーター深さの理論を構築しようとしているが、それ以上の速度（実用に耐えうる衝突速度）では、様々な非線形性が生じるため、クレーターの直径や深さに対する実験式が主に使われている。クレーターの実験解析やシミュレーションは、地球物理学、物理学、粉体工学、機械工学、土木工学などで多くの研究が行われている。粉粒体は流動性を有す

るため、流体力学をバックグラウンドとする研究者が主に行っていたり、流体近似したりする人が多い。しかし、飛翔体は固体であり、衝突時に弾性変形もしくは塑性変形し、粉粒体を構成する個々の粒子も固体で、弾性→塑性変形、時には破壊する場合もある。粒子の破壊・粉砕については、粉体工学や鉱山学の研究者によって多くの研究があるが、クレーター形成に粒子の弾性変形→塑性変形→破壊を考慮している研究は少ない。また、個々の粒子の変形には固体材料のひずみ速度依存性や温度依存性を考慮する必要がある。さらに、個々の粒子にはその内部で波が伝わり、粒子間の接触力が伝ばしていくが、それらを考慮して考察を行っている例は少ない。

また、レンヌ大学（フランス）の Bideauらは、砂漠の風紋形成を目的として、飛翔体衝突（3-70 m/s）を受ける粉粒体の研究を行っている。彼らは、Splash Functionと呼ぶ砂が飛び散るプロセスに注目し、スケール則としてFrude数  $V_0^2/gd$  ( $V_0$ : 飛翔体の衝突速度,  $d$ : 粒子の直径,  $g$ : 重力加速度) を用いている。また、UCLAのUeharaら (Phys Rev Lett 90, 2003) やUC San DiegoのTsimringらは、飛翔体衝突（1-5 m/s）による粉粒体表面のクレーターの深さと直径の実験式を構築しようとしている。Twente大（オランダ）のLohseらは、Frude数に加え、Newton数  $\rho_t V_0^2 / \sigma_y$  ( $\rho_t$ : ターゲット材の密度,  $\sigma_y$ : ターゲット材の降伏応力) を用いて、飛翔体の粉粒体への低速衝突（1-10 m/s）から隕石の惑星への高速・大規模衝突（1-10 km/s）のクレーターを統一的に説明しようとしているが、必ずしも上手くいかず、論文中では新たな無次元パラメータの必要性を指摘するに留まっている。

## 2. 研究の目的

機械工学、土質工学および粉体工学など分野において、例えば、杭打ち機による埋設施工や飛翔体の侵徹の際（JAXA: はやぶさ計画, Lunar-A計画）にみられるような「粉粒体の衝撃現象」が問題となり、多くの研究が行われている。粉粒体は多数の固体粒子の集合体であるため、特有の圧縮性および流動性を有し、特にその衝撃挙動は複雑で未解明の点が多い。本申請研究では、飛翔体衝撃を受けた粉粒体表面に形成されるクレーターの形成メカニズムおよびクレーター形成を支配する力学的因子を明らかにすることを目的とする。

2年の研究期間では、これまでの研究結果を参考に、クレーター形成を支配する因子を調べ、クレーター形成を説明する無次元パラメータを提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験装置

図1に示すように、透明塩化ビニル（PVC）

の板で作製した直方体容器内に粒子集合体をランダムに配列し、加速した飛翔体を種々の角度（15~90 deg.）で衝突させた。このときの様子を、正面と上方の2台の高速度ビデオカメラ（IDT ジャパン社製, MotionScope PCI2000S および MotionXtra N3）により撮影し、衝突現象や形成されるクレーター形状に対する衝突速度と衝突角度の影響を調べた。実験には、表1に示す飛翔体に直径6~20 mmの鋼球、真鍮球、アルミナセラミックス球を用い、粒子集合体には、表2に示すポリスチレンビーズ（セキトー社製 S II S）、ガラスビーズ（不二製作所製 FGB #10）、ケイ砂（オクムラセラム製 乾燥 5号）の計5種類を用いた。

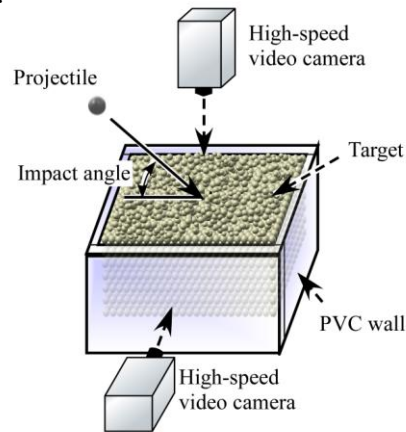


図1 実験装置

表1 実験に用いた飛翔体

	Diameter [mm]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]
Steel	6.0	7.81
Steel	9.0	7.81
Steel	11.1	7.81
Steel	12.0	7.81
Steel	20.0	7.81
Alumina	11.1	3.94
Brass	11.1	8.45

表2 実験に用いた粒子集合体

	Diameter [mm]	Powder density [g/cm <sup>3</sup> ]	Repose angle [deg.]
Sand	0.4	1.35	34
Grass beads	1.7	1.52	24
Polystyrene beads	6.0	0.64	23
Polystyrene beads	6.0	1.39	23
Polystyrene beads	6.0	1.78	26

#### 4. 研究成果

##### (1) 飛翔体の挙動

ランダム配列した粉粒体に対して飛翔体が衝突したときに観察される挙動を図2に示す3つに分けて定義した。まず、(1)粒子集合体に貫入する場合(Penetration), (2)粒子集合体の最上層を水平方向に移動する場合(Horizontal movement), そして、(3)粒子集合体から離脱して上方へ跳ね返る場合(Rebound)の3通りである。

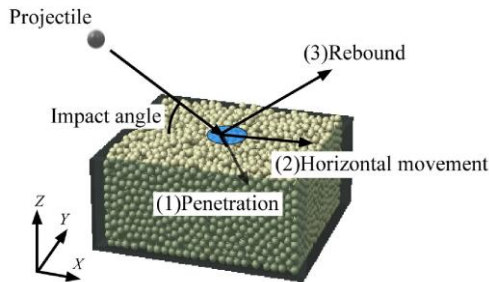


図2 実験装置

##### (2) 飛翔体の挙動特性の遷移

衝突実験より得られた衝突後の飛翔体の挙動を図3に示す。ただし、衝突挙動はプロットの色で分類し、それぞれ▼が貫入、○が水平移動、△が跳ね返りを示している。また、図4には遷移領域で貫入が起こる確率を示す。一例として、飛翔体に鋼球9mm, 粉粒体: ポリスチレンビーズ 0.12gの結果を示している。

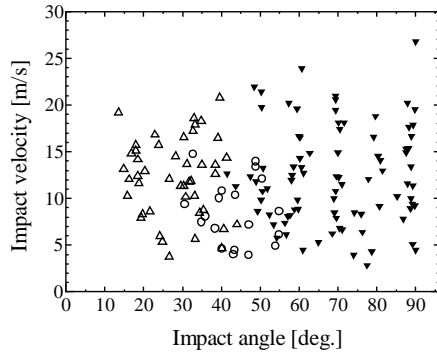


図3 衝突後の飛翔体の挙動特性

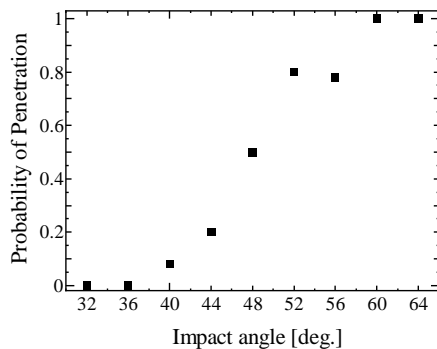


図4 遷移領域内の貫入確率

全ての飛翔体と粒子集合体の組み合わせに共通して 90deg. 付近で実験を行った場合、その衝突挙動は常に貫入であり、衝突角度が小さくなるにしたがって水平移動が起こり始め、さらに小さくなると跳ね返りが起こる。その現象は衝突速度にほとんど依存せず、挙動が共存する遷移領域があることがわかった。そこで、貫入する最小の角度と貫入しない最大の角度の間を遷移領域とした。また、その挙動が遷移し始める「貫入臨界角度」は飛翔体と粒子集合体の直径比や高密度比によって異なった。そこで、その現象が下記の式で表せると仮定し、係数の  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  を決定した。

貫入臨界角度：

$$\theta_E = \alpha \left( \frac{(1-\varepsilon)\rho_t}{\rho_p} \right)^\beta \left( \frac{D_t}{D_p} \right)^\gamma$$

ここで、 $\rho_p$  は飛翔体の密度、 $(1-\varepsilon)\rho_t$  は粉粒体のかさ密度、 $D_p$  は飛翔体の直径、 $D_t$  は粉粒体の粒子の直径である。

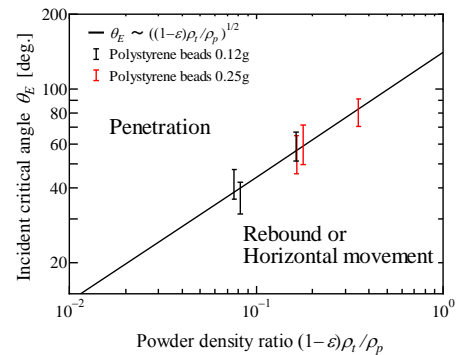


図5 同一直径の結果

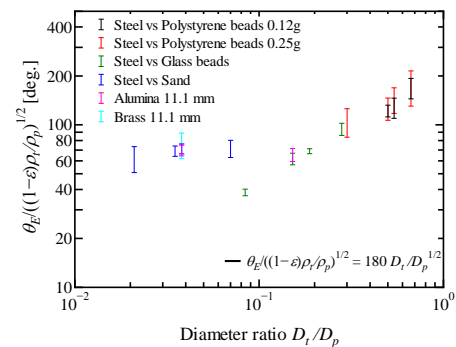


図6 直径比の影響

同一直径の結果を図5に示す。貫入臨界角度はエラーバーで示しているが、ほぼ直線的に変化し、その傾きは、0.5であった。つまり  $\alpha=0.5$  であった。さらに直径比の影響を調べるために、種々のデータを加えた結果を

図6に示す. その結果, 必ずしも直線状にはならず, ポリスチレンビーズとガラスビーズを用いた場合と砂を用いた場合で異なる様に思えた. そこで, それぞれ式を作ると, ポリスチレンビーズとガラスビーズ:

$$\theta_E = 210 \left( \frac{(1-\varepsilon)\rho_t}{\rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{D_t}{D_p} \right)^{\frac{2}{3}}$$

砂:

$$\theta_E = 130 \left( \frac{(1-\varepsilon)\rho_t}{\rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{D_t}{D_p} \right)^{\frac{1}{5}}$$

のようになった. いろいろな違いはあるが, ポリスチレンビーズ, ガラスビーズ, 砂の違いの一つは, 安息角である. 安息角が結果に影響を与えているものと考えられ, 今後はその影響を調べる必要がある.

### (2) クレーターの形状

次に, クレーターの形状について調べた. 飛行体の角度が変化することによるクレーターの形状の変化について考えた. 予想通り, 斜め衝突では, 円形から楕円形に変化する. しかし, 長軸と短軸の長さの変化を測定し, 実験式を構築することを試みたがうまくいかなかった. 図7に示すように, 衝突点を基準に $L_1$ ,  $L_2$ とし, それらの長さの変化を調べた.

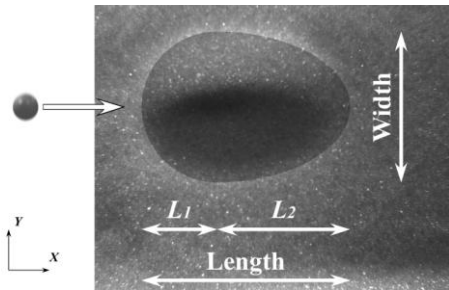


図7 クレーター形状の定義

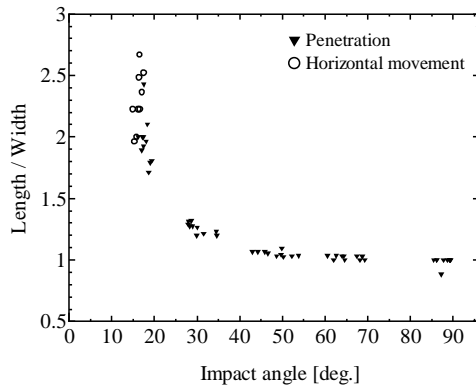


図8 クレーター縦横比の衝突角度依存性 (飛行体: 鋼球 20.0mm, ガラスビーズ)

また, クレーターの形状は, 衝突速度に依

存する. しかし, 形状の縦横比は, 衝突速度に依存せず, ほぼ一定であった. そこで図8に示すようにクレーターの形状の縦横比について調べてみると, 角度が変化するに従い, 変化し, それには一定の傾向が見られた. 特に貫入時には, 角度の低下とともに縦横比が大きくなっていった. また, 貫入しない場合は, 縦横比に大きなばらつきが見られた. そこで, 貫入時について実験式を提案した. 図9のように,  $L_1$ ,  $L_2$ をプロットすると, 直線状になった. そこでそれぞれを直線で結び,

$$\frac{L}{W} = \frac{1}{2} \left( (\sin \theta)^2 + (\sin \theta)^{-1} \right)$$

のような形で表すことができ, 図10に示すように実験結果を再現することができる.

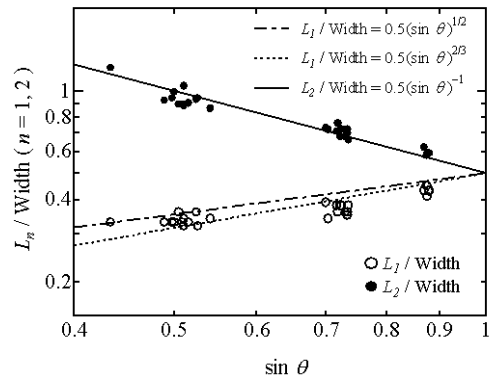


図9  $L_1$ と $L_2$ の角度依存性

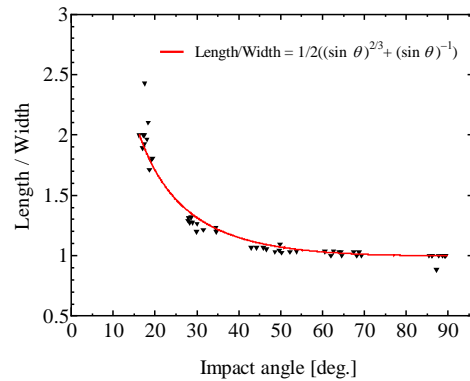


図10 実験式と図8の結果の比較

### (3) 飛行体の形状の影響

さらに, 飛行体を球形以外とし, 図11のような飛行体を用いて, 形状, 質量の影響を調べた. その結果, 同じ質量であっても, 円柱の場合, 貫入臨界角度が大きくなり, 縦横比は小さく. つまり, 円形に近くなった. 形状の影響が大きいことがわかる. これに関してはまだデータが少なく, 今後データを増やしていく必要がある. また, 円柱形状の場合,

図 1 2 に示すような中央丘付きの半球状になり、単純な半球状ではなくなった。

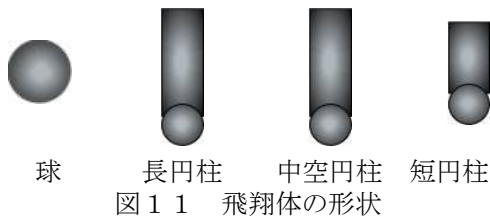


図 1 1 飛翔体の形状

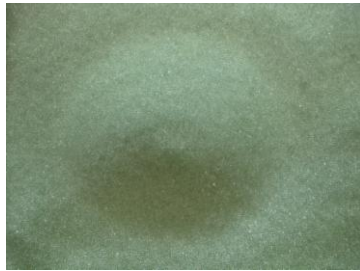


図 1 2 中央丘付きクレーター  
(長円柱の場合)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

西田政弘, 田中皓一, 二次元規則配列された粒子群への飛しょう体の衝突(層数および異材層の影響) 日本機械学会論文集 A, A74-739 (2008-3) pp. 419-427.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 楊ハン, 粒子集合体への貫入挙動に与える飛翔体形状の影響, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム (名大, 3/19, 2009)
- ② 奥村允, 三次元粒子集合体への飛翔体の衝突現象の観察, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム (名大, 3/17, 2009).
- ③ 永松淳司, 三次元粒子集合体への飛翔体貫入現象の離散要素法シミュレーション, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム (名大, 3/17, 2009).
- ④ 西田政弘, 異種粒子層を含む二次元粒子群への飛翔体衝突, 第 52 回 日本学術会議材料工学連合講演会 (京大会館, 10/23, 2008).
- ⑤ Masahiro Nishida, Oblique Impact of Projectiles on Granular Beds Consisting of Large-Diameter Spheres, Gordon Research Conference (Granular & Granular-Fluid Flow), 2008 Jun 24, Colby College.
- ⑥ 西田政弘, 離散要素法シミュレーション

による粉粒体表面のクレーター形成の解析, 平成 19 年度 衝撃波シンポジウム, (3/18, 2008 東工大)

- ⑦ 西田政弘, 離散要素法による粉粒体表面のクレーター形成の解明, 第 51 回日本学術会議材料工学連合講演会 (京大会館, 11/27, 2007).
- ⑧ 奥村允, 三次元粒子集合体への飛翔体の衝突現象の観察 (跳ね返り臨界角度およびクレータの形状), 高速度撮影とフォトリクスに関する総合シンポジウム 2007 (名工大, 2007, 11/17) .

[その他]

ホームページ

<http://kenkyu-web.nitech.ac.jp/Profiles/0004/0000275/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西田 政弘 (NISHIDA MASAHIRO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 6 0 2 8 2 8 2 8

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者