

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	田邊章洋
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論文題目			
(和訳) 粉体衝突により引き起こされるスプラッシュと応力伝播に関する数値的研究 (英文) Numerical study for granular splash and force propagation caused by single granular impact onto granular bed			
論文審査担当者			
主 査	教授 西森 拓		
審査委員	教授 小林 亮		
審査委員	教授 中田 聡		
審査委員	教授 早川 尚男(京都大学基礎物理学研究所)		
審査委員	准教授 粟津 暁紀		
〔論文審査の要旨〕			
<p>粉体は、多数の固体粒子から構成された集合体であり、近接粒子間の相互作用によって固まった状態、液体のように流動する状態、固化した部位と流動部位が混在する状態など、状況に応じた多様な状態間を移り変わり複雑な挙動を示す。粉体の動力学の解明は、薬剤や建設材料などの製造における非一様な乾燥粒子の混合、地球表面での堆積物の移動、あるいは、惑星や衛星のクレーター形成など地球内外の天体の環境履歴推定の研究にも関連し、基礎から応用にいたるまで理工学全般において重要な課題である。ただし、粉体の動力学の詳細を検証する実験・観測には、測定精度や関連諸パラメータの制御など多くの困難が伴い、粉体の振る舞いを物理学の基礎法則や検証事実を土台として系統的に記述する基礎方程式はいまだに確立されていない。</p> <p>本論文において著者は、粉体の振る舞いの中でも未解明な面が多い「スプラッシュ過程」、すなわち、静止した粉体層表面に入射粒子が一定角度で衝突した際に発生する粉体粒子の跳躍の過程に関して、主に数値的な手法を用いて動力学の詳細を明らかにした。</p> <p>論文前半では、スプラッシュ過程における跳躍粒子集団のダイナミクスの統計的性質を、離散要素法 (DEM) による数値計算に基づいて論じた。事前手続きとして、まず、今回用いた数値計算法や使用パラメータが、入射粒子自身の反跳や、スプラッシュ過程で放出された粒子の速度分布などに関して、既存の実験結果を定量的に再現することを確認した。その後、入射粒子の粉体層への衝突の瞬間からスプラッシュ過程が終了するまでの跳躍粒子の運動を詳細に調べた。その結果、スプラッシュによる跳躍粒子が、運動の様相の違いによって、2つの特徴的粒子集団に分類されることが明らかになった。すなわち、スプラッシュ初期に粉体層から跳び出した、跳躍粒子全体の15%程度の「初期跳躍粒子」集団と、残りの「後期跳躍粒子」集団の分類である。後期跳躍粒子の速度分布は、入射方向の水平速度成分は0を中心とした幅の狭い前後対称な形状を示し、鉛直成分に関しては、対数正規分布で表される。一方で、初期跳躍粒子の集団は、入射方向の水平速度成分に関して、中心が入射粒子の衝突方向に偏った分布を形成</p>			

し、鉛直速度分布はべき的な分布を示すことがわかった。初期跳躍粒子は、全跳躍粒子の運動エネルギーの総計のおよそ70%のエネルギーを得て跳躍するにもかかわらず、その速度の大きさのため、従来、速度分布を含めて十分な報告がなされて来なかった。また、上の性質全般は、粉体層の構成粒子の粒径分布に大きく依存することなく、粒径分布が、一様分布、分散の小さい正規分布、あるいは、分散の小さい正規分布の、いずれの場合においても、同様に実現されることが分かった。

論文後半では、スプラッシュ過程における、粉体層内部での力の伝播について論じており、入射粒子により粉体層に与えられた力学的エネルギーが、粉体層内部をどのように伝播し、その後、粉体層表面に戻り、いかに表面およびその近傍の粒子の跳躍を引き起こすのかを数値的に考察した。とくに、入射粒子の衝突後の衝突エネルギー伝播経路が、粉体層内部各粒子における2体間接触力の連鎖によるネットワーク構造で表現されるものと考え、上述のDEMによる計算に基いてエネルギー伝播経路を推定し、個々の伝播経路の特徴とスプラッシュによる跳躍粒子の性質についての解析を行った。その結果、跳躍粒子の速度は粉体層内部での伝播経路の長さに対して指数的に減衰すること、指数関数の減衰率は数値計算でパラメータとして設定した粉体粒子間の反発係数よりも小さい値となること、また、伝播経路の長さが粒子の直径の3倍以上になると入射粒子の入射方向の情報が失われることが分かった。

本博士論文の内容は、粉体の動力学の中でも重要な位置を占める、スプラッシュ過程の動力学に関する基礎的な性質について、従来の実験的研究では得られなかった側面に光を当てたものといえる。とくに、「初期跳躍粒子」の性質や、粉体層内部での衝撃伝播の詳細は、今回の研究によって、初めて明らかにされたものである。今回得られた知見は、粉体の動力学の物理学的な理解を広げ、かつ、風成地形における砂の輸送の定量的予測モデルの確立や、探査機による地球外天体での粒子衝突による表面粒子群の収集などの応用的研究の発展にもつながるものである。

以上より、審査の結果、本論文の著者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

### 主論文

Numerical study for granular splash and force propagation caused by single granular impact onto granular bed

(粉体衝突により引き起こされるスプラッシュと  
応力伝播に関する数値的研究)

### 公表論文

- (1) Splash detail due to a single grain incident on a granular bed  
Takahiro Tanabe, Takashi Shimada, Nobuyasu Ito, and Hiraku Nishimori  
Physical Review E, **95**, 022906 (2017).

### 参考論文

- (1) 定常的な粒子輸送下での粒子-粒子層間の衝突過程  
田邊章洋, 新屋啓文, 栗津暁紀, 西森拓  
交通流数理研究会, 20, (2014) 15-18.