

〈特別研究課題〉 堆積したアレルギー原因物質の飛散量・
距離に関する物理モデルの構築
助成研究者 早稲田大学 松田 佑



堆積したアレルギー原因物質の飛散量・ 距離に関する物理モデルの構築

松田 佑
(名古屋大学(現：早稲田大学))

Observation and Physical Modeling of Impactor-Ejecta Mechanism of Granular Materials causing an Allergic Reaction

Yu Matsuda
(Nagoya University (Current: Waseda University))

Abstract :

It is important to comprehensive understand of the dynamics of allergens to prevent allergic diseases such as hay fever. It is considered that pollens and yellow dust can be treated as granular materials in physics. In the present study, we have studied the impact on a granular bed by a solid sphere, a hydrogel sphere, and a cube. The impact of an object will lead to the formation of a crater. The resultant crater of a cube impact is an ellipse. The impact dynamics depends on the initial condition of the attitude of the cube. The diameter of the crater D_c is proportional to the $1/4$ power of the impact kinetic energy of the object U ($D_c \sim U^{1/4}$) when the object is a *solid* sphere and the impact velocity is low. On the other hand, some scaling factors have been reported as distributing from $1/6$ to $2/5$ for the impact of a *liquid* drop due to the complexity of a liquid drop impact phenomenon, where a drop deforms, splashes, and penetrates the granular bed. A hydrogel sphere deforms without splashing and penetrating; thus, we can consider only the effect of the deformation on the scaling relation. For spheres with high Young's modulus, the relation of the $1/4$ power law, which is reported for a solid sphere impact cratering, is observed. On the other hand, the power is smaller than $1/4$ for the impact of the sphere with small Young's modulus.

1. はじめに

花粉や黄砂などに代表される浮遊するアレルギー原因物質によって引き起こされるアレルギー鼻炎・結膜炎の罹患者は増加を続けており、小児の罹患者も増加している。現代社会では9割の時間を室内で過ごすといわれており[1]、快適で健康的な住環境のためにはアレルギー原因物質の居住区内への流入の予防や室内空間でのアレルギー原因物質の濃度分布の予測と制御技術の構築が不可欠である。室内空気中に浮遊しているアレルギー原因物質の振る舞いに関する研究は、これが気体と固体粒子の混合系として流体力学の一分野である固気混相流として扱えるために、流体力学の知見が活用でき活発に研究が行われている。床に堆積したり壁面に付着したりしているアレルギー原因物質の再飛散・浮遊は、室内環境中の濃度を瞬時に大きく変えるため、その物理モデルの構築はアレルギー原因物質の濃度分布の予測技術の構築において非常に重要である。しかし、堆積しているアレルギー原因物質は固体のように振舞い、舞い上がった際には流体のように振舞うために、流体力学のフレームワークとして扱うことができずに粒子の集合体と定義される粉粒体として取り扱う必要がある。特に粉粒体はおかれた状態によって物理的に大きく異なった振る舞いをするところから、堆積状態から舞い上がり状態の間を結ぶ物理モデルの構築は非常に難しい。

本研究では、粉粒体層への物理衝撃により生じる粉粒体層の変形・飛散量・距離に関して実験的に調査を行った。具体的には、物体を粉粒体層に衝突させた際に粉粒体層に生じるクレーター形状に関して調査を行った。本問題は、極めて単純な系でありながら、粉粒体の個々の運動を全て考えるには粒子の数が多すぎ、連続体と仮定して扱うには粒子の数が少ないために、この問題のモデルは非常に難しい。粉粒体層に固体球を落下させたときに形成されるクレーター直径は、落下球の運動エネルギーの1/4乗に比例する[2]ことが知られている。一方、粉粒体層に液滴を落下させた際に形成されるクレーター直径は、液滴の運動エネルギーの1/6乗から2/5乗に比例すると、文献によって値が大きく異なっている[2-8]。これは、粉粒体そのものの運動に加えて、液滴の変形、飛沫化や液滴の粉粒体層への浸透などの過程が非常に複雑であるためと考えられる。そこで本研究では、落下物体としてハイドロゲルを用いることで、形成されるクレーター直径に対する落下物体の変形の影響を調査した。また、これまでの落下物体では球体を用いられていたが、異なった形状の落下物体を用いて、その影響を調査することとした。

2. 試料および実験方法

本報では、粉粒体層には平均直径が0.115 mmのガラスビーズを用いた。これをシャーレに満たした。粉粒体層はシャーレに入れた後に押し込むなどの操作は行わない。このとき、ガラスビーズの空間充填率は62%程度であった。落下物体としては、固体としてABS樹脂製の球とPLA樹脂を用いて3Dプリンタで作製した立方体を準備した。また、変形する落下物体としてハイドロゲルで作製した球を準備した。球の直径はいずれも3.1 mmで立方体は1辺が5 mmのものを用いた。これらの落下体を粉粒体層表層に対して自由落下させて衝突させた。ここで、落下高さを $h=50\sim 500$ mmの範囲で変えることによって衝突エネルギーを変化させた。また落下物が粉体層に衝突する瞬間の速さは $\sqrt{2gh}$ に3%以内のずれで一致した。ここで、 g は重力加速度である。

ハイドロゲル球は、ポリエチレングリコールを主剤としたハイドロゲルに純水ならびに架橋剤を混合させ、これをシリコンオイル内でUV光照射することで作製した。またハイドロゲル剤と純水

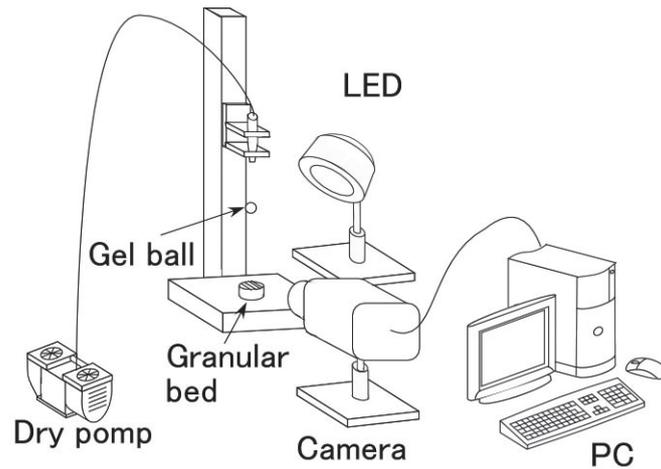


図1 粉粒体衝突実験の装置概要図

の混合比率を変えることで、ゲル球のヤング率を変化させることができる。

粉粒体層への物体落下の様子は、高速度カメラを用いて10000fpsで撮影した。また形成されたクレーターサイズはカメラ画像から算出した。実験装置全体の概要を図1に示す。

3. 実験結果

3.1 物体衝突によるクレーター形成

粉粒体層に立方体を高さ $h=400$ mmから落下衝突した際の時系列画像を図2に示す。また、図3に典型的なクレーター形状を示す。図2では物体が最初に粉粒体層と接触した時刻を0として時間を表している。図2のように、立方体物体の落下においては初期の物体の固定時の状況や、物体を落下させる際のわずかな力に作用によって、平面ではなくいずれかの角面が粉粒体層に最初に接触することが多く観測された(0 ms)。0.5 msでは、もう一方の面が粉粒体層に接するように立方体物体の向きが変わっていく様子が確認できる。その後、物体は粉粒体層の中に沈み込んでいくと同時に、粉粒体層面に対して物体が水平になる様子が確認できた(4.0 ms)。これに引き続き、粉体が大きく舞い上がり、40 ms後に粉粒体層の運動、物体の運動がともに停止する様子が確認できた。また静止時の様子を見ると、物体の最初に粉粒体層に接触した面(左側)がもう一方の面(右側)よりも上方で静止していた。また図3に示すように、形成されるクレーター形状に関して、落下物が球の場合には円形のクレーターが形成されるのに対して、立方体の衝突では楕円形状のクレーターが形成された。これは、立方体の衝突の場合には、粉粒体層と物体の接触位置やその面積ならびにそれらの時間履歴に依存するものと考えられ、詳細な解析にはより詳しく衝突過程の時間履歴を調査する必要があると考えられる。

3.2 形成されるクレーター径と落下物体の運動エネルギーとの関係

3.1に述べたように、立方体の衝突の結果形成されるクレーター形状は、立方体の接触時の状況に大きく依存すると考えられる。落下時の立方体の角度を高再現性で実験することは難しく、以下では、まず球体の衝突に限定してクレーター径と落下時のエネルギーの関係について調査した。具体的には、ゲル球のヤング率を変化させてると共に、落下高さを変化させて、これらが形成されるクレーター径に与える影響を調査した。本研究ではまず、固体球について実験を行った。落

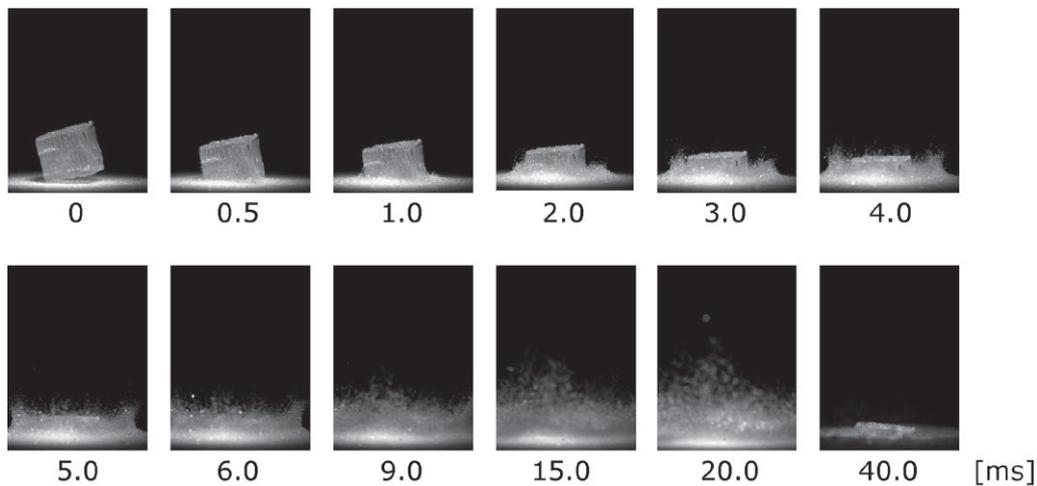


図2 立方体物体の粉粒体層への衝突の様子

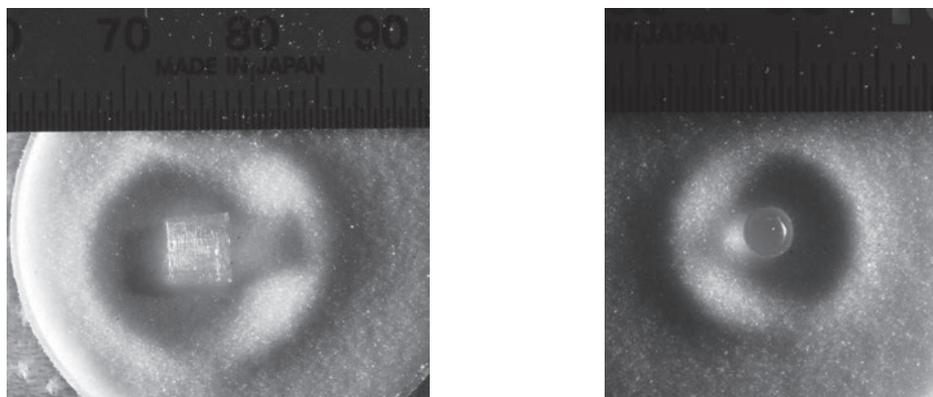


図3 形成されたクレーター形状(左: 立方体, 右: 球体)

下高さ、すなわち衝突時の球体の運動エネルギーを変化させて、形成されるクレーター径への依存性を調査した。このとき、形成されるクレーター径は、球体の運動エネルギーの1/4乗に比例した。これは過去の研究例[2]と一致しており、本研究での実験装置や実験手法・解析手法が妥当であることを示している。

次にゲル球に対して同様に実験を行った。結果を図4に示す。ゲル球は、ヤング率が 150 ± 14 kPa(図中の赤丸)および 50 ± 10 kPa(図中の青四角)の2つの統計量で表される2種類のゲル球群を準備した(ここで、ヤング率は(平均値) \pm (標準偏差)で表す)。図4の横軸はゲル球の運動エネルギーを表し、縦軸は形成されたクレーター直径を表す。図4に示すように、ヤング率が高い場合、形成されるクレーター径は固体球によって形成されるクレーター径と同じく、運動エネルギーの1/4乗に比例することが分かる。一方、ヤング率が小さいゲル球によって形成されるクレーター径は運動エネルギーの1/4乗よりも小さな指数に比例することが分かった。ゲル球のヤング率と運動エネルギーならびにクレーター径の詳細な議論に関しては、文献[9]を参照されたい。

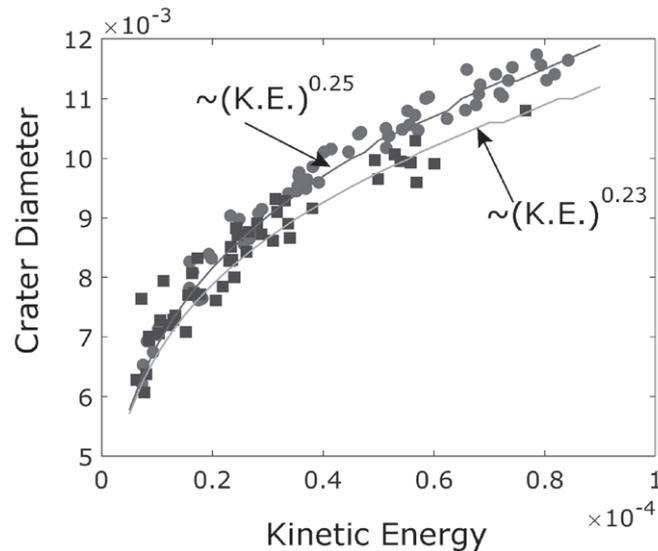


図4 クレーター径と落下体運動エネルギーの関係
赤丸がヤング率, 青四角がヤング率の球体を表す

4. まとめ

本研究では粉粒体層への物理衝撃により生じる粉粒体層の変形・飛散量・距離に関して実験的に調査を行った。具体的には、物体を粉粒体層に衝突させた際に粉粒体層に生じるクレーター形状に関して調査を行った。落下体が立方体の場合は、落下時の姿勢のわずかな違いが衝突時のダイナミクスに影響を与えることが分かった。また球体の場合においては、クレーター径と落下物体の運動エネルギー間の関係式において落下体が柔らかくなると固体球とは違った依存性を示すことが明らかとなった。

参考文献

1. 塩津, 弥.; 吉澤, 晋.; 池田, 耕.; 野崎, 淳., 生活時間調査による屋内滞在時間量と活動量 : 室内空気汚染物質に対する曝露量評価に関する基礎的研究 その1. *日本建築学会計画系論文集* **1998**, 63, (511), 45-52.
2. Katsuragi, H., *Physics of Soft Impact and Cratering*. Springer Japan: 2016.
3. Zhao, R.; Zhang, Q.; Tjugito, H.; Cheng, X., Granular impact cratering by liquid drops: Understanding raindrop imprints through an analogy to asteroid strikes. *PNAS* **2015**, 112, (2), 342-347.
4. de Vet, S. J.; de Bruyn, J. R., Shape of impact craters in granular media. *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **2007**, 76, (4 Pt 1), 041306.
5. Katsuragi, H., Morphology Scaling of Drop Impact onto a Granular Layer. *Phys. Rev. Lett.* **2010**, 104, (21), 218001.
6. Delon, G.; Terwagne, D.; Dorbolo, S.; Vandewalle, N.; Caps, H., Impact of liquid droplets on granular media. *Physical Review E* **2011**, 84, (4), 046320.
7. Nefzaoui, E.; Skurtys, O., Impact of a liquid drop on a granular medium: Inertia, viscosity and surface tension effects on the drop deformation. *Experimental Thermal and Fluid Science* **2012**, 41,

43-50.

8. Marston, J. O.; Zhu, Y.; Vakarelski, I. U.; Thoroddsen, S. T., Deformed liquid marbles: Freezing drop oscillations with powders. *Powder Technology* **2012**, *228*, 424-428.
9. Matsuda, Y.; Fukui, S.; Kamiya, R.; Yamaguchi, H.; Niimi, T., Impact cratering on a granular bed by hydrogel spheres having intermediate property between solid and liquid. *Physical Review E* **2019**, *99*, (3).