

論文 Article

流動床インターフェース中の物体に働く浮力

原稿受付 2021年8月2日

ものづくり大学紀要 第11号 (2021) 13~16

亀山頌互^{*1}, 菅谷諭^{*2}^{*1}ものづくり大学 技能工芸学部 総合機械学科 研究生^{*2}ものづくり大学 技能工芸学部 総合機械学科 教授

概要 本研究では、流動床インターフェース中の物体に働く浮力を計測するほか、その結果を用いて流動状態にある砂のかさ密度を求めた。

キーワード : 流動床, 浮力, ヒューマンインタフェース, かさ密度

Buoyancy Force on an Object Immersed in Fluidized Bed Interface

Shogo KAMEYAMA^{*1}, Satoshi SUGAYA^{*2}^{*1} Research Student, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Professor, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

Abstract Net buoyancy force acting on an object immersed in Fluidized Bed Interface was measured and the bulk density of fluidized bed surface was calculated. Air/ceramic sand fluidized bed was operated at 70-100 V with a spherical weight immersed at the depth of one to four times of its diameter. The result demonstrates Archimedes' principle is applicable at the depth of less than two times of the diameter. However, the object sinking at three to four times of the diameter shows a negative net buoyancy force, which suggests the existence of defluidized hood at the top of the object.

Key Words : Fluidized bed, buoyancy, human interface, bulk density

1. はじめに

流動床インターフェースは、まるで流体のように振る舞う砂を、エンターテイメント・医療・防災訓練等の多様な場面で応用できる装置である¹。² 流動床（または流動層）とは、粉粒体が入った容器の底から流体を吹き上げることによって、固体粒子が流体中に浮遊懸濁している現象のことである³。この現象は粉粒体の乾燥・加熱・触媒反応等の様々な工業プロセスで利用されてきたが、近年までヒューマンインタフェース用途としては考えられていなかった。

流動床インターフェースの応用を進めるにあた

り、その動作原理を理解し、用途に合った作動条件で設計することが必要である。そこで、本稿では流動床インターフェース中の物体に発生する力を計測し、砂表面からの深さや送風機の作動電圧（供給空気流量）との関係を調べた。

2. 実験方法

実験に用いた流動床インターフェースは、人工セラミック砂(伊藤忠セラテック社 ナイガイセラビーズ®60 #1450 粉体かさ密度 1.69 g/cm³)を容器に入れ、容器底部に設置されたパイプにあけられた穴から、自作送風機（以下、送風機と呼ぶ）

の空気を吹き出させることにより、流動現象を発生させている。送風機は電圧調整器に接続されており、供給空気流量を連続的に変化させることができる。本実験装置では、70 V 前後で砂の流動が始まる。100 V 以上では砂が容器の外に頻繁に吹き出すため、実用的と思われる 70-100 V の範囲で実験を行った。

浮力の計測には、図 1 に示すように実験用の約 45 mm の鋼球おもり（直径 44.45 mm, 360 g）を使用した。おもりは 2 つのはかりで両端を単純支持された棒の中央に木綿糸で吊るされており、流動状態では、おもりが砂の下に完全に沈むようになっている。この状態で、はかりの目盛りを読み取ることで、おもりにかかっている鉛直下向きの力を計測することができる。静止状態で流動床がおもりに及ぼす力は、計測された力と、おもりにかかる重力の差分となる。文献によると、流動床が及ぼす力には、密度差による浮力、空気の流れによる抗力があるが、最も支配的なのは浮力である⁴⁾。本実験で計測できるのは、定常状態で流動床が及ぼす力の合力であり、これを上向きを正としてネット浮力（net buoyancy force）と定義している。

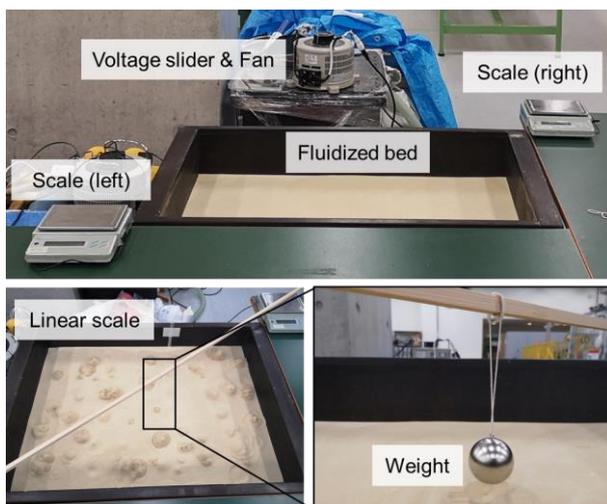


Fig. 1 Fluidized bed interface experimental setup

また、おもりの砂表面からの深さは、吊るす糸の長さにより変えることができる。表 1 に示すように、実験を行った深さの条件は 4 種類であり、

吊るした時の棒上面からおもりの上端までの長さは、それぞれ 202 mm, 235 mm, 280 mm, 325 mm である。ただし、砂表面の高さは、送風機から吹き込む空気流量により、およそ 20 mm の範囲で変化するため、容器壁面に取り付けたスケールで記録した。おもりの深さは、砂表面からおもり上端までの距離と定義した。表に示した結果は、砂表面の高さから計算した、最小および最大値である。また、深さをおもりの直径で無次元化した結果も示した。以下、本稿において、おもりの深さについての条件は、砂表面からおもり上端までの深さをおもりの直径で無次元化した 0D, 1D, 2D, 3D と表す。

本実験では、4 種類の深さ条件に対して送風機作動電圧を 70-100 V の範囲で 5 V ごとに変化させ、浮力や流動床の表面高さを計測する操作を 3 回繰り返した。実験結果は全て、同一条件における 3 回の実験データの平均である。これは、ランダムな誤差要因を平均化する以外にも、おもりの振動や流動床内の非定常な流れによる加速度（気泡の生成・離脱等）がネット浮力の計測時に含まれてしまうのを平均化する目的で実施した。

Table 1 Experimental conditions

No	Case ID	String length [mm]	Depth [mm]	Depth / D
1	0D	202	2-17	0.1-0.4
2	1D	235	33-53	0.7-1.2
3	2D	280	79-96	1.8-2.2
4	3D	325	124-142	2.8-3.2

3. 実験結果および考察

まず、図 2 に送風機作動電圧と砂表面との高さの関係を示す。70 V 前後で砂は流動状態になり、おもりは完全に砂の中に沈んでいるが、砂表面は上昇していない。85 V までは電圧と共に高さが上昇し、それ以降はほぼ一定となる。

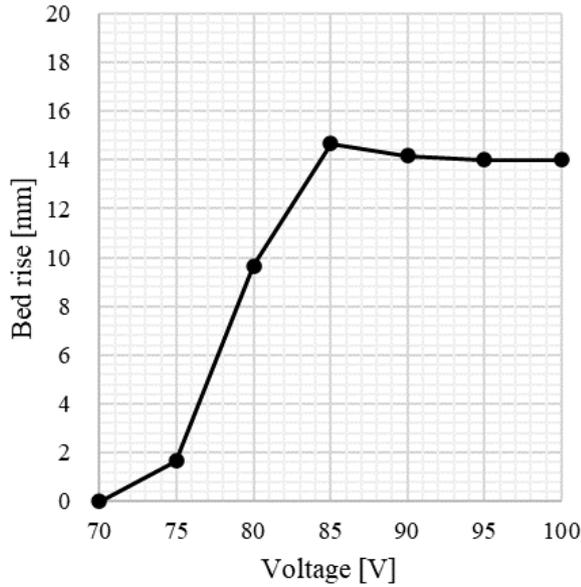


Fig. 2 Fluidized bed interface surface rise (Case: 0D)

次に、図3に送風機作動電圧とおもりに働くネット浮力の関係を示す。全ての深さにおいて、送風機の作動電圧、すなわち空気流量が大きくなると、浮力が小さくなることが確認された。これは、空気流量が大きくなるにつれ、砂と空気を平均した見かけ上の密度（かさ密度）が低下していくことを示している。また、おもりの深さが 2D および 3D の場合は、95 V と 100 V において、鉛直下向きの力が発生し、浮力が打ち消されていることが分かった。

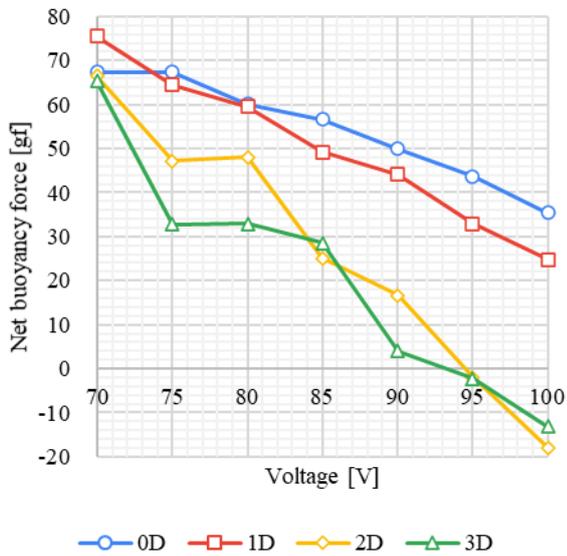


Fig 3 Net buoyancy force at various airflow

2D および 3D で鉛直下向きの力がおもりにかかる理由としては、一定以上の深さを超えると、おもりの上部で空気の流れが遮られ、砂が溜まり追加の重量が加わることによると考えられる。これは文献4-7で de-fluidized hood と呼ばれる現象にあたる。

図4には、4条件の深さでの浮力計測を示した。電圧が 85 V 以上となり、おもりの無次元化深さ Depth / D がほぼ一定となっても、送風機の電圧が変化するとネット浮力は変化する。

ネット浮力の変化の大きさは、おもりの深さが 0-1D 程度の場合と 2-3D の場合では異なる可能性が高い。流動床内部吹き出しパイプに近いことによる局所的な流れの違いや、defluidized hood の鉛直方向長さが変化していることが推測される。

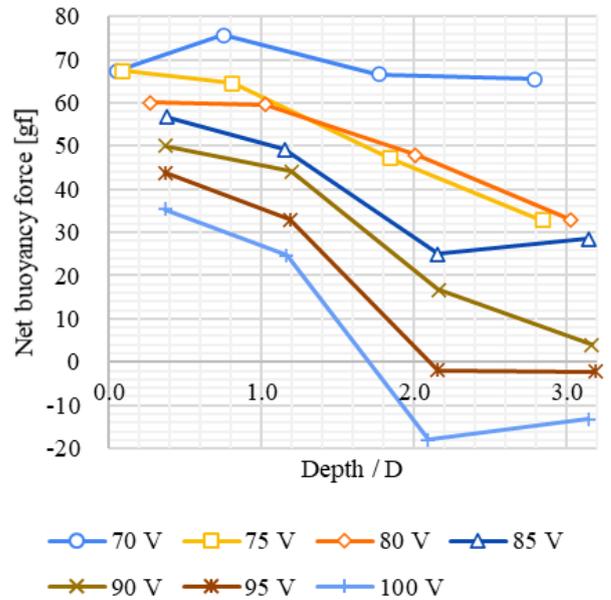


Fig 4 Net buoyancy force - depth relationship

最後に、0D の条件のデータを用いて、砂表面付近でのかさ密度を計算した結果を図5に示す。実際に流動床インターフェースを使用する場面では、物体が表面に浮いており、0D の条件が最も近いと考えられる。表面に近いため、defluidized hood による下向きの力はないものと仮定し、浮力と密度の関係は $F = \rho V g$ のアルキメデスの原理を利

用した。

流動状態にある砂は、送風機の作動電圧を 70-100 V で変化させた場合、 0.77 g/cm^3 から 1.47 g/cm^3 の範囲で密度が変化していることが分かった。使用した砂のかさ密度は 1.69 g/cm^3 であるため、100 V では静止状態の半分程度までかさ密度が減少していることになる。

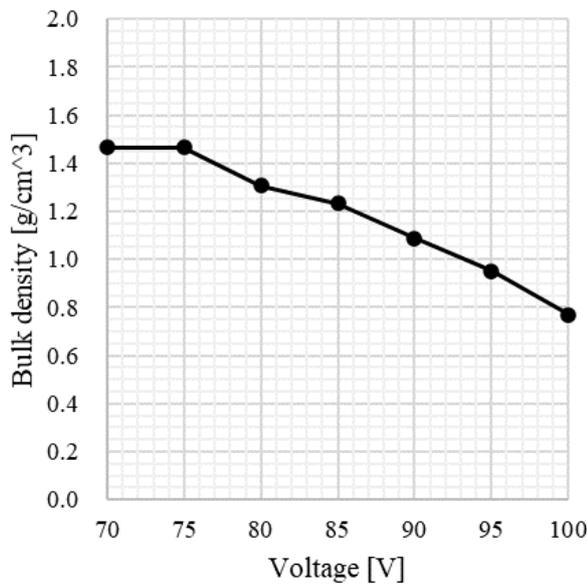


Fig. 5 Calculated bulk density of fluidized bed
(Case 0D: average of fluidized bed at 2-61mm depth)

4. まとめ

本稿では、流動床インターフェース中の物体にはたらくネット浮力を計測し、送風機の電圧および表面からの深さとの関係性を調べた。また、実験結果を用いて、流動床インターフェース作動中の砂表面かさ密度を求めた。

空気流量が大きくなるとかさ密度が低下し浮力が小さくなるという結果は理論通りであった。一定以上の深さでは、アルキメデスの原理より算出される浮力には従わず、物体上部で流動しない砂が存在することによる下向きの力が発生していることが示唆された。

文献

- 1) 的場・菅谷：流動床インタフェース：液体のようにふるまう砂を用いたインタラクションシステム，情報処理学会インタラクション 2017，2-510-28，(2017) 476-479.
- 2) Y. Matoba & S. Sugaya: Fluidized Bed interface, International Display Workshops 2018, (2018).
- 3) R. Holdich: Fundamentals of Particle Technology, Midland Information Technology and Publishing (2002).
- 4) T. H. Nguyen & J. R. Grace: Forces on Objects Immersed in Fluidized Beds, Powder Technology, 19, 2 (1978) 255-264.
- 5) W. R. Hager & S. D. Schrag: Particle Circulation Downstream from a Tube Immersed in a Fluidized Bed, Chemical Engineering Science, 31 (1976) 657-659.
- 6) A. K. Kulkarni: Defluidized zone over a horizontally immersed tube in a fluidized bed, Chemical Engineering Science, 42, 5 (1987) 1245-1247.
- 7) A. C. Rees, J. F. Davidson, J. S. Dennis & A. N. Hayhurst, The Rise of a Buoyant Sphere in a Gas-fluidized Bed, Chemical Engineering Science, 60 (2005) 1143-1153.