

加圧環境下での垂直振動粉体ポンプシステムによる粉体毛細管現象

鈴木 奏大¹, 鷲野 公彰², 辻 拓也², 安達 真聡^{1*}

Granular Capillary Action of a Pressurized Powder Bed in a Granular Vibration Pumping System

Sota Suzuki¹, Kimiaki Washino², Takuya Tsuji² and Masato Adachi^{1*}

Received 13 October 2025; Accepted 18 January 2026

A granular vibration pumping system employing a vertically oscillating pipe offers a promising approach for particulate transport. When a pipe is inserted into a granular bed and vibrated, powder materials can climb in the pipe owing to the so-called granular capillary action. While most of the prior studies have focused on the effects of vibration parameters and pipe geometry, the influence of powder bed pressure remains unclear. This study experimentally and numerically examines the impact of externally applied pressure on particle climbing behavior. The results show that the applied pressure markedly increases the particle climbing height by promoting the inflow beneath the pipe and enhancing interparticle forces. In some cases, particles become transportable under externally applied pressure. In addition, the climbing height increases with the vibration frequency under externally applied pressure, owing to greater acceleration. However, excessive pressure may cause jamming, which can limit the improvement of transport performance.

Keywords: Granular vibration pumping, Granular capillary action, Vibration transport, Powder handling, External powder pressure.

1. 緒言

粉体は、食料品、医薬品、化粧品などの日用品から、塗装材や化学品原料といった製造分野に至るまで、幅広く利用される基本的な材料であり、その物性値や環境条件、外部からのエネルギー入力によって、固体・液体・気体のように振る舞いを変える特徴的な性質を有する[1]。そのため、物理特性や使用環境を考慮した適切な粉体ハンドリング技術の活用が不可欠である。加えて、技術的な制約もハンドリング技術の選定における重要な要素である。

たとえば、特徴的な応用例として、宇宙環境下における粉体材料のハンドリングが挙げられる。月面に存在する「レゴリス」と呼ばれる粉体材料は、宇宙環境下における貴重な資源である。このレゴリスは金属酸化物や水

を含み、それを化学・熱処理することで酸素や金属、さらには水といった人間の生命維持やロケットの燃料などに不可欠な資源の抽出が可能である[2,3]。長期的な月面滞在を実現するために必要な物資をすべて地球から輸送するのは、コストとリスクの面から考えても現実的ではなく、そのため現地資源であるレゴリスを現地で活用する ISRU (In-Situ Resource Utilization) が不可欠とされている[4,5]。

レゴリスを資源活用するには、採掘[6]、収集[7]、分級、選鉱、化学処理など多岐にわたる工程が存在する。それらの工程で共通して必要となるのが、重力に逆らって垂直方向に粉体を搬送するプロセスである。月面は低重力加速度であるとはいえ、重力に打ち勝って粉体を運ぶ必要があり、水平方向搬送と比べるとその技術的難易度が高くなる。一般的に地上で使用される粉体の垂直搬送技術として、流体を利用したものや機械的な構造を組み合わせたシステムがあり、バキュームコンベア[8]やベルトコンベア[9]などが例に挙げられる。しかし、これらは装置が大型化・複雑化しやすく、地球からの輸送コストが高くなること、地上での産業応用のように高頻度でのメンテナンス・修理が行えないこと、さらには気体や液体といった流体材料が必要となることなど、月面環境条件においては解決しがたい技術的制約がある。

そこで、月面環境下での ISRU を行う上で重要な粉体

1 京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)
Department of Mechanical Engineering and Science, Graduate School of Engineering, Kyoto University
(Kyoto-daigaku Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan)

2 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻
(〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Osaka
(2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

* Corresponding Author masato@me.kyoto-u.ac.jp

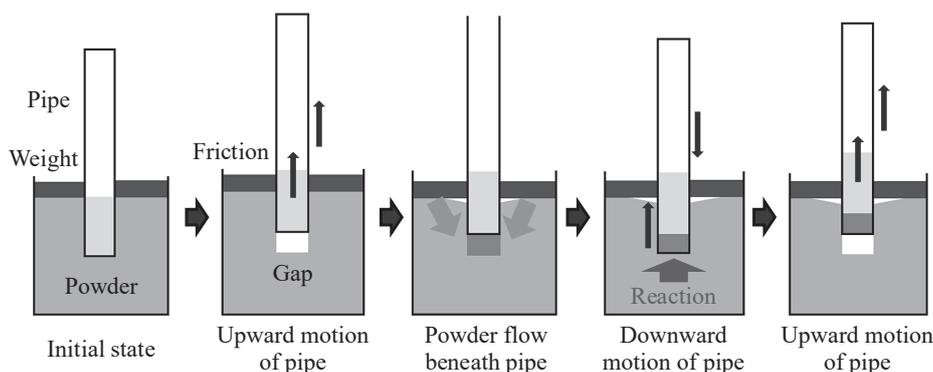


Fig. 1 Granular capillary action in a granular vibration pumping system

の垂直搬送に適している技術として垂直振動粉体ポンプシステムが注目されている[10]。このシステムは、粉体層内に挿入したパイプを鉛直方向に振動させることで、粉体がパイプ内を上昇する「粉体毛細管現象」を利用した粉体ハンドリング技術である[10]。粉体毛細管現象は、液体における毛細管現象とはまったく異なる原理に基づく現象であり、システムの小型化・軽量化が可能で、防塵性にも優れる。また、気体や液体を用いずに動作するため、月面環境下での利用に多くの利点がある。そのメカニズムについて、Fig. 1 に示すような説明がなされている[11]。振動によってパイプが上に移動する際、摩擦力により粉体が一緒に持ち上げられる。パイプ下部には隙間が生じて、その隙間に周囲の粉体が流れ込む。パイプが下降するとき、パイプ内の粉体がパイプ外の粉体に押しつけられることとなり、その時の力のバランスによってパイプ内の粉体の位置が相対的に上昇する。再度、パイプが上昇する時には、前サイクル時よりもパイプ内の高い位置に粉体が引き上げられる。このようなプロセスが振動周期中に繰り返されることで、粉体がパイプ内を徐々に上昇するという仕組みである[11]。

先行研究では、本システムの輸送性能に関する基本的特性が調査されており、振動周波数や振幅といった振動パラメータが、粒径 200 μm 程度の球状ガラスビーズの上昇高さに与える影響が明らかにされている[12]。また、1.0~3.5 mm のより大きな粒子に対する輸送性能も実証されている[13]。さらに、管の形状、直径、挿入深さなどの影響も調査されている[10,14]。数値シミュレーションによる粒子挙動の可視化や重力加速度の影響についての調査も行われており、重力加速度が小さくなると粒子がより高く上昇しやすくなることが示唆されている[15]。

一方で、振動条件を含めたパイプ側の条件ではなく、粉体層側の状態が粉体搬送におよぼす影響についてはほとんど調査が行われていない。過去の実験における観察では、容器内の粉体層からパイプ内へとより多くの粒子が移動するにつれて、容器内の粉体層表面高さとともにパイプ内の粒子上昇速度が低下することが確認されている。これは、パイプ入口付近の粉体層にかかる圧力に変化が生じ、それが粉体毛細管現象に影響をおよぼしていることを示唆している[13]。このシステムでは、粒子とパイ

プ間や粒子間の摩擦力、重力、粉体層からの圧力など、振動周期中の力のバランス変化によって粉体が上昇していると考えられるため、粉体層側の圧力の影響は重要な要因となりえる。

本研究では、容器内の粉体材料にかかる圧力が、粉体毛細管現象における粉体の上昇挙動におよぼす影響を明らかにすることを目的とする。具体的には粉体層自体にかかる重力に加えて、外部から粉体層を加圧した状態で垂直振動粉体ポンプシステムを用いた実験を行い、それらが粉体上昇高さにおよぼす影響を調査した。さらに、個別要素法 (DEM) に基づくシミュレーションを用いて、粉体層圧力の影響を可視化・解析した。

2. 実験方法

Fig. 2 に本研究で用いた実験装置を示す。アルミフレームの土台に加振機構を設置し、この機構を用いて粉体容器内に挿入されたパイプを振動させる。加振機構部にはサーボモータ (Oriental Motor, NX975AS-3) と偏心カム機構を使用しており、モータの回転運動を直線運動に変換して振動させている (詳細は[12]を参照)。使用したカムフォロワの偏心量は振動振幅に対応し、回転速度は振動周波数となる。円筒形の容器 (外形 200 mm, 肉厚 5 mm, 高さ 250 mm) に、実験試料となる平均粒径 3 mm のガラス球形粒子 (ソーダ石灰ガラス, 真比重: 2.5, アズワン) を、底面からの高さが 150 mm となるように充填した。先行研究では、粒径 3 mm の粒子は数 100 μm の粒子よりも上昇しにくいことが報告されており[13]、加圧の有無による上昇挙動の差異の比較を容易にするため、本研究では粒径 3 mm のガラス粒子を使用した。また、大粒径粒子を使用することで、数値シミュレーションにおいて再現する際に計算コストが低減できる。そこへ外径が 16 mm, 肉厚 4 mm, 長さ 1000 mm のパイプを挿入し、垂直に加振することにより実験を行った。パイプ径は、先行研究において粒径 3 mm のガラス粒子が振動条件下で上昇可能であることが確認されている条件を採用した[13]。振動前にパイプ上端部から粉体を加え、パイプ内の粉体高さを粉体容器内の粉体層の高さと合わせた。すべての実験でパイプの初期挿入深さは 75 mm に統一した。粉体の上昇挙動を 2 台のカメラ (NET Japan Co., Ltd., IC4133BU)

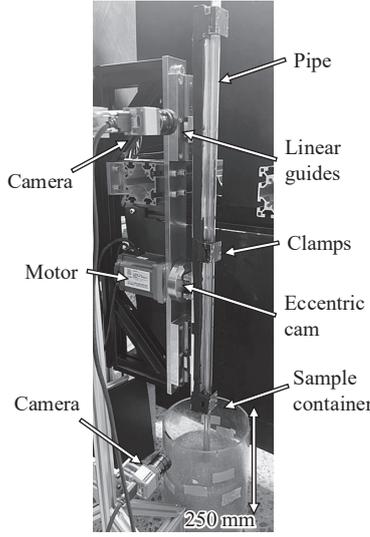


Fig. 2 Experimental setup

により撮影した。その動画の各コマを画像解析し、パイプを振動させ始めてから 120 s の間で初期位置から上昇した高さを粉体上昇高さとした。ただし、粉体がパイプの最上部まで到達した場合はその時点で振動を止め、粉体上昇高さを 925 mm とした。これは用いたパイプの長さから、粉体層へのパイプの挿入深さを差し引いた値である。また、300 s の長時間での試験も実施しており、その際にはパイプ周囲に設置したスケールを使用して、30 s ごとに粉体上昇高さを目視計測した。

粉体層に外部から圧力を加える手段として、Fig. 3 に示すように、重さが約 3380 g、外径が 185 mm、パイプを通す内径が 40 mm、高さが 18 mm の鉄製の重りを用意し、粉体層の上部に設置した。重りの外形および内径は、それぞれ容器内径とパイプ外形に接触しない範囲で設定可能な最大径・最小径である。この半分の高さの重りも別途用意し、それらの設置数を調整することで粉体層への加圧量を調整した。重りを使用しない場合も含めて 7 段階の粉体層への加圧量条件下において実験を行った。実験条件として、振動周波数 (15~30 Hz) と粉体層への加圧量 (0~9.9 kPa) を変化させて試験を実施した。すべての実験は、大気圧下、温度約 22°C の環境下で行った。実験は各条件において 3 回繰り返して実施し、粉体上昇高さはその平均値を算出した。

3. シミュレーション方法

数値シミュレーションには、個別要素法を用いた EDEM ソフトウェア (Altair Engineering Inc.) を使用した。個別要素法は個々の粒子について運動方程式を解く手法である [16]。粒子 i に対して、以下の Eqs. (1), (2) の運動方程式が成立する。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^n (\mathbf{F}_{nij} + \mathbf{F}_{rij}) + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^n (\mathbf{M}_{ij} + \mathbf{M}_{rij}) \quad (2)$$

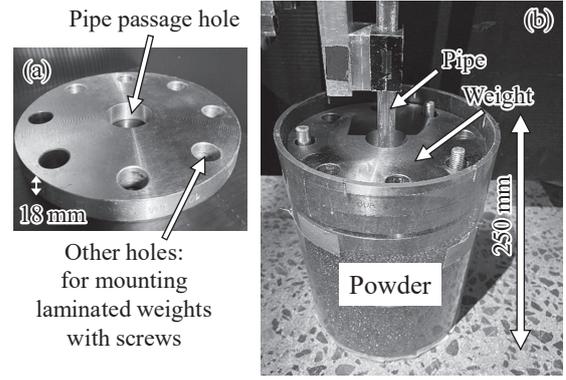


Fig. 3 (a) Steel weight and (b) its placement on top of the powder bed in the container

m_i は粒子の質量、 I_i は慣性モーメント、 v_i は粒子の速度、 ω_i は角速度、 n は粒子 i と接触している粒子数、 \mathbf{g} は重力加速度である。それぞれの粒子に対して、Eqs. (1), (2) を数値積分することにより、各粒子の挙動を追跡することができる。 \mathbf{F}_{nij} は粒子 i と粒子 j 間に働く法線方向の接触力、 \mathbf{F}_{rij} は接線方向の接触力であり、それぞれ Eqs. (3), (4) のように表される。

$$\mathbf{F}_{nij} = -k_{nij} \delta_{nij} \mathbf{n}_{ij} - C_{nij} \mathbf{v}_{nij} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{rij} = -\min(\mu |\mathbf{F}_{nij}| t_{ij}, k_{rij} \delta_{rij} t_{ij} + C_{rij} \mathbf{v}_{rij}) \quad (4)$$

k_{nij} と k_{rij} は法線・接線方向のばね定数、 C_{nij} と C_{rij} は法線・接線方向の減衰定数、 δ_{nij} と δ_{rij} は粒子 i と粒子 j の間の法線・接線方向の重なり量、 \mathbf{n}_{ij} は粒子 i から粒子 j への法線単位ベクトル、 \mathbf{t}_{ij} は \mathbf{n}_{ij} への接線単位ベクトル、 \mathbf{v}_{nij} は粒子 i と粒子 j の法線方向の相対速度、 \mathbf{v}_{rij} は接線方向の相対速度、 μ は摩擦係数である。ばね定数と減衰定数はそれぞれ以下の Eqs. (5)~(8) で表される。

$$k_{nij} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}} \delta_{nij} \left(\frac{1 - v_i^2}{E_i} + \frac{1 - v_j^2}{E_j} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$C_{nij} = -\frac{\ln(\varepsilon)}{\sqrt{\ln^2(\varepsilon) + \pi^2}} \sqrt{5 k_{nij} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} \quad (6)$$

$$k_{rij} = 8 \sqrt{\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}} \delta_{rij} \left(\frac{2 - v_i^2}{G_i} + \frac{2 - v_j^2}{G_j} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$C_{rij} = -\frac{\ln(\varepsilon)}{\sqrt{\ln^2(\varepsilon) + \pi^2}} \sqrt{\frac{10}{3} k_{rij} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} \quad (8)$$

r は粒径、 ν はポアソン比、 E はヤング率、 G は弾性率、 ε は反発係数である。Eq. (2) の \mathbf{M}_{ij} は粒子に加わるトルク、 \mathbf{M}_{rij} は粒子の転がり摩擦であり、以下の Eqs. (9), (10) で表される [17]。

$$\mathbf{M}_{ij} = r_i \mathbf{n}_{ij} \times \mathbf{F}_{rij} \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_{rij} = -\mu_r k_{rij} \delta_{rij}^{\frac{3}{2}} \frac{r_i r_j}{r_i + r_j} \frac{\omega_{ij}}{|\omega_{ij}|} \quad (10)$$

ω_{ij} は粒子 i と粒子 j の相対角速度であり、 μ_r は転がり摩擦係数である。なお、粒子とパイプあるいは容器との接触

Table 1 Simulation parameters

Simulation parameter	Particles	Acrylic
Density [kg/m ³]	2500	1200
Poisson's ratio	0.23	0.35
Young's modulus [MPa]	320	3200
Coefficient of restitution for contact with particle	0.7	0.1
Coefficient of friction for contact with particle	0.3	0.7
Rolling friction coefficient for contact with particle	0.01	0.01

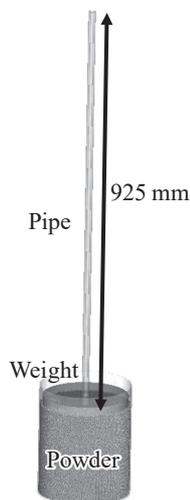


Fig. 4 DEM simulation model

は、計算上、一方の粒子半径を無限大として計算した。

本シミュレーションで設定したパラメータを **Table 1** に示す。基本的に粒子はガラス、容器とパイプはアクリルの物性値を設定したが、計算コストの都合上で粒子のヤング率を小さく設定した。予備調査の結果、ヤング率を低く設定した状態で、振動条件を変化させて計算した際の粉体上昇高さが、同様の振動条件で実施した実験結果とおおむね一致することを確認している。使用した粒子は球形で、直径は 3 mm である。これは、実験に用いた粒子の平均粒径と一致している。そのほかの各寸法についても、実験と同様になるように設定した (**Fig. 4**)。また、計算を行う際のタイムステップは 4.5 μs とし、シミュレーション時間を 20 s とした。

4. 結果と考察

4.1 粉体層加圧時における搬送特性

Fig. 5 に各加圧条件下で実験を行った際の粉体上昇高さの時間変化を示す。Fig. 5 (a) は動画解析による 0.1 s ごとの粉体上昇高さの変化を示しており、Fig. 5 (b) は同一条件で実施した長時間試験における 30 s ごとの計測結果を示している。測定方法や実験データは異なるものの、時間変化と加圧の影響の傾向は一致しており、再現性のよい結果が得られていることが確認できる。また、**Fig. 6** に実験と同じ振動条件を設定して計算を実施した際のシミュレーション結果を示す。粉体層への加圧量が 0 MPa の条件は、重りは設置せずに粒子の自重のみが生じている状態である。Fig. 5 (a) の結果から、どの加圧条件下でも、

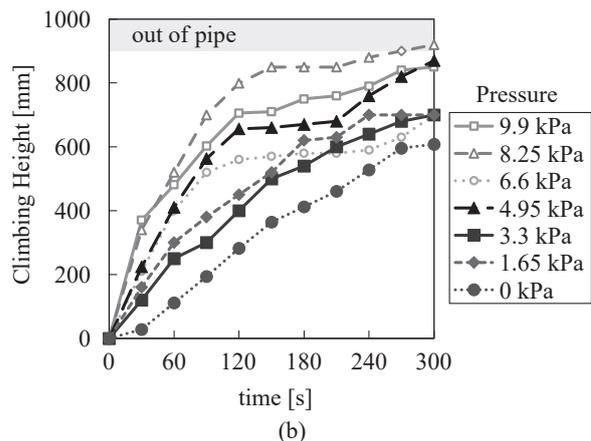
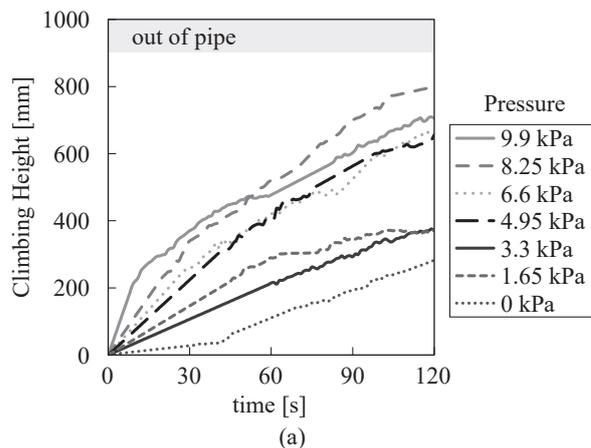


Fig. 5 Temporal variations of climbing heights under different pressure conditions, with vibration applied for (a) 120 s and (b) 300 s (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)

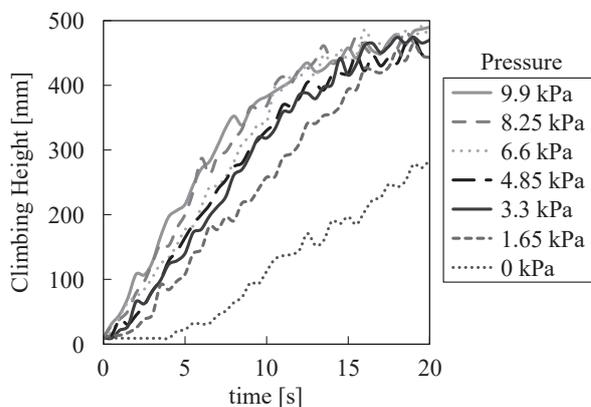


Fig. 6 Temporal variations of calculated climbing heights under different pressure conditions (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)

振動開始から 120 s の間では粉体上昇高さが時間に対して一様に増加していることがわかる。しかし、Fig. 5 (b) に示すように、振動開始から 120 s 経過した後はその速度が低下していき、ある時点で高さがほとんど変化しなくなることを確認できる。粉体上昇高さが大きくなるにつれて上昇速度が低下するのは先行研究でも確認されており[13]、パイプ内の粒子の量が増加するにつれて、そ

れらに作用する重力の影響は大きくなる一方、容器内に設置された粒子の量は減少し、パイプ外の粒子がパイプ内の粒子を持ち上げるように働く圧力は低下する。この影響が実験時間の経過とともに顕著となり、最終的には平衡状態に達したものと考えられる。

Fig. 5の結果から、粉体層への加圧量が大きくなるほど、上昇速度が増加することがわかる。その一方、粉体圧が大きくなりすぎると、上昇速度の増加率が小さくなっていくことも確認できる。上昇速度が大きい場合、パイプ内の粒子量増加と容器内の残存粒子量減少の変化も大きくなるため、加圧量が大きい条件では平衡状態に達する時間が短くなっていることが確認できる。加圧を行わない条件では、300 sの時点でも平衡状態に達していないが、より長時間の試験を実施した場合には最終的に平衡状態に達すると考えられる。また、加圧を行わない条件では、振動開始直後に粉体上昇高さがただちに増加せず、一定時間経過後に明確な上昇が始まることを確認できる。これは振動開始直後はパイプが十分に加速していないため、パイプ内に初期配置した粒子が降下してしまい、その高さ分だけ戻するのに時間を要したためである。一方、加圧条件下では、外部からパイプ内の粒子へ作用する圧力が增加することで、初期段階での粒子降下が抑制されたと考えられる。これらの傾向はFig. 6に示すようにシミュレーションでも確認できた。計算時間の都合上、実験と同様の搬送時間を再現することはできないものの、加圧量が大きくなるほど上昇速度が速くなることだけでなく、ある程度上昇するとその速度が低下することなども確認でき、実験結果と定性的に同様の傾向を確認することができた。

4.2 粉体層加圧によるパイプ内への粒子流入の変化

DEMシミュレーションを用いて、粉体毛細管現象が生じた際の粉体運動特性について、より詳細な考察を行った。Fig. 7にパイプ最下層断面での粒子の流出量の時間変化を示す。これらのデータは、パイプ内の粒子数を振動周期の1/8ごとに算出し、直前の測定点との比較により、1/8周期の間にパイプ内へ流入した粒子数をプロットしたものである。ここでは、重りによる加圧量が3.3 kPaの条件下で、振動開始から1.5~1.6 sの間の結果を示しており、パイプの振動位置も同時に示している。また、振動開始から1.5~1.55 s後までの1サイクルにおける各粒子の速度方向ベクトルの時間変化をFig. 8(a)~(d)に示す。見やすさのために、大きさが0.1 m/s以上の速度ベクトルのみを表示している。矢印の大きさは速度の大きさに対応している。Fig. 7の結果から、パイプの上昇とともに粉体の流入量が増加するのではなく、パイプが下降し始めてから下がりきるまでの間で、パイプ内へと粒子が流入していることがわかる。一方、パイプ内の粒子の速度ベクトルについては、パイプの下降過程では全体的に速度が下向きとなり(Fig. 8(a), (b))、パイプの上昇過程では上向きになっているため(Fig. 8(c), (d))、パイプが上昇している時に粒子が上昇しているように見受けられる。これは粒子の速度ベクトルを実験室座標系

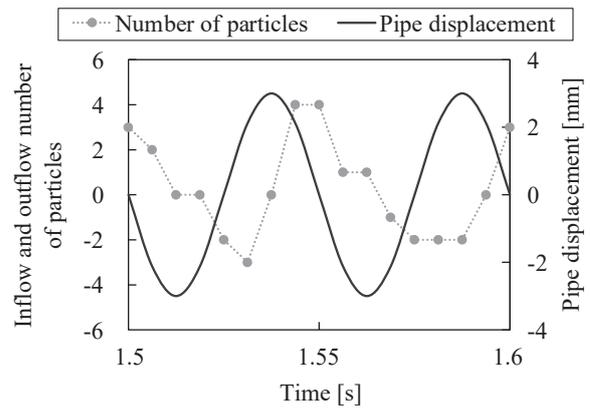


Fig. 7 Temporal variation of calculated particle inflow and outflow at the bottom cross-section of the pipe during 1.5–1.6 s after vibration onset (powder pressure: 3.3 kPa; vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)

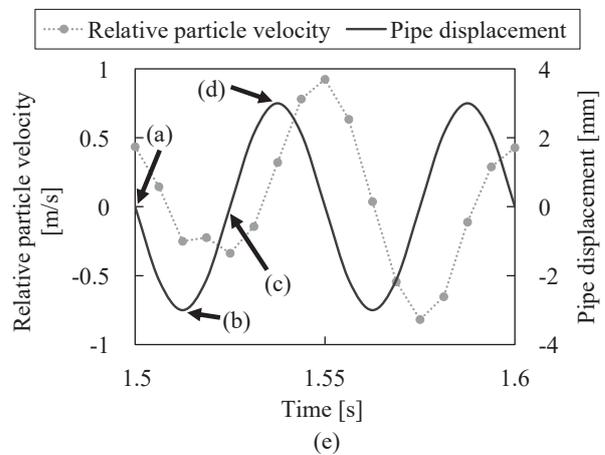
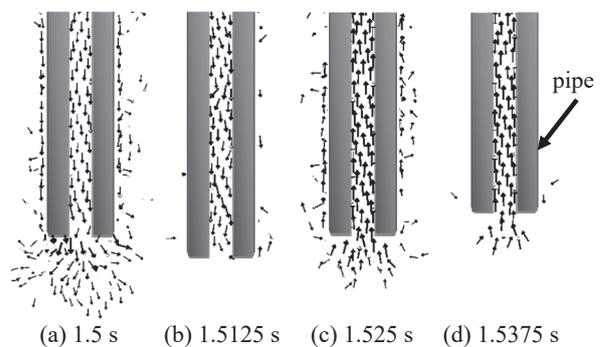


Fig. 8 (a–d) Calculated particle velocity vectors in one vibration cycle; (e) relative vertical velocities of particles in the pipe with respect to the pipe during 1.5–1.6 s after vibration onset (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz; pressure: 3.3 kPa)

において示しているためである。パイプ運動に対するパイプ内粒子の相対速度を計算し、その重力方向の平均値の時間変化をFig. 8(e)に示す。相対速度で見ると、パイプ内の粒子はパイプが下降している間に上向きの速度を持つことがわかり、流出量の結果とも一致することがわかる。これらの結果から、Fig. 1に示すように、パイプが粉体層に押しつけられる際に、パイプ入口付近の粒

子が拘束の少ないパイプ内へと流入していることがわかる。一方、パイプが上昇する時には、摩擦力によって持ち上げられる効果でパイプ内の粒子は上方向へ移動しているものの、重力の影響やパイプ壁面でのすべり、さらには粒子間での摩擦による相互保持が十分でないことなどにより、パイプ運動と比較すると相対的に下方へ移動しており、その結果、パイプから粒子が流出していると考えられる。

このような振動サイクルにおけるパイプ内への粉体の流出量の積算が粉体毛細管現象を決定づけている。振動開始から 1.5~2.0 s の間における、パイプ内への粒子流出量の積算値の計算結果を Fig. 9 に示す。Fig. 7, 9 に示すように、粉体層への加圧量が 3.3 kPa の時、パイプ上昇時の粒子流出量よりも、下降時の流入量の方が多く、それらの積算としてパイプ内の粒子数が増加した。また、粉体層への加圧量が大きくなるほどパイプ内への粒子流入量が増加していることが確認できる。さらに、Fig. 9 には、振動開始から時間がさらに経過した状態 (9.5~10 s, 19.5~20 s) での計算結果も示している。振動開始後 1.5~2.0 s の時点では粒子がよく上昇していたが、時間の経過に伴いパイプへの粒子流入量が減少する傾向が確認できる。特に、19.5~20 s の時点では、加圧していない条件を除き、粒子の流出量が著しく低下しており、各加圧条件下での最大上昇高さ付近に到達し、最終的な平衡状態に近づいたものと考えられる。これは先に述べたように、パイプ内の粒子が増加するにつれて、それらに作用する重力の影響は大きくなる一方、容器内に設置した粒子の量が減少し、パイプ外の粒子がパイプ内の粒子を持ち上げるように働く圧力が低下したためである。なお、粉体層を加圧していない条件下では、19.5~20 s の時点でも一定量の粒子流入が生じている。これは Fig. 5, 6 に示すように粉体の上昇速度が低く、平衡状態に達するまでに時間を要するためである。

粉体層の加圧条件がパイプ内への粒子流入に与える影響を調べるため、パイプに流入する前の粒子の状態についても解析を行った。Fig. 10 に、振動前および振動中における、パイプ直下の円柱領域内 (直径 20 mm, 高さ 10 mm) に存在する粒子の充填率を示す。振動中のデータは、パイプが振動中心から 1/8 周期分だけ上昇した時点のデータを 10 周期分抽出し、その平均値を算出したものである。これは、Fig. 1 に示すプロセスで、パイプ内の粒子が持ち上げられ、その直下に新しい粒子が流れ込む時点に相当する。この領域内に位置する粒子は、近接するパイプの内部への流入に寄与しているものと考えられる。Fig. 10 より、振動前の状態では、加圧量が大きい方が充填率はやや高くなるものの、顕著な差は見られなかった。一方、振動中は粒子が流動するため、振動前の状態よりも充填率は低下するが、加圧量が大きいほど充填率が高くなる傾向が確認できる。これは、重りによって粒子の移動可能な領域が制限される効果に加えて、加圧量の増加に伴いパイプ直下の粒子がより強く圧縮されるためである。

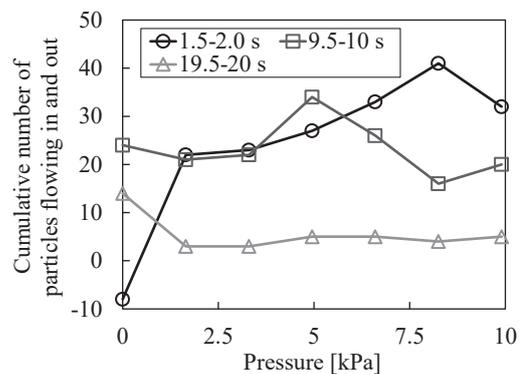
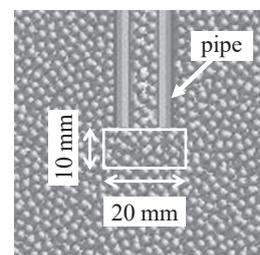


Fig. 9 Calculated cumulative particle flows at the bottom cross-section of the pipe during 1.5~2.0, 9.5~10, and 19.5~20 s after vibration onset under different powder pressures (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)



(a)

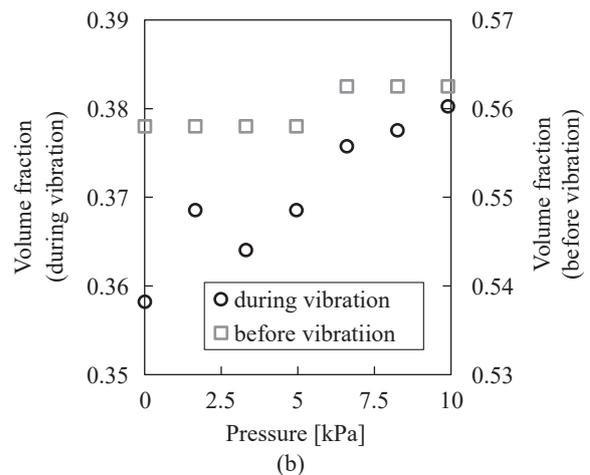


Fig. 10 (a) Cylindrical region beneath the pipe used for calculating volume fractions. (b) Volume fractions of particles within the region under different powder pressures (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)

さらに、粉体層への加圧はパイプ直下の領域への粒子供給にも寄与していると考えられる。Fig. 11 に、加圧条件を変化させた際のパイプ直下の円柱領域周辺における粒子の速度ベクトルを示す。これらはパイプが振動中心にて下降した時点 (振動開始から 1.5 s 後) の結果を示しており、見やすさのために速度の大きさが 0.1 m/s 以上のベクトルのみを表示している。また、Fig. 12 に、パイプ入口付近における各粒子の速度の大きさと、パイプ直下の円柱領域内の粒子の平均速度を示す。Fig. 12 のデータは、パイプが振動中心から 1/8 周期分だけ上昇した時点の

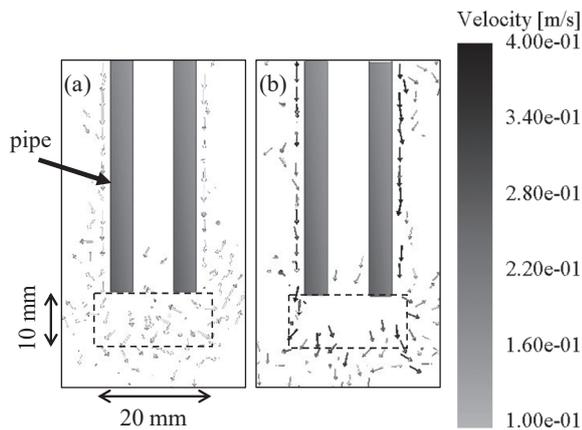


Fig. 11 Calculated particle velocity vectors near the cylindrical region below the pipe at 1.5 s after vibration onset under powder pressures of (a) 0 kPa and (b) 9.9 kPa (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)

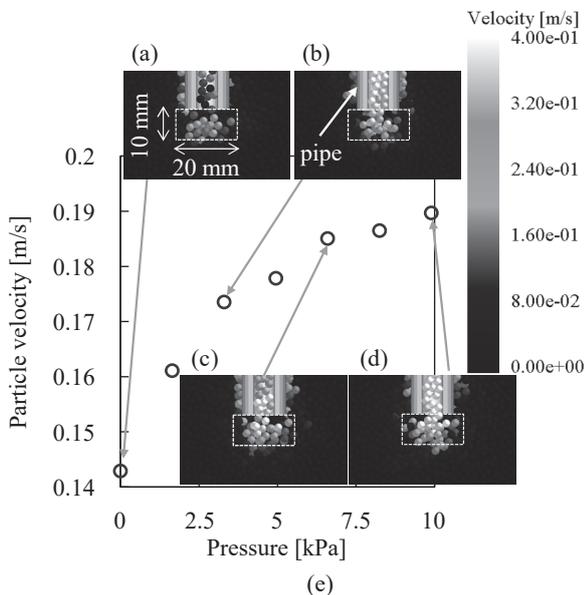


Fig. 12 Particle velocity distributions at 1.53125 s after vibration onset under different powder pressures: (a) 0 kPa, (b) 3.3 kPa, (c) 6.6 kPa, and (d) 9.9 kPa (vibration amplitude: 3 mm, frequency: 20 Hz). (e) Averaged velocities of particles in the region beneath the pipe

データを10周期分抽出し、その平均を算出したものである。Fig. 11より、パイプ直下の円柱領域には、おもに上部から粒子が流入していることがわかる。これはFig. 8(a)に示すように、パイプが下降する際に、パイプ外側面付近に位置する粒子がその動きに引きずられるように下降し、円柱領域へ搬送されるためである。パイプ近傍の粒子の移動量が大きくなるのは、先行研究の結果とも一致する[13,18]。さらに、粉体層の加圧の有無を比較すると、加圧ありの条件では円柱領域への粒子流入速度が増加していることがわかる。これは、粉体層上層からの加圧により、パイプ下降時にその側面付近を通過して入口に向かう粒子の移動が促進されたためと考えられる。Fig. 12は、Fig. 11の状態に続くパイプ上昇時の結果を示してお

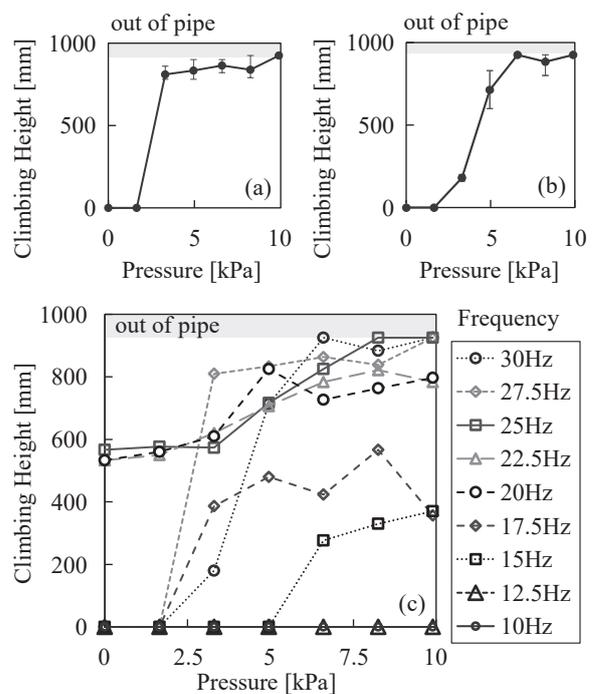


Fig. 13 Climbing heights of particles under different powder pressures at vibration frequencies of (a) 27.5 Hz and (b) 30 Hz. (c) Averaged particle climbing heights under varied vibration frequency. (measured time: at 300 s after vibration onset; vibration amplitude: 3 mm)

り、加圧ありの条件下では、振動サイクルの中でパイプ内部方向へ向かう粒子やパイプ内で上昇する粒子についても、運動量が増加し、粒子流入が促進されていることが確認できる。

このように、粉体毛細管現象を生じさせるための前段階であるパイプ入口付近への粒子供給に対して、粉体層への加圧量が大きく寄与していることがわかる。加圧量が大きくなるほど、パイプ入口付近領域への粒子供給量が増加し、同領域での充填率および圧力も高くなる。この圧力の逃げ場はパイプ内となるため、粒子はその方向へ流れ込む。そのため、Fig. 12に示すように、パイプから離れた領域では重りによって拘束された粒子はほとんど動けないものの、パイプ直下の領域では粒子がパイプ内へと逃げるように動き、その運動量が大きくなっていることがわかる。

4.3 粉体層加圧が粉体上昇高さにおよぼす影響

Fig. 13 (a), (b)に振動周波数を27.5 Hzと30 Hzに設定して、粉体層加圧量を変化させて実験を行った際の、300 s時点における粉体上昇高さを示す。また、Fig. 13 (c)に振動周波数と加圧量を変化させた際の粉体上昇高さを示す。Fig. 13 (a), (b)にはエラーバーも表示しており、いずれの条件下においても再現性の高いデータが得られたことが確認できる。一方、Fig. 13 (c)では、見やすさを優先してエラーバー省略し、平均値のデータのみ記載した。これらの結果から、加圧条件が0 kPaの時には、20~25 Hzの範囲でのみ粉体が上昇することがわかる。これは先行研究の結果とも一致する[13]。粒径が200 μm 程度の粒子が

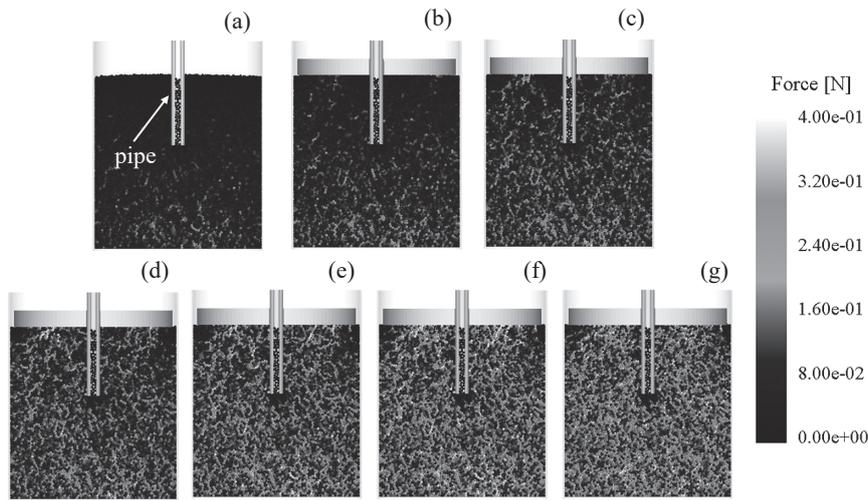


Fig. 14 Distributions of forces applied to particles before vibration onset under different powder pressures: (a) 0 kPa, (b) 1.65 kPa, (c) 3.3 kPa, (d) 4.95 kPa, (e) 6.6 kPa, (f) 8.25 kPa, and (g) 9.9 kPa

先行研究でよく使用されており、そのようなハンドリングがしやすい粒径の場合には、基本的には周波数が高くなるほど粉体上昇高さも高くなる。これはパイプの最大加速度が大きくなることで粒子が持ち上げられる力が大きくなるためである[12]。同様に、1 mm 以上の大粒径粒子の場合でも、振動周波数が小さいとパイプの最大加速度も小さくなり、粒子を持ち上げる方向の力が十分でないため上昇しなかったと考えられる。一方、大粒径粒子の場合で振動周波数が過大になると、慣性の効果などが大きくなることで振動の動きに追従してパイプ内へと移動する十分な時間が得られなくなることや、パイプ内部に存在する粒子数が少なくなり、高周波振動下では粒子間の力鎖が切れてしまうことでお互いを保持できなくなることによって粉体上昇高さが低下すると考えられている[13]。

一方で、粉体層を加圧した条件下では、低周波数でも高周波数の条件下でも粉体上昇高さが上昇していることが確認できる。低周波数の条件下で、加圧なしでは粉体上昇せず、加圧ありでは粒子が上昇したのは、加圧によって外部からパイプ内の粒子への上向き圧力が増加したためだと考えられる。また、高周波数条件下で、加圧ありの場合に粒子が上昇したのは、4.2章でも述べたように粉体層の加圧がパイプ内への粒子流入を促す効果が働いたためと考えられる。この結果から、1 mm 以上の大粒径粒子を使用して、粉体層への加圧を行わない場合に、高周波条件下で粉体毛細管現象が生じなかった理由として、パイプ内へと粒子が流入する十分な時間がなかったことが大きな要因と考えられる。Fig. 12 に示したように、粉体層を加圧すると粒子がパイプ内へと流入しやすくなり、その結果、粉体毛細管現象が生じるようになる。この粉体流入が十分にある条件下では、小粒径粒子を使用した時と同様に、振動周波数を増加させて振動加速度が大きくなると、大粒径粒子の粉体上昇高さも増加した (Fig. 13)。

また、粉体層への加圧が大きくなりすぎると、粉体上昇高さの上昇率が小さくなっていくことも確認できる。

たとえば、20 Hz の振動周波数条件下では、6.6 kPa よりも加圧量が大きくなると粉体上昇高さに顕著な差が生じなくなる。これは、加圧量が大きすぎると、パイプ開口部という粉体圧力の抜け道が小さすぎることによってジャミングを起こし、パイプ内への流入増加にそれ以上寄与しなくなったためと考えられる。

粉体層を加圧した際に、パイプ内への粒子流入におよぼす影響に加えて、パイプ入り口付近の粉体圧が増加して、パイプ内の粉体全体を持ち上げる力が増加する効果も考えられるため、加圧条件が粉体に加わる外力におよぼす影響も解析を行った。加圧条件を変化させた際の、パイプ振動前の状態における各粒子にかかる法線方向の外力和を計算した結果を Fig. 14 に示す。4.2章でも述べたように、Fig. 14 の結果から、粉体層への加圧がパイプ入り口付近の粒子に加わる外力の増加に寄与していることが確認できる。

さらに、粒子を深さごとに十層のグループに分け、そのグループの中央断面に存在する粒子にかかる力の総和を算出し、それを粉体層の断面積で除すことで導出した深さ方向に対する圧力の変化を Fig. 15 (a) に示す。さらに、Fig. 15 (b) にパイプが振動中心にて下降した時点 (振動開始から 2 s 後)、すなわち粉体がパイプに対して相対的に上昇する瞬間の、深さ方向の粉体圧の計算結果を示す。また、粉体容器内で粒子にかかる静置時の粉体圧については Janssen の式が成り立つことが知られている [19]。今回の条件のような円筒容器内粒子の Janssen の式は Eq. (11) のように与えられる [19]。

$$P = \frac{D\gamma}{4\mu k} \left(1 - e^{-\frac{4\mu k}{D}x} \right) \quad (11)$$

P は深さ x における粉体圧、 D は円筒の直径、 γ はかさ比重、 μ は粒子と容器壁面の間の摩擦係数を表している。今回の条件では $D = 0.02$ m、 $\gamma = 1494$ kg/m³、 $\mu = 0.7$ とした。かさ比重は、シミュレーションでの粉体初期設置時における値を使用した。また、 k は Rankine の理論に基

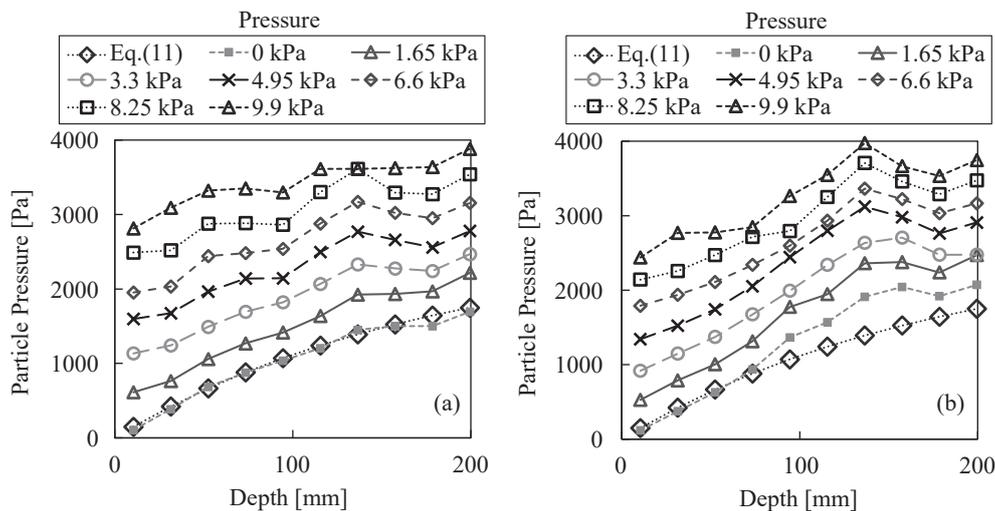


Fig. 15 Particle pressure as a function of depth from the top surface of the powder bed under different powder pressures: (a) before pipe vibration and (b) during downward motion of the pipe (vibration amplitude: 3 mm; frequency: 20 Hz)

づく主働土圧係数を表し、粒子の内部摩擦角 ϕ を用いて Eq. (12) のように与えられる[19,20]。

$$k = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \quad (12)$$

今回は粒径が大きい粒子を用いているので充填密度が小さく、 $\phi = 25^\circ$ として計算を行った。この Janssen の式から導出された粉体圧の理論値も Fig. 15 に示す。この結果より、加圧なしの条件下でのシミュレーション結果と理論値がよく一致していることがわかり、深くなるほど粉体圧が大きくなるが、その上昇率は小さくなることが確認できる。この結果からもシミュレーションは粉体圧の影響をよく再現できていることがわかる。

粉体層へ加圧をしていくと、深さ方向の圧力分布が加圧量に応じて増加していることがわかる (Fig. 15 (a))。深さが 200 mm 付近の位置で低下しているように見えるものがあるのは、粉体容器の底面の影響である。これらの結果から、粉体層の加圧により、パイプ入口付近の粉体圧が増加しており、それはパイプ内の粉体を持ち上げて、落下しないよう支えることで、粉体上昇高さの増加に寄与していると考えられる。ただし、粉体圧が加圧条件に応じて一様に増加しているのに対し、加圧による粉体上昇高さの増加への効果には限界がある (Fig. 13)。これは、先に述べたようにジャミングの効果だと考えられ、与えられた圧力がパイプ内の粒子を持ち上げる方向にすべては転換できていないためだと考えられる。また、粉体上昇高さが増加することで、それらに働く重力やパイプ内壁面との摩擦力も増加すると考えられる。これらは粉体層全体に働く外力バランスの変化に影響をおよぼすと考えられるが、詳細な解析は今後の課題である。

さらに、Fig. 15 (b) に示すように、パイプが下降している際は、加圧なしの条件下で、パイプ挿入深さよりも深い位置において、Janssen の式による理論値から粉体圧が増加していることが確認できる。これはパイプ押し込み

による粉体層への加圧の効果である。重りによって加圧した条件下でも、パイプの押し込みによる粉体層の圧力増加が確認できる。また、重りによる圧力増加と比較すると、パイプ押し込みによる圧力増加の効果は小さいことがわかる。そのため、重りによる圧力を与えることで、パイプを振動させなくても粉体上昇する可能性も考えられたが、振動なしでは粉体上昇高さは変化しなかった。振動サイクルの中での、パイプによる圧力の変動が粉体毛細管現象の発生に大きく寄与しており、重りによる加圧は補助的な役割であるといえる。

以上より粉体層への加圧が大きくなると、搬送速度に加えて粉体上昇高さも大きくなり、垂直振動粉体ポンプシステムの搬送性能が向上することが確認できた。加圧による搬送性能向上の効果は、パイプ内への粉体流入の促進と粉体を持ち上げる力が増加することによるものであると考えられる。ただし、加圧は粉体層のジャミングも生じさせるため、その効果も搬送性能に大きな影響をおよぼす。

5. 結 言

本研究では、垂直振動粉体ポンプシステムにおいて粉体層への加圧が搬送性能に与える影響を実験および数値解析により評価した。実験結果から、加圧によって粒子の搬送速度および粉体上昇高さが向上することが確認された。さらに、DEM シミュレーションにより、粉体層への加圧がパイプ直下の領域への粒子流入・充填率を高め、パイプ内への流入を促進することが明らかとなった。また、加圧によってパイプ入口付近の粉体圧が増加し、粒子を持ち上げる力が強化されることも確認された。一方で、過度な加圧はジャミングを引き起こし、それは搬送性能の向上を制限することも示された。

今後の調査では、本研究で示された加圧条件が振動サイクル中における粉体層の外力バランスにおよぼす影響を、

より詳細に解析する必要がある。特に、垂直振動粉体ポンプシステムの有力な応用先である月面などの低重力環境下では、これらの挙動が地上条件とは異なる可能性がある。粉体毛細管現象に関するメカニズムを詳細に理解することで、新しい粉体搬送技術の設計における重要な

指針を構築できると考えられる。

[謝辞] 本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP24KK0096), MEXT 卓越研究員事業研究環境整備費 (JPMXS0320200063) の助成により実施した。ここに記して謝意を示す。

Nomenclature

m_i : mass of particle i	[kg]	v_{ij} : tangential relative velocity from particle j to particle i	[m/s]
v_i : velocity of particle i	[m/s]		
I_i : moment of inertia of particle i	[kg·m ²]	μ : friction coefficient	[-]
ω_i : angular velocity of particle i	[rad/s]	r : particle radius	[m]
n : number of contacts of particle i	[-]	ν : Poisson's ratio	[-]
g : gravitational acceleration	[m/s ²]	E : Young's modulus	[Pa]
F_{nij} : normal contact force from particle j to particle i	[N]	G : elastic modulus	[Pa]
F_{tij} : tangential contact force from particle j to particle i	[N]	ε : coefficient of restitution	[-]
k_{nij} : normal spring constant between particle i and particle j	[N/m]	M_{ij} : torque from particle j to particle i	[N·m]
		M_{rij} : rolling friction torque from particle j to particle i	[N·m]
k_{tij} : tangential spring constant between particle i and particle j	[N/m]	ω_{ij} : relative angular velocity from particle j to particle i	[rad/s]
C_{nij} : normal damping coefficient between particle i and particle j	[N·s/m]	μ_r : rolling friction coefficient	[-]
C_{tij} : tangential damping coefficient between particle i and particle j	[N·s/m]	P : granular pressure	[Pa]
δ_{nij} : normal overlap between particle i and particle j	[m]	D : diameter of the cylinder containing the granular layer	[m]
δ_{tij} : tangential overlap between particle i and particle j	[m]	γ : bulk density of the granular layer	[kg/m ³]
n_{ij} : normal unit vector from particle j to particle i	[-]	k : active earth pressure coefficient	[-]
t_{ij} : tangential unit vector to n_{ij}	[-]	x : depth from the top surface of the granular layer	[m]
v_{nij} : normal relative velocity from particle j to particle i	[m/s]	φ : internal friction angle of particles	[rad]

References

- [1] P. Sonar, H. Katsuragi, Fracturing-induced fluidization of vibrated fine-powder column, *Powder Technol.* 421 (2023) 118405.
- [2] Q. Wang, J. Gu, Y. Pang, Y. Zuo, G. Mo, X. Zhang, Water extraction and collection from icy lunar regolith by microwave heating, *Acta Astronaut.* (2025) S0094576525002516.
- [3] B. A. Lomax, Á. Selmeçi, A. Rützler, T. Schild, M. D. Symes, E. Bonsall, C. Schröder, M. Conti, R. Lindner, J. D. Carpenter, Identifying an efficient endpoint for oxygen extraction from lunar regolith simulant pellets using molten salt electrolysis, *Acta Astronaut.* (2025) S0094576525002504.
- [4] G. B. Sanders, W. E. Larson, Integration of in-situ resource utilization into lunar/Mars exploration through field analogs, *Adv. Space Res.* 47 (2011) 20–29.
- [5] G. B. Sanders, W. E. Larson, Progress made in lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program, *J. Aerosp. Eng.* 26 (2013) 5–17.
- [6] W. Zhang, S. Jiang, J. Ji, D. Tang, A drilling tool design and in situ identification of planetary regolith mechanical parameters, *Adv. Space Res.* 61 (2018) 2444–2456.
- [7] T. Zhang, B. Wang, H. Wei, Y. Zhang, C. Chao, K. Xu, X. Ding, X. Hou, Z. Zhao, Review on planetary regolith-sampling technology, *Prog. Aerosp. Sci.* 127 (2021) 100760.
- [8] G. E. Klinzing, Historical review of pneumatic conveying, *KONA Powder Part. J.* 35 (2018) 150–159.
- [9] M. C. Jena, S. K. Mishra, H. S. Moharana, Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis, *Environ. Prog. Sustain. Energy* 42 (2023) e14031.
- [10] C. Liu, P. Wu, L. Wang, Particle climbing along a vibrating tube: A vibrating tube that acts as a pump for lifting granular materials from a silo, *Soft Matter* 9 (2013) 4762–4766.
- [11] F. Zhang, K. Cronin, Y. Lin, C. Liu, L. Wang, Effects of vibration parameters and pipe insertion depth on the motion of particles induced by vertical vibration, *Powder Technol.* 333 (2018) 421–428.
- [12] M. Adachi, K. Shirode, S. Yamato, K. Tanaka, H. Kanamori, Granular vibration pumping system for handling and characterizing particulate materials, *Rev. Sci. Instrum.* 95 (2024).
- [13] M. Adachi, K. Shirode, N. Hatano, K. Tanaka, H. Kanamori, Climbing characteristics of millimeter particles in granular vibration pumping system, *Powder Technol.* 447 (2024) 120200.
- [14] C. Liu, F. Zhang, P. Wu, L. Wang, Effect of hoisting tube shape on particle climbing, *Powder Technol.* 259 (2014) 137–143.
- [15] H. Kawamoto, K. Kubo, R. Kikumiya, M. Adachi, Vertical transportation of lunar regolith and ice particles using vibrating tube, *J. Aerosp. Eng.* 34 (2021) 04021097.

- [16] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29 (1979) 47–65.
- [17] H. Sakaguchi, E. Ozaki, T. Igarashi, Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo, *Int. J. Mod. Phys. B* 07 (1993) 1949–1963.
- [18] F. Fan, E. J. R. Parteli, T. Pöschel, Origin of granular capillarity revealed by particle-based simulations, *Phys. Rev. Lett.* 118 (2017) 218001.
- [19] R. Aoki, H. Tsunakawa, Pressure measurement of powder layer in hopper, *J. Res. Assoc. Powder Technol. Jpn.* 2 (1965) 189–194.
- [20] Funtaiougaku No Kiso Henshu Iinkai, Funtaiougaku no Kiso, Nikkan Kogyo (1992).