

固気系流動層と濃厚粒子噴出装置を用いて温浴効果と刺激効果を 高めた健康機器開発のための流動特性に関する基礎的検討

幡野博之

Fundamental study on flow characteristics of gas-solid fluidized bed with
dense particle ejector to develop new sand bath to enhance warming and
stimulation effects to improve human health

Hiroyuki HATANO

Abstract

In recent years, life expectancy and healthy life expectancy have been steadily increasing in Japan. However, the healthy life expectancy is about 10 years shorter than the life expectancy. In addition to this, the birth rate is significantly lower than 2.0, which has led to various problems such as a decline in society's activities, an increase in the number of people requiring nursing care, as well as an aging society with fewer children. Therefore, it is desirable to take measures for elderly people to live longer healthy and comfortable life. In order to achieve this, the basics of the particle system, which has a high warm bath effect in sand baths, is aimed at developing a health system that can improve the quality of life (QOL) of the elderly. As a result of examining systems such as a solid-gas fluidized bed and a particle jet from a nozzle that ejects particles with a high-speed air stream, it is clear that a concentrated particle jet tank with a high particle concentration has a high stimulation effect and a warm bath effect, and has a good controllability as well. Then, the possibility was clarified that the combination of the concentrated particle jet tank with the solid-gas fluidized bed bathtub is effective as a system.

1. 研究の背景と目的

21世紀に入り我が国では少子高齢化社会への移行がますます加速されている。このような状況はいびつな人口構成をもたらし、社会の活性低下など様々な問題を引き起こすと言われている。この対策の一つとして、高齢者が長期に渡って健康で快適に暮らすことが望ましいと考えられている。これを実現するための直接的な方法として、医療技術や薬品などと共に、様々な健康食品・サプリメント、あるいは健康維持に関わるシステムの開発などが挙げられる。しかし、これらの効果についての定量的な知見は少ない。そこで、高齢者の生活の質(QOL)を向上させ、社会の活性を維持していく上で必要な健康保持・増進を可能とする健康システムを開発するためには、効果について定量的な調査を行う必要がある。

様々な健康システムの中で、温泉療法は古くから知られており温浴効果や癒やし効果や、打たせ湯などによるマッサージ効果などが効能としてあげられており、心身の健康維持に良い影響を及ぼすと考えられている。この要因として温熱性の末梢血管拡張と心拍出量増加により静脈血ガスの浄化(酸素分圧上昇と二酸化炭素分圧の低下)をもたらすことや、組織の好氣的代謝と老廃物排出を促進する

ことなどが要因と述べている[1]。これらの効果以外にも浮力によるリラククス効果、皮膚の汚れを取る効果などもプラスの要因として考えられている。

温浴効果をもたらす温泉は液系システムといえるが、指宿の砂蒸し風呂に代表される砂や礫を使うことでも温浴効果が得られ、これらは固気系システムといえる。砂蒸し風呂はリウマチや腰痛にも効能が高いとされ、心拍や心拍出量は増加するが血圧上昇は軽く、静脈血中の酸素分圧の顕著な上昇と二酸化炭素分圧の低下と、乳酸、ピルビン酸の顕著な低下も認められている[2]。これは、温泉と同様、温熱性の末梢血管拡張に加え、砂重による静脈還流増加による心拍出量増加が、より好氣的代謝と老廃物排出を促進するためである。この他に、小石を敷き詰めたり、板状の岩を使ったりする岩盤浴などもある。

これらの固気系システムでは砂や小石の熱容量は温泉水より小さいが、比重が大きいため単位体積当たりでは大きな差は無い。また、温泉水の場合は境界層が出来ることにより、伝熱に寄与する温度差は温泉水本体と体温との差より小さくなるが、砂や小石は肌と直接接触することが出来るため、接触点を通じての伝熱速度が大きくなると考えられる。さらに、砂や石などでは低温でも遠赤外線が多く、身体の内部まで温められ易いといった効果も考えられる。

砂むし風呂の場合は身体の下部は適度な蒸気が上昇してくることで、岩盤浴の場合は岩盤や砂層を熱が伝導することから加熱効果は持続する。しかし、砂は静止していることと、下部から上がってくる蒸気による再加熱効果は身体上部への蒸気の拡散がほとんど無いために砂を再加熱することは難しい。そのため、仰臥時の身体の上部では時間経過と共に温度が低下し、体内への熱移動速度が低下する。この他、浮力によるリラククス効果や皮膚の汚れを取る効果などは無い。

固気系流動層は装置下部から吹き込まれる空気により、気泡が生成することで粒子が激しく動いている。また、層内では粒子の重力と空気の流れによる抗力が釣り合い、無重力状態となることから液体と同じ振る舞いをする。この他にも様々な特徴を有することから産業界において幅広く使われている装置である。中でも粒子が動くことによって伝熱係数が砂蒸し風呂や岩盤浴より大きくなることや、伝導加熱を併用できることから、層内の温度はほとんど均一になることは大きな特徴の一つである。この特徴が温浴効果を持続させることになり温浴装置への応用が可能では無いかというアイデアにつながっている。また、粒子が激しく動いていることからマッサージ効果も期待できることや、温泉と同様に水圧に相当する砂層の圧が身体に均等にかかるため、心拍出量増加だけでなく、浮力によるリラククス効果や洗浄効果も期待出来る。

これまで粉粒体の流動化装置を健康器具に応用した例として、横川らが提案した一連の特許に見られる入浴介護装置などへの応用研究[3-6]が挙げられる。しかし、いまだに商用化はされていないようである。

本研究ではこれら実用化の障害となりそうな要素を除くために流動層や粒子噴流の特徴を明らかにし、温浴設備として利用するためのシステムを提案している。

2. 既往の粒子式入浴システム

2.1 既往の粒子温浴システムの詳細

横川らが提案した粒子を利用した温浴システムは一連の特許により幅広い範囲がカバーされている。当初、流動層の中に車イスのまま入浴させ、粒子の衝突や摩擦効果による洗浄機能・マッサージ機能を主体とした装置の出願が行われた[3]。これは、介護の労力を軽減するために、要介護者が自ら身体を洗浄することを主目的としていた。お風呂での入浴はお湯につかることでリラクゼーション効果が高いが、身体洗浄は介護者が手作業で全て行っており、1人の入浴に複数の介護者が必要になるケースも多かった。そのため、車イスのまま入浴することが出来る装置として研究がFig.1に概略図として示す装置を使って実際に被験者に入浴して貰いインタビューにより、その効果を確認することも行われた[4]。

身体の洗浄は皮膚上の汚れには、角質、汗、皮脂などの身体内部から発生するものと、化粧品などの残留物、ホコリ、排ガスなど生活環境から発生するものがある。これらを除くために洗浄溶液を加え汚れが身体から離れやすくする際に、タオル等で物理的な力を加えて汚れの除去を加速するのが洗

浄である。粒体を使った洗浄は、粒体が身体に接触する際の摩擦や衝撃によって物理的に汚れの剥離を促進するものであり介護者の労力を減らし、より被介護者とのコミュニケーションを取ることを促進することを狙っていた。しかし、車イスがそのまま入ることが出来る流動層を想定すると大量の粒子が必要となり、熱エネルギーだけでなく、送風動力や騒音が多くなる。また、送風動力が大きくなる割に摩擦や刺激といった皮膚感覚があまり強くなり、また、洗浄剤の添加により粒体の流れが大きく変わることにより粒体によっては流れ難くなったりする。そこで、Fig. 1の分散板を改良して噴流層に変更して検討が行われた[5, 6].

本装置では下部の分散板から高速のポリスチレン製の粒子の噴流を吹き出し、身体に衝突して洗浄や刺激効果を与えた後に分散板まで降下する。分散板は傾斜しているため身体の汚れが付着した粒子は空気輸送により上部のホッパーに移送される。そこで洗浄再生されて装置本体に戻され、再びジェットにより粒子が上方に吹き上げられるというサイクルを繰り返すものである。洗浄剤は上部から様々な角度で供給できるようにしてあり、粒子と身体の衝突で汚れをかき取ることが期待されている。また、粒子は正面や上部に設けたノズルから高速気流による粒子噴流として身体の各所に当てることも可能としている。

Table 1に一連の研究が使用した粒子性状を示す。また、Table 2は被験者に対してインタビューを行った結果を示す。その中ではポリプロピレンは付着力が強く洗浄力は弱い、セラミックスやポリスチレンは摩擦感覚が強い。また、セラミックスの場合、ポリスチレンより重いことから圧損失が大きくなるため、動力費を削減する目的で圧力損失が小さな直径6mmのポリスチレン粒子を選択している[4].

さらに、機械的に回転するローターにより身体の局所に粒子を当てるといった改良も行われてきた。Figs. 2, 3は粒体を身体に衝突させる推進力として高速で回転する羽根車から遠心力で粒体を身体に衝突させる装置の概略図である[7, 8]。特にFig. 3は粒体を直接衝突させないようにするため、柔軟な素材を出口に取り付け、間接的に皮膚に当たるようにしており顔面でもマッサージと加温を行うことができる。

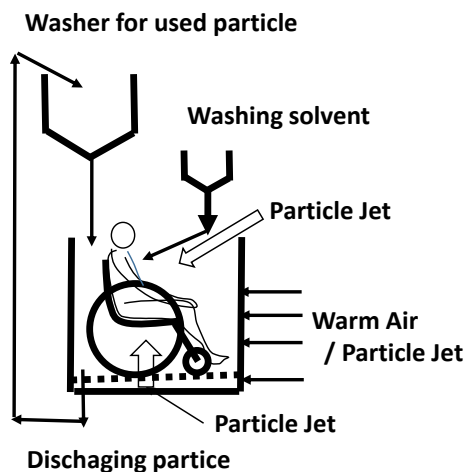


Fig. 1 Fluidized or spouted bed type nursing care sand bath.

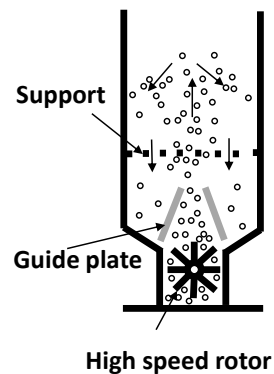


Fig. 2 Mechanically ejecting high speed particles to stimulate local areas of the body.

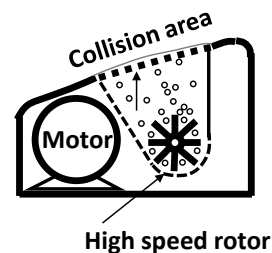


Fig. 3 A care device to stimulate a part of face with mechanically accelerated large particles.

Table. 1 Properties of solid particles used in previous research [6].

Particles	Shape	d_p [mm]	t [mm]	ρ_p [kg/m ³]	ρ_B [kg/m ³]	ϵ [-]
Polypropylene	disk	4.0	2.0	900	500	-
Polystyrene	sphere	6.0	-	1000	600	0.43
Ceramic 1	sphere	4.5	-	2400	1400	0.43
Ceramic 2	sphere	5.0~6.0	-	2200	1300	0.43
Ceramic 3	Cylinder	4.5	6.7	2500	1500	0.41
Ceramic 4	sphere	1.7	-	2400	1400	0.41
Ceramic 5	sphere	3.5	-	2700	1500	0.43
Alumina	sphere	3.0	-	3600	2100	0.41

Table. 2 Impact effect of solid particles reported in previous research [6].

Particles	d_p [mm]	Power consumption	Friction effect	Skin feeling
Polypropylene	4.0	Small	Bad	Bad Adhere to skin
Polystyrene	6.0	Good	Best	Good
Ceramic 1	4.5	Medium	Good	Bad
Ceramic 3	4.5	Large	Bad	Bad
Ceramic 4	1.7	Small	Good	Bad
Ceramic 5	3.5	Large	Good	Bad
Alumina	3.0	Large	Good	Good

2.2 本研究で提案の粒子温浴システム

本研究では流動層の温浴効果に加えて、粒子を噴出させて刺激効果を増幅するシステムについて検討する。特に粒子噴流として低い空塔速度ながら濃厚な粒子を高速で噴出することが可能な濃厚粒子噴出槽を想定している。本提案のシステムの概略図を Fig. 4 に示す。システムは浴槽 (Sand Bath)、粒子上昇管としてのライザー (Riser)、濃厚粒子噴出槽 (Dense particle ejector)、粒子上方輸送用と濃厚粒子噴出用のブロワー等から構成されている。システムとしては図 (a) のように座位で入浴するタイプと、図 (b) のように仰臥して入浴するタイプの 2 種類が考えられるが、基本的な構造は同じである。

濃厚粒子噴出槽は濃厚な状態で粒子を噴出させるために、粒子回収用のサイクロンの下部に取り付けている。噴出口下部あるいは上部に空気を供給することで、少量の空気で流動化が可能である。手元に空気流量の制御バルブ等を用意しておけば粒子の噴出を直ぐに止められる。また、層高を制御出来る様にサイクロンからの粒子流を制御することで噴出量の制御も容易に行える。流動化した粒子は液体と全く同じ挙動を示すため、噴出する粒子の初期濃度は砂層とほぼ同じである。粒子は噴出中に落下しながら、徐々に拡がるため粒子濃度は徐々に希薄になる。そのため、自由に衝撃の範囲や強度を手元で調整できる。なお、サイクロンとは柔軟性のある樹脂性のホースで連結してあるので自由に身体各所に粒子の噴流を当てる事が可能である。

基本的な構造は、横川らのシステムに似ているが、上部からの粒子は濃厚な状態で入浴者に衝突する点が大きく異なる。そのためまた、必要な空気量を大幅に削減しても少なくとも十分な衝撃を与えることが可能である。

一般的に直径の小さな粒子の伝熱性能は高いが、刺激効果は弱い。一方、直径の大きな粒子の伝熱性能は低い、刺激効果は強い。そこで、単一成分で操作するのではなく、小粒子と大粒子を混合することで双方の効果が得られる可能性が高い。横川らはポリスチレン粒子である直径 6mm、かさ密度 ρ_B の粒子を摩擦や刺激の効果が高いとした。そのため、本研究でもポリスチレン粒子を使い、小粒子としては砂の代わりに球状のガラスビーズを使うことを想定し、大粒子を混合することで温浴効果や刺激効果などが複合する効果が期待できる。液と同じ特徴を有する流動層内で、浮力の大きな軽い大粒子が小さく重い砂の組み合わせでも下降流が発生する条件では良く混合することが分かっている [9]。

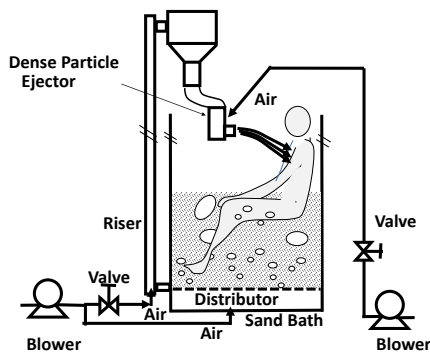


Fig. 4 (a) Deep sand fluidized bed bath with dense particle ejector

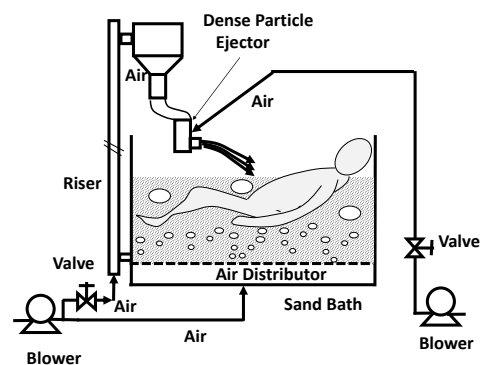


Fig. 4 (b) Shallow sand fluidized bed bath for supine posture with dense particle ejector

本研究で使用する砂は横川らのプラスチック粒子に較べて細かく割れやすいことなどから目、耳、鼻、口などから体内に取り込まれる可能性がある。そのため、防護面等により体内への微粒子の取り込みを防ぐ工夫をしなくてはならない。なお、一部の実験で使用しているガラスビーズが割れると鋭利な面が形成されて身体に刺さる可能性がある。ここでは、あくまで基本的な流れ特性を把握するための球形粒子として用いている。

3. 実験

3.1 実験装置

1) 希薄粒子噴出：横川らのシステムとの対比を行うため、高速気流による粒子噴出実験に使用した実験装置の概略図を Fig. 5 に示す。装置本体は内径300 mm、高さ400 mm の粒子溜 (Reservoir)、円錐部を介して粒子溜めに連結する内径40 mm、高さ400 mm の粒子下降管 (Downcomer)、内径20 mm の粒子上昇管 (Riser)、下向きに粒子を噴出させるためのノズル (Nozzle) から構成されている。これに、曝気槽用のブロワーを使って粒子上昇管と下降管を駆動している。空気流量調整用としてダウンカマー下部とライザー下部につながる流路にそれぞれバイパス弁を設置してある。また、層内温度を一定にするため、温水循環器に接続したコイル式熱交換器を粒子下降管に挿入している。層内温度は熱電対を挿入して連続的に記録している。粒子噴流はデジタルカメラの高速度ビデオ機能を使って撮影する。

2) 濃厚粒子噴出：Fig. 6 に示す内径60mm、高さ600mm の流動層の側面に開けた孔から粒子を噴出させ、1)と同様にデジタルカメラの高速度ビデオ機能を使って粒子が噴出する様子を撮影している。

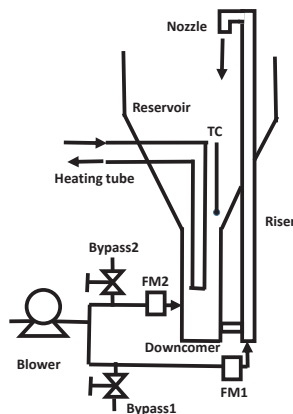


Fig. 5 Experimental setup for dilute particle ejector with sand fluidized bed bath.

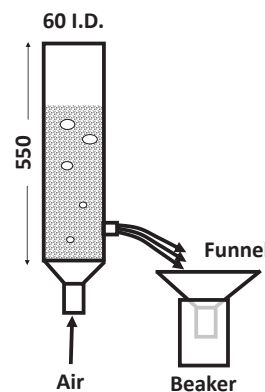


Fig. 6 Dense particle ejector to measure lateral particle ejection velocity and particle density.

3.2 実験方法

高速気流を使った粒子噴出実験は Downcomer と Riser の空気流速 U_d と U_r を一定に保ち、噴出される粒子量を一定時間サンプリング後に重量を測定し、単位時間・単位断面あたりの粒子噴出量 G_s とした。また、ノズル先端の粒子速度は高速度ビデオモードで撮影した後フリーソフトの Free Video to JPG Converter を用いて jpg 形式の静止画に変換し、撮影された粒子の移動距離をコマ間隔で除して噴出初速度 v_{p0} を求めている。撮影速度は、毎秒480コマ、1000コマに設定している。なお、撮影時に背景にスケールを置いている。

濃厚粒子噴出実験は流動層の空塔速度を一定に保った後に壁面の開口部を塞いでいるゴム栓を外し、噴出する濃厚粒子を高速度ビデオ撮影することで行った。撮影後の処理は、 v_{p0} については高速気流による粒子噴流の場合と同じであるが、噴出距離 L については粒子が100 mm 落下するまでに到達する水平距離として求めている。

3.3 使用粒子

実験に使用した粒子は主として淡路硅砂で A-3, A-4 の 2 種類を用いた. また, 一部の実験では A-5 も用いた. これらの外観写真を Fig. 7 に, 粒子物性を Table 3 に示す. また, 濃厚粒子噴出実験ではガラスビーズ GBS と GBL を用いた. 砂とガラスビーズの粒子密度は $\rho_p = 2600 \text{ kg/m}^3$ である. 終末速度 U_t はポリスチレン粒子が最も大きく, 12.1 m/s であるが, 砂は $U_t = 6 \sim 11.3 \text{ m/s}$ となっている.

粒子混合の実験を行う場合には先行研究でも使用されている軽量で大きな粒子としてポリスチレン製粒子を用いた. これは, 直径が 6 mm , $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3$ である.

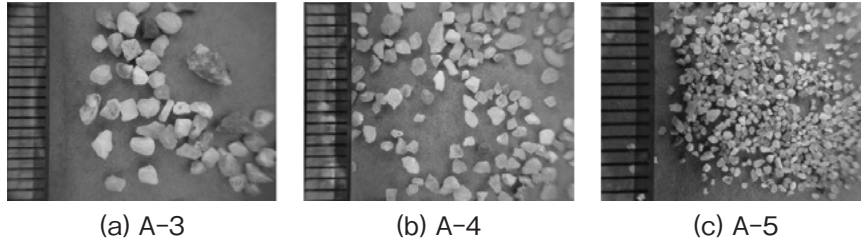


Fig. 7 Photographs of sand particles used. (a) A-3, (b) A-4, (c) A-5

Table. 3 Properties of solid particles used.

Particles	d_p [mm]	ρ_p [kg/m^3]	ρ_B [kg/m^3]	U_{mf} [m/s]	U_t [m/s]
Sand A-3	1.7- 2.0	2600	1500	1.26	11.3
Sand A-4	0.8 - 1.7	2600	1500	0.98	8.7
Sand A-5	0.3 - 0.8	2600	1500	0.8	6.4
Polystyrene	6.0	1000	550	1.36	12.1
Glass beads GBS	0.2	2600	1500	0.024	1.4
Glass beads GBL	0.4	2600	1500	0.11	3

3.3 実験条件

実験は恒温槽からの温水循環を行いながら粒子を循環させ所定の温度に達したところで開始する. 空気流速はブロワーからの流量をバイパス弁の開度を調節して変更する. 温度が一定の条件になったところで, Riser 側空気空塔速度 $U_r = 6.5 \text{ m/s}$, Downcomer 側の空気空塔速度 $U_d = 1.3 \text{ m/s}$ に保ち, 粒子噴出量 G_s をサンプリングにより求める. ここでは空気空塔速度を変えていないが, 粒子によらず粒子噴出量の最大値はほぼ同じであった.

一連の実験では粒子充填層高を 550 mm としている. また, 一部の実験では U_d を変えて, G_s に及ぼす影響について検討を行った. また, 手あるいは足先を粒子群の中に入れ, しばらくそのままの状態を保ちながら暴露時間 t_e と刺激などの感覚をインタビューにより数値化を行うが, 本研究では流れの条件を決めるために試験的に実施している.

4. 実験結果

4.1 希薄粒子の噴出速度

Fig. 8 にノズル先端で A-3 粒子の噴出状況を毎秒 480 コマ (480 fps) で撮影した高速度ビデオ映像を連続した 2 コマの静止画として示している. 最初の映像に映っている粒子の先端部から白線を降ろし, $1/480 \text{ s}$ 後の静止画で対応する粒子の先端から白線を延ばすことで速度を求めている. 粒子の移動距離は粒子長の約半分であり 3 mm 程であり, 粒子噴出速度は約 1.5 m/s と計算することができる.

Fig. 9 は A-4 粒子で背景にスケールを置き 1000 fps で撮影した映像を連続した 2 コマの静止画として示している. 静止画にすると不鮮明なため, $1/1000 \text{ s}$ 後も対応している砂粒子を白丸で囲って

いる。粒子の移動距離は約 3 mm のため約 3.0 m/s と計算できるが、視差によりこれよりは少し遅い速度となる。両方の粒子とも粒度分布が広いが噴出速度に大きな差は無い。なお、連続する 2 枚の画像間の移動距離から速度を算出しているが、画像上でもブレている粒子については 1 枚の画像のみでも速度を求めることが出来る。

4.2 希薄粒子噴出流量

ノズルでの空塔速度を $U_r = 6.5 \text{ m/s}$ 、粒子層高を 400 mm 一定に保ちながらノズルからの噴出粒子流量 G_s を測定した。粒子下降管の空気空塔速度 U_d に対して G_s をプロットすると Fig. 10 のようになる。A-3 も A-4 も U_d の増加に伴って増加するが $150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 前後が最大値となる。 G_s が最大となるダウンカマー流速は A-3 で $U_d = 1.3 \text{ m/s}$ 、A-4 で $U_d = 0.9 \text{ m/s}$ である。

4.3 濃厚粒子層の噴出(流動層から側方に排出される濃厚粒子)

流動層の側方に孔を開けておくと側方に粒子が噴出する。 Fig. 11 は GBS を使って撮影した側方への排出状況である。空気流速を $1.0 U_{mf}$ 、 $1.3 U_{mf}$ 、 $2.2 U_{mf}$ と変え、毎秒 480 コマで撮影している。静止画に変換して噴出速度 V_{p0} と到達距離 L を求めたところ空気流速に関わらず $V_{p0} = 1.9 \text{ m/s}$ 、100 mm 下降する間に $L = 200 \text{ mm}$ まで到達している。なお、層高の低下に伴い Fig. 12 に示す様に徐々に V_{p0} は減少するため粒子の到達距離が徐々に減少していく。

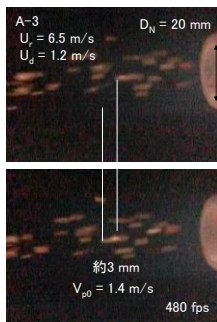


Fig. 8 High speed images of dilute particle jet to calculate particle velocities for A-3 sand particles.

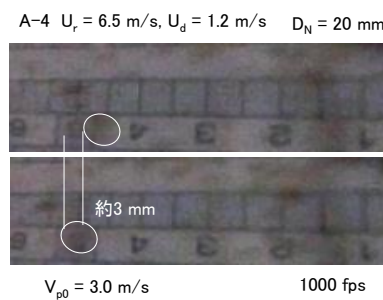


Fig. 9 High speed images of dilute particle jet for A-4 sand particles. White circles show corresponding sand particle.

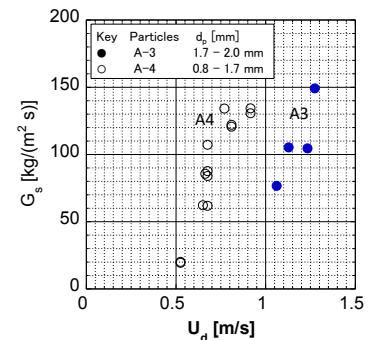


Fig.10 Effect of downcomer gas velocities on solid loading rate G_s .

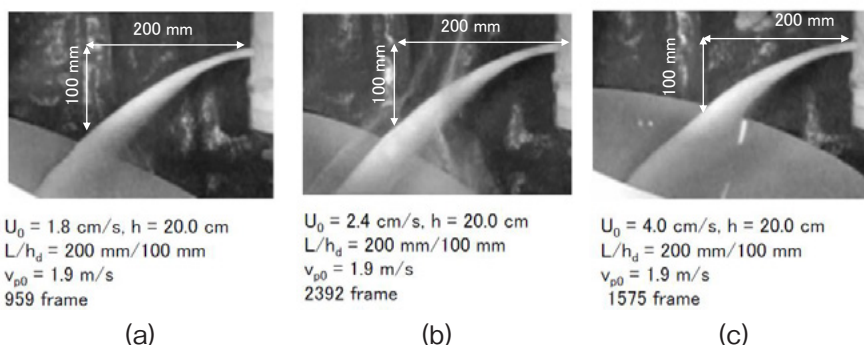


Fig.11 Ejection velocity of dense particles is almost constant regardless of the fluidization velocity.

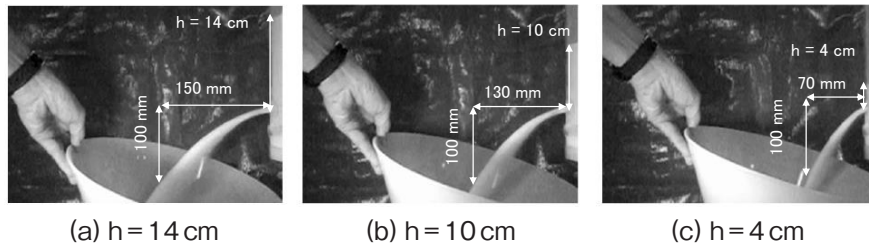


Fig.12 Ejection velocity of dense particles decreases with decreasing bed height of dense particle ejector.

5. 考察

5.1 希薄粒子の上方輸送

固気系気泡流動層では空気空塔速度 U_0 の 4-6 乗に比例して粒子の上方への輸送量が増加するという特徴を持っている。本実験装置ではライザー内の空気流速の増加によっても上方への輸送量は僅かに増加していた。これは、今回の装置構造ではライザー内の空塔速度の増加によってライザー内圧力が増加し、ダウンカマーの押し込み力との圧力バランスから十分にライザーに粒子が供給されなかったためである。

ダウンカマーの空気流速を増加した時、Fig. 10 に示す様に砂粒子の循環量 G_s はダウンカマーでの U_0 の 1 次に比例し U_0 が U_{mf} になるまでは G_s が増加している。空気空塔速度が U_{mf} 以下では粒子が受ける抗力がダウンカマー流速に応じて大きくなるため、見かけの粒子重量が軽くなることや、安息角が低下してくるためライザー側に流出する粒子量が増加するためである。ただし、ダウンカマーの空気流速が U_{mf} 付近まで増加すると $G_s = 150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 程度で頭打ちとなる。これは、空気空塔速度の増加に従って、空気の抗力と粒子の重力がバランスし粒子層は流動化するため液体と同じ挙動を示すようになったことによる。実際に A-3 の最小流動化速度 $U_{mf} = 1.26 \text{ m/s}$ と、A-4 の $U_{mf} = 0.98 \text{ m/s}$ であるが、 G_s がほぼ頭打ちとなる U_d が、それぞれ 1.3 m/s と 0.9 m/s であり、これは両者の U_{mf} におおよそ一致している。そこで、空気空塔速度が U_{mf} 以上になると層高が噴出の推進力になると考えられる [11]。

固気系の気泡流動層における粒子の上方輸送は飛び出し現象と呼ばれるが、Entrainment と Elutriation の 2 種類からなることが知られている。前者は層表面付近で激しく粒子が飛び出す現象で、粒子ホールドアップは層表面からの高さ h が高くなるにしたがって指数関数的に減少することが知られている。後者は TDH (Transport Disengaging Height) 以上で支配的になる現象で、粒子が空気の流れに伴われて上方に輸送される [9]。TDH は 0.4 mm 以下の粒子について実験的に求めた相関関係が示されている。また、TDH は Entrainment と Elutriation の境界であるという考え方から粒子の最大射出高さ $h_{p,max}$ で求めることが可能である [10]。その場合、気泡径の推算式を使い、実験的に 2 つのパラメータを求めれば粗大粒子に対しても TDH の推算が可能となる。

いずれの現象も推進力である空気空塔速度 U_0 の増加に伴って 4-6 乗の依存性で増加することが知られているが、これは、層表面付近における気泡の合体が粒子の飛び出し現象の推進力となるためである。気泡の合体頻度が空気流速の増加に伴い指数関数的に増えるというモデルが提出されている [12]。本研究の様なライザーの場合、 U_0 に対する依存性は明確で無くダウンカマーとライザーのバランスが重要になると考えられる。

小粒子と大粒子が混合した系における飛び出し現象について、系統的な検討は行われていないが特定の空気空塔速度では絶対に飛び出さない様な直径 20 mm のセラミックスボールが 10 から 20 m 以上の高さがある循環流動層ライザーを激しく循環することが一般的に知られている。これは小粒子が流動化している状態では液体と同じく浮力が働くため、見かけの重量が軽くなって浮遊状態になっていること、一旦、浮遊した大粒子に小粒子が高速で衝突することなどが要因と考えられている。

希薄粒子の輸送限界：Zenz と Weil が Saturaton Carrying Capacity から求めた粒子の G_s はほぼ空気流速のほぼ 1 次に比例しているが、粒子径によってその依存性が変わっている [9]。一方、Bai と Kato は循環流動層ライザーの最大循環流量について提出した実験式から求めた G_s は空気流速の 1.85 乗に比

例している[13]. 粒子径の影響は含まれているがFrとArではほぼキャンセルされるため大きな影響が現れない式になっている.

$$\frac{Gsd_p}{\mu} = 0.125 Fr^{1.85} Ar^{0.63} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}\right)^{-0.44} \quad (1)$$

$$\text{ここで, } Fr = \frac{u^2}{gd_p}, \quad Ar = \frac{gd_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\mu^2}$$

粒子の最大循環流量を(1)式を基に推算した結果をFig.13に示す. 本研究で使用した淡路珪砂の場合, ライザーの U_0 が4~5 m/s以上になるとFrが適用可能であり実線で示している. これ以下の U_0 では適用範囲外になるが, 参考のため破線で表している. Fig.13の結果を実測値と較べる $U_r (= U_0) = 6.5$ m/sの時に150 kg/(m²s)であるので, ほぼ同程度のGsとなり(1)式でほぼ推算できることが分かる. ただし, 粒子径の相違によって空気流速に対する依存性が変わるか否かは式の特徴から変わらない. 参考のためZenz&Weilの実験的な相関図から求めたGsをFig.14に示す. 絶対値と空気流速の依存性は(1)式を使う場合と異なり, 粒子径が大きくなるに従って空気流速に対する依存性が増加している. これは低空気流速では大きな粒子が持ち上げ難いということに定性的に一致する. こちらの相関結果も実測値とほぼ同じ U_0 で同程度のGsになっている.

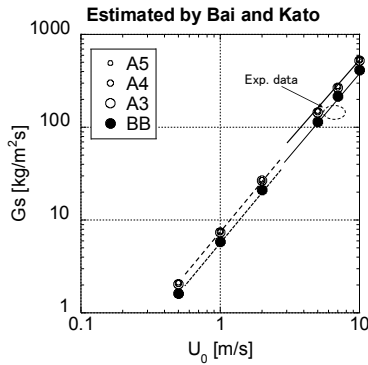


Fig.13 Effect of riser gas velocities on solid loading rate Gs, estimated by Bai and Kato [13].

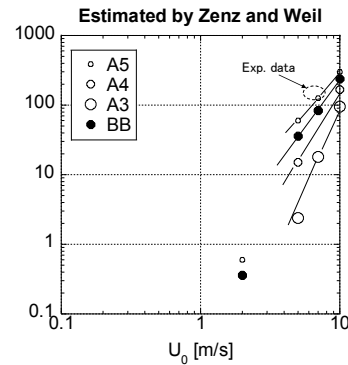


Fig.14 Effect of riser gas velocities on solid loading rate Gs, estimated by Zenz and Weil [9].

5.2 希薄粒子噴出速度

粒子噴出ノズルから噴出される粒子の速度はライザー内を上昇する粒子速度にほぼ等しいと考えて良く, 実測値は $v_{p0} = 1.5 \sim 3.0$ m/sである. ライザー内の空気空塔速度は $U_r = 6.5$ m/sであるので粒子噴出速度は相当遅くなっている. この差は循環流動層ライザーや空気輸送ではスリップ速度 U_{slip} として(2)式で表されている.

スリップ速度は空塔速度 U_0 と粒子速度 v_p の差であるから, その概念図をFig.15に示す. 実際の空気速度 U_i は粒子が占有していない空間, すなわち空間率 ε 部分の流れるとすると, その分だけ空気空塔速度より速くなる. (2)式中の右辺第一項は空気空塔速度 U_0 を空間率 ε で除することで速度増加を表している. 粒子の占有している空間は図からも分かるように $(1 - \varepsilon)$ であるから, 粒子の平均上昇速度 \bar{v}_p は粒子輸送量Gsを粒子密度 ρ_p に粒子の空間率 $(1 - \varepsilon)$ を乗じた値で除すことで求められる. これが(2)式中の右辺第二項になる.

(2)式中, 右辺第一項と第二項の差が空気上昇速度と粒子上昇速度との差となり, これがスリップ速度となる[14].

$$U_{sl} = \left(\frac{U_0}{\varepsilon}\right) - \frac{Gs}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2)$$

Fig.16は粒子噴出速度 v_{p0} をA-3で1.5 m/s, A-4で3.0 m/sと仮定し, (2)式を使ってガスホールド

アップ ε を求めたものである。横軸を G_s とし、縦軸を ε としている。 G_s に対する依存性は大粒子になるに従って大きくなっている。すなわち、粒子径が小さな粒子ほど空気の流れに伴われやすくなるといえる。

高速気流による粒子噴流の場合、粒子濃度は 1 - 3% 程度であるため、刺激力 F は単位時間に衝突する粒子の持つ運動量となり、次式で表すことが出来る。

$$F = \frac{1}{2} \rho_p (1 - \varepsilon) v_p^2 \quad (3)$$

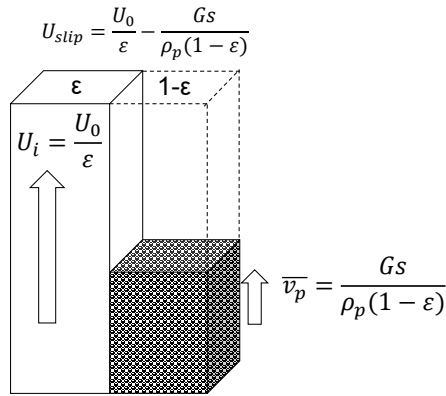


Fig.15 Schematic explanation of slip velocity, U_{slip} .

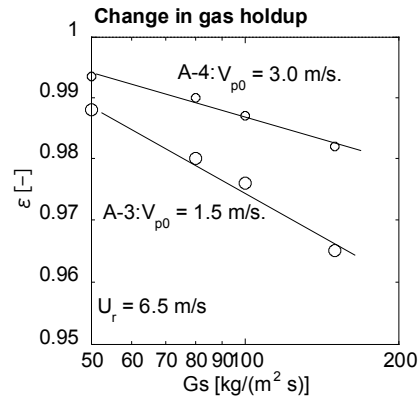


Fig.16 Effect of solid loading rate, G_s , on gas hold-up.

5.3 粒子噴流の刺激と温浴効果の予備的検討

1) 希薄粒子の噴出：今後、粒子噴流の刺激と加温効果を系統的に検討していかなくてはならない。ここでは、その前に予備実験として実際に噴流内に 1 - 2 分手を入れることで感触を確認した。この時、粒子層の温度 $T = 39^\circ\text{C}$ 一定としている。

A-3 粒子：粒子径が大きいことから G_s は同じであっても手への衝突頻度は A-4 や A-5 粒子より少ない。粒子温度が 39°C と低いことと衝突頻度が少ないことから、暖かいという感じはそれほどせず、温浴効果は小さいといえる。一方、粒子径が大きいため粒が手に当たる感覚があったことから、刺激効果は高いと考えられる。

A-4 粒子, A-5 粒子：粒子径を小さくした場合、温浴効果は A-3 より高いと感じたが極端に差がある訳では無く、また、粒を感じるような刺激効果は明確では無かった。しかし、手を粒子噴流から外した時には不快では無く、軽くしびれる様な心地良さを感じた。

このような個人的な感覚の処理方法・評価方法については多くの被験者に体験させて結果を統計的に処理する必要があるが、現状の装置では流動条件の変動などを精緻に制御することは難しい。そこで、被験者を使った検証を行う前に、刺激効果や温浴効果を定量的に評価できるようにする必要があった。

2) 濃厚粒子の噴出(流動層から側方に排出される濃厚粒子)：流動化した粒子層は液体と全く同じ挙動を示し、Figs. 11, 12 に示した様に濃厚な状態で噴出させることが可能である。粒子の噴出速度も高速気流を使った場合とあまり変わらないため流動層高と孔径に応じて粒子の噴出速度は変わる。実際には粒子の形状や直径によって流出係数が変わるが孔径や層高を変えることで粒子の噴出量を制御出来る。

液体の側方への噴出速度は理想的には運動エネルギー = 位置エネルギーとすると、 $v = \sqrt{2gh}$ で表される。流動層でも同じ式を適用すると Fig. 17 のように、 $h = 0.2\text{m}$ で $v_{p0} = 1.97\text{m/s}$ となる。実測値は視差などが入るため大きな誤差があるが、 $1\text{m/s} \sim 1.5\text{m/s}$ 程度とすることが出来る。また、層高が低くなるに従って噴出速度が減少する傾向は理想的な場合と大きくは変わらない。

Fig.18は流動層高 h に対して100mm落下する間に到達した噴出距離 L をプロットしたものである。こちらも h に比例して L が増加し、おおよそ1/2乗に比例している。

これらのことから、流動層の側方から粒子を噴出させる際に、層高や側壁に開けた孔の径を変えて噴出量を変えることが可能である。すなわち、刺激効果を層高で制御出来るが h が高くなっても大きな変化をしなくなるので、 $h = 0.2 \sim 0.3\text{m}$ 程度に出来れば十分といえる。なお、空気空塔速度は U_{mf} 付近でも十分な粒子速度を得られることや、粒子ホールドアップ $(1 - \varepsilon) = 0.55$ 前後という非常に濃厚なまま身体に衝突することから大きな刺激効果が期待出来る。

高速気流の場合は1～3%程度の粒子濃度であるため粒子速度が変わらない場合には刺激効果は少ない。また、スリップ速度が大きいため、流動化に必要な空気空塔速度は流動層の1/100以下となる。さらに、高速気流が身体に吹き付けられるため身体の熱が奪われ、冷たいと感じることもある。このような観点から高速気流を使ってノズルから粒子を噴出させるより、流動層の側方に濃厚な粒子群を噴出させることのメリットは大きいと考えられる。

5.4 粒子混合の効果

小粒子の流動層に大粒子を混合すると大粒子の刺激効果と小粒子の温浴効果を合わせ持つ可能性がある。砂の密度は 2600kg/m^3 であるのに対し、ポリスチレン粒子は 1000kg/m^3 と軽く、密度差がある系でもうまく混合している。流動層内は液体と同じ挙動を示すため全ての粒子が浮上する筈であるが、うまく混合している[9]。これは気泡塔でも見られるが液下降流にある小さな気泡は下降することが知られている。本研究では濃厚な粒子層の下降流になるが、それに巻き込まれた軽い大粒子も下降すると考えられる。ただし、粒子放出器から1個の大粒子を放出した時に浮上しなくなる限界深さが存在する。これはFig.19に示した概念図のように、 U_{mf} 付近では大粒子が上昇するためには小粒子を上押し上げるだけでなく、横にも押し拡げないといけない。しかし、流動化しているとは言え、小粒子は詰まっているため押し拡げられない。このようなことが要因として浮上限界が存在すると考えられており、軽い大粒子でも層内に分散し大粒子と小粒子の混合によって衝撃の効果が高くなると考えられる。今後、大粒子の混合量によって噴出量や噴出速度がどのように変わるか調べる必要がある。

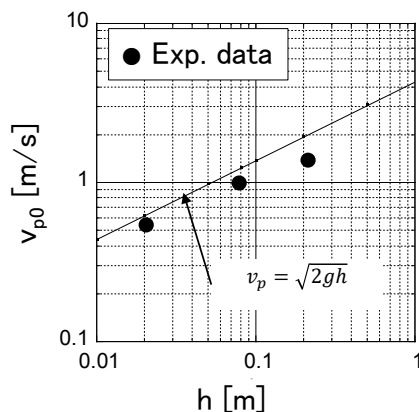


Fig.17 Effect of fluidized bed height on initial particle velocity, v_{p0} , from dense particle ejector.

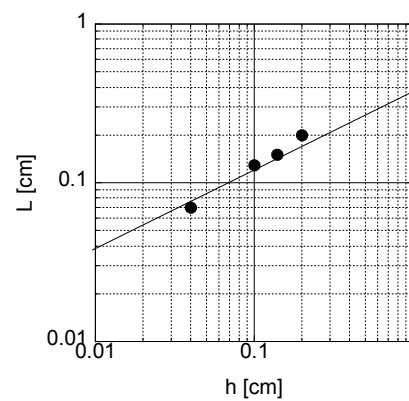


Fig.18 Effect of fluidized bed height on ejection distance, L , from dense particle ejector. L was determined as horizontal distance to reach while descending 100 mm.

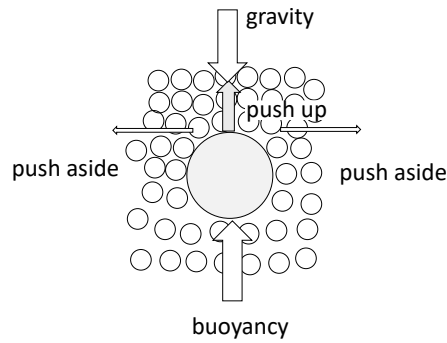


Fig.19 Image of force balance around coarse Flotsam in an incipiently fluidized bed.

5.5 今後の展開

本研究では主として粒子噴流の流動特性について検討を行ったが、温浴効果や衝撃効果を調べるためには実際に被験者に入浴してもらい感想をまとめるといった作業が必要となる。しかし、感想は個人的な感覚に依存する部分も多く、また、流れの条件や温度・湿度などを一定に保つために、まず効果についての定量的な指標を設定することが必要である。そこで、温浴効果については赤外線サーモグラフィを、衝撃効果についてはマイクロフォンを衝撃センサーとして使うことで定量的な刺激量を把握したところで、複数の被験者に対して入浴の結果をまとめていく予定である。

6. 結論

温浴効果が高いと言われている砂むし風呂の効果を高めるために、粒子システムを用いる新しい健康機器の流動特性について検討を行った。ここでは、流動層と粒子噴流を併用したシステムとし、高速気流による粒子噴出速度、粒子密度、噴出量、濃厚粒子噴流の速度や密度などを測定した。その結果、流動層と濃厚粒子噴出槽を組み合わせることで高い衝撃効果や温浴効果が期待出来ることが分かった。また、小粒子の流動層に低密度の大粒子を混合することが可能か検討を行った結果、定常的な下降流を形成することで良く混合することが明らかになった。

7. 謝辞

本研究の一部は中央大学理工学研究所研究プロジェクト(共同研究第1類：粉粒体を用いた加熱・冷却型身体刺激装置開発と健康維持効果の定量的評価)によって実施された。ここに記して謝意を表す。

8. 参考文献

- [1] 田中伸行：“私の温泉・入浴・サウナ・運動・リハ医学に関する研究の歴史”，日本温泉紀行物理医学界雑誌79,2, 97-105, 2016
- [2] 野村英幸，田中信行：“指宿砂むし温泉の作用機序とその効果について”，日本温泉紀行物理学会雑誌, 77, 36-37 2013
- [3] 横川明：“身体洗浄方法及び装置”，特開平11-137627
- [4] 園山司：“粒体流動化式自動入浴介護装置の開発”，高知工科大学卒業論文, 1010157, 2001

- [5] 北條英二：“粒体噴流化式身体洗浄装置”，特開2001-95880
- [6] 山崎敬一：“粒体噴流化式身体洗浄装置の実用化の研究”，高知工科大学修士論文，1055072, 2003
- [7] 横川明：“粒体式身体洗浄マッサージ装置”，特開2006-174869
- [8] 横川明：“粒体式足温熱・マッサージ装置”，特開2008-54876
- [9] 幡野博之，藤野和也：“固気系流動層内の浮上性粒子の混合と分級”，第22回流動化粒子プロセスシンポジウム講演論文集，109-112, 2016
- [10] Zenz, F. A. and Weil, N. A. : “A Theoretical-empirical approach to the mechanism of particle entrainment from fluidized bed”, *AIChE J.*, 4, 472 – 479, 1958
- [11] Hatano, H. and Ishida, M. : “Bubble eruption model for entrainment phenomena below the TDH for gas-solid fluidized beds”, *J. of Chem. Eng. Jpn.*, 17, 491-497, 1984
- [12] Ishida, M., and Hatano, H. : “The flow of solid particles in an inclined channel”, *Powder Technol.*, 27, 7-12, 1980
- [13] Hatano, H. and Ishida, M. : “Study on the entrainment of FCC particles from a fluidized bed”, *Powder Technol.*, 35,201-209, 1983
- [14] Bai, D. and Kato, K. : “Saturation carrying capacity of gas and flow regiems in CFB”, *J. of Chem. Eng. Jpn* 28, 179-185, 1995
- [15] Ishii, H., Nakajima, T. and Horio, M. : “The clustering annular flow model of circulating fluidized beds”, *J. of Chem. Eng. Jpn.*, 22, 484-490, 1989