

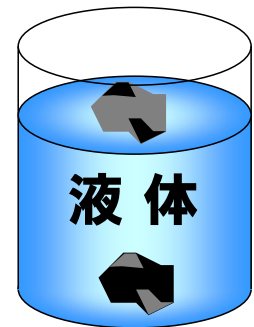
固気流動層内での物体浮沈と密度偏析を 利用した乾式比重分離技術

岡山理科大学 押谷潤

1

湿式比重分離技術

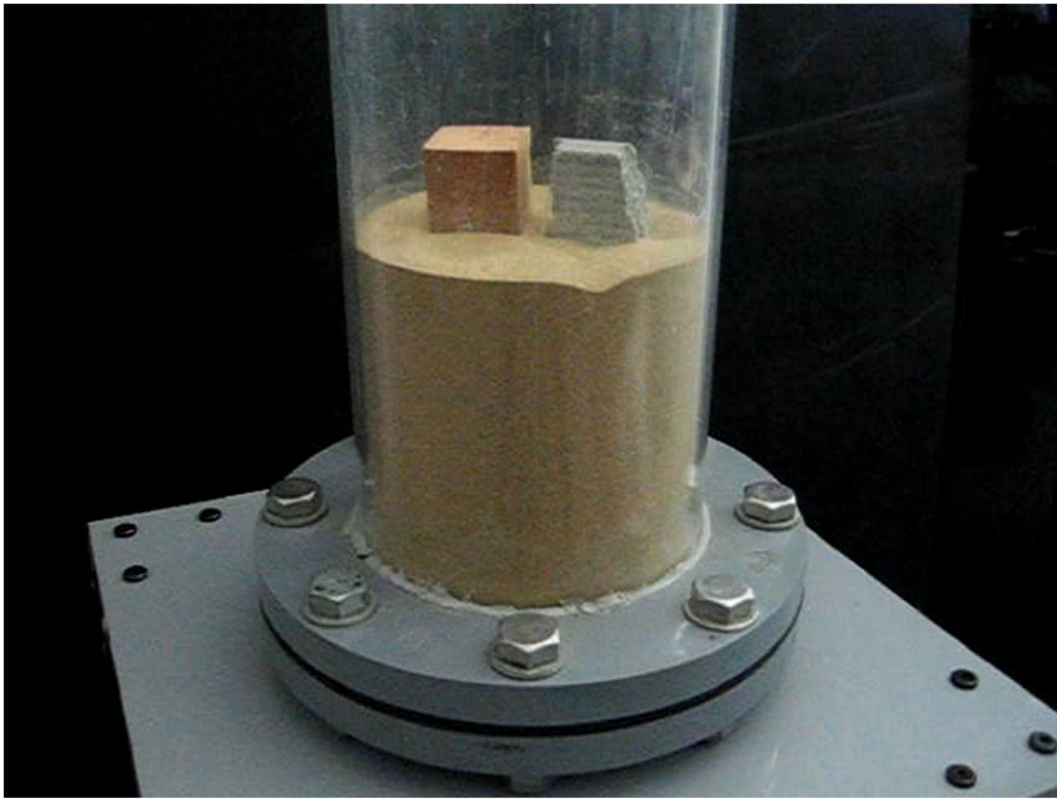
- ・廃液処理
- ・分離後に乾燥工程が必要
- ・装置からの液漏れ
- ・比重調整剤・浮選剤などのコスト高
- ・水資源枯渇地域や寒冷地での使用が困難



代替として

固気流動層を利用した乾式比重分離技術
を開発した

2



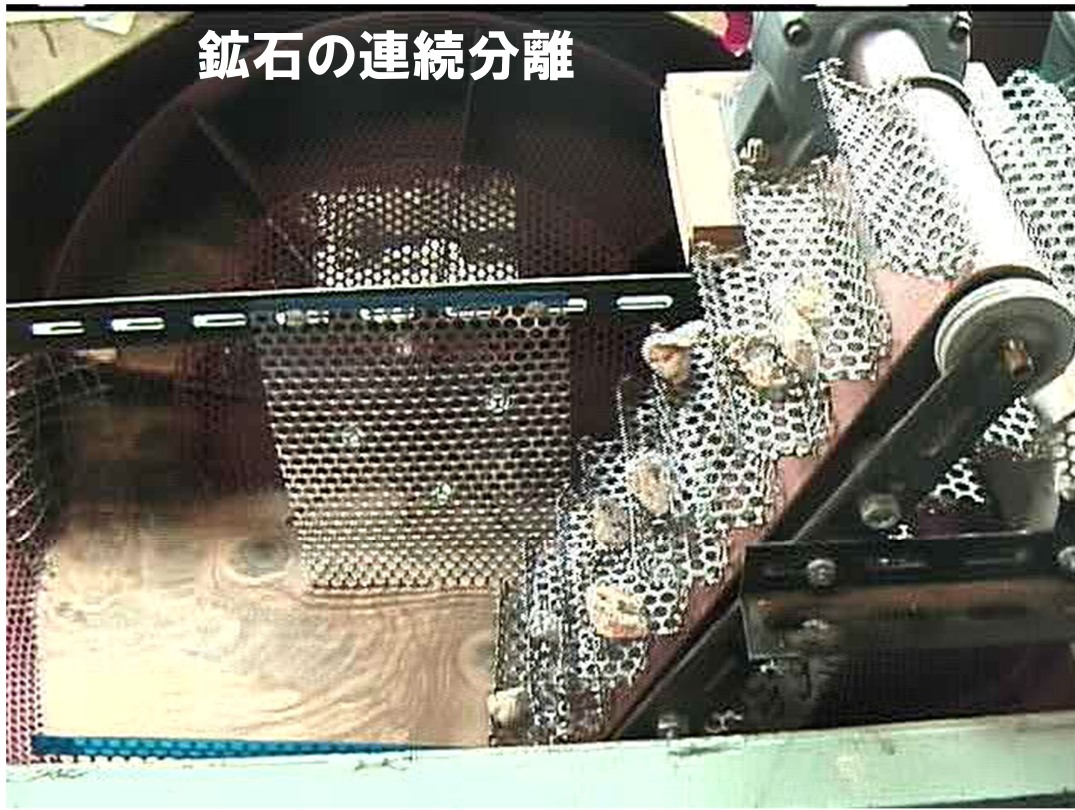
砂の下から風を送り込むと砂が踊りだす ⇒ **流動層**
“もの”の浮沈が起こる ⇒ **分離技術として使えるのでは？**

3



技術として使うには、浮いたものと沈んだものを取り出さなければならない・・・

4

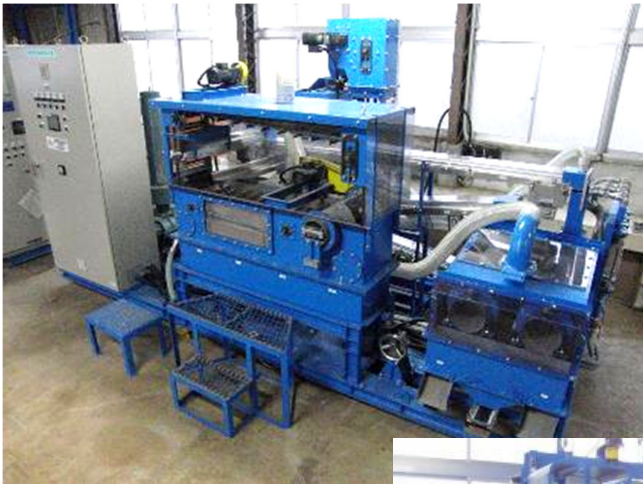


鉍石の連続分離

浮いたものと沈んだものを連続的に
取り出すことが可能な装置

5

実験室レベルでの分離装置



6

廃棄物処理分野で実用化した分離装置



7

廃非鉄金属の分離



8

鉄鉱石の分離



9

鉄鉱石の分離



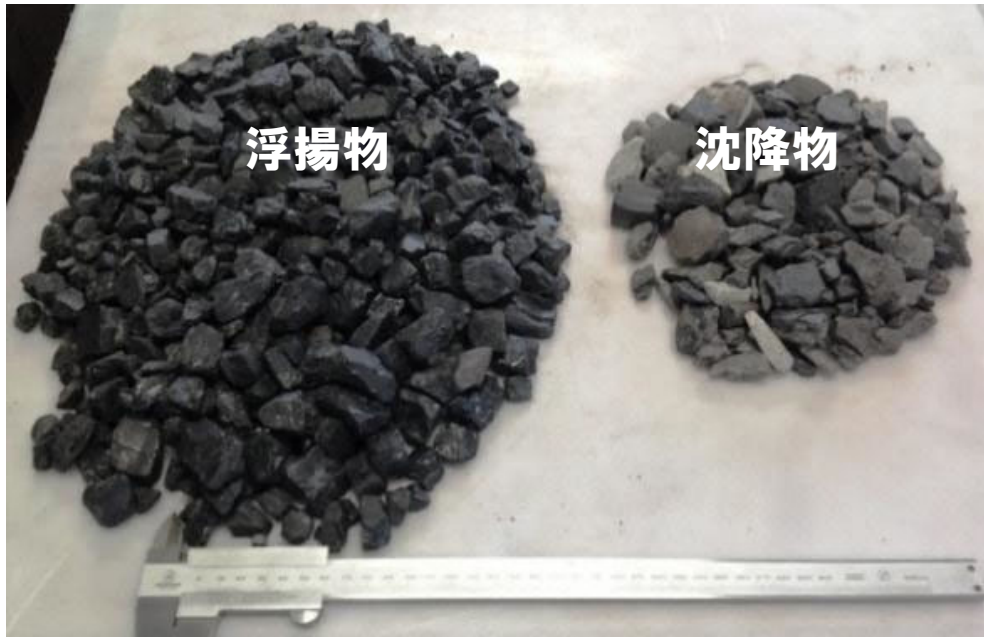
10

石炭の分離



11

石炭の分離



	分離前	分離後	
		浮揚物	沈降物
発熱量 [kcal/kg]	3926.0	6367.3	1270.3
灰分 [wt%]	48.6	19.8	80.5

12

基礎研究

- ・ 固気流動層の見掛け密度の制御
- ・ 風速・粒子サイズ・層高と物体浮沈の関係解明
- ・ 分離対象物のサイズ・形状と物体浮沈の関係解明
- ・ 安定した物体浮沈のための空気分散板の最適化
- ・ 疎水性粒子を用いた高湿度下・湿潤物体の分離

応用研究

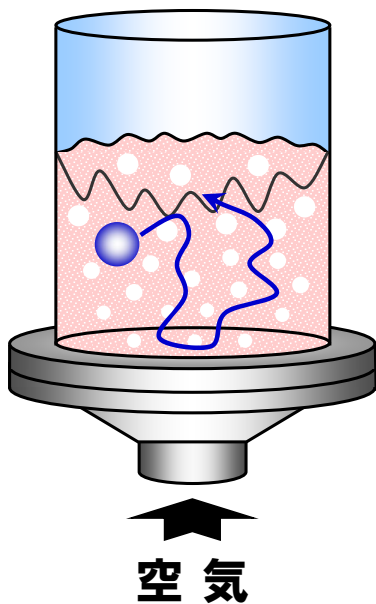
- ・ 自動車シュレッダーダストの素材分離
- ・ 家電シュレッダーダストの素材分離
- ・ 廃非鉄金属の素材分離
- ・ 廃コンクリートの素材分離
- ・ 建設廃材の素材分離
- ・ 選炭 選鉱

13

固気流動層の見掛け密度 ρ_{fb} の求め方

一般的には…

$$\rho_{fb} = \frac{\text{層内に仕込んだ粒子の重量}}{\text{流動化状態での粒子層の体積}}$$



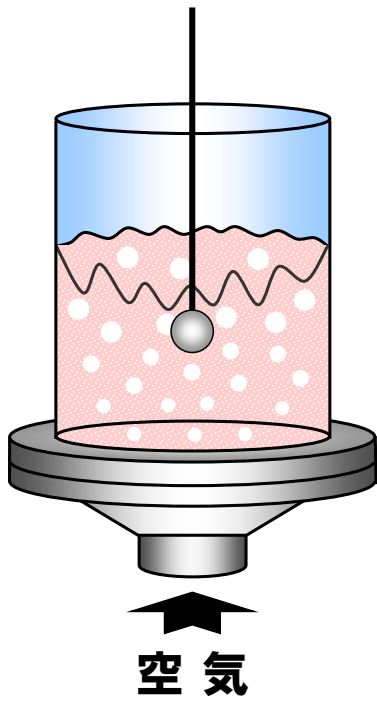
気泡上昇や粒子流れが存在

↓
物体の浮沈に影響

↓
それらの影響を含んだ見掛け密度

↓
物体浮沈から見掛け密度を求める

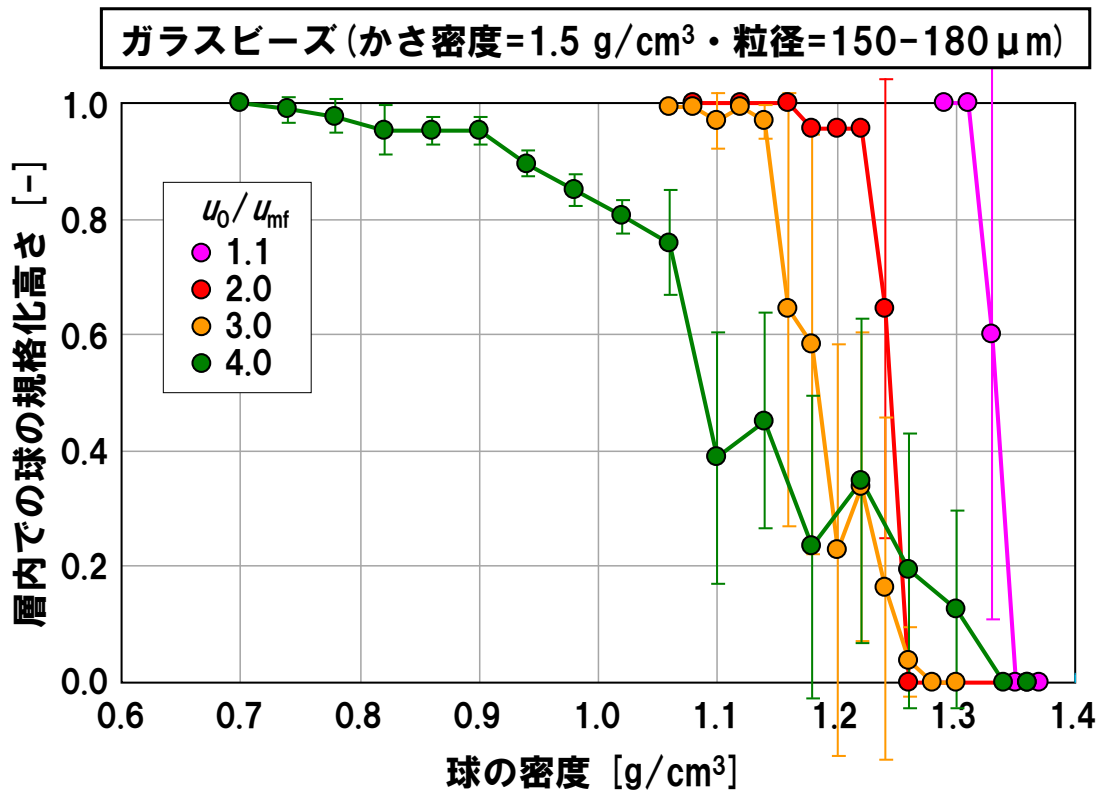
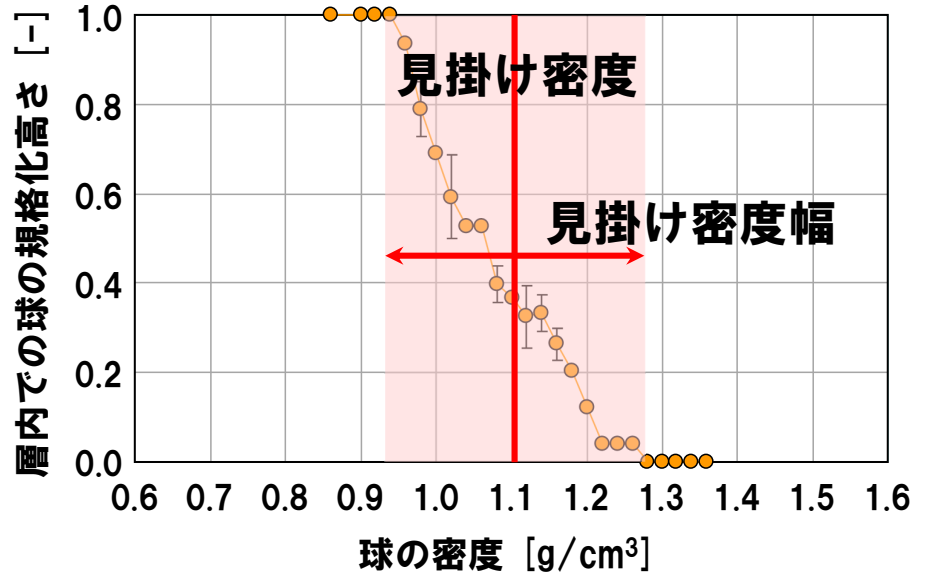
14



様々な密度の球を層内に投入



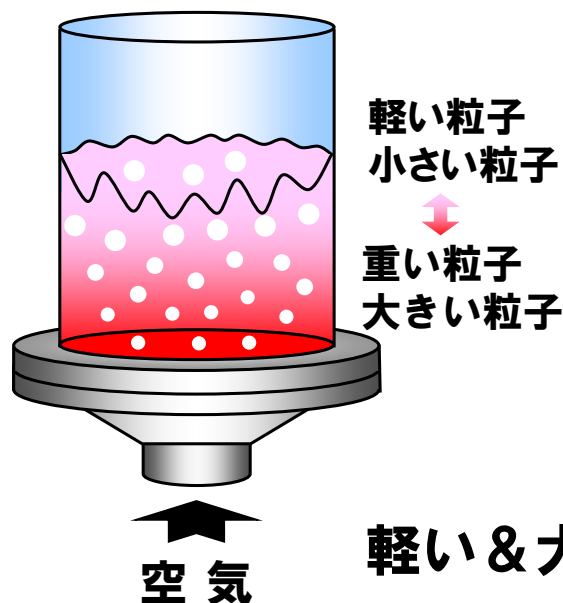
所定時間放置後、球の高さを測定



固気流動層の見掛け密度の制御

密度の異なる2種類の粒子を混合

様々な見掛け密度が得られる



2成分粒子の偏析

↓ 見掛け密度が不均一

2成分粒子の組み合わせ
(密度と粒径)に注意が必要

軽い&大きい粒子 + 重い&小さい粒子

↓ 偏析を抑制

17

粒子混合割合と球の浮沈

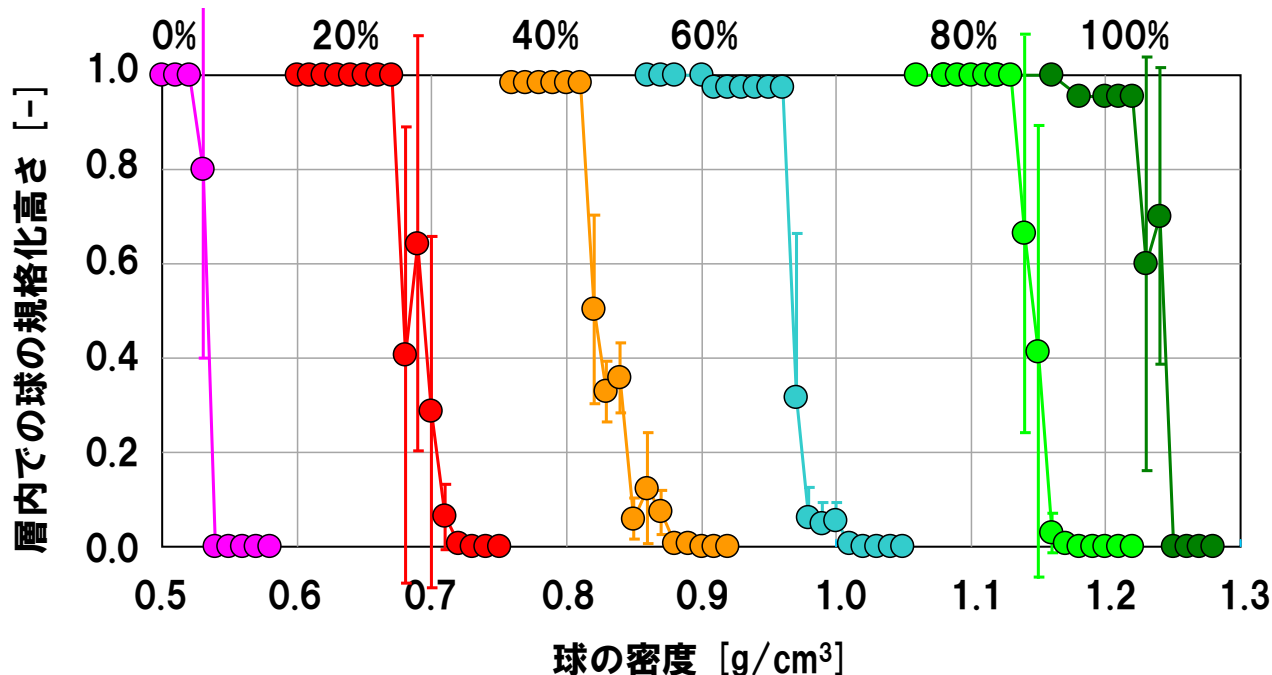
ポリスチレン粒子
(かさ密度=0.6 g/cm³・粒径=355-425 μm)

+

ガラスビーズ
(かさ密度=1.5 g/cm³・粒径=150-180 μm)

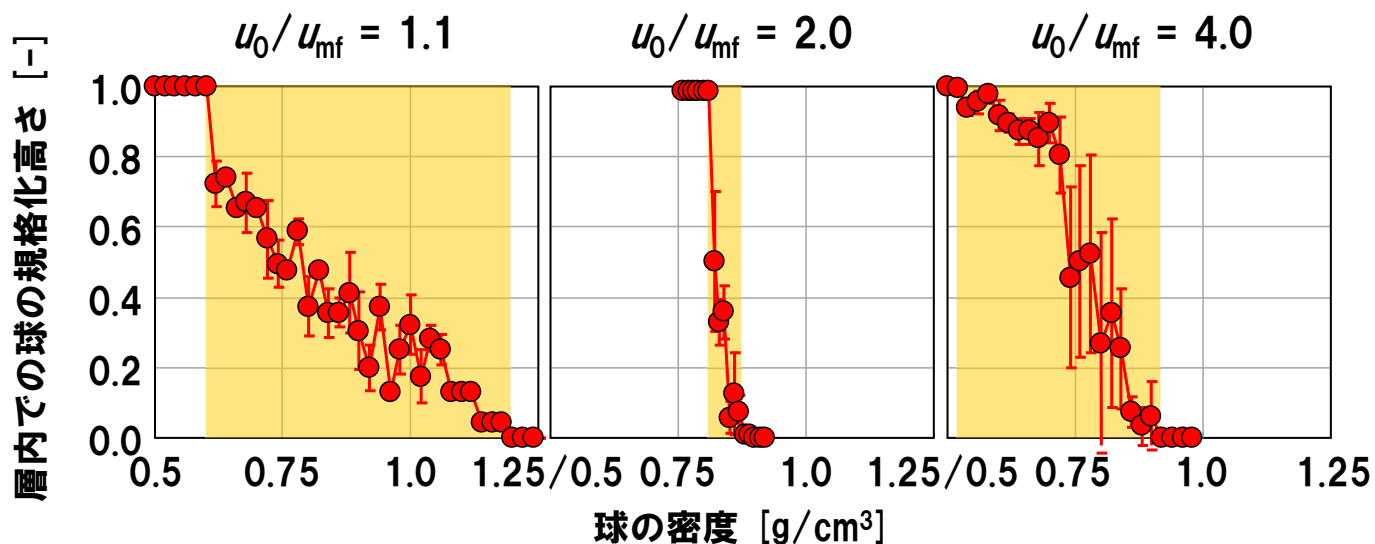
ガラスビーズの体積混合割合

$u_0 / u_{mf} = 2.0$



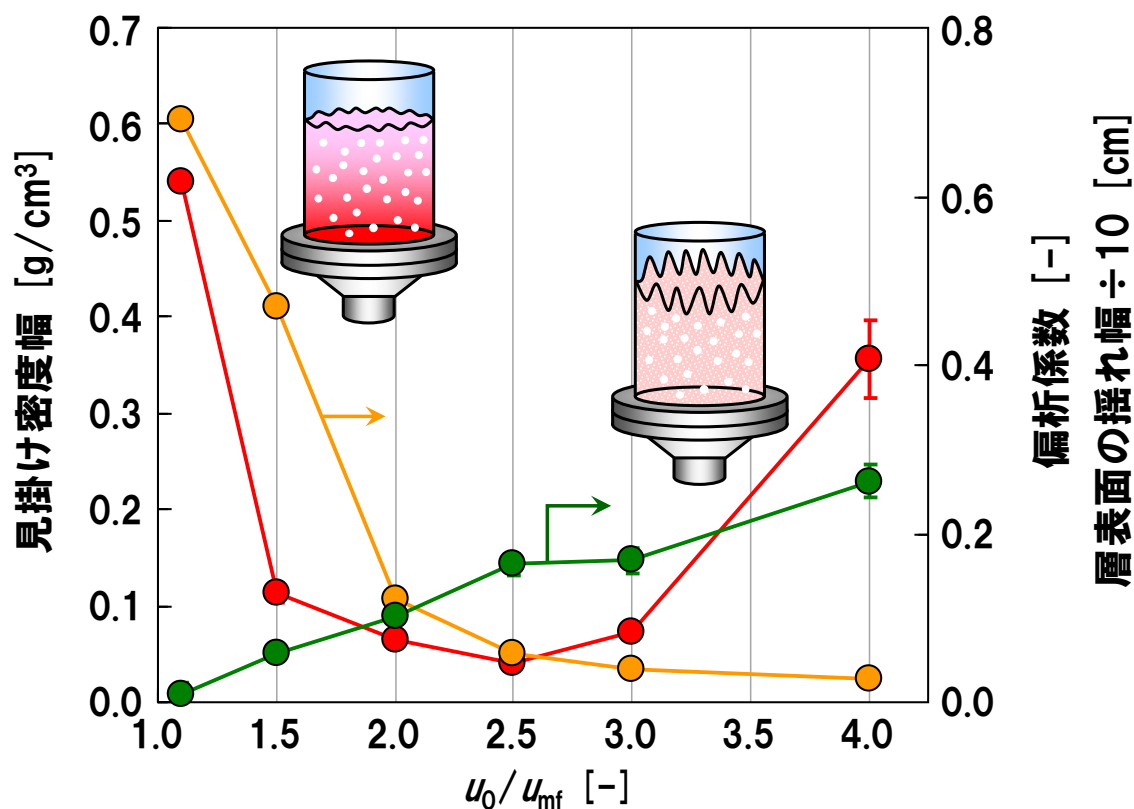
18

風速と球の浮沈



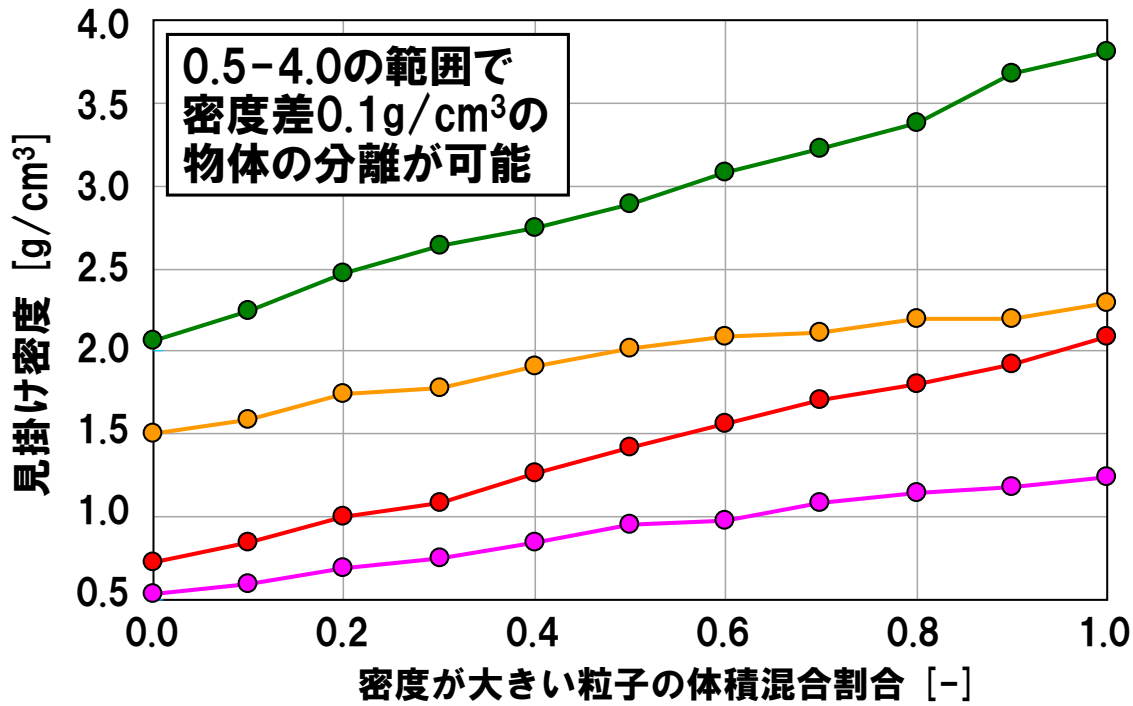
ポリスチレン粒子 (355-425 μm) & ガラスビーズ (150-180 μm)
 ガラスビーズの体積混合割合 = 40%

見掛け密度幅と偏析・粒子運動の関係



ポリスチレン粒子 (355-425 μm) & ガラスビーズ (150-180 μm)
 ガラスビーズの体積混合割合 = 40%

2成分粒子系を用いた見掛け密度の制御

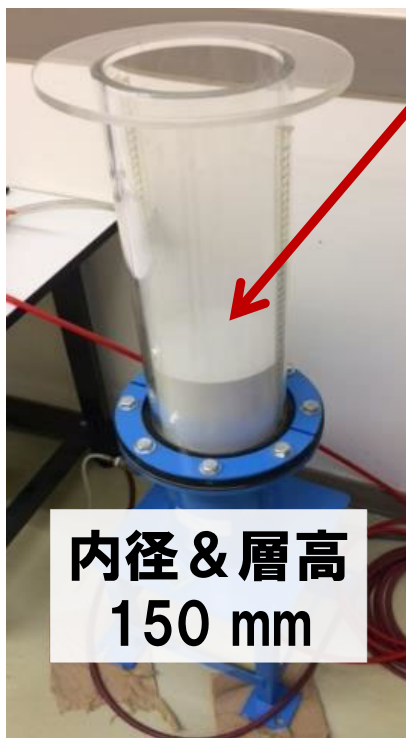


様々な2成分粒子系 (粒径と風速)

- ポリスチレン (355-425 μm) & ガラスビーズ (150-180 μm), ($u_0/u_{mf}=2.0$)
- グラニュー糖 (425-500 μm) & ユニビーズ (180-212 μm), ($u_0/u_{mf}=2.0$)
- ガラスビーズ (425-500 μm) & ユニビーズ (180-212 μm), ($u_0/u_{mf}=1.1$)
- ユニビーズ (180-212 μm) & 鉄粉 (75-90 μm), ($u_0/u_{mf}=2.0$)

21

固気流動層



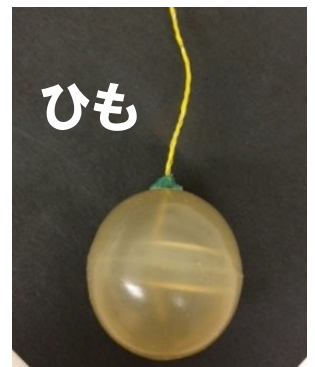
内径 & 層高
150 mm

ガラスビーズ

粒径 : 0.125 - 0.180 mm
かさ密度 : 1.5 g/cm³
最小流動化速度 u_{mf} : 2.3 cm/s

密度調整球

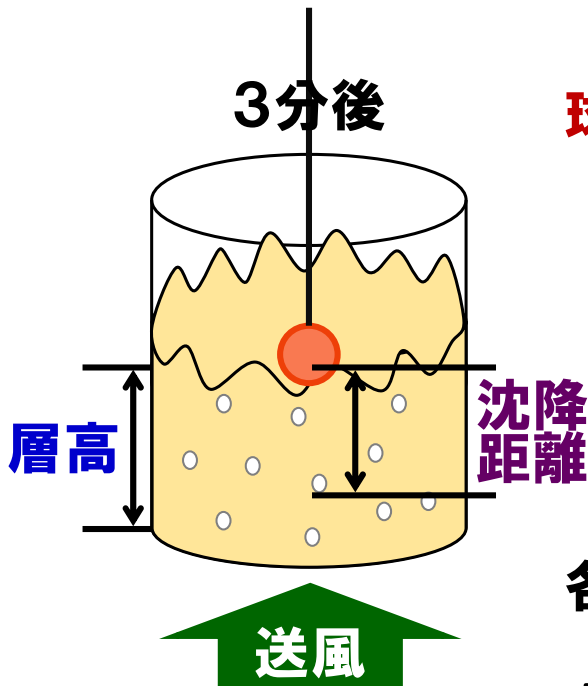
直径 : 30 mm
密度 : 0.8 ~ 1.5 g/cm³



所定量の鉄粉を
プラスチック球に入れた

22

浮沈実験



球の規格化高さ h

$$= \frac{\text{層高} - \text{沈降距離}}{\text{層高}}$$

$h = 1$: 完全浮揚

$h = 0$: 完全沈降

各条件で浮沈実験を3~10回実施

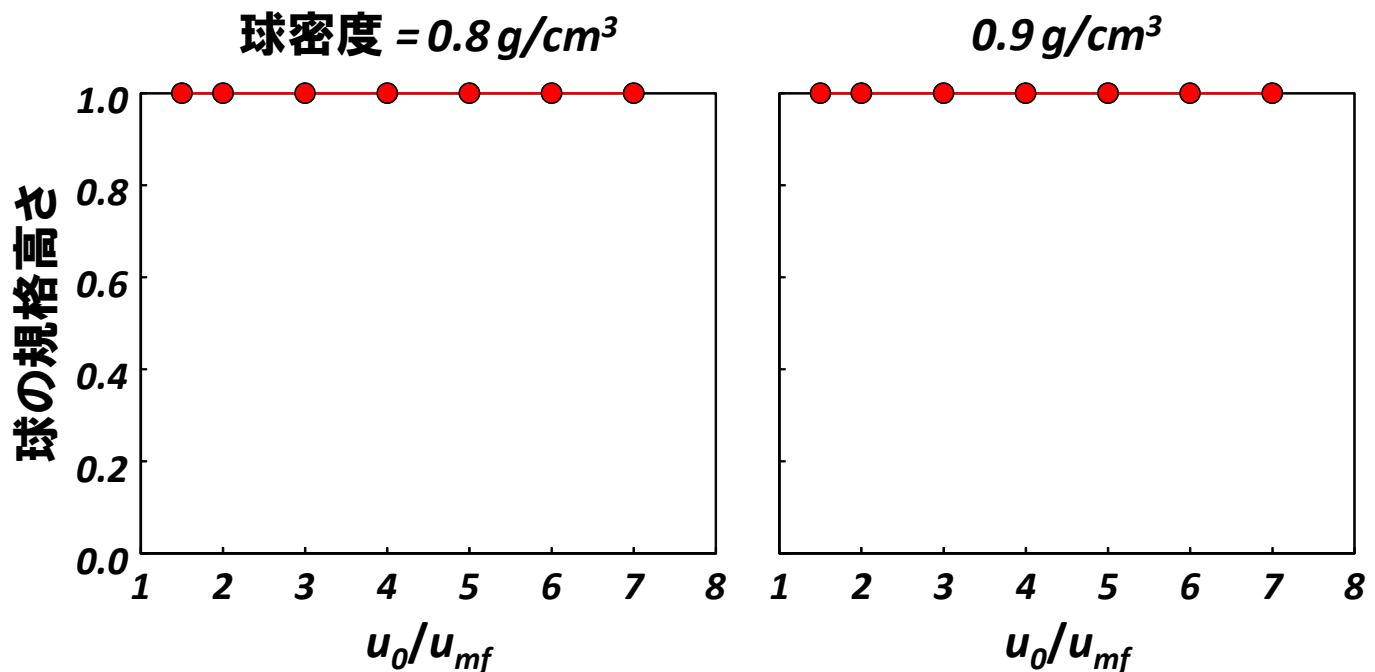
風速 : $u_0/u_{mf} = 1.5 \sim 7.0$

↓
最小流動化速度

23

密度が小さい球

0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 g/cm³



どの風速でも球は浮揚した

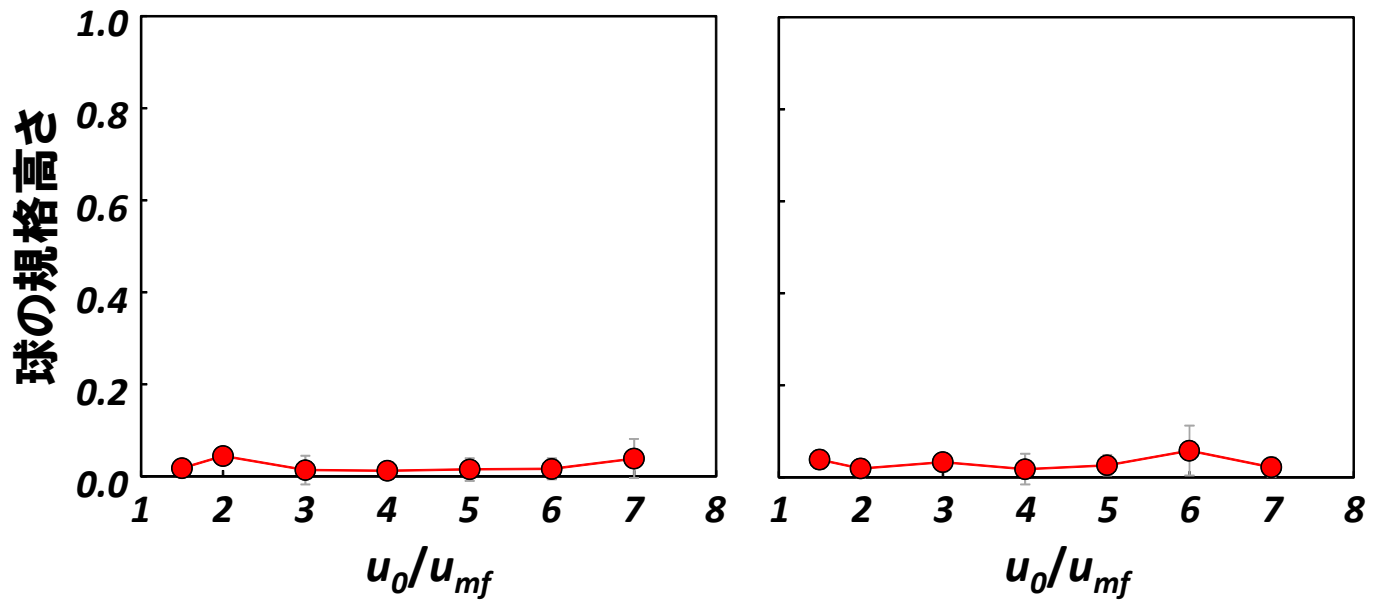
24

密度が大きい球

0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, **1.4, 1.5** g/cm³

球密度 = 1.4 g/cm³

1.5 g/cm³



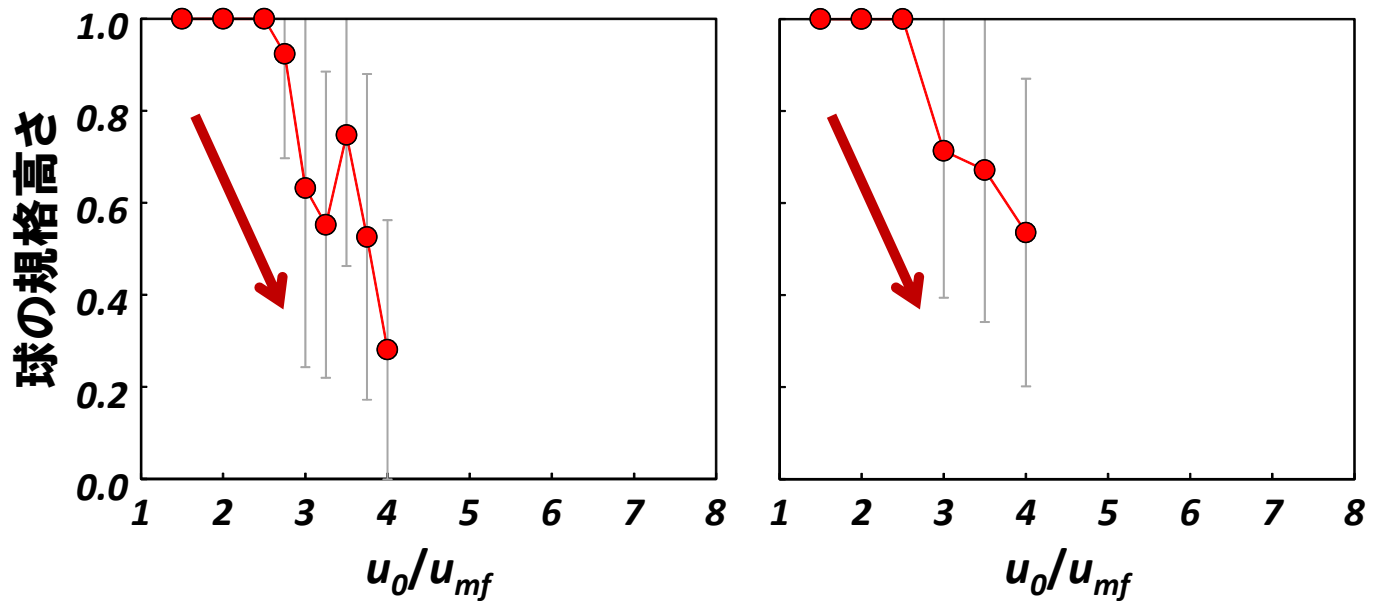
どの風速でも球は**沈降**した

密度が中程度の球

0.8, 0.9, **1.0, 1.1**, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 g/cm³

球密度 = 1.0 g/cm³

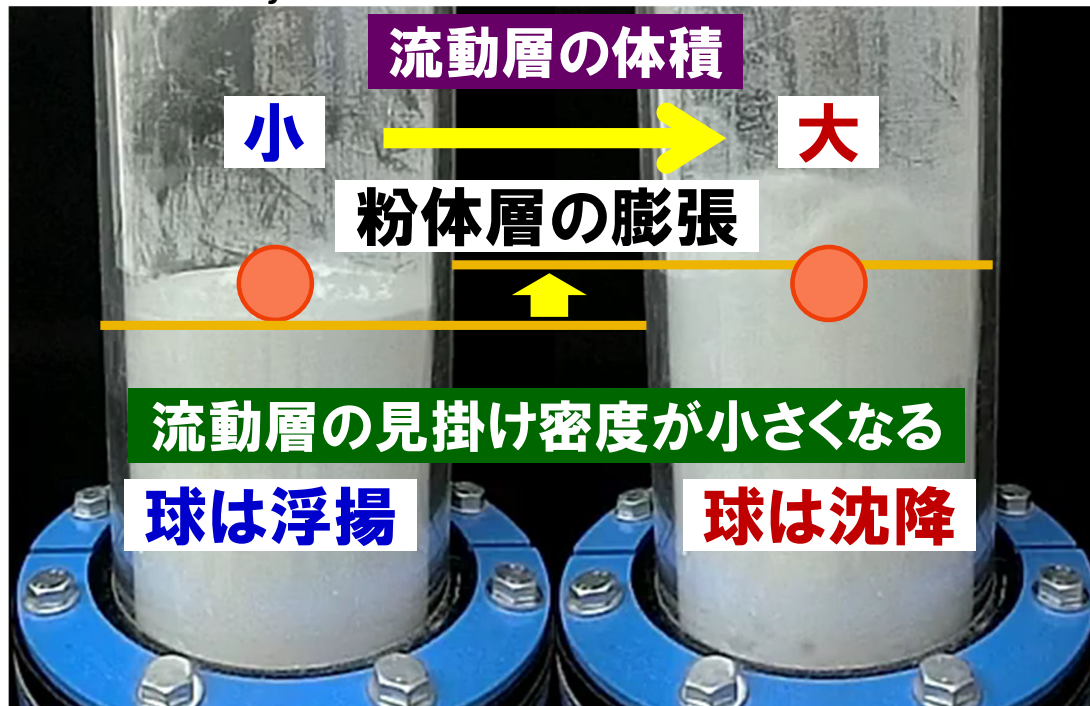
1.1 g/cm³



風速の増加と共に球は**沈降**した

なぜ風速の増加と共に球は沈降したのか？

$$u_0/u_{mf} = 1.5 \longrightarrow 4.0$$

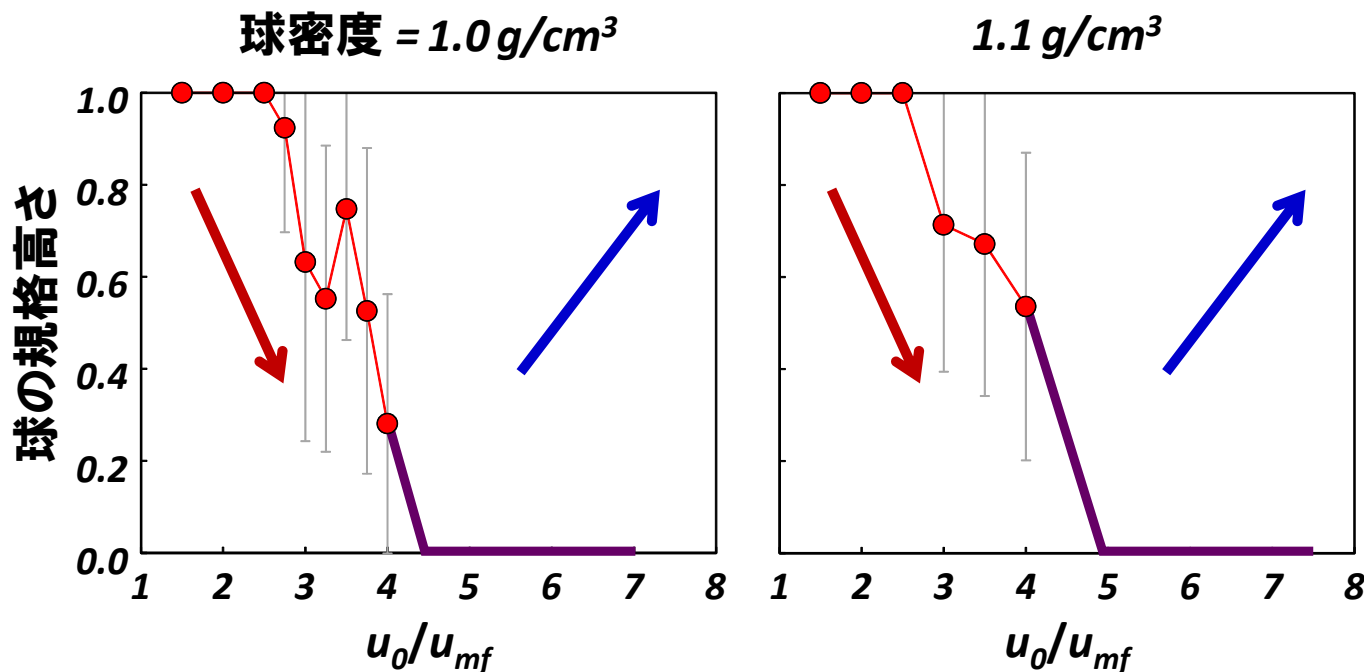


$$\text{流動層の見掛け密度} = \frac{\text{粉体質量 (= 一定)}}{\text{流動層の体積}}$$

27

密度が中程度の球

0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 g/cm³

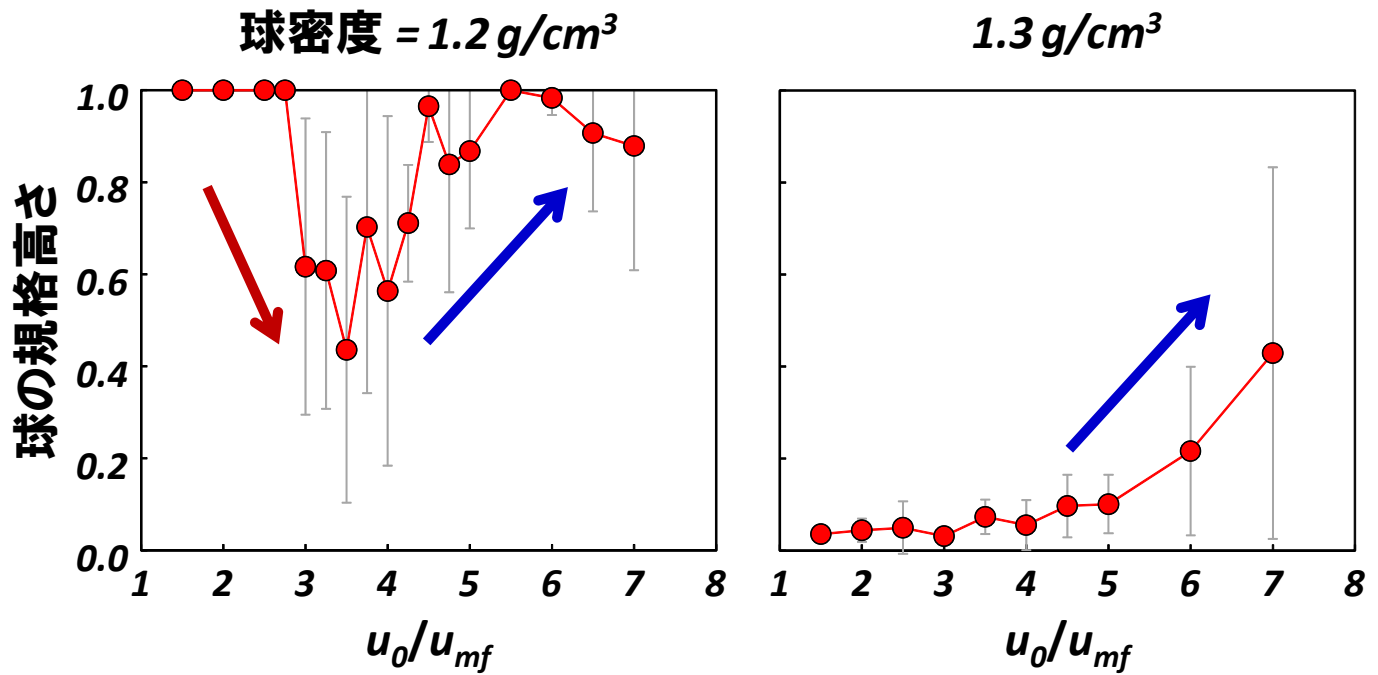


風速をより大きくすると、球は沈降すると予想した
しかし、球は浮揚した!!!

28

密度が中程度の球

0.8, 0.9, 1.0, 1.1, **1.2, 1.3**, 1.4, 1.5 g/cm³



高風速での球の沈降は不安定!!!

29

流動層 ($u_0 > u_{mf}$)

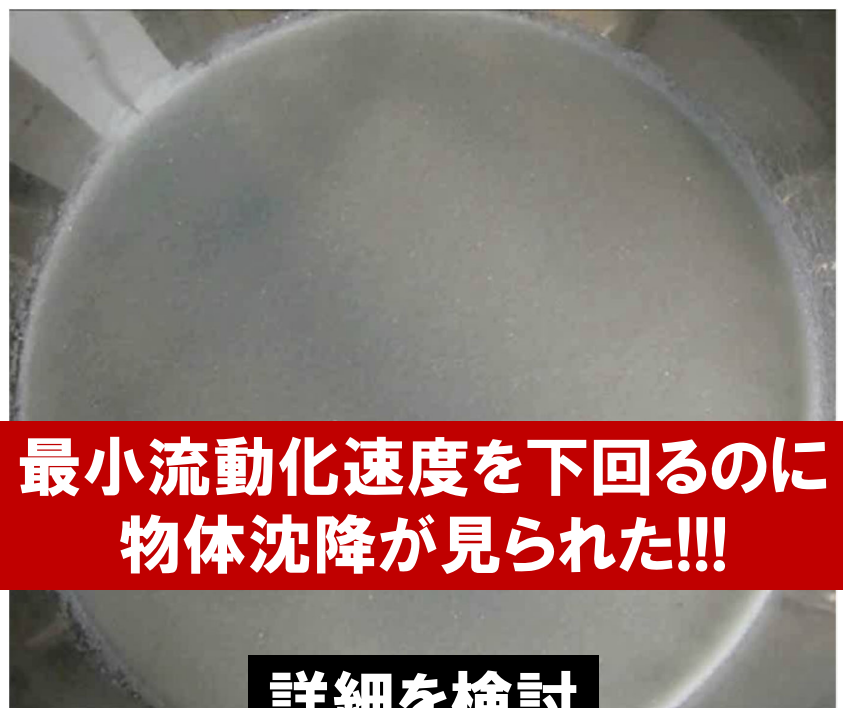


固定層 ($u_0 = 0$)



u_0 : 風速
 u_{mf} : 最小流動化速度

疑似固定層 ($0 < u_0 < u_{mf}$)

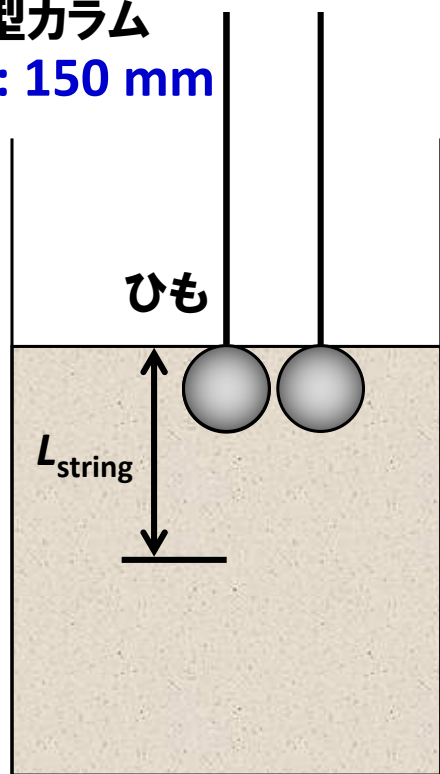


**最小流動化速度を下回るのに
 物体沈降が見られた!!!**

詳細を検討

30

円筒型カラム
内径 : 150 mm



ガラスビーズ
サイズ : 0.21 - 0.25 mm
かさ密度 ρ_{bed} : 1.53 g/cm³
層高 : 150 mm

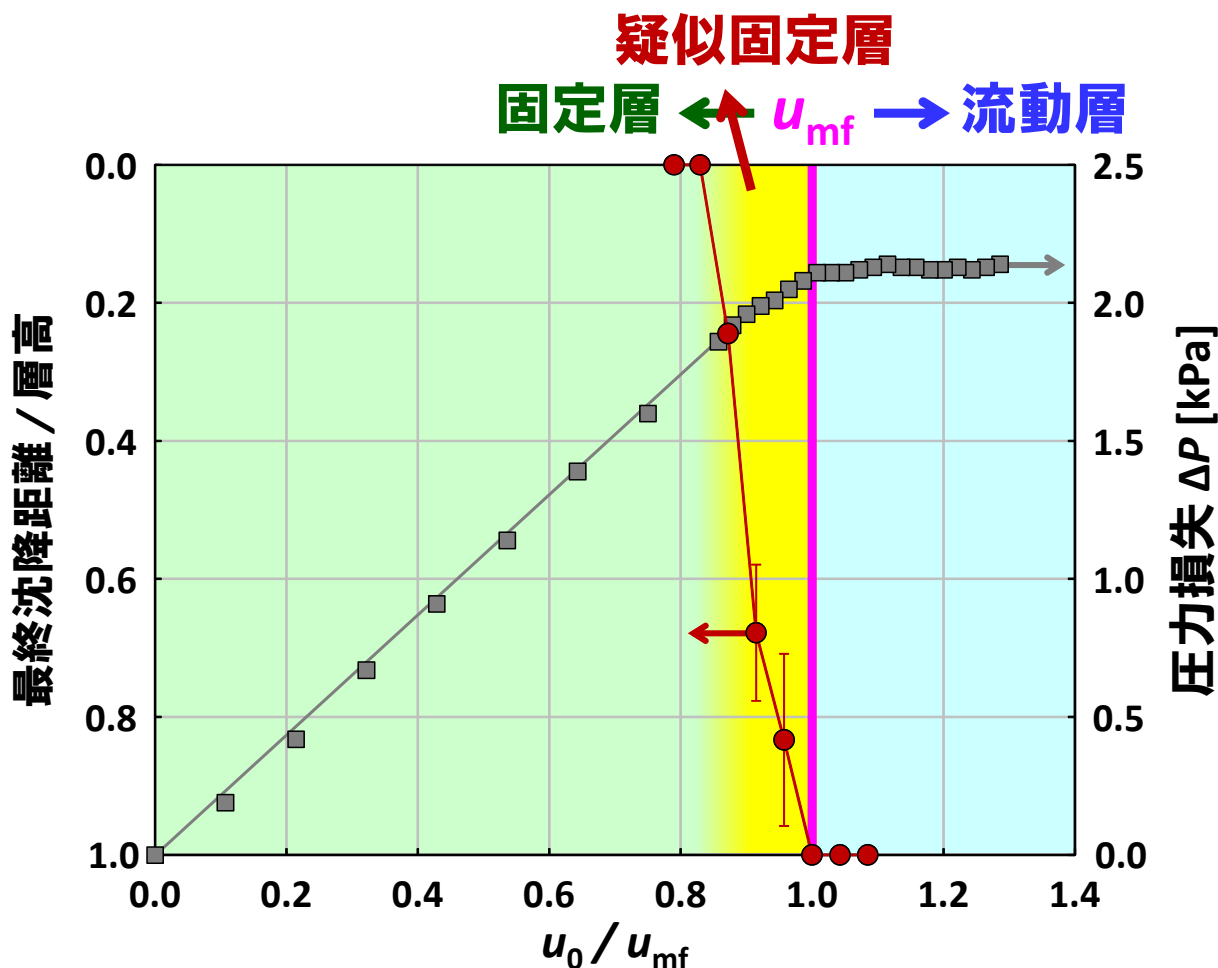
比重調整球
球直径 : 30 mm
球密度 ρ_{sphere} : 1.50 g/cm³

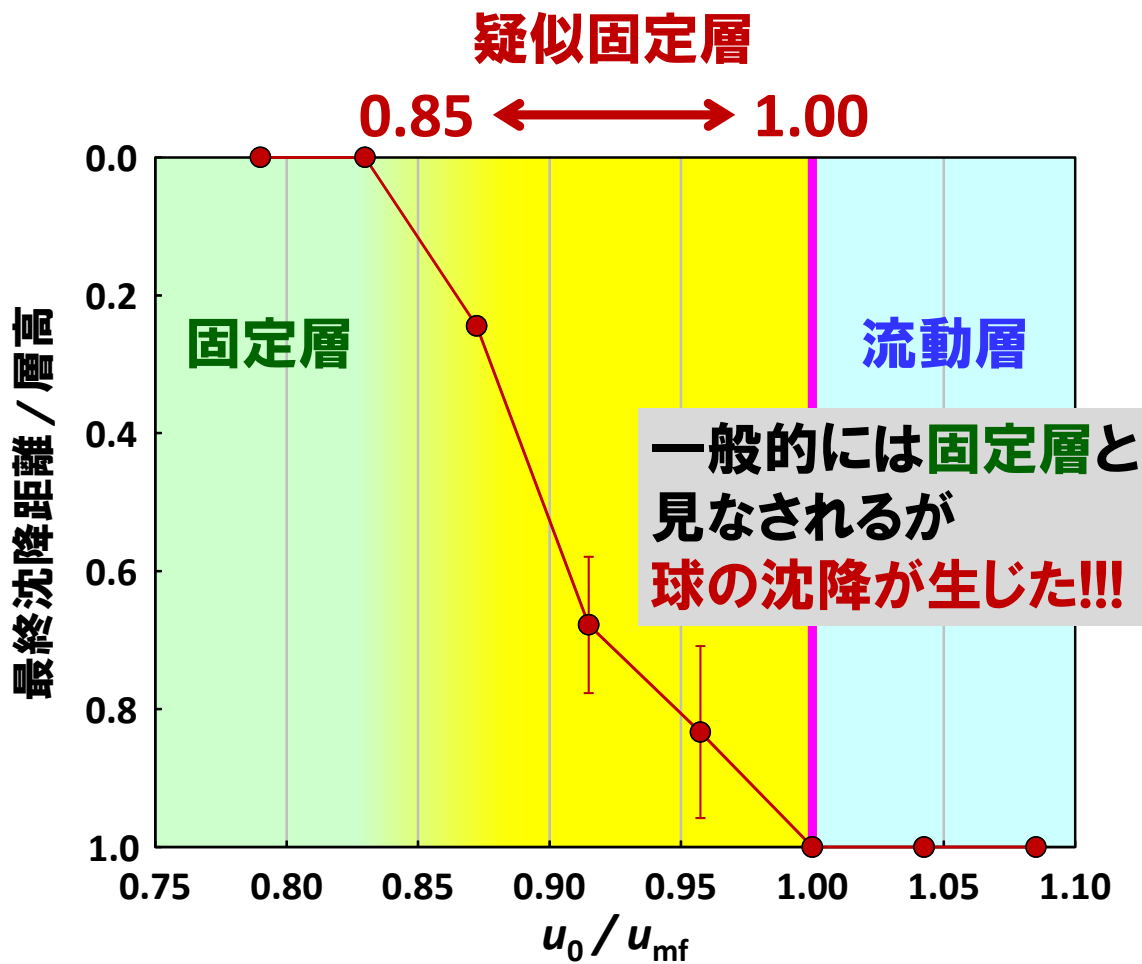
$$\rho_{sphere} / \rho_{bed} = 0.98$$

最終沈降距離
 $\frac{L_{string} + \text{球直径 } 30 \text{ mm}}{\text{層高 } 150 \text{ mm}}$ → 0 : 浮揚
1 : 沈降

$$u_0 / u_{mf} = 0.79 - 1.09$$

u_0 : 風速
 u_{mf} : 最小流動化速度





33

円筒型カラム

内径 : 150 mm

滑車

ひも

球沈降の経時変化

ガラスビーズ

サイズ : 0.21 – 0.25 mm

かさ密度 ρ_{bed} : 1.53 g/cm³

層高 : 300 mm

比重調整球

球直径 : 30 mm

球密度 ρ_{sphere} : 1.10 – 4.00 g/cm³

$\rho_{sphere} / \rho_{bed} = 0.72 - 2.61$

疑似固定層

おもり

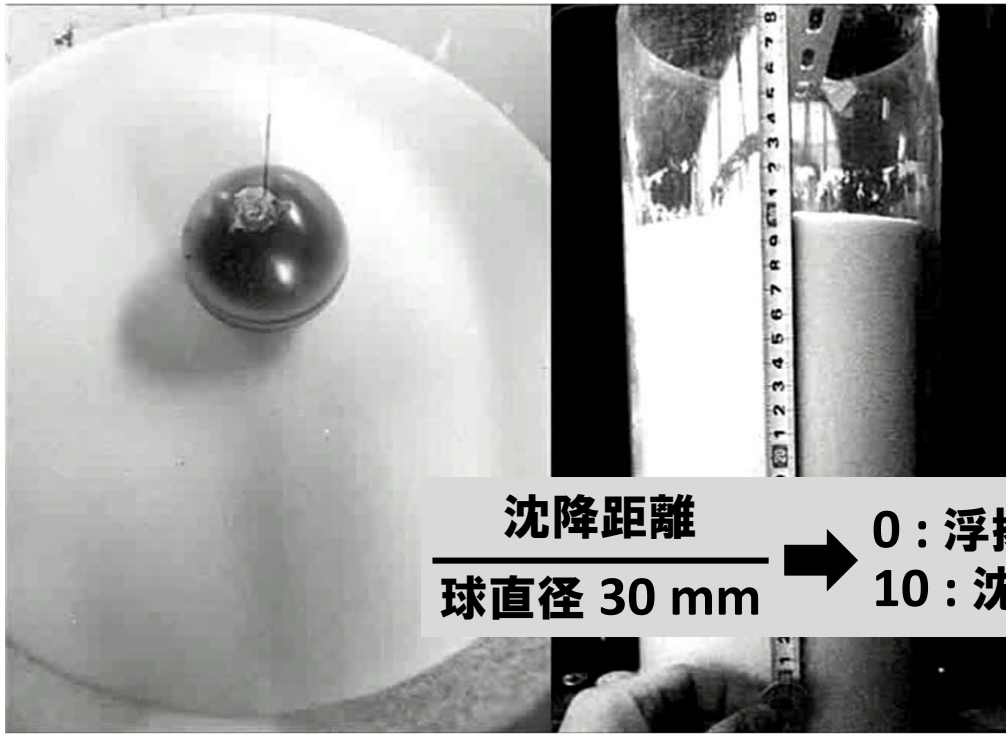
送風

$u_0 / u_{mf} = 0.95$

34

1/4 倍速

球沈降の経時変化



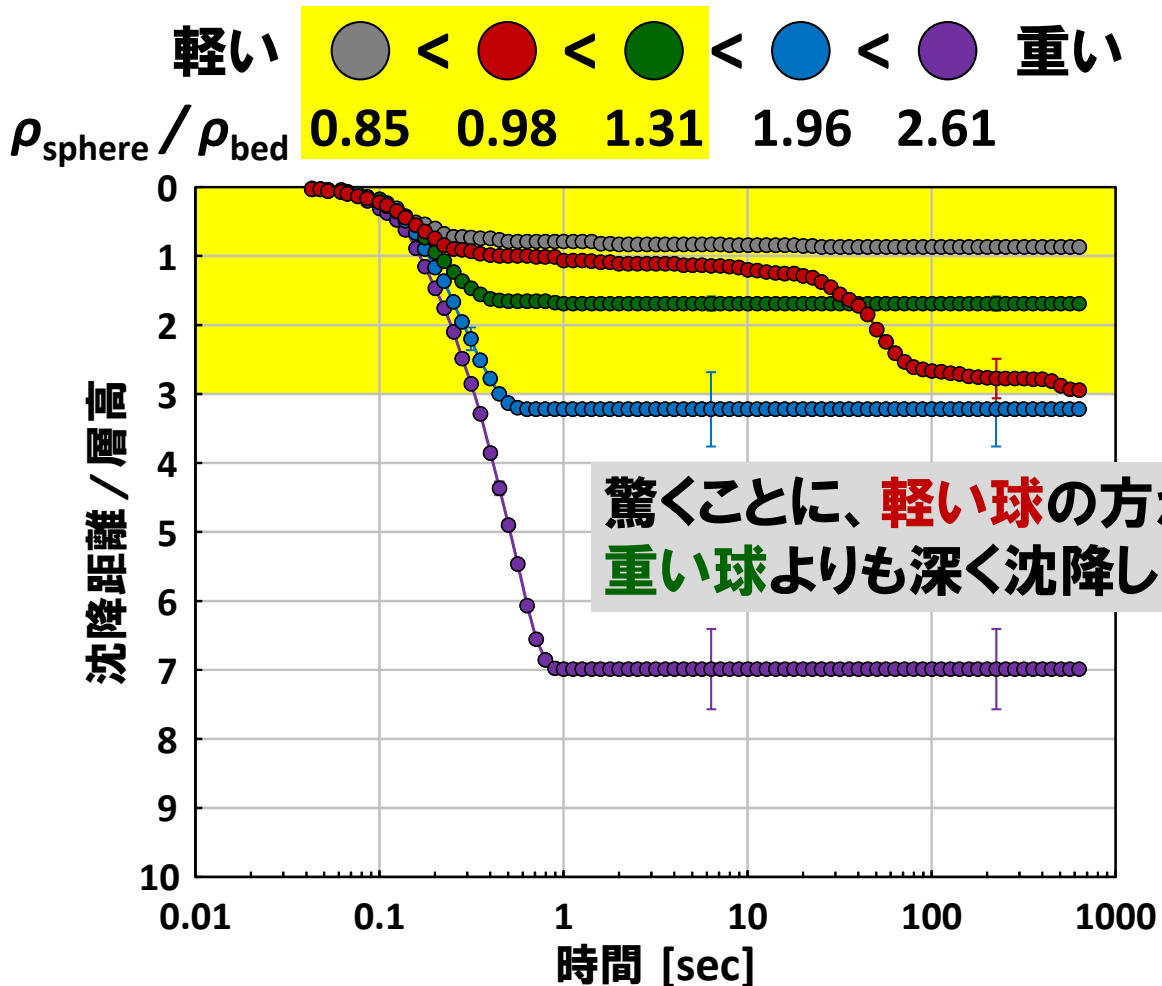
沈降距離
球直径 30 mm

0 : 浮揚
10 : 沈降

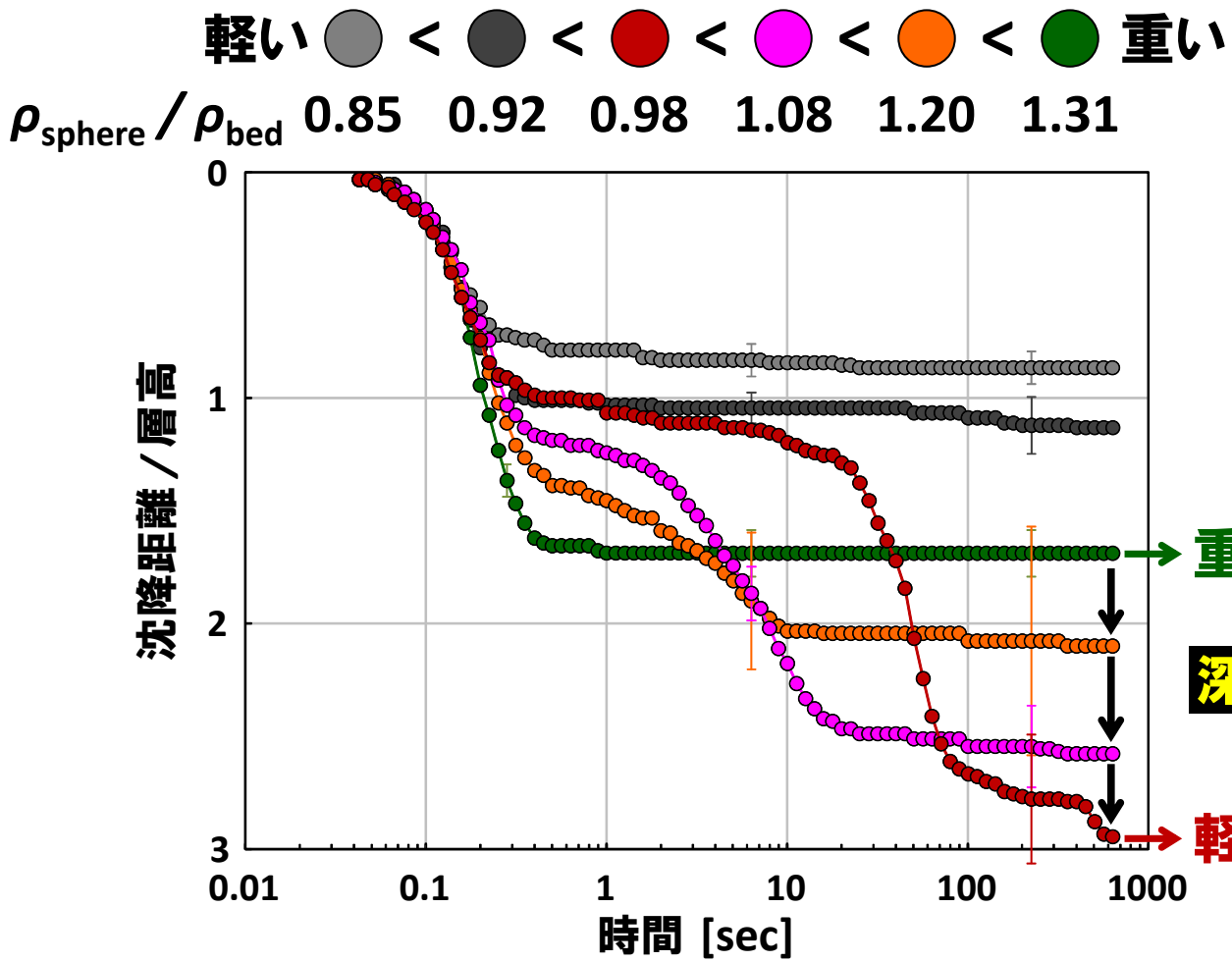
球密度 $\rho_{\text{sphere}} : 4.00 \text{ g/cm}^3$

$$\rho_{\text{sphere}} / \rho_{\text{bed}} = 2.61$$

35

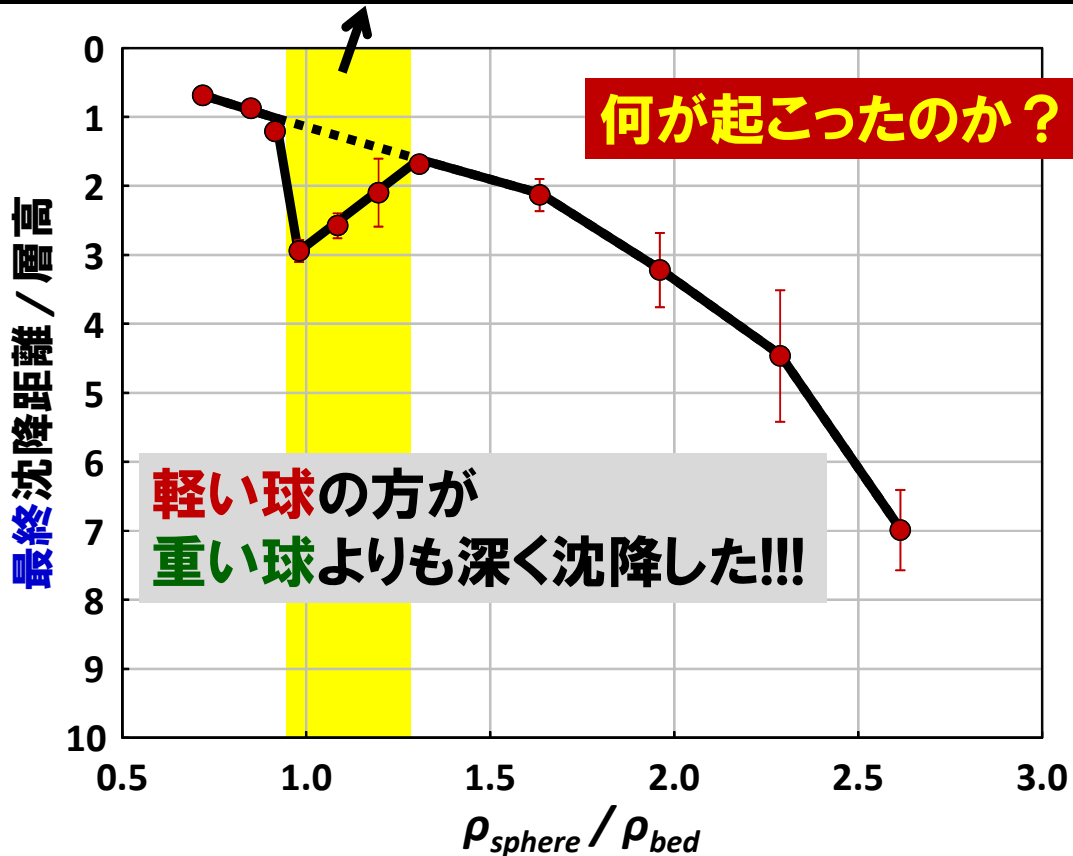


36

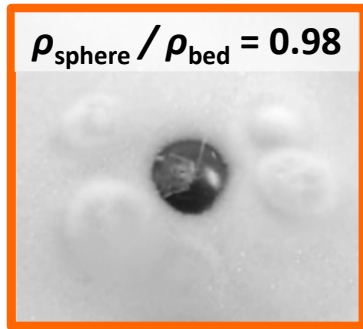
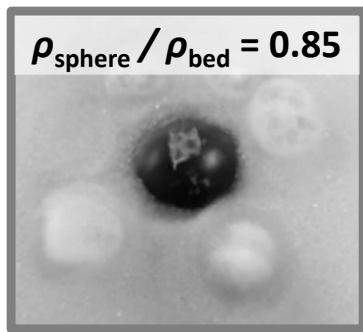


37

$\rho_{\text{sphere}} / \rho_{\text{bed}} \approx 1.0 \rightarrow$ 球密度 \approx 粉体のかさ密度

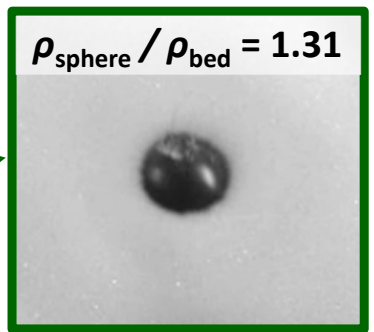
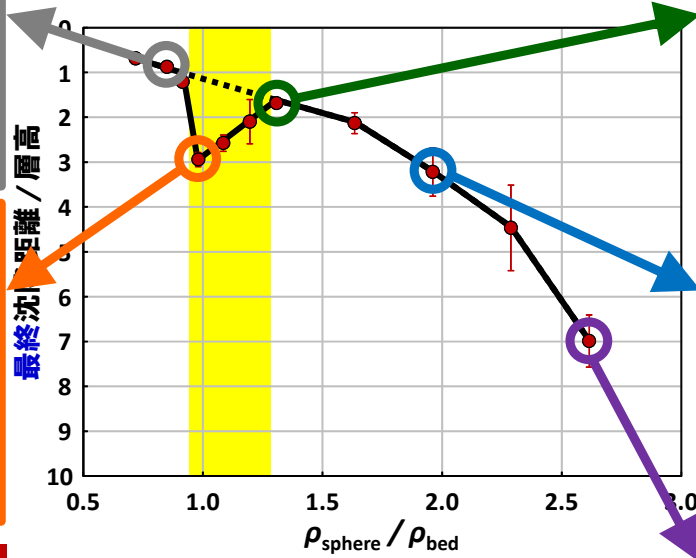


38



気泡発生有り

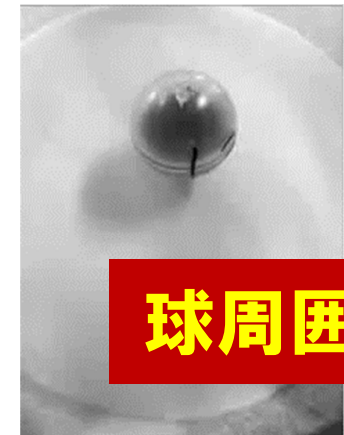
球沈降時の層表面の様子



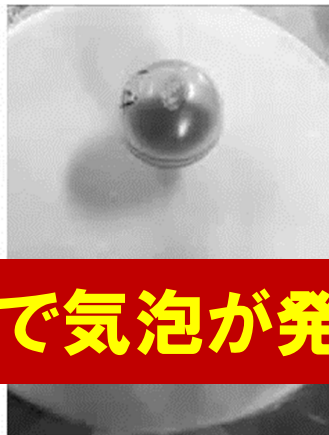
気泡発生無し



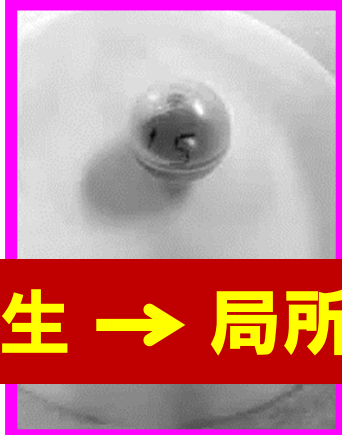
$\rho_{\text{sphere}} / \rho_{\text{bed}} = 0.85$



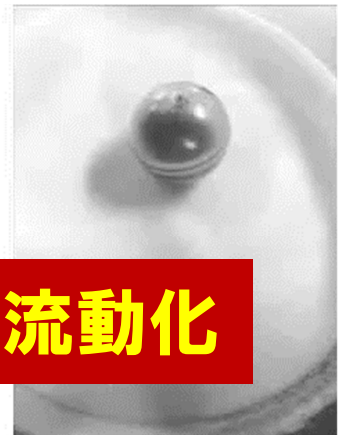
0.92



0.98



1.08

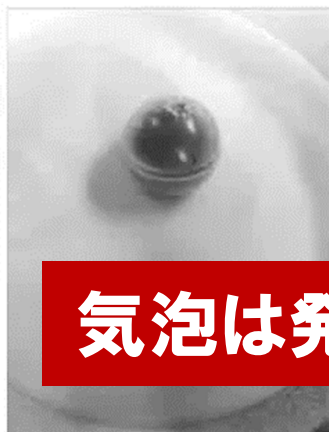


球周囲で気泡が発生 → 局所流動化

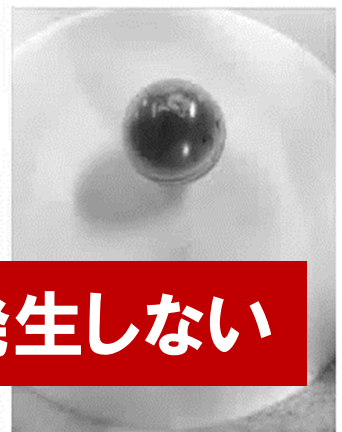
1.20



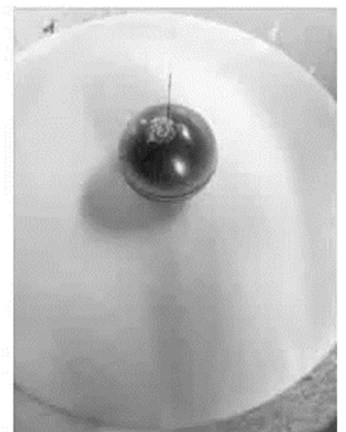
1.31



1.96

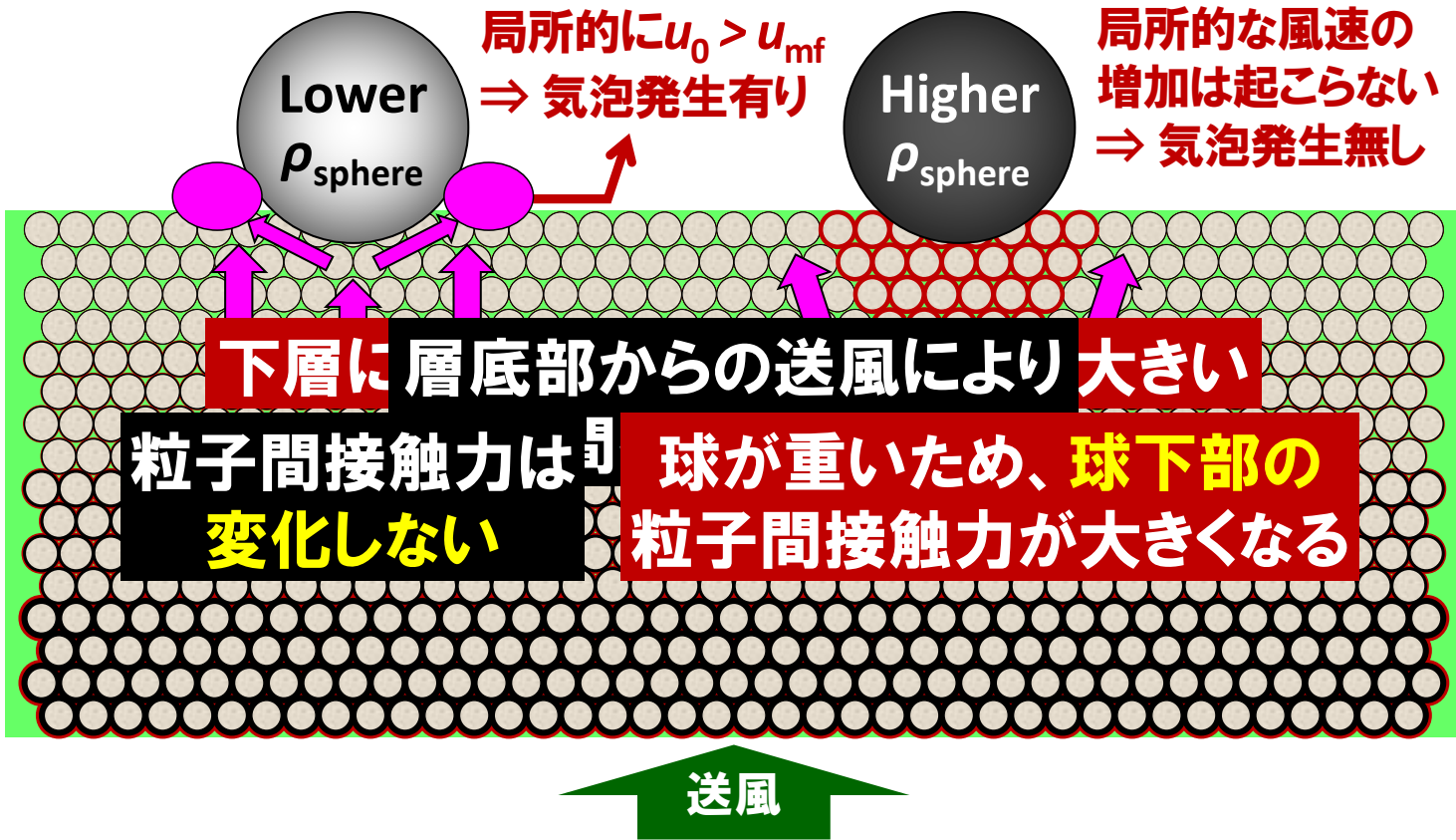


2.61

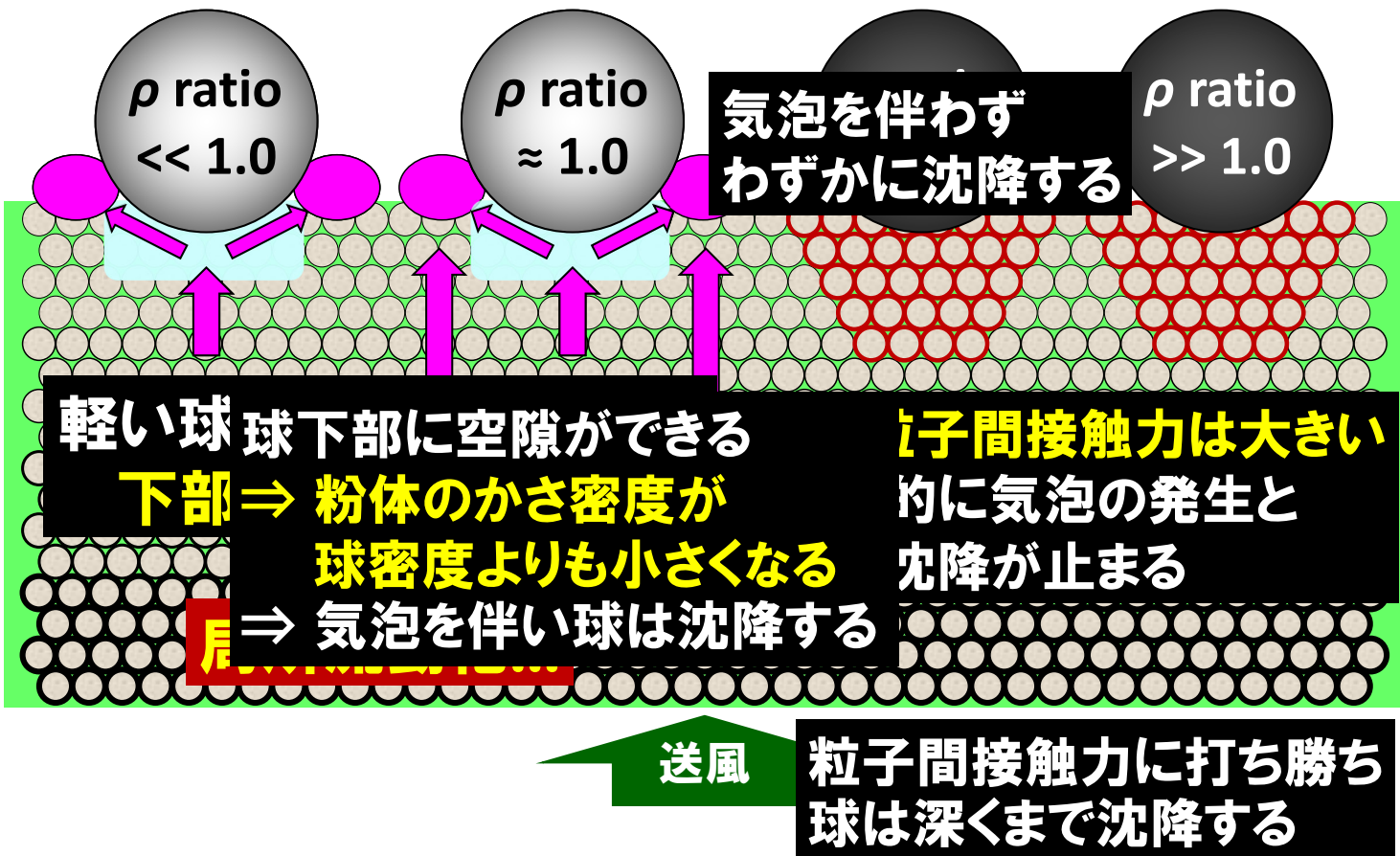


気泡は発生しない

軽い球と重い球とでの気泡発生の有無はなぜか？



球密度によって球の沈降距離が異なるのはなぜか？



流動層内での物体浮沈に基づく乾式比重分離技術



サイズ10mm以下の小さな粒の混合物の場合
浮沈が不安定になるため分離が難しい…

43

流動層内での密度偏析に基づく乾式比重分離技術



密度の小さな粉体が上へ
大きな粉体が下へ移動

鉄粉とガラス粉などの密度差の
大きな粒の混合物の分離は容易

石炭や鉄鉱石の高品位化が可能

しかし、密度差の小さな粒状混合物の分離は難しい…

そこで、下からの送風の他に上下振動を加えることで
粒状混合物の分離精度の向上を図った

44

分離対象物

- ・モデルケースである異密度の粒状粉体の混合物
- ・産業的に分離ニーズがある**廃棄物と鉱物**



建設廃棄物残渣 (建廃残渣)

木片 (有機物) と土砂 (無機物) からなる粒状混合物

東京ドーム
6.2個分!!

年間発生量 : 約228万トン



効果的な処理技術がないため、埋め立てられている

45

建廃残渣処分の現状

埋め立て用の最終処分場

建廃残渣中の**有機物の腐敗**
⇒ 悪臭・水質汚濁・火災



安定型



管理型

処分費用**5~10倍!!!**

建廃残渣の不法投棄が問題となっている

平成25年度の不法投棄の13.8%が建設廃棄物

有機物の含有率を低減して、処分費用を安くしたい…

↳ **熱灼減量** : 強熱時の重量減少割合

熱灼減量が5wt%未満

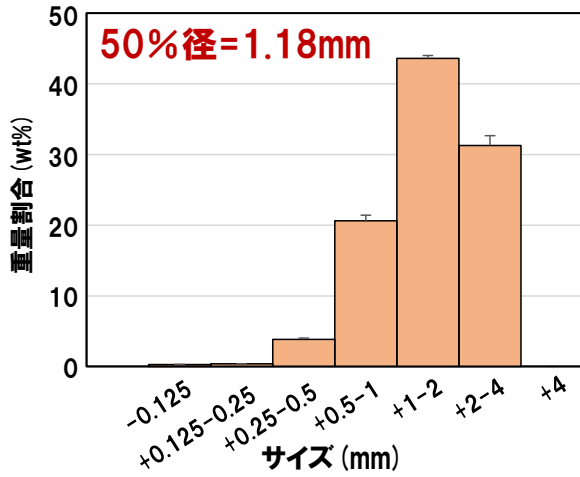


安価な安定型での処分が可能

振動流動層により有機物と無機物を分離できないか?

46

実験に用いた建廃残渣

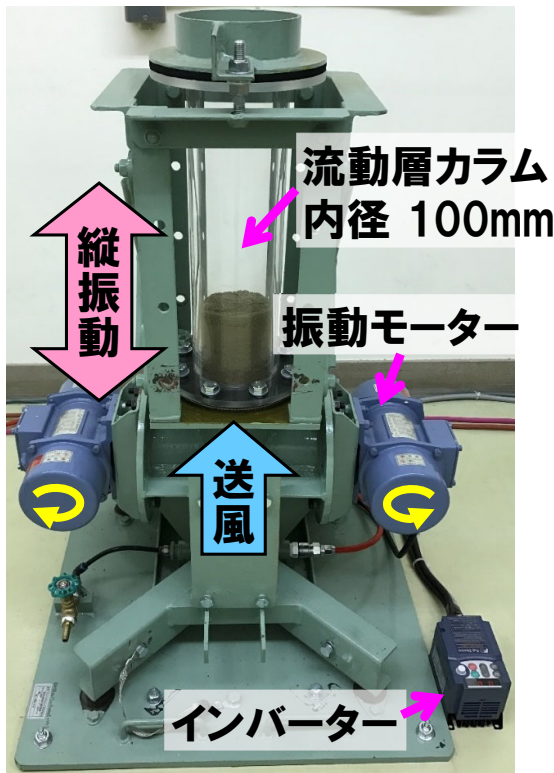


かさ密度 含水率 熱灼減量
 0.96 g/cm³ 4.26 wt% 7.88 wt%

5wt%以上なので分離が必要



振動流動層装置



建廃残渣を層高105mm充填し10分間処理

- 振動あり (送風+縦振動)
- 振動なし (送風のみ)

上層から約10mmずつ10層に分けて回収

各層のかさ密度と熱灼減量を求めた

105℃で3時間乾燥後、600℃で3時間強熱

振動条件

縦振幅	振動周波数	振動強度
0.50 mm	22.5 Hz	1.0 G

※ 振動強度 = $\frac{\text{振動加速度 (振幅} \times \text{角速度}^2)}{\text{重力加速度}}$

振動なし (送風のみ)

振動あり (送風+縦振動)



風速 30cm/s

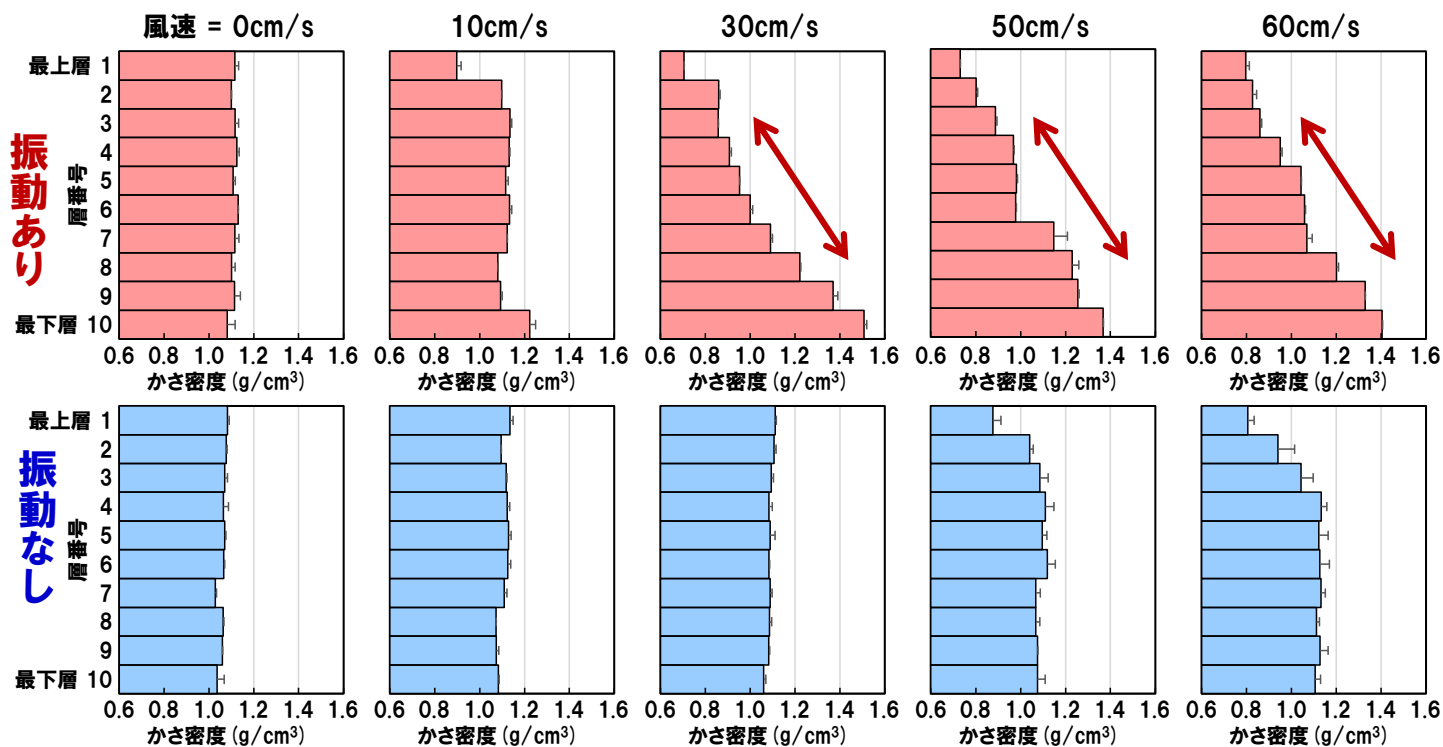
60cm/s

30cm/s+1.0G

60cm/s+1.0G

分離時間10分・40倍速再生

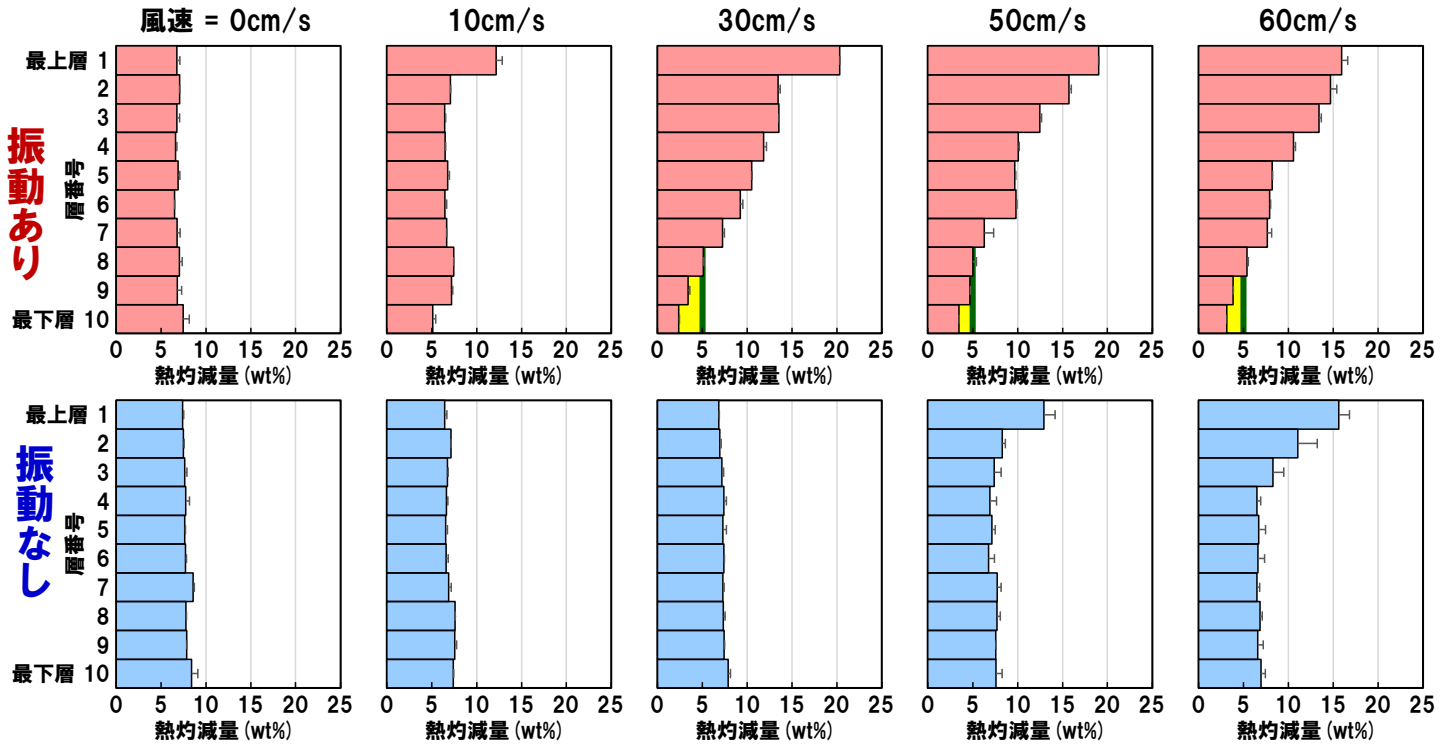
かさ密度



送風のみでの流動層に振動を加えると密度偏析が生じた

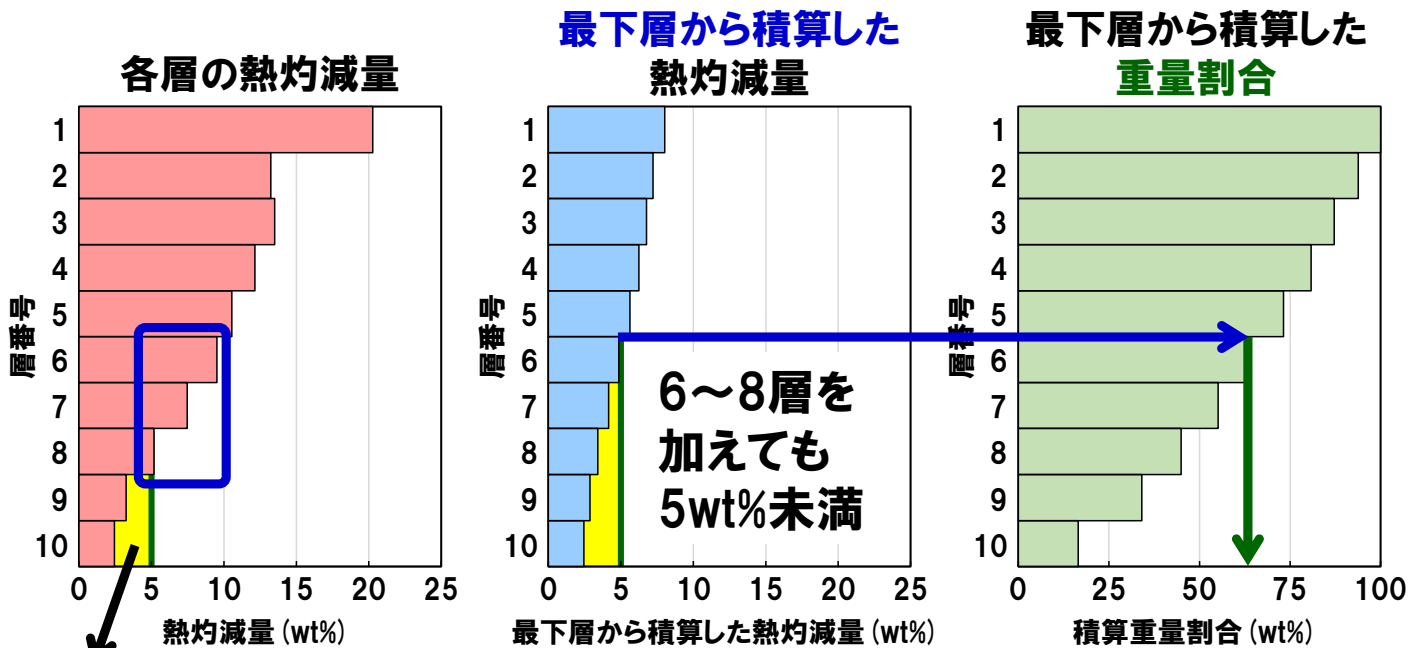
熱灼減量

メリットはあるのか？



振動ありでは下層の熱灼減量が5wt%未満となった

熱灼減量5wt%未満としてどの程度回収できるのか？

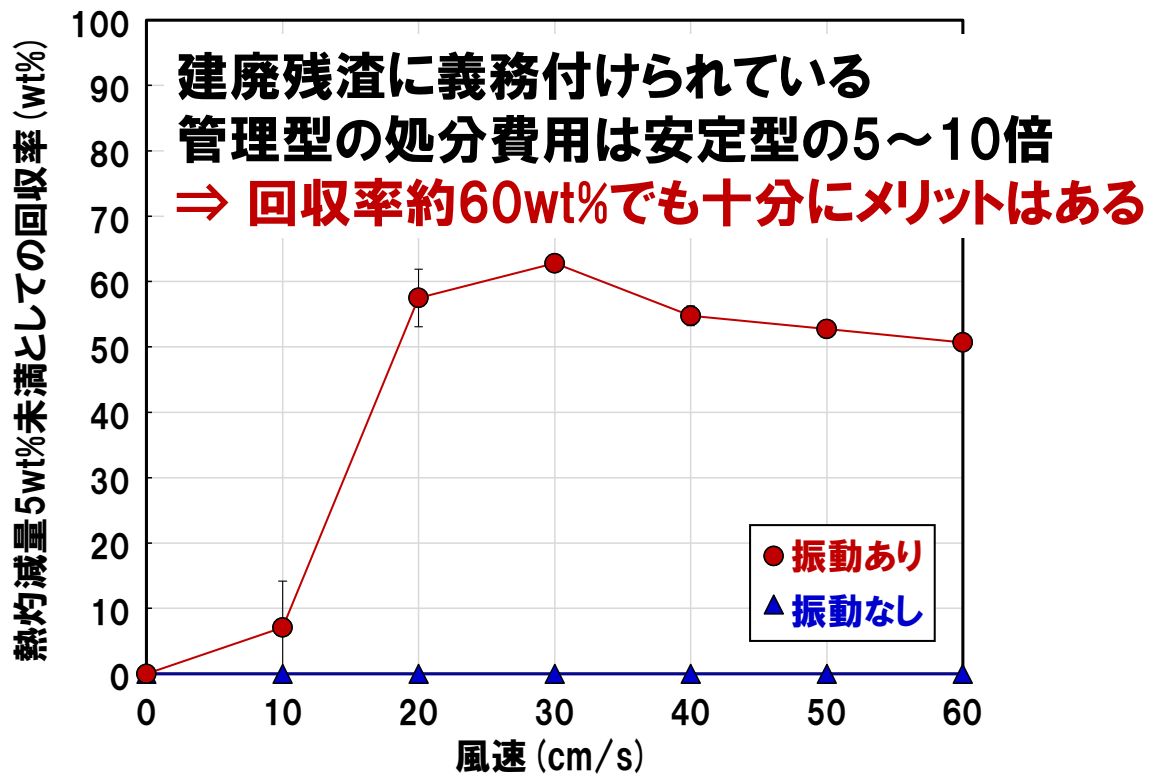


全体として5wt%未満であれば
良いのでまだ余裕がある

6~8層を加えても大丈夫では!?

5wt%未満として
63.1wt%を回収

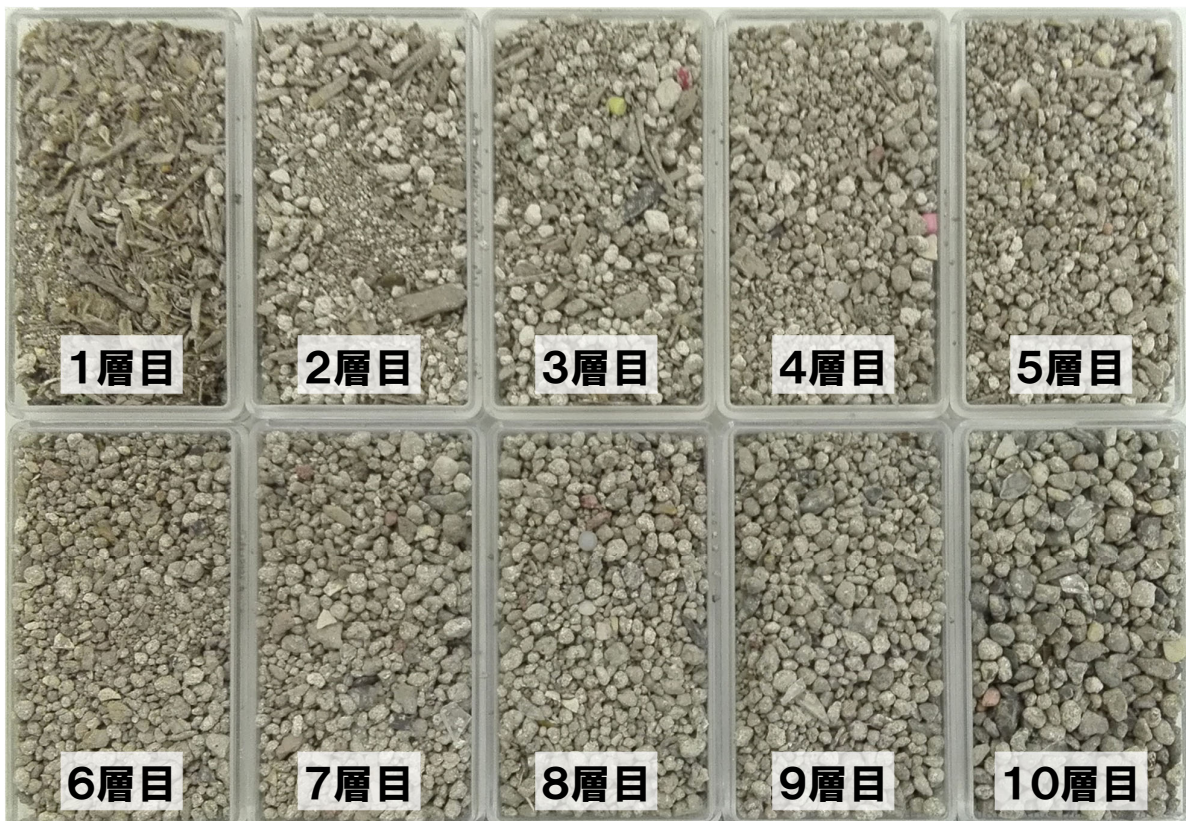
熱灼減量5wt%未満としての回収率



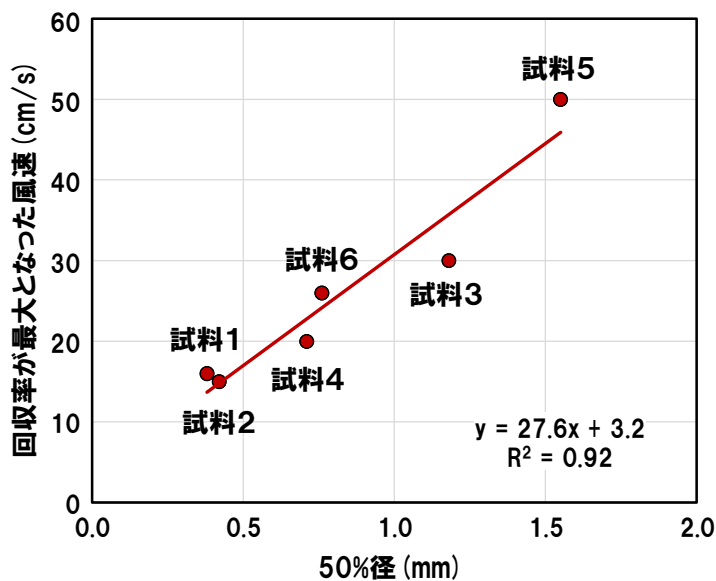
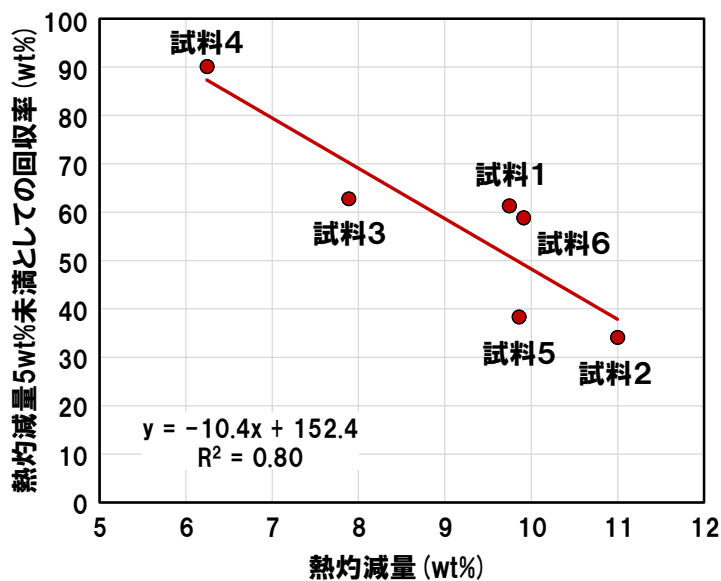
各層の写真

振動あり・風速30cm/s

上層に有機物



下層に無機物



分離対象の試料粉体



豪州の鉱物会社から入手したミネラルサンド

重鉱砂 (2.5g/cm³) と珪砂 (1.5g/cm³) の混合物

↳ 輸入: ジルコニア化合物や耐火物



豪州の採掘現場では

処理を8回繰り返す
数百キロの水輸送

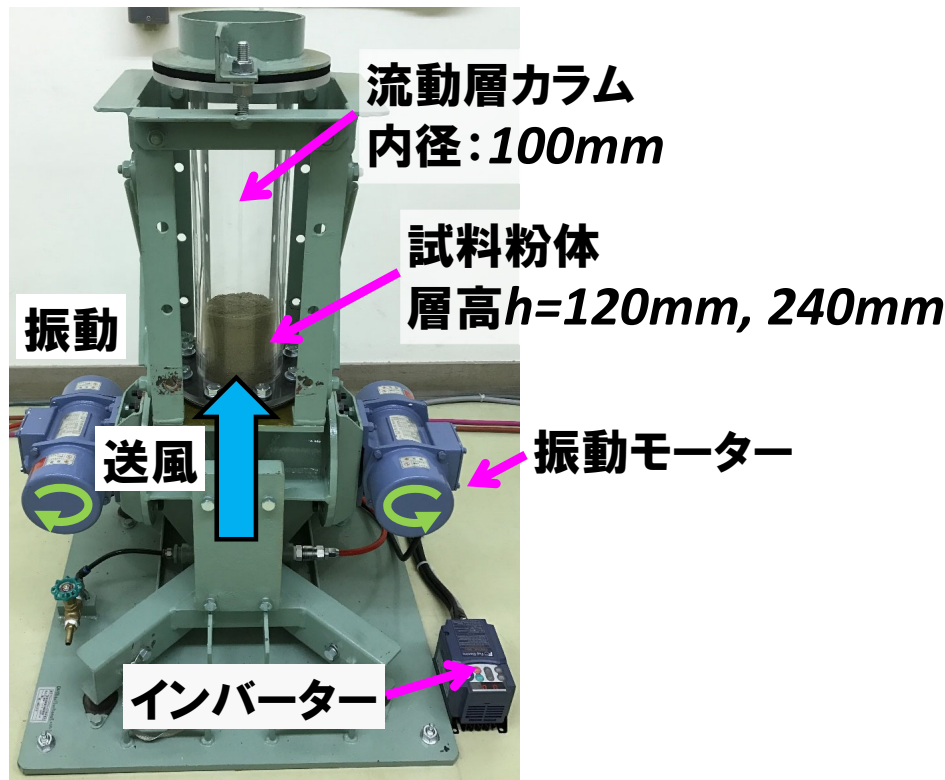
スパイラル式の湿式比重分離技術を利用



流動層式の乾式比重分離技術を試行

0.063~0.125mmを分離対象の試料粉体とした

振動流動層

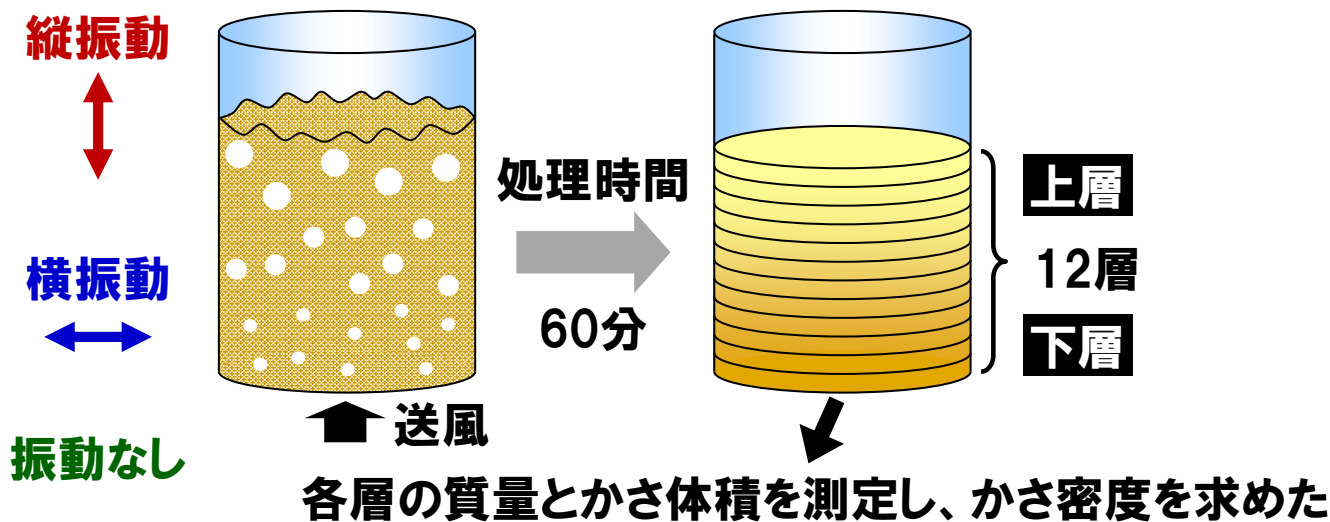


$$\text{振動強度 } \Gamma = A \cdot 10^{-3} \cdot (2\pi f)^2 / g$$

振 幅 周 波 数

57

実験方法



1) 風速変化 u_0/u_{mf} & 2) 振動強度変化 Γ

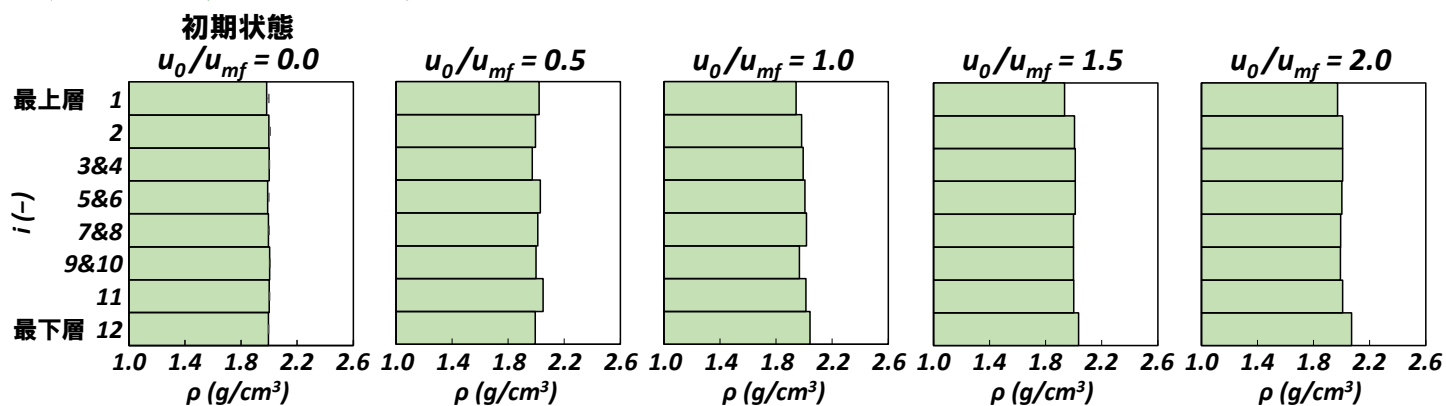
↓
最小流動化速度: 粉体が流動化し始める風速

58

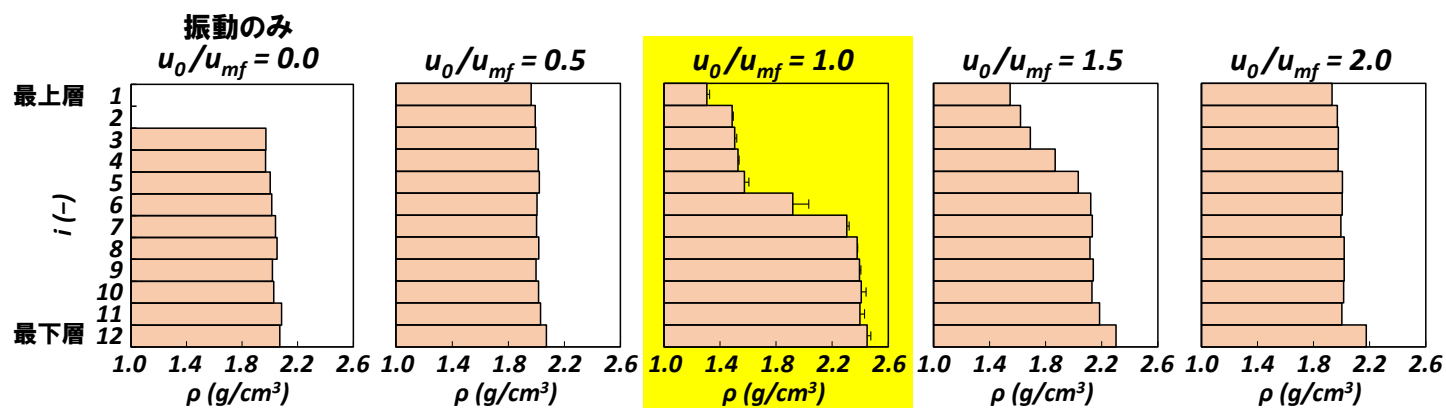
1) 風速変化 u_0/u_{mf}

振動なし (送風のみ)

$h = 120\text{mm}$



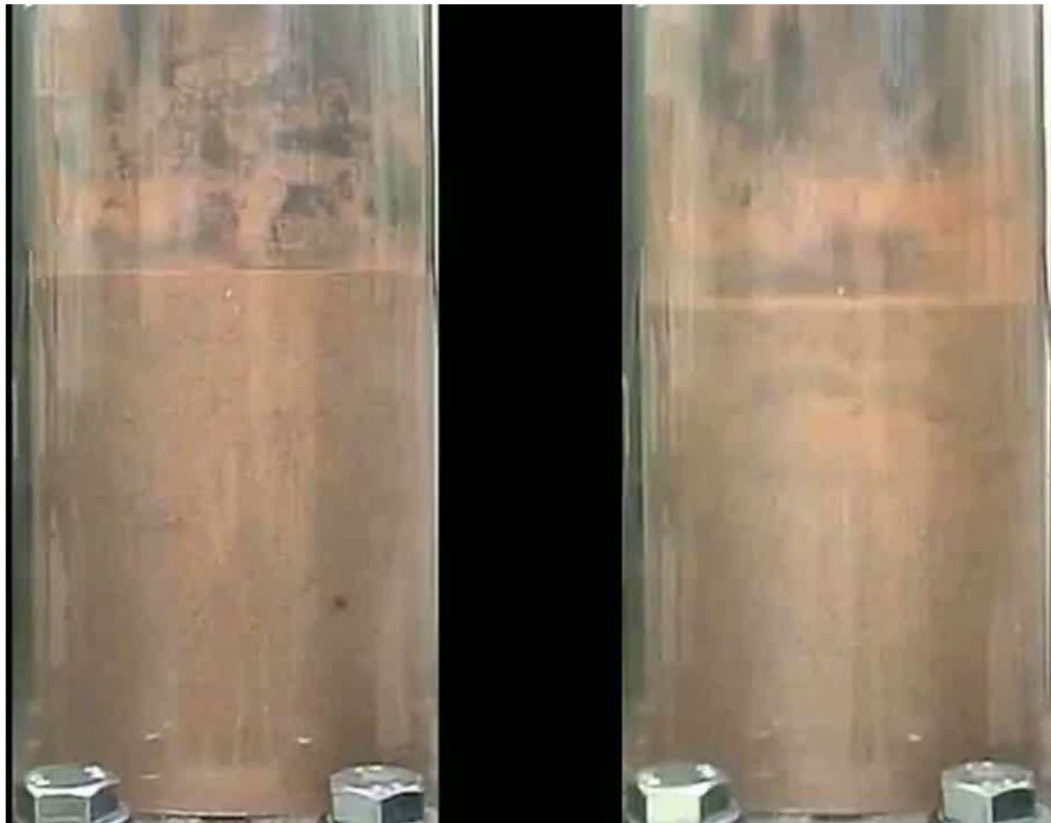
縦振動 (振動強度 $\Gamma = 1.2$)



$h = 120\text{mm}$

振動なし
 $u_0/u_{mf} = 1.5$

縦振動
 $u_0/u_{mf} = 1.0$ & $\Gamma = 1.2$



x300 speed

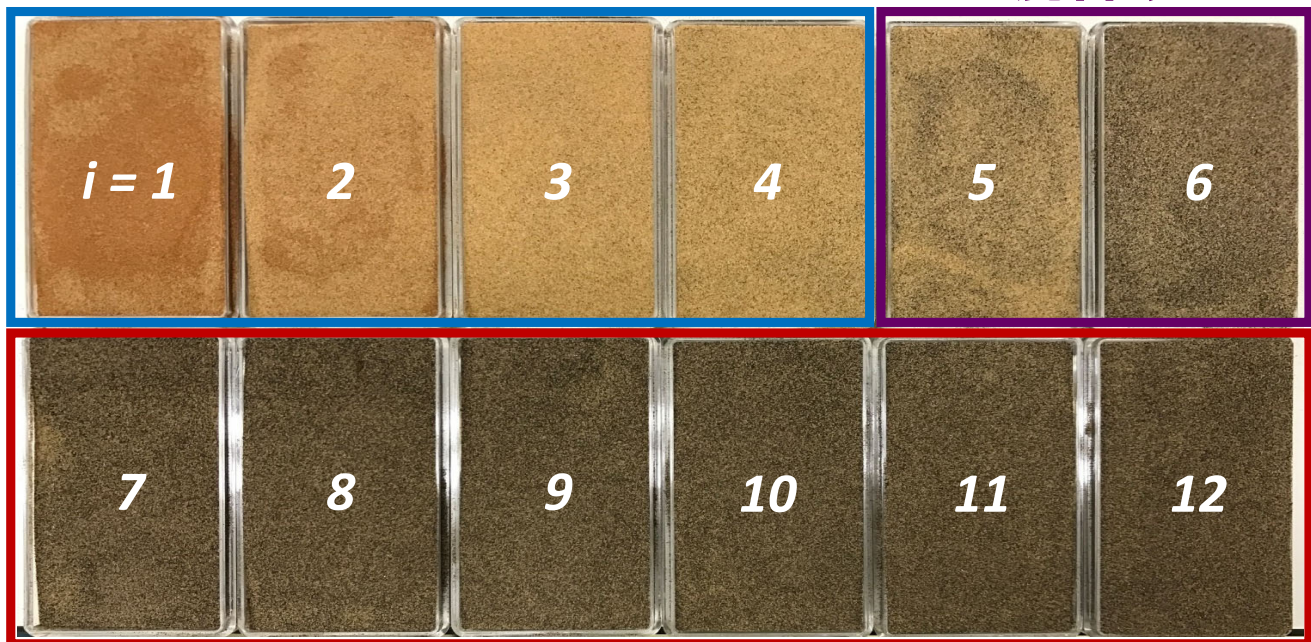
61

縦振動 ($u_0/u_{mf} = 1.0$ & $\Gamma = 1.2$)

$h = 120\text{mm}$

珪砂

混合砂

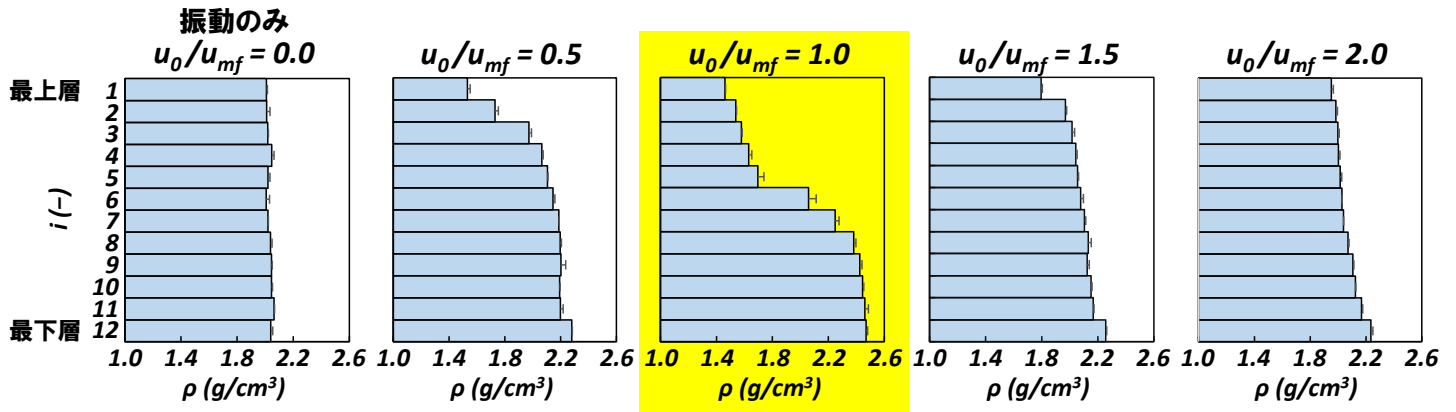


重鉍砂

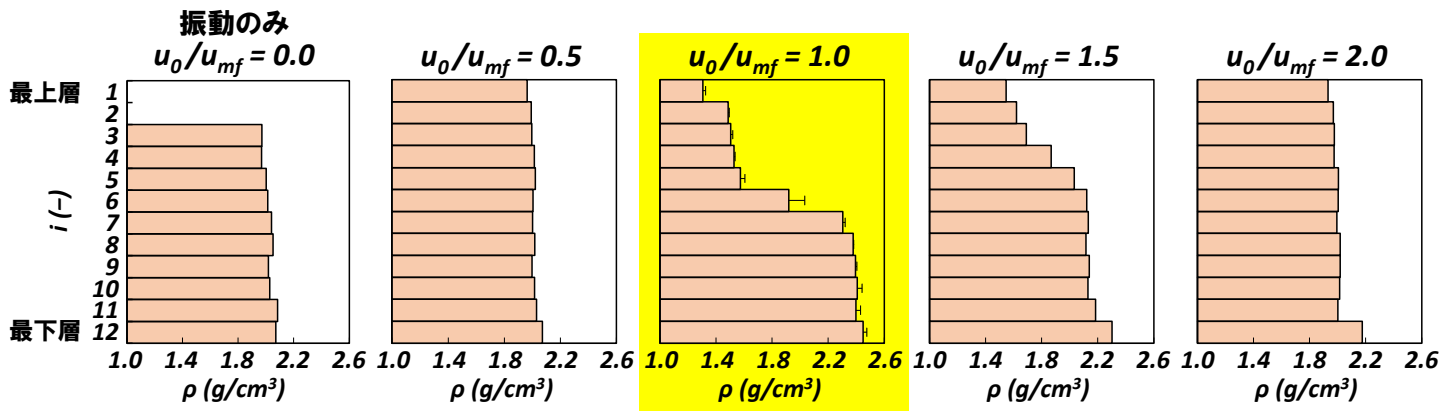
62

横振動 (振動強度 $\Gamma = 1.2$)

$h = 120\text{mm}$



再掲・縦振動 (振動強度 $\Gamma = 1.2$)



63

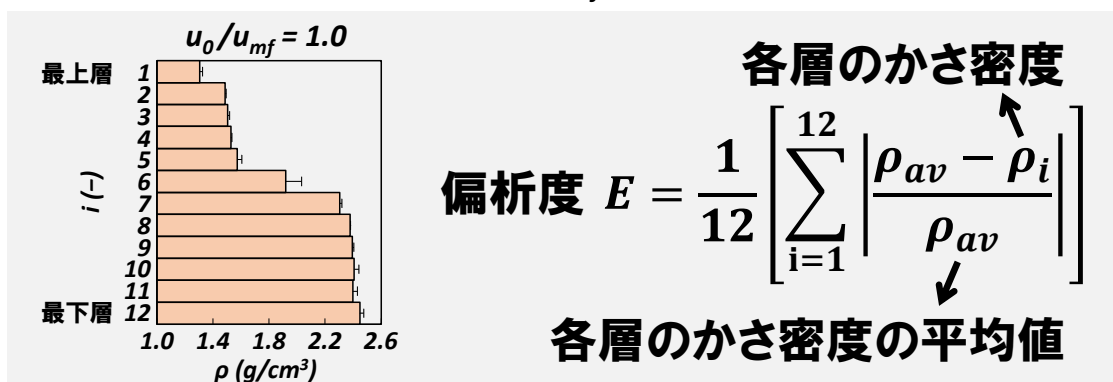
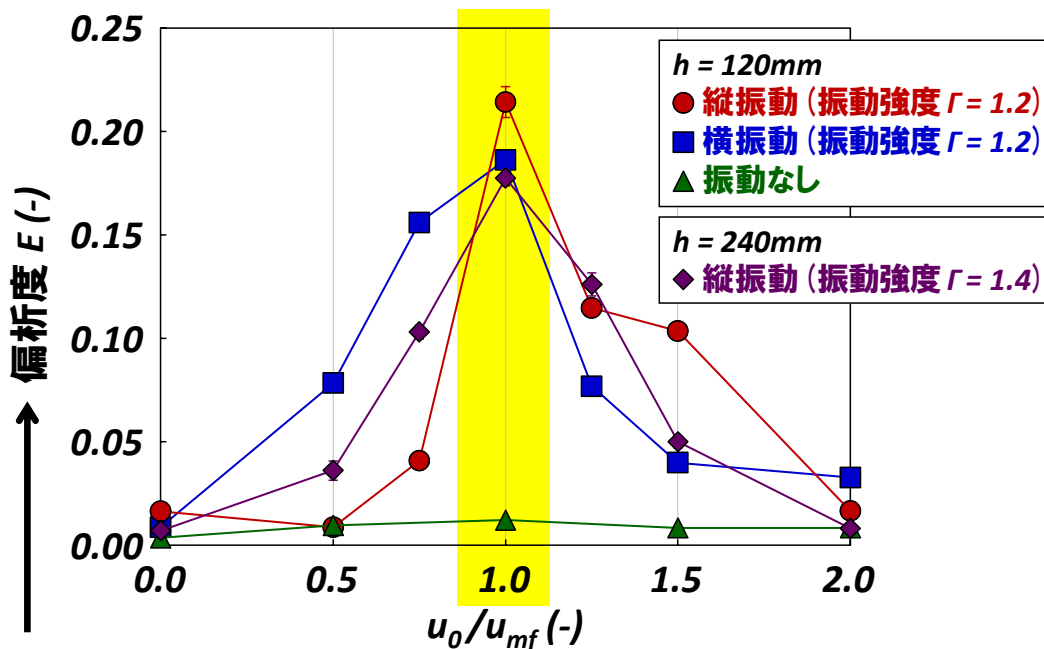
振動なし
 $u_0/u_{mf} = 1.5$

(手前と奥の) 横振動
 $u_0/u_{mf} = 1.0$ & $\Gamma = 1.2$



x300 speed

64



65

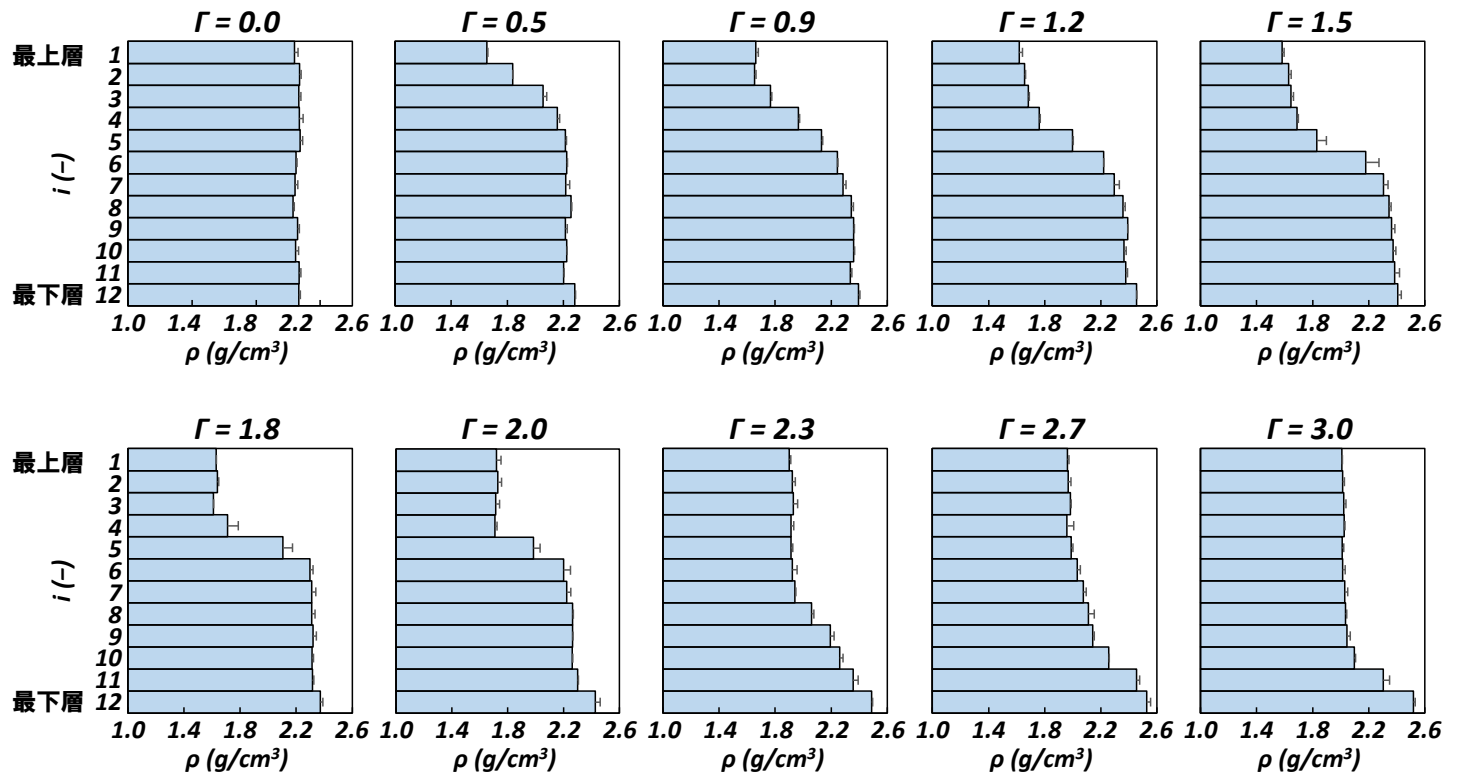
2) 振動強度変化 Γ

(風速 $u_0/u_{mf} = 1.0$)

66

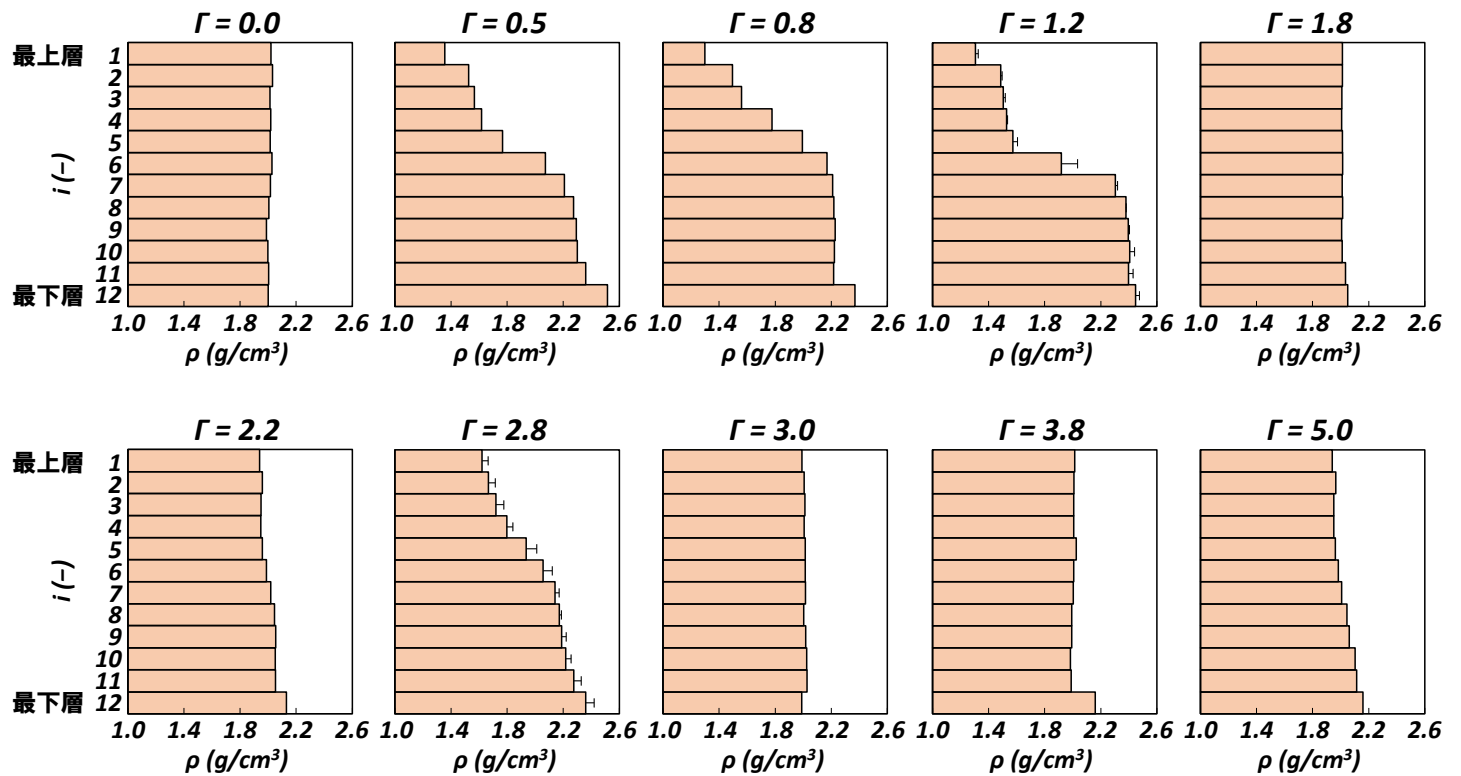
横振動

$h = 120\text{mm}$



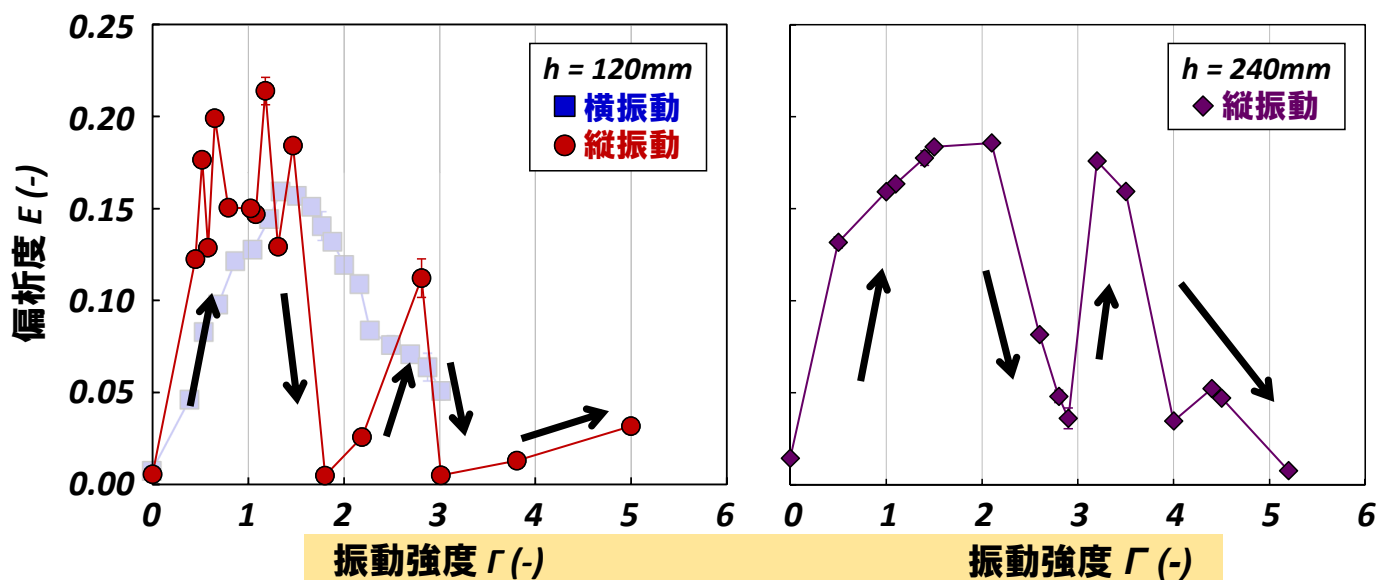
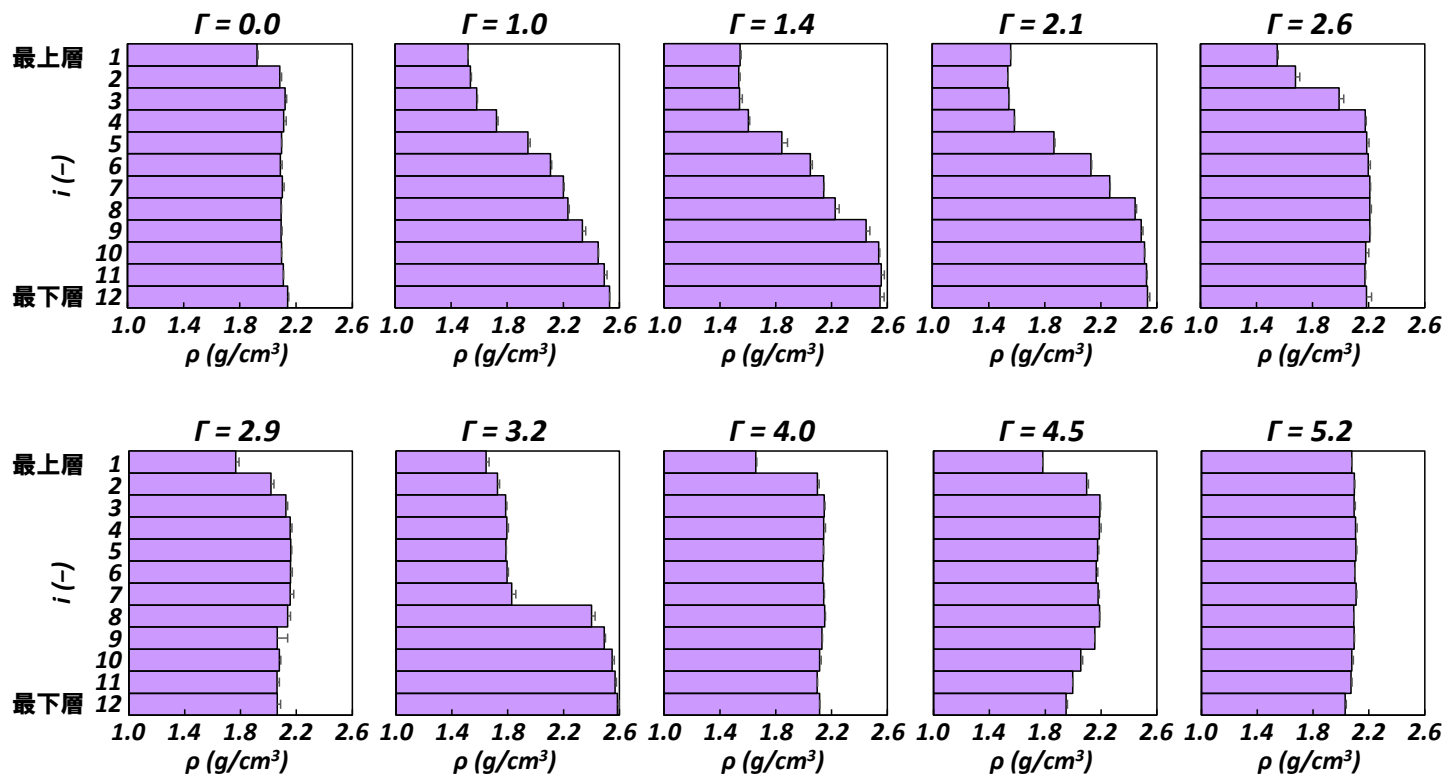
縦振動

$h = 120\text{mm}$



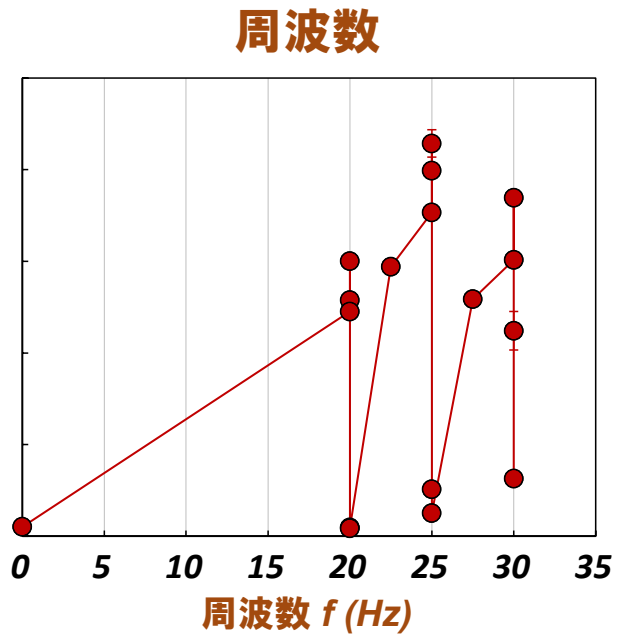
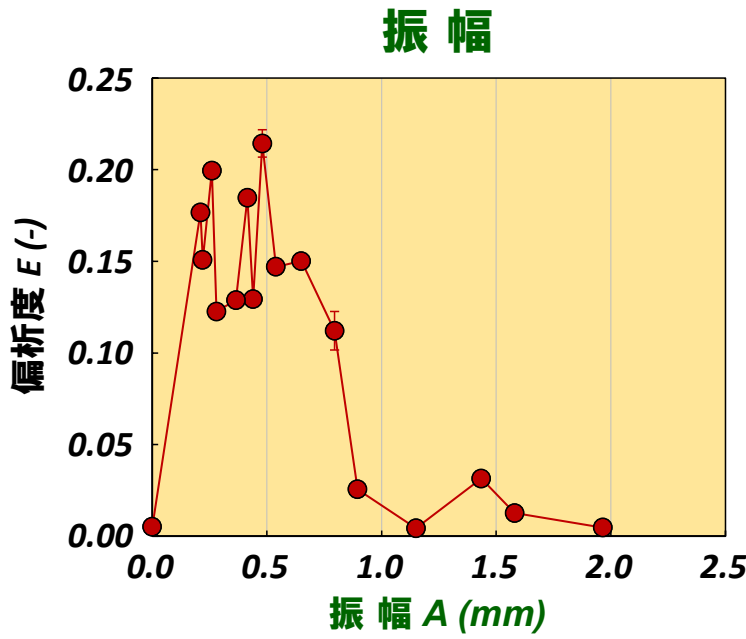
縦振動

$h = 240\text{mm}$



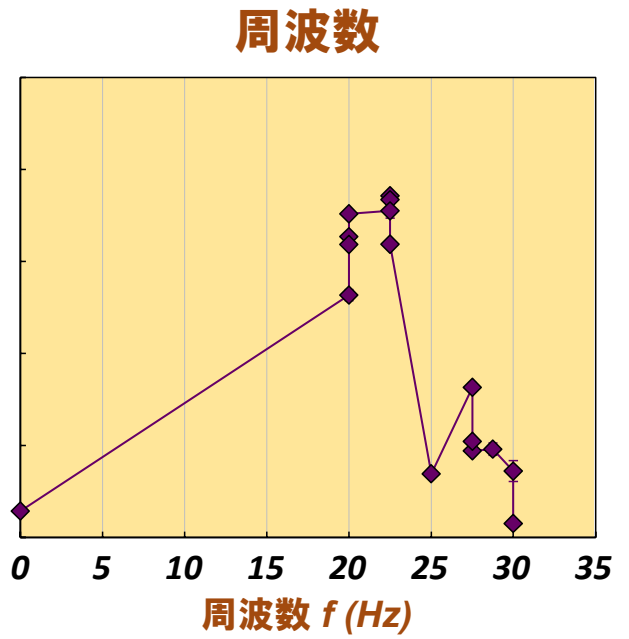
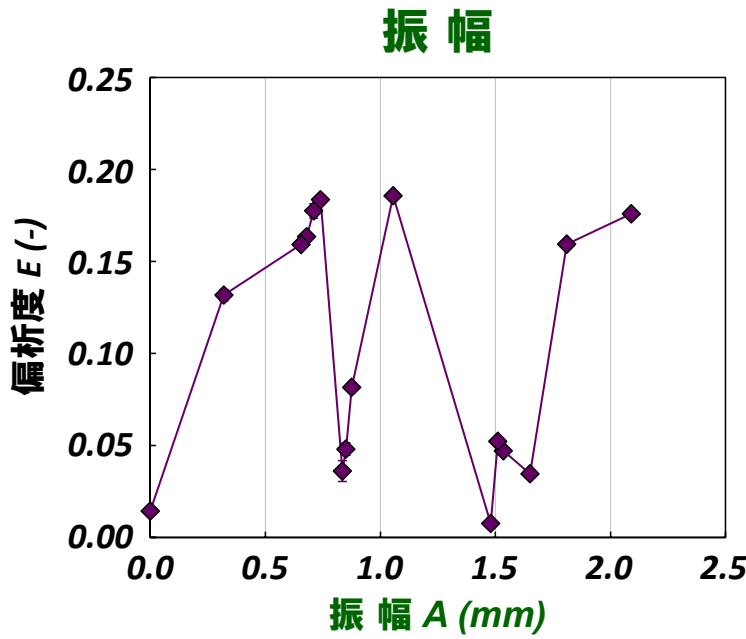
振動強度 $\Gamma = A \cdot 10^{-3} \cdot (2\pi f)^2 / g$
 振幅 周波数

$h = 120\text{mm}$

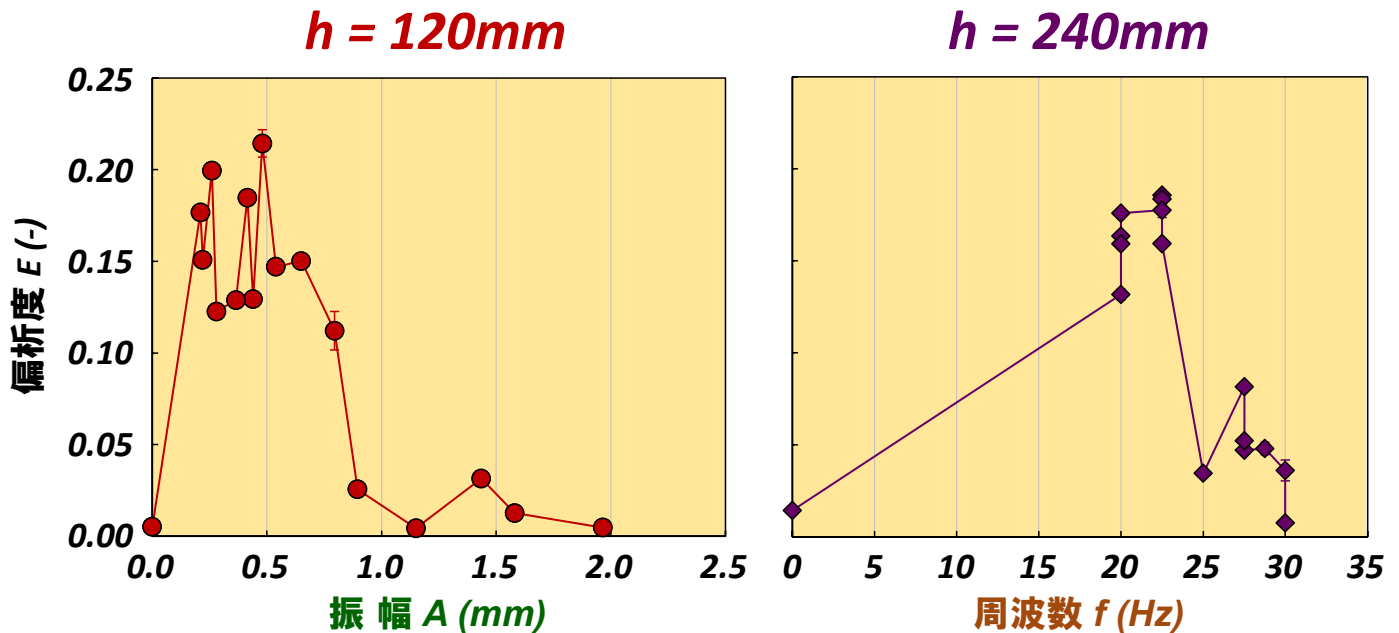


71

$h = 240\text{mm}$



72



**非常に複雑で理解に苦しむ…
メカニズムの提案は困難…**

まとめ: 従来の湿式比重分離技術の代替として
固気流動層内の物体浮沈と密度偏析に基づく
乾式比重分離技術を利用可能である。
物理的に非常に興味深い現象が見られ
分離メカニズムについては未解明な部分が多い。

謝辞: 本研究は、以下の助成を受けて遂行された。
ここに記して感謝の意を表す。

NEDO産業技術研究助成事業 (04A19506d)
NEDO産業技術研究助成事業 (08E52501d)
科研費・若手研究A (17686067)
科研費・基盤研究B (18H03406)
科研費・基盤研究B (21H03646)