

## (第10回) 2014年度・研究助成報告

|                 |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|
| 研究題名            | ワイヤレスセンサシステムによる流動層中の流体力計測         |
| 研究期間            | 2014年4月1日～2015(2016)年3月31日        |
| 研究機関・所属<br>研究者名 | 北海道大学大学院工学研究院・環境循環システム部門<br>原田 周作 |

## 1. 2014(2015)年度研究成果の概要

本研究では、固気流動層中の粗大物体の浮沈運動に関して、ワイヤレスセンサシステムを用いて物体に作用する力を測定することにより、そのメカニズムの解明を目指した。Geldert の分類で B 粒子に対応する気泡流動層中に、物体の作用力を非接触で測定可能なワイヤレスセンサ粒子 (センサ粒子) を投入することで、流動層内部で自由運動を行う粗大物体に作用する力を直接測定した。センサ粒子は、流動層の見かけ比重より小さくなるように比重を調整して、流動層表面近傍で周期的に上昇する気泡との相互作用によってどのような運動を行い、どのような力が作用するのかについて調べた。その結果、粗大物体の運動は 1) 気泡の接近にともなう緩やかな上昇運動、2) 気泡の崩壊による自由落下状態、3) 気泡下部の粒子との衝突、の 3 種類の運動を周期的に繰り返すことが確認された。

## 2. 助成期間内での研究成果の概要

## 1. 緒言

近年、固気流動層を応用した乾式比重選別法が注目されている。この方法は、流動化した粉粒体が液体のようにふるまい、その結果、流動状態に応じた見かけ比重を有する性質を利用したものであり、水を使用しないなどさまざまな利点を有する。既に石炭や鉄鉱石の選鉱や廃プラスチックの選別に乾式比重選別法が利用されており、特に粗大物体の比重分離に適している。しかしながら、固気流動層中における物体の浮沈運動は、単純に見かけの比重差だけでは説明できないことが近年明らかになってきている。特に気泡流動層のような複雑な流動状態にある流動層中の粗大物体の浮沈機構は十分に解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、物体に作用する力を非接触で測定可能なワイヤレスセンサシステムを用いて、気泡流動化状態の固気流動層中を自由運動する物体の作用力を測定した。特に、周期的に上昇する気泡との干渉によって、粗大物体がどのような運動を行い、どのような力が作用するのかについて、さまざまな風速条件で実験を行い、固気流動層中の粗大物体の浮沈機構の解明を目指した。

## 2. ワイヤレスセンサシステム

Fig.1 に、自由運動を行う物体の作用力を直接測定可能なワイヤレスセンサシステム(センサ粒子)の外観を示す。センサ粒子は、直径 29.8mm の外殻粒子に 3 軸加速度センサ、3 軸磁気センサ、無線モジュールおよび信号処理用 IC が内蔵されている。各センサから出力されるアナログ信号は IC によって AD 変換およびシリアル化され、無線モジュールを通して PC に接続した外部受信機に伝送される。このような、移動物体にセンサを組み込んで物理量を測定するシステムは Lagrangian センサとよばれ、海洋工学、航空宇宙工学、生態系観測などの分野で多くの測定例がある。ここで示すセンサ粒子も Lagrangian センサの一種であり、空気中や水中で自由運動を行う球形物体の加速度を非接触で測定することができる。加速度は運動方程式 ( $m\alpha=F$ ) を介して作用力と直接結び付いているため、各瞬間に物体に作用する力を求めることが可能となる。

本測定システムでは加速度センサにより粒子加速度を測定することで各瞬間に作用する作用力を算出するが、一般に、加速度センサは粒子の運動変化による動的加速度と重力による静的加速度を同時に検出する。したがって作用力を求める際には出力信号から重力加速度を取り除くことが必要であるが、センサ粒子は時々刻々と姿勢を変化させるため、センサに固定された座標系においてどの方向が重力方向かわからないという問題がある。この問題を解決するために、重力方向に外部磁場を印加し、同時に磁気センサを用いて磁気ベクトルを測定することにより重力方向を同定し、粒子の姿勢変化にともなう鉛直方向の作用力測定を可能とした。

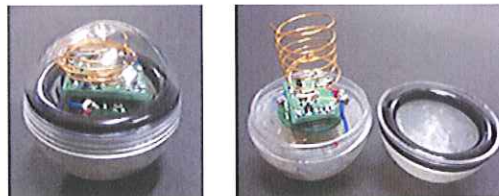


Fig.1 Schematic of sensor particle

## 3. 実験装置および実験方法

Fig.2 に固気流動層の実験装置を示す。実験は、送風開始前の静止した粒子層上部にセンサ粒子を静置させ、5 条件 ( $u=1.1\sim 1.5$  m/s) の異なる風速(最小流動化速度  $u_{mf}=1.05$  m/s)を下部から与えて、流動化にともなって運動を行うセンサ粒子に作用する力の測定を行った。また同時に外部に設置したビデオカメラにより粒子挙動の撮影を行った。流動層を構成する粒子には平均粒子径  $d_p=2.3$  mm のガラスビーズ ( $\rho_p=2430$  kg/m<sup>3</sup>) を使用した。本実験条件では、流動層は周期的な気泡の発生をともないながら流動化する気泡流動化状態になることが確認された。

実験終了後、センサ粒子による作用力の測定結果と、ビデオカメラによる撮影画像を対比させて、粒子の運動と作用力の関係について考察を行った。

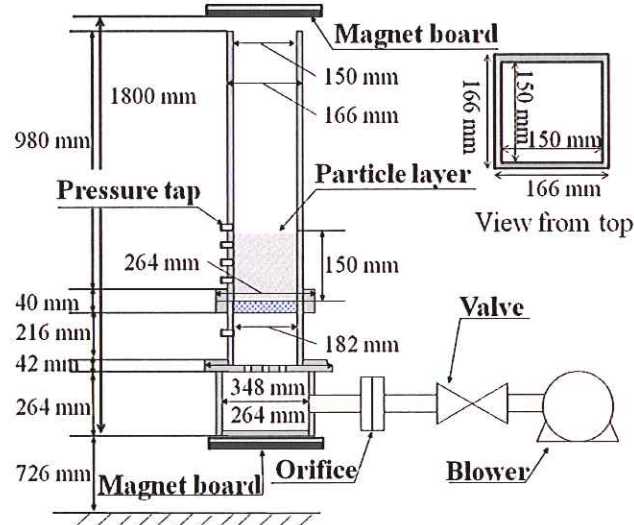


Fig.2 Schematic of experimental apparatus

#### 4. 実験結果

結果の一例として、Fig.3 に流体速度  $u=1.4\text{m/s}$  の条件における固気流動層中の粗大粒子 (センサ粒子) の挙動、また Fig.4 に、それに対応した作用力の測定結果を示す。粗大粒子の比重は流動層の見かけ比重よりも小さくなるように調整しており、Fig.3 に示されるように、粗大粒子は流動層表面を上昇する気泡と干渉しながら運動を行う様子が確認できる。また Fig.4 に示される粗大粒子に作用する力の測定結果は Fig.3 の観察結果とよく対応していることがわかる。上昇する気泡の接近にともなって表層付近の粗大粒子に上向きの力が作用した後、気泡の崩壊後に自由落下状態となり、最後は気泡下部への衝突によって急激な上向きの接触力が作用する。以上の結果から、気泡との干渉により粗大粒子に周期的な流体力 (および接触力) が作用し、その周期的な力が粒子の浮沈運動に影響を及ぼしていることが示唆される。このように、従来の手法では測定が不可能であった気泡流動層と粗大物体の複雑な相互作用力が、本ワイヤレスセンサシステムによる非接触測定によって明らかとなった。

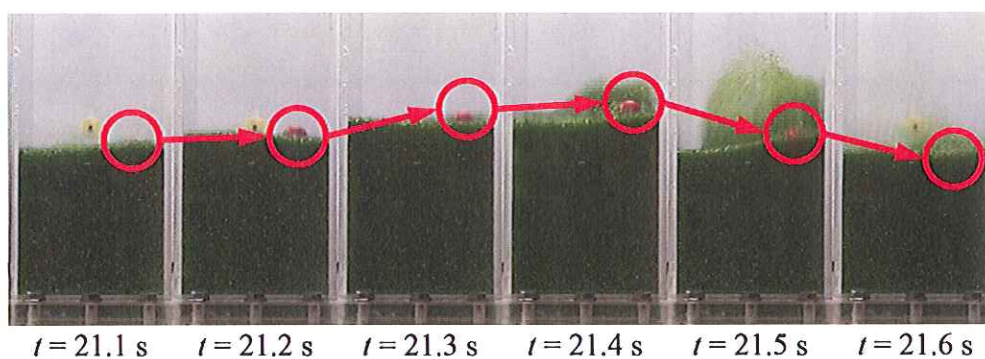


Fig.3 Motion of coarse particle in gas-solid fluidized bed



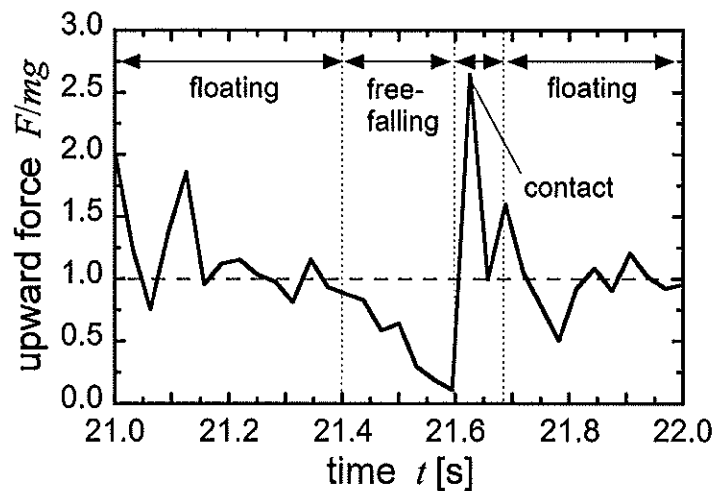


Fig.4 Force acting on coarse particle in gas-solid fluidized bed

## 5. 結 言

固気流動層中に投入された粗大粒子に作用する力をワイヤレスセンサシステムを用いて測定し、粗大物体の浮沈機構について調べた。実験結果から、流動層内部に間欠的に発生し上昇する気泡との干渉によって物体に周期的な上下方向の力が作用し、浮沈挙動に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

## 3. 研究発表

- [1] Yoshimori, W., Ikegai, T., Higashida, K., Rai, K., Oshitani, J., Tsuji, T. and Harada, S., Measurement of Force Acting on a Course Particle in Gas-Solid Fluidized Bed by Lagrangian Sensor System, *The 9th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows*, (2015), pp.1-2.
- [2] 東田恭平, 雷 健太, 吉森 亘, 池貝友喜, 辻 拓也, 原田周作, 押谷 潤, 田中敏嗣, 固気流動層中内の浮遊粗大物体に作用する鉛直方向の力について (数値解析とLagrangian センサによる計測の直接比較), 第21回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, (2015).
- [3] 吉森 亘, 池貝友喜, 東田恭平, 雷 健太, 押谷 潤, 辻 拓也, 原田周作, Lagrangian センサを用いた固気流動層中における粗大粒子の作用力測定, 混相流シンポジウム2015, (2015).