

環境資源工学会 第40回シンポジウム
「リサイクル設計と分離精製技術」
乾式分離精製のための粉体工学研究の最前線

固気流動層中での物体浮沈挙動の 無線式センサによる非接触計測

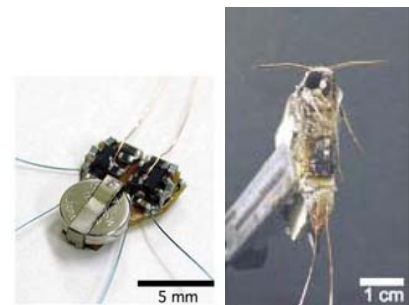
原田 周作（北海道大学）

Lagrangian センサ

Lagrangian センサ

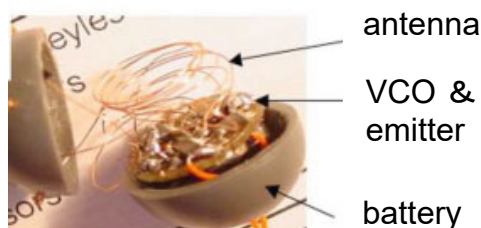
- 物理量を運動と共に移動しながら測定 (Lagrange的視点)
- 生態系観測, 航空宇宙分野などで利用
- MEMSセンサ, 信号処理ICにより構成
- 測定データはロガーに蓄積 or 無線伝送

スズメガの神経電位測定



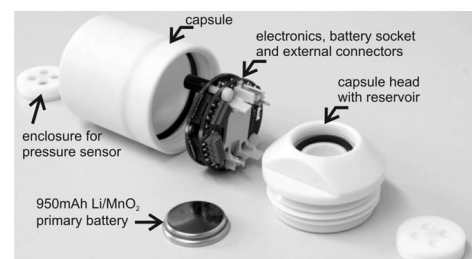
(Ando et al., *J. Neurosci. Methods*, 2002)

流体温度の測定



(Shew et al., *Rev. Sci. Instr.*, 2007)

流体圧力の測定

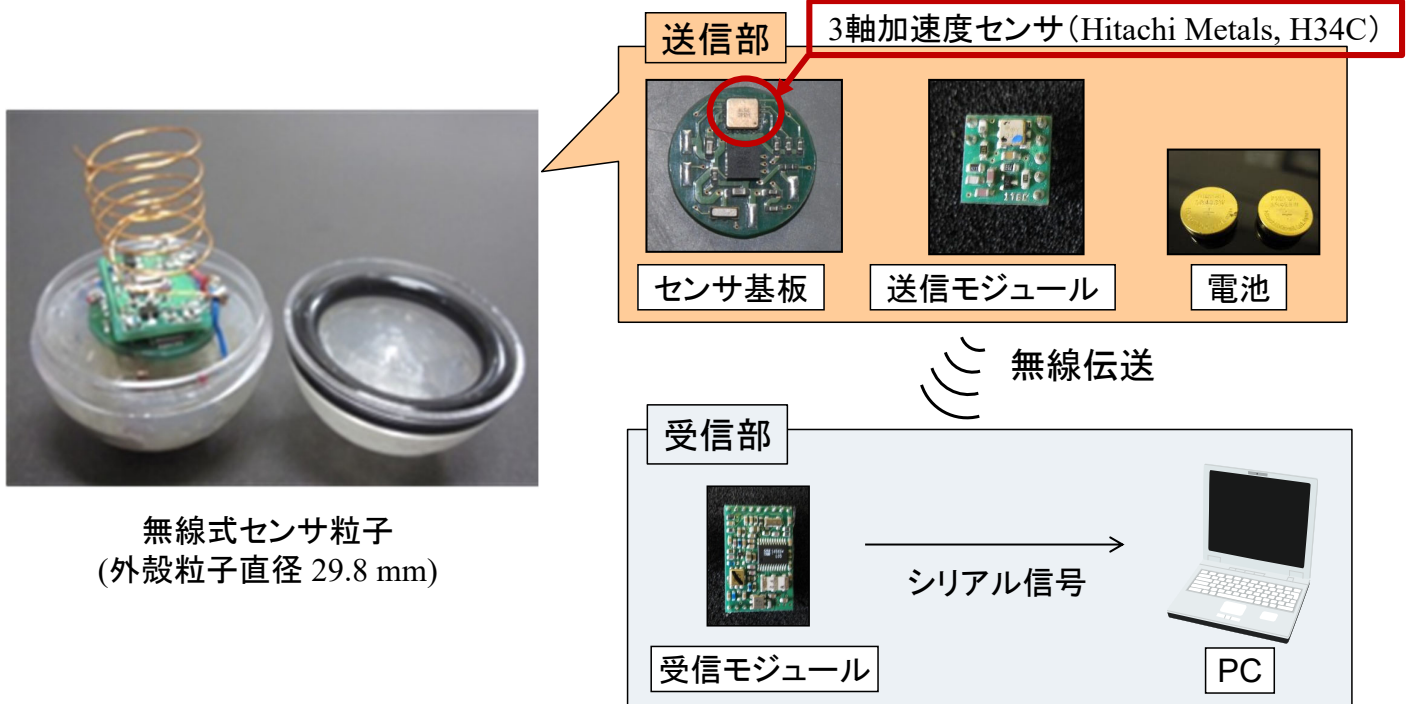


(Reinecke et al., *Biochem. Eng. J.*, 2012)

無線式センサ粒子

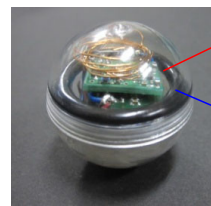
無線式センサ粒子の開発 (Harada *et al.*, *Int. J. Multiphase Flow*, 2011)

粒子加速度 (作用力) の非接触測定システム (Lagrangianセンサ)



外部磁場の印加

外部より磁場を印加することにより、任意の姿勢において重力方向の同定が可能

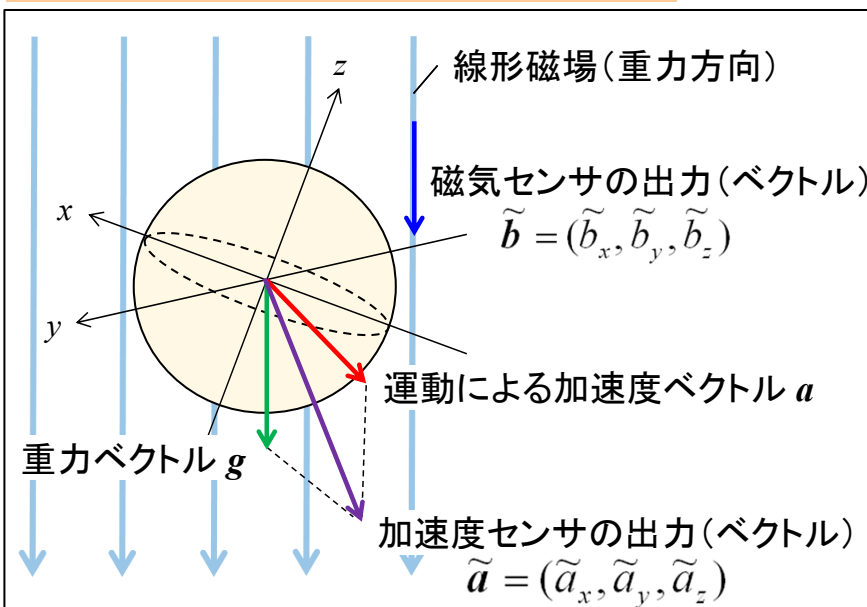


3 軸加速度センサ(H34C)

粒子の加速度ベクトルを出力

3 軸磁気センサ(AMI302)

粒子位置での磁気ベクトルを出力



加速度センサの出力

- ・ 運動による加速度 \mathbf{a}
- ・ 重力加速度 \mathbf{g}

運動加速度 (鉛直成分)

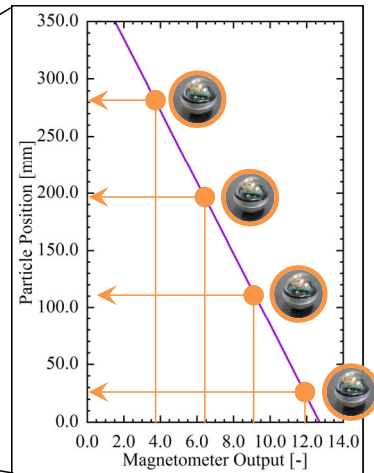
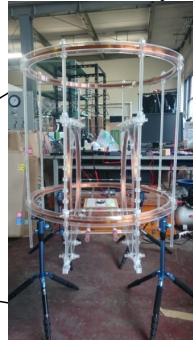
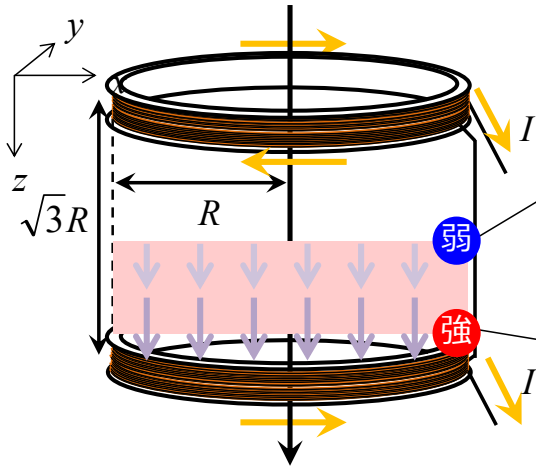
$$a_v = \tilde{\mathbf{a}} \cdot \frac{\tilde{\mathbf{b}}}{|\tilde{\mathbf{b}}|} - g$$

運動加速度 (水平成分)

$$a_H = \sqrt{|\tilde{\mathbf{a}}|^2 - \left(\tilde{\mathbf{a}} \cdot \frac{\tilde{\mathbf{b}}}{|\tilde{\mathbf{b}}|} \right)^2}$$

- ・ Helmholtzコイルに逆電流を流すことによる**勾配磁場**の発生
- ・ 各位置における磁場強度をセンサ粒子で測定 → **位置測定システム**

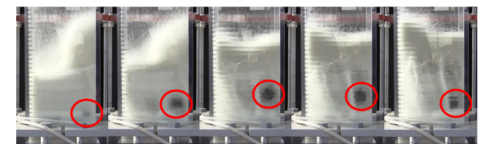
Helmholtzコイルによる勾配磁場



鉛直方向位置-磁場強度検量線

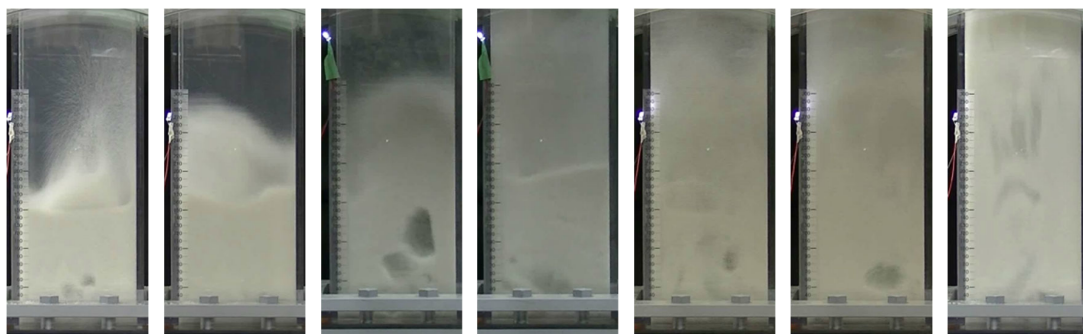


勾配磁場の導入により, 外部から観察できない
物体位置と作用力の非接触同時測定が可能に!



位置-作用力同時測定

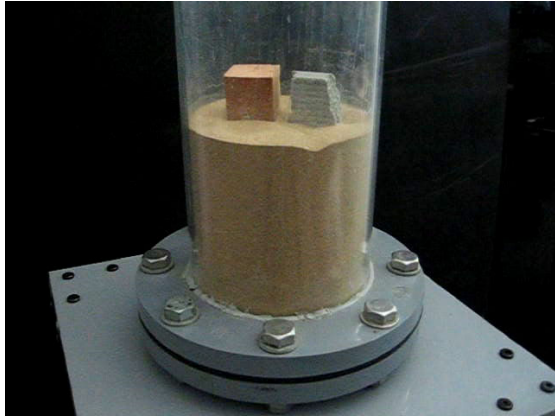
固気流動層中の物体浮沈運動への適用



固気流動層中の物体浮沈現象

固気流動層中の粗大物体の運動

固気流動層中の物体浮沈現象 (e.g. Oshitani et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2016)



燃焼炉中の粗大物質の除去,
乾式比重選別への応用

物体の浮沈機構, 最適条件などの
詳細は明らかではない

- ・ 流動層実験 (Oshitani et al., *PRL*, 2016)
- ・ 数値計算 (Tsuji et al., *AIChE J.*, 2014)
- ・ 浮沈力測定 (Harada et al., *IJMF*, 2011)
により機構解明を目指す

実験方法

Lagrangianセンサ

- 直径 $d_s = 29.8 \text{ mm}$
- 粒子密度 $\rho_s = 0.90, 2.10, 2.35 \text{ g/cm}^3$

◇実験条件

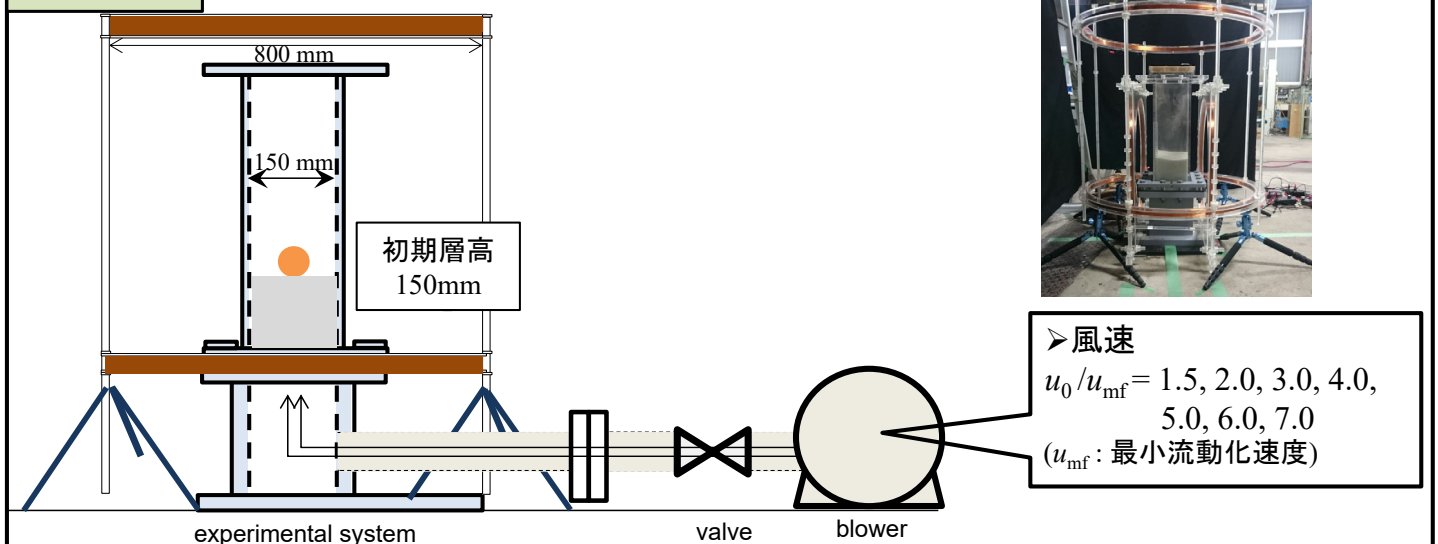


媒体粒子(ガラスビーズ)

- 直径 $d_p = 650 \sim 800 \mu\text{m}$
- 粒子密度 $\rho_p = 2.5 \text{ g/cm}^3$
(見かけ密度 $\rho_b = 1.5 \text{ g/cm}^3$ 程度)

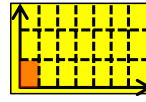


◇実験装置

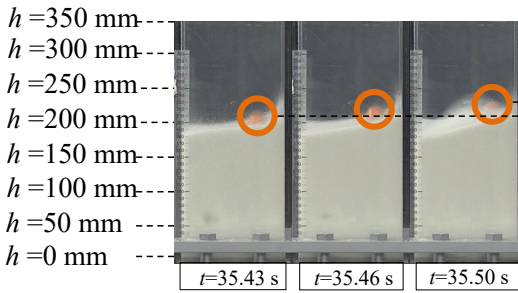


実験結果(その1)

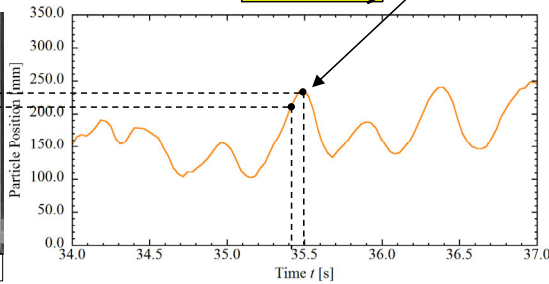
粒子密度 $\rho_s = 0.90 \text{ g/cm}^3$ 風速 $u_0/u_{mf} = 1.5$



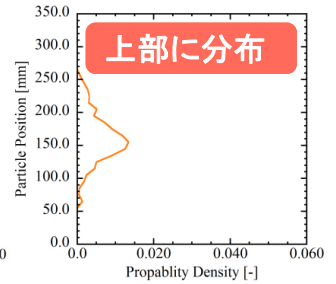
観察結果との定量的な一致



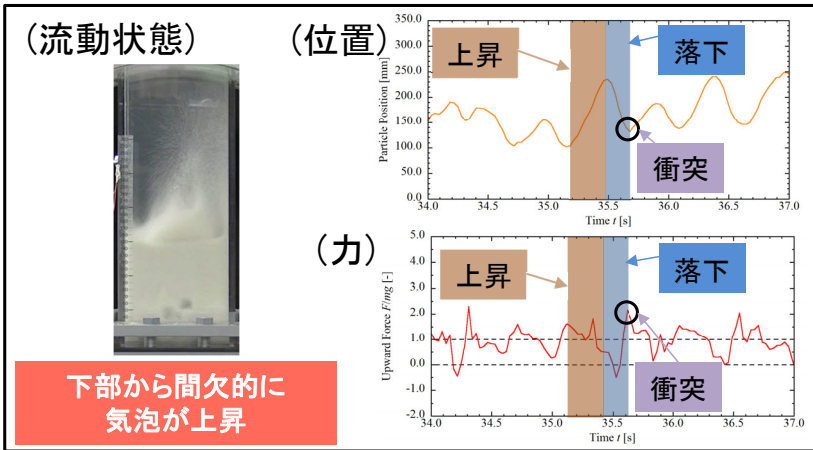
粒子位置の観察結果



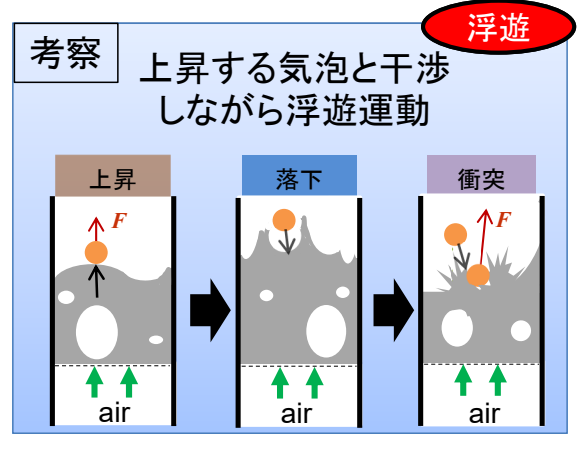
粒子位置の測定結果



位置確率密度分布



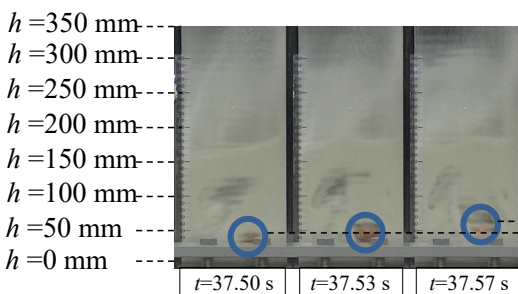
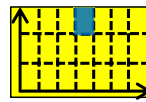
下部から間欠的に気泡が上昇



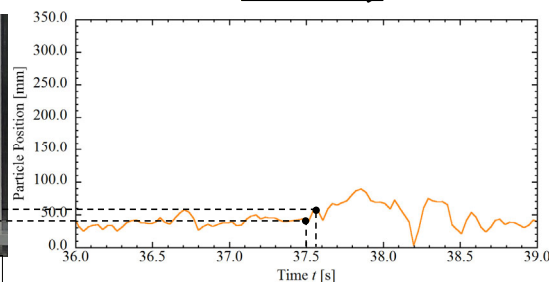
浮遊

実験結果(その2)

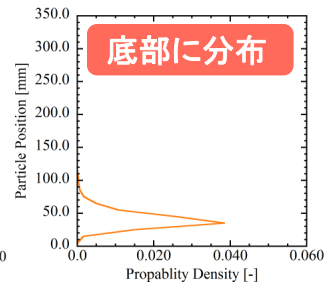
粒子密度 $\rho_s = 2.35 \text{ g/cm}^3$ 風速 $u_0/u_{mf} = 4.0$



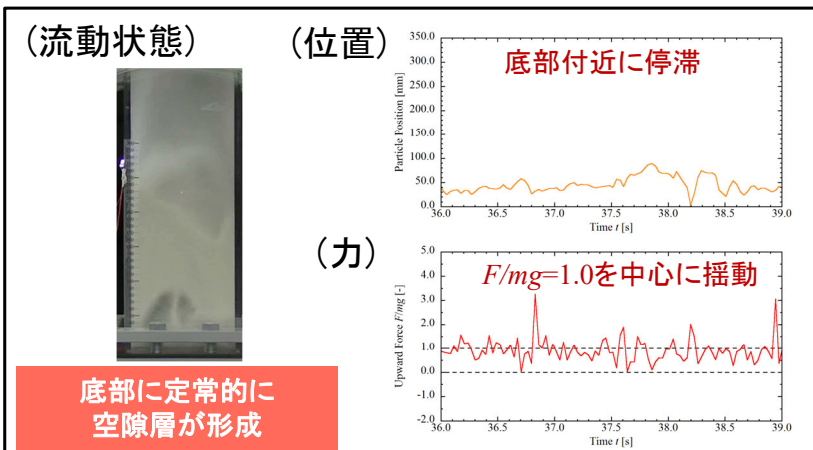
粒子位置の観察結果



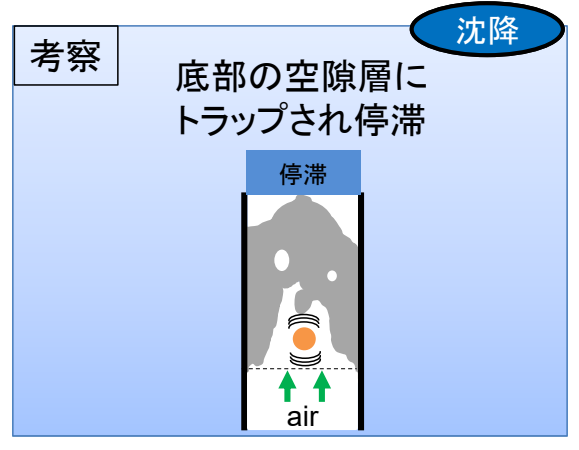
粒子位置の測定結果



位置確率密度分布

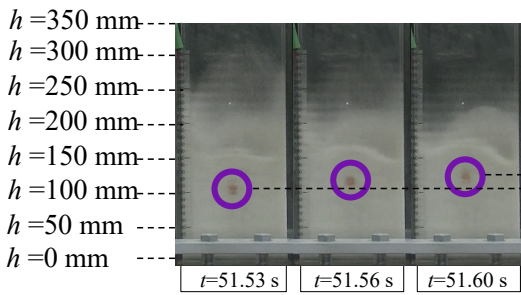
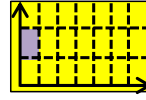


底部に定常的に空隙層が形成

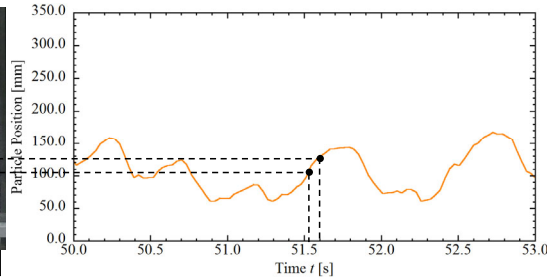


沈降

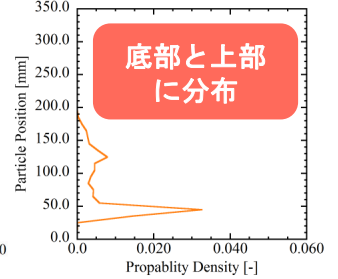
粒子密度 $\rho_s = 2.10 \text{ g/cm}^3$ 風速 $u_0/u_{mf} = 1.5$



粒子位置の観察結果



粒子位置の測定結果



位置確率密度分布

(流動状態)

(位置)

(力)

複数の小さな気泡が合一して大きな気泡が形成

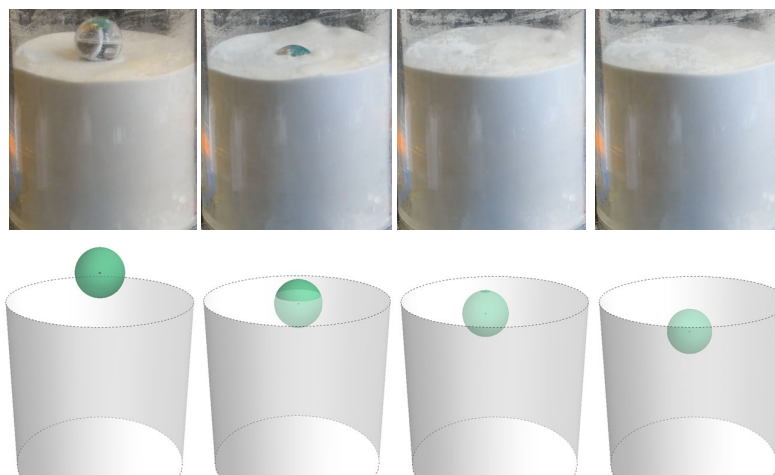
浮沈

考察 底部の停滞と上部への浮遊運動を繰り返す

停滞

浮遊

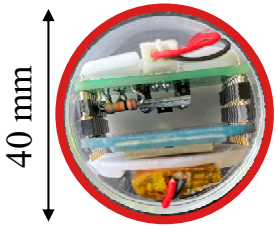
固気流動層中の物体運動の3次元測定



Lagrangianセンサシステム

—概要と位置測定原理—

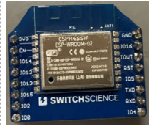
Lagrangianセンサ (Yoshimori *et al.*, 2018)



送信側 電池

出力電圧: 3 V

ESP-WROOM-02(送信側)



センサおよび無線 (WiFi) 送信の動作を制御するマイクロコンピュータ

MPU9250 9軸センサ



3軸加速度センサ
3軸磁気センサ
3軸ジャイロセンサ

センサの挙動を測定



センサ固定具
9軸センサを球中央に位置させる

受信側

Micro USB



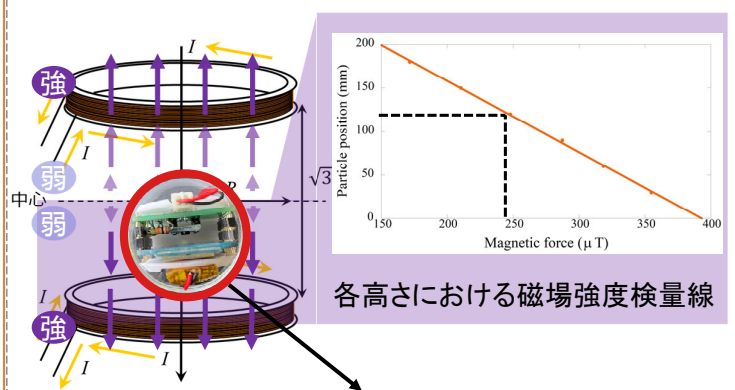
ESP-WROOM-32 開発ボード (受信側)



測定値を無線で受信

不可視系において自由運動する物体挙動を非接触かつリアルタイムに測定

位置測定原理



勾配磁場コイル

磁場強度に勾配のある鉛直磁場を発生

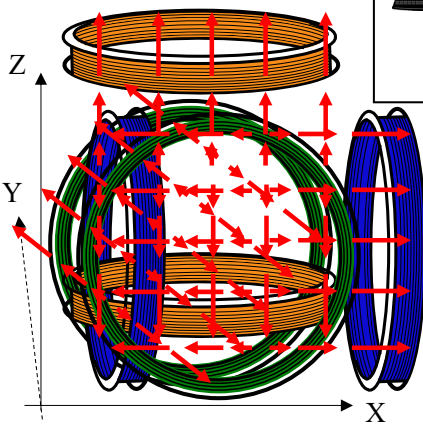
3軸磁気センサ
磁場強度を検出

センサが検出した磁場強度と検量線を照合することで粒子位置を算出

3次元測定へ適用

Lagrangianセンサシステム 3次元測定への適用

コイルの3次元化

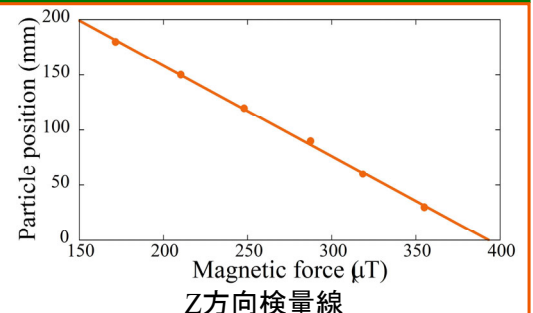
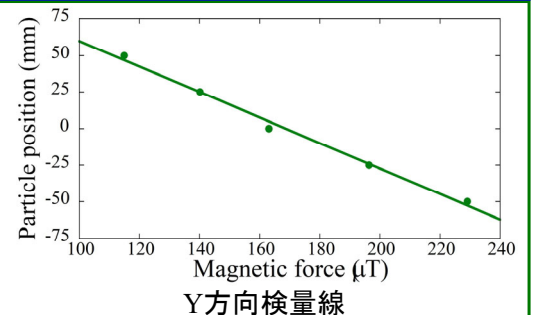
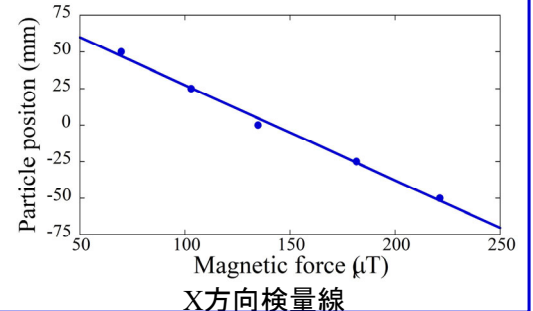
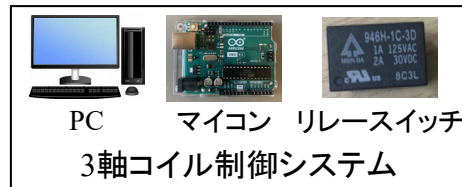


3対の勾配磁場コイルを直交させて配置

100 ms毎に各対コイルのON/OFFを切り替えることで、3方向に周期的な線形勾配磁場が発生

センサが各瞬間における物体の3次元位置を測定

不可視系において自由運動する物体挙動の3次元測定を実現



3次元位置測定実験 実験概要

実験装置外観

固気流動層



実験条件

○固気流動層

媒体粒子径 $d_m = 0.15 \text{ mm}$
 媒体粒子密度 $\rho_m = 2500 \text{ kg/m}^3$
 充填高さ $H = 150 \text{ mm}$
 流動層径 $R = 150 \text{ mm}$
 風速比 $u_0/u_{mf} = 1.2$
 (u_{mf} :最小流動化速度)
 見かけ密度 $\rho_s = 1400 \text{ kg/m}^3$



媒体粒子外観

○センサ粒子

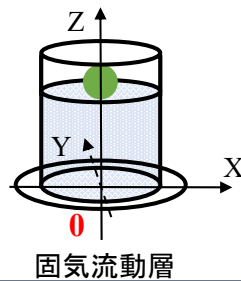
粒子径 $d_p = 40 \text{ mm}$
 密度 $\rho_p = 910, 1325, 1666 \text{ kg/m}^3$
 初期位置 $X = 0 \text{ mm}, Y = 0 \text{ mm}, Z = 170 \text{ mm}$ (層高+センサ半径)



センサ粒子外観

各軸の設定とセンサの初期位置

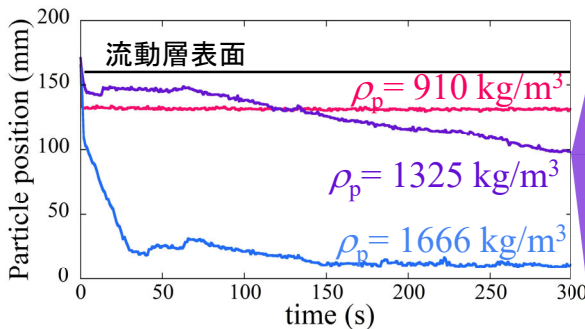
X, Y: 層断面の中心
 Z方向: 層底部
 上記を原点として設定



流動層内を自由運動する
 センサ粒子の挙動を300秒間3次元測定する

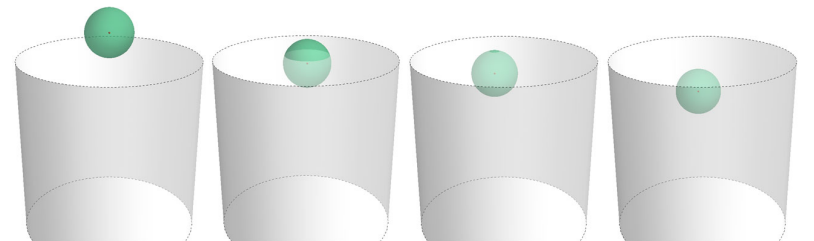
実験結果まとめ - 固気流動層内の浮沈現象と液体との非類似性 -

見かけ密度 $\rho_s = 1400 \text{ kg/m}^3$



各密度条件における鉛直方向の挙動

投入粒子密度と流動層見かけ密度に十分に差がある場合、液体における浮沈挙動同様に密度の大小で浮沈が決定



(a) $t = 0 \text{ s}$ (b) $t = 4 \text{ s}$ (c) $t = 120 \text{ s}$ (d) $t = 240 \text{ s}$

← 急激な沈降 長期的な低速沈降 →

投入粒子密度 $\rho_p \cong$ 見かけ密度 ρ_s の条件では、
 流動化後の急激な沈降の後、層の中ほどまでゆっくりと沈降
 → 各時間で浮沈傾向が変化する複雑な挙動

投入粒子密度 $\rho_p \cong$ 見かけ密度 ρ_s
 静水圧による浮力だけでは説明できない複雑な浮沈挙動を示した

本システムの利点

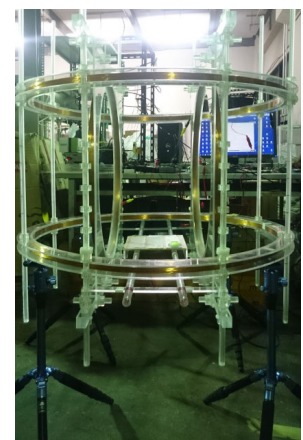


本システムの利点

(利点その1) 超安価！

Lagrangianセンサシステム諸元

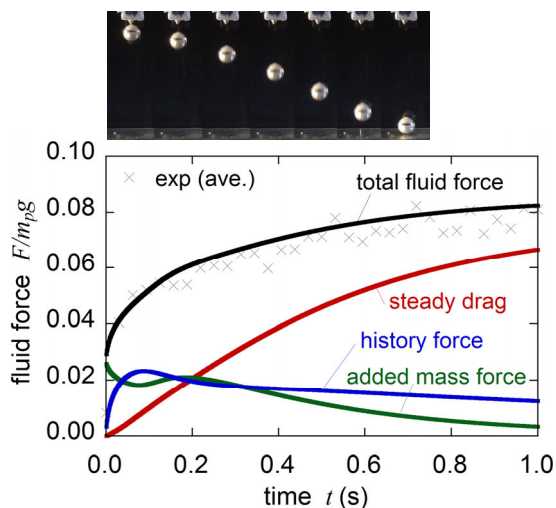
目に見えない物体の位置と力を同時に測定



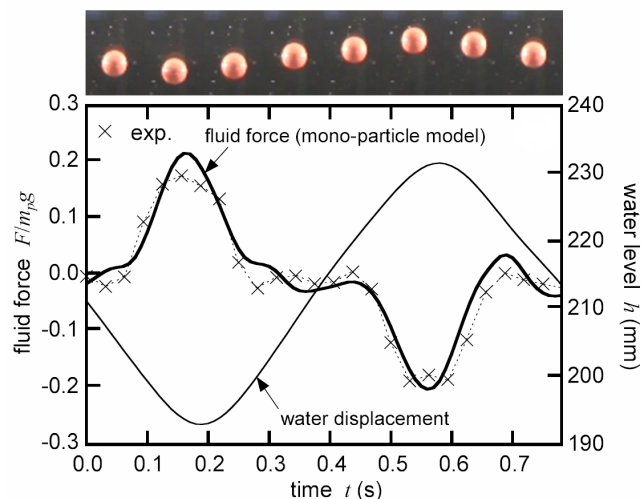
サイズ	位置測定精度	作用力測定精度	応答周波数	価格
30~40mm (センサ本体)	数mm程度 (鉛直方向のみ)	0.01~0.1mg (鉛直方向のみ)	最大200Hz	5万円程度 (材料費)

(利点その2) 水の中でも使える！

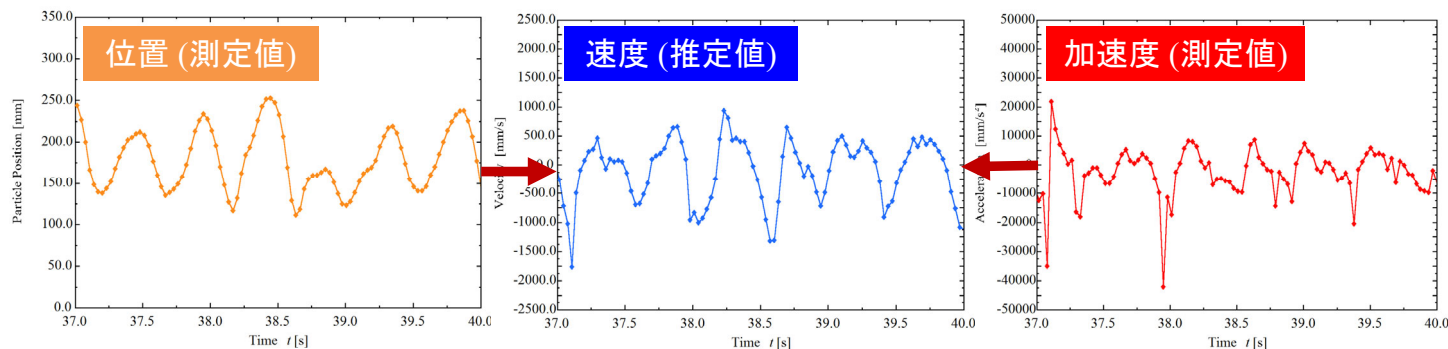
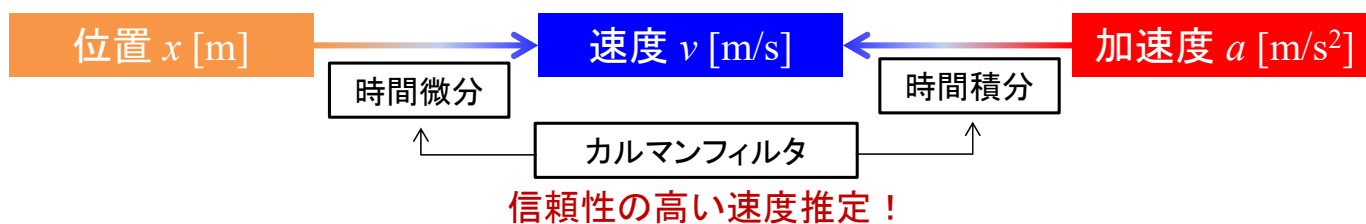
単一粒子の重力沈降時に作用する流体力 (Harada *et al.*, 2011)



垂直振動流中における中立浮遊粒子に作用する流体力 (Harada *et al.*, 2013)



(利点その3) 速度も算出可能！



自由運動を行う物体の位置—速度—加速度(力)を非接触で同時測定可能！

- Lagrangianセンサによる**物体位置-作用力同時測定システム**を開発
- 固気流動層中の**不可視な物体浮沈運動**に
開発した測定システムを適用，**位置と力の非接触同時測定**
- 流動層中の**物体浮沈現象が密度，風速のみによって
決定されない複雑な機構**を有することを解明
- 固気系のみならず、**流体中の任意の物体運動**にも
本測定システムを適用可能

