

キャパシティブセンサによる落下物体の速度測定

日本大学生産工学部 教養・基礎科学系(物理)
教授・大熊康典

目的・背景

静電誘導法を測定原理とする、簡便であるがやや複雑な電場測定にも対応できる電場センサを製作し、誘電体の分極と外部電場強度の関係や、誘電体境界面での電束密度の連続性を計測する手法をこれまでの研究で確立している[1]。本研究では、この電場センサを改良してキャパシティブセンサとし、物体(導体)の運動を簡易的に計測できる手法を確立することを目的としている。

[1] Y.Nogi, K.Suzuki, and Y.Ohkuma, "Measurement of electric fields and estimation of dielectric susceptibility," Am. J. Phys. 81, 359-365 (2013).

本実験では、大気中を自由落下する物体の時々刻々の速度 v を、キャパシティブセンサを使って測定し、その時間変化 dV/dt から物体の加速度(重力加速度: g)の値の導出を試みる。

大気中を自由落下する質量 m の物体の運動方程式

$$m \frac{dv}{dt} = (m - m_{air})g - D$$

・浮力: $m_{air}g$
・空気抵抗による抗力: D

dV/dt の m 依存性を測定して、 D が無視できる領域の加速度を求め、浮力の補正を行って g の値を決定する。

【キャパシタ中の導体の運動】

キャパシタの電極間に導体が運動する

キャパシタの静電容量 C は導体の運動によって時間変化する

周波数 $f = \omega/2\pi$ の交流電圧 $V_0 \sin(\omega t)$ を電極間に印加

静電容量 C のキャパシタに蓄えられる電荷: $Q = CV_0 \sin(\omega t)$

キャパシタに流れ込む電流:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

抵抗 R の両端電圧:

$$V = RI = RV_0 \sqrt{\left(\frac{dC}{dt}\right)^2 + (\omega C)^2} \sin(\omega t + \delta) \quad \delta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega C}{dC/dt}\right)$$

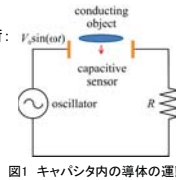


図1 キャパシタ内の導体の運動

導体が電極間を通過する時間: $\tau \Rightarrow \frac{dC}{dt} \approx \frac{C}{\tau}$

$1/\tau$ に対して $f = \omega/2\pi$ が十分に大きい: $\frac{C}{\tau} \gg \omega C \Rightarrow \frac{dC}{dt} \gg \omega C$
(例えば、 $\tau = 1 \mu\text{s}$, $f = 400\text{kHz}$)

抵抗 R の両端電圧: $V = \omega R V_0 C \sin(\omega t + \delta) = \omega R V_0 (C_0 + C_1(t)) \sin(\omega t + \delta)$

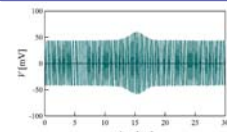
導体がない場合の静電容量: C_0

導体の影響による静電容量の変動分: $C_1(t)$

周波数 f の搬送波が $C_1(t)$ により振幅変調される波

$$V = A(C_0 + C_1(t)) \sin(\omega t + \delta) \quad A = \omega R V_0$$

\Rightarrow 導体が電極の中央にくる時に $C_1(t)$ が最大



測定する電圧信号
 $V_1(t) = AC_1(t)$

図2 オシロスコープによる振幅変調信号の観測

原理・方法

重力加速度 g の測定装置

【落下装置】

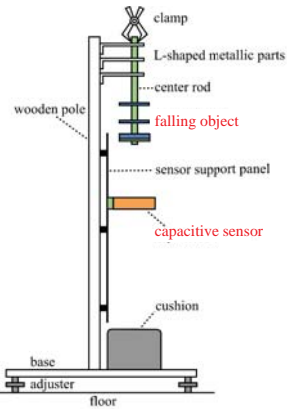


図3 実験装置概念図

【落体】

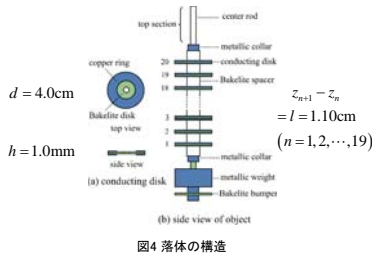


図4 落体の構造

【キャパシティブセンサの空間分解能の計算】

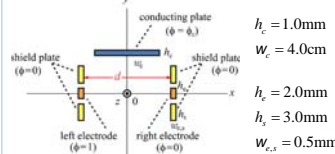


図7 キャパシティブセンサのモデル

ポアソン方程式
 $\nabla^2 \phi = 0$

$$y = -1.5\text{cm} \square + 1.5\text{cm}$$

$$d = 4.4\text{cm}, 4.6\text{cm}$$

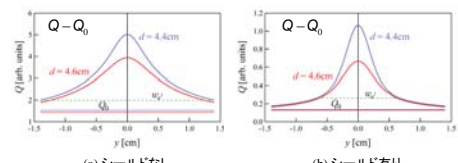


図8 キャパシティブセンサのモデル計算結果

導体がない場合の静電容量 C_0 のときの電荷量: Q_0

【キャパシティブセンサ】

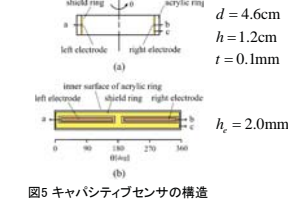


図5 キャパシティブセンサの構造

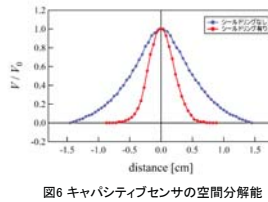


図6 キャパシティブセンサの空間分解能

【測定回路】

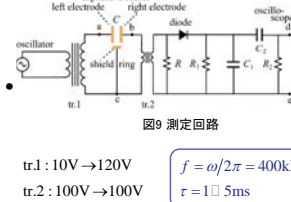


図9 測定回路

測定条件
 $RC \square 2\pi/\omega (\omega = 1/f)$
 $2\pi/\omega \square R_1 C_1 \square \tau$
 $\tau \square R_2 C_2$

$$R = 10\text{k}\Omega \quad C = 1 \square 5\text{pF}$$

$$R_1 = 30\text{k}\Omega \quad C_1 = 3.2\text{nF}$$

$$R_2 = 100\text{k}\Omega \quad C_2 = 47\mu\text{F}$$

tr.1: 10V \rightarrow 120V
tr.2: 100V \rightarrow 100V

$$f = \omega/2\pi = 400\text{kHz}$$

$$\tau = 1 \square 5\text{ms}$$

結果・まとめ

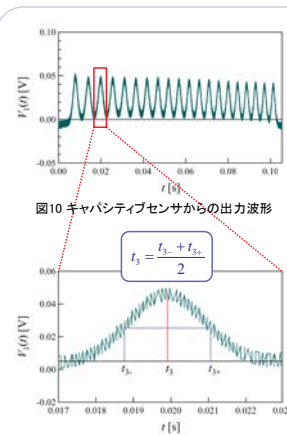


図10 キャパシティブセンサからの出力波形

図11 パルスの拡大波形

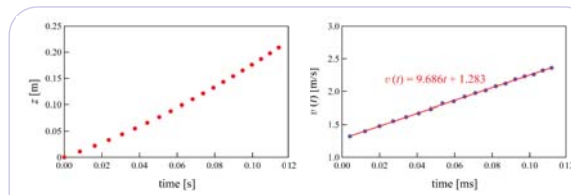


図12 z-t 依存性

図13 速度の時間変化

$$v_n(t) = \frac{z_{n+1} - z_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{l}{t_{n+1} - t_n} \quad (l = 1.10\text{cm})$$

$$t = \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \quad (n = 1, 2, \dots, 19)$$

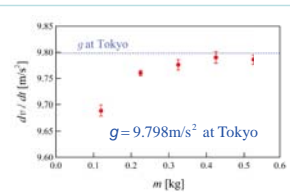


図14 落体の加速度の質量依存性

$$g = \frac{1}{1 - m_{air}/m} \frac{dv}{dt}$$

$$m_{air} = 0.0001\text{kg}$$

$$g = 9.785\text{m/s}^2$$

誤差: 0.2%

- 大気中を自由落下する物体の時々刻々の速度を、キャパシティブセンサを使って測定した。速度が時間に比例して増大することを確認した後、その時間変化から物体の加速度を求めた。空気抵抗の効果は加速度の質量依存性から調べられた。
- 運動方程式が示す通り、質量を大きくすれば空気抵抗が無視でき、重力加速度が求められることが分かった。
- 実験で求めた重力加速度は、公表されている値と誤差0.2%で一致した。

応用分野・用途

- 物体の移動を検出するセンサや速度計測器の開発
- 電磁気学の基本原理を用いた計測器の開発
- 物理学実験等の授業で使用される実験装置の開発

日本大学産官学連携知財センター (NUBIC)

〒102-8275 東京都千代田区九段南4-8-24 日本大学会館
Tel: 03-5275-8139 Fax: 03-5275-8328 E-mail: nubic@nihon-u.ac.jp

http://www.nubic.jp

