

## 素電荷の測定 — ミリカンの実験

### □ 目的

帯電した油滴の電荷を測定し、これより素電荷 (電気素量) を求める。

### □ 実験用具

ミリカン電気素量測定装置、スプレー、ストップウォッチ、CCD カメラ、PC

### □ 解説

Millikan は 1909 年に帯電した油滴の電荷より、素電荷  $e$  を求めた。現在の素電荷の値<sup>\*1</sup>は以下の通りであり、1913 年には Millikan はこの値を 0.2% の誤差で求めた。

$$e = (1.602\ 176\ 487 \pm 0.000\ 000\ 040) \times 10^{-19} \text{ [C]} \quad (1)$$

我々は基本的に Millikan の行った実験手法により油滴の電荷を求め、それより素電荷を推測する。

真空中、あるいは空気中で電圧  $V$  を電極間にかけて、電場  $V/d$  が生じる。このとき  $d$  は電極間の距離である。帯電した電荷は空気中では、以下の力を受ける (図 1 参照)。

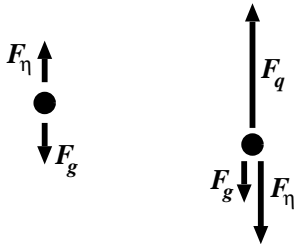


図 1

(左) 電場がゼロの場合に空気中を落下する油滴に働く力。

(右) 電場がある場合に空気中を上昇する油滴に働く力。

- (1) 重力  $F_g$ : (質量)  $\times$  (重力加速度) であり、質量は (体積)  $\times$  (油の密度,  $\rho$ ) である。厳密には空気の浮力があるため、密度は油の密度より空気の密度を引いたものを使うべきであるが、この実験の精度では無視できる。

$$F_g = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho g \quad (2)$$

$r$  は油滴の半径である。

- (2) 空気抵抗  $F_\eta$ :

$$F_\eta = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

$\eta$  は空気の粘性、 $v$  は油滴の速さである。

<sup>\*1</sup> 2006 年 CODATA 推奨値

- (3) 電場から受ける静電気力  $F_q$ : 電荷を持つものが電場より静電気力を受けるのは、「静電気」によってものがまとわりついたり、CRT(ブラウン管) で電子を走査させるときと同じ原理である。

$$F_q = qE, \quad E = \frac{V}{d} \quad (4)$$

$q$  は油滴の持つ電荷、 $V$  は電極間の電圧、 $d$  は電極間の距離である。

油滴は力を受けて運動するが、空気抵抗があるためすぐに等速度運動をするようになる。この時の力はつりあっている。電圧は鉛直方向(上下方向)にかけることにすると、以下の式が成り立つ。

$$F_q = F_g + F_\eta \Leftrightarrow qE = \frac{4\pi}{3}r^3\rho g + 6\pi\eta r v \quad (5)$$

$v$  は実際の油滴の運動を見ることにより測定できる。よって式の中で未知の量は  $q$  と  $r$  だけである。2 つ未知の量があるので、2 種類の電場について  $v$  の測定を行えば、 $q$  と  $r$  が求まる。

まず、一番簡単な電場  $E = 0$  の場合(電圧をかけていない場合)について油滴の(下向きの)速さ  $v_0(= -v)$  を測定し、(5) 式より  $r$  が求まる。

$$\frac{4\pi}{3}r^3\rho g = 6\pi\eta r v_0 \Rightarrow r = 3\sqrt{\frac{\eta v_0}{2\rho g}} \quad (6)$$

今度は粒子が上昇するように電場  $E$  をかけ、油滴の上昇する速さ  $v_E(= v)$  を測定する。(4)、(5) 式より  $q$  が求まる。

$$q = \frac{d}{V}6\pi\eta r(v_E + v_0) \quad (7)$$

実験ではいくつかの油滴について電荷  $q$  を測定し、これより素電荷  $e$  を推測する。それには、電荷が離散的であることを確認する必要がある。そのためには、電荷の小さい油滴について測定することが重要である。なぜならば、1 と 2 の区別は簡単であるが、100 と 101 の区別は難しいからである。よって、測定は電場をかけたときにできる限りゆっくりと運動する油滴に関して行うことが必要である。

この実験結果の重要な意味は電荷が離散的であり、素電荷  $e$  の整数倍であるという事である。電荷は連続的な値を取るものではなく、基本的な素量の整数倍なのである。この結果と比電荷の測定、実験「電子の電荷と質量の比」の結果を総合すると、電子は粒子であることがわかる。そして、電子の電荷と質量を求める事もできる。比電荷の測定は 1897 年に Thomson によって行われた。Thomson はさらに Millikan の実験より前に本実験と同じ原理で水滴の電荷を測定しようと試みたが成功しなかった。

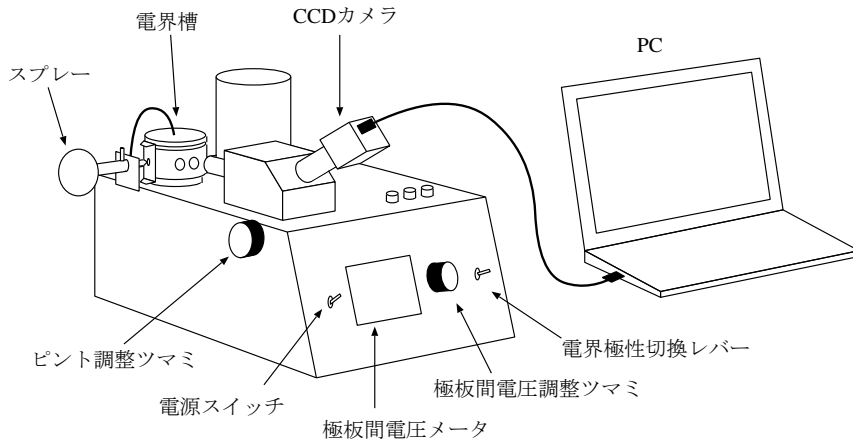


図2 ミリカン測定装置

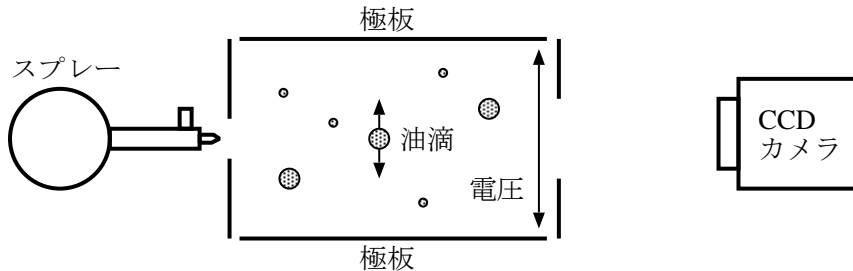


図3 電界槽の模式図

## □ 実験方法

注意 測定装置の背面にある電極にはさわらないこと。

- (1) ミリカン測定装置と PC の電源を入れる。PC で「ミリカン実験ビューワー」を起動する。ビデオは全画面表示にし、以下の測定は全て全画面表示で行う。油滴はスプレーによって電界槽に注入される (図 2、3 参照)。
- (2) CCD カメラの方向が正しいことを側面の字等から確認する。スプレーのゴムをつまんで油滴を注入し、PC で見えることを確認する。PC で見て油滴が真下に落下することを確認する。油滴がぼやけている時はピント調整ツマミでピントを合わせる。
- (3) 操作パネル前面のレバーを上下させることにより、電場が生じる。レバー中央の場合は電場はゼロである。電圧を極板間電圧調整ツマミで  $V = 300$  [V] に設定し、前のレバーを上下させることにより油滴が上下に動くことを確認する。
- (4) 以下の問に答える。

## 問 1

電場をかけた際に、上昇する油滴と下降する油滴、そして電場に影響されずに自由落下する油滴があるのはなぜか？

## 問 2

油滴の電荷が大きいと、電場がある場合、無い場合に運動はどのように変化するか？

- (5) PC の画面に貼られた OHP シートに 2 本の平行線が描かれているのを確認する。この平行線の間隔が電界槽内の実際の 1 mm に対応する。
- (6) 上昇方向に電場をかけた際に、できる限りゆっくりと上昇する油滴を選ぶ。この油滴を平行線より高い位置へ上昇させて電場を切り、平行線の間を自由落下する時間を測定する。
- (7) 同じ油滴について電場をかけた際に上昇して平行線間を通過するのにかかる時間を測定する。
- (8) (6)、(7) の測定を合計で油滴 10 個について行う。(6)、(7) の測定の順序は逆でもかまわない。
- (9) 平行線間の実際の距離 1 mm から自由落下速度  $v_0$  と上昇速度  $v_E$  を求める。
- (10) (6) 式を用いてそれぞれの油滴について半径  $r$  を求める。この際、共通の定数  $3\sqrt{\eta/(2\rho g)}$  を計算しておくとう便利である。
- (11) (7) 式を用いてそれぞれの油滴について電荷  $q$  を求める (電荷の単位はクーロン、 $[C] = [kg \cdot m^2 / V \cdot s^2]$  である)。この際、共通の定数  $(d/V)6\pi\eta$  を計算しておくとう便利である。
- (12) 電荷が小さい方から一つ一つの油滴について縦軸を電荷にとりグラフを描く。
- (13) 素電荷  $e$  の値を推測する。

必要な物理パラメーターを以下にあげる。

重力加速度	$g = 9.80 \text{ [m/s}^2\text{]}$
油の密度	$\rho = 913 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
空気の粘性係数	$\eta = 1.82 \times 10^{-5} \text{ [kg/(m} \cdot \text{s)]}$
電極間距離	$d = 5.0 \times 10^{-3} \text{ [m]}$