

概要

ミリカンの油滴実験は、物理定数の一つである電気素量を求める実験である。本論文では学生実験としてこの測定実験を行い、精密な電気素量の値を測定することを目的とする。また、その過程において実験における留意点や手順の簡素化のための工夫、種々の影響の判定などについて考察を行った。

目次

概要.....	1
1. 序論.....	6
1.1. はじめに.....	6
1.2. 電気素量の測定原理.....	7
1.3. 使用器具, 装置について.....	9
1.3.1. 島津理化 ミリカン電気素量測定器 MLD-5.....	9
1.3.2. ドリテック SW-109 スポーツタイマー.....	10
1.3.3. TANITA デジタル温度計 TT-559.....	10
1.3.4. Logicool HD Webcam C270.....	10
1.3.5. Microsoft Windows Media Player.....	10
1.3.6. sartorius 上皿天びん TE6101-L.....	11
1.3.7. HANNA 温度テスター/ HI 98509 Checktemp 1.....	11
1.3.8. ヤガミ 電気素量測定器 YMN-5.....	11
2. 電気素量の測定.....	12
2.1. 測定手順の確認.....	12
2.2. フレームレートによる測定.....	16
2.2.1. ラテックス液を用いた測定.....	16
2.2.2. 油滴を用いた測定.....	20
3. 測定における影響の検討.....	26
3.1. ラテックス液の信頼性.....	26
3.2. 水を用いる場合に蒸発が与える影響.....	27
3.3. 連続して測定を行うことによる影響.....	28
3.3.1. 光源からの熱線による極板間温度の変化.....	28
3.3.2. 噴霧された物質の充満による極板間湿度の変化.....	29
3.3.3. 直接噴霧による極板間での空気の対流.....	29
3.4. 噴霧器の口径が粒子の大きさに与える影響.....	30
3.5. 噴霧された帯電粒子の電荷の正負.....	32
4. 測定値の補正.....	33
4.1. 本章における研究背景.....	33
4.2. ストークスの法則.....	34
4.2.1. ストークスの法則における仮定.....	34
4.2.2. ストークスの法則の補正.....	35
4.2.3. e および A の算定.....	36
4.3. 補正した測定値による電気素量の推定.....	38

5. 結論.....	39
6. 付録.....	40
6.1. 湿り空気の密度を計算で求める。.....	40
7. 謝辞.....	41

Figure 1 自由落下	7
Figure 2 電界中での上昇.....	7
Figure 3 電界中での下降.....	8
Figure 4 ミリカン電気素量測定器 MLD-5	9
Figure 5 電気素量測定器 YMN-5	11
Figure 6 ストップウォッチによる測定実験の様子.....	12
Figure 7 噴霧直後のラテックス液（左）および油滴（右）	12
Figure 8 選別後のラテックス液（左）および油滴（右）	12
Figure 9 ラテックス球を用いた測定の結果.....	15
Figure 10 フレームレートによる測定の開始終了目安イメージ.....	16
Figure 11 フレームレートによる測定実験の様子	16
Figure 12 ラテックス球を用いた測定の結果 2.....	19
Figure 13 油滴を用いた測定の結果.....	24
Figure 14 油滴の半径と帯電量	25
Figure 15 ラテックス球の電子顕微鏡写真（白石，1973）	26
Figure 16 光源からの熱線による極板間温度の変化実験の様子.....	28
Figure 17 時間経過による極板間温度と実験室温度の変化	28
Figure 18 使用した噴霧器と作製した取付部品	30
Figure 19 噴霧器の口径の違いと粒子の半径の度数分布	30
Figure 20 噴霧器の構造.....	31
Figure 21 定数 A を算定するための回帰直線.....	37
Figure 22 ミリカンによる定数 A の算定.....	37
Figure 23 油滴を用いた測定の結果（補正有）	38

Table 1 空気の粘度[mPa・s].....	10
Table 2 ラテックス球を用いた測定の結果.....	14
Table 3 ラテックス球を用いた測定の結果 2.....	17
Table 4 油滴を用いた測定の結果.....	21
Table 5 ラテックス球の直径の比較.....	26
Table 6 参考文献ごとの帯電理由一覧.....	32
Table 7 得られた電気素量の比較.....	33

1. 序論

1.1. はじめに

これまで、基礎物理学研究室に電気素量測定器は備えてあったが測定器を使用して電気素量の測定実験を行った学生がこれまでにいなかった。また以前高等学校物理の教科書で示されていた製作実験を行ったところ全く動作しなかった経験から教科書に示されている実験や製作は思っているよりも厳しい条件であると感じていた。

本研究は、数値や実験方法は知っていても実際に測定や実験を行った経験が少ないことに気づき、教科書に示されている実験を実際に行い、記載されているような数値や結果が得られるのか確かめてみたいと考えていた中で、指導教員である高嶋教授より「今日から大塚ミリカン 覚に改名しよう」という助言を賜ったことをきっかけとして開始された。

本測定実験と同様の内容は過去に Robert Andrews Millikan(1868-1953)をはじめとした多くの科学者や学生らによって行われてきたものではあるが、自身の手によって物理定数を求める実験を行うことで実験において留意すべき点の理解や物理学の歴史の一部を感じたいと考えた。

最後に、本論文が今後この実験を行う学生にとって実験手順や実験上の留意点といった点においてわずかでも参考となるものになればと思う。

1.2. 電気素量の測定原理

半径 r の粒子が粘性率 η の空气中を落下する際に働く抵抗力 R はその速度 V に比例し、ストークスの法則により次の式で求めることができる。

$$R = 6\pi r\eta V \quad (1)$$

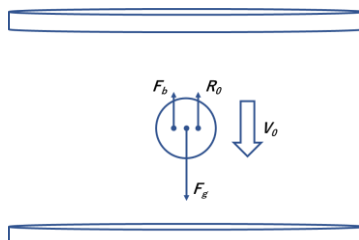


Figure 1 自由落下

落下速度 V が大きくなるにつれて粒子に働く抵抗力 R は大きくなり、粒子に働く重力 F_g 、浮力 F_b 、抵抗力 R_0 がつり合い、終端速度 V_0 に達する。このとき、粒子の密度を σ 、空気密度を ρ 、重力加速度を g とすると、以下の式および関係が成り立つ。

$$R_0 = 6\pi r\eta V_0 \quad (2)$$

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

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

$$F_g = F_b + R_0 \quad (5)$$

したがって、自由落下する粒子の終端速度 V_0 を測定することにより粒子の半径 r が次のように定まる。

$$r = \sqrt{\frac{9\eta V_0}{2g(\sigma - \rho)}} \quad (6)$$

次に、帯電した粒子が上昇するように二つの平行な極板間に電場 E をかけ、重力 F_g 、浮力 F_b 、抵抗力 R_i 、静電気力 F_e がつり合い、終端速度 V_i に達した場合には、粒子の帯電量を q 、極板間の距離を d 、極板間の電位差を P とすると、以下の関係が成り立つ。

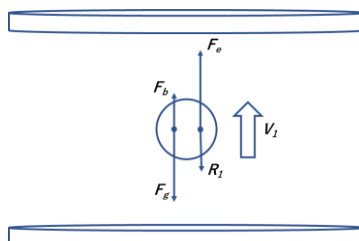


Figure 2 電界中での上昇

$$R_1 = 6\pi r\eta V_1 \quad (7)$$

$$F_e = qE \quad (8)$$

$$E = \frac{P}{d} \quad (9)$$

$$F_g + R_1 = F_b + F_e \quad (10)$$

したがって、電場中を上昇する粒子の終端速度 V_1 を測定することにより、(5)式と(10)式から粒子の帯電量 q が次のように得られる。

$$q = \frac{6\pi r\eta d}{P}(V_0 + V_1) \quad (11)$$

同様に、帯電した粒子が下降するように極板間に電場 E をかけ、重力 F_g 、浮力 F_b 、抵抗力 R_2 、静電気力 F_e がつり合い、終端速度 V_2 に達した場合には以下の関係が成り立つ。

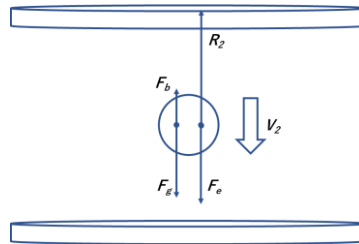


Figure 3 電界中での下降

$$R_2 = 6\pi r\eta V_2 \quad (12)$$

$$F_g + F_e = F_b + R_2 \quad (13)$$

したがって、電場中を下降する粒子の終端速度 V_2 を測定することにより、(5)式と(13)式から粒子の帯電量 q が次のように得られる。

$$q = \frac{6\pi r\eta d}{P}(V_2 - V_0) \quad (14)$$

また、(11)式と(14)式より V_0 を消去すると粒子の帯電量 q が次のように得られる。

$$q = \frac{3\pi r\eta d}{P}(V_1 + V_2) \quad (15)$$

複数の粒子で帯電量を測定することで、それらの最大公約量が電気素量 e として得られる。

(11)式中の $V_0 + V_1$ 、(14)式中の $V_2 - V_0$ 、(15)式中の $V_1 + V_2$ 部分にそれぞれの測定値の最大公約量を代入することでも電気素量 e を得ることができる。

また、帯電量が量子化されていることがわかれば、測定値の最小値を電気素量であると推定することもできる。

1.3. 使用器具, 装置について

1.3.1. 島津理化 ミリカン電気素量測定器 MLD-5

極板間に噴霧された小滴は光源からの光が当たることによりチンダル現象によって観測することができるため, 1.3 電気素量の測定原理 で示した測定原理によって電気素量を測定することができる。主な仕様として顕微鏡部分に目盛間隔 0.2 mm の接眼スケールが内蔵されており, 電極間印加電圧は 100~480 V で連続可変, 極性切換えスイッチがついている。

小滴を極板間に直接噴霧するため多くの測定値が得られるが, 一方で精密な測定を行う場合には噴霧によって極板間の空気の温湿度が変化し粘性率にずれが生じる, 対流を起こしやすいといった欠点がある。



Figure 4 ミリカン電気素量測定器 MLD-5

1.3.2. ドリテック SW-109 スポーツタイマー

粒子の落下時間および上昇時間, 下降時間の測定に使用した。読取限度は 1 / 100 秒。

本研究で行った測定には開始から終了までの間隔が 1 秒にも満たないほど非常に短いものも多いため, 測定における誤差が大きくなってしまわないかと考えられる。

1.3.3. TANITA デジタル温度計 TT-559

実験室の温湿度の測定に使用した。主な仕様を以下に示す。

温度表示範囲	-5.0 ~ 50.0 °C
温度目盛単位	0.1 °C
温度測定精度	0 ~ 40 °C ±1.0 °C 上記以外 ±2.0 °C
湿度表示範囲	20 ~ 95 %
湿度目盛単位	1 %
湿度測定精度	35 ~ 75 % ±5 % 上記以外 ±10 %

測定した温湿度から, 6.1.湿り空気の密度を計算で求める。より空気の密度を求めた。また, 空気の粘性率については, 「気体編 1-2. 気体の粘度」(流体工業, 発行年不明) より抜粋した以下の表中の値を参考に最も近い温度条件での値を用いた。

単位は[mPa・s]=[$\times 10^{-3}$ N・s/m²]に換算して用いた。

Table 1 空気の粘度[mPa・s]

名称	0 °C	20 °C	50 °C	100 °C
空気(AIR)	0.0171	0.0181	0.0195	0.0218

1.3.4. Logicool HD Webcam C270

測定実験のモニター表示および動画撮影に使用した。ビデオキャプチャーは 720 p (1280 × 720) の解像度をもち, フレームレートは最大 30 フレーム/秒である。

1.3.5. Microsoft Windows Media Player

測定実験のようすを撮影したビデオのコマ送りに使用した。

1/14 fps (約 7/100 秒) または 1/15 fps (約 13/100 秒) の精度で測定することが可能であるが, 1/14 fps であるのか 1/15 fps であるのかの表示がされず, その規則性も不明なため, 測定ごとに開始(終了)時点のフレームが含まれる 1 秒間が 1/14 fps であるのか 1/15 fps を確認しなければならない点で測定に時間を要する。

1.3.6. sartorius 上皿天びん TE6101-L

測定実験に用いる油の密度を求めるために使用した。ひょう量 6,100 g, 読取限度 0.1 g
既に製造が中止されており, 買換案内がなされている。推薦型式として
Practum 6101-1SJP, Entris8201-1S, Quintix 6101-1SJP の 3 製品が示されている。

1.3.7. HANNA 温度テスター/ HI 98509 Checktemp 1

光源からの熱線による極板間の温度変化の測定に使用した。測定には先端 40 mm 以上を
測定対象と接触させる必要がある。主な仕様を以下に示す。

測定範囲	-50.0 ~ +150.0 °C
検出単位	0.1 °C
精度	-20 ~ +90 °C ±0.3 °C
	上記以外 ±0.5 °C
環境条件	0 ~ 50 °C

1.3.8. ヤガミ 電気素量測定器 YMN-5

1.4.1.島津理化 ミリカン電気素量測定器 MLD-5 同様に 1.3.電気素量の測定原理 によ
って帯電量を測定することができる。

小滴が噴霧される噴霧室と極板間が別になっており噴霧による温湿度の変化や対流への
影響は 1.4.1.島津理化 ミリカン電気素量測定器 MLD-5 に比べると小さいと考えられるが,
噴霧された小滴が上部極板の孔を通過する個数が少なく, 多くの測定値を得るには相応の
時間を要する。

また, 基礎物理学研究室に備えてあるものは電圧計が故障しており, 該当部品を修理また
は交換する必要があるため, 小滴の半径を求める以外には使用できない状況である。



Figure 5 電気素量測定器 YMN-5

2. 電気素量の測定

2.1. 測定手順の確認

Web カメラを用いてモニターに極板間の様子を表示し、ストップウォッチを用いて測定を行った。

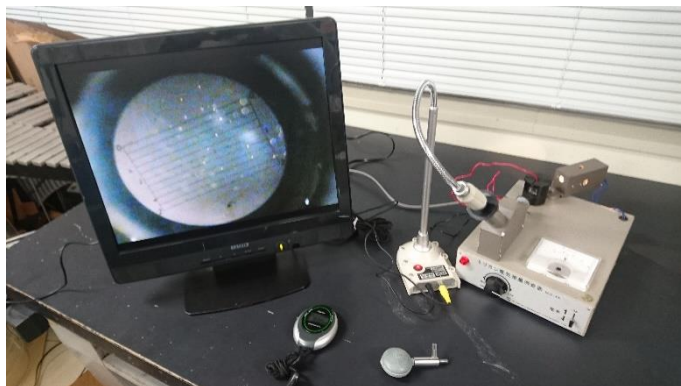


Figure 6 ストップウォッチによる測定実験の様子

測定に当たっては、噴霧直後に一度電場をかけることで帯電粒子の選別を行った。これは視野内の帯電粒子を減らすことで測定する粒子の運動を追いやすくするとともに、測定中に粒子がその周囲にある他の粒子と接触し結合することを防ぐねらいがある。用いる粒子の種類によって除去率の差が見られるが、これは粒子の帯電しやすさに言い換えることができる。と考える。

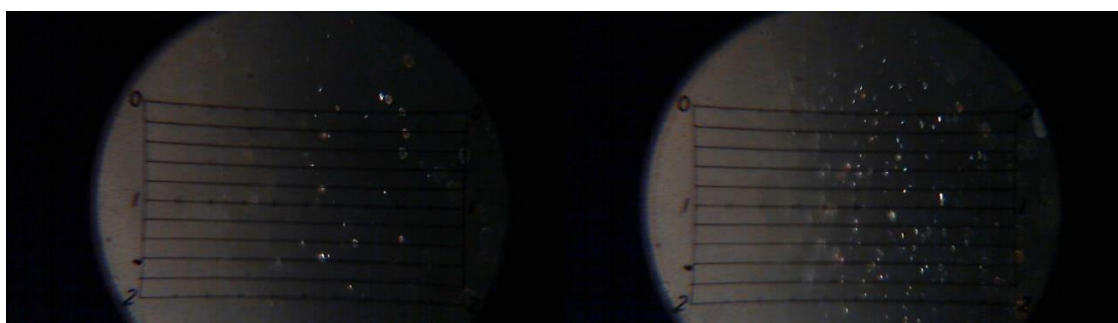


Figure 7 噴霧直後のラテックス液 (左) および油滴 (右)

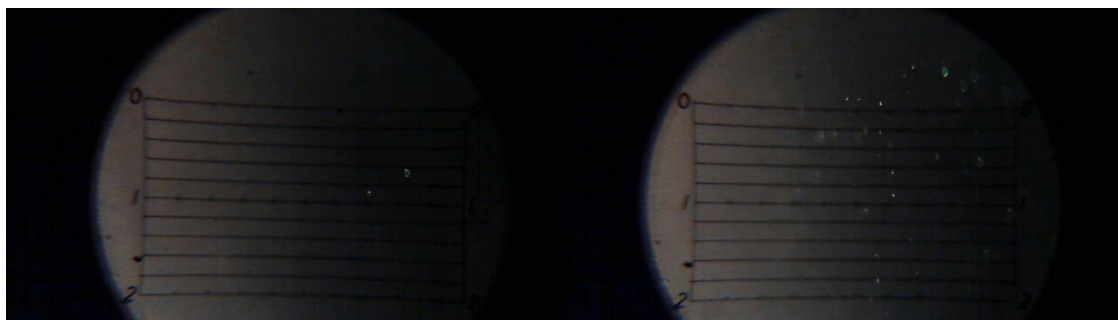


Figure 8 選別後のラテックス液 (左) および油滴 (右)

測定の開始および終了は接眼スケールの目盛線上を粒子が通過するタイミングとし、粒子が終端速度に達している必要があることを考慮しておよそ一目盛分（0.2 mm）以上運動した後の粒子を測定対象に取った。このとき必要に応じて電場をかけ粒子の運動開始位置を調整した。

この測定手順と以下の条件で測定実験を行い、帯電量は(11)式より得たものを用いた。

粒子の種類	ラテックス液
粒子の密度[kg/m ³]	1.05×10 ³
実験室の温湿度	22.0 °C, 50 %
空気の密度[kg/m ³]	1.190721
空気の粘性率[N・s/m ²]	1.81×10 ⁻⁵
重力加速度[m/s ²]	9.8
印加電圧[V]	100
極板間電圧[m]	5.0×10 ⁻³
測定間隔[m]	1.0×10 ⁻³

測定の結果を以下に示す。

Table 2 ラテックス球を用いた測定の結果

No.	落下時間 [s]	上昇時間 [s]	下降時間 [s]	半径 [m]	V_0+V_I [m/s]	帯電量 [C]
1	51.03	30.03	13.03	3.94E-07	5.29E-05	3.56E-19
2	82.88	13.16	10.63	3.09E-07	8.81E-05	4.64E-19
3	42.50	17.63	9.69	4.32E-07	8.03E-05	5.91E-19
4	106.06	4.47	4.03	2.73E-07	2.33E-04	1.09E-18
5	20.57	14.19	5.88	6.21E-07	1.19E-04	1.26E-18
6	32.65	5.87	4.38	4.93E-07	2.01E-04	1.69E-18
7	32.84	5.34	3.97	4.91E-07	2.18E-04	1.82E-18
8	46.66	3.25	2.84	4.12E-07	3.29E-04	2.31E-18
9	18.53	6.47	3.76	6.54E-07	2.09E-04	2.33E-18
10	42.72	3.28	2.75	4.31E-07	3.28E-04	2.41E-18
11	36.00	3.38	2.78	4.69E-07	3.24E-04	2.59E-18
12	25.37	3.97	2.87	5.59E-07	2.91E-04	2.78E-18
13	48.25	2.34	2.15	4.05E-07	4.48E-04	3.10E-18
14	13.44	6.15	3.25	7.68E-07	2.37E-04	3.10E-18
15	18.06	4.37	2.97	6.62E-07	2.84E-04	3.21E-18
16	42.50	2.22	1.97	4.32E-07	4.74E-04	3.49E-18
17	17.78	3.84	2.69	6.68E-07	3.17E-04	3.61E-18
18	23.18	2.96	2.16	5.85E-07	3.81E-04	3.80E-18
19	17.56	3.40	2.43	6.72E-07	3.51E-04	4.02E-18
20	27.50	2.4	2.07	5.37E-07	4.53E-04	4.15E-18
21	15.78	3.43	2.40	7.09E-07	3.55E-04	4.29E-18
22	46.91	1.47	1.34	4.11E-07	7.02E-04	4.92E-18
23	16.44	2.06	1.69	6.94E-07	5.46E-04	6.47E-18
24	47.87	1.07	0.97	4.07E-07	9.55E-04	6.63E-18
25	24.97	1.40	1.22	5.63E-07	7.54E-04	7.25E-18
26	6.50	3.94	1.85	1.10E-06	4.08E-04	7.68E-18
27	38.04	0.75	0.65	4.56E-07	1.36E-03	1.06E-17
28	65.37	0.53	0.47	3.48E-07	1.90E-03	1.13E-17
29	12.12	0.54	0.48	8.09E-07	1.93E-03	2.67E-17
30	38.85	0.16	-	4.52E-07	6.28E-03	4.84E-17

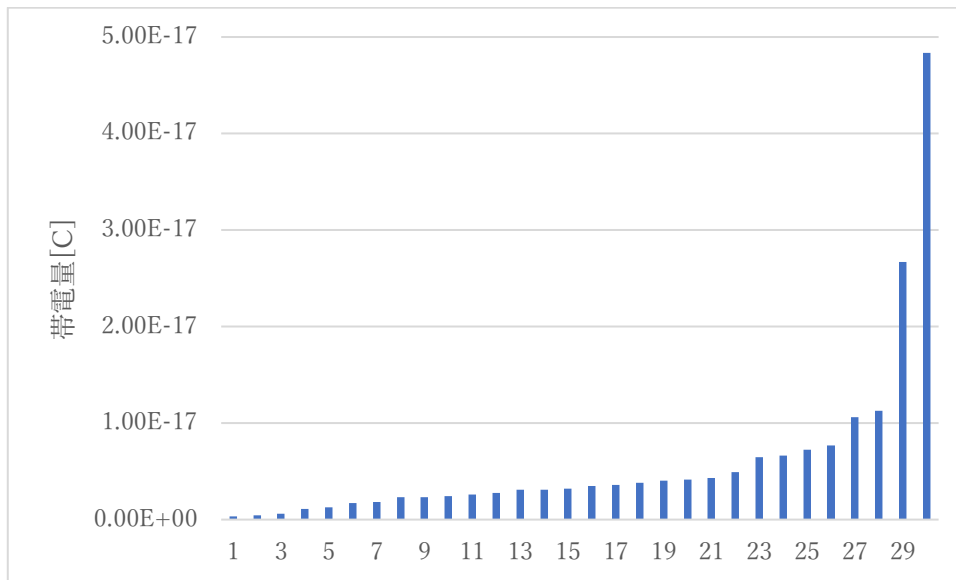


Figure 9 ラテックス球を用いた測定の結果

帯電量は大きな値が多く得られ、形もなだらかであるため最大公約量を求めることが難しい。よって最小値 No. 1 から、

$$3.56 \times 10^{-19} \text{ C}$$

を電気素量として得たが、標本が一つしかないため信頼性はかなり低い。

2.2. フレームレートによる測定

2.2.1. ラテックス液を用いた測定

2.1.測定手順の確認 から粒子の運動速度の測定誤差を小さくすることを目的としてストップウォッチからフレームレートへと使用機器を変更した。フレームレートを用いた測定実験において測定の開始および終了は接眼スケールが目盛線上を粒子が通過するときそれらが重なってPC画面上で粒子の光が弱まって見える瞬間とした。

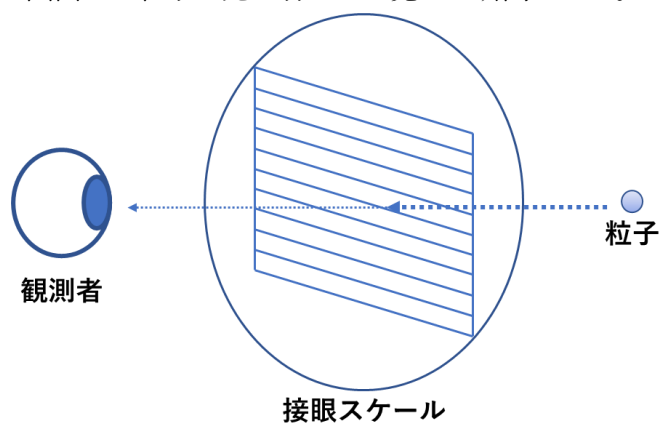


Figure 10 フレームレートによる測定の開始終了目安イメージ

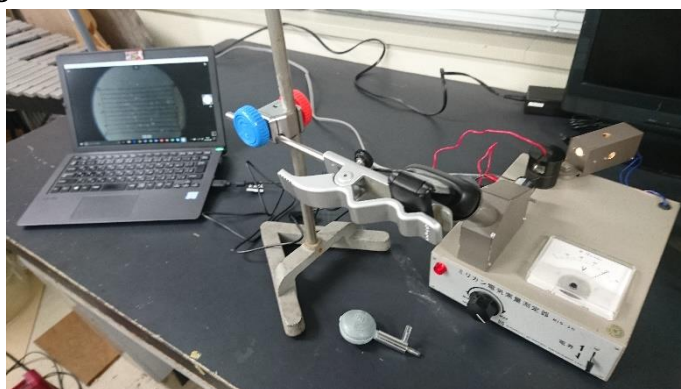


Figure 11 フレームレートによる測定実験の様子

以下の条件で測定実験を行い、帯電量は(11)式より得たものを用いた。

粒子の種類	ラテックス液
粒子の密度[kg/m ³]	1.05×10^3
実験室の温湿度	23.2 °C, 63 %
	18.8 °C, 68 %
空気の粘性率[N · s/m ²]	1.81×10^{-5}
重力加速度[m/s ²]	9.80665
印加電圧[V]	200
極板間電圧[m]	5.0×10^{-3}
測定間隔[m]	1.0×10^{-3}

測定の結果を以下に示す。

Table 3 ラテックス球を用いた測定の結果 2

No.	空気の密度 [Kg/m ³]	落下時間 [s]	上昇時間 [s]	下降時間 [s]	V_0+V_I [m/s]	半径 [m]	帯電量 [C]
1	1.183812	42.67	34.19	13.00	5.27E-05	4.31E-07	1.94E-19
2	1.183812	108.43	11.33	9.07	9.75E-05	2.70E-07	2.25E-19
3	1.183812	144.14	8.88	7.92	1.20E-04	2.34E-07	2.39E-19
4	1.183812	27.33	24.37	8.53	7.76E-05	5.38E-07	3.57E-19
5	1.183812	96.77	7.26	6.45	1.48E-04	2.86E-07	3.61E-19
6	1.183812	76.61	6.86	6.22	1.59E-04	3.22E-07	4.36E-19
7	1.183812	107.40	5.47	4.87	1.92E-04	2.72E-07	4.45E-19
8	1.203079	121.00	4.86	4.08	2.14E-04	2.56E-07	4.67E-19
9	1.203079	42.21	7.00	5.33	1.67E-04	4.33E-07	6.16E-19
10	1.183812	23.50	11.07	5.01	1.33E-04	5.81E-07	6.58E-19
11	1.183812	41.00	6.35	4.23	1.82E-04	4.40E-07	6.82E-19
12	1.183812	43.65	5.25	24.14	2.13E-04	4.26E-07	7.75E-19
13	1.203079	44.73	5.07	4.19	2.20E-04	4.21E-07	7.88E-19
14	1.203079	43.43	4.87	4.20	2.28E-04	4.27E-07	8.32E-19
15	1.203079	30.47	5.90	3.96	2.02E-04	5.10E-07	8.80E-19
16	1.183812	44.00	3.80	3.46	2.86E-04	4.24E-07	1.03E-18
17	1.183812	39.39	4.07	3.40	2.71E-04	4.49E-07	1.04E-18
18	1.183812	18.92	6.47	3.74	2.07E-04	6.47E-07	1.14E-18
19	1.183812	45.11	2.73	1.87	3.88E-04	4.19E-07	1.39E-18
20	1.183812	37.00	2.69	2.23	3.99E-04	4.63E-07	1.57E-18
21	1.183812	47.75	2.27	1.97	4.61E-04	4.07E-07	1.60E-18
22	1.183812	40.53	2.40	2.20	4.41E-04	4.42E-07	1.66E-18
23	1.183812	42.96	2.13	2.00	4.93E-04	4.29E-07	1.81E-18
24	1.203079	50.57	1.82	1.73	5.69E-04	3.96E-07	1.92E-18
25	1.183812	25.13	2.40	2.00	4.56E-04	5.62E-07	2.19E-18
26	1.183812	24.86	2.27	2.00	4.81E-04	5.65E-07	2.32E-18
27	1.183812	79.93	1.16	1.15	8.75E-04	3.15E-07	2.35E-18
28	1.183812	24.07	2.20	1.80	4.96E-04	5.74E-07	2.43E-18
29	1.183812	46.13	1.40	1.31	7.36E-04	4.14E-07	2.60E-18
30	1.183812	48.80	1.35	1.25	7.61E-04	4.03E-07	2.62E-18
31	1.183812	24.81	1.66	1.46	6.43E-04	5.65E-07	3.10E-18
32	1.183812	53.07	0.86	1.82	1.18E-03	3.86E-07	3.89E-18

33	1.183812	34.87	0.95	0.91	1.08E-03	4.77E-07	4.40E-18
34	1.203079	49.57	0.78	0.71	1.30E-03	4.00E-07	4.44E-18
35	1.203079	50.00	0.77	0.73	1.32E-03	3.98E-07	4.48E-18
36	1.183812	18.47	1.02	0.93	1.03E-03	6.55E-07	5.78E-18
37	1.183812	10.71	0.97	0.86	1.12E-03	8.60E-07	8.25E-18
38	1.183812	41.58	0.43	0.40	2.35E-03	4.37E-07	8.75E-18
39	1.183812	24.05	0.40	0.40	2.54E-03	5.74E-07	1.24E-17

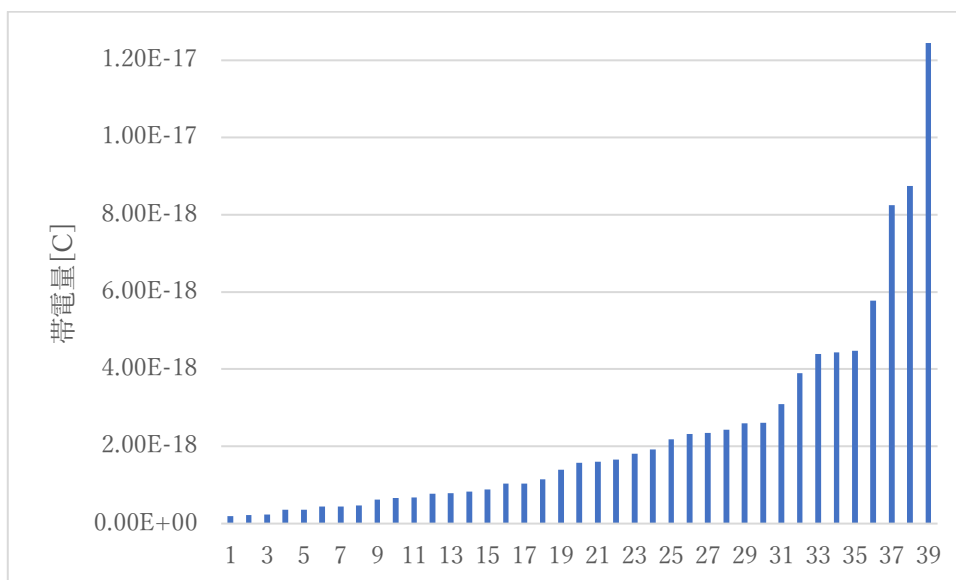


Figure 12 ラテックス球を用いた測定の結果 2

Table 2 および Figure 9 と同様に帯電量は大きな値が多く得られ、形もなだらかであるため最大公約量を求めることは難しい。したがって、最小値付近 No. 1 から No. 3 の平均値と標準偏差から、

$$2.19 \pm 0.19 \times 10^{-19} \text{ C}$$

を電気素量として得た。

2.2.2. 油滴を用いた測定

2.2.1.ラテックス液を用いた測定 から噴霧する物質を食用油に変更して同様の測定実験を行った。また、油滴は噴霧によって得られる粒子が多く帯電量も小さいことから粒子の選別の効率化のために印加電圧を 400 V とした。

以下の条件で測定実験を行い、帯電量は(11)式より得たものを用いた。

粒子の種類	食用油
粒子の密度[kg/m ³]	8.90×10 ²
実験室の温湿度	19.1 °C, 72 %
	6.2 °C, 88 %
重力加速度[m/s ²]	9.80665
印加電圧[V]	400
極板間電圧[m]	5.0×10 ⁻³
測定間隔[m]	1.0×10 ⁻³

測定の結果を以下に示す。

Table 4 油滴を用いた測定の結果

No.	空気の密度 [Kg/m ³]	空気の粘性率 [N・s/m ²]	落下時間 [s]	上昇時間 [s]	下降時間 [s]	V_0+V_l [m/s]	半径 [m]	帯電量 [C]
1	1.201319	0.0000181	28.46	59.97	8.67	5.18E-05	5.73E-07	1.27E-19
2	1.260368	0.0000171	132.73	6.11	5.67	1.71E-04	2.58E-07	1.78E-19
3	1.260368	0.0000171	60.47	9.81	7.07	1.18E-04	3.82E-07	1.82E-19
4	1.201319	0.0000181	22.80	42.00	8.67	6.77E-05	6.40E-07	1.85E-19
5	1.260368	0.0000171	56.85	9.94	7.16	1.18E-04	3.94E-07	1.88E-19
6	1.201319	0.0000181	45.87	12.93	7.95	9.91E-05	4.51E-07	1.91E-19
7	1.201319	0.0000181	39.27	15.07	8.72	9.18E-05	4.88E-07	1.91E-19
8	1.201319	0.0000181	141.93	5.91	5.35	1.76E-04	2.57E-07	1.93E-19
9	1.260368	0.0000171	40.40	12.80	7.87	1.03E-04	4.67E-07	1.94E-19
10	1.201319	0.0000181	31.40	19.40	8.11	8.34E-05	5.46E-07	1.94E-19
11	1.201319	0.0000181	33.56	17.37	8.50	8.74E-05	5.28E-07	1.97E-19
12	1.201319	0.0000181	74.47	8.56	6.73	1.30E-04	3.54E-07	1.97E-19
13	1.201319	0.0000181	34.80	16.43	8.15	8.96E-05	5.18E-07	1.98E-19
14	1.201319	0.0000181	35.94	15.71	8.67	9.15E-05	5.10E-07	1.99E-19
15	1.201319	0.0000181	39.00	14.13	7.73	9.64E-05	4.89E-07	2.01E-19
16	1.201319	0.0000181	36.43	15.17	8.50	9.34E-05	5.06E-07	2.02E-19
17	1.201319	0.0000181	34.16	16.33	8.37	9.05E-05	5.23E-07	2.02E-19
18	1.260368	0.0000171	50.84	9.93	7.07	1.20E-04	4.17E-07	2.02E-19
19	1.201319	0.0000181	47.36	11.67	7.64	1.07E-04	4.44E-07	2.02E-19
20	1.201319	0.0000181	51.00	10.93	7.80	1.11E-04	4.28E-07	2.03E-19
21	1.201319	0.0000181	64.60	9.06	6.86	1.26E-04	3.80E-07	2.04E-19
22	1.201319	0.0000181	51.36	10.67	7.60	1.13E-04	4.27E-07	2.06E-19
23	1.201319	0.0000181	47.53	11.20	7.86	1.10E-04	4.43E-07	2.09E-19
24	1.201319	0.0000181	87.73	7.20	5.93	1.50E-04	3.26E-07	2.09E-19
25	1.201319	0.0000181	20.71	39.47	8.40	7.36E-05	6.72E-07	2.11E-19
26	1.201319	0.0000181	85.57	7.20	6.57	1.51E-04	3.30E-07	2.12E-19
27	1.201319	0.0000181	32.80	15.88	8.13	9.35E-05	5.34E-07	2.13E-19
28	1.201319	0.0000181	60.40	9.05	6.87	1.27E-04	3.93E-07	2.13E-19
29	1.201319	0.0000181	108.36	6.20	5.80	1.71E-04	2.94E-07	2.14E-19
30	1.201319	0.0000181	62.29	8.80	7.05	1.30E-04	3.87E-07	2.14E-19
31	1.260368	0.0000171	63.40	7.86	6.21	1.43E-04	3.73E-07	2.15E-19
32	1.260368	0.0000171	95.40	6.05	-	1.76E-04	3.04E-07	2.15E-19

33	1.201319	0.0000181	52.87	9.78	7.07	1.21E-04	4.20E-07	2.17E-19
34	1.201319	0.0000181	117.27	5.81	5.20	1.81E-04	2.82E-07	2.17E-19
35	1.260368	0.0000171	83.57	6.47	5.40	1.67E-04	3.25E-07	2.18E-19
36	1.201319	0.0000181	78.55	7.34	6.23	1.49E-04	3.45E-07	2.19E-19
37	1.201319	0.0000181	37.70	12.98	8.15	1.04E-04	4.98E-07	2.20E-19
38	1.201319	0.0000181	153.71	4.87	4.51	2.12E-04	2.47E-07	2.23E-19
39	1.201319	0.0000181	113.38	5.77	5.41	1.82E-04	2.87E-07	2.23E-19
40	1.201319	0.0000181	82.87	6.86	5.67	1.58E-04	3.36E-07	2.26E-19
41	1.260368	0.0000171	120.87	4.90	4.21	2.12E-04	2.7E-07	2.31E-19
42	1.201319	0.0000181	58.86	8.36	6.73	1.37E-04	3.98E-07	2.32E-19
43	1.201319	0.0000181	84.50	6.43	5.40	1.67E-04	3.33E-07	2.37E-19
44	1.260368	0.0000171	98.33	4.87	4.36	2.16E-04	3E-07	2.6E-19
45	1.260368	0.0000171	18.57	13.53	5.47	1.28E-04	6.9E-07	3.55E-19
46	1.260368	0.0000171	26.80	8.36	5.20	1.57E-04	5.74E-07	3.63E-19
47	1.260368	0.0000171	40.38	5.89	4.43	1.95E-04	4.68E-07	3.67E-19
48	1.260368	0.0000171	33.85	6.71	4.80	1.79E-04	5.11E-07	3.67E-19
49	1.201319	0.0000181	14.50	24.58	5.55	1.10E-04	8.03E-07	3.75E-19
50	1.260368	0.0000171	38.91	5.85	4.47	1.97E-04	4.76E-07	3.77E-19
51	1.260368	0.0000171	35.93	6.15	-	1.90E-04	4.96E-07	3.8E-19
52	1.201319	0.0000181	14.07	25.80	5.57	1.10E-04	8.15E-07	3.82E-19
53	1.260368	0.0000171	53.45	4.65	3.92	2.34E-04	4.06E-07	3.83E-19
54	1.260368	0.0000171	32.14	6.64	5.15	1.82E-04	5.24E-07	3.84E-19
55	1.260368	0.0000171	50.47	4.67	4.07	2.34E-04	4.18E-07	3.94E-19
56	1.260368	0.0000171	41.35	5.30	4.07	2.13E-04	4.62E-07	3.96E-19
57	1.260368	0.0000171	56.01	4.13	3.70	2.60E-04	3.97E-07	4.16E-19
58	1.260368	0.0000171	88.67	3.00	2.82	3.45E-04	3.16E-07	4.38E-19
59	1.260368	0.0000171	61.37	3.44	3.00	3.07E-04	3.79E-07	4.69E-19
60	1.201319	0.0000181	12.06	15.92	4.37	1.46E-04	8.80E-07	5.47E-19
61	1.260368	0.0000171	34.40	4.16	3.22	2.69E-04	5.07E-07	5.5E-19
62	1.260368	0.0000171	125.73	1.93	1.92	5.26E-04	2.65E-07	5.62E-19
63	1.260368	0.0000171	58.74	2.80	2.47	3.74E-04	3.88E-07	5.84E-19
64	1.260368	0.0000171	56.50	2.10	2.05	4.94E-04	3.95E-07	7.87E-19
65	1.260368	0.0000171	15.71	3.23	2.32	3.73E-04	7.5E-07	1.13E-18
66	1.260368	0.0000171	66.79	1.27	1.13	8.02E-04	3.64E-07	1.18E-18
67	1.260368	0.0000171	15.55	3.06	2.24	3.91E-04	7.54E-07	1.19E-18

68	1.260368	0.0000171	14.47	3.14	2.27	3.88E-04	7.81E-07	1.22E-18
69	1.260368	0.0000171	69.00	1.12	1.04	9.07E-04	3.58E-07	1.31E-18
70	1.260368	0.0000171	12.80	1.98	1.57	5.83E-04	8.31E-07	1.95E-18
71	1.260368	0.0000171	3.93	14.28	1.40	3.24E-04	1.5E-06	1.96E-18
72	1.260368	0.0000171	21.00	0.84	0.79	1.24E-03	6.48E-07	3.23E-18
73	1.260368	0.0000171	8.11	0.97	0.78	1.15E-03	1.04E-06	4.85E-18
74	1.260368	0.0000171	12.67	0.67	0.64	1.57E-03	8.35E-07	5.29E-18

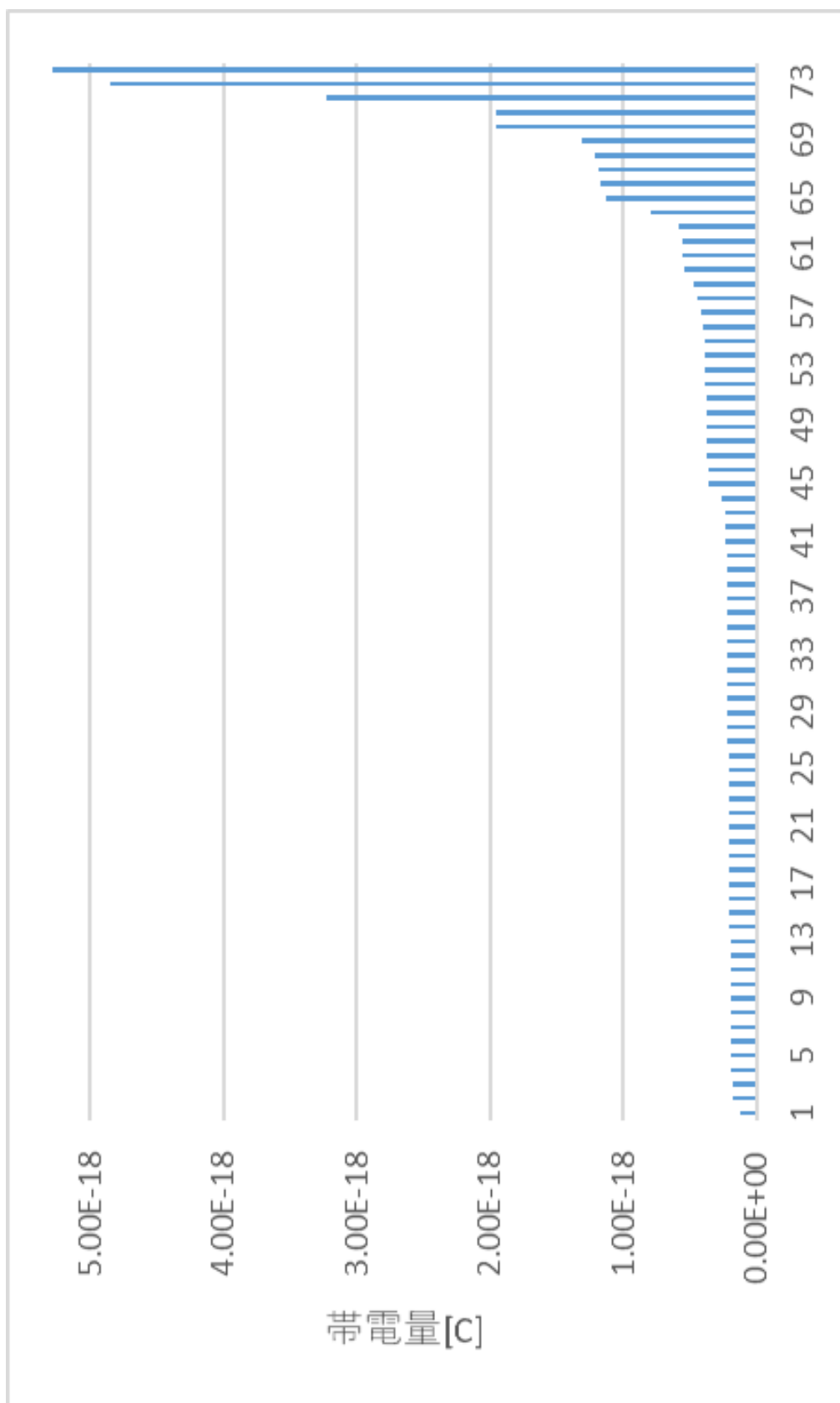


Figure 13 油滴を用いた測定の結果

この結果から、帯電量は量子化されていることが明らかである。したがって Figure 13 より電子一つ分の電荷を持つと考えられる帯電量の最小値付近 No. 1 から No. 44 の測定値において、偏差 20 以上のものを取り除いた値の平均値を電気素量に代えることができると考えた。No. 1 と No. 44 について、それぞれ偏差-39.94 と 26.88 が得られて取り除いた。

したがって、No. 2 から No. 43 の値の平均と標準偏差から

$$2.07 \pm 0.14 \times 10^{-19} \text{ C}$$

を電気素量として得た。3.測定における影響の検討の内容も考慮すると、2.2.1.ラテックス球を用いた測定 によって得られた測定値よりもこちらの値の方がより精密であると考えられる。

また、油滴の帯電量と半径の関係を示したものを以下に示す。

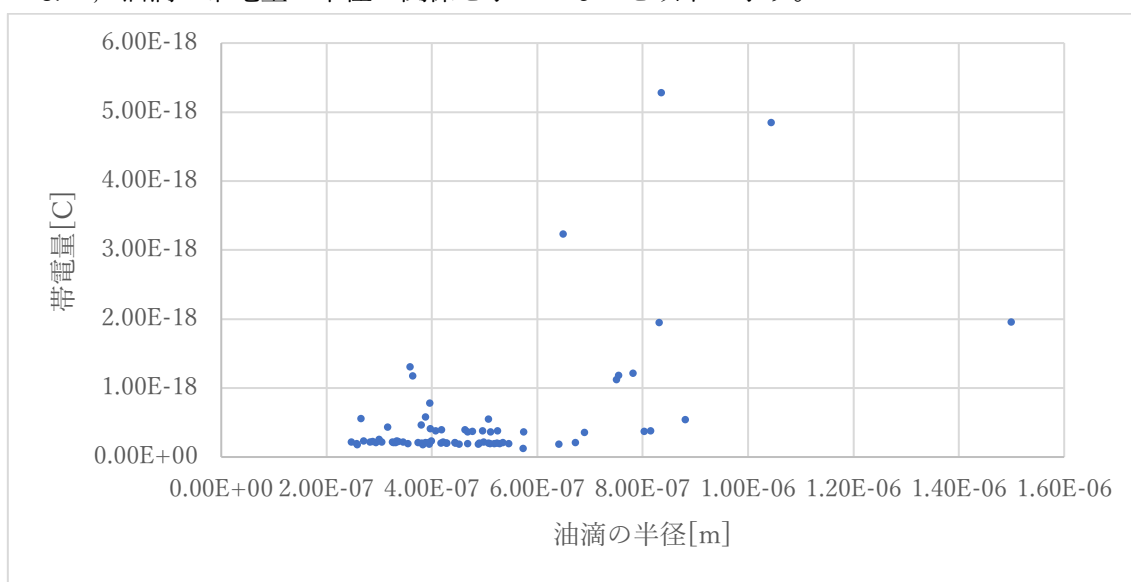


Figure 14 油滴の半径と帯電量

この結果から、粒子の半径が小さい場合は大きな帯電量が得られないことがわかる。これは空気の絶縁の限界値が $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ であることより、電荷が反発しあうことで狭い範囲にとどまることができないためであると考えられる。

3. 測定における影響の検討

3.1. ラテックス液の信頼性

測定実験で使用するラテックス液は1.4.1.島津理化 ミリカン電気素量測定器 MLD-5 の付属品を用いるが、このラテックス液には「Latex sphere dia. 0.804 μm 」との表示がある。この表示（から得た半径 $0.402 \times 10^{-7} \text{ m}$ ）についてラテックス球の自由落下運動の終端速度より求めたラテックス球の直径（Table 3 参照）と比較すると、ずれが生じていることが見て取れる。このことから使用するラテックス液について表示された値の信頼性について調べることは精密な電気素量の測定において重要であると考えられる。

また、ラテックス液の表示が十分に信頼できるものであればラテックス液を用いた測定における計算が簡単になることも期待できる。

Table 5 ラテックス球の直径の比較

	直径[μm]	対製品表示の割合[%]
製品表示	0.804	
測定値平均	0.876 ± 0.207	109.0

また、ラテックス球を電子顕微鏡で観察して撮影された写真を以下に示す。

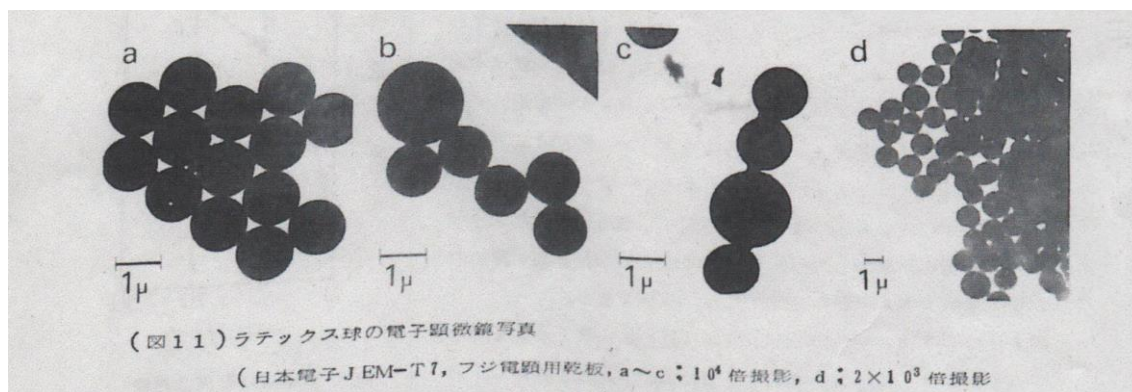


Figure 15 ラテックス球の電子顕微鏡写真（白石，1973）

これらの結果より、実際のラテックス球の大きさはほとんど均一であるが、落下速度の測定によって得られるラテックス球の大きさにはばらつきがあり、大きな値として得られていることがわかる。

3.2. 水を用いる場合に蒸発が与える影響

水を用いて測定実験を行うと測定の途中で水滴が見えなくなり、光源から当たる光の角度を変えても再確認することができないものが存在する。ラテックス球および油滴による測定ではこのような現象は観測されなかった。したがって、これは水滴が視野角から外れたのではなく蒸発によって水滴が消失したためであると考えられる。

水滴は非常に小さく含まれる水も少量であることを考慮すると、わずかな蒸発であっても与える影響は大きく、電気素量の測定実験においては水滴を用いた場合蒸発の影響が無視できないため水滴を用いることは適さないと考えられる。

3.3. 連続して測定を行うことによる影響

3.3.1. 光源からの熱線による極板間温度の変化

光源からの熱線に曝露した状態で極板を開いて上部に紙テープを重ねて貼り付け、そこに 1.4.7.HANNA 温度テスター／HI 98509 Checktemp 1 を刺して温度変化の様子を観察した。上部の極板の代わりに紙テープを用いており実際の測定とは条件が異なるため、実験の精度よりも大まかな傾向をつかむことを目的とする。

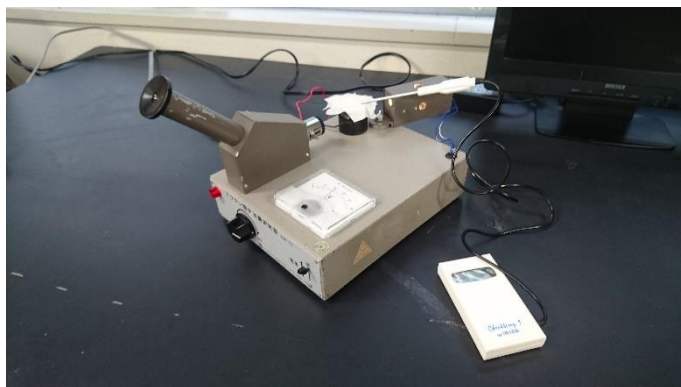


Figure 16 光源からの熱線による極板間温度の変化実験の様子

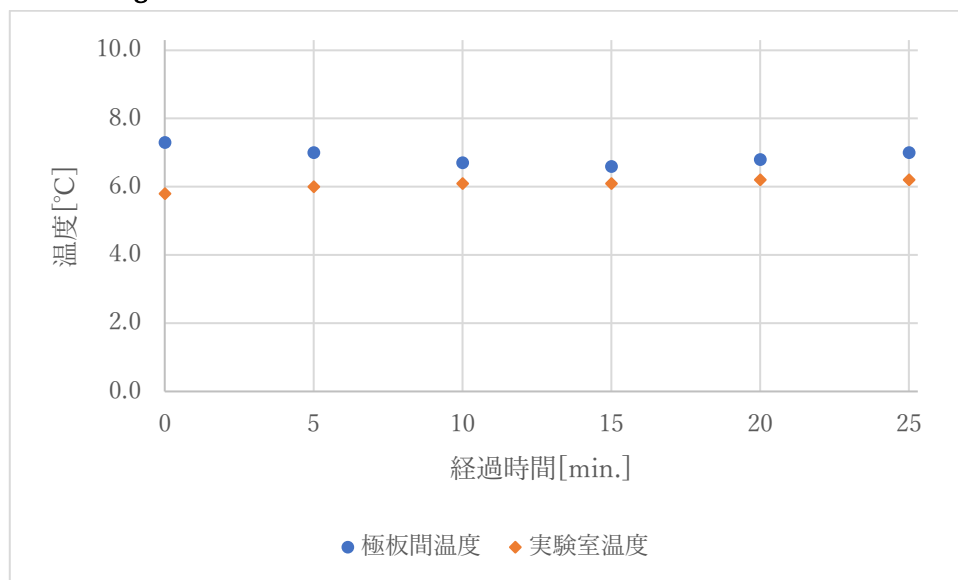


Figure 17 時間経過による極板間温度と実験室温度の変化

実験結果より、極板間温度は室温に近づいた後わずかに上昇を始めることがわかる。極板間温度のわずかな変化が空気の密度 ρ に与える影響は 6.1. 湿り空気の密度を計算で求める。より非常に小さいことがわかる。また、空気の密度 ρ は粒子の密度 σ に比べて非常に小さいため(6)式から考えて、多少の変化があっても帯電量を測定するのにほとんど影響しない。よって、測定中の極板間温度の変化はその影響を無視できるものとして考える。

3.3.2. 噴霧された物質の充満による極板間湿度の変化

3.2.水を用いる場合に蒸発が与える影響 において噴霧を繰り返すと観察される水滴の消失頻度が減少した。これは噴霧された水の充満によって極板間の相対湿度が大きくなったためであると考えられる。したがって、水分を含む物質を用いて長時間にわたって測定実験を行う場合には一定時間ごとに極板を開いて極板間湿度を実験室の湿度と均す必要が生じる。

3.3.3. 直接噴霧による極板間での空気の対流

測定実験を行っているとき視野内で大きく横にずれる、自由落下運動中に長時間同じ位置に留まったり上昇したりする粒子が観測できる。これらの粒子は極板間の空気の対流の影響を大きく受けており、測定結果に誤差を生じさせると考えられるため測定結果から取り除く必要がある。

一度の測定実験全体を通しての極板間の様子を見ると用いる物質によってもわずかではあるが対流の様子に違いがあるように見受けられた。ラテックス球では対流が生じていたのに対して油滴ではほとんど対流は生じなかった。この差について、ラテックス球は油滴に比較して帯電しやすく帯電量の大きな粒子が多いため相互に引き合ったり反発しあったりして対流のように見えることや、ラテックス液に含まれる水分の蒸発などの影響による可能性などが考えられる。

3.4. 噴霧器の口径が粒子の大きさに与える影響

電気素量測定実験においては、多くの式中に粒子の半径 r が組み込まれていることから粒子の大きさが非常に重要な意味を持つことがわかる。測定に当たっては 1.4.1. 島津理化ミリカン電気素量測定器 MLD-5 に付属していた噴霧器を用いた。

噴霧器の口径によって噴霧される粒子の大きさに影響が生じるのであれば、帯電量の小さな粒子を多く得るために半径の小さな粒子が多く得られるよう噴霧器の口径を調整することで効率的な測定が期待できる。噴霧器単体で噴霧した油滴の半径と噴霧器(口径 2 mm)の先端に作成した部品(口径 0.8 mm)を取り付けて噴霧した油滴の半径の比較を以下に示す。



Figure 18 使用した噴霧器と作製した取付部品

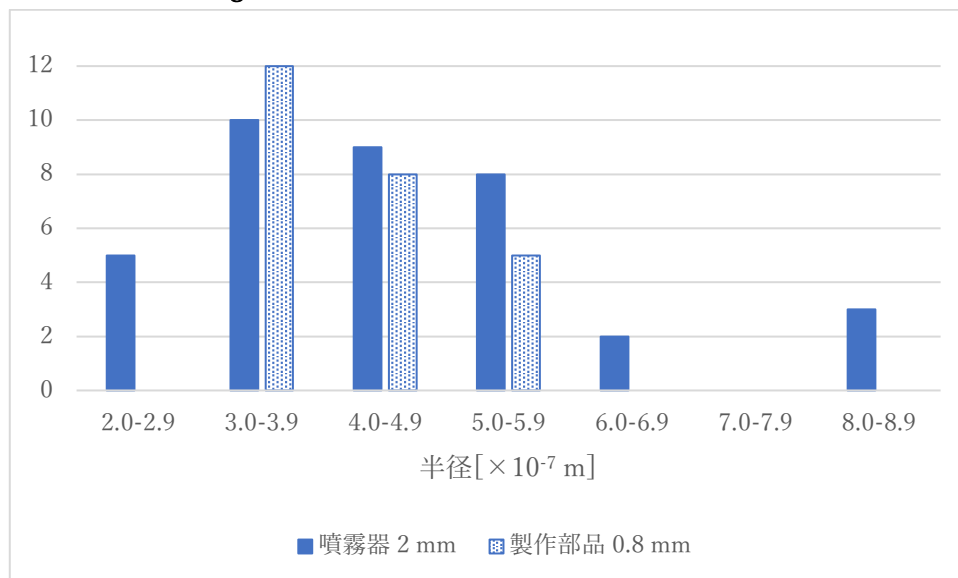


Figure 19 噴霧器の口径の違いと粒子の半径の度数分布

噴霧器の口径は噴霧の際の目詰まりを防ぐ関係から粒子の大きさに比べて十分大きいいため、粒子の大きさにほとんど影響を与えないと考えることができる。一方で、口径を小さくすることで観測される視野内の粒子が適度に減り、粒子の選別に要する時間の減少など効率的な測定が可能になるという点においては測定手順の改善につながった。

測定において使用した噴霧器は液体が金属筒の先端で滴り、そこに空気を勢いよく吹きかけることで噴霧される構造になっている。噴霧される粒子の大きさは液体がこの金属筒から離れる瞬間に決定されていると考えられる。

この金属筒の太さの違いが粒子の大きさに与える影響について検討を行うことを考えたが、0.8 mmの太さの金属棒は噴霧器に挿入することができず、筒状であることとこれ以上細いことが両立しており部品に用いることができそうなものが見当たらずに断念した。

噴霧される粒子が極端に多い(少ない)場合にはこの金属筒の露出の程度を調整することで視野内の粒子数の改善が可能である。

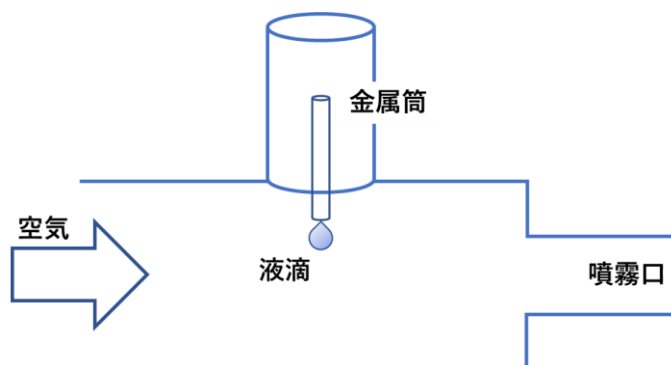


Figure 20 噴霧器の構造

3.5. 噴霧された帯電粒子の電荷の正負

噴霧直後に電場をかけて帯電粒子の選別を行う際、同一視野内において上昇する粒子と下降する粒子を観測することができる。この現象から粒子の帯電理由に関して疑問を生じたため本節の記述を行う。

粒子が帯電する理由としては「油滴をスプレーで空気中に噴霧すると、噴出したときの摩擦によって帯電する。」(滋賀県総合教育センター, 2015) といった内容の記述がされている文献が多い。また粒子の電荷の変化について、「X線を空気に照射すると電子やイオンが発生して、それらが油滴に付着して帯電する。」(大槻ほか 19名, 2009, pp.211) といった内容の記述も見られる。

Table 6 参考文献ごとの帯電理由一覧

記述内容	参考文献
噴霧の際に摩擦によって帯電 電離してイオン化した油滴	滋賀県総合教育センター(2015), 「9 電気素量の測定」 三浦登ほか 19名(2007), 『物理Ⅱ』東京書籍.
噴霧の際に摩擦によって帯電 イオン化した空気分子の付着	兵頭俊夫ほか 19名(2004), 『物理Ⅱ』三省堂.
噴霧の際に摩擦によって帯電	兵藤申一ほか 16名(2003), 『物理Ⅱ』啓林館.
X線の照射によりイオン化した 空気分子の付着	國友正和ほか 9名(2004), 『物理Ⅱ』数研出版.
X線の照射により発生した電子 やイオン化した空気分子の付着	大槻義彦ほか 12名(2009), 『物理Ⅱ』実教出版.
X線の照射によりイオン化した 空気分子の付着	中村英二ほか 17名(2008), 『物理Ⅱ』第一学習社.

摩擦による粒子の帯電については用いる噴霧器の材質および物質が同一であれば噴霧された粒子の正負は帯電列によって正負が定まると考えられるが、実際の帯電粒子において正負は用いる物質により定まっていない。

X線の照射によってイオン化した空気分子の付着による電荷の変化については噴霧によって十分な帯電粒子が得られることから X線の照射を行っていないため、この測定実験においては無視できると考えられる。

4. 測定値の補正

4.1. 本章における研究背景

2.2.2.油滴を用いた測定 より得られた帯電量および電気素量について見たとき、『物理定数表』（飯田他，1969）および「CODATA Value: elementary charge」（Committee on Data of the International Council for Science, 2014）など，一般に示されている値と比較して大きな値を得ているものが多い。（Table 4 参照）

Table 7 得られた電気素量の比較

参考文献	電気素量[C]
2.2.2. 油滴を用いた測定	$2.07 \pm 0.14 \times 10^{-19}$
飯田修一ほか 4 名, 1969	$1.6021917 \times 10^{-19}$
Committee on Data of the International Council for Science, 2014	$1.6021766208 \times 10^{-19}$

これを測定における誤差とせずに測定値を補正することで，精密な電気素量の測定につながると考えたことから本章について記述を行う。

4.2. ストークスの法則

4.2.1. ストークスの法則における仮定

「ストークスの法則を理論的に導き出すに当っては次の五つの仮定が設けられている。

- (1). 媒質中の不均一性は球の大きさに比べると小さい。
- (2). 球は無限に広がった媒質中を落ちてゆくものとする。
- (3). 球は滑らかで変形を受けない。
- (4). 球の表面に於ける媒質の滑りは無い。
- (5). 球の速度は小さいので、この運動に対する抵抗は全く媒質の粘性に依るもので、その中を通る球の運動に依って前方に押しやられている一部分の媒質の慣性に依るものでは少しもない。」(ロバート A. ミリカン, 1950, pp.71-72)

3.1.ラテックス液の信頼性 において測定によって求められた半径の値が大きいことから、(6)式より自由落下速度が大きいことがわかる。これはストークスの法則における仮定「(1)媒質中の不均一性は球の大きさに比べると小さい。」が成り立たっておらず、粒子が空気分子の隙間と比較できる程度に小さいために、空気分子の隙間を通過する瞬間に抵抗力が弱まり速度が大きくなるためであると考えられる。

4.2.2. ストークスの法則の補正

(6)式を V_0 について整理すると以下の(16)式が得られる。

$$V_0 = \frac{2gr^2}{9\eta}(\sigma - \rho) \quad (16)$$

4.2.1 ストークスの法則における仮定 より、粒子が小さいときに粒子にはたらく抵抗力 R は(1)式で示したストークスの法則をそのまま適用して求めることはできないため、空気分子の隙間の大きさが平均自由行路 l によって得られるとすると

$$V_0 = \frac{2gr^2}{9\eta}(\sigma - \rho) \left(1 + A \frac{l}{r}\right) \quad (17)$$

の形で空気分子の隙間の大きさと粒子の大きさを比較した項を入れた補正を行う必要がある。

したがって、 $V_{0\text{有効}}$ は

$$V_{0\text{有効}} = \frac{V_0}{1 + A \frac{l}{r}} \quad (18)$$

となる。また、(6)式を η について整理すると

$$\eta = \frac{2gr^2}{9V_0}(\sigma - \rho) \quad (19)$$

となり、 V_0 部分に(17)式より得られる V_0 を代入することで $\eta_{\text{有効}}$ が得られる。したがって、(17)式と(19)式から以下の(20)式が得られる。

$$\eta_{\text{有効}} = \frac{\eta}{1 + A \frac{l}{r}} \quad (20)$$

この式によって得られた $\eta_{\text{有効}}$ を用いて測定値の補正および電気素量の推定を行う。

4.2.3. e および A の算定

(6)式と(11)式より半径 r を消去して整理すると

$$q = \frac{9\sqrt{2}\pi d}{P} \times [g(\sigma - \rho)]^{-\frac{1}{2}} \times \eta^{\frac{3}{2}} \times (V_0 + V_1) \times V_0^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

が得られ, (18)式または(20)式より

$$q_{\text{有効}} = \frac{9\sqrt{2}\pi d}{P} \times [g(\sigma - \rho)]^{-\frac{1}{2}} \times \eta^{\frac{3}{2}} \times (V_0 + V_1) \times V_0^{\frac{1}{2}} \times \left(1 + A\frac{l}{r}\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (22)$$

となる。よって

$$q_{\text{有効}} = \frac{q}{\left(1 + A\frac{l}{r}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (23)$$

$$e_{\text{有効}} = \frac{e}{\left(1 + A\frac{l}{r}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (24)$$

$$e_{\text{有効}}^{\frac{2}{3}} \left(1 + A\frac{l}{r}\right) = e^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$

であり, (25)式から定数 A を算定できる。縦軸に $e^{2/3}$ をとり, 横軸に l/r をとったグラフにおいて, 測定によって得られた電子一つ分の電荷の値についてプロットして得られた回帰直線の傾きを切片で割ったものが定数 A である。また, 切片 $e_{\text{有効}}^{2/3}$ より, この値を $3/2$ 乗することで $e_{\text{有効}}$ を得ることができる。実験室は大気圧であると考えられるため平均自由行路 l は 7×10^{-6} [cm] (大澤, 2007) を用いる。2.2.2.油滴を用いた測定 によって得られた測定値を用いて作成したグラフを以下に示す。

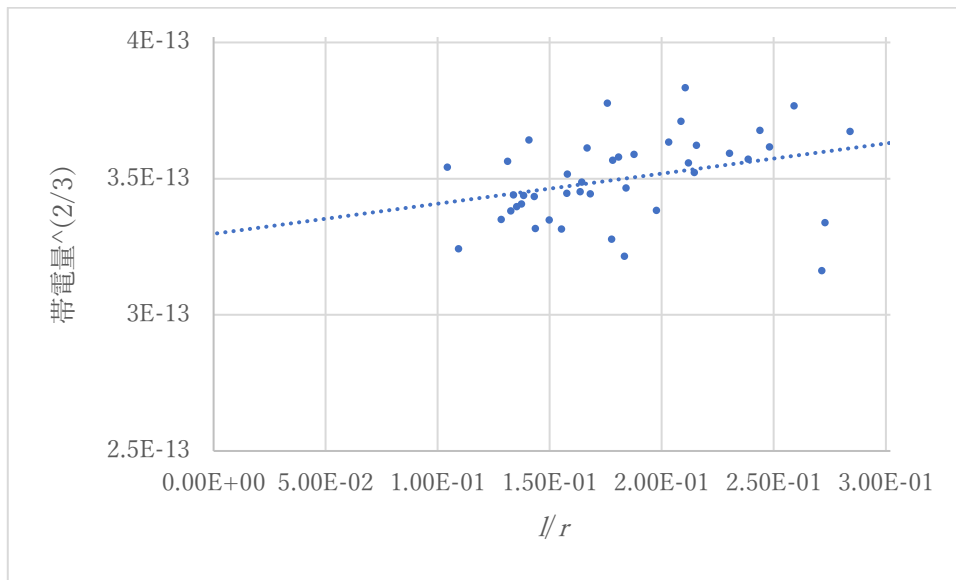


Figure 21 定数 A を算定するための回帰直線

この回帰直線より $e_{\text{有効}} = 1.89 \times 10^{-19}$ C および定数 $A = 0.335$ が得られた。

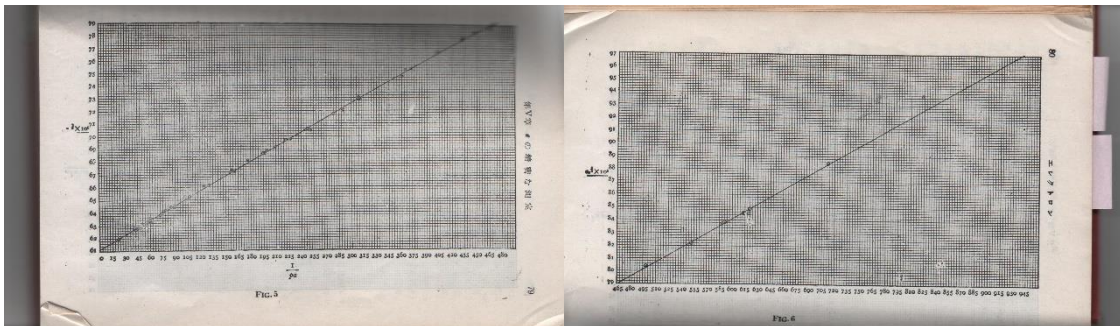


Figure 22 ミリカンによる定数 A の算定

本測定実験において得られた値の補正を行うには定数 $A = 0.335$ を用いるが、相関係数が 0.11 であることには留意する必要がある。ミリカンによる定数 A の算定では、理論的な計算からは $A = 0.788$ が得られたが、「いろいろな油滴で測定した電子の電荷が、その A の値を使って計算すると、互いにより近い値になることを発見したから」(ワインバーグ, 1986, pp.220) という理由から $A = 0.874$ を採用している。

4.3. 補正した測定値による電気素量の推定

2.2.2.油滴を用いた測定 によって得られた測定値に対して、(23)式および平均自由行路 $l = 7 \times 10^{-6}$ [cm], 定数 $A = 0.335$ を用いて補正を行う。補正された測定値によって得られた帯電量を以下に示す。

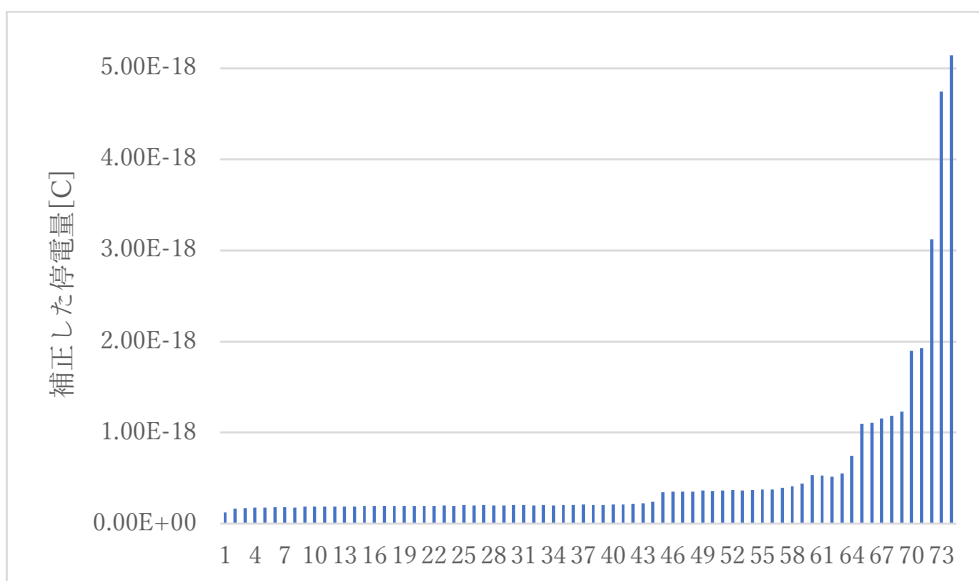


Figure 23 油滴を用いた測定の結果 (補正有)

この結果から、帯電量は量子化されていることが明らかである。したがって Figure 23 より電子一つ分の電荷を持つと考えられる帯電量の最小値付近 No. 1 から No. 44 の測定値において、偏差 20 以上のものを取り除いた値の平均値を電気素量に代えることができると考えた。No. 1 と No. 44 について、それぞれ偏差 -41.21 と 26.42 が得られて取り除いた。したがって、No. 2 から No. 43 の値の平均と標準偏差から

$$1.95 \pm 0.10 \times 10^{-19} \text{ C}$$

を補正された電気素量として得た。

ミリカンが補正に用いた定数 $A=0.874$ を適用した場合には、 $1.80 \pm 0.10 \times 10^{-19} \text{ C}$ が得られる。

5. 結論

ミリカンの電気素量測定装置による測定実験に関する結論として、以下の内容をまとめる。

- 1) 非常に小さな粒子では粒子の運動速度が大きくなるために、ストークスの法則が成立しない。
- 2) 一つの電子が持つ電荷である電気素量は $1.95 \pm 0.10 \times 10^{-19}$ C である。

6. 付録

6.1. 湿り空気の密度を計算で求める。

湿り空気の密度 ρ は以下の式によって求められる。(流体工業, 2007)

$$\rho = 1.293 \times \frac{273.15}{(273.15 + T)} \times \frac{P}{1013.25} \times \left(1 - 0.378 \times \frac{e}{P}\right) \quad (26)$$

$$e = \text{相対湿度}[\%] \times \frac{e(\text{SAT})}{100} \quad (27)$$

$$e(\text{SAT}) = 6.1078 \times 10^{\frac{a \times T}{b + T}} \quad (28)$$

(28)式はティーティンスの近似式である。

式中においてそれぞれの文字の意味するところを以下に示す。

湿り空気の密度 ρ [kg/m ³]	
温度 T [°C]	
圧力 P [hPa]	1013.25
水蒸気の圧力 e [hPa]	
定数 a	7.5
定数 b	237.3

7. 謝辞

基礎物理学研究室に配属されてから1年間、高嶋隆一教授には非常に多くの御指導をいただきました。本論文を記すきっかけに始まり、途中の単純な疑問にも多くの返答をいただき、新たな疑問や課題の提示も含めて、これらの御指導がなければ提出を迎えることはできませんでした。日々の慰安など、碌に指示も聞かない私の奔放な研究室活動を温かく見守っていただきました。また、常に励まし合い気分転換の息抜きにも付き合っていたいただいた基礎物理学研究室の皆様、大学生活4年間を共に過ごした京都教育大学理科領域専攻の学生の皆様、先生方、最後に、何も言わず出来得る限り最大の支援をしてくれた家族、多くの方々に支えられていることを実感することとなりました。

この場を借りて感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 大澤幸治(2007)「プラズマ衝撃波の基礎物理：1. 4 磁場中の無衝突衝撃波」『プラズマ・核融合学会誌』Vol.83-01, pp.66-69, プラズマ・核融合学会.
- 2) 滋賀県総合教育センター (2015)「9 電気素量の測定」,
<http://www.shiga-ec.ed.jp/www/contents/1440578636412/files/kiki_phys_09.pdf>
(参照 2017-8-29).
- 3) 白石正夫 (1973)「ミリカンの実験の検討」,『研究収録. 理科研究(2)編 / 新潟県立教育センター編』pp.11-18, 新潟県立教育センター.
- 4) スティーブン・ワインバーグ (1986)『電子と原子核の発見』pp.219-222, 日経サイエンス社.
- 5) 流体工業 (発行年不明)「気体編 1-2. 気体の粘度」,
<<http://www.ryutai.co.jp/shiryou/gas/gas-nendo.htm>> (参照 2017-10-5).
- 6) 流体工業 (2007)「湿り空気の密度を計算で求める。」,
<<http://www.ryutai.co.jp/shiryou/data-top.htm>> (参照 2017-10-5).
- 7) ロバート A. ミリカン (1950)『エレクトロン』彰國社.
- 8) Committee on Data of the International Council for Science(2014), 「CODATA Value: elementary charge」, <<https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>> (参照 2018-2-1).