帯電測定値に及ぼす諸因子

葛 西 昭 成*

1. はじめに

測定の対象となる静電気には、工場などですでに発生しているものと、実験室で基礎研究のために発生させるものがある。前者に対しては、帯電の状況を正確にはあくし、適切な障・災害対策を講じられるように、帯電体の寸法や形状に適した測定方法を選び、電荷発生の箇所や原因をすみやかに見出さねばならない。後者においては、帯電に基因する諸因子をうまく制御でき、研究しようとする一つの因子と帯電との関係を正しく簡単に知りうるよう、装置や試料の選定が必要である。これらの目的に対して、電荷の発生から測定までの過程を十分に吟味し、いかなる因子が帯電測定値に影響を及ぼすかをできるだけ知る必要がある。

帯電測定値としては、帯電体の全電気量・電荷分布・電位・電位分布などであって、これらを正確に知ることが測定の目的であるが、一般に、ファラデー・ケージによる全電気量の測定以外は正確を期しがたく、測定器の指示と測定条件から算出または推定する場合が多い。これは、測定器の指示が、帯電量のほかに、測定器の電極構造・帯電体形状・近接導体の条件などに大きく支配されるからである。これら測定器の指示に寄与する因子は、主として、電気力線のやりとりの模様（等価回路で考えると相互の間の静電容量）を変え、測定器に入る電気力線を増減させるものである。このことの詳細は測定器の使用方法として説明されるものと思う。ここでは、測定以前にあって、帯電測定値を左右する因子について述べることにする。なお、帯電は固体間の接触・分離や摩擦によるものに限定する。

2. 帯電測定値に寄与する諸因子

電荷が発生するためには、まず2物体の表面が接触し、このあとに2表面の分離が必要である。2物体は必ずしも異物質である必要はなく、なんらかの差異(温度・方向性・ひずみ・非均質性など)があればよい。また、

観測される帯電量は、分離の際、またはその後測定されるまでの間に、中和や逃散した電荷を差引いた残りのものである。

したがって、電荷の発生と逃散を左右するものとして、一方において帯電体の物質や形状、他方接触のしかたや分離速度などの力学的因子が考えられる。さらに、この現象は主として物体の表面において起こるものであるから、周囲の条件によって大きく影響される。以下、帯電測定値に及ぼす諸因子について述べるが、それらは大きく分けてこの三つに属する。また、現象として観測されているものばかりでなく、理論的に考えられる因子についても述べることにする。

2-1. 物質

物質のいかなる性質が、またその組合せが帯電の符号や量を左右するかは、帯電機構の説明が確立するまでは定量的に厳密にはいえない。むしろ、それが研究の目的であって、そのため他の諸因子を制御する必要があるのである。

帯電符号を決定する帯電列が昔から知られている。第1表は古くから引用されている帯電列から最近の高分子材料を多く含むものまでをまとめた帯電列表である。この表では、各列に共通してある物質のいくつかを同じ行に並べ、全体としてみやすくした。また、右側に金属の仕事関数の順を、帯電列中にある金属と大体一致する位置に書いてみた。なお、この表の9番目のものは、表の下注にあるように、普通の方法によるものでなく、ゴムローラに対する帯電量から求めたものである。この表を見ると、測定者によって多少の違いはあるが、同じ物質は大体同じ所に位置している。このことは、帯電列での位置は物質固有の属性であって、外的条件によってはいくらか変化するものであると考えられる。この変化は物質表面の変化によるものであろうことは容易に考えられる。帯電列を物質の分子構造から説明することが今後の課題であると思う。

ところで、帯電列での位置の開きが大きくとも、帯電量は必ずしも大きくはならない。これは、一つには物質の導電率の相違によって、電荷の逃散量が変わるため、導電率が大きいほど、また、分離速度が遅く観測までの時

* Akinari KASAI 東京理科大学理学部応用物理
Several Factors Influencing Quantitative Measurement of Static Electrification

ゴムローラーでローリングしフッラデ一箱中に落し込んで帯電量を測定したものの
金属の仕事関数の序列

第1図 金属の帯電(接触電位差と帯電量の関係)

A: 金属-誘電体, B: 誘電体-誘電体
第2図 圧着による帯電(誘電率と帯電量の関係)

間が長いほど漏洩逃散する量は大きくなる。しかし、導電率のきわめて低い範囲(約 $10^{-18} \Omega \text{ cm}^{-1}$ 以下)、またきわめて高い金属など(約 $10^8 \Omega \text{ cm}^{-1}$ 以上・帯電の観測には片側を十分よく絶縁する)においては、普通の分離速度の範囲では、導電率の違いによる差異は認められない。後者の例として、金属間の帯電では、導電率に関係なく、両金属の帯電列の位置すなわち仕事関数の差(接触電位差)に比例した帯電量が、Harper¹⁰⁾によって第1図のごとく観測されている。前者の例は2.10の分離速度の影響において見られる。

Coehn¹¹⁾は液体と接する固体における帯電列の位置を誘電率に関係づけることを試み、誘電率の大きいものが帯電列の上位にあるとした。後に彼は¹²⁾、さらにこの法則を拡張し、帯電量は誘電率の差に比例するとした。しかし、ShawとJex¹³⁾およびMacky¹⁴⁾は、この関係は固体間の接触には適用できないことを示した。ところが、RoseとWard⁶⁾は圧着による帯電量が、第2図のごとく、それぞれ、金属対誘電体なら誘電体の、誘電体対誘電体なら小さい誘電率のものの、誘電率に比例する結果を得ている。この説明としては、帯電量は大気中の放電電圧によって抑えられるが、誘電率の小さいものは大きいものより、少ない電気量でこの電圧になるからと

している。

以上のように、帯電量は物質の帯電列での位置・導電性・誘電性によることがわかる。そしてとくに帯電においては、物質内部における性質ばかりでなく、その表面のものが重要な意味を持つ。これらは、物質の組成・分子構造によりきめられ、結晶性物質においては、結晶構造・不完全性(転位・格子欠陥不純物)、また高分子などでは、結晶化度・オリエンテーションなどにも多かれ少なかれ関係しているものと考えられる。化学構造と帯電の関係についての実験結果がようやく二三^{15)~17)}発表されている段階である。今後このような測定結果の集積がおおいに期待される。そのためにも、次項以下に述べる諸因子を十分おさえ、再現性のある実験を行なわねばならない。なお、化学構造と静電特性については本特集の篠原・土田両氏の解説を参照されたい。

2.2. ひずみの影響

HershとMontgomery⁵⁾は各種繊維のフィラメントを他のいろいろのものと摩擦するときの、ひずみの帯電に及ぼす効果を調べ、弾性限界内では、これを無視しうることを認めた。

しかし、圧電性を持つ結晶絶縁物にひずみを与えておき、これと他の物質を接触や摩擦させたときは、当然、圧電分極による電場の効果が考えられるが、この系統的研究はまだないようである。また、イオン結晶ではひずみを与えると転位が起こるが、これに電荷を伴ういわゆる荷電転位(Charged Dislocation)なるものがある^{18),19)}。このような物質に大きなひずみを与えた場合、帯電に影響する可能性がある。

2.3. 試料の大きさと形の影響

電気量が一定の場合、電位は静電容量に反比例する。容量が小さくなると、帯電量が十分大きいとき、気中絶縁破壊を起こし、試料の形・大きさにより規制される帯電量の限界値を与える¹⁴⁾。気中絶縁破壊を起こさない範囲の帯電量で、それがフィラメントの直径に反比例する実験結果があるが²⁰⁾、その機構はまだ明らかでない。粉体についても多数実験結果^{21)~27)}があるが、非常に複雑で不明な点が多い。

2.4. 帯電状態の影響

当初の帯電の有無によって試料に新しく生ずる電気量は変化する。第3図は、真空中(10^{-4} mmHg 以下)および空気中でのくり返し接触・分離による帯電が、接触回数の増加につれて1回の発生量は小さくなり、ついには電荷が飽和に達する模様を示すものである²⁸⁾。いま接触回数 n における帯電量を Q とすると

$$Q = Q_m (1 - e^{-\gamma n}) \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 Q_m は飽和帯電量、 γ は定数である。このような指数関数的な帯電曲線では毎回の帯電が、

接触圧：50g 重，真空度： 1×10^{-4} mmHg 以下，
A：未照射，B：1，C：9，D：18，E：36 単位，
F：72 単位（1 単位 = 5×10^7 レントゲン）

第3図 被照射ポリエレンの帯電曲線

$$\frac{dQ}{dn} = \alpha(Q_s - Q) - \beta Q \quad (2)$$

のように、漏洩がないときの飽和帯電量 Q_s とその時の帯電量 Q との差に比例して増加する分と、その時の帯電量に比例して漏洩する分との差であると考えるのが最も自然である。こうすると、

$$Q_m = \alpha Q_s / (\alpha + \beta), \quad \gamma = \alpha + \beta$$

となる。 α はこれが大きいほど速く飽和に達することを示す定数で、電荷が試料内部に入るようなときは、その拡散係数に比例するものと考えられる。 β は、分離時またその後の電荷逃散を支配する定数で試料の導電率もこれに含まれる。

2-5. 温度の影響

まず、温度による試料導電率の変化が考えられる。これは、温度上昇によって伝導状態に熱励起される電荷担体の数が増加するからである。もし、この熱励起による電荷担体の数が、二つの物質により異なるとすれば、ゼーベック効果と同じ機構による帯電が考えられる。また、摩擦による局部加熱の度合も周囲温度によって制限されよう。実験結果は、現在のところ、室温付近のもののみであるが、大幅な温度範囲にわたる結果が期待される。

Shaw と Jex²⁹⁾ はガラスどうしの帯電において、片方を加熱し温度差を与えると、高温の方が負になることを見出した。同一物質の非対称摩擦による帯電も温度差によるものと考えられ、これらは、熱励起された電荷担体の濃度差による拡散、および熱拡散の機構によるものと考えられる。

2-6. ふんい気の影響

2-6-1. ガス組成

Péclet³⁰⁾ や Macky¹⁴⁾ の研究によると、種々のガス

△：アセテート-ナイロン，○：Pt-ナイロン，
□：ポリエチレン-Au

第4図 湿度による帯電量変化

第5図 帯電符号に及ぼす水分の影響

第6図 気圧による帯電量変化

ふんい気による影響の差はふんい気を乾燥させると非常に小さいことがわかる。したがって、大きな影響は水分によるもので、第4図はその一例である。なお、多くの研究者は水分の影響を、水分吸着による表面導電率のもたらす量的効果のみと考えているようであるが、筆者らの研究によると、帯電列での位置が接近している物質間では、その位置の逆転することもあることがわかった。第5図はその例である³¹⁾。

第7図 電圧印加による帯電量変化

△: Au-テフロン, ●: Pt-ポリエチレン,
○: ポリエチレン-Au, □: アセテート-Au
第8図 摩擦長による帯電量変化

傾角度は, ○: 40°, ×: 35°, ●: 30°
第9図 ルチルの滑落による帯電の接触時間による変化

2-6-2. 気 圧

帯電量が十分大きくなると気中絶縁破壊を起こすようになる。この絶縁破壊電圧は気圧によって変わり、したがって気圧により飽和帯電量が変化する。第6図は Peterson³²⁾が、熔融石英球を金属のタルの中でのころがしたときの最大帯電量の気圧による変化である。この変化は Paschen の法則による気中破壊電圧の気圧の変化によく対応している。

2-6-3. 電磁場の影響

傾斜させた2枚の平行金属板間に電圧を印加し、下の板上をエボナイトの立方体をすべり落す Gill と Alfrey³³⁾

第10図

接触圧: 50g 重, 真空度: 1×10^{-4} mmHg 以下, A: 未照射, B: 1, C: 9 単位 (1 単位 = 5×10^7 レントゲン)
第11図 帯電量に及ぼす分離速度の影響

の実験、同様の方法でホウケイ酸ガラス球を転り落す Peterson²⁶⁾の実験の場合、帯電と電場の関係は、接触による電荷に印加電場により移動した電荷が加わり、帯電量が増減したと解釈されている。Harper³⁴⁾は Medley³⁵⁾の報告より、印加電圧による気中放電が電場による帯電の変化を左右するのではないかと考えた。しかし、比較的高い導電率の物質では気中放電でなくて帯電量が増減する。第7図は筆者らの実験結果で、Pt と熔融石英およびアクリル棒の接触帯電において、印加電圧の効果が接触時間によって強調されていることを示す。

Ta-ナイロン, 相対湿度~75%
第12図 摩擦による帯電量の変化

第13図 種々の導電率をもった繊維の
摩擦速度による帯電量の変化

2-7. 接触面積・摩擦長の影響

試料の片方が良絶縁体であるとき、試料の形、接触加重によってきまる接触面積が大きいと、発生する全電気量は当然大きくなる。また、対象摩擦のように常に新しい面が摩擦されるときは第8図のように帯電量は摩擦長に比例する⁵⁾。而試料が金属のような導体である場合には、分離時、初め離れたところの電荷は最後に離れる点を通して中和されてしまうので、摩擦長によらず、最後に離れる点の帯電のみとなる。金属のタルの中で溶融石英球を連続的にころがすようなときは、被接触面積の飽和に対応して、帯電量もついには飽和する^{32), 36)}。

非対称摩擦では、摩擦する方の点は摩擦される方の線の部分より高温になるが、摩擦長が長いほどこの効果を助長する。

2-8. 接触時間の影響

Donald^{37), 38)}は Cook と Jewel-Thomas らが、金属トイで半導体ルチルをすべりおとさせたときの測定結果を引用し、第9図のように帯電量がすべり下りに要する時間のみに依存することを示している。さらに、すべり始めてからの時間 t における電荷を C 、 t が無限大の時得られる最大電荷を C_m とすると第10図のごとく $\log [C_m / (C_m - C)]$ は時間 t に対し直線的に変化し、 $C = C_m [1 - \exp(-t/\tau)]$ (τ は緩和時間) で表わされることを示している。金属では緩和時間はきわめて小さく接触時間による帯電量変化はほとんどない。絶縁物では、緩和時間と考えられる接触平衡に要する時間はきわめて長いも

のと考えられる。はく離帯電ではおそらく、十分平衡に達していると思われる長時間接触をしているが、接触帯電で接触時間の影響を調べた例はほとんどない。

電圧を印加したときの接触時間の影響は前に述べたが、温度差を与えた場合も、接触時間によって熱伝導や熱拡散の効果に差異を生ずることが考えられる。

2-9. 分離速度・摩擦速度の影響

摩擦速度は一応、接触時間と分離速度に分解して考えられる。第11図は、接触時間を1分間にし、分離速度だけを2とおりに変えたときの接触帯電の帯電曲線である。分離速度が遅いとき前の(2)式における漏洩の定数 β が大きくなるものと考えられる。なお、この場合の試料は原子炉中で照射を受けたもので、その導電率は測定され、わかったものである。試料 A・B・C は大幅に導電率が変化しているが、皆 $10^{-14} \Omega \text{ cm}^{-1}$ 以下であった。第11図によるとこの場合、分離速度の効果は導電率によってほとんど変わらないことがわかる。したがって、この程度の導電率では電荷逃散は分離時の相対する面だけでの中和のみであろうと考えられる。

摩擦速度の増大とともに帯電量は増大する。第12図は Cunningham と Montgomery²⁰⁾ の結果、第13図は Medley によるものである。これら結果は、観測した速度範囲がせいまいのでははっきりとはいえないが、ある飽和値に達する傾向がある。しかも、他の実験より、これら結果が気中絶縁破壊によるものでないことが推測される点に意味がある。

2-10. 物体間の力の影響

接触・分離帯電には、1 dyn 程度の軽い接触から数 kg 重までの圧着に至るまでいろいろの接触荷重が考えられ、また測定結果もあるが、この接触荷重と帯電の関係を広い範囲にわたって系統的に研究した結果はまだない。接触荷重の増加は、試料のヤング率と関係して、接触面積を増加させるばかりでなく、試料のひずみの増加、および表面凸起の破断などが考えられ、単なる量的効果だけではなくさそうである。

第14図は Medley³⁹⁾、第15図は Cunningham と Montgomery²⁰⁾ による結果で、飽和前の帯電量は、法線方向荷重の 1/2 乗に比例している。荷重増加による接触

第14図 法線荷重による帯電量変化

第 15 図 法線荷重による帯電量変化

第 16 図 接触圧変化による帯電符号の反転

面積の増加によるものと考えられる。

Lavy⁴⁰⁾の実験によると、帯電が摩擦による仕事の 1/2 乗に比例することが見出されている。

ところが、Gonsalves⁴¹⁾による結果では、接触圧の変化によって第 16 図のごとく帯電符号の反転が観測されている。彼はこれを電子の表面エネルギー単位によって説明している。すなわち、圧力が小さい間は、絶縁物の浅い表面単位から金属へ電子が移るが、圧力が大きくなると表面のポテンシャル障壁が低くなり、より奥にある深い方の表面単位に、金属からの電子が移動するものとしている⁴²⁾。

2-11. 履歴の影響

試料が上に示したどのような条件にあったか、またそれらがどのように組み合わせられ、くり返されたかという履歴を明らかにすることは、帯電の定量的考察の必要条件である。

3. おわりに

以上、帯電測定値に寄与する因子を考えられるだけ列挙説明した。帯電現象が複雑で、再現性がないといわれるのは、これらの因子が十分一定におさえられないからであると思う。これからの研究では測定器の適切な使用と相まって、よく因子の整理された、一般性のある、研究者どうしが互に利用しあえるような、しかも、ねらいのすぐれた測定結果が多く発表されることを期待する。

文 献

- 1) J. C. Wilcke: *Disputatio Physica Experimentalis de Electricitatibus Contrariis*, Academy of Rostock, (1957)
- 2) P. E. Shaw: *Proc. Roy. Soc.*, **A 94**, 16 (1918)
- 3) D. J. Lehmicke: *Am. Dyst. Rep.*, **28**, 853 (1949)
- 4) J. W. Ballou: *Textile Research J.*, 146 (1954)
- 5) S. P. Hersh, D. J. Montgomery: *Test. Res. J.*, **25**, 279 (1955)
- 6) G. S. Rose, S. G. Ward: *Brit. J. Appl. Phys.*, **8**, 121 (1957)
- 7) 北川徹三: 火災, **7**, 146 (1958)
- 8) E. Fukada, J. E. Fowler: *Nature*, **181**, 693 (1958)
- 9) 竹中治夫, 上野 弥: *Plastics Age*, **10**, 6, 53 (1964)
- 10) W. R. Harper: *Proc. Roy. Soc.*, **A 205**, 83 (1951)
- 11) A. Coehn: *Ann. Physik.*, **64**, 217 (1898); **66**, 1191 (1898)
- 12) A. Coehn: *Ann. Physik.*, **30**, 777 (1907)
- 13) P. E. Shaw, C. S. Jex: *Proc. Roy. Soc.*, **A118**, 97 (1928); **A118**, 108 (1928)
- 14) W. A. Macky: *Proc. Roy. Soc.*, **A119**, 107 (1928)
- 15) J. Henniker: *Nature*, **196**, 474 (1962)
- 16) V. E. Shashoua: *J. Polymer Sci.*, **A1**, 169 (1963)
- 17) 土田英俊, 北島昌夫, 八尾 巍, 篠原 功: 工化, **69**, 1978 (1966)
- 18) 園池実覧: 日本物理学会誌, **16**, 32 (1960)
- 19) 園池実覧: 応用物理, **35**, 761 (1966)
- 20) R. G. Cunningham, D. J. Montgomery: *Text. Res. J.*, **28**, 971 (1958)
- 21) W. R. Harper: *Advances in Physics*, **6**, 365 (1957)
- 22) O. Knoblauch: *Z. Physik. Chem.*, (Leipzig) **39**, 225 (1902)
- 23) W. A. D. Rudge: *Phil. Mag.*, **23** [6] 852 (1912); **25** [6] 481 (1913)
- 24) J. W. Hansen: *Phys. Rev.* **72**, 741 (1947)
- 25) W. B. Kunkel: *J. Appl. Phys.*, **19**, 1053 (1948); **19**, 1056 (1948); **21**, 820 (1950); **21**, 833 (1950)
- 26) J. W. Peterson: *J. Appl. Phys.*, **25**, 501 (1954)
- 27) L. B. Loeb: *Static Electrification*, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heiderberg. 1958
- 28) 橋高重義, 葛西昭成: 応用物理, **29**, 27 (1960)
- 29) P. E. Shaw, C. S. Jex: *Proc. Roy. Soc.*, **A111**, 339 (1926)
- 30) Péclet
- 31) S. Kittaka: *J. Phys. Soc. Japan*, **14**, 532 (1959)
- 32) J. W. Peterson: *J. Appl. Phys.*, **25**, 907 (1954)
- 33) E. W. B. Gill, G. F. Alfrey: *Nature*, **163**, 172 (1949)
- 34) W. R. Harper: *Nature*, **167**, 400 (1951)
- 35) J. A. Medley: *Nature*, **166**, 524 (1950)
- 36) P. E. Wagner: *J. Appl. Phys.*, **27**, 1300 (1956)
- 37) M. B. Donald: *Research*, **7**, 46 (1954)
- 38) W. R. Harper: *Brit. J. Appl. Phys.*, **11**, 324 (1960)
- 39) J. A. Medley: *J. Textile Inst.*, **45**, T 123 (1954); **48**, 112 (1957)
- 40) J. B. Lavy, J. H. Dillon, J. H. Wakelin, J. H. Dusenbury: *Text. Res. J.*, **28**, 897 (1958)
- 41) V. E. Gonsalves: *Text. Res. J.*, **24**, 1 (1954)
- 42) V. E. Gonsalves: *Text. Res. J.*, **23**, 711 (1953)