

# 空中電位の測定と地球の電氣的環境

県立三条高等学校 笹川民雄

## 1 はじめに

高校時代の物理の教科書に「地球は電子が過剰で負に帯電している。」ということが載っていたことは記憶にあったが、どのようにしてそれが測定されたものかは考えたこともなかった。そこで、あらためて身近な実験器具を用いた空中電位測定方法とその原理を考え、実験を試みた。

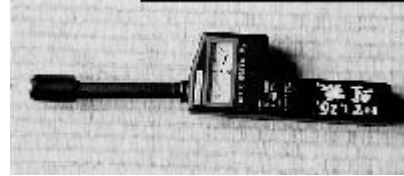


写真2-1

## 2 地球の周りの電位（空中電位）の測定方法

### (1) 静電位計による測定

ここでいう静電位計とは、理科振興法で最近、基準品目になったもので、スタティックモニターといわれるものである（写真 2-1）。帯電体に先端部分を近づけることにより、その電位を測定する装置である。その構造と測定原理について少し述べてみたい。

先端部分は図 2-1 のように、モーターで回転する羽根形の金属板 A と固定された金属板 B からなる。図 2-2 のように、この装置を帯電体に近づけたときを考える。金属板 A、B が重なるときは、帯電体の電界は金属板 A で遮蔽され、金属板 B には表面電荷は現れない。一方、金属板 A、B の重なりがなくなるときは金属板 B に表面電荷が現れる。金属板 B を電流計を通して接地しておけば、モーターの回転とともに電流計に電流が流れることになる。この電流値を読みとることにより帯電体の電位を測定することができる。

定量的に考える。帯電体と金属板 A との距離を  $D$ 、金属板 A、B 間の距離を  $d$ 、金属板 A の半径を  $r$  とする。また、回転の角速度を  $\omega$  とし、帯電体の電位を  $V$ 、金属板 B に誘起される電気量を  $-Q$  とする。帯電体と金属板 B との電気容量は  $C = \frac{S}{D+d}$  となる。ただし、 $S$  は金属板 B の A に遮蔽されない面積である。よって電流計に流れる電流  $I$  は次のようになる。

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = \frac{dS}{dt} \frac{e_0 V}{(D+d)} = \frac{\pm e_0 V}{(D+d)} \cdot \frac{1}{2} r^2 \omega \cdot 2$$

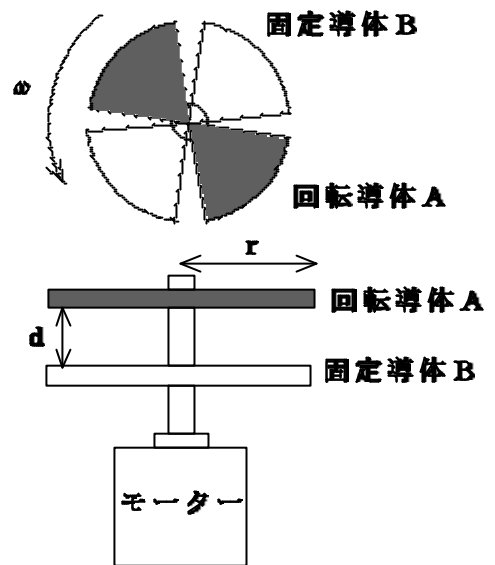


図2-1

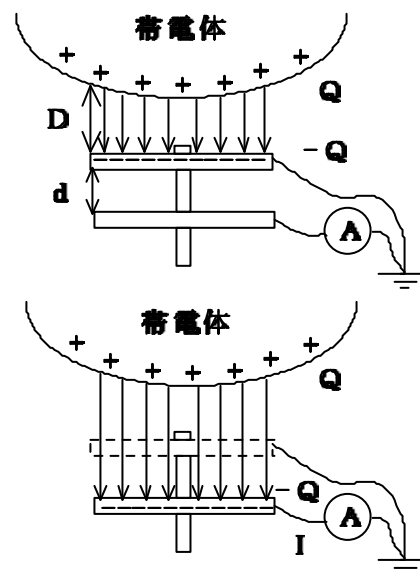


図2-2

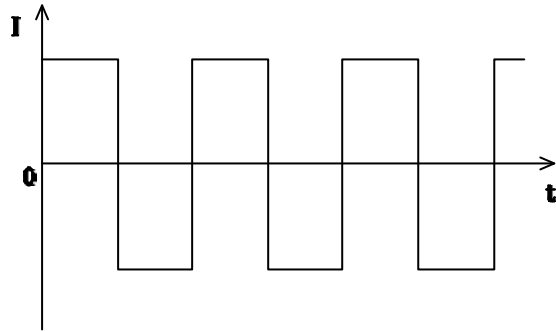


図2-3

図 2-3 のような矩形電流が流れる。しかも電流の最大値が帯電体の電位  $V$  に比例しているので、逆に電流を測定すれば  $V$  がわかることになる。これが、静電計の原理である。

この静電計を利用して空中電位を測定するに図 2-4 のように、電位計を鉛直に立て、そのときの読みと金属板で空中電界を静電遮蔽したときの読みを比較すればよい。計測の際に若干の注意が必要である。まず、測定場所として屋内では家屋が空中電界を遮蔽するのでよくない。家屋から 50m くらい離れなければならない。また、電位計は光電効果の影響をうけるので日中、金属板で遮蔽したときは光まで遮ることになり具合が悪い。太陽光のない夜間、広い空き地で測定しなければならない。特に日中での計測にこだわるならば、

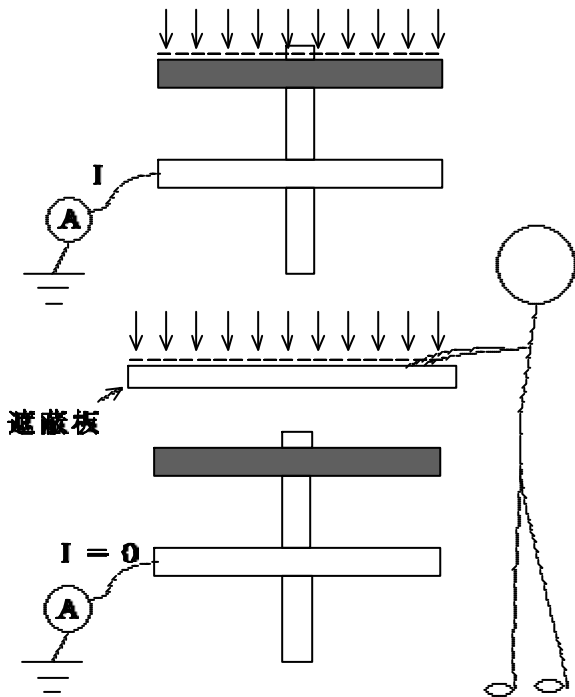


図2-4

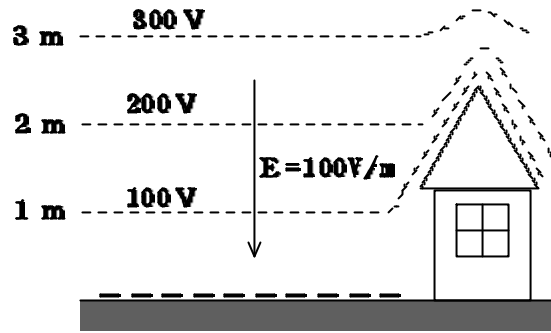


図2-5

金属板で空中電界を遮蔽する方法をやめ、まず建物の近くの戸外で測定し、そのまま電位計のスイッチを切らずに明るさが変わらない広い空き地に出て読みの変化をみればよい。

さて、測定結果であるが、夜間の空き地でアルミ板を電位計の先端に 1 ~ 2mm のほどの距離に近づけて空中電界遮蔽すると、読みは 90V ほど負の方に变化した。このことから、逆にアルミ板で遮蔽した場合を基準にすると遮蔽しないときの読みは約 +90V ということになる。すなわち、地球の上空から地面に向かって電界が存在することがわかった。地球は負に帯電しているのである。

定量的に考える。空中電界を  $E$  とすると電位計の金属板  $B$  に誘導される電荷  $-Q$  は  $Q = \epsilon_0 E S$  である。よって電流値  $I$  は次のようになる。

$$I = \frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 E \frac{dS}{dt} = \pm \epsilon_0 E \cdot \frac{1}{2} r^2 \omega \cdot 2$$

この式から電位計に流れる電流  $I$  を測定すると空中電界  $E$  がわかることになる。雷雲など近づき  $E$  が变化した場合の測定にも応用できる。

さて、精密な測定によると空中電界  $E$  は約 100V/m で、電位のような図 2-5 のようになっていることが知られている。また、屋内や家屋の近くではほとんど地表の電位と同じと考えてよい。

## (2) 炎による測定

図 2-6 のように、帯電している箔検電器の上でマッチや線香などに火をつけてみると箔は閉じることが観察される。炎や炎のような高温物体の周りの空気が電離しており、そのイオンが箔検電器に移動して箔が閉じるのだと推察される。

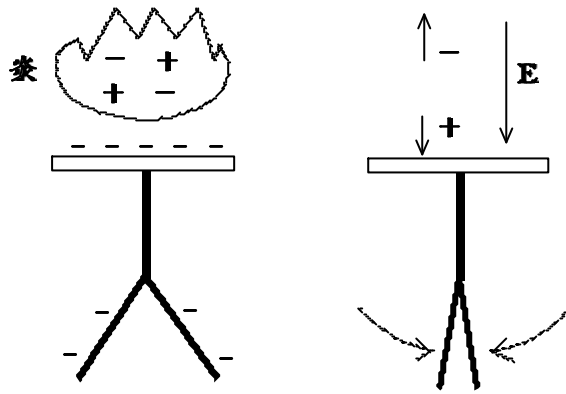


図2-6

この炎が電離しているということを利用した空中電位の測定方がある。写真 2-2 のように、釣り竿（絶縁棒）の先端にエナメル線を付け、エナメル線に脱脂綿やティッシュペーパーなどをくくりつけ、エナメル線の他端は地上に置いた箔検電器の金属板につなぐ。脱脂綿にエタノールをしみこませ、火をつけて釣り竿を高く掲げる。このときエナメル線が地面や人に触れないように注意する。炎の高さを高くしていくとともに、箔が開くことが観察された（写真 2-3）。静電位計を箔検電器の金属板から 3cm の所に近づけたところ、約+300V の電位をもつことがわかった。この実験も建物から離れた平坦な場所で行わなければならない。また、静電位計は戸外の明るい所では正の極性が逆に示される特性があるので注意が必要である。

実験結果は次のように理解される。空中電界は鉛直下向きなので炎の中（あるいは周辺）の負イ

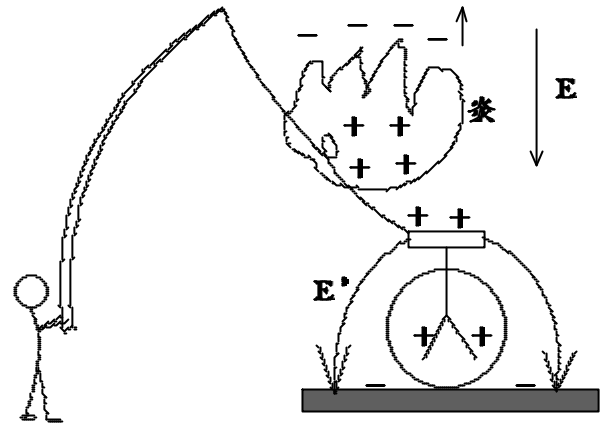


図2-7

オンは上向きに正イオンは下向きに電界から力を受ける。一方、炎はもともと高温気体であり、上昇しようとするのであるから、すなわち上向きの浮力を受けるのであるから、イオンの中で負イオンはこの作用と電界の作用の向きが上向きで一致し上空に逃げ、結果として炎は正に帯電すると考えられる（図 2-7）。これをエナメル線で箔検電器につなぐと箔検電器も正に帯電し、箔検電器と地表の間にコンデンサーが形成され電界が生ずる。箔検電器と炎は導線で結ばれているので等電位である。よって、箔検電器の電位を測定すれば上空にある炎の電位がわかることになる。また、炎の電位はそこでの空中電位に等しいと考えられる。

### (3) 導体による測定

炎の代わりにアルミ缶をエナメル線につるして同じ実験をしてみると箔検電器の箔はアルミ缶を高くするほど開きが大きくなった。箔の開きは炎



写真2-2



写真2-3

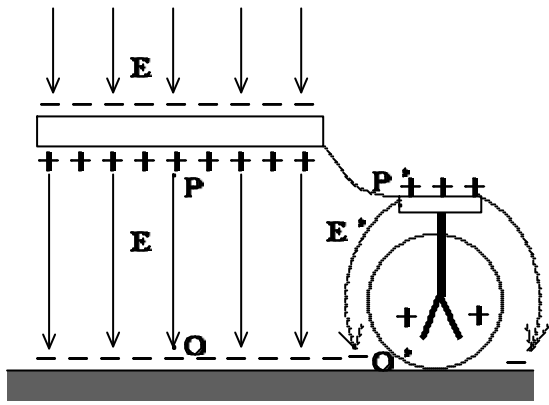


図2-8

の場合よりは小さかった。静電位計を近づけて箔検電器の電位を測定したら約+200Vであった。また、アルミ缶を付けなくともエナメル線だけでも箔は開くことが確認された。

この現象は次のように考えることができる。図2-8のように、孤立導体を空中に置くと空中電界Eのために誘導電荷が導体表面に生じ、導体と地表との電位差Vは

$$V = \int_P^O \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

となる。また、この孤立導体と箔検電器をエナメル線で接続すれば両者は等電位となる。よって

$$V = \int_{P'}^{O'} \vec{E}' \cdot d\vec{s}$$

を満たす電界  $\vec{E}'$  が箔検電器から地表に生ずると考えられる。

アルミ缶の上にエタノールを湿らせた脱脂綿に

火をつけて空中に掲げると箔の開きはさらに大きくなり、電位は上昇した。

### 3 地球の電氣的環境と電荷の大循環

地表近くの下向きの空中電界Eの大きさが約100V/m あることと宇宙線や自然放射能による空気の電離作用による大気の電気伝導率  $3 \times 10^{-14} / (\text{m})$  であるという2つの事実から地球の電氣的環境について考察することができる。

まず、地球全体のもつ負電荷の大きさQはガウスの定理より、地球半径Rとして

$$Q = e_0 E \cdot 4\pi R^2 = 5 \times 10^5 \text{ C}$$

となる。また、電荷面密度は

$$Q / 4\pi R^2 = e_0 E = 9 \times 10^{-10} \text{ C} / \text{m}^2$$

である。すなわち地表  $1 \text{ m}^2$  あたり電子が約  $10^{10}$  個過剰ということになる。

次に、空中電界Eにより大気中に流れる電流密度は  $J = \sigma E = 3 \times 10^{-12} \text{ A} / \text{m}^2$  である。

これから地球全体に流れ込む電流は

$$I = J \cdot 4\pi R^2 = 1500 \text{ A}$$

になる。この電流により地表の電荷 - Qは時間

$$t = \frac{Q}{I} = 300 \text{ s}$$

つまり、わずか5分で消滅してしまうことになる。

実際は空中電界Eは約100Vで定常的に存在しているのだから地表に電子を供給する機構がなければならない。この機構をつくりだしているのは雷であると考えられている。典型的な雷雲内

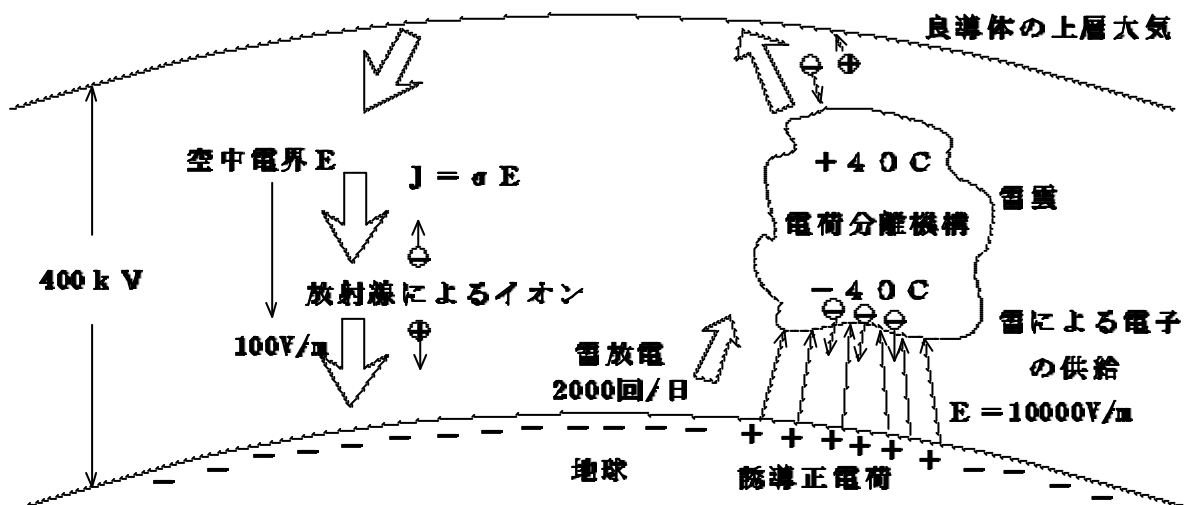


図3-1

では正電荷と負電荷が分離し，上部では約+40C，下部では - 40C の電荷が生じている。この下部の負電荷により雷雲の真下の地表には正電荷が誘導され，誘導電界は上向きで大きさは約  $10^4$  V/m にもなる。この電界によってコロナ放電や雷放電が生じ，地面から雷雲に向かって電流が流れ地面に電子が供給されるのである。また，正電荷をもつ雷雲の上部から上層大気へも電流が流れ，全体として地球規模の電荷の大循環が存在していると考えられている。(図 3-1)

雷雲中の電荷分離機構については落下する霰と上昇気流で吹き上げられる氷晶との衝突による摩擦電気の発生によると考えられている。氷晶が正に帯電し，霰が負に帯電し電荷分離が起こる。初冬の日本海側の地方で雷が発生するときには確かに霰や強風を伴う場合が多い。上昇気流の運動エネルギーと霰の重力による位置エネルギーが静電エネルギーに変化し放電する現象が雷といえよう。これについてはまた別の機会に触れてみたい。

#### 参考文献

- 1) バーガー・オルソン：電磁気学（培風館）
- 2) 孫野長治：雲と雷の科学（NHK出版）
- 3) 速水敏幸：電線のスズメはなぜ感電しない（講談社）