

降雪、降雨の電荷量測定と冬季雷雲の電気構造に関する考察

北村 岩雄, 作本 憲大, 南口 芳文, 池田 長康

1. ま え が き

今日の高度情報化社会を維持する上で必要不可欠なものに、品質の良い電力の供給が上げられる。一旦停電事故が発生すると、状況によっては市民生活にパニックさえも起こしかねないほど重要な影響を与える。そして、この停電事故の大部分は落雷が主な原因である。しかし、雷雲の発達から落雷のメカニズムについての詳細はいまだ不明のままであり、当然、落雷に対する適切な対応も遅れているのが現状である。特に、北陸地方の降雪に伴う落雷に関しては夏の雷雲による落雷と異なり、特有のプロセスで複雑であると言われている。我々は雷雲の構造、電荷量の分布状態など上空の雲の情報を運んで来てくれると思われる雪や雨に着目し、これらの電荷量とその時間的推移を観測し、雷雲の構造、電荷量の分布状態などの推定と雷雲の発達、衰退および雷撃予測の可能性を検討することにした。この報告は降雪および降雨の電荷量の測定方法と得られた結果から推測され冬季雷雲の電気的構造に関して考察する。

2. 測定装置

この研究のポイントは降雪および降雨の正確な測定にかかっている。この電荷量の測定装置は1)降雪および降雨の電荷量を集電する電極部、2)集電した電荷量を測定し、記録する計測回路とからなっている。

2.1 集電電極部

この微量な電荷をいかに漏れないように測定するかという点を考慮して、降雪に対して製作した集電電極部を図1に示す。同図から分かるように良好な耐候性と高い対地漏洩抵抗をもつ構造となっている。同図において、*B*はアルミ製のたらい形状をした集電電極板でありこの上部に雪*H*が積もるようになっている。これは長幹碍子*C*によって地面*F*より非常に高抵抗に保持されている。また、長幹碍子*C*に直接雪がかかると漏洩抵抗が低くなり、測定が出来なくなるため合成樹脂製の保護円筒で周りを覆い、更に、上部からの吹き

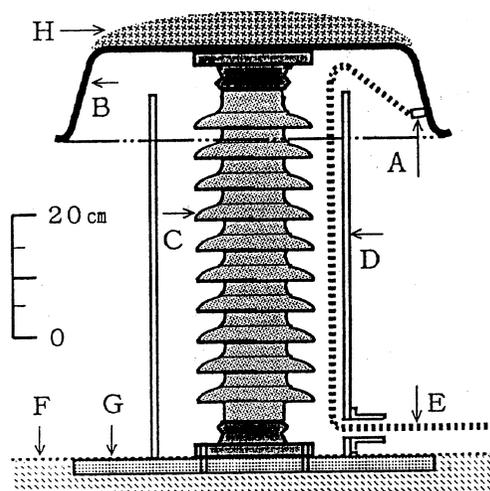


図1

込みに対処するため、集電電極板で覆っている。この電極板で発生した電圧は測定用端子Aから同軸ケーブルEを通して計測回路につながれている。また、この集電電極部は風雨に晒されるので風などにより倒されることがないように、長幹碍子Cを金属の台Gで固定している。

次に、雨に対しても測定可能なように、図2に示すような高漏洩抵抗の集電電極部を製作した。雨は雪と異なり、金属製たらいの集電電極外側に付いた水滴はたらいの中の電荷も集め、いっしょに落下してしまい、集電することが出来ない。従って、集電電極の外側には水滴が付着しないように合成樹脂製の円筒状覆いを設けた。このような形状のため、雨水はすべて溜める方式をとっている。

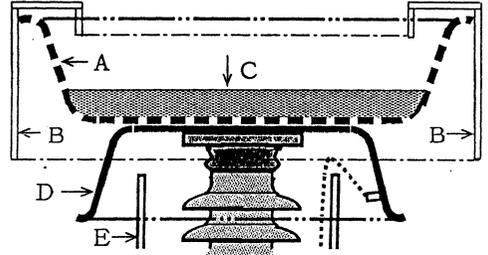


図2

2.2 計測回路と測定方法

集電電極板に積もった雪の電荷量を計測する回路を図3に示す。同図の左端が集電電極部であり、 C_0 は測定用同軸ケーブルの静電容量を含む集電電極部全体の浮遊静電容量で、718pFである。測定用同軸ケーブルは5C-2V、10mを用いており、エレクトロメータに接続されている。このエレクトロメータは超高入力インピーダンス ($1 \times 10^{12} \Omega$) の直流電圧計として用いている。

今、単位時間に $q [C]$ の電荷が降って来るとすれば、 t 秒後、端子電圧を $E [V]$ 、漏洩電流を $i [A]$ とすれば、電荷の保存から

$$qt = C_0 E + \frac{1}{R_0} \int_0^t E dt$$

が成り立つ。右辺の第2項は q を一定とすれば、 $Et / (2R_0)$ となる。実際の回路では t は10秒、 E は50[V] 以下としているため、漏洩電流による電荷の漏れは静電容量 C_0 に蓄えられる電荷量の8%程度であり、 t 秒間の電荷量はほぼ $C_0 E$ で表される。同図におけるスイッチ S_a と S_b は静電容量 C_0 と R_0 を測定するためのものである。静電容量 C_0 の測定は既知の静電容量 C_s をバッテリー B_s で充電し、 C_0 を並列につなぎ、電圧の降下で測定する。また、漏洩抵抗 R_0 は充電された静電容量 C_0 の時定数から求めた。スイッチ S_c は t 秒毎に電荷を放電させ、リセットさせるスイッチである。また、このエレクトロメータには記録計が接続されていて、時間的な推移も測定可能である。

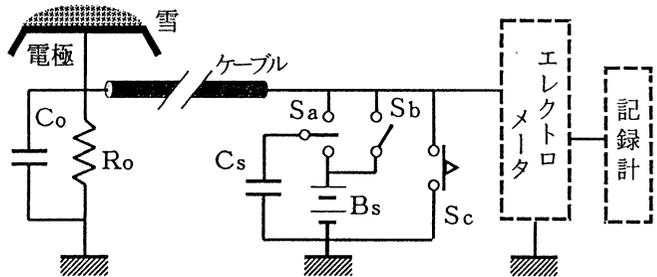


図3

この R_0 の値は碍子の表面の状態により大きく変動するため、澆水シリコンを塗布し、更に、計測回路のスイッチ類は乾燥剤の入った缶の中に入れ、高絶縁抵抗を維持している。しかも、時々点検を行っている。

2.3 降電、降雨センサー

雪や雨が降って来ても、上述の計測回路が動かなければ、測定出来ない。それで、雨などを自動的に感知して計測回路を動作させるセンサーを付加した。これは図4に示すような基盤で自作した、検

出部と図5に示すリレー-CRを動作させるための増幅回路部とからなる。

2.4 測定方法

この計測は雪や雨の電荷量を積分してゆく方法であるから，どこかで電荷を放電させなければスケールオーバーしてしまう。また，計測時間を長くすると，漏洩電荷が増え，電荷量と電圧との比例関係が悪くなってしまふ。更に，電荷の極性が反転した場合の判定が分かり難いということがある。これらの理由により，ある一定時間毎に電荷を放電させ，リセットさせるために，タイマーを使い，オン・オフを繰り返す。この測定ではこの時間を10秒に設定している。図6に測定される電圧の模式図を示す。時間間隔Aはタイマーがオフの状態であり，10秒間の電圧上昇がある。時間間隔Bではタイマーがオンの状態であり，発生した電荷をリセットさせている。この時間は電極の電荷を放電させるに十分な時間があればよく，1秒間に設定している。

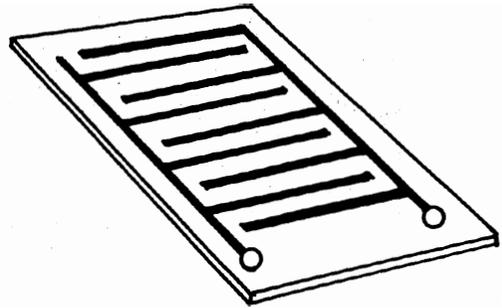


図4

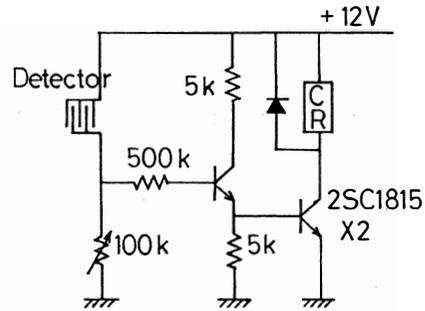


図5

3. 電荷量の測定結果

3.1 降雪および電荷量の測定結果

1993年1月28日および2月12日に得られた測定結果を図7 a)，b)に示す。1月28日は約10cmの積雪があり，気温も0°Cと低く，図8 a)，b)に示す気象衛生の画像と気圧

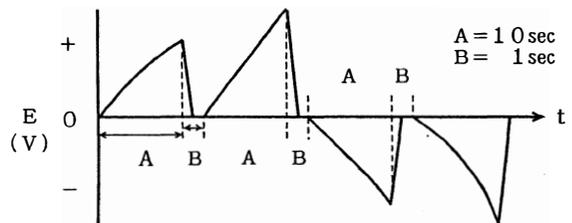


図6

配置図から分るように典型的な冬型の気圧配置であった。降雪電荷量については次節において検討する。図7 c)には8月17日の降雨の電荷量の測定例を示す。この降雨の場合負電荷が多く，しかも，正電荷は短時間に密度が大きく降って来ることが分る。



図7 a)

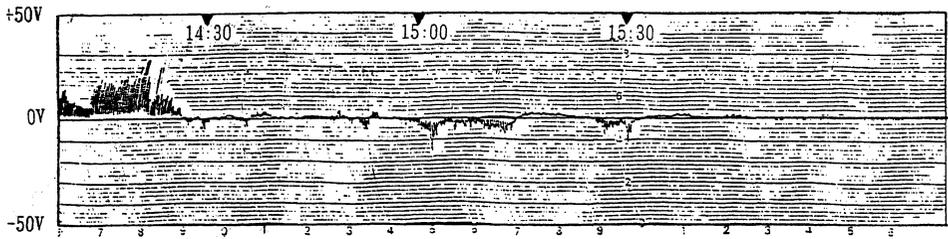


図7 b)

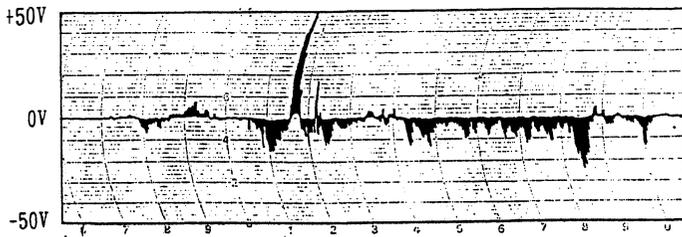


図7 c)

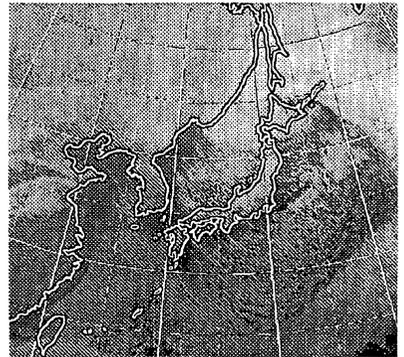


図8 a)

3.2 降雪電荷量の特徴

3.2.1 一分布電荷量の特徴

隣接する電荷を持った集団と明らかに区別出来る別の電荷集団をここでは一分布と呼ぶことにする。3月中旬までに得られた測定データから、これら一分布の形状は図9に示すように四つに分類することが出来る。

1) は電荷量の最大値が一分布のほぼ中央にある, 2) 最大値が一分布の始めのところにある, 3) 最大値が一分布のおわりにある, 4) いずれでもない分布の場合である。これらの中で1) の最大値が分布のほぼ中央にある場合が最も多く現れた。

次に、最大値と平均値との関係を調べた。図10には約40の分布例について調べたものを示す。ほぼ1次関数的な依存性を示す。図中の破線は三角形分布の場合の時である。これから、一分布の平均的な形はやや鋭い三角形分布か、その所々に切れ目の入った分布であると考えられる。また、一分布の最大値とその継続時間は図11のようにはあまり関係が無いことも分った。

3.2.2 降雪電荷の極性

測定データから、1から数個の分布が集まって、1つの同極性集団を形成していることが分る。図12は同極性集団が極性が反転または電荷が無くなるまでの継

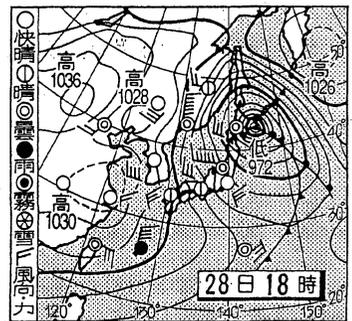


図8 b)

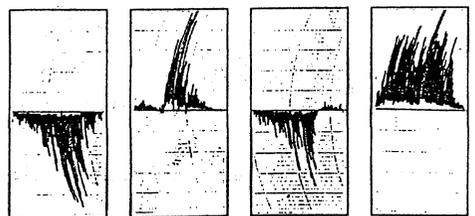


図9

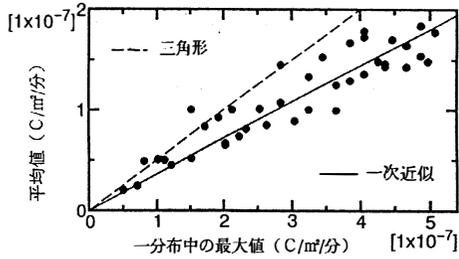


図10

続時間に対してどのような頻度で現れるかを調べたものである。同極性集団の継続時間は8分程度が最も高い頻度で現れ、5分から15分程度で反転している。これらは同極性電荷をもつ雪雲の分布、拡がりや移動速度、風向きなどで決まると考えられる。

次に、1月28日の降雪を極性別にして降雪時間の積算量を調べたものが、図13である。この図から正極性と負極性の雪がほぼ同じ位の時間、交互に降っていることが分る。また、図7 a) を分りやすく降雪の極性別平均電荷量で整理すると図14のようになる。ここで雲が一定速度で移動しているとすれば、ある極性の雪が降った後には、ほぼ同量の反極性の雪が降っていることが分る。これは同じ雲から降って来たとは考えにくく、当然、雲の移動から生じた現象と考えられ、上空では正負両極性の電荷を帯びた雪が対をなして移動していると考えられる。

降雪の電荷量を計算すると、25分間で約 8×10^{-6} C/m² もの電荷が地面に落ちたことになり、これは1 km² 当たり8 C もの電荷が上空から地上に移動したことになる。

4. 冬季雷雲に関する考察

以上の降雪電荷量測定から、降雪の極性は正負交互になっていることが分かった。冬季雷雲は高さが低いことから、雷雲と降雪のそれぞれの荷電極性は大体一致していると考えて良いのではないと思われる。また、通常の雷撃では3から90 C、平均25 C くらいの電荷量を放電しており¹⁾、上述した測定では25分間で

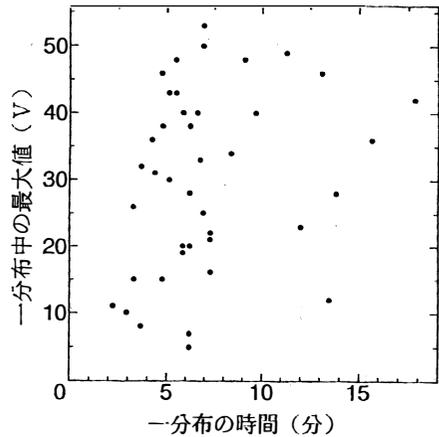


図11

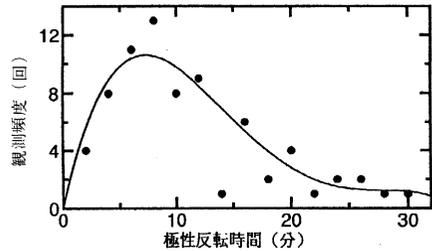


図12

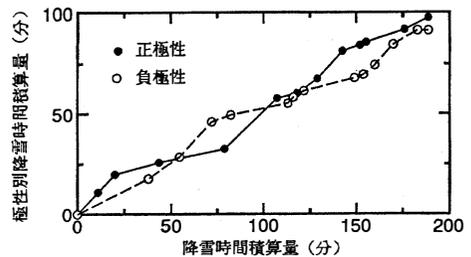


図13

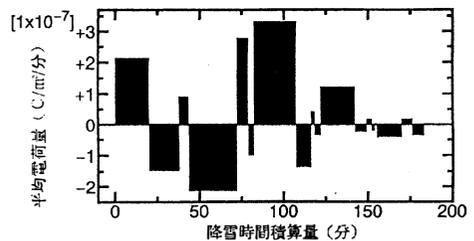


図14

8 C/km² の電荷量の降雪もあり、意外に大きい値である。雲から正負の電荷が等量に降ってくる場合は問題はないが、片方の極性の雲から激しい帯電状態の降雪があった場合、上空での電荷のバランスが崩れることになる。実際の測定データではある程度のアンバランスは常に見られる。

ここでは交互に帯電した雲の塊が次々に押し寄せて来る雲の電氣的モデルから落雷のメカニズムを考えて見る。理論を簡単にするため、図15のように地上 h [m] のところに電荷 q [C] をもった正負の電荷がそれぞれ距離 d [m] 離れて次々に存在するとする。この時、電荷の中心から直下の距離 a [m] はなれたところを雲底とする。この点の電界がある限界を越えれば落雷となると考える。簡単のため、正負一對の電荷による雲底の電界の垂直成分 E_y を求めると

$$E_y = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ -\frac{1}{a^2} - \frac{1}{(2h-a)^2} + \frac{aa}{\{d^2+a^2\}^{3/2}} + \frac{a(2h-a)}{\{d^2+(2h-a)^2\}^{3/2}} \right\} \quad [\text{V/m}]$$

で表される。これから、注目している雲底の電界の垂直成分は隣りの反対極性の電荷により弱められていることが分る。ここで α は注目している雲電荷に対する隣の雲電荷の割合である。それ故、隣りの反対極性の電荷が降雪によってかなりの部分が降雪とともに大地に下ってしまえば、電界をキャンセルする電荷がなくなり、注目している雲底の電界が大きくなり、落雷に至るのではないかと考えられる。図16には隣の雲の電荷の割合 α をパラメータにして電荷の大きさに対する雲底の電界の強さを表したものである。これから、隣の雲の電荷が小さくなると雲底の電界が大きくなることが分る。図17には隣の雲までの距離 d をパラメータにして同様に電荷の大きさに対する雲底の電界の強さを表したものである。遠くなればキャンセルする効果が小さくなり、雲底の電界が大きくなる。

5. む す び

この研究はまだ始まったばかりであるが、幾つかの雷雲からの電気に関する有益な知見が得られた。

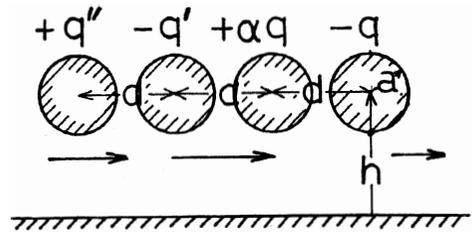


図15

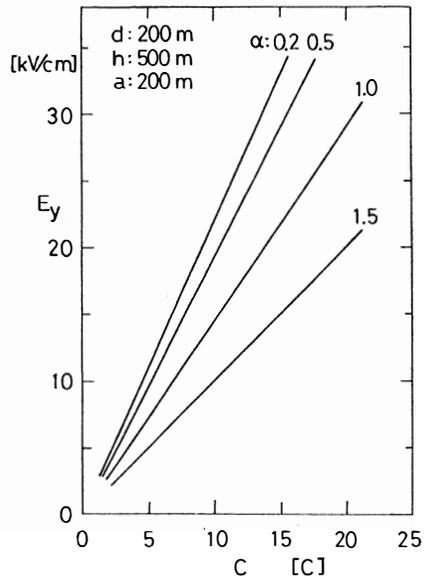


図16

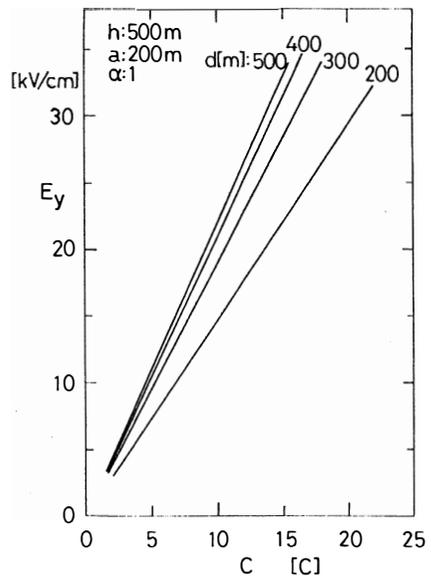


図17

- 1) 比較的簡単な測定装置で降雪および降雨の電荷量を測定することが可能になった。
- 2) 降雪は正負の交互の電荷をもって降って来る。しかも，一回の降雪では正負等量の電荷を地上に下ろす。
- 3) 降雨はほぼ負の電荷をもって降って来るが，この中に短時間強い正電荷を伴う。
今後，更に測定データの信頼性を高めるように装置を改良し，測定箇所も増設し，継続的な観測が可能ないように整備する。これにより，北陸地方の冬季降雪に伴う雷雲の電氣的現象の解明に努力したい。

参考文献

- 1) Uman, "Lightening" Dover, 1984.

Electric charge measurements of snow fragments and rain drops and a consideration of electric structure of clouds in winter

Iwao Kitamura, Norihiro Sakumoto, Yoshifumi Minamiguchi, Nagayasu Ikeda

It is very important for electric power transmission line to protect the electric surge due to lightning. It is therefore indispensable to forecast the lightning. The measurement of the electric charge of snow fragments and rain drops is intended for examining the relations of the electric charge of them, the snow falling and the lightning. It is carried out successively by a simple method which consists of an accumulating metal plate of the snow fragments on the porcelain insulator column and a high sensitive electrometer. It is found from the measurements that snow fragments with both electric polarities fall down alternatively and the almost same charge fall down in one falling period. A simple theory of lightning in winter is proposed based on the charge measurements.

〔英文和訳〕

降雪、降雨の電荷量測定と冬季雷雲の電気構造に関する考察

北村 岩雄, 作本 憲大, 南口 芳文, 池田 長康

電力送電線にとって雷撃による電氣的サージを防ぐことは非常に大切である。それ故、雷撃の予測は不可欠である。降雪の電氣量、降雪と雷撃の関係を調べるために、降雪の荷電量の測定を意図した。これは簡単な方法により、成功裡に行われた。この方法は長幹碍子の上に乗せた雪を集める金属板と高感度のエレクトロメータから構成されている。これらの測定から、両方の電氣的極性をもつ雪が交互に降って来ることおよび一回の降雪の間にはほぼ等量の電荷が降りて来ることが分った。これらの電荷測定にもとずき、冬季雷撃に関する簡単な理論を提案する。