晴天時大気電界微小変動の観測

正員 成田 憲一 (宮城職業能力開発短大)

正員 竹内 伸直 (東北 大)

正員 中鉢 憲賢 (東北 大)

正員 本間 規泰 (東北 電力)

Small Variational Signals of Atmospheric Electric Field under Fair Weather

Ken'Ichi Narita, Member (Miyagi Polytechnic College), Nobunao Takeuchi, Member, Noriyoshi Chubachi, Member (Tohoku University), Noriyasu Honma, Member (Tohoku Electric Power Co., Inc.)

The variational signals of atmospheric electric field under fair weather has been observed both at Aobayama in Sendai and Tsukidate. This signals are measured using slow antenna type electric field meter which is composed of a metal plate electrode and a CR integrator and recorded using a portable pen-recorder. The field meter of this type is suitable to measure relatively rapid variational field signals. We have observed the characteristic variational signals with a few minutes period in a breeze under fair weather. About these signals we examined the comparison of naked metal electrode and insulated one, the dependences of electrode's area and of electrode's height. From signals observed at two different positions the time delay of two waveforms are recognized. This means that scale of electric field perturbation is estimated about several hundred meters. The already found atmospheric circulation with a few minutes suggests that the observed variational electric field signals are caused by the movement of electric charge together with atmospheric circulation.

キーワード：大気電界，空地電流，スローアンテナ，大気ゆらぎ，大気循環

1. はじめに

大気中の電位は高さによって異なり，電位は高度が高いところほど高くなる。また同じ高さの電位が時間的に変化することは，古から指摘されており，これらについての詳しい研究も数多くなされてきている⁽¹⁾。この観測の初期には大気電位の観測として行われることが多かったが，その後は大気電界の観測として行われることが多く，観測用の測定器も種々のものが考案されてきた⁽²⁾。これらの詳しい研究の代表例としては，ヨーロッパ・アルプス地方でのライター⁽³⁾による長年の研究や日本での小川など⁽⁴⁾による研究があげられる。

晴天の場合の大気電界の日変化，経年変化などのゆっくりした時間変動については，長期間の詳しい観測が行われている⁽⁵⁾。

一方，雷雲の挙動や落雷の状況の把握に必要な時間的に数十秒から数十分の比較的速い大気電界変動の観測は，必要に応じた短期間の観測として行われている⁽⁶⁾。しかし，晴天時には雷雲発生時に比べて電界変動が非常に小さいた

めもあり，変動時間が数分の領域での大気電界微小変動の詳しい観測や解析は，ほとんど行われていない。

大気電界の数分の時間領域での観測は，大気循環の微細構造の把握に役立つと考えられる。また地震震源域での地表面電荷の発生により大気電界の発生が議論されているが⁽⁷⁾，このような現象の解明にも必要と考えられる。本論文では，時間領域が数分程度の大気電界微小変動の観測とその信号の解析を，特に晴天時に行った結果について述べる。更に複数箇所での観測などから，この変動の原因について検討している。

2. 観測地点と観測システム

本観測は，大気電界変動観測用平板電極を用いて，宮城県仙台市青葉区東北大学工学部構内の青葉山観測地点，同電気・情報系研究棟屋上および同地点から北北東 60 km にある宮城職業能力開発短大の築館観測地点で行った。電極としては，大気電界によって発生する電荷変動を測定するための，絶縁されていない金属平板電極を使用している。観測の便を図るため，持ち運び容易な電極を準備し，野

図 1 観測模式図
Fig. 1. Schematic diagram of observation system.

外の複数地点での同時観測が容易に行えるようにしてある。
図 1 の観測模式図に示すように、大気電界微小変動信号は、大気中電界により金属平板電極に誘導された電荷が、測定器(ペンレコーダ)の入力抵抗($2\text{ M}\Omega$)と並列に接続された静電容量($3.3\text{ }\mu\text{F}$)間に充電される電圧として記録される。これは原理的には、雷観測でスローアンテナと呼ばれたものと同様である。

一方、雷雲下での大気の垂直方向電界観測に標準的に使用されているのは、回転電極形電界計(フィールドミル電界計)である。この電界計は、図 2 に示すように、固定電極と回転電極およびこの電極を回転させる電動機(モータ)から構成されている。その測定原理は、垂直方向電界下で、回転電極の遮へいの繰り返しによって固定電極(検出電極)上の静電誘導電荷が発生と消滅を繰り返し、この交流信号を増幅検波して電界値を得るものである。

本観測で使用する平板電極が大気電界変動に対して、どのような特性をもつのかを明らかにするために、回転電極形電界計と平板電極との同時観測を行った結果を図 3 に示す。なおこれから示すすべての観測波形では、2 または 3 チャンネルのペンの時間軸位置がずれるため、同一時刻の開始位置を表示してある。また、振幅の正は矢印で示すように下側である。

この図で、数分の変動については両者とも同じような変化を示している。しかし、フィールドミル電界計に現れている直流成分から数十分のゆっくりした時間変動成分は、平板電極では除かれているのがわかる。これは平板電極電界計では、レコーダの抵抗に並列に接続されている静電容量が比較的小さく、その時定数は 6.6 秒であり、10 分以上のゆっくりした変動は観測できないためである。

フィールドミル電界計自身の変動時間応答は 0.1 秒まであり、直流からこの応答時間までの変動にたいして正確な電界変動を示す。しかし、変動時間が 1 分以下の電界変動は、直流電界に比べて相対的に非常に小さいため、記録波形からは数分以下の変動は明確に読み取れない。

このように、平板電極電界計では、使用する静電容量を適当に選択することにより、数分周期の変動のみを選択的に観測することが可能となる。また、年間を通した長期間の観測を行う場合、フィールドミル電界計では、回転部分の磨耗や雪などの回転電極への負荷のため観測途中で停止することがある。従って、本論文で検討するような、数分

図 2 フィールドミル電界計の原理
Fig. 2. Schematic diagram of field mill electrometer.

図 3 電界計による校正(上:フィールドミル, 下:平板電極)
Fig. 3. Calibration of metal plate antenna (lower) using field mill (upper).

より速い大気電界変動についてのみの長期間観測には、機械的可動部分がないこともあり、本平板電極方式が適していると考えられる。

次に、フィールドミル電界計に外部から既知の電界を印加して校正を行い、更に平板電極での出力(ただし、 1 m^2 の電極で 0.75 m の高さで比較)に換算すると、数分の変動では、平板電極信号の出力 0.1 mV 当たり 122 V/m の電界となる。

3. 観測結果

大気電界が非常に強くなるのは、雷雲下であり、晴天時の 100 倍以上も強くなる場合がある。ここでは、雷雲下以外の場合について観測された信号を検討する。

大気電界の変動時間や振幅は天候により複雑に変化するため、一般的に分類することはできないが、天候状態により、どのような信号になるのかを単純化して述べる。晴天で無風の状態ではこの変動の振幅は非常に小さい。晴天で微風の場合は振幅がやや大きくなる。一方、上空を雲が流れている場合は振幅が大きくなる。また、強風の場合は振

幅が、微風時の10倍以上大きくなる。降雨の場合も変動が大きくなるが、更に顕著なゆっくりした変動分が加わる。これらすべての場合に数分程度の時間変動が現れているが、それぞれの場合で、大気電界の変動状況は異なると考えられるため、すべての場合を統一的に扱うのは困難と考えられる。

本観測では、条件を限定し、晴天で無風状態(気象庁風力階級0か1)か、微風状態(同2か3)での大気電界微小変動についてのみ検討する。この場合、晴天の定義として、全く雲の存在しない快晴の他に、観測点上空を見渡して、ある程度の範囲に雲のない状態も含むものとしておく。このような条件下では、雲による大気電界への直接の影響は考えなくてもよいことになる。

青葉山地点と築館地点(青葉山地点から60 km)での本方式による大気電界変動の同時観測では、両者の信号に明白な相関関係は認められなかった。すなわち、ここでの大気電界変動の観測は、それ以下の短いスケールの現象を対象としていることになる。

〈3・1〉 変動波形の観測条件による特性 これらの観測は青葉山構内の砂利を敷いた駐車場で実験室の建物から5 mほど離れた点に電極を配置して行った。天候が晴天、無風時の状態で行ったものである。

(1) 大気中では、大気電界だけでなく、地表面に垂直方向の大気電界と大気の導電率により、それらの積で与えられる電導電流が流れることになる。当然その方向は地表面に垂直であり、この電流は空地電流といわれている。通常、大気電界検出アンテナとしては、金属平板電極が使用されるが、絶縁膜による被覆がない場合には大気電界変動により誘導された電荷による電位とこの空地電流による電位との和の電位が得られることになる。

今回観測に使用した電極は絶縁されていない金属板であるため、得られた信号が大気電界変動による変動か、空地電流による変動かを明らかにする必要がある。そこで、大気電界アンテナと同じ面積をもち、絶縁シートで表面全体を完全にシールした電極を用いて同時観測を行った結果を図4に示す。2平方メートルの電極を高さ1.5 mに並べて配置して観測した。両者の時間変動波形には、周期は不

図4 電極絶縁の影響(上:絶縁被覆なし、下:絶縁被覆あり)

Fig.4. Comparison of naked metal electrode (upper) and insulated one (lower).

規則であるが、数分のほとんど同じ変動が現れている。また、この両者で、変動の振幅は絶縁被覆ありの電極のほうが、若干大きくでているが、その差は大きくない。ただし、絶縁されていない金属平板電極には、観測時間内で、ほぼ直流となる成分がみられる。すなわち、この図で点線で示した -0.02 mV くらいの直流成分が加わった波形となっている。これが空地電流と考えられるが、この直流分は気象条件、観測時刻により大きさおよび正負の違いがみられた。しかし、数分の変動の周期および振幅だけを議論する場合にはこの両者には基本的な差異がないので、これ以降の観測には、絶縁されていない金属平板電極を使用している。

図5 電極面積の変化

Fig.5. Signal amplitude versus area of electrode.

図6 電極高さの変化

Fig.6. Signal amplitude versus height of electrode.

(2) 地表面から0.75 mの高さに0.5 m², 1.0 m², 2.0 m²の大きさの異なる電極を配置して観測した結果を図5に示す。観測された信号の振幅は時間的に変動しているが、この図においては、2.0 m²の電極で得られた振幅を常に1として他の電極で得られた振幅を正規化してある。従って、他の大きさの電極でのばらつきは、これら三つの電極間の振幅のばらつきを示していることになる。し

図 7 観測地点の周囲の環境
Fig. 7. Circumstances of observation point.

図 8 電極配置図
Fig. 8. Arrangement of electrodes.

かし、全体としては、ほぼ面積に比例して変動の振幅が増加している。

(3) 電極の面積を一定にして、電極の地表面からの高さを変えて観測した結果を前図と同様にして図6に示す。ここでは、電極の高さが1.5 mの振幅を常に1として、他の高さの振幅を正規化してある。ほぼ高さに比例して変動の振幅が増加しているが、地表面では0にならないようにみえる。この場合、電極の高さにより大地間の静電容量は変わるが、1 m²の電極が地表から1 mの場合の静電容量は約10 pFであり、並列に挿入されている容量(3.3 μ F)は、これに比べれば十分大きいので高さが多少変化しても、大地と電極間の静電容量の影響は無視できると考えられる。

〈3・2〉異なる観測点間での変動波形の時間関係 この観測では、地上風の影響を出来るだけ避けるために、周囲に大気電界に影響を与えるような建造物がないことが望ましい。このため、東北大学工学部電気・情報系研究棟の屋上に(地上高28 m)東西方向3箇所にて25 mの間隔で電極を設置して観測を行った。観測地点の周囲の状況を図7に示す。半径約150 mの範囲にはこの研究棟に並ぶ高さの建造物や樹木はなく、観測には良い条件である。

研究棟屋上における電極配置図を図8に示す。使用した電極の面積は1 m²で、床から高さ0.75 mに設置した。得られた変動信号波形を図9に示すが、この図は、観測点上空に雲が全くない状態で、微風時のものである。3箇所での信号には強い相関が現れている。西側の振幅は東側に比べてやや小さく、中間点での振幅はそれよりも更に小さい。これは図8に示すように、中間点に高さ9.5 mのエレベータ機械室や電磁波観測室などの構造物があり、更にその上に高さ8 mの避雷針が設置されているため、大気電界がかなり影響を受けるためと考えられる。また、西側にも中間点ほどでないが、構造物や避雷針の影響が多少及

図 9 電極を3点に置いたときの観測波形(上：東側電極，中：中央電極，下：西側電極)
Fig. 9. Signals observed at three different positions (upper: east electrode, middle: center electrode, lower: west electrode).

図 10 快晴，無風時の観測波形(上：東側電極，下：西側電極)
Fig. 10. Signals observed in a calm (upper: east electrode, lower: west electrode).

図 11 快晴，微風時の観測波形(上：東側電極，下：西側電極)
Fig. 11. Signals observed in a breeze (upper: east electrode, lower: west electrode).

ぶものと考えられる。

この図では時間後半のほうが変動の振幅が時間前半よりも大きくなっている。長時間の観測結果をみると振幅の大きさは時間的に不規則に変動しており，ある時間領域でみるとこの図のように，時間的に振幅が比較的大きく変化する場合もあるが，逆に，時間的に振幅のあまり大きな変化がみられない場合もある。

場所的に異なる点での大気電界変動の時間的相互関係を，更に詳しく検討するために東側と西側の電極のみを使用し，電極面積を2倍の 2 m^2 にして観測した。無風時の結果を図10に，微風時の結果を図11に示す。

4. 検 討

大気電界変動信号の振幅は平板電極の面積にほぼ比例して増加する。面積が広いほどそれに比例して大気電界変動による誘導電荷が得られ，妥当な結果である。

青葉山観測地点の研究棟屋上での観測では，晴天で微風時には大気電界信号の顕著な変動時間は1.5～3分であるが，無風時には20～30秒の変動の振幅が相対的に大きくなってくる。また2箇所での信号のずれは，晴天，微風時

の場合，変動信号の同一ピークは時間的に西から東にずれていく場合がほとんどである。ただし一般的には天候状態，特に雲の流れる状態に応じて，同一ピークの時間的ずれから判断して東から西，西から東または，ほとんどずれない場合がある。

図11に示すように，微風時，東西2箇所所得られた信号の代表的な時間のずれ ΔT は20秒である。この間の電極間距離は50 mであるから，この変動は秒速2.5 m/sで移動していることになる。また，このときの変動の時間間隔 T が110秒であるから，変動の規模としては280 mとなる。一方，無風時では2箇所での相関はあまり明確ではない。これは無風といっても，ある時間にはわずかな風速があり，例えば，0.5 m/sの風速があるとすると，30秒の変動時間に対してその変動の規模は15 mとなり，電極間隔より小さいためであろう。

次に，このような大気電界の微小変動の発生原因について検討する。大気層では，地表面から安定層までの摩擦層(または境界層ともいわれる)において活発な大気循環が起こる。この摩擦層は更に，地表面の影響が大きい地表面から100 mまでの接地層とその上のエクマン層(混合層)に

分けられる。この混合層の中では大きなものから小さなものまで、幾つかの規模の渦が発生と消滅を繰り返しながら、エネルギーや運動量(風)を上下にかきまぜる働きをしている⁽⁸⁾。これらの規模の最大は1 km 程度であり、この規模の変動が周期で数分の特徴的なスペクトルを示すことになる⁽⁹⁾。更に地表面に近づくにつれて、それ以下の規模の渦により、様々な変動が存在している。

観測される大気電界の特徴的な変動時間が、摩擦層の大気循環の特徴的な変動時間と一致することは、大気電界が大気循環により変動することを推測させる。しかし、大気電界の変動が大気循環変動により生じるためには、大気内に電界と結合する荷電粒子が存在しなければならない。この荷電粒子の電気的変動が、結果として大気電界変動として観測されることになる。

大気中での荷電粒子の存在についてはこれまでに多くの観測が継続して行われており、大気中での電離作用で説明されている。すなわち、大気中では種々の電離作用により、常にある一定以上の荷電粒子が存在している。その下部が摩擦層である対流層より上方の大気層では、太陽からの強い紫外線を受けて気体分子の電離が著しい。しかし、対流層大気の大気電離は主として、(1)大気中の主にラドンと宇宙線のような放射性物質による電離、(2)高度300 m 以下に限られるが、土壌中の放射性物質による大気の大気電離などがあげられ、この電離量は通常、単位体積中に単位時間に作られるイオン対で表される。ここで問題にしている摩擦層の存在する1 km 以下では、宇宙線による電離量は高度によらずほぼ一定である。大気中の放射性物質ラドンによる電離量は高度とともに減少する。土壌による電離量は地表付近では他の電離量に比べて非常に多いが、高度が高くなるとともに急速に減少していく。これらの総計である電離量は、全体として高度とともに減少する。

大気中荷電粒子が電界変動信号に影響を与える具体的例として、次のような例がある。観測中、鳥がちょうど電極の真上を通過したときに、パルス状の信号が得られる。これは電極上方の荷電粒子分布が乱され、電気力線が影響を受けるためだと考えられる。また図6に示したように、地表面に近いほど変動信号の出力は減少している。これは地表面に近づくほど地表付近での電離量が増加し、大気電界の遮へい量が多くなるためと考えられる。

これまでに観測された結果のみで、大気電界変動の詳細を与えるのは、各種データが不十分で困難である。しかし、定性的なモデルとして次のような説明が可能であろう。大気中には電離作用があり、常に荷電粒子が存在している。この荷電粒子密度は、大気密度変動に対応して時間的および空間的に変動している。この荷電粒子は電離層から地球大地に垂直方向に発生している大気電界の一部を遮へいするため、大気電界は空間的に変動することになる。これが大気循環に対応するために、固定された地点で観測した場合、大気電界自体も時間的に変動することになる。

以上から、観測された大気電界変動は大気中荷電粒子を

通して、観測地点垂直方向での大気の変動している様子を示していることになる。しかし、どの高度の荷電粒子の変動を示すのか、または垂直方向に荷電粒子数の平均化されたものを示しているのかなど不明である。この点を明らかにするには観測地点での垂直方向風速分布、大気中電離量分布などのデータが必要となる。

本観測で得られた結果をもとに、電極の数を増やして、観測範囲をひろげることにより、大気循環の様子が時間的および空間的に詳細に明らかにできよう。このような観測は、高層大気循環を地上観測で行える可能性があり、例えば晴天乱気流(CAT)の解明に役立つであろう。また、更に大規模な観測を行うことで、地球環境の監視システムとして、大気中汚染物質に関連した電離粒子の挙動観測の可能性が指摘できる。

5. ま と め

絶縁されていない金属平板電極を使用して大気電界の変動が観測できることを示し、フィールドミル型の電界計を用いて出力の校正を行った。

この平板電極の絶縁効果を明らかにした。

晴天、微風時に、大気電界に数分の特徴的な微小変動信号が観測される。

この大気電界変動信号は電極面積に比例している。

この大気電界変動信号は地表面上では非常に小さくなる。これは、変動電界が、大地からの放射線による地表面での電離された荷電粒子の影響を強く受けることを示している。

この大気電界変動の規模は数百 m 程度と考えられる。

大気循環による大気自体の変動が、観測点上空の大気電界変動の原因になるものと推測される。

(平成9年1月14日受付、同9年4月25日再受付)

文 献

- (1) 北川信一郎・河崎善一郎・三浦和彦・道本光一郎：大気電気学、(平8)東海大学出版会
- (2) M. A. Uman: "Lightning", Dover, New York (1984)
- (3) R. Reiter: "Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity", Elsevier, Amsterdam (1992)
- (4) T. Ogawa: "Fair-weather Electricity", *J. Geophys. Res.*, 90, 5951~5960 (1985)
- (5) 小川俊雄: 「地球をとりまく大気電場」, 静電学誌, 5, 383~394 (昭56)
- (6) 竹内利雄: 雷放電現象, (昭62)名古屋大学出版会
- (7) 竹内伸直・中鉢憲賢・成田憲一・本間規泰: 「地震波による地表面電位変動」, 電学論C, 116, 1414~1415 (平8-12)
- (8) 日本気象学会教育と普及委員会: 教養の気象学, (昭55)朝倉書店
- (9) 竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座1 地表面に近い大気, (昭56) 東京大学出版会

成 田 憲 一 (正員) (電学論C, Vol. 117, No. 5 参照)

竹 内 伸 直 (正員) (電学論C, Vol. 117, No. 5 参照)

中 鉢 憲 賢 (正員) (電学論C, Vol. 117, No. 5 参照)

本 間 規 泰 (正員) (電学論C, Vol. 117, No. 5 参照)