

# 自由大気中の気象電気現象(総合報告)

内 川 規 一

## Phenomena of Aerological Atmospheric Electricity

BY KIICHI UCHIKAWA

### Abstract

Investigations of the electric phenomena in the free atmosphere have been carried out since the beginning of the present century. An increase of conductivity with altitude was first shown by measurements on manned balloons, which were made in Germany during the period of 1905-20. Continuous registration of conductivity up to a maximum altitude of 22 km was made during the flight of the stratosphere balloon Explorer II.

Idrac made a number of balloon soundings of the vertical electric field intensity over France during 1926-27. Some of them reached over the altitude of 15 km, and their registrations indicated the increase of the potential gradient in the lower stratosphere. Recently, soundings with radio sondes were developed exceedingly, and measurements of conductivity were made up to 100,000 feet above sea level in U. S. A. Potential gradient measurements with radio sondes were also carried out in Belgium and India.

On the other hand, a number of measurements with air-crafts and gliders in the troposphere were made, and it was found that the atmospheric electric phenomena in the lower troposphere were closely related to the exchange layer. Registrations of potential gradient and air-earth current on high mountains were carried out chiefly in Germany, and the relations between the "Austausch" layer and the atmospheric electricity were discussed.

Measurements in the lower atmosphere were made with captive balloons, on towers or on small hills, and it was found that the variations of the electric elements near the ground were remarkably affected by the temperature inversions.

### § 1. 緒 言

自由大気中の気象電気現象のうち雷活動は最も重要な現象であるが、これについては多くの人の総合報告があり、活潑な研究が行われている。こゝで述べようとするのは、主たる発電機である処の雷の部分を除いて、成層圏より地表附近までの間の実測を主体とした気象電気研究の概観である。

現在までに行われて来た研究を大別すると、3つの項目に分れる。第一は未知の分野へ延びようとする努力の成果、即ち超高層の観測であり、第二は対流圏内における特に交換層との関連を有する気象電気現象の研究、第三は地上より 1000 m 程度までの下層大気中の現象の研究である。以下順を追って述べることにする。

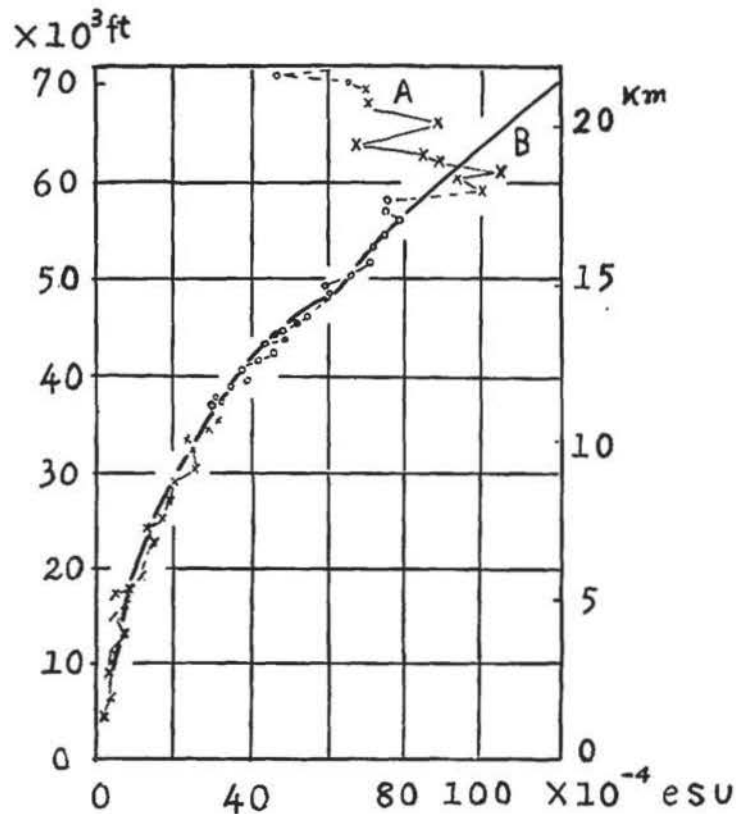
## § 2. 超高層の気象電気現象

20世紀始めに、ドイツでは塔乗気球によつて上層への探求が盛んに行われた。Gerdien<sup>(1)</sup>は電気伝導率を測定する装置を考案し、上層における測定に成功した。彼は1000 m以下の下層大気中では伝導率が著しい変動を示すが、それより高い気層では増加し、6000 mでは $20.6 \times 10^{-4}$  esu で地上の値の22倍であることを見出した。

その後間もなく Wigand<sup>(2)</sup>らは Gerdien の装置を若干改造して、1913年に9000 mまでの伝導率を測定した。そして、8865 mで最大値 $37.3 \times 10^{-4}$  esuを得た。また彼等<sup>(3)</sup>はAitkenカウンターを用いて凝結核の測定も行つている。核も1000 m以下では複雑な変化をたどるが、それより上層では急激に減少していることが分つた。

1905年より20年間に12の気球が伝導率又はイオン測定に揚げられ、そのうち11個はドイツで1個はロシアであつた。

1935年11月11日、アメリカのSouth Dakotaで行われた Explorer II<sup>(4)</sup>では、伝導率の連続記録を22 kmまでとつた。その結果を第1図に示す。Aは正偏伝導率の測定値、B



第1図 1935年11月11日、アメリカ South Dakota で行はれた Explorer II の電気伝導率の測定値 (A) 及び宇宙線強度より求めた計算値 (B)。

は宇宙線、気温及び気圧の実測値より求めた伝導率の曲線である。正偏電気伝導率  $\lambda_+$ 、正のイオン数及び移動度を  $n_+$ 、 $k_+$ 、素電荷  $e$ 、イオン生成率  $q$ 、再結合係数  $\alpha$ 、気温  $T$ 、気圧  $p$ 、宇宙線強度  $I$  とすれば、次式が成立つ。但し、上層大気には大イオンが存在せず、且つ宇宙線のみがイオン生成に寄与していると仮定する。

$\lambda_+ = n_+ e k_+$ ,  $k_+ = k_0 \cdot p_0 T / (p T_0)$ ,  $n_+ = \sqrt{q/\alpha}$ ,  $q = I \cdot p T_0 / (p_0 T)$ , Gish は  $\alpha = \alpha_0 (p/p_0)^x (T_0/T)$  とおき、

$$\lambda_+ = e k_0 (p_0/p)^{\frac{x+1}{2}} (T/T_0)^{\frac{9}{2}} \sqrt{I/\alpha_0},$$

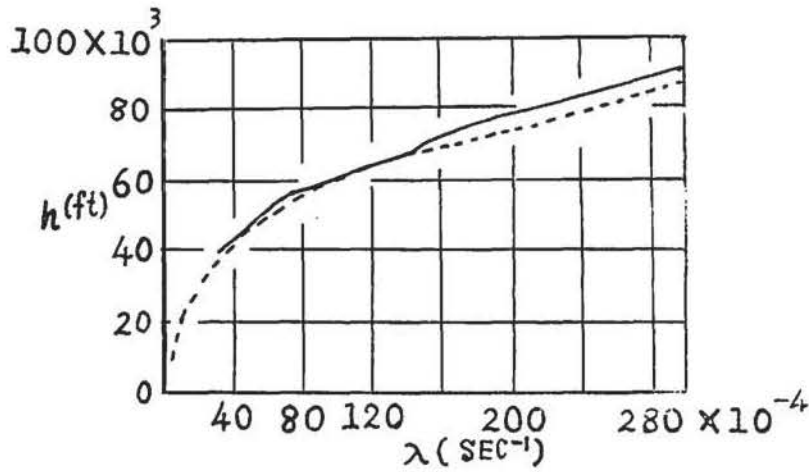
を得た。B 曲線は  $x=0.28$  とおいて求めた曲線である。図中 19 km 附近で  $\lambda_+$  が最大となり、それより上は減少しているが、これについて Gish は多分 Aitken-核が存在しているであろうと云っている。最近 Faucher<sup>(5)</sup> はこの  $\lambda_+$  の異常は、その時の測器に与えた電圧が高すぎた為に、上空で飽和電流となり、その為に変動を示したので、測定の見誤りであると云っている。

Explorer II より数年前、Idrac<sup>(6)</sup> はフランスで、気球に電場測定用自記装置をつけてとばし、成層圏までの記録を得た、1926-27 年の間に、60 個の気球をあげ、利用出来るもの 44 個を得た。15 km 以上までの記録も数個得られ、成層圏下部に相当する処に電場の増大がしばしば観測された。

最近になつて、Holzer and Saxon<sup>(7)</sup> は雷の近傍の伝導電流を計算した。彼等は電気伝導率は地表から導電層まで、指数函数的に増加すると云う仮定を設けた。計算された電流密度は雷から数十軒はなれた地表では、晴天のときの電流密度に比べ、遙かに小さいが、導電層の高さには非常に関係する。この事は、20 km 以上の高さに伝導率の小さい層があつて、而も常に存在しているとすれば、雷によつて生じた電流が 100 km 程度はなれた処で観測され得ると云う事を暗示している。

McDonald<sup>(8)</sup> は Explorer II 及び Idrac の観測結果に基き、雷が凝結核を成層圏下部に持ち込むのではないかと云う仮定の下に、運び込まれる量と拡散する量とを見積つた。その結果は拡散する量の方が大きく成層圏に核が定常的に存在すると云う事にはならなかつた。

最近になつて測定技術の進歩と共に、ラジオゾンデを用いて、伝導率又は電位傾度を測定することが出来るようになった<sup>(9)(10)(11)</sup>。Stergis<sup>(12)</sup> らは 100,000 呎 (30.5 km) までの伝導率を測定することに成功した。Gerdién 型の円筒を直流増幅器につなぎ、これを更に 1680 MC/sec の送信器につなぎ、このシグナルを地上で受けて自動的に記録させた。送信器はプラスチック気球又はゴム気球を何個かよせあつめたもので、成層圏まで飛揚させた 8 個のうち 5 個が成功した。第 2 図にその一例を示す。破線は計算値である。この計算で Gish の式と異なる処は  $\alpha$  の値を次のようにして求めた点である。



第2図 正偏電気伝導率, 実線はゾンデの下降時の値, 点線は宇宙線強度より求めた計算値 (Stergis *et al* による).

$$\alpha = 1.93 \times 10^{-6} (273/T)^3 f(x).$$

こゝに  $f(x) = 1 - (4/x^2)(1 - e^{-x}(x+1))^2$ ,  $x = 0.81(273/T)^2(p/760)L_A/L$ ,  $L_A/L$  は標準状態における分子とイオンの平均自由路程の比である。これを用いて  $\lambda_1$  を表わすと,

$$\lambda_1 = ek_0(p_0/p)^{1/2}(T/T_0)^{9/4} \sqrt{I/[1.93 \times 10^{-6} f(x)]},$$

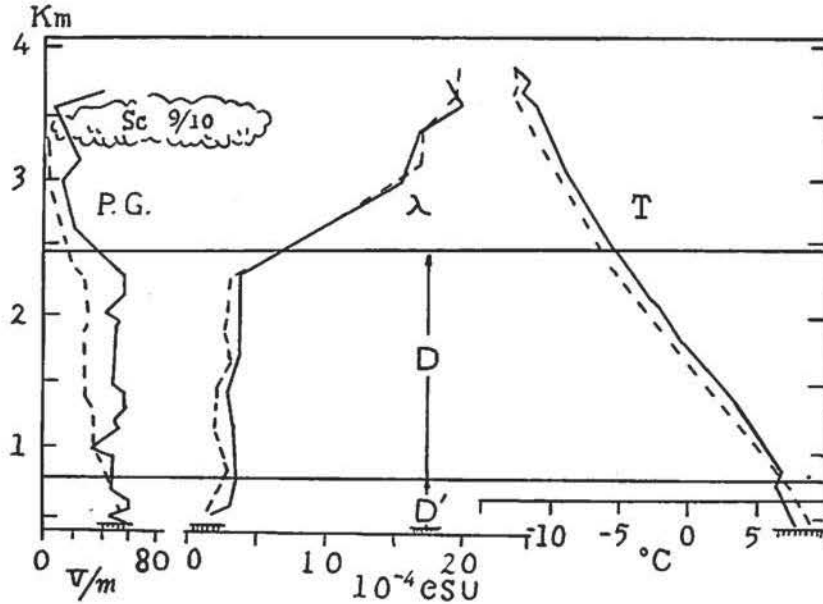
となる。図に示した例は測器が気球から自動的に切断されて、落下傘で下降した時の測定値である。上昇のときは高層へ行ってシリンダー内で飽和電流となり、測定値が上空へ行く程変動を示す。下降時の値について考察すると、次の事が云える。即ち、電気伝導率は地上から100,000呎の高さまで単調に増大し、Explorer II で見出されたような19 kmより上での減少は何も観測されなかつた。又測定された値は宇宙線強度より求めた値と極めてよく一致している。

Stergis らの測定は最も信頼性があり、また理論ともよく一致するが、測定の数も少く、場所も New Mexico 1ヶ所であるので、これだけの資料では成層圏に核の存在を否定するには無理である。Explorer II の19 kmの高さにおける伝導率の減少は Faucher の云つたごとく誤観測であるかも知れないが、Idrac の観測はたとえその精度に問題があるにせよ、成層圏下部に核の存在を暗示している。汎世界的の観測網を設けて、この点を究明する事が望ましい。地球観測年の成果を期待するゆえんである。

### § 3. 対流圏内の気象電気現象

Gerdien, Wigand らが今世紀始めに対流圏内の測定を行つた事は既に述べたが、その後 Lautner<sup>(19)</sup> は1932年より数年間に亘つて航空機よりゾンデを落下させ、電場を測定した。

そして 3 km 以下の高さの空間電荷を算出した。Rossmann<sup>(14)</sup> は第二次大戦の終了前の数年間、ドイツの Oberbayern でグライダーを用い、電位傾度、伝導率、小イオン数、凝結核等の観測を行い、数多くの資料を得た。第 3 図はその一例である。この日は中央ロシアの高気



第 3 図 グライダーによる電位傾度 (P.G.), 電気伝導率 ( $\lambda$ ), 気温 ( $T$ ) の垂直分布 (1943 年 3 月 14 日, 10 h 14 m ~ 11 h 55 m). 実線は上昇時, 点線は下降時の実測値, D は煙霧層を示す (Rossmann による).

圧が西に張り出していた。地上 800 m までの煙霧層の上に、2500 m 境界を有する均質な厚い煙霧層があつた。伝導率は煙霧層の中では殆んど一定であるが、境界の下 100~200 m の処から急激に増加している。

電位傾度の垂直分布は天気状態によつて特徴ある走向を示し、晴天の場合でも下層大気の混合状態を知る目安になり、電位傾度のある特殊な走向は天気予報的の意味を持つている。伝導率は一般に上空程増加するが、煙霧の上限では特に急激に増す。又積雲下でしばしば異常に大きな値を観測した。凝結核の数の垂直分布は電位傾度ときわめてよい相関を示し、核数を  $S$ ,  $V$  を電位とすると、

$$\frac{d^2V}{dz^2} = 5.15 \frac{d \log S}{dz},$$

の関係がある。このグライダーによる凝結核の資料を用いて、その後 Dreisbach<sup>(15)</sup> が詳しく調べた。

ラジオゾンデで電場を測定したのものとしては、Koenigsfeld<sup>(16)</sup> が日食の際に行つたものがある。1952 年 2 月 25 日ベルギーコンゴにおける日食の時、食前、食甚、食後に夫々一回づ

つゾンデを飛揚した。最初のもは 20 V を超えない程の弱い電場であつた。二番目のものは全く異り、地上 3000 m までの間は大きく、最高 110 V/m であり、非常に変動を示し、不安定であつた。5000 m より上は零又は負であり、約 15,000 m で通常値に戻つた。日食の影響は著しく、地上の観測とよく対応している。三番目の飛揚では電場は安定になり、前のものより小となり、最高は 37 V/m で、4500 m 以上では全く一定である。

Venkiteshwaran<sup>(17)</sup> もインドでラジオゾンデによる電位傾度の測定を行つている。それによると、晴天の日は高さと共に急激に電位傾度が減少し、15,000 呎以上では 20~30 V/m の殆んど一定値となる。10,000~15,000 呎以下の下層大気では日変化及び季節変化が存在している。

飛行機による測定としては、晴天のとき、Callahan<sup>(18)</sup> らが 1950 年 2-11 月の間アメリカ上空で電気伝導率の測定を行つたものがある。一般に、一定高度において区域による差違は同一区域の毎日の変化より小さい。正及び負偏伝導率は相等しい。又数軒以上では日変化はまず存在しないと云う結果を得た。青木<sup>(19)</sup> は 1943 年に飛行機によつて約 8,000 m までの小イオンの観測を行つた結果、高空程正、負両イオンの比が 1 に近く乃至は 1 より小さくなつている。

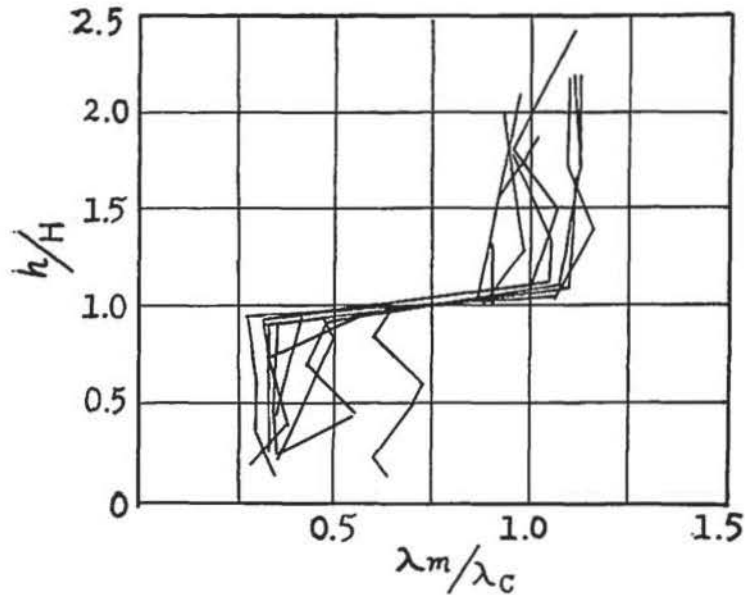
Callahan 等の飛行機観測に引き続き、Sagalyn and Faucher<sup>(20)</sup> は 700~15,000 呎の間の伝導率と大イオン数を測定し、交換層との関係について有益な資料を提供した。既に前節で述べたように数軒以上の上空では電気伝導率は宇宙線による小イオンの生成と再結合による消滅との間の平衡によつて決定される。大気下層の伝導率は宇宙線強度から期待されるものより小さい。これは荷電した核と荷電しない核とがイオン平衡に重要な役割に演ずる結果である。

第 4 図及び第 5 図は Sagalyn らの測定結果の例である。9 例の垂直分布が取りまとめて図示されている。第 4 図の横軸にとつた  $\lambda_m/\lambda_c$  は高さ  $h$  における伝導率の測定値と、イオンの生成が宇宙線のみによるものとして計算した値との比である。縦軸の  $h/H$  は測定高度と交換層の高さとの比である。 $\lambda_c$  は次式を用いて計算した。

$$\lambda_c = ek_0 M^{1/4} / C^{1/2} (I_0/\epsilon)^{1/2} (p_0/p)^{1/2} (T/T_0)^{5/4}.$$

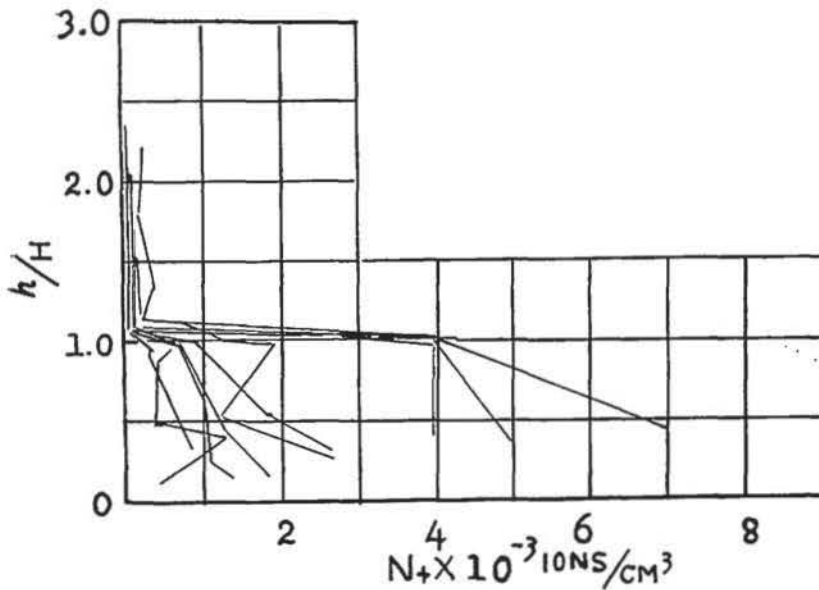
こゝに  $e$  はイオンの素電荷、 $k_0$  と  $I_0$  は夫々標準状態における移動度及び電離強度である。 $M$  は空気中におけるイオンの平均分子量、 $C$  は常数で  $1.73 \times 10^{-5} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ 、 $\epsilon$  は気温及び気圧の函数である処の確率函数である。

交換層の上では  $\lambda_m/\lambda_c$  が 1 に近づいているが、交換層内では大きな変動を示している。これは層内の核の大きな変化によるものである。第 5 図は大イオンの変化を示したものであるが、この図を見れば分るように、対流圏は交換層とその上の層と電氣的に明瞭に異つた二



第4図 交換層附近の電気伝導率の変化

$\lambda_m$  は  $h$  の高さの実測値,  $\lambda_c$  は宇宙線の資料より求めた値,  
 $H$  は交換層の高さ (Sagalyn and Faucher による).



第5図 交換層附近の大イオン数

$h$  は測定した高度,  $H$  は交換層の高さ  
 (Sagalyn and Faucher)による).

つの層に分ける事が出来る。又更に細かく見ると交換層内で大イオンの垂直分布の様相が大体5つの型に分れ、夫々気象状態と密接に結びついている。交換層の高さは1,000~10,000呎の間にあり、平均6,000呎である。夏は高く、冬は低い。そして全気柱抵抗の40~73%をこの層で受持っている。

一方高山における気象電気の観測として、Israël<sup>(21)(22)</sup>らが Jungfrauoch(3472 m)で電位傾度と垂直電流とを夏より冬に互つて測定し、交換層の影響を非常に受けていることを見出した。電位傾度は夏冬共に早朝極小で、夕方極大を有する24時間週期の変化を示し、垂直電流は夏では午後に極小、早朝に極大を示す一日週期であるが、冬は電位傾度と殆んど同じ日変化を示す。電位傾度と垂直電流より求めた伝導率の日変化は夏は午後極小、早期極大を示す著しい日変化を示すのに、冬は全く日変化を示さない。この事はアルプスの頂上は冬には交換層がこの高さに達せず、海洋性の型(気象電氣的な)が卓越することを示すものである。また400 kmはなれた Sonnblick(3100 m)と同時観測を秋に行つた処、変化が非常によく似ており、兩者共海洋性の型の変化を示した。交換層の上に出ると、広い区域を代表する値が得られるわけである。

畠山<sup>(23)</sup>らは富士山の山頂(3778 m)、5合5勺(2800 m)、太郎坊(1290 m)及び御殿場(460 m)で夏冬二回に互つて電位傾度を測定した。その結果、御殿場では他の平地におけると同様、朝と夕方に極大のある複振動であり、太郎坊は一日中ほとんど変化がない。山頂と5合5勺では昼間に大きく夜間は小さい。これは昼間谷風によつて核の多い空気が下から運ばれるものと考えられる。富士山頂では更に他の要素と一緒に長期に互つて観測が望ましい。

Pluvinage<sup>(24)</sup>らはグリーンランド探検の際に、正及び負偏伝導率を測定し、3000 mの高所では正と負の比がそれより低所に比べて、著しい変動を示した。これは観測点が交換層の上に出たり、層内に入つたりする為であろうと考えられる。

対流圏内の気象電気現象はIsraëlらがヨーロッパの高山で測定し、“Austausch”との関係を明らかにし、更にSagalynらの飛行機による測定で多くの資料を得て、対流圏は電氣的に異なる二つの層に分れる事を明確にした。交換層はかくして最近に至り、クローズアップされて来た。交換層内でも、Rossmann, Sagalynらの測定で明らかな如く、気象現象と電気現象とが極めて密接な関係にあり、電氣的諸要素が気団分析の一助にもなり得る事を暗示している。

対流圏内における観測で特記すべき事は、Gish and Sherman<sup>(25)</sup>が1948年7月～10月の間、21個の雷雲の頂上を飛行機で通過し、電場と伝導率とを測定し、上向きの電流を求めた結果、Whipple<sup>(26)</sup>の説を裏付ける有力な資料を提供した事である。

#### § 4. 下層大気の気象電気現象

1893年より1899年の間に Chauveau<sup>(27)</sup>はエツフェル塔上とパリーの気象台とで電位傾度の同時測定を行つた結果、塔上では早朝に極小、夕方に極大を示す1日週期の変化を示すのに対し、地上では朝夕極大を示す複振動であつた。



菊地<sup>(29)</sup>は柿岡で観測所構内とそれより100 m高い丘の上とで、電位傾度の同時測定を行った。日変化は両者共朝夕極大が現われるが、山頂の朝の極大は構内のように著しい変化を示さず、約1時間おくれて出現する事を見出した。これらの事柄より、地上の特徴である朝夕の極大を示す日変化の原因は地上数百米以内の大気中にあるものと推定される。

一方、けい留気球を用いて電氣的要素を測定することも可なり行われ、技山ら<sup>(29)</sup>は索電流及び索電圧を測定し、これらの値から空中電位が算出出来ることを示した。畠山ら<sup>(30)</sup>は索電流及び索電圧を測定し、技山の式を用いて電位傾度及び空間電荷を算出した。片積雲や煙霧層のある処で、正及び負の電荷が上下に重なっており、電氣的二重層をなしていることを見出した。北岡<sup>(31)</sup>は索電流の変動が逆転層に関係のある事を述べている。

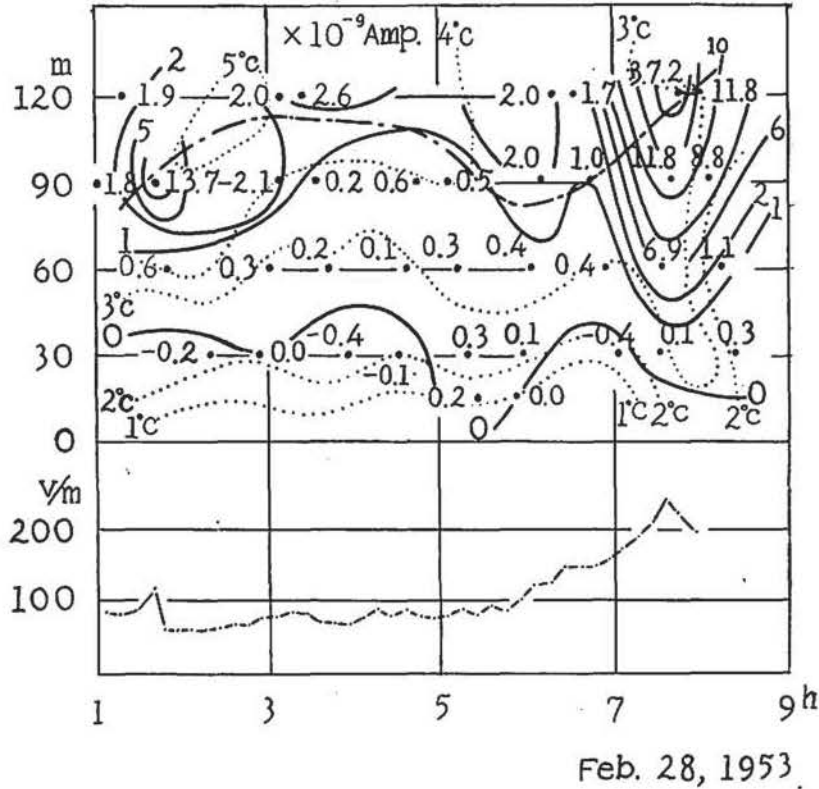
Herath<sup>(32)</sup>はLindenberg高層气象台で1931~37年の間にけい留気球及び凧によつて測定した索電流を調べ、高気圧域内或は海洋性気団内では数千米の高さまで単調に増加する値を示すが、二つの気塊の重なっている境界では強い変動を示すことを述べている。尚Chalmers<sup>(33)</sup>はけい留気球に取付けた尖端より生ずる尖端放電々流は風速にも影響を受けることを述べ、Davis and Standring<sup>(34)</sup>も索電流は風速が強いと大きくなることを測定している。

内川、近藤<sup>(35)</sup>はけい留気球を用いて地上数百米までの下層大気中の索電流(主として尖端放電々流)、電気伝導率及び気象要素(乾球、湿球、風向、風速)の測定を行った。その結果、夜間の気温の接地逆転の上部に索電流の最大値が現われ、これが地上の電位傾度の最大値と対応している。第6図に一例を示した。気温の接地逆転の存在していないときは、伝導率は地上より百数十米まで変化が余りないが、逆転が存在しているときは、その上部で伝導率が減少している。以上の事実より逆転層の上部に正の空間電荷の存在が推定され、その密度は計算によると、 $0.1 \text{ esu/m}^3$ 程度である。晴天のときは、夜間接地逆転の発達が著しく、その為地上附近の電気現象も著しく影響を受ける。

最近Reiter<sup>(36)(37)</sup>も逆転層と気象電気現象との関係を測定事実から論じている。彼はZugspitzeを中心にして15 km以内に6ヶ所の観測点を選び、電位傾度及び垂直電流の同時測定を行った。1955年1月の始め、この地方は寒気塊に蔽われていた。強力な接地逆転が現われていた。6ヶ所の同時記録はその特性により、三つの型に分類される。即ち、逆転層より高い処にある観測点では普通の平均状態に近い変化を示しているに対し、境界層では変動の多い乱れた状態であるが、平均すると普通の状態に近い、一方逆転層内部では著しく乱れた変動を示す。このように高さによつて全く異つた型を示すのは、逆転層内部に滞留する凝結核の有する電荷の影響によるものであることを述べている。

下層大気中の電気現象は逆転層及び煙霧層によつて支配的な影響を受けることが以上の研究により明らかになされた。従つて代表的な値を得る為にはこれらの影響を受けない高所で観

測を行う事が必要になってくる。



第6図 接地逆転と索電流, 地上電位傾度との関係

上図 黒丸が観測点数字は索電流の実測値, 実線はその等値線, 点線は等温線, 鎖線は逆転層の高さを示す。  
下図 地上電位傾度の変化 (内川, 近藤による)。

## § 5. 結 論

以上成層圏より地表附近までの自由大気中の気象電気現象についての研究の概観を述べた。成層圏ではその下部における凝結核の存在の有無が未解決の問題であり, 対流圏内では交換層との関係が最近特に取上げられて来た。この圏内の凝結核の存在は気象学的に云つても重要な問題であり, この核と密接な関係を有する電気的要素も又気象学的に重要な役割を演ずるであろう。時間的, 空間的にひろがった詳しい資料の集積が今後課せられた問題である。

## 参 考 文 献

- (1) Gerdien, H. (1905): Gött. Nach., 240 or Phys. Zs. **6**, 800.
- (2) Wigand, A. (1914): Terr. Mag. **19**, 93-101.
- (3) Wigand, A. (1919): Annaler Phys. **59**, 689-742.
- (4) Gish, O. H. and K. L. Sherman (1946): Nat. Geogr. Soc. Contrib. [Tech. Papers, Stratosphere Ser. No. 2, 94-116.

- (5) Faucher, G. A. (1956): 1956年10月29日雷研究会にて発表
- (6) Idrac, P. (1928): Mémorial l'Office National Météorologique de France, Paris.
- (7) Holzer, R. E. and D. S. Saxon (1952): J. Geophys. Res. **57**, 207-216.
- (8) McDonald, J. E. (1953): Trans. Amer. Geophys. Un. **34**, 529-533.
- (9) Coroniti, S. C. *et al* (1954): Instrumentation for Geophysical Research, No. 3, Geophysics Research Directorate.
- (10) Koenigsfeld, L. and Ph. Piraux (1951): Inst. Roy. Met. de Belg., Mem. 45.
- (11) Venkiteshwaran, S. P. *et al* (1953): Proc. Ind. Acad. Sci. **38**, 109-115.
- (12) Stergis, C. G. (1955): J. Atmosph. Terr. Phys. **6**, 233-242.
- (13) Lautner, P. (1941): Gerl. Beitr. Geophys. **57**, 357-364.
- (14) Rossmann, F. (1950): Ber. D. Wetterd. US-Zone, Nr. 15.
- (15) Dreisbach, K. (1956): Arch. Met. Geophys. Biokl. A **9**, H. 1, 36-53.
- (16) Koenigsfeld, L. (1953): Byers, Thunderstorm Electricity, 24-45.
- (17) Venkiteshwaran, S. P. and B. B. Huddar (1956): Ind. Journ. Met. Geophys. **7**, 61-64.
- (18) Callahan, R. C. *et al* (1951): J. Geophys. Res. **56**, 545-551.
- (19) 青木敏男 (1948): 電気試験所い報, 才9巻, 才1~12号.
- (20) Sagalyn, R. C. and G. A. Faucher (1954): J. Atmosph. Terr. Phys. **5**, 253-272.
- (21) Israël, H. *et al* (1955): Arch. Met. Geophys. Biokl. A **8**, 72-94.
- (22) Israël, H. (1952): J. Met. **9**, 328-332.
- (23) 畠山久尙, 内川規一 (1951): J. Met. Soc. Japan, **29**, 28-33.
- (24) Pluvinage, P. and P. Stahl (1953): Annales de Geophysique, **9**, 34-43.
- (25) Gish, O. H. and G. R. Wait (1950): J. Geophys. Res. **55**, 473-484.
- (26) Whipple, F. J. W. (1938): Quart. J. R. Met. Soc. **64**, 199-213.
- (27) Chauveau, B. (1925): Électricité Atmosphérique, Paris II, 105.
- (28) 菊地繁雄 (1943): 柿岡地磁気観測所要報, 才4巻, 才2号, 17-22.
- (29) 拔山大三, 中田金市 (1928): 海と空, 才8巻, 117-124.
- (30) 畠山久尙, 藤本成男 (1946): 気象技術官養成所研究報告, 才1巻, 才1~2号, 22-25.
- (31) 北岡竜海, 宮本岩男 (1947): 高層気象台い報, 才3巻, 才2号, 257-279.
- (32) Herath, F. (1951): Ber. D. Wetterd. US-Zone, Nr. 22.
- (33) Chalmers, J. A. (1955): J. Atmosph. Terr. Phys. **6**, 149-159.
- (34) Davis, R. and W. G. Standring (1947): Proc. Roy. Soc. **191**, 304-322.
- (35) 内川規一, 近藤五郎 (1955): J. Met. Soc. Japan, II, **33**, 124-132.
- (36) Reiter, R. (1955): Met. Rundschau, Jg. **8**, Ht. 7/8, 127-133.
- (37) \_\_\_\_\_ : \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, Ht. 9/10, 148-165.