

最近の大気電気学研究*

まえがき

大気電場、大気イオン、雷電気、降水電気等、大気中の電気現象を対象として出発した大気電気学は、気象学一般の新しい進歩に対応して、最近どのように発展をとげ、又どのような方向に発展するであろうか？ 今年5月下旬、東京、札幌でひらかれた国際雲物理学会においても、雲物理と関連する最近の大気電気学の研究結果が大きくクローズアップされ、大気電気学の気象学の中における位置づけ、意義が出席した内外の気象学者の注目をあつめ、新たな認識を深めた。

最近の大気電気学研究のたどった発展のあとを省りみ、将来をさぐると、二つの方向が考えられる。一つはいわゆる大気のマイクロフィジックス (microphysics) と関連して、というよりむしろ、大気のマイクロフィジックスそのものとして発展する方向、もう一つはシノプテック気象学、あるいは宇宙を含む全地球的な (global) 大気物理学の中で、電気現象をとりあつかい、このスケールの大気物理学の一部を担い、これに寄与して行く方向である。

分子数値からなっていると云われている小イオンは勿論、極微小のエロゾルから、直径数納の降水粒子迄、大気中に存在するあらゆる粒子は、いずれも高いプロバビリティで帯電しているの、すべて大気電気学の対象となっている。その性質、生成、消滅等を論ずることは、そのままエロゾルの物理であり、雲物理学に外ならない。今日迄の研究の発展過程は、このような考えで概括することが出来、またこのような考えの下に研究を進め、研究者の相互の協力を組織することによって今後の発展が期待される。

第二の研究の方向として、地上における静穏日の大気

電気要素の観測、ゾンデ、あるいはロケットによる高層、超高層の大気電気要素の観測が、シノプティック、あるいは全地球的なスケールで多数の興味ある結果をもたらしており、この方向で気象学、あるいは大気物理学への寄与も大いに期待されている。

大気電気学の最近の発展を、概括し、展望を与えるため、専門の研究者にそれぞれの分野の最近の研究結果の解説を依頼し、以下に大気電気学総合報告を特集した。

(北川信一郎)

1. サブミクロン・エロゾル*

三崎 方郎**・金沢五寿雄***

エロゾルも粒径が1ミクロン以上の粒子については多くの研究があるが、それ以下のものについては知られているところが極めて少い。たとえば粒径スペクトラムにしても、よく引き合いに出される Junge の分布では、サブミクロンの部分は今から25年前に Israel が求めたイオンの移動度スペクトラムを基にしてつくられたものにすぎない。これは大きな粒子が凝結核として活発に作用するので、雲物理または大気汚染の面から着目されている反面、サブミクロンの領域はいままで現実的要求が稀薄だったことによるのであろう。

しかし、そうだからといってサブミクロン粒子についても、現在程度の知見では到底満足はできない。第一の理由として、サブミクロン粒子はミクロン以上の粒子に比べて、その数が圧倒的に多い。第二の理由として、サブミクロンの部分では粒径スペクトラムの特徴が空気の汚染状況を極めて微妙に反影している。更に第三の理由として、空気中での自然放射能の担体としてサブミクロン粒子がクローズアップされていることを数えよう。

* Recent Studies on Atmospheric and Space Electricity.

—1965年8月15日受理—

* Submicron Aerosols

** Masao Misaki,

*** Izuo Kanazawa, 気象研究所高層物理研究部

さてサブミクロン粒子の研究といっても昔からやられていたように、それが空気中の単位体積中に全体で何箇あるかといったことで満足できる時代ではない。数と同時にその直径を知らなければならない。すなわち、粒径スペクトラムを知ることがすべての研究の基礎になる。そしてこのスペクトラムは分子程度の大きさ (10^{-8} cm) から1ミクロン (10^{-4} cm) までにわたっているわけである。

サブミクロン粒子は空気中であって殆んど落下しないというのが大きな特徴の一つであろう。しかし細かく云えば、沈降速度は粒子の大きさによって甚しくちがう。Stokes-Cunningham-Millikan の式によると(粒子の比重を1とする)、半径が 1μ の粒子の沈降速度は $1\text{cm}/\text{min}$, 0.1μ で $1\text{cm}/\text{hr}$, 0.01μ で $1\text{cm}/\text{day}$ となる。 10μ では $1\text{cm}/\text{sec}$ であるからこれと比べればサブミクロン粒子の沈降速度が如何に小さいかがわかる。

粒子は空気中でその拡散作用を通じて互に凝集し合う。凝集の結果、粒子の濃度は減少するが、その大きさは次第に大きくなる。ところでこの凝集の速さがまた粒子の大きさに関係している。小さな粒子程拡散係数が大きいから凝集の速さも大きいわけである。半径 0.01μ の粒子が大きな粒子に凝集する速さは、 0.1μ のその約11倍である。こうしたわけで、一つの系の中にエアロゾルを閉じこめておけば、凝集は初めは急速に起り、次第に緩慢になってゆく。凝集効果が顕著だというのもサブミクロン粒子の特徴の一つである。

大気が全く静止していれば、こうしてサブミクロン粒子は凝集によって成長して行き、大きくなると沈降作用によって系外へ出て行く。凝集と沈降のかね合いで、エアロゾルの粒径スペクトラムは $10^{-6}\sim 10^{-5}$ cm あたりで最高値が現われる。

さて粒子に働く第三の作用として電気力がある。大気中には自然の電場があるので、粒子が電荷をもつていればクーロンの力がそれに働く。更に帯電粒子の間に電気的相互作用が生ずる。ところで、粒子の帯電は粒子と小イオンとの結合によつておこるわけであるが、この結合の確率(結合係数)がまた粒子の半径によって異なるのである。結合係数と粒径との関係については現在に到るまで完全な実験的検証がないが、理論の示すところによると、粒子が大きい程結合係数は大きい。つまり小イオンと結合しやすい。その結果、サブミクロン粒子のなかで帯電しているものの存在比は粒径が大きい程大きくなる。 0.01μ の粒子は約18%, 0.1μ で64%が帯電し

ている。

ここで帯電といったのは粒子が素電荷1箇持ったことである。粒子が素電荷1箇を既に持っているとする、同符号の小イオンとの間には斥力が働くから、その間の結合は困難になる。それにもかかわらず、粒子の半径が 0.03μ 以上になると、その結合の確率が無視できなくなる。つまり、二重帯電粒子の存在が無視できなくなる。更に 0.1μ 以上になると三重帯電粒子も無視できなくなる。

空気中にエアロゾルが増加すると、小イオンがそれと結合する割合が増すので、帯電粒子の数は増えるが、小イオンの数は減つてくる。この節の冒頭にサブミクロンエアロゾルの粒径分布は空気の汚染状況を微妙に反映していると述べたのはこのことである。

さて、静止空気中でのサブミクロン粒子の行動を決定する重要な因子として、沈降、凝集、電気力について述べたが、このいずれも粒子の半径と大きな関係があることが明らかになった。したがってサブミクロン粒子の行動を明らかにしようとするれば、何をあいてもその粒径スペクトラムの測定から始まらなければならない。ところがこれが技術的には甚だ困難な仕事である。

サブミクロン粒子に関して永年にわたりもつとも集中的に研究を進めてきたのは、Nolan, Pollak をはじめとするアイルランドの人々であった。彼等はまず、粒子数(数密度)を測定する装置の改良を重ね、更に粒子の拡散係数を測定することに主力を注いできた。粒径の比較的にそろっているエアロゾルに関してはその測定精度は高いものであるが、種々の粒径が混合しているエアロゾルについて、拡散係数からその粒径スペクトラムを求める試みは理論的には可能であっても、実際にはまだ極めて困難のようである。

Goetz は遠心分離法によって粒子を粒径にしたがつて振り分ける装置を開発した。円錐形の回転体の表面に螺旋状に空気の通路を彫っておく。この外側に金属薄膜を密着させて高速回転 ($10,000\sim 30,000$ rpm) させると遠心力により粒子が薄膜に沈着する。空気通路の長さに沿っての沈着密度の分布を測定すれば、直径 $3\mu\sim 0.03\mu$ の範囲内の粒子の粒径スペクトラムを計算によって求めることができる。この測定法によると、結果が沈着後の粒子の変化に影響されず、空気中における状態のままのスペクトラムが測定できるという特長がある。

粒子が帯電していれば電場によって粒径のふるい分けが出来る。帯電粒子は小さい程電場によって動かされや

すい。したがって、電気的な移動度スペクトラムが測定されれば、それを粒径スペクトラムに変換できる。移動度スペクトラムの測定も Israel の示した原理をそのまま実行したのでは誤差が大きくてものにならないので、内極分割法 (三崎, Whipple) とか、交流捕集電圧法 (Junod, Dolezalek) など、精度を高めるための種々な考案が近年行われている。電気的移動度測定が適用できる粒径スペクトラムの範囲は 10^{-8} cm \sim 10^{-5} cm (0.1μ) 程度である。遠心分離法では粒径の大きい粒子程捕集され易いが、移動度法ではその反対に小さい粒子程捕集され易いという違いは面白い。

さて、遠心分離法にしても、拡散係数法または移動度法にしても、その中でいままで粒径と述べてきたのは、いわゆるストークス直径のことであって、粒子の密度が 1 でない時には幾何学的直径とは異なったものである。サブミクロン粒子の化学的組成に関してはまだ研究する手段の見通しもない。

2. 放射性エアロゾル*

川野 実**

一般に自然大気中における放射性エアロゾルと呼ばれるものは、その発生因によつて 2 種に大別できる。その一つは地殻内に存在するウラン、トリウムなど、自然系列放射性元素に基因する R_n (ラドン)、 T_n (トロン) など放射性気体が崩壊して生成した最初の放射性崩壊生成物、 R_aA 及び T_hA は固体原子であつて単体として存在する寿命は非常に短かく、短時間内にエアロゾルに付着して行くと考えられる。エアロゾルに付着したこれらの原子は当然、放射性崩壊を起して R_aB , R_aC (R_aC') 及び T_hB , T_hC (T_hC') となる。従つて大気中には R_n 及び T_n の崩壊生成物の担体となつたエアロゾルが存在している。もちろん、その崩壊生成物である R_aD , E , F も存在する。(2) は核爆発実験によつて生成される核分裂生成物その他の人工放射性降下物である。これらの放射性物質は核爆発物自体の碎片、強力な中性子線によつて放射化される誘導放射能を持つ土砂の細片などであつて、それらの微粒子自体が放射能を持つと考えてよい。従つて (1) に述べた自然放射能に基づく放射性エアロゾルとは形成過程が全く、ちがつたものと考えられる。放射性降下物に関する研究は大気物理学的興味よりも、む

しろ環境衛生の立場からの要求に応じたものと考えらるべきであろう*。そこで本稿では自然放射能に基づく大気中の放射性エアロゾルに限ることとする。

放射性エアロゾル濃度の時間変動については今世紀の始めから非常に多くの測定結果が報告されている。又、気象要素、例えば気温、風速、風向、降水量などとの相関についても多くの研究が行なわれた。放射性エアロゾル濃度を測定する場合、最も重要なのは捕集・濃縮の操作である。現在、使用されつゝある捕集装置には完全なものはないと云つてよい。しかし、このことが問題にされるようになったのは比較的、最近のことである。一応、捕集効率の時間変動等に関しては問題にせず、単に流量だけを考慮して求めた放射性エアロゾル濃度の日変化を示したのが Fig. 2-1 である。静穏な日についてみれば、この日変化は多くの場所で、ほぼ同様な型となる。即ち、昼間に低く、夜間に高いのである。この変化は、渦動拡散の強弱によって大きく支配されていると

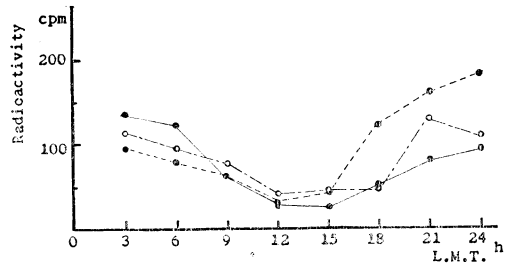


Fig. 2-1 放射性塵の量の日変化曲線の例

考えれば説明がつく。しかし、同様な天候・気象条件の下でも必ずしも日々の平均値は等しくない。これは、放射性浮遊物濃度が局地的な原因ばかりでなく、気団その他、大規模な原因によつても影響されているらしいことを示すものでこれらについても検討する必要がある。放射性エアロゾル濃度とそのもとであるラドン濃度とを同時に測定、比較してみるとラドン濃度は殆んど同じであつても、捕集された放射性エアロゾル濃度は、かなり違う場合が少なくない。顕著な一例は夏季と冬季における両者の関係である。即ち、ラドン濃度は殆んど同じでも、放射性エアロゾル濃度は夏季に少く、冬季に多いのが普通である。そこで放射性エアロゾル濃度と凝

* ただ地表に蓄積した放射性降下物からの β 放射線によつて、地表付近大気が自然状態と、ちがつた異常電離をするために気象電気学的には無視し得ない影響が現われつつあるが、これについては第 6 節に近藤五郎氏の紹介がある。

* Radioactive Aerosols

** Minoru Kawano, 名古屋大学工学部

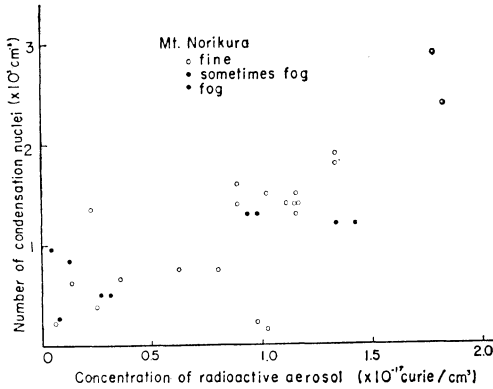


Fig. 2-2

結核濃度（エーロゾル濃度に比例すると考えてよい）との同時測定を行ない、両者の関係を調べてみると、Fig. 2-2 に示すような結果が得られた。即ち、両者の相関は非常によく凝結核濃度の高い冬季には夏季よりも放射性エーロゾル濃度が高い理由が説明できそうである。この顕著な関係は大型の Gasometer 内部で凝結核濃度を適当に制御して行なった実験によっても確認できた。そこで疑問となってくるのは、このような捕集濃縮装置によって集められる放射性エーロゾルは、どのような粒径を持つか、ということであろう。放射性エーロゾルの粒径分布を明らかにしようとする努力は、かなり多くの研究者によって続けられて来た。

適当な捕集法で集めたエーロゾルの粒径を光学顕微鏡を用いて測定し得るのは 0.4μ 程度であるから、それ以上のエーロゾルについては粒径分布を測定できる。従って各粒径におけるエーロゾルからの放射能を測定すれば放射性エーロゾルの粒径分布を知ることができる。しかし、光学顕微鏡によって見ることの出来ない領域の粒径のエーロゾルの場合、直接その粒径を測定できないので (i) 単一電荷を持つ (ii) 構成物質が一様であり、且つ球状であるという大きな仮定の下で測定された放射性エーロゾルの易動度から計算によって粒径を求めるか、あるいは拡散係数を測定し、球状を仮定して粒径を求めるかである。このような、ずい分、荒い仮定の下で得られた粒径分布を見てみると 0.1μ のあたりに最大値があり、 $0.015 \sim 0.5 \mu$ の範囲に多くの部分が集中している。この粒径分布が気象の変化に伴って、どのように変化するかなどについては殆んど判らない。

最近、放射性エーロゾルの原形をなすものとして放射性イオンが重要視されて来た。このイオンは殆んど正だ

Table 1 The coefficient of attachment and the mean life of radioactive ion.

	Mt. Norikura	campus (Summer)	campus (Winter)
q (cc ⁻¹ sec ⁻¹)	7.4×10^{-7}	48.0×10^{-7}	48.0×10^{-7}
n (cc ⁻¹)	1.7×10^{-5}	0.7×10^{-5}	0.6×10^{-5}
N (cc ⁻¹)	1.3×10^3	3.2×10^4	5.0×10^4
β (cc.sec ⁻¹)	3.3×10^{-5}	2.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}
θ (sec)	23	1.4	1.2

けで負のものは実験誤差以上には検出されない。その易動度は大気中の小イオンと殆んど同程度の値を持ち、地表付近の空中電場が負方向に非常に強くなるとその濃度が殆んど0になるという事実が判っている。このような現象も放射性イオンが正の小イオンと殆んど同じ性質を持つことを示している。小イオンと同様に放射性イオンも大気の清澄度に強く支配される。Table 1 は、名古屋と乗鞍岳とで観測した結果を比較したものである。名古屋ではその平均寿命が僅か 1.3 秒であるが、乗鞍岳では 23秒にも及ぶことがわかる。この結果からみて、空気の汚れの少ない環境では放射性イオンから放射性エーロゾルに移り、その粒度が次第に成長する過程の進行は遅いが、汚れの著しい環境では遙かに速かに進行するものと考えられる。

3. 降水の電荷*

孫野 長治**

まえがき

降水の電荷が着目される主な理由の一つは降水の荷電機構が雷雲の電気発生の原因または結果と考えられるからと、も一つの理由は空地電流の一部の役目を果しているからである。

雷雲の電気発生の原因にしる結果にしる、密接な関係をもっていることに相違ないので地上で降水の電荷を他の量、たとえば空中電場などとの同時測定をおこなえば電気発生の手懸りがつかめそうである。少なくとも電気発生に関する学説の当否をチェックできる場合が多い。

測定法

空地電流の一部と考える場合は一定量の雪や雨滴を集めてから電荷を測ってもよいが、実際は正負いりまじっ

* Charge on Precipitation

** Choji Magono, 北海道大学理学部

て降ってくるので、一つ一つについて測ることが望ましい。最近、真空管技術が非常に進歩したので、気楽に測られるようになった。たとえば雨滴を金属板に受け、金属板を真空管の格子につなぎ、これを直流増巾して測ればよい。この際、雨滴うけの系統の絶縁を充分にする注意が必要である。もう一つの方法はブラウン管オシログラフに継いだ金属誘導管の中を雨滴を降らせる方法である。雨滴が 10^{-4} esu 程度の電荷を有しておれば容易に測ることができる。この方法は連続観測の結果を自記するのに適している。もっと小さい霧粒程度の電荷を測るには 1000ボルト/cm 程度の交流水平電場に霧粒を降らせて波状の跡跡を撮影して電荷を計算する方法で、この場合は 10^{-6} esu までは楽に測定できる。符号を測るために直流電場も加えておけばよい。

測定結果と考案

降雪、雨滴及び雲粒の一枚あたりの電荷測定の代表的な平均値を下の表に示す。

この表でもわかるように雪や雨滴には正負がいろいろあるが、大きさから云うと 10^{-3} esu の桁であり、静かな降雪の場合は 10^{-4} と 1桁少ないようである。雲粒の場合は 10^{-7} から 10^{-4} であるが凍結を始めると 10^{-3} の桁になって雪の電荷に近づいて来る。このことは降水機構とも関係しているように思われる。

空中電場との関係

全般的に降水の電荷の符号は空中電場と反対なことが多い。静かな雪の時は電場が正で雪は負の電気を帯びていることが圧倒的に多い。擾乱が烈しくなると電場が正負と烈しく変動し、これに伴って雪や霰の符号も変る。降雨の場合は符号が雪の場合と逆になる。すなわち静雨の時には負の空中電場の下で正の雨滴が多い。電場の変動につれて雨滴の符号が変動することは雪の場合と同様である。

空中電場と降水の符号の関係は、このように逆になることに対して種々の説明が試みられているが、Wilsonの静電誘導説が最も有力である。たとえば正の電場の下で落下中の雨滴はその下方が正に帯電するので落下中に負のイオンを撰択吸収して全体として負に帯電すると云う説明である。これだけでは不十分と思われるが有力な考えかたに相違ない。

結 論

上に述べように雨滴や雪は雲から落下する途中で更に電気的变化を受ける可能性があるので、その電荷を測ったところで、それが直接的に雷雲の荷電機構と結びつく

観測者	平均電荷	備考	
Chalmers and Pasquil	$+10.5 \times 10^{-3}$ esu	驟雪	降 雪
	-5.7 //		
Geschwend	+0.09 //	静雪	
	-0.06 //		
	+5.64 //	驟雪	
	-4.78 //		
Gunn	+0.67 //	静雪	
	-1.0 //		
大 田	+0.2 //	雪	
	+2.5 //		
	-2.9 //	霰	
Geschwend	+0.24 //		降 雨
	-0.53 //	静雨	
	+1.75 //		
	-5.43 //	驟雨	
Banerji and Lele	+8.11 //	暴風雨	
	-5.88 //		
Banerji and Lele	+6.4 //	驟 雨	
	-6.7 //		
Lele	+6.9 //	暴風雨	
	-7.3 //		
Chalmers and Pasquil	+2.2 //	静雨	雲 粒
	-3.0 //		
	+1.3 //	驟雨	
	-2.3 //		
Chalmers and Pasquil	+3.7 //	暴風雨	
	-9.2 //		
孫野・織笠	+0.4 //	静雨	
Twomey	$+10^{-7} \sim 10^{-5}$ esu	暖雲粒	
	$+10^{-8} \sim 10^{-4}$ esu	過冷却雲粒	
	$-10^{-7} \sim 10^{-5}$ //		
孫野・菊地	$+10^{-6} \sim 10^{-4}$ //	過冷却雲粒	
	$-10^{-6} \sim 10^{-4}$ //		
	$+10^{-7} \sim 10^{-3}$ //	凍結雲粒	
	$-10^{-7} \sim 10^{-3}$ //		

とは限らない。しかし雷雲の発生過程を通じて、他の量、たとえば雲の形、レーダー、空中電場の変化との同時測定を実施すれば有力な手懸りを与えてくれるのであろう。

4. 雷雲の電氣的構造*

田村 雄一**

雷雲の極性についてのウィルソン等との長い論争に終止符を打つ目的で、シンプソン等が雷雲内の気球観測をして、雲頂部は正に、その下部は負に、雲底付近は局部的に正に帯電しているという結果を発表したのは1940年頃のことであった。Fig. 4-1 はこれらの結果の要点を示したもので、図中の P, N, p 電荷の代表的の大きさはそれぞれ +20, -20, +4 C であるとした。これらの結果のうち、極性に関しては、大体においてその後の諸研究によって確かめられているが、電荷の高さや電氣量については種々異論がある。例えば、N電荷は -40°C 付近の高さまでも拡がっているというマランの説、P電荷の中心部は 0°C の辺りにあるというキューツナーの説、いずれの電荷ともにその電氣量は上記の値よりも甚だ大きいというカセミアーの説等である。

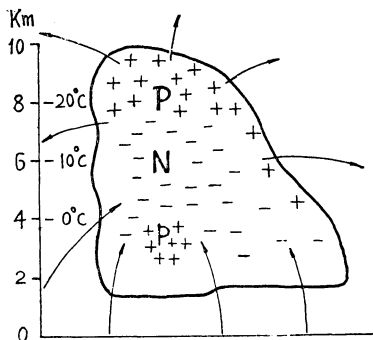


Fig. 4-1 静電的に見た電荷分布と電氣力線

雷雲の電氣的構造を論ずる場合、静電的見方と動電的見方のいずれによるかが重要な問題である。ただし多くの研究者は、雷電気発現には二つの段階があるものとみている。第一段は正、負帯電体の生成である。生成されていても混合したままでは巨視的には中和状態であるから、第二段として正、負電荷の分離が起こらなければならない。分離の機構として考えられるのは、正の帯

電体と負のそれに容積の相違があって重力場で、あるいは雷雲内の特殊な気象状況のもとで両者の篩い分けが起こることである。例えばメーソンによると、霰の成長に伴ない、その際できる氷の小破片は正に霰は負に帯電し、この小さい氷片と大きい霰の篩い分けによって P, N 電荷ができるのだという。どの程度まで電荷が分離するかについては二つの考えがある。一つは静電的の見方であって、分離が進むにつれて電極間の電場が強まり、篩い分けが次第に妨げられ静電氣力と重力との平衡状態に近づくとする。他は動電的の見方で、篩い分けによる供給は一定の割合で起こっているが、分離する電荷はその付近の電場と電氣伝導度に応じて生ずる電流によって失われ、供給と流出との平衡状態に近づくというのである。

電荷分離が平衡状態になる前に電場の大きさが臨界値に達すると電光放電が起こり、その後再び分離が進む。観測によれば、P, N 電荷の間の放電では、1回で平均 20~30C の電荷が中和する。静電的の見方をすれば、P, N 電荷はほぼ1回の放電量程度のもので、放電後再び篩い分けが始まり次の放電の起こるまで指数的に進むものとする。動電的の見方によれば、P電荷は数回分の放電量に相当する大きさのものと考え得るし、またN電荷はP電荷よりもずっと大きくなり、一方篩い分けも同じ割合で持続するから、このため放電は相ついで起こり得るとする。

従来、電離層と大地間の晴天日電流は雷雲の起電力によって供給されるという見方が行なわれていて、1個の雷雲によっては約1Aの上向き電流が期待され、観測からも一応確かめられている。この見方からすると P, N 電荷は対流電流(篩い分け)によって供給され、大地より雷雲へ、雷雲より電離層へ向う伝導電流により、また一部は P, N 間を短絡する伝導電流及び電光放電によって失われるものとみられる。従って P, N 電荷の集積は伝導電流を決めるに重要な雲の内外の電氣伝導度に依存することになる。このような見地から、カセミアーは P, N 電荷の中心の高さをそれぞれ 9, 3 km, 伝導電流を 1 A とし、雷雲内外の電氣伝導度を適当に仮定して P, N 電荷の大きさをそれぞれ +60, -340C とした。なおこのとき、P電荷の値としては +50C と想定した。これらの値はシンプソン等の与えたものより著しく大きい。特にP電荷にくらべてN電荷が甚だ大きいことは、N電荷の対地放電(落雷)の起こる理由を容易に説明し得る点で注目すべきことである。

* Electrical Structure of Thunder Cloud

** Yuichi Tamura, 京都大学理学部

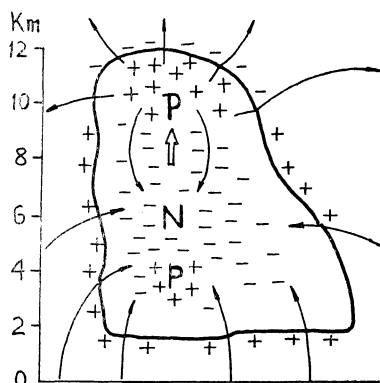


Fig. 4-2 動電的に見た電荷分布と電流線

Fig. 4-2 は動電的に見た場合の電荷分布と電流線の様子を描いたもので、Fig. 4-1 と異なる重要な点は、起電力として対流電流(図中白い矢印)が持続的であり、P電荷にくらべてN電荷が非常に多いこと、雲と自由大気との境では電気伝導度の大きい勾配のため電荷が誘発され雲内の電荷の外部への影響が大いに遮蔽されることである。

P電荷は落雷の引き金の役をするといわれているが、そのでき方についてはよく判らないというのが現状である。

5. 雷雲の帯電*

北川信一郎**

雷雲を特徴づける電光放電は、雨中に電荷が蓄積し、大気の絶縁を破壊する強い電場が生じ、大気の絶縁破壊をとまなう大規模な火花放電によって雲の電荷が瞬間的に中和される現象である。雲中でこのような電荷の集中がいかんして行なわれるかという問題にたいしては、20世紀の頭初からさまざまな学説が提唱されている。これを分類してあげると次のようになる。

(A) 降水説

- (1) 感応説および各種の分極説
- (2) 水滴分裂説
- (3) 氷粒の摩擦分裂説
- (4) 水と氷の二つの相の界面で電荷が分離するという相転移説
- (5) 氷が溶解するさいに帯電するという溶解説

* Electrification of Thundercloud

** Nobuichiro Kitagawa 気象研究所高層物理研究部

(6) 氷の中に温度差があると電荷が分離するという氷の温度差説

(B) 対流説

降水説は、雷雲中で、大粒の重い降水粒子に一方の符号の電荷が上昇気流で吸き上げられる小粒の軽い雲粒に反対符号の電荷が生じ、両者の下降と上昇の相対運動が正負の電荷を分離蓄積するという考えにもとづいていて。これに反し、対流説では電荷の輸送はすべて対流によって行なわれ、電荷の最初の源は静穏日、地表附近に卓越する正の空間電荷で、周囲の大気中の負イオンと地表から尖端放電で大気中に放出される正電荷が第二次の源泉となる。

降水説は元来、われわれの体験する温帯地方の雷雲の帯電の成因を説明するべく提唱されたものであるが、第二次大戦後、航空機やレーダーによる観測から、雷雲が高さ12km、直径数kmのセル構造をなしており、電荷分離が -5°C から -40°C の温度層の間で行なわれていることが各種の大規模な観測から帰納されるようになったので、過去の学会をにぎわせた帯電の諸説も逐次淘汰される結果になった。(1)の感応説、(2)の分裂説はいずれも雨滴の存在を仮定している点で、雷雲の主要な電荷分離を説明することはできない。また、室内実験の量的裏付けが欠けている点で(3)の氷粒の摩擦分裂説も歴史的な価値しか認められていなかったが、このうちの氷粒の分裂は(6)と関連して新しい脚光をあびるようになった。

米国の Workman と Reynolds (1948年, 1950年) は微量の電解質を溶解した水が氷結するさい、水と氷の界面で電荷の移動がおこり、両相の間に電位差を生ずる現象を発見し、この効果によって雷雲の帯電を説明しようとした。これが(4)の相転移説で、雷雲の降水は炭酸カルシウム、炭酸ナトリウム等の電解質を微量に溶解しており氷結にさいしては氷にたいして水が正に帯電する。Workman は落下する雲が過冷却の微小水滴に衝突して成長するさいに水滴の一部は正に帯電した飛沫となって飛び散り、上昇気流で運ばれて雲の上部の正電荷を形成し、雲は負に帯電して下部の負電荷領域をつくると考えた。この説の基礎になった電荷分離効果そのものは実験室内で再生可能で、疑問の余地のない確実なものであるが、氷粒が過冷却水滴に衝突するさい、 -5°C ~ -40°C の低温では水滴の一部は雲の表面をぬらすことはあっても、水の飛沫として飛び散る可能性はほとんどないことが判明したので、この説も難点に縫着してしまってい

る。

氷の溶解による帯電についても北大の菊地等の実験があり、これは雷雲下部の局部正電荷や降水電荷の説明には適用できるが、 $-5^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ の温度高度で行なわれる雷雲の主要な電荷分離の説明には用いられない。

(6)の氷中の温度差による電荷分離はもともと、スエーデンの Findeisen (1940年, 1943年), ドイツの Kramer (1948年) 及び Weickmann と Aufm Kampe (1950年) 等の過冷却水滴を金属面に吹きつけ霧氷を生長させる一連の室内実験に端を発している。彼等の実験結果によるとこのさい生長にともなって霧氷が負に帯電するという結果を得た。この種の実験結果は定性的には広く受け入れられているが、過冷却水滴をノズルから吹き出すときの水滴分裂の帯電効果が混入するため、定量的な結果については疑問が残されていた。これにたいし、以前に相転移説を発表した Reynolds は低温槽内に雲中に近い状態を再現し、回転する金属棒の先端に霧氷を生長させる実験を根気よくくりかえし、生長する霧氷の帯電の機構を明らかにした。霧氷の帯電現象で、必要条件と考えられていた過冷却水滴の存在は、霧氷に氷結して潜熱を放出し、霧氷の温度を空気中の氷晶の温度より高くするという間接の役割を演ずるもので、電荷の分離そのものは温度の異なる二つの氷——低温の氷晶と比較的温度的高い霧氷——の接触分離によって生ずるということである。この温度の異なる二つの氷の接触分離による帯電の実験は、Brook と Reynolds (1957年)によっていろいろな条件下でたしかめられ、英国では Latham と Mason (1961年) が同様な実験を行なってこの効果をたしかめ、彼等や Fletcher (1965年) 等によってこの効果の物性論的な説明がこころみられている。

この効果についての定量的な評価については、Brook や Mason の間でなお議論がたたかわさされており、もっと広範な条件下における名大の高橋の実験 (1965年) 等があるが、(B)の対流説についての議論を別にすれば、温帯の雷雲の帯電機構の解明に関しては、かなり明瞭なすじ道がつくられてきたといえる。冒頭にかかげた諸説の分類は、はなはだ現象論的便宜的なもので、物理的には本来、水と氷、氷と氷、あるいは氷とイオンないしはユーロゾルとの間における電荷分離機構というように分類すべきであろう。電荷分離が雷雲においては氷どうしの分離によって行なわれていることを明らかにし、また従来、(無計画、試行錯誤的に行なわれていた氷同志の帯電の実験で、)二つの氷の温度差が本質的な原因であ

ることを発見したのは Reynolds であるから、雷雲帯電機構の研究は彼によってはじめて大気のマикроフィジックスとしての系統に組み入れられたということができよう。

(B)の対流説はフランスの Grenet (1947年), アメリカの Vonnegut (1955年, 1958年) によって提唱されているが、定量的な裏付けを欠いており、降水説を全般的にくつがえすような観測事実もない。ただ、彼等が西インド諸島で観測した暖かい雷雲 (warm thundercloud) の存在は否定できないので、Reynolds 等が発展させた氷の温度差による電荷分離以外の機構で、とにかく電光放電をおこし得る程度に雲を帯電させる別種の機構が存在することは認めなければならない。

6. 核実験と大気電気*

近藤 五郎**

核爆発実験にともなう大量の降下性放射能塵が大気中にばらまかれ、そのために、大気は異常に電離され、またその塵そのものが核としての働きをするなど、いずれにしても、大気中のイオン平衡の条件は大きく変化し、大気電場に大きな変化を与えるであろうことは明らかである。最も直接的なものは核爆発実験直後に実験場近くで観測された大気電気異常変化で、電気伝導度の異常増加と電位傾度の降下が報告されている。

しかし、降下性放射能塵は実験場近くのみでなく、気流にのり世界中にばらまかれるので、その影響は方方で報告されている。(E.T. Pierce, L. Koeningfeld, K.H. Stewart)

例えば、Fig. 6-1 は柿岡での1950年以後の電位傾度の変化と、降下性放射能塵の変化を対応して示したものであり、電位傾度の最大の歪は50%以上にもおよんでおり、いかに降下性放射能塵が大気電場を大きく歪ませた。しかも、それは約2カ年にわたる後遺症をのこすので非常にやっかいである。

世界的にこの歪がどのようなものであるか、ということについては充分なデータはないが、たとえば、I.G.Y. 期間、即ち1958年の夏の各地の値から等電位傾度線を引いてみると Fig. 6-2 のように、jet 気流の通る地域では電位傾度が低くなっている。

* The Influence of Nuclear Explosions on Atmospheric Electricity

** Goro Kondo, 地磁気観測所

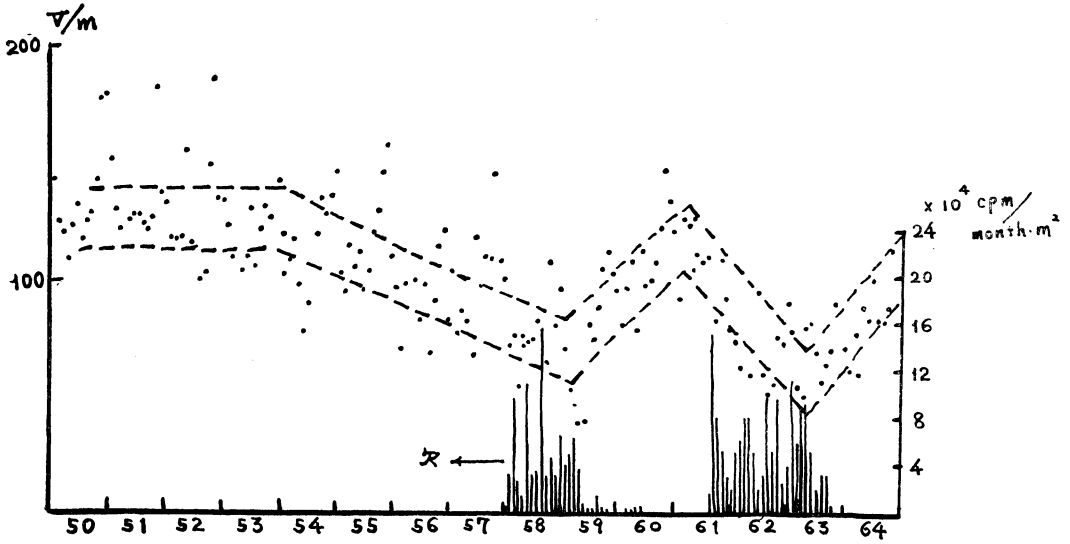


Fig. 6-1 落下塵・降水中の放射能（東京）と電位傾度（柿岡）

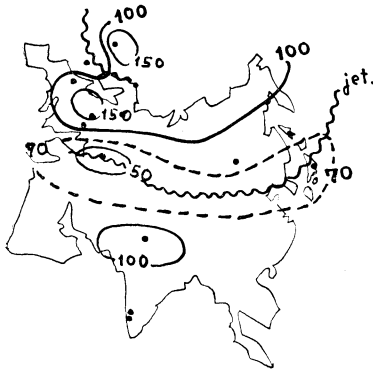


Fig. 6-2 等電位傾度線図（1958年夏，単位は V/m）

つまり、定性的には、Jet 気流によって運ばれる放射性降下塵が地上に堆積して行って、その影響として、電位傾度が減少するといつてよい。しかし未だ、定量的に十分な説明が出来ないことは非常に残念なことで、自然現象の研究、例えば、太陽活動と大気電場との関係を議論する場合には1954年以後のデータは、この大きな人工雑音のためマスクされて使いものにならないのである。

今後、この種の実験が行われないことを願うと同時に少しでも、この変化を定量的に説明すべく研究が進められねばならず、又その方向に向っていることを報告して結びとする。

7. 高層の大気電気研究の近況*

内川 規一*

地球上ではいつでも何処かで雷が発生している。雷は上部に正電極、下部に負電極を持っている一種の発電機である。雷の上部から発する電流は電離層下部に至り、そこで地球全体に広がる。晴天域では電離層から地表に向う垂直電流となり、地上に達すると雷雲下の地面に至り、更に雷雲の底部の負電極に向って大気中を流れる。これを global circuit とよんでいる。Fig. 7-1 はこれを模式的に描いたものである。

大気電気学の大きな目的の一つは global circuit の究明にある。1922年から1925年にわたってアメリカのカネギー号が大洋上の電位傾度を観測した結果、電位傾度の日変化が世界時を基準とした一日周期の波であることがわかった。この現象を説明するのに Whipple (1936)らは全地球上の雷活動の時間別頻度をとってみた。この頻度曲線が大洋上の電位傾度日変化と位相が一致していることから、大洋上の電位傾度の変化は電離層の変化を示していなければならないことを示唆した。その後の雷雲上の上向き電流の測定、雷雲と地面との間の全電流の見積り等はいづれもこの理論を支持する結果となり、矛盾する事実は見出されていない。多くの大気電気研究者は

* Recent Studies on Electricity of Free Atmosphere.

** Kiichi Uchikawa, 気象庁高層課

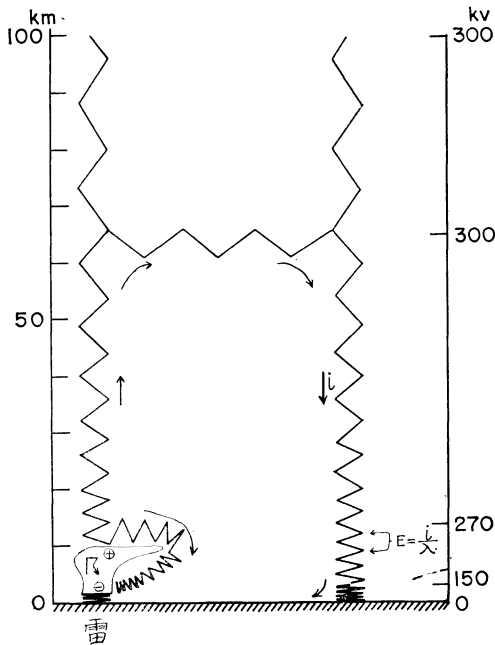


Fig. 7-1 Global Circuit の模式的説明

雷の上部から発した電流は電離層に至り晴天域では下向きの電流となつて地面に達する。ジグザグの線は気柱抵抗を示す

この仮説を支持している。しかし、この理論は完全には観測の事実によって裏づけされていない。例えば、電離層電位はある時刻に地球上到る処で等しいのであろうか？ また晴天域の電流密度は電離層から地表まで一定値をとるだろうか？ かの事柄はまだ明瞭でない。

ラジオゾンデ、航空機、ロケットにより上層大気の電氣的要素を直接測定することが近年盛んになってきた。世界各国で開発されてきた電気ゾンデは下表のとおりである。これらのゾンデを用いて電位傾度を測定し、その値を積分して電離層電位を求めることができるので、ラジオゾンデは global circuit の研究には非常に有力な手段である。

ラジオゾンデの測定結果から求めた電離層電位が Whipple の説のとおりになっている 否かは頗る興味あることである。

筆者は IGY の資料をもとにして、Weissenau (西独)、Payerne (スイス)、Murchison Bay (北極圏)、Poona (インド)、Leningrad (ソ連)、館野および札幌のゾンデの測定値から電離層電位を計算した。その結果を Fig. 7-2 に示す。Payerne と Murchison Bay および館野と

各国の電気ゾンデ

考案者	国名	種類
Mühleisen & Fischer	西 独	電位傾度
Rönicke	西 独	電位傾度—伝導率
Coroniti et al	アメリカ	電位傾度, 伝導率
Kasemir	アメリカ	電位傾度, 空地電流
Koenigsfeld & Piraux	ベルギー	電位傾度
Lugeon & Bohnenblust	スイス	電位傾度, 伝導率
Venkiteswaran et al	インド	電位傾度, 伝導率
Maddever & Sanders	イギリス	電位傾度
Paltridge	オーストラリア	電位傾度
島山ほか	日 本	電位傾度—伝導率
内 川	日 本	空地電流—伝導率

註: ハイフオンは同一のゾンデで二要素測定するものを示す

電離層電位

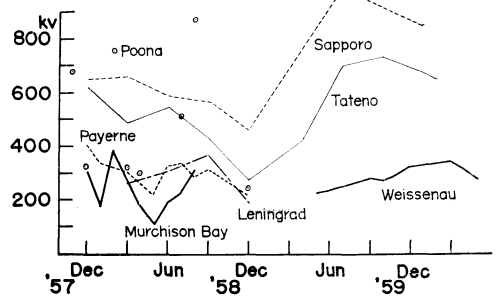


Fig. 7-2 電離層電位

世界各地のラジオゾンデ観測から求めたもの
●印をつないだ曲線はプーナの変動を示す

札幌とは同じ型のゾンデを用いている。こゝで驚くべきことは日本とヨーロッパでその値が著しく異なり、札幌と館野でさえかなりの相違がある。Dolezalek はこれに対し測定が正確でないかまたは成層圏又はそれ以上の高さに存在するエーロゾルが補償する役割を演じているのではないかと主張している。しかし電離層電位の70%は交換層内で占めるので、この層内の変動が電離層電位に及ぼす影響が大であることは勿論である。人工的な煙が交換層内で電位傾度に大きな変化を及ぼす。この変化に対する補償を上層のエーロゾルが果たしているとは一寸考えにくいことである。

雷の上から出た電流が水平方向に流れ、全地球に亘って様に分布する層の高さは Kasemir の見積りによると約 65km である。この辺の高さの大気の電氣的構造を知ることは非常に重要である。20~30km の高さでは、大気の電気伝導率は所謂小イオンによって決定される。多くの人の仮定によると小イオンは 10~20 個の空気分子が 1 個の素電荷のまわりについていると考えられている。電離層の伝導率は自由電子のみでできる。その転移層は 30~80km であろう。こゝではイオンが小さくなり逐には分子イオンとなる。その移動度は化学的性質によってちがうだろう。また自由電子の存在も多くなり、逐にはイオンの存在が電気伝導率に何等の影響を与えなくなろう。これらの事柄は 30~80km の区域のイオンの大きさと数密度、電気伝導率、電場の強さ、電子

密度の垂直分布をロケットを用いて測定することにより明らかになろう。Fig. 7-3 は上層大気の電気伝導率を示したものである。

global circuit が完全に解明できたらどんなふうに役に立ってであろうか？まづ第一に上層大気の物理的機構がわかり、地上付近の気象の変動に重大な情報を提供する。更に雷雲と対流雲の刻々の活動を一点の空地電流の測定によって手にとるようにわかる。降水をもたらす大部分の雲は雷雲と対流雲であるから、全地球の規模でこれらの雲すなわち降水の状況がわかるのである。

8. 宇宙空間電気現象*

大林 辰蔵**

地球大気の電気現象を取扱うのが大気電気学であるが、この概念をもっとひろげて電離層や大気圏外の電氣的現象をも含めて統一的な研究分野を開こうという動きが最近みられる。ロケット技術の発達によって今まで到達しえなかった高層大気の直接測定が可能となってきた今日、従来つちかわれてきた大気電気学をもとにして、さらに広い視野にたった汎世界的な現象を探求しようとする努力の一つの方向として問題が提起されていることは重要である。地球大気内の電荷のバランス、電離層と下層大気の電氣的結合といったような課題が新しい観点にもとづいて再検討される時期がきている。

space electricity の活動分野は電離層から地球外圏大気を含む超高層大気の電気現象である。おそらく近い将来、われわれ近傍の惑星大気の電気現象も地球のそれとの比較対照といった観点で重要な研究項目となる。

超高層大気の電氣的性質を理解する上に大切なことは、大気が電離したプラズマの状態で存在することである。電気伝導率は下層大気に比べてほとんど導体と見做しうる状態となり、またそこに存在する地球磁場の影響がプラズマの運動を決定する上に支配的なはたらきをする。こゝでは電場はプラズマが磁場内で運動することによってのみ意味をもち、電流も著しい非等方性を示すことになる。

われわれが space electricity の課題の一つとして最も重要視しているのは超高層大気内の電場に関してである。周知のように下層大気では雷活動を伴う地方を源として静穏な地域の下降電流によって閉じられる global

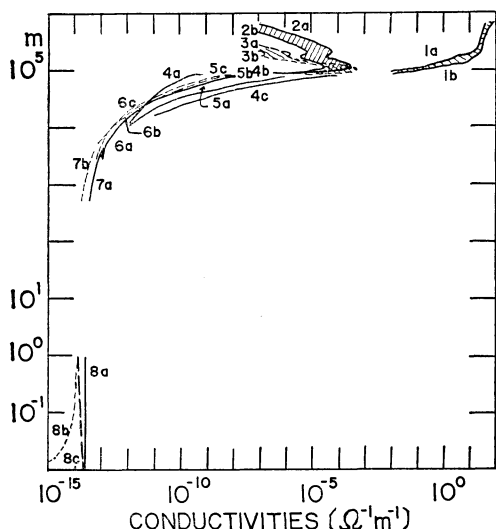


Fig. 7-3 上層大気の電気伝導率

1a, 1b は磁力線に平行な電気伝導率, a は太陽黒点極小期, b は極大期.

2a, 2b は磁力線に垂直な電気伝導率

3a, 3b は Hall Conductivity

4a, 4b 4c は Israél an b Kasemir の計算 a は自由電子を考慮しない, b, c は自由電子を考慮した, ただし b のときは $(\alpha/p)^{0.3} = \text{一定}$, c のときは $\alpha/p = \text{一定}$

5a はロケット観測. 5b は負の電気伝導率. 5c は正の電気伝導率

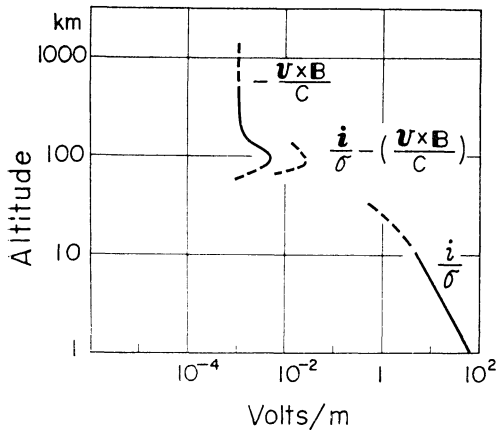
6a はゾンデ観測 6b は負の電気伝導率 6c は正の電気伝導率

7a は高山における観測 7b は正の電気伝導率

8a は地表付近の電気伝導率 8b は負の電気伝導率 8c は正の電気伝導率

* Space Electricity

** Tatsuzo Obayashi, 京都大学工学部



Electrostatic field in the upper atmosphere

Fig. 8-1 地球大気電場の高度分布

circuit があり、電場分布はそれによって規定される。静穏時の電場は地表付近では 100ボルト/m であるが、これは高さと共に急激に減少することが知られている。果してこの電場はどれくらいの高度まで伸び、汎世界的にはいかに分布しているか、これは近い将来その解答を見つねねばならない問題の一つである。

電離層内の電場は下層大気とは全く異った機構で発生する。大気の潮汐運動によってダイナモ電流が流れ、それが地球磁場の日周変化の原因となるというダイナモ説は有名である。このダイナモ・アクションの結果生ず

る空間電荷の分布が電離層内の静電場をつくる。地磁気変化から推定される電場の強さは 1~10ボルト /km で顕著な日変化をすることが特徴である。

電離層から外にひろがる超高層大気内では上述のダイナモ電場が地球磁力線に沿って伝達されているほか、電離ガスの固有運動（回転及び対流）が起っていてそれによって生ずる偏極電場がある。理論的な推定によるとこの電場の強さは 1ボルト/km ぐらいになる。これらの電場の推定をまとめてその高度分布を Fig. 8-1 に示してある。

ロケットでこれらの電場を直接測定しようとする試みがすでに始まっている。Gringauz (ソ連) の報告では理論値よりも非常に大きい電場が測られたとあり、また Kavadas (カナダ) はオーロラ地帯でこれを測っているが、いづれも測定方法、原理などに欠陥があって成功したとは云えない。わが国では平尾邦雄(電波研究所)および東大宇宙航空研究所のグループがカップ、ラムダロケットをつかってロケットの空間電位の測定をはじめており、その結果が期待されている。このほか、気象ロケットをつかって下層大気の電場分布を測ることも日本で先鞭をつけてやってみる必要がある。

宇宙空間電気学はいま漸くその第一歩をふみだしたと云える。この分野が将来健全な成長をとげることをのぞみたい(口絵参照)。

〔書評〕

アジアの気候

—世界気候誌第1巻— 島山久尚監修

A 5判 580頁 ¥ 3,500円

いまからでは、少し“おそすぎた書評”になりかねないが、本誌に未だ取りあげられたことはないし、しかも、もっと知られていい本として、この“アジアの気候”をあげたい。

これは、今後続刊される“世界の気候誌”のトップバッターとして発刊されたもので、倉嶋厚、落合盛夫、青木宜治、土屋巖、有賀淳の諸氏の手になるものである。

従来気候表として手もとにすぐ使えるものとしては、“外国気候表”とか東亜研究所が出されていた“気候

表”ぐらいのものであった。いまでは、それらも古く、かつ不完全なものとなって、新しい気候表が待望されていた矢先きである。

本書はその点、従来の気候要素の平均値を分列した気候表の作り方を止揚して、それらの変動性と相互の関連性を重視して作られているのが特色といえよう。また詳細な解説は、すぐにも使いたいと思う人達に良い指針となるろう。

ただし、難をいえば本書のようにいきの長い、また国際的にも通用する本としては政治的版図の取り扱いにはもっと神経を払ってもらいたかった。続刊を待つ。

(気象研究所 神山恵三)