

大気電気学を学ぶために

(I) 雷・特に電荷発生機構

高 橋 劭*

大気電気学は古い学問の中の一つである。大気電気は人間の知覚に直接関与しないので学びにくいといわれる。

雷の解明が遅れている原因は、一言でいえば複雑怪奇故といえよう。もう少し学問的にいえば雷は、いろんな学問の分野が複雑に絡みあっているためである。雷は、まず雷雲内の流れの場が知られなければならない。又雷雲内では霰・雹・雪が形成されるが、これらの形成過程の知見が必要で、雲物理学の知識が必要となる。この雷雲内での電荷の発生は、主に、霰と雪との衝突によるが、プロトンのやりとりの問題には、物性論の新しい考え方、特に表面問題が重要になってくる。この雷雲中で強い電場が形成されると、イオンの運動が電場に支配され、電磁気学の知識が必要となる。即ち、雷の解明には、気象力学・雲物理学・物性論・電磁気学・化学等の広い学問の総動員が必要である。

大気電気学は単に雷の解明にとどまらない。大気電気の要素が、特に気象と密接な関連のあることから、他の気象要素に匹敵する重要な要素になりうる。他の気象要素と異なる点は、まず第一に、正・負の異なる符号をもつこと。第二にイオン形成は単純な機構で行われ、イオンのバランスが論じられること。第三に降水要素の電荷は、その生成過程が物理的な条件で決定されること、空中電場は、一つの雲全体としての性質を示すこと、雷放電からの波は単純な法則で走りまわること等である。

1 必読論文

大気電気学の入門書として必読の論文をいくつかあげる。

a) 雷雲内の電荷分布については **Simpson & Scrase** (1937), **Simpson & Robinson** (1941) の有名な論文がある。100 台近くの電場ゾンデを飛揚して、雷雲内の電荷分布のモデルを提出した。このモデルは今でも雷雲内の電荷分布の考えの基礎となっている。この論文

は著者の雷への意気込みが感じられる力作である。一方 **Kuettner** (1950) は、ツグスピッチ山で電場と降雪との対応から雷の強い電場は霰と雪に対応していることをのべている。雷雲内では何が電荷になっているかについては、まだはっきりせず、高橋 (1965) の若干の試みがあるが、今後の問題である。

b) 放電機構については、**Schonland** が南アフリカ連邦で行なった一連の研究がすばらしく、古典物理の野外実験の真髄である。リーダー・ストローク、リターン・ストロークの区別、放電量、放電と雷雲電荷の中和のモデルとすばらしい成果をあげている。

c) 電荷発生機構については、まず大きく二つに分かれる。雷はイオンだけで説明できるという **Vonnegut** (1955) の考え方と、必ず霰・雹が必要という説である。**Vonnegut** は、地上近くの正イオンが負イオンより多いことを考慮して、あとは積雲の発達とともに雷ができるという考え方である。後者は降水要素によるとする考え方で、霰、雹の必要という説に賛成する人は多いが、電荷発生の物理的機構でまた多くのグループにわかれる。水の凍結中の電位とする **Workman & Reynolds** (1950)、着氷実験の **Reynolds, Brook & Gourley** (1957)、温度差のある氷と氷の接触とする **Brook** (1958)、この解釈に物性論の考え方を導入した **Latham & Mason** (1961) がある。しかし氷の電荷発生機構のしっかりした論文が、古く日本にあったことは誇っている。それは、吉田 (1944) の論文で、実験のうまさというのは、論理性のつらぬいた実験をいうものだとして著者をして感激させた一作である。

2. 教科書

さて教科書としては、日本では畠山久尚・川野実：気象電気学 (1955)、(大気電気に関する特集号)、気象研究ノート、16巻 (1966) がある。一般書としては、畠山：かみなり、中谷：雷、川野：気象と電気がある。外国では、しっかり大気電気学をやりたい人のためには、

* 名古屋大学理学部

Compendium of meteorology (1951), **Erich : Lehrbuch der Luftelektrizität** (1958), **Israel : Atmosphärische Elektrizität Teil I, II** (1961), **Chalmers : Atmospheric Electricity** (1967) がある。気象学会でまとめた論文集 (No. 16, 1962) はよくまとまっている。その他 **Schonland : The fright of thunderbolts** (1964) があり、国際学会の論文集として **Proceeding on the Conference on Atmospheric Electricity** (1955), **Recent Advances in Atmospheric Electricity** (1958), **Problems of Atmospheric and Space Electricity** (1963) がある。

3. 雲物理から気象物理へ

気象学の目的が気候制御にあり、そのためには気象現象の種々の物理的過程を正確に知る必要がある。

このためには、少し遠まわりでも、**L.I. Shiff の Quantum mechanics**, (1948), **J.M. Ziman の Principles of the theory of solids** (1963, Cambridge Univ press), **C. Kittel の Introduction to Solid State Physics** (1956, John wiley & sons), **Slator の Introduction to Chemical Physics** (1939, Mcgraw hill,) **V. Heine の Group theory** を勉強されることを希望したい。又表面現象の多いことから **Surface Science** を読まれ、積極的に気象物理への道を歩まれることを期待したい。

論 文

- Simpson, G.C. & F.J. Scrase (1937): The distribution of electricity in thunderclouds, Proc. Roy. Soc. A, **161**, 309-352.
- Simpson, G.C. & G.D. Robinson (1941): The distribution of electricity in thunderclouds II, Proc. Roy. Soc. A, **177**, 281-329.
- Kuettner (1950): The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds, J. Met. **7**, 322-332.
- Takahashi, T. (1965): Electric charge measurement in thunderstorm by the use of radiosonde, J. Meteor. Soc. Japan, **43**, 206-217.
- Schonland, B.F.J.: The lightning discharge, Handbuch der Physik, Springer **23**, 576-628.
- 吉田順五, (1944): 氷の摩擦破壊によって生ずる電気並びに雷の電気の発生機構, 低温科学, **1**, 149-187.
- Vonnegut, B. (1955): Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity, Proc. Conf. Atmos. Elec. Portsmouth, 169-181.
- Workman, E.J. and S.E. Reynolds (1950): Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity, Phys. Rev. **78**, 254-259.
- Brook, M. (1958): Studies of charge separation during ice-ice contact, Recent Advances in Atmospheric Electricity, 383-389.
- Latham, J. & B.J. Mason (1961): Electric charge transfer associated with temperature gradients in ice, Proc. Roy. Soc. A, **260**, 523-536.
- Reynolds, S.E., M. Brood and M.F. Gourley (1957): Thunderstorm charge separation, J. Met. **14**, 426-436.

教 科 書

- 島山久尚, 川野実, (1955): 気象電気学, 岩波全書, 201.
(大気電気に関する特集号): 気象研究ノート(1966), 第16巻, 第3号, 日本気象学会。
- 島山久尚, (1961): かみなり, 地人書館。
- 中谷宇吉郎, (1939): 雷, 岩波新書。
- 川野実, (1958): 気象と電気, 日刊工業新聞社。
- Selected Meteorological Papers No. 16, Atmospheric electricity, 1962, Met. Soc. of Japan.
- Compendium of Meteorology (1951), Waverly press, 101-155.
- Basil Schonland, (1964): The Flight of thunderbolts, Charendon Press.
- Erich von Kilinski, (1958): Lehrbuch der Luftelektrizität, Akademische Verlagsgesellschaft.
- H. Israel, (1961): Atmosphärische Elektrizität, Teil I, II, Akademische Verlagsgesellschaft.
- J. Alan Chalmers, (1967): Atmospheric Electricity, Pergamon Press.
- Air Force Cambridge Research Center, (1955): Proceedings on the Conference on Atmospheric Electricity. Recent Advances in Atmospheric Electricity, (1958), Pergamon Press.
- Elsevier, (1963): Problem of Atmospheric Space Electricity.
- Surface Science, North-Holland Publishing Co., 1964, Vol. 2.

(II) 地球大気の電気構造およびイオン・エアロソルの諸問題

三 崎 方 郎*

最近の大気電気学の概要と中心的話題を、勉強されようという向きには、それぞれのテーマ別に、12名の著者により書かれた総合報告が特集された**気象研究ノート**、**第16巻第3号**がある。その表題だけでも一覽されれば、現在の大気電気学が指向する研究方向をはっきり分っていただけると思う。どの著者も非常な力作で、各分野の現況を簡潔明瞭に、しかも学問的に最高のレベルで書かれてあるので、この集成版はある意味では大気電気学の名著であろう。少くとも専門家には非常に便利な座右の書であり、重要文献はもちろん各項目毎に網羅されている。ただし全くの基礎的説明は省かれているから、教科書として見るときには多少の難点があろう。

教科書としては、日本では**畠山久尚・川野実：気象電気学**、外国書では**J.A. Chalmers: Atmospheric Electricity**, **H. Israel: Atmosphärische Elektrizität**をおすすめしたい。前者は示唆に豊んだ内容をもっており、改版を重ねてきた名著であり、後者は観測例を豊富に盛り込んで、よくもこれだけ徹底して書かれたものだと思う程しっかりした基礎より成っている。

これ等の教科書により、基礎的な、そして従来の大気電気を理解された上で、前述の気象研究ノートを併せ読まれば、変貌しつつある現在の大気電気が完全に理解されよう。以下各論にうつる。

1. 地球大気および宇宙空間の電気構造

(a) 雷電流系

地球大気圏内の到るところに見いだされる大気電場の源は主に雷である。すなわち大気中に雷という発電機が置かれた時、それから空気という抵抗体を通して電荷が流れ出る。雷雨域から出た電流が電導率の高い上層を廻って地表面に戻るといふ全地球的な電流系のピクチャーを示した論文が**H. Israel, H.W. Kasemir (1948~1952): Studien über das atmosphärische Potentialgefälle, I~VI.**である。これが今日の下層地球大気(電離層より下)の電気構造の基本的概念となっている。また、Israel, Kasemirはこの論文の中で、大気の時常数の概念を導入しているが、下層大気の電気構

造を理解する上で重要である。さらに、小論文であるが、Chalmersが雷電流系領域全体の電荷について、他の数人と討論をかわしている。大気の電気構造に関するイメージを確立する意味で重要である。この討論のもととなった論文は**J.A. Chalmers: The charge on the ionosphere**である。

この雷電流系の領域も細かくみると二つに分かれる。すなわち、交換層内とその上の領域である。地表から数千メートルまでは大気の交換現象が盛んなところで、その電気構造はエアロソル分布によって支配される。この高さは日により季節により変動する。

ここから上は割合に単純であって、大気密度の勾配と宇宙線強度の関係で電気伝導率が高さに対して指数関数的に増大して行く。交換層の問題でもっとも良い参考文献は、**R.C. Sagalyn and G.A. Faucher (1954): Aircraft investigation of the large ion content and conductivity of the atmosphere and relation to meteorological factors.**である。

雷電流系領域内の荷電粒子はイオンであって、エレクトロンは存在しない。

(b) 電離層電流系

さて、超高層となると、その電気構造には全く新しい要素が加わってくる。7~80km以上の高層では大気密度が著しく低くなり、粒子相互間の衝突頻度が減少する。このことはいろいろの効果をもたらす。その第一はエレクトロンの寿命が長くなることである。そのために電気構造を考える上でエレクトロンが重要な役割りを果たすようになる。第二は、磁場との相互作用が現われ始め、電気伝導率が異方性となる。したがって、そこでは電流はもはや電場の方向のままには流れない。この電流系もその特性にしたがって二つの領域に分かれる。100km以上となると粒子相互間の衝突が殆んど無くなるので、磁場に直角な方向には荷電粒子は動かなくなる。つまり、イオンもエレクトロンもその運動は磁場の方向にしか起らない。これが電磁流体領域である。

これに対して、100km~80kmはかなり性質が異なり、ダイナモ領域と呼ばれる。そこでは粒子相互間の衝突の効果もかなり強く残っているため、荷電粒子群が大気に

* 気象研究所高層物理研究部

引連られて運動し、磁場を横切り、発電機のように誘導電場を生ずる。

このような超高層大気の電気構造については、大林辰蔵、村田宏雄の宇宙空間電気現象を参照されたい。

この分野の研究が急速に進み出したのは、ロケットによる超高層大気の観測網ができて、従来たかだか 30km までであったシノプティックデータが 80km まで拡大されたからである。W.L. Webb (1968): **Source of atmospheric electrification** はロケット観測から得られた成層圏の潮汐運動をもとにして超高層大気の電気構造の理論を展開している。

2. イオン・エアロゾル

雷、超高層大気の電気構造と並んで現在の大気電気の世界で重要なのは、イオン・エアロゾルの諸問題である。

エアロゾルといっても、巨大粒子は大気電気の対象ではない。空気中の濃度が極めて低いからで、むしろ雲物理の領域である。ここではサブミクロン粒子、つまり直径が 1 ミクロンより小さいものに限られる。

教科書は C. E. Junge (1963): **Air Chemistry and Radioactivity** のエアロゾルの章が簡潔で読みや

すく、N. Fuchs (1964): **The Mechanics of Aerosols** は粒子の運動、拡散、凝集に詳しく、C. N. Davis 編 (1966): **Aerosol Science** はさらに、帯電現象、放射能、光学的性質から工学的方面にまで及んでいる。

大気電気ではエアロゾル粒子と小イオンの結合の問題が中心で、論文を一つだけ挙げるとすれば、C. E. Junge (1955): **The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data on the atmosphere** である。理論、実験ともに多数の論文があるが、総合解説として、三崎 (1960): **イオン・核に関する近年の研究**、三崎 (1966): **サブミクロン・エアロゾル** がある。参照されたい。

最後に、ごく近年に始まった新しい研究課題として、大気イオンの成因とその化学組成の問題がある。まだ公式に出版された論文はないが、昨年東京で開かれた第 4 回国際大気電気会議に提出された V. Mohnen と R. Siksnas の論文をあげておこう。いずれも対流圏内の小イオンについてであるが、問題のとり組み方は延長すれば超高層イオンの問題につながるものであり、極めて重要である。

参 考 文 献

〔教科書〕

C.E. Junge(1963): **Air Chemistry and Radioactivity**, International Geophysics Series, Vol. 4, Academic Press.

N.A. Fuchs (1964): **The Mechanics of Aerosols**, Revised and enlarged edition, Pergamon Press.

C. N. Davis (1966): **Aerosol Science**, Academic Press.

〔総合報告・論文〕

H. Israel, H.W. Kasemir et al.: Studien über das Atmosphärische Potentialgefälle, I (1948), *Terr. Mag. Atm. Electr.* **53**, 373-386, II (1949), *Ann. Geophys.* **5**, 196-210, III (1950), *J. Atm. Terr. Phys.* **1**, 26-31, IV (1950), *Arch. Met. Geophys. Biokl. A* **3**, 83-97, V (1952), *ibid* **4**, 56-70, VI (1952), *ibid* **4**, 71-88.

J.A. Chalmers (1953): **The Charge on the Ionosphere**, *J. Atm. Terr. Phys.* **3**, 345-346.

R.C. Sagalyn and G.A. Faucher: (1954) **Aircraft Investigation of the Large Ion Content and Conductivity the Atmosphere and Relation to Meteorological Factors**, *J. Atm. Terr. Phys.* **5**, 253-272.

大林辰蔵、村田宏雄(1966): **宇宙空間電気現象**, 気象研究ノート, 第16巻, 第3号, 514-524.

W.L. Webb (1968): **Source of Atmospheric Electrification**, *J. Geophys. Res.* **73**, 5061-5071.

C.E. Junge (1955): **The Size Distribution and Aging of Natural Aerosols as Determined from Electrical and Optical Data on the Atmosphere**, *J. Met.* **12**, 13-25.

三崎方郎(1960): **イオン・核に関する近年の研究**, 天気, 第7巻, 119-125.

三崎方郎(1966): **サブミクロン・エアロゾル**, 気象研究ノート, 第16巻, 第3号, 395-411.

V. Mohnen (1968): **On the Nature of Tropospheric Ions**, 第4回国際大気電気会議 提出論文.

R. Siksnas (1968): **The Role of the Water Substance in the Structure and by Production of Ions in the Ambient Atmospheric Air**, 第4回国際大気電気会議 提出論文.