

雷……その電荷発生機構を中心として*

高 橋 劭**

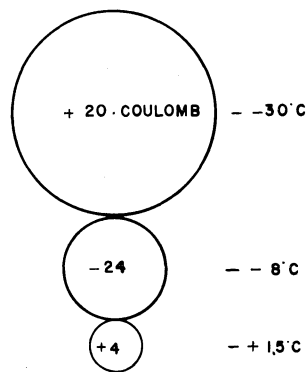
雷は人間の生活様式の変化に無関係に現われ、人間を圧倒し悠々と去る。この雷を神の世界から科学の世界に引き入れたフランクリンの風揚(1752)以来多くの研究があり雷程多くの研究者を動員した例も稀であろう。フランクリン以後雷の研究は3つの方向に大別される。その一はフランクリンの点放電による電位測定の改良として、火焰集電器(Volta)、水滴集電器(Lord Kelvin)、放射性集電器、回転集電器が次々と考察され地上のみならずゾンデ方式による上空での空中電位測定、イオン計数管によるイオン密度、電気伝導度の観測、電離層の研究、と雷の研究から晴天時の電気現象について研究が多く進められている。その二は放電機構の研究でありWalter(1902)、Boys(1926)による回転カメラ方式の考案、これを用いたSchonland(1938)の研究が特筆されよう。その後放電電荷量、その符号、放電のエネルギー、光学的スペクトル等の研究が行われ雲間放電を除けばかなりよく究明され、学問的には進んだ領域である。最後が物理系の人達が興味を持った部門で雷雲中の電荷発生、分離機構を明らかにしようとした。WilsonとSimpsonの論争は今でも我々に少なからず興奮を与えるのであるが、Simpsonは彼の主張を確かめるべく電位ゾンデを飛揚し雷雲中の電荷分布について一つのモデルを提出した。その後、彼のモデルを説明すべく数多くの考えが提出された。しかし近年、レーダー、放電、降水要素の電荷測定が進み、これら観測事実をもとにMason(1953)は今までの諸理論を再吟味している。

将来はこれら3つの方向が合補い全地球的な大気電気の様子が解き明かされるであろう。

I 雷雨の観測

Wilson(1921)は彼の考案した電位計で雷雲観測を

行い雷雲中の電荷分布は雷雲の上に正の電気、下に負の電気がある双極子型をしていることを示した。一方Simpson(1927)は落雷の写真と実験室内での放電との比較からWilsonとは逆に雷雲の上に負、下に正の電荷が存在すると主張した。しかし彼の主張には自然の放電と実験室での放電との同一性の仮定があり受け入れられなかった。そのため雷雲中の電位を測るべくマルチエレクトロードグラフ(1937)を考案し雷雲中の電位の直接測定を試みた。約100台のゾンデ飛揚の結果Wilson型の電荷分布以外に雷雲の下層に新しく正の電荷が度々見出され彼の面目が保たれた。これら観測の結果から一つのモデルを提出し図1に示すように -30°C 層を中心に半径2kmの球状空間に+20クーロン、 -8°C 層を中心に半径1kmの球状空間に-24クーロン、 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 層を中心に半径0.5kmの球状空間に+4クーロンの電荷分布を持つと考えた。これでやっと雷雲中の電荷分布の論争に一応終止符が打たれたのであるが次の問題はこれら電



SIMPSON'S MODEL

第1図 Simpsonの雷雲中の電荷分布に関するモデル。(Simpson and Scrase 1937.)

* Electric Charge Generation in Thunderstorm

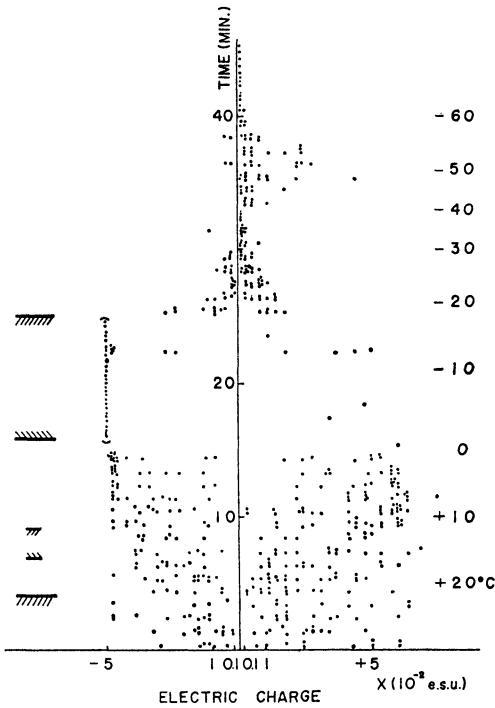
** T. Takahashi. 名古屋大学水質科学研究施設

荷はイオン上にあるのか降水要素上にあるのかということである。Ross Gunn は1957年 B17 飛行機を用いて、誘導環を電荷を持つ降水要素が通過したとき誘導された電気を増幅しオンログラフで記録した。彼によれば降水要素の電荷で雷が十分説明できるという。著者(1965)は電

に行われ放電模様が明らかにされ放電一回当りの電荷量は約20クーロンで負の電荷が雷雲から地球に流れることがわかった。Workman & Reynolds (1950) はレーダーを用いて雷活動と降水強度との関連を研究し主な電荷分離の領域は 0°C から -15°C までであり、エコーが見えて12分~20分後に放電が観測された。又 Reynolds は放電電荷量、放電場所を決めるため空中電位の8点観測を行い、正の電荷をもつ領域が -10°C 近くまで広がっていることを示した。

気象庁(1967)では館野で落雷と雲のエコーの高さとを比較している。それによるとエコートップが -10°C 層以上になると雷の起る頻度が急に増加することを示した。

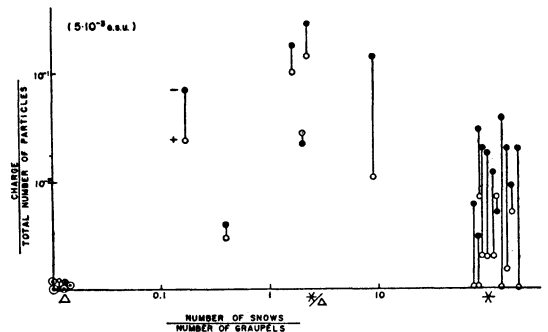
雷雲中の電気が降水要素上にあるとわかったが、次にどんな降水要素上(霰か雨滴か)にあるかが問題である。Kuettner (1950) はツグスピッチ山頂で霰が雷雲時の急な電位変化に対応することをのべ、霰の重要性をのべている。磯野・駒林・著者(1966)は冬期、積雲からの霰の電気の測定を行い霰の帯電には雪の共存が必要なことを示した。(図3)織笠は更に霰の電荷の符号と雲頂温度を対応させ -10°C 以下に温度が下がる時は負の電荷が、 -10°C 以上の時は正の電荷が卓越することを示した。これらの観測事実から電荷分離機構に関する諸理論を考察する。



第2図 電荷ゾンデによる雷雲中の降水要素の電荷測定。 0°C 層近くでは正・負の電荷が混在しているが全体としては正に帯電している。 0°C 層より -16°C 層までは負の電荷が大きく -50°C 層のカナトコ雲と思われる層には 10^{-2} e. s. u. のオーダーの電荷群が観測され、この分布はシンプソンモデルと似ている。(Takahashi 1965)

荷ゾンデを試作し雷雲中の降水要素の電荷をラジオゾンデ方式で測定した。(図2)電位ゾンデでは正・負の電荷が混在しているときは、その差引きのみが求まるのであるが、電荷測定では正・負の電荷をそれぞれ区別して測定できる強みがある。雷雲の最下層の正の電荷の所には 0.01 e. s. u. 程度の正・負の電荷をもつ降水要素が混在していて数としては正の電気をもつ雨滴が多いこと、雷雲の負の電荷の領域は負の 0.1 e. s. u. 程度の電荷をもつこと、カナトコ雲と思われる層では 10^{-2} e. s. u. 程度の正の電荷があることがわかった。

一方放電機構の研究が Schonland(1928)により大々的

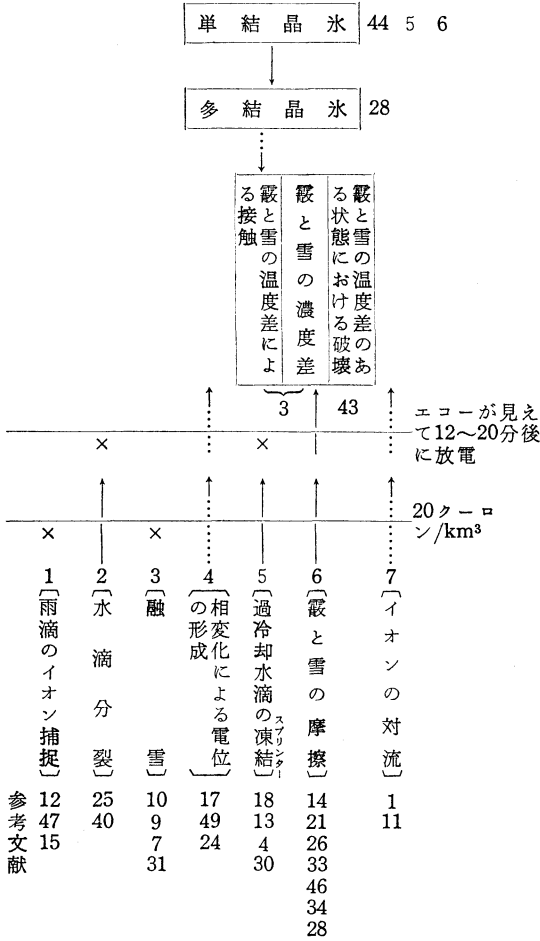


第3図 降水要素1つ当りの電荷量と1降雪中に見られる霰と霰以外の雪の存在比。1降雪中に霰のみが降るときは霰は帯電せず、1降雪中に霰・雪が観測されるときは、霰も雪も大きく帯電している。雪のみの降雪のときは雪は負に帯電して雪1コ当り 10^{-4} e. s. u. である。この結果は雷雲中でも霰の帯電は雪の共存の必要を暗示している。(Isono, Kcmabayasi and Takahashi 1966)

II 雨中の電荷分離機構に関する諸理論

電荷分離に関する理論は数多く、気象電気専門の人で

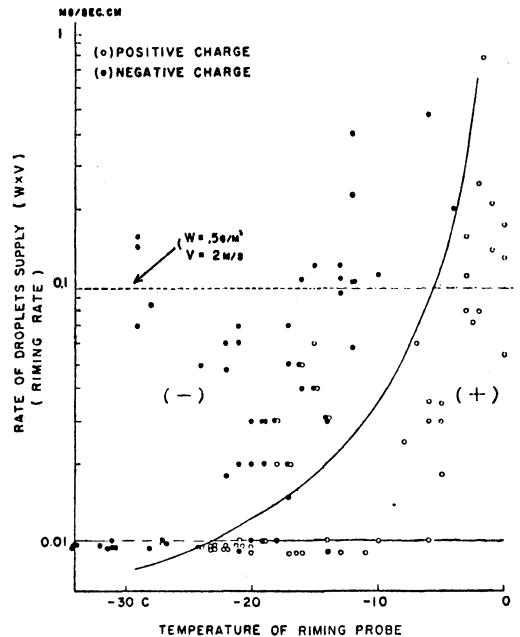
さえ戸感う程である。しかし雷雲中の電荷発生のための理論と限るとかなり選択される。雷雲であるための電気的条件はレーダーで見えるほど雨滴が成長してから12—20分後に1 km³ 当り20クーロンの電荷量が蓄積されることである。



1の雨滴のイオン捕捉による帯電機構(晴天電場の極性のもとで落下する雨滴は雨滴の上端が負、下端が正の双極子になる。イオンの易動度より早く雨滴が落下すると雨滴の下側が中和され雨滴は負に帯電する)では、1 km³ 当り20クーロンという値より一桁少ない。2の水滴分裂については水滴の分裂の際大きい粒は正に小さい粒は負に帯電するという考え方で、水1 g 当り 2.3×10^{-2} e. s. u. の電荷が分離されるが、12分で1 km³ 当り20クーロンという条件より、二桁少ない。3の融雪については霰・雪の融解時に霰・雪に含まれる気泡の破裂のとき空気を負に、雨滴を正に帯電させるもので1 g 当り約1

e. s. u. の電荷が分離されるが1 km³ 当り20クーロンという値よりも一桁少ない。4の相変化は、水の凍結に際し水と氷の間に大きな電位差が生じ、その電位の大きさは、水に含まれる不純物の種類・量に著しく依存するが自然の雨水に似た化学成分の混合液では1 g 当り 3×10^4 e. s. u. の電荷量が発生するという。Lathan & Mason (1961) は直径100 μ 以上の大雲粒を氷球に衝突させ電を作り、その際電は負の電荷ももち雷の電荷密度を作るのに十分であるという。しかしこの実験では不純物濃度に敏感であり自然での雷雲中の雲粒が彼等の実験に適した濃度を持っていたかは今後の問題である。

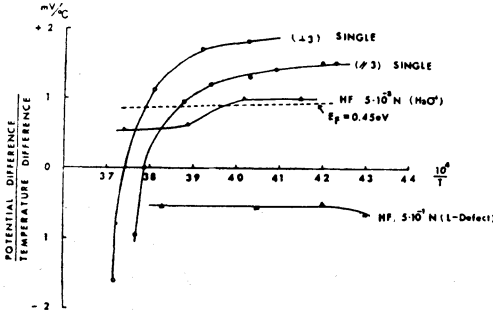
5.は霰と雲の衝突による電荷発生の方で古くから考えられていたが Reynolds 等 (1957), 孫野・著者 (1963) は過冷却水滴と雪の共存のもとに霰を作りその電荷量を測定した。着水物体と雪との衝突では電荷量は雪1回衝突当り 10^{-4} e. s. u. で1 km³ 当り20クーロンという条件及び時間の問題もパスする。更に後者は霰の帯電の符号は低温では負に高温では正になることを示し、この事実は



第4図 低温室内での実験。過冷却水滴、氷晶の存在のもとで霰を形成し、霰の帯電電荷の符号を霰形成の温度、過冷却水滴の量で図示した。黒点は霰が負に帯電した場合を、白丸は霰が正に帯電した場合を示す。高温側では霰は正に帯電し低温側では霰は負に帯電する。

(Mogono & Takahashi 1963)

Reynolds の観測・織笠の観測ともよく合う(図4). 更に研究は霰と雪の衝突のときどんな機構で電荷分離が起るかと進んでいく. Brook (1958) は霰と雪との温度差, 濃度差のある状態での接触の重要性を指摘し, 著者は霰と雪との温度差のある状態での破壊についてのべ特にこの



第5図 単結晶氷の熱電位の測定

HF. $5 \times 10^{-9} N$ を氷にドーブルし氷に H_3O^+ イオンを作り温度差を与えると氷の高温側は負, 低温側(図示)は正に帯電する. 高温側で動きうる H_3O^+ イオンが多く生成され低温側に動くためである. 又 HF. $5 \times 10^{-11} N$ をドーブルした氷では L-欠陥ができ, これは H^+ の穴で負の電荷を持ちこれが高温側から低温部に動くため低温側が負の電位を示す. 単結晶氷では $-10^\circ C$ 以上では低温部が負電位を示し即ち L-欠陥が優勢で $-10^\circ C$ 以下では低温部が正電位を示し H_3O^+ イオンが支配的である. (Takahashi 1966)

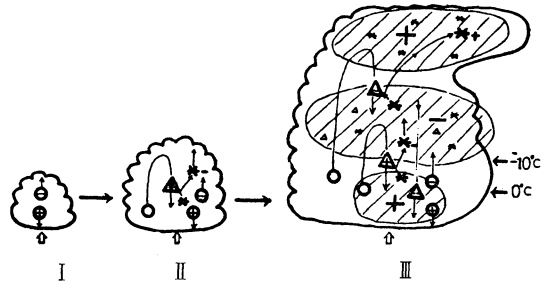
際霰の構造に敏感であることをのべた. しかし, まだこのような温度差・濃度差のもとで何が動いているかという事はわかっていなかった. Lathan & Mason (1961) は多結晶氷で氷の熱電効果を測定し H_3O^+ が高温から低温に動いた結果温かい霰が負に帯電することを示した. 著者は単結晶氷を用いて同一の実験を繰り返して $-10^\circ C$ 以上では高温側の霰はむしろ正になることを示し, この結果は着氷実験での高温側で霰が正になる事実を説明できる. (図5) Bryant & Fletcher (1965), Brownscombe & Mason (1967) は氷に不純物 HF, NH_4OH を入れ欠陥を作って氷の電氣的性質の研究を行っている. しかしここで困ったことは霰と雪との温度差が $10^\circ C$ あるとしても霰と雪の接触で発生する電荷量は基礎的実験による計算では高々 10^{-7} e. s. u. であり, 最少限必要な 10^{-5} e. s. u. に及ばない. これは多分霰は多結晶氷で気泡が非常に多く含まれていて欠陥, 不純物が多くそれらの役割が一義的にきいているのであろう. 単純な単結晶から初め, わかっている欠陥を少しずつ挿入し氷の電氣的特性を一

つ一つ研究していくべきであろう. 最後のイオンモデルについては Vonnegut (1955) はエレクトロード効果で地表に豊富に存在する正のイオン ($+0.1 e. s. u./m^3$) が対流で上空に運ばれ, 一方負の電荷がイオン層から降り双極子型の電荷分布を作ると主張し, Blanchard (1963) は海のシブキで発生する微水滴の正電荷の重要性をのべているが雷雲の上部の正電位は彼等の考えでは説明困難ではあるが弱い帯電機構には重要であろう.

電荷分布機構については今一步という所であるが, 実はこの一步が大変で氷の物性的研究という大きい仕事が間に入っている. このような事情は雷のみならず氷晶核・氷晶の成長・氷晶の光吸収等の問題にも共通することで, 物性雲物理部門の発展が期待される.

III 雷雲中の電荷発達の一モデル

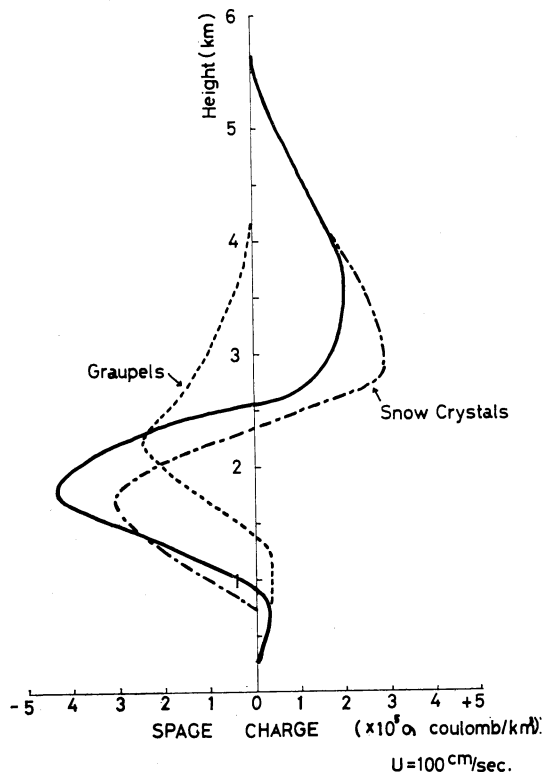
雷雲の今までの観測・ハワイ洋上の雲等の観測・実験室内での電荷発生の実験を通して積雲から雷雲への電氣的な発達の過程を推論してみたい(図6).



第6図 雷雲への電氣的発達過程

Stage I では雲頂はまだ $0^\circ C$ 層に達せず, ハワイ洋上の温かい雲型であり電荷発生機構はいまだ不明であるが Blanchard の実験を加味したイオンの対流説が可能性がある. 電荷ゾンデによれば積雲の下層の雨滴は正に, 上層の雨滴は負に帯電している. この積雲が発達し雲頂が $-10^\circ C$ 近くになると (Stage II) 雲底からの大雲粒により小さい霰が形成され Stage I 型の帯電機構の他に雪との衝突で霰は正に帯電し雪は負に帯電する. 上昇気流のため負電荷の雪は上層に, 正電荷の霰は落下し電荷が分離される. Stage I, II での雨滴一つ当りの電荷は凡そ $10^{-3} \sim 10^{-2}$ e. s. u. である. 更に積雲が発達し Stage III になると雲頂近くに新しく正電荷が形成される. $-10^\circ C$ から $-40^\circ C$ の領域内で, 霰と雪の衝突では霰は負に帯電し雪は正に帯電する. $-40^\circ C$ 近くまで上昇した霰は負の電荷が $0.1 e. s. u.$ に達し, $-10^\circ C$ 以下の霰を正にする領域を通過してもその電荷量は減少するが符号を変え

ない。この Stage で雲底の大雲粒から出発し -10°C 近くですでに上昇気流の大きさと釣り合うようなときは霰は正になる。 -40°C から -10°C の温度領域で霰を負に帯電させた正電荷の雪はカナトコ雲に広がる。 -10°C 層近くでは上からの霰の負電荷、 -10°C 層以下で霰を正に帯電させた雪の負電荷、小雨滴の負電荷といずれも負の電荷が集まりこの領域の負の電荷密度を高める(図7)。 0°C 層近くでは 0°C から -10°C の領域で正に帯電した霰、 -40°C 近くまで達し大きな負に帯電した霰が混在し相打ち消し合うが全体としては正の電荷密度をもつ。 -10°C 近くの大きな負電荷、 0°C 近くの正電荷の間にまず放電が起き、このとき作られたイオンの助けで -10°C 層の負電荷が地球へ流れる。



第7図 雷雲中の電荷分布に関するモデル計算

-10°C 層を境にして霰と雪との衝突時に発生する電荷の符号が逆になるものとして霰形成時の電荷分布を計算した。下層の正電荷領域の存在は上昇気流の大きさ、雲底の大雲粒の大きさに著しく依存している。実線が全体の分布を示す。

IV 将来の課題

雷雲の電荷分布・発生機構は雲物理学の知識の総動員

が必要であり積雲形成発達力学的計算、積雲内での降水要素の分布等、観測をくり入れながら、どの層で何が電荷を生成しているかを雪ゾンデ・電位ゾンデ・電荷ゾンデ・空電測定装置を用いて観測を行なう必要がある。レーダー、特にドップラーレーダーとの同時観測により雷雲の構造を有機的に知る必要があり、この場合多くの研究者による共同観測が必要となってくる。一方電荷発生基礎的実験では、廻り道でも氷・過冷却水・水の物性基礎的実験を始める必要があり現実からの遊離論を振りかざすことなくもっと理解と寛容を持つべきであろう。将来は雷の予防、及び制御 地球電荷保持の問題、空中電位のグリニッチ時による変化、赤道と極地上の電位の絶対値の差、等の解明が行われるであろう。又、一方電位・伝導度のゾンデ観測は、気団の識別、大気中の小擾乱・大気大循環等に応用される日も近いであろう。又豪雨・豪雪・台風の雲物理的な研究にも気象電気は大きな役割を果たすであろう。

謝辞

この度日本気象学会賞をいただきありがとうございます。私は良き師に恵まれ、北大では孫野長治先生、名古屋では磯野謙治・駒林誠両先生の御指導を受けました。磯野、駒林両先生は氷の基礎的な研究の必要を強調され雲物理学の新しい方向を作るべく励ましていただきました。深くお礼申し上げます。

ラジオゾンデ飛揚にあたっては乳井課長始め館野高層気象台の方々にお世話になりました。

参考文献

- 1) Bernard Vonnegut., 1955: possible mechanism for formation of thunderstorm electricity, Proc. Conf. Atm. Elec., 169-181.
- 2) Boys, C. V., 1926: Progressive lightning, Nature, **118**, 749-
- 3) Brook, M., 1958: Laboratory studies of charge separation during ice-ice contact, Recent Advances in Atmospheric Electricity, 383-389.
- 4) Browning, K. A. and B. J. Mason, 1963: Production of ice crystals and electric charge by splintering of freezing droplets in thunderclouds, Q. J., **89**, 139-144.
- 5) Brownscombe J. L. and B. J. Mason: 1966, Measurement of the thermoelectric power of ice by an induction method, phil. Mag., **14**, 1037-1047.
- 6) Bryant, G. W. and N. H. Fletcher, 1965: Thermoelectric power of ice containing HF or NH_3 , phil Mag., **12**, 165-176.
- 7) Choji Magono and Katsuhiko KiKuchi, 1963:

- On the positive electrification of snow crystal in the process of their melting, *J. Meteor. Soc. Japan*, Ser. II, **41**, 270-277.
- 8) Choji Magono and Yoshiharu Shiotsuki, 1966: On the effect of air bubbles in ice on frictional charge separation, *J. Atm. Science*, **21**, 666-670.
 - 9) Dinger, J. E., 1965: Electrification associated with the melting, of snow and ice, *J. Atm. S.*, **22**, 162-166.
 - 10) Dinger, J. E. and R. Gunn, 1946: Electrical effects associated with a change of water, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, **51**, 477-
 - 11) Duncan C. Blanchard., 1963: The electrification of the atmosphere by bubbles in the sea, *Progress in Oceanography*, vol. **1**, 71-202.
 - 12) Elster, J. and H. Geitel, 1913: Zur Einflussztheorie die Niederschlagselektrizität, *Phys. Z.*, **14**, 1287-
 - 13) Evans, D. G. and W. C. Hutchinson, 1963: The electrification of freezing water droplets and of colliding ice particles, *Q. J.*, **89**, 370-375.
 - 14) Findeisen, W., 1940: Über die Entstehung der Gewitterelektrizität, *Met. Z.*, **57**, 201-
 - 15) Frenkel, J., 1944: A theory of the fundamental phenomena of atmospheric electricity, *J. Phys. U. S. S. R.*, **8**, 285-
 - 16) Gunn, R., 1949: The free electric charge on thunderstorm rain and its relation to droplet size, *J. Geophys. Res.*, **54**, 57-63.
 - 17) Gunn, R., 1946: Electrical effects associated with changes of state of water, *Terr. Mag. Atm. Elec.*, **51**, 477-
 - 18) Hutchinson, W. C. A., 1965: The electrification of freezing water drops, *Q. J.*, **91**, 80-86.
 - 19) Isono, K., M. Komabayashi and T. Takahashi, 1966: A physical study of solid precipitation from convective clouds over the sea, Part III, *J. Meteor. Soc. Japan*, Ser. II, **44**, 227-333.
 - 20) 気象庁予報部, 1967: 予報作業指針 その10, p. 110.
 - 21) Kramer, C., 1948: Electriche ladingen ann berijpte oppervlakken, *Neth. Met. Inet. Med. en Verk. A.*, **54**.
 - 22) Kuettner, J., 1950: The electrical and meteorological condition inside thunderclouds, *J. Met.*, **7**, 822-
 - 23) Latham, J. and B. J. Mason, 1961: Electric charge transfer associated with temperature gradients in ice, *Proc. Roy. Soc., A*, **260**, 523-536.
 - 24) Latham, J. and B. J. Masón, 1961: Generation of electric associated with the formation of soft hail in thunderclouds, *Proc. Roy. Soc., A*, **260**, 537-549.
 - 25) Lenard, P., 1892: Über die Elektrizität der Wasserfälb. *Ann. Phys.*, **46**, 584-
 - 26) Lueder, H., 1951: Vergraupelungs-Elexrisierung als eine Ursache der Gewitterelektrizität, *Z. angew. Phys.*, **3**, 288-
 - 27) Mac Cready, P. B. Jr. and A. Proudfit, 1965: Observation of hydrometeor charge evolution in thunderstorms, *Q. J.*, **91**, 44-53.
 - 28) Magono, C. and T. Takahashi, 1963: Experimental studies on the mechanism of electrification of graupel pellets, *J. Meteor. Soc. Japan*, Ser. II, **41**, 197-210.
 - 29) Mason, B. J., 1953: A critical examination of theories of charge generation in thunderstorm, *Tellus* **5**, 446-460.
 - 30) Mason, B. J. and J. Maybank, 1960: The fragmentation and electrification of freezing water drops, *Q. J.*, **86**, 176-186.
 - 31) Mathews, J. B. and B. J. Mason, 1964: Electrification produced by the rupture of large water drops in an electric field, *Quart. J.*, **90**, 275-286.
 - 32) Mathews, J. B. and B. J. Mason, 1963: Electrification accompanying melting of ice and snows, *Q. J.*, **89**, 376-380.
 - 33) Meinhold, H., 1951: Die elektrische ladung eines Elugzeuges bei Vereisung in Quellusken, *Geotis. pura e App.*, **19**, 176-
 - 34) Reynolds, S. E., M. Brook and Mary Foulks Gourley, 1957: Thunderstorm charge separation, *J. Met.*, **14**, 426-436.
 - 35) Reynolds, S. E., 1955: Thunderstorm charge structure and suggested electrification mechanism, *Proc. Cont. Atm. Elec.*, 162-168.
 - 36) Schonland, B. F. J., 1938: The lightning discharge, Clarendon press, 1-19.
 - 37) Orikasa, K.: to be published
 - 38) Simpson, G. C., 1927: The mechanism of thunderstorms, *Proc. Roy. Soc., A*, **114**, 376-
 - 39) Simpson, G. C. and F. J. Scrase, 1937: The distribution of electricity in thunderclouds, *Proc. Roy. Soc., A*, **161**, 309-352.
 - 40) Simpson, G. C., 1909: On the electricity of rain and its origin in thunderstorms, *Phil. Trans., A*, **209**, 379-
 - 41) Takahashi, T. and K. Isono, 1967: to be published in *Tellus*.
 - 42) Tsutomu Takahashi, 1966: Thermoelectric effect in ice, *J. Atm. Science*, **23**, 74-77.
 - 43) Tsutomu Takahashi, 1962: Electric charge

- generation by breaking of ice piece, J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, **40**, 277-286.
- 44) Tsutomu Takahashi, 1965: Measurement of electric charge in thundercloud by means of radiosonde, J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, **43**, 206-217.
- 45) Walter, B., 1902: Ein photographischer Apparat zur geneueren Analyse des Blitzes, Phys. Zs., **3**, 168-
- 46) Weickman, H. K. and H. J. Aufm Kampe, 1950: Preliminary experimental results concerning charge generation in thunderstorms concurrent with the formation of hailstones, J. Met., **7**, 404-
- 47) Whipple, F. J. W. and J. A. Chalmers, 1944: On Wilson's theory of the collection of charge by falling drops, Q, J., **70**, 103-120.
- 48) Wilson, C. T. R., 1921: Investigation on lightning discharges and the electric field of thunderstorms, Phil. Trans. Roy. Soc., A, **221**, 73-
- 49) Workman, E. J. and S. E. Reynolds, 1950: Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relation-ship to thunderstorm electricity, Phys. Rev., **78**, 254-259.

日本学術会議地球物理連絡委員会大気科学小委員会
 福岡管区気象台
 日本気象学会九州支部

共催 シンポジウム

梅雨末期集中豪雨の研究

(南方海域特別観測)

会 期：昭和42年11月22日 (水)

場 所：福岡管区気象台会議室

座 長：小倉義光 (東大海洋研)

講演者：

小倉 義光(東大海洋研)：地球大気開発計画について

高橋 淳雄(鹿児島大)：大気海洋相互作用

岸保勘三郎(気象庁電計)：大規模運動における対流活動の取扱

松本 誠一(気研予報)：降水と対流活動

鍋島 泰夫(福岡管区)：九州の大雨について

牛島 敏光(福岡管区)：レーダーおよびメソ解析について