

雷雲電荷発生機構—霰の電荷符号逆転の謎

2003年度藤原賞受賞記念講演

高橋 劭*

1. はじめに

この度は、名誉ある“藤原賞”をいただきまして有難うございます。私は多くの人達に支えられながら、学生時代から同じテーマで研究を続けることができました。雷電気の最大の謎は、電気3極構造 (Simpson and Scrase, 1937) の下層の負と正が降水域にありながら、その位置が変わらないことです (第1図)。雷活動は熱帯で最も活発ですが、大陸と海洋では大きく異なることも不思議な現象です (第2図)。

2. 霰符号逆転の謎

私は北海道大学(北大)・地球物理学科の第1期生です。ある日学部の授業の後で、孫野長治先生が Schonland (1937) の放電の小冊子を私に手渡ししながら「今は雷が面白い。特に電荷発生は100人100説で皆目分かっていないからね」と言われました。当時脚光を浴びていた機構に、Workman (Workman and Reynolds, 1950) の雹の凍結電位説と Brook の着氷電荷分離機構 (Reynolds *et al.*, 1957) がありました。特に後者では着氷棒が氷晶との衝突で大きく負に帯電します。孫野先生はこのことを実際に自然の雲の中で試してみようと、手稲山山頂に2坪の小屋を建てました。しかし日曜日などにはドアをノックした若い女性に「なんだここはトイレじゃないんだ」とよく言われたものです。

春休みを利用しての観測でしたが、山頂の気温は -5°C 程度で、小さな部屋の片隅では、一緒に来た同期の菊地勝弘さんが雲粒の電気を測定していました。私は氷の棒の中心に太い銅線を入れ、外の空気を引き

込み雲粒と雪を着氷棒に衝突させ、その帯電を象限電位計で測定したのですが、結果は常に正にふれました (Magono and Takahashi, 1963a)。そのことを孫野先生に電話で報告しますと大変ご不満のご様子で、次の日曜日スキーで山頂に登って来られました。ザックから大きな角型の電池を取り出し「これがプラスの端子だ。さて、どっちにふれたかな」と言ってご覧になるとやはり正でしたので、先生は無言でさっさと帰ってしまわれました。この実験が私の修士論文になりました。

博士課程ではなぜ Brook の結果と違ったかがテーマでした。北大では雪の成長形と成長条件を示す中谷ダイアグラム (Nakaya, 1951) は有名で、私も同じことをやってみることにしました。気温と雲水量を変えると結果は気温が高い時着氷棒は正、低いときは負になり、雲水量が多いと正になりやすくなりました。結果を孫野先生へお持ちしたところ「でたか」の一言だけでした (Magono and Takahashi, 1963b)。これが私の博士論文です。最近諸先生は学生を褒め過ぎる傾向があるのではないかと思います。

助手として名古屋への赴任が新婚旅行でもありました。名古屋大学(名大)では磯野謙治先生と駒林 誠先生にご指導をいただきましたが、その1つには毎日午後5時頃からの会合で繰り返される議論からいろいろ学んだことです。1963年の所謂「38北陸豪雪」についても黒板に駒林先生が目的、測定要素、期待される測定結果、結論を書かれた後、それぞれの項目について検討しました。北大とのあまりの違いに驚いてしまったものです。

雷では、もし着氷電荷発生機構が重要であれば氷晶と霰が主電荷であり、それらの電荷だけで3極電荷構造を形成するに違いないと考えました。当時 Vonnegut (1955) のイオン説が有望となり、イオンだけで雷電気が作られると大勢の人が考えていました。雷雲

* 桜美林大学コア教育センター。

t2@obirin.ac.jp

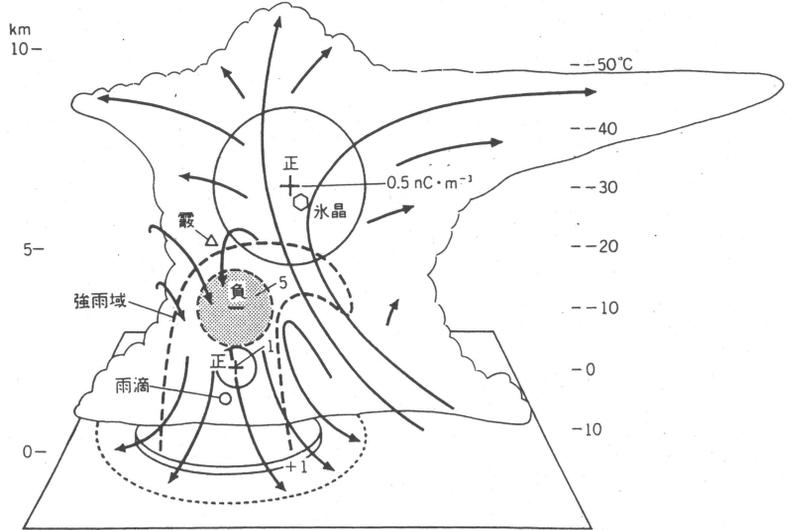
—2003年7月1日受領—

—2003年11月7日受理—

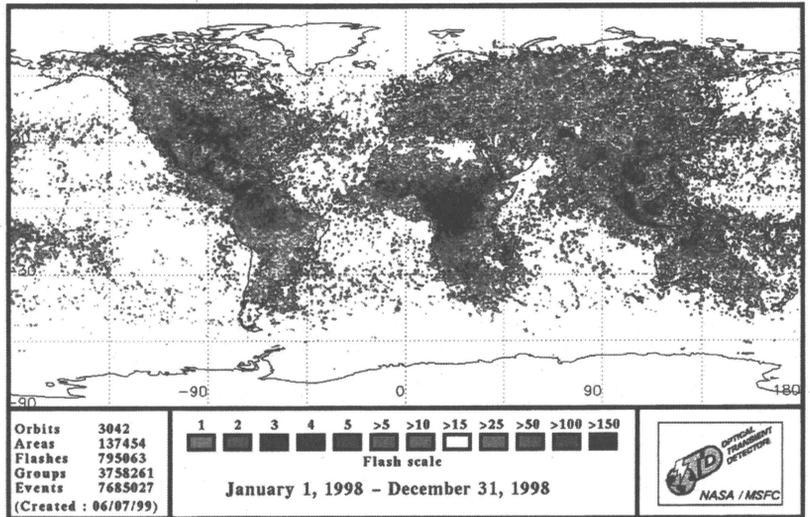
内で水晶や霰の電気を測定しなければなりません。電磁気学の最初で学んだ2重球の原理を使ってみることにしました。内球の電気は必ず外球に向かい、一方外球の電荷はそこに居続けるわけです。内球と外球の間に高抵抗を挟むことにしました。内球が誘導環に相当します。運良く雷雲に1台入り、途中スケールアウトもありましたが3極構造が見られました (Takahashi, 1965)。その年の国際雲物理学会札幌シンポジウムで発表したとき、外国人に“Crazy”と言われながらも拍手されたのには驚きました。これが気象学会賞になりました。

しかし着氷電荷分離機構が重要である事を示すには更なる定量化が必要であり、また実験も物理系なりにレベルアップしなければなりません。前者に関しては小倉義光先生から雲モデルを学び (Ogura and Takahashi, 1971), 後者では東京教育大学光学研究所の尾中龍猛先生のご指導をいただき氷の紫外吸収研究を行いました (Onaka and Takahashi, 1968)。小倉先生は米国イリノイ大学に行かれて間もなく私を呼んで研究をさせて下さいました。

帰国途中ハワイ大学気象学科の学科長を訪ねたとき私たちの雲モデルの結果について話すように言われました。その時学部長も話を聞いておられましたが、話し終わると学科長が1枚の紙を手渡しそれにサインをするように言われました。私は何も考えず言われるままにしたのですが、それは雇用契約だったのです。帰



第1図 雷雲内空間電荷分布.



第2図 人工衛星で観測された年間の放電回数分布(1998年)。濃影が施された東南アジアからオーストラリアにかけてや、アフリカのコンゴ盆地、アマゾンから中米にかけてなど、雷活動は熱帯の大陸地域で特に多い。反対に、熱帯海上では雲活動が大陸同様活発であるが雷活動が極端に弱い。宇宙航空研究開発機構提供。

国してからが大変で結局は職を辞することになりましたが、なかなか Visa を出してもらえず名大の助教から半年間北大の研究生になりました。

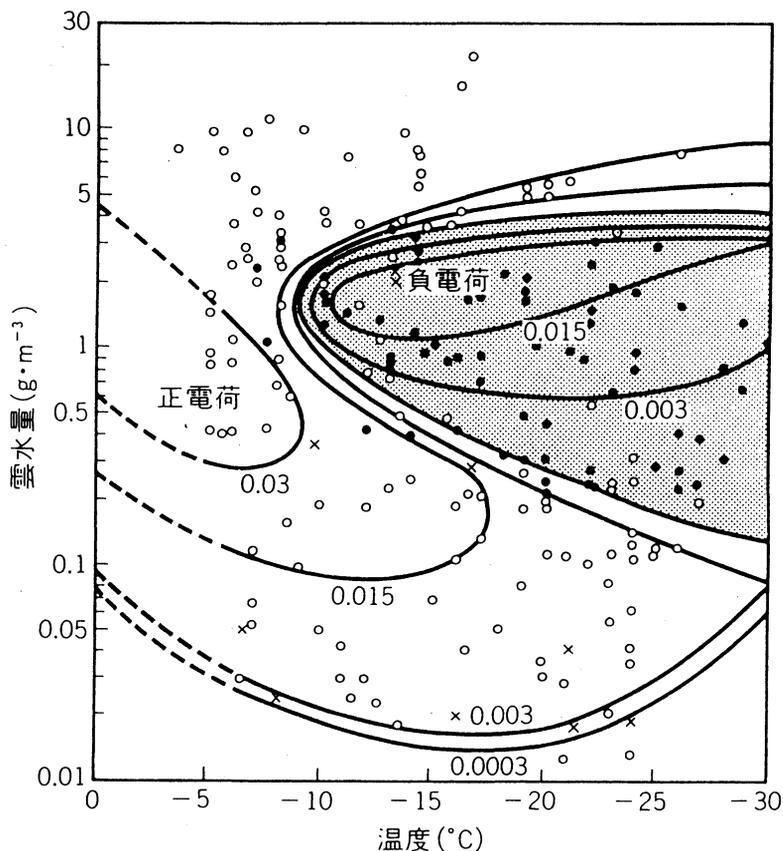
3. コンピューターで雷をつくる

赴任してまもなくホノルルの気象学科でセミナーをさせられました。終って席に着いたところ近づいて来

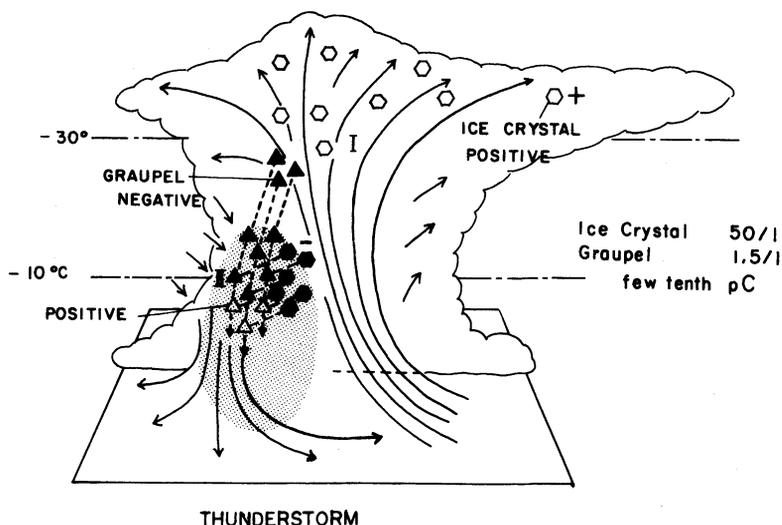
た年配の人に「グラント(研究助成金)が欲しくないか?」と聞かれました。キョトンとしている私に、周りの教授達がYESと言えとしきりにウインクしますのでその通りにしました。米海軍研究部 (Office of Naval Research) の Jim Hughes 氏だったわけですが、毎年決まって2万ドル送っていただきました。3年程たって少し心配になり報告書を書きましようかと手紙を出したところ、返事にその暇があったら研究をするようにと走り書きがありその後6年間研究費のサポートが続きしました。

この雲物理観測所は、スタッフ研究者が3人で少ないのですが、りっぱな工作室もあり自分で考えたものをいつでも作れました。低温室には大きな円柱を据え付け雲粒と氷晶の雲の中で着氷棒を回転させました。1年がかりの研究の結果、強い電荷発生は着氷棒が氷晶との衝突時発生し、大学院の時の結果をサポートするかたちで、符号は雲水量と温度に大きく依存する事が知られました(第3図)。即ち気温が -10°C 以上では着氷棒は常に正に、 -10°C 以下では雲水量が非常に多いか、少ないかを除いて負になり、天然の雲の雲水量は $0.3\text{--}3\text{ g/m}^3$ 程度なので -10°C で符号逆転が起ることになります(Takahashi, 1978a)。

この実験結果を数値雲モ



第3図 着氷実験による雷電荷の符号と大きさ。白丸：正，黒丸：負，氷晶1個衝突当りの電荷量を pC で示す，x は無帯電。



第4図 着氷電荷発生機構による電荷3構造形成メカニズム。6角形が氷晶，3角形が霰，白抜きは正電荷，塗りつぶしは負電荷。

デルに導入し走らせると面白い結果が出てきました (Takahashi, 1984). 実はこの符号逆転が重要で、 -10°C 層以下で霰は正に氷晶は負に帯電しますが、負の氷晶は上昇気流で上方へ運ばれます。一方、 -10°C 層より上方では霰は負に氷晶は正に帯電します。軽い正の氷晶はカナトコへ、重い負の霰は上昇気流に打ち勝って下降、 -10°C 層付近で下から上昇してくる負の氷晶と合流します(第4図)。符号逆転があつてはじめて3極構造が形成されるだけでなく、負の空間電荷は -10°C 層に居続け、雨が降れば降るほど負空間電荷は増加します。得々としてイギリスでの国際大気電気学会で発表したのですが、前列に陣取っていた英国マンチェスター大学グループの質問責めにあい、この研究結果を認めようとしないうる暗気を強く感じました。

しかし、その後の学会の発表で米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の若者が1人、「高橋の結果は面白い」と言ってくれたのです。アメリカの良いところは、研究者が多く必ず誰かが別の視点を持っていることです。すぐ後でマンチェスターグループも同じ実験を行いました。低雲水量域では私と正反対の結果(Jayarathne *et al.*, 1983)となり、以後20年に亘りMITのWilliamsとマンチェスターグループのSaundersとの間で論争が続くことになります。しかし最近アルゼンチン(Pereyra *et al.*, 2000)とカナダ(Berdeklis and List, 2001)、宮脇久仁子さんの風洞実験(Takahashi and Miyawaki, 2002)があり、いずれも高橋を支持し、一応論争も下火になりました。

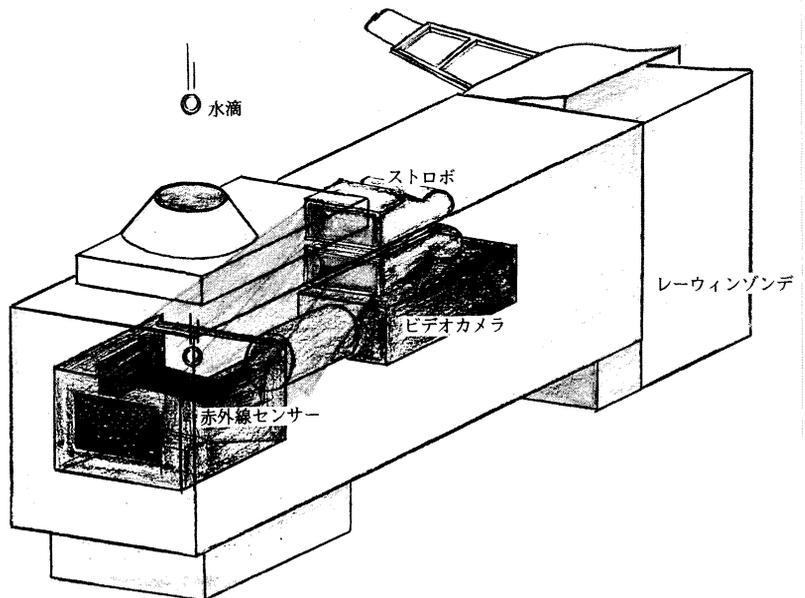
モデルの結果を確かめるため新電荷ゾンデを作りました。雷雲内で降水粒子の電荷と形状の識別を同時に行おうとするものです。電荷は誘導環で測定し、降水粒子の識別には、大きな粒子にはマイクロホンを用い、雨滴はフィルターに落ちた痕跡を伝導度変化で求め、霰は光電管をセットした筒内を落下させて区別するものです。雲が高く発達するマイクロネシアのポナベ島(第6図参照)でも観測

をしました(Takahashi, 1978b)。しかしそこでは雪が少なく、北陸の冬季雲なら理想的なのだと思います。

ハワイでは水相だけで降る暖かい雨の研究もしていました(Takahashi, 1981)。Bowen (1950)の計算によると雨滴形成は水滴の雲内落下中下層で形成されます。ところが数値雲モデルによると上昇気流が雲の発達につれ上方に移動しますが、そのとき雨滴は雲頂近くですでに形成されているのです(Ogura and Takahashi, 1973)。私はこの違いを確かめることにしました。セスナ機の翼の支持棒に手作りの測器を次々に並べ雨の観測をしたところ、雲頂近くで雨滴がわんさから見られました。高橋の観測をチェックしようというプロジェクトがあり、米国ワイオミング大学のKing Air機がハワイに飛んできました。測器だけではなく情報処理にも勝れ、6秒毎に上昇気流、温位、雲水量などが打ち出され、粒子の映像も連続的に記録されます。観測に関しては勝負有りの感じでしたが、ただ1つ弱点は着水の心配からレーダーエコー強度50 dBZ以上の領域には飛行しないことでした。しかしそこでこそメインの降水プロセスが行われているのです。

4. 北陸雪雲へのビデオゾンデ飛揚

そのころ松野太郎先生に米国大気科学研究センター(NCAR)でお会いしました。そのことがきっかけとなり九州大学に勤務することになりました。日本に帰っ



第5図 Videosonde.

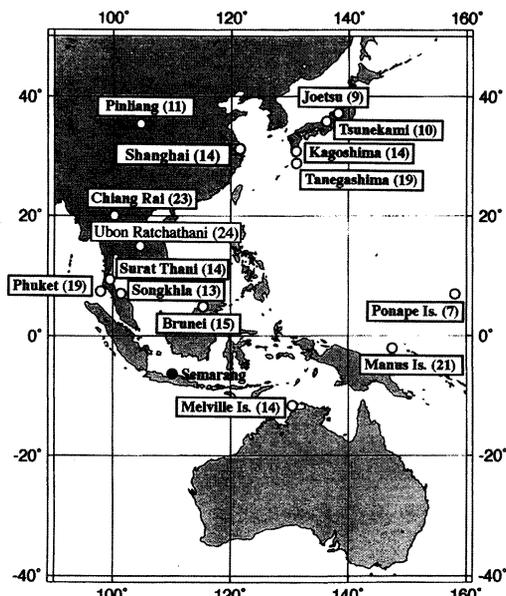
て一番驚いたことは科学研究費などの予算申請が真に簡単で、記入する枚数がせいぜい2枚位です。アメリカの場合は厚さ1cm位にもなり、それが5人程の審査員である研究者に送られ評価とコメントを受けます。そして見込みがあると判断された予算申請書に限り審査員に対し反論が許されます。かくして研究助成金額が決まるのですが、それまでに疲れはててしまうのです。

日本に帰ってもう1つ驚いたことは、気象研究所が雲粒子ゾンデに高価なビデオカメラを使用し惜しげも無く使い捨てていることです。しかも周りの研究者はいとも当然のように何も言わないのです。これだと思い、電荷ゾンデの降水粒子の形状識別にビデオカメラを組み込むことにしました(第5図)。赤外線束を粒子が遮るとフラッシュがたかれ、その映像をビデオカメラで撮影するものです(Takahashi, 1990)。まずは北陸で観測をしました。霰の符号は -10°C 以下で逆転するだけでなく霰と氷晶の電荷だけで3極構造を示しました(Takahashi *et al.*,

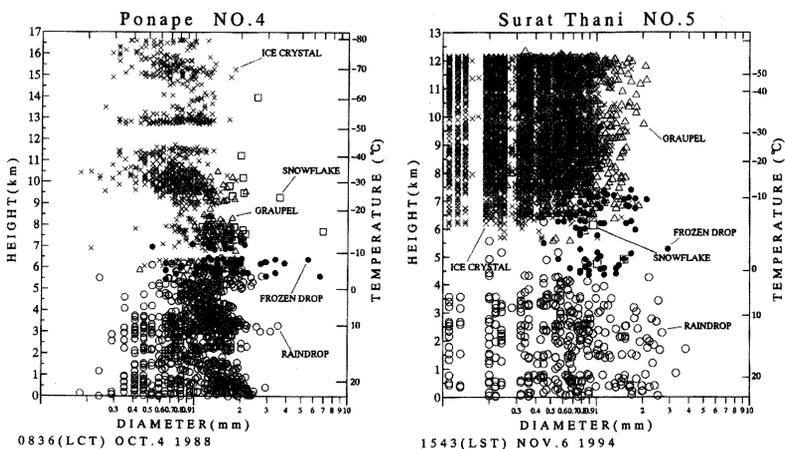
1999)。雷数値モデルでは、放電が起る空間電荷形成には霰は1.5/l、氷晶は50/l以上が必要であることを示しています(Takahashi, 1984)。

5. 雷の多い大陸・少ない海洋(第2図参照)

世界の雷分布を眺めると雷放電は赤道域に多く、しかも大陸に集中しています。アジアモンスーン域でも多島域と西太平洋では雷放電は100倍も違います(Christan *et al.*, 2003)。年間降水量は海洋上でむしろ多いにもかかわらずです(Shea, 1986)。おそらく霰・氷晶の数に差があると考えました。後はなるべく多くの地点でビデオゾンデを飛揚することでした。幸い優秀な学生が集まってきましたし、TOGA-COARE¹¹、HEIFE¹²、MCTEX¹³、TRMM¹⁴など多くのプロジェクトにも参加させていただきました。そして大変幸運なことにタイ気象庁からは全面的な協力もいただきました。



第6図 Videosonde 飛揚地点と飛揚台数。



第7図 ポナペ島とスラタニ(タイ)での代表的な降水粒子高度分布。各パネルの横軸が粒子直径(mm)、縦軸左が高度(km)、縦軸右が気温($^{\circ}\text{C}$)、白抜き丸(雨滴)、黒丸(凍結氷)、三角(霰)、クロス(氷晶)、四角(雪片)

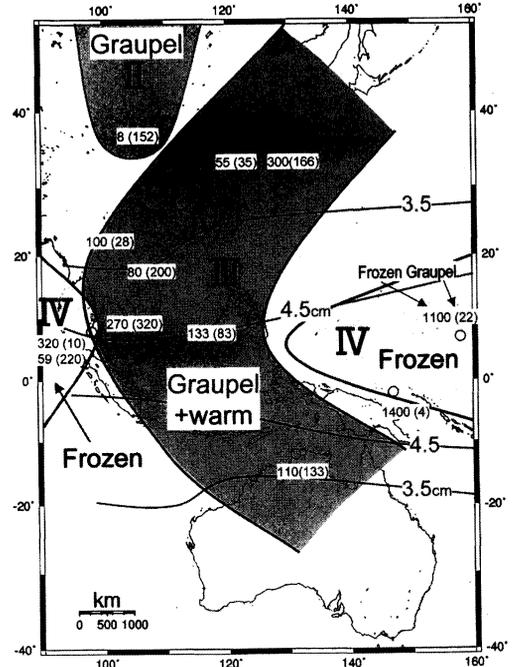
九州大学の定年までに研究が終りそうにもなく、定年少し前に桜美林大学に移りました。この15年間に東南アジア域15箇所で208台のビデオゾンデの飛揚を行

¹¹ Tropical Ocean-Global Atmosphere-The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment.
¹² Heihe River Field Experiment.
¹³ Maritime Continent Thunderstorm Experiment.
¹⁴ Tropical Rainfall Measuring Mission.

うことが出来ました(第6図)。降水粒子空間分布は各地で大きく異なり特に海洋上と多島域で氷晶活動に大きな差があります(第7図)。凍結氷は“暖かい雨”型活動の目安となり、一方霰は“冷たい雨”活動を反映していると考えられます。雨含水量のピーク値は凍結氷・霰の含水量のピーク値と関連があり、凍結氷・霰含水量の4領域で雨含水量に極大値が見られそれぞれ異なる降水機構に対応しているようです。それらは凍結氷も霰も少ない暖かい雨型；凍結氷が多く霰の少ない凍結氷型；凍結氷が少なく霰の多い冷たい雨型；そして凍結氷・冷たい雨のMIX型です。各観測地での平均値を求めてそこでの降水機構を地図上に投影してみると、モンスーン雨は降水機構によって4つの領域に“すみわけ”があるようです(第8図)。西太平洋の凍結氷型(IV)、多島域のMIX型(III)、アングマン海側のMIX型も時には入り込む凍結型(IV)、中国内部の冷たい雨型(II)などです。雨水含水量 $1\text{g}/\text{m}^3$ での霰と氷晶の空間数密度ピーク値の積は雷放電分布と非常に良い相関があります。期待した通り雷放電の多い多島域では霰と氷晶が多く、雷放電の少ない西太平洋では霰と氷晶が少なくなっています(第9図)。雷雲内では霰と氷晶が分離していますのでそれぞれの霰・氷晶の数密度に対応する平方根が意味を持つと考えられます。西太平洋では雷放電が多島域に比べ100倍少ないのですが、雪の数も100倍少なくなっています(Takahashi, 2003)。そこでは雨は多島域のMIX型降水と異なり凍結氷型で降っています。

6. 気象学としての雷研究

雷放電は雲内降水機構に密接に関連します。オーストラリア北部のメルビル島(第6図参照)でのスコールラインでは前面での凍結氷成長、上方での霰形成が知られ前面下層の正帯電雨滴、少し上方での負帯・氷晶、カナトコ雲での正氷晶が特徴です(第10図, Takahashi and Keenan, 2003)。強力なトルネード発生時、放電数急増があり(Carey et al., 2003)、又放電数と台風レインバンド内上昇気流との関連も知られ(Black and Hallett, 1999)、雷研究がストーム研究にも大きく役立つようになってきました。最近の雷研究の進展は目覚しく(第11図)、積乱雲内での雷放電は雲底からまず始まって上方に向かいカナトコへ、次いで雲底から前方へ水平に進むことが分かってきました(Shao and Krehbiel, 1996)。雷雲ライフの後半で正極放電が増え(Rutledge et al. 1990)、厚い層状雲から



第8図 モンスーン雨の降水機構による“すみわけ”。各地点に凍結氷(霰)含水量ピーク値(mg/m^3)の平均を示す。又横線は大気水蒸気量(Barry and Chorley, 1995)。

の強い正極放電は手の指状に水平に伸び、Blue Jet¹⁵、Red Sprite¹⁶や Elve¹⁷が発生、Shumann¹⁸共鳴が励起されます(Rodger, 1999)。雷予報が残された大きな課題ですが、偏波レーダから霰・氷晶の情報が得られるので(Zrnich and Ryzhkov, 1999)近い将来試みられる事でしょう。

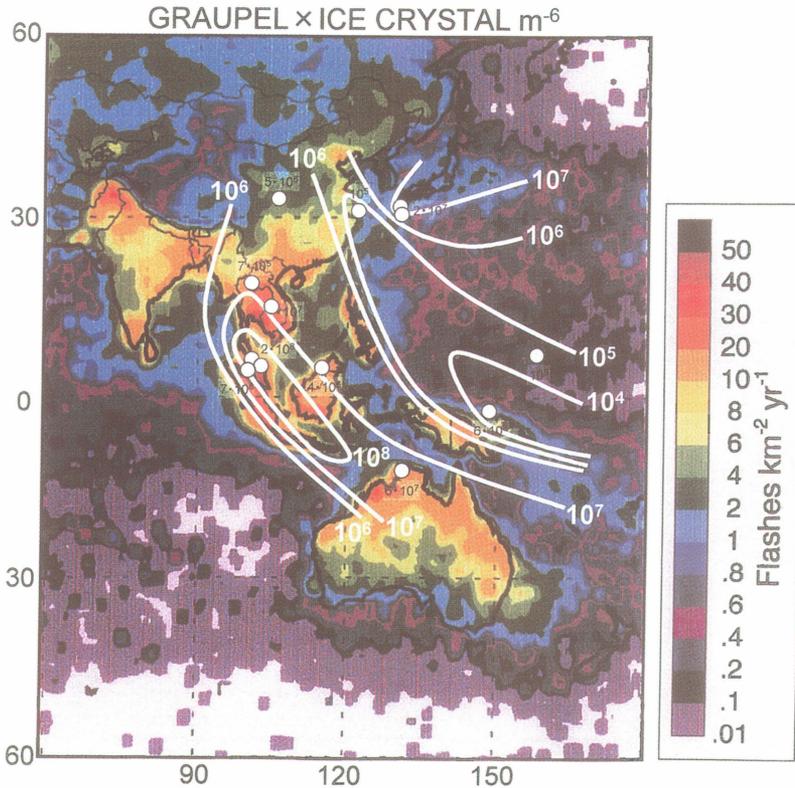
マスコミの人から時々何があなを研究に駆り立てるのですかと聞かれることがあり、正直いって返答に困ってしまいます。終戦まもなく母に連れられて能代に向かう汽車の中で母が急に腹痛で苦しみました時、側にいたリング行商のおばさんが見兼ねて自分の薬をくれ、事なきを得たことがあります。その時こういう人達の役に立つようなことをしたいと思ったものです。しかし人の役に立てるようなしっかりした研究をすることは至難の技です。今日藤原賞をいただきましたが、人の役に立つどころか多くの人達に助けられて

¹⁵ 高度20～50 km で青く光る現象

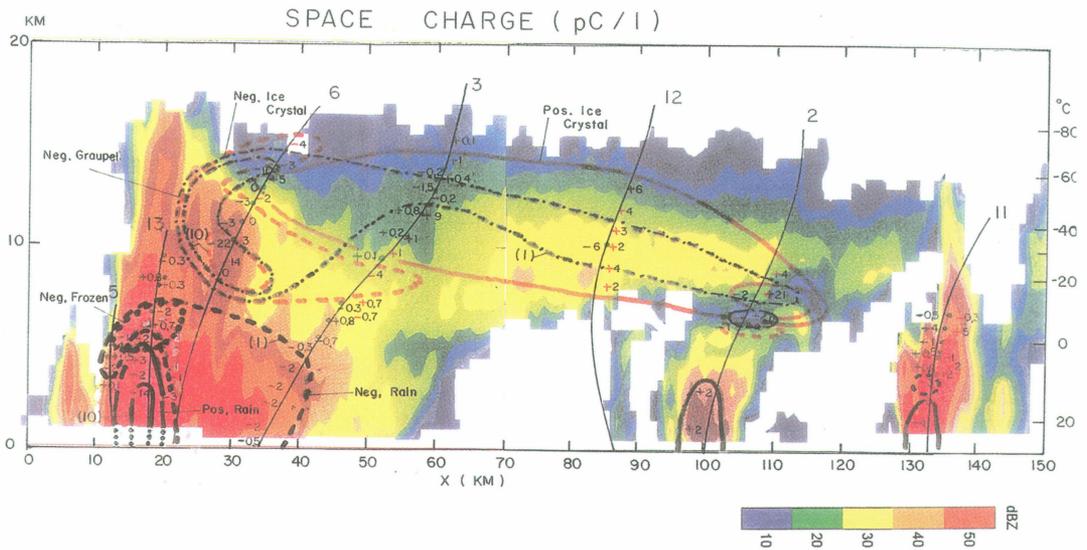
¹⁶ 高度40～90 km で赤く光る現象

¹⁷ 高度90～105 km で赤く光る現象

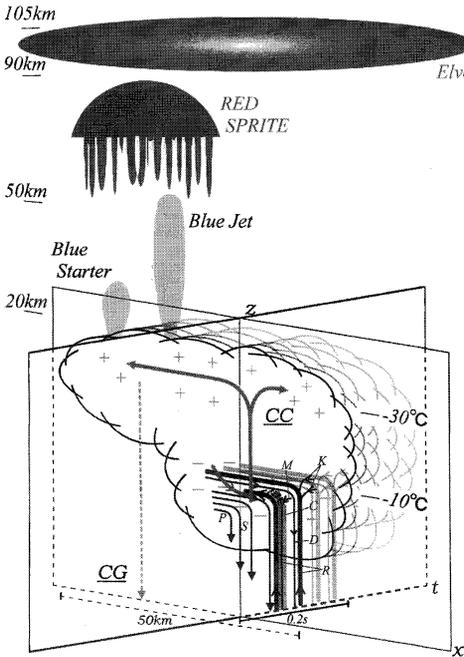
¹⁸ 電離層—大地間をまわる共振低周波



第9図 1平方キロメートル当りの年間雷放電数 (Christian *et al.* 2003) と videosonde による雨水量 1 g/m^3 での霰と氷晶ピーク空間数密度の積。



第10図 Melville 島 Hector 雲内空間電荷分布. 多数のビデオゾンデ飛揚による(上方に伸びた細い線はビデオゾンデの軌跡)合成図. 太い実線は正空間電荷 (pC/l), 斜線と鎖状は負. それぞれ雨, 凍結氷, 霰, 氷晶別に示す.



第11図 雲内、雲外雷時空放電図。

来ました。藤原賞を機に今までの研究をまとめ得られた成果を多くの人達に還元出来るよう努力したいと思っております。本日はまことに有難うございました。

7. 最後に

今年(2003年)6月9~13日、フランスのパリで国際大気電気学会が開催され、私も出席しました。興味があったのは、フランスでビデオゾンデ新型を試作、飛ばしようとしていたことと1984年の私の雷数値モデル(Takahashi, 1984)をアメリカの若い研究者がよく読んでいて放電路シミュレーションまで発展させていることでした。私の研究が継承されているのを知り嬉しく思いました。この国際学会でのコーヒーブレイク時の最大関心事は海洋上での雪が少ない謎についてで、雲物理の根本問題に立ち返ることになりました。

参考文献

Barry, R. G. and R. J. Chorley, 1995 : Atmosphere, weather and climate, Routledge, 392pp.
 Berdeklis, P. and R. List, 2001 : The ice crystal-graupel collision charging mechanism of thunderstorm electrification, J. Atmos. Sci., **58**, 2751-2770.

Black, R. A. and J. Hallett, 1999 : Electrification of the hurricane, J. Atmos. Sci., **56**, 2004-2028.
 Bowen, E. G., 1950 : The formation of rain by coalescence. Aust. J. Sci. Res., **A**, 193-213.
 Carey, L. D., W. A. Peterson and S. A. Rutledge, 2003 : Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998, Mon. Wea. Rev., **131**, 1811-1831.
 Christian, H. J., R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. L. Boeck, D. E. Buechler, K. T. Driscoll, S. J. Goodman, J. M. Hall, W. J. Koshak, D. M. Mach and M. F. Stewart, 2003 : Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector, J. Geophys. Res., **108**, DOI 10.1029/2002JD002347.
 Janaratne, E. R., C. P. R. Saunders and J. Hallett, 1983 : Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **109**, 609-630.
 Magono, C. and T. Takahashi, 1963a : On the electrical phenomena during riming and glazing in natural supercooled cloud droplets, J. Meteor. Soc. Japan, **41**, 71-78.
 Magono, C. and T. Takahashi, 1963b : Experimental studies on the mechanism of electrification of graupel pellets, J. Meteor. Soc. Japan, **41**, 197-210.
 Nakaya, U., 1951 : The formation of ice crystals, Compendium of Meteorology, Amer. Met. Soc., 207-220.
 Ogura, Y. and T. Takahashi, 1971 : Numerical simulation of the life cycle of a thunderstorm cell, Mon. Wea. Rev., **99**, 895-911.
 Ogura, Y. and T. Takahashi, 1973 : The development of warm rain in a cumulus model, J. Atmos. Sci., **30**, 262-277.
 Onaka, R. and T. Takahashi, 1968 : Vacuum UV absorption spectra of liquid water and ice, J. Phys. Soc. Japan, **24**, 548-550.
 Pereyra, R. G., E. E. Avila, N. E. Castellano and C. P. R. Saunders, 2000 : A laboratory study of graupel charging, J. Geophys. Res., **105**, 20803-20812.
 Reynolds, S. E., M. Brook and M. F. Gourley, 1957 : Thunderstorm charge separation, J. Meteor., **14**, 426-436.
 Rodgers, C. J., 1999 : Red Sprite, upward lightning, and VLF perturbations. Rev. of Geophys., **37**, 3, 317-336.
 Rutledge, S. A., C. Lu and D. R. MacGorman, 1990 :

- Positive cloud-to-ground lightning in mesoscale convective systems, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2085-2100.
- Shao, X. M. and P. R. Krehbiel, 1996 : The spatial and temporal development of intracloud lightning, *J. Geophys. Res.*, **101**, 26641-26668.
- Shea, D. J. 1986 : *Climatological Atlas : 1950-1979. Surface Air Temperature, Precipitation, Sea Level Pressure, and Sea-Surface Temperature.* NCAR Technical Note, NCAR/TN-269+STR.
- Schonland, B. F. J., 1937 : *The lightning discharge. The Halley Lecture, Oxford at the Clarendon Press*, 19pp.
- Simpson, G. C. and F. J. Scrase, 1937 : The distribution of electricity in thunderclouds, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **161**, 309-352.
- Takahashi, T., 1965 : Measurement of electric charge in thundercloud by means of radiosonde, *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 206-217.
- Takahashi, T., 1978a : Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- Takahashi, T., 1978b : Electrical properties of oceanic tropical clouds at Ponape, Micronesia, *Mon. Wea. Rev.*, 1598-1612.
- Takahashi, T., 1981 : Warm rain study in Hawaii—Rain initiation, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 347-369.
- Takahashi, T., 1984 : Thunderstorm electrification—A numerical study, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2541-2558.
- Takahashi, T., 1990 : Near absence of lightning in torrential rainfall producing micronesia thunderstorms, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 2381-2384.
- Takahashi, T., 2003 : Lightning and in-cloud ice phases in the east asian monsoon, 12th International Conference on Atmospheric Electricity, Versailles 9-13 June., 115-118.
- Takahashi, T., T. Tajiri and Y. Sono, 1999 : Charges on graupel and snow crystals and the electrical structure of winter thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1561-1578.
- Takahashi, T. and K. Miyawaki, 2002 : Reexamination of riming electrification in a wind tunnel, *J. Atmos. Sci.* **59**, 1018-1025.
- Takahashi, T. and T. Keenan, 2003 : Hydrometeor mass, number and space charge distribution in a “Hector” squall line, To be submitted.
- Vonnegut, B., 1955 : Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity, *Proc. Conf. Atmos. Electr. Portsmouth*, 169-181.
- Wever, M. E., H. J. Christian, A. A. Few and M. F. Stewart, 1982 : A thunderstorm electric field sounding : charge distribution and lightning, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7158-7169.
- 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.
- Zrnica, D. S. and A. Ryzhkov, 1999 : Polarimetry for weather surveillance radars, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 389-906.

Electric Charge Separation Mechanism —Puzzle of Graupel Charge Sign Reversal

Tsutomu Takahashi*

* *Core-Education Center, Obirin University, 3758 Tokiwa-cho Machida-shi, Tokyo, 194-0294, Japan.*
