

第10回国際大気電気学会 (大阪大会) 報告*

菊地 勝 弘^{*1}・上 田 博^{*2}・三 浦 和 彦^{*3}・川 崎 善 一 郎^{*4}
成 田 憲 一^{*5}・早 川 正 士^{*6}・児 島 紘^{*7}・仲 野 蕘^{*8}

1. はじめに

1996年6月10~14日にかけて、国際大気電気委員会 (ICAE) と日本大気電気学会の主催で記念すべき第10回国際大気電気学会 (大会委員長: 菊地勝弘北海道大学教授) が大阪ロイヤルホテルで開催された。

本国際会議は、1954年アメリカ・ポーツマスでの第1回大会に端を発し、1958年アメリカ、1963年スイス、1968年日本(東京)、1974年西ドイツ、1980年イギリス、1984年アメリカ、1988年スウェーデン、1992年ロシアと引き継がれ、最近ではほぼオリンピックイヤー毎に定期的に開催されるようになった。ご承知のように、ICAEは、気象学の他の分野と同じように、IUGG(国際測地学地球物理学連合) - IAMAS (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences) の下部組織の一つとして、「大気電気学」の発展のために活動している。

日本大気電気学会は、早くから、故気象庁長官島山久尚博士や故孫野長治北海道大学教授、故金原淳名古屋大学教授、故田村雄一京都大学教授等を発起人として雷研究会としてその活動の場を広げ、1968年東京で開催された第4回大会を契機に雷研究の他に、イオン、エアロゾル、放射能その他大気中の電気・電波および

これに関連する諸問題を対象として、日本大気電気学会として正式に発足した。1981年から独自の Journal である“Research Letters on Atmospheric Electricity”を発行し、1993年以降“Journal of Atmospheric Electricity”と改称し、年2回刊行している(第1図)。

わが国における大気電気学は電気学会、静電気学会、エアロゾル学会等々と関連分野の学会が数多くあることもあるが、気象学会のセッションからは必ずしも活発であるようにみえないかもしれない。しかし、気象学会的に分類すれば、雲物理、メソ現象、エアロゾル、環境気象、微量気体、オゾン、大気境界層、気候問題等々、関連する分野は多く、他の研究分野と比較しても遜色なく活発に活動していることを強調したい。そして、国際的にはICAE、CIGRE(国際大電力システム会議)、URSI(国際電波科学連合)等を通して諸外国との連携を密に活動しているのである。今回の大会では、従来のようなThunderstorm Electrification, Lightning Discharge, Atmospheric Ions, Schumann Resonances etc. といったセッションは勿論だが、新しいトピックスとして、Earthquake Electromagnetic Effectsや、Cloud-to-Ionosphere Couplingといった新しいセッションが設けられた。更に、日本で注目され、そして、積極的に研究が進められているWinter Thunderstormというセッションを設けたのが特徴である。

今回第10回大会が、東京で行われた第4回大会以来28年ぶりに国内で行われたことでもあり、大会の内容の概略を第1表のセッション毎に担当会員から紹介したい。なお、大会には最終的には参加者208名(内、外国人82名)、参加国25か国、論文数163編で、全て口頭発表の形式で行われた。

会議は日本気象学会、URSIの共催、電気学会、放電研究グループの協賛、日本学術会議の後援を得た。

* Reports on the 10th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE) at Osaka, 1996.

^{*1} Katsuhiko Kikuchi, 北海道大学大学院理学研究科.

^{*2} Hiroshi Uyeda, 北海道大学大学院理学研究科.

^{*3} Kazuhiko Miura, 東京理科大学理学部.

^{*4} Zen-ichiro Kawasaki, 大阪大学工学部.

^{*5} Ken-ichi Narita, 宮城職能開発短期大学校.

^{*6} Masashi Hayakawa, 電気通信大学工学部.

^{*7} Hiroshi Kojima, 東京理科大学理工学部.

^{*8} Minoru Nakano, 豊田工業高等専門学校.

© 1997 日本気象学会



第 1 図 “Journal of Atmospheric Electricity” の表紙及び第 10 回国際大気電気学会 (大阪大会) の公式文書、プログラム等に使用された写真。フェニキヤで発掘された雷神のブロンズ像。彼女の特徴的な点は、先端の尖った帽子をかぶっていること、そして右手には細長い棒を持っていることである。先端の尖った帽子は、ブラッシュ放電かセントエルモの火を象徴していると思われる。手に持った細長い棒は、落雷の時に万物を破滅させるような力、すなわち、樹木を切り裂き、岩石を粉碎し、生きる物全てを死に至らしめる “Donnerkeil (雷神の矢)” のようなものと想像される。

また万博協会、日本気象学会、日本気象協会および関連各社、財団から数多くの御理解をいただいた。その内の一部は特に発展途上国からの若手研究者 21 名の大会出席旅費の一部に使用させていただいた。大会中、および終了後も大会の大成功のお祝いの言葉をいただいた。御協力いただいた関係各位へ紙面を借りて厚く感謝の意を表するものである。最後に本会議のために、事務局運営に献身的に努力された大阪大学工学部川崎善一郎助教授と松村緑さんに感謝します。

(菊地勝弘)

2. セッション 1, 3, 5 雷雲電荷の発生機構 (I) (II) (III)

セッション 1 は、高橋 (九州大学理学部) が座長を

つとめた。発表 8 件と代読 2 件のうち、6 件が電荷の発生機構に関する室内実験であった。観測に比べて実験が少なくなりつつあるなかで地道な研究成果の発表が行なわれた。

Saunders and Peck (マンチェスター理工科大学, イギリス) は霰と水粒子の衝突の室内実験の結果を整理して、霰の持つ電荷の極性と電荷量を議論した。霰が正または負に帯電する領域の, EW (Effective Liquid Water Content; 有効雲水量) と温度の関係についての実験結果を整理して示した。EW は霰と水粒子の速度差と雲粒の粒径分布に依存するので、実際には雲の中の EW をどのように測定すれば良いのか問題である。また、他の研究者による霰の帯電時の LWC (Liquid Water Content; 雲水量) と温度の関係をどのように評価すればよいのか基本的な疑問が残ったままであった。Berdeklis and List (トロント大学, カナダ) は初めて霰の電荷発生 of 室内実験に鉛直風洞を使用した。Saunders と Takahashi の結果を比較するためには別の実験をする必要があるとの主張であったが、主に装置の説明に終わった。氷晶数濃度の測定をどのようにするかなどの問題を解決することにより、今後の成果が期待される。Jayaratne (ポツワナ大学, ポツワナ) は、過冷却雲粒を大きな冷凍庫に供給し続けて霰の電荷発生機構を調べる実験を行なった。雲水量 1.0 gm^{-3} で、霰の温度が $-15^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$ では霰が正に帯電するという結果を得た。また、 0°C に近い温度領域でも、Saunders の結果を支持する結果になっているが、霰表面での潜熱放出の効果等も検討しなければならないとの結論であった。Troncoso-Lozada (大気科学センター, メキシコ) は、メキシコ高原 (2,250 m) での地上雨量、電場、尖端放電電流の観測結果について発表した。熱帯の高原での雷雲の特性を示す貴重なデータであると考えられる。Mason *et al.* (ワシントン大学, アメリカ) は、電極盤にはりつけた氷同志の衝突時の電荷発生量と水の質量変化を測定する装置の試作結果を示した。摩擦が起きないように、2 つの水粒子が接するように調節した装置だということで、実験結果が待たれる。Mareev *et al.* (応用物理学研究所, ロシア) は、雷雲内にエアロゾルが存在する状態で粒子の誘導による電荷発生と界面での電荷発生のメカニズムを入れた数値モデルの発表を行なった。van der Hage and van Noort (ユトレヒト大学, オランダ) は大気中を落下する水滴の持つ電荷量の変化を測定する室内実験を行った。水滴内のイオンとそのまわりの大

第1表 第10回国際大気電気学会 (大阪大会) スケジュール表

10th International Conference on Atmospheric Electricity
 June 10-14, 1996
 Royal Hotel, 2nd Floor
 5-3-68, Nakanoshima Kita-ku, Osaka 530, Japan

Room	9 (Sunday)		10 (Monday)		11 (Tuesday)		12 (Wednesday)		13 (Thursday)		14 (Friday)
	A (Kiku)	B (Katsura)	A (Kiku)	B (Katsura)	A (Kiku)	B (Katsura)	A (Kiku)	B (Katsura)	A (Kiku)	B (Katsura)	
8 : 30	Registration (8 : 00-) in front of Room "Kiku"		Registration (8 : 00-) in front of Room "Kiku"		Session 5 Thunderstorm Electrification (III)		Session 9 Lightning Characteristics (I)		Session 13 Winter Thunderstorms		Tours Sightseeing Tour to Nara Technical Tour
MORNING	Opening Ceremony (9 : 00-10 : 00) at Room "Kiku"		Thunderstorm Electrification (III)		Session 6 Lightning Discharges (I)		Session 10 Earthquake Electromagnetic Effects		Session 14 Cloud-to-Ionosphere Coupling		
Coffee Break	Session 1 Thunderstorm Electrification (I)	Session 2 Atmospheric Ions (I)	Session 5 Continued		Session 6 Continued		Session 9 Continued		Session 13 Continued		
12 : 30	Session 3 Thunderstorm Electrification (II)	Session 4 Atmospheric Ions (II)	Session 7 Lightning Detection & Protection		Session 8 Lightning Discharges (II)		Session 11 Lightning Characteristics (II)		Session 15 Triggered Lightning Resonances and Sferics		
AFTERNOON	Session 3 Continued	Session 4 Continued	Session 7 Continued		Session 8 Continued		Session 11 Continued		Session 15 Continued		Banquet & Closing Room "Sanraku" (18 : 30-20 : 30)
Coffee Break	Registration desk opens at Royal Hotel Osaka, Room "Tachibana" on 2nd floor (16 : 30-20 : 00)		Session 7 Continued		Session 8 Continued		Session 11 Continued		Session 15 Continued		
17 : 30	Reception at Room "Katsura" (18 : 00-20 : 00)		Session 7 Continued		Session 8 Continued		Session 11 Continued		Session 15 Continued		

気中のイオン間の化学反応を考えようというものである。Pereyra *et al.* (コルドバ国立大学, アルゼンチン) は直径 100 μm の凍結水滴を直径 4 mm のシリンダーに衝突させたときの電荷発生量を測定する室内実験の結果の発表を行なった。実験装置の図が示されず、実験方法が理解できなかったが、2つの氷粒子の温度の組み合わせを変えた場合の霰の持つ電荷量をヒストグラムで示していた。Pereyra が代読した同じ大学の Scavuzzo *et al.* の論文は雷雲内での電荷発生と分離の数値実験であった。電荷密度分布の三極構造などが示された。しかし、代読のせい、パラメタリゼーションの中身が不明であり残念であった。

セッション3はマンチェスター理工科大学の Saunders が座長をつとめ発表8件は、電荷と電場の観測が中心であった。

Soula and Chauzy (ポールサバチエ大学, フランス) はフランス南西部で夏期の降雨の電流値と電場の観測を地上付近で行った。電流の極性は1つの降雨イベント中に変動するが、負に帯電した雨滴が支配的であるという結果を得た。このことは、地上付近の負に帯電した雲粒を雨滴が捕捉するためであると考えられた。織笠(元室蘭工業大学)は、雪粒子や火山灰等の固体粒子の衝突による電荷発生とイオンの生成の実験結果を紹介した。Kamra and Ravichandran (インド熱帯気象学研究所, インド) は、インドにおける雷雲のまわりでの電場の地上観測結果を紹介した。Rust *et al.* (国立中規模擾乱研究所, アメリカ) は、これまでの MCSs (Mesoscale Convective Systems) の電氣的構造に関する研究成果のレビューと MCSs 全体の概念モデル(鉛直断面のイメージ)に関する発表を行なった。a) MCSs 中に4~6か所の電荷がたまる領域があること、b) 層状域の最大の電場(E)と空間電荷密度最大の部分は0°C付近にあること、c) MCSs 中の対流域には少なくとも4つの電荷の大きな領域があり、上昇域の外には6つの電荷の大きな領域があることなどについて述べた。Schuur and Rutledge (コロラド州立大学, アメリカ) は、MCSs 中の電荷発生について2次元数値モデルを用いた実験を行なった。その結果、氷粒子の衝突による電荷の発生だけで観測されている空間電荷密度を説明できるとした。Kridler *et al.* (アリゾナ大学, アメリカ) は、ケネディー宇宙センター周辺の LDAR (Lightning Detection and Ranging; VHF 帯の電波受信機による3次元雷放電検出システム) 等の観測システムのデータを用いた雷放電

の位置と電荷分布の関係、及び直交2偏波観測による雷雲の構造との比較結果について発表した。雷雲内の降水粒子の形状と電荷分布及び雷放電の関係を3次的に同時に観測できるようになったことはすばらしいことである。MacGorman *et al.* (国立中規模擾乱研究所, アメリカ) は、雷雲の電氣的構造についてのレビューと考察を示し、数値実験の重要性を強調していた。Maier (レイセオン計算機センター, アメリカ) and Maier (ケネディー宇宙センター, アメリカ) は、ケネディー宇宙センター周辺の観測システム(7台の LDAR, 31台のフィールドミル, 5台のリターンストローク検出システム, 5 cm と 10 cm の気象レーダーなど)による雷雲の最初のステージの電荷発生機構に関する観測結果の発表を行なった。新しいシステムによる観測なので活発な質疑がなされた。しかし、プロシーディングに論文が載っていないのが残念であった。

セッション5の発表8件は、国立中規模擾乱研究所の Rust を座長として、レーダーと放電探知器を用いた雷雲の発達過程と雷放電の関係に関する研究が中心であった。

Rison *et al.* (ニューメキシコ鉱工学大学, アメリカ) は、ケネディー宇宙センター周辺の LDAR による雷放電の構造と、NCAR (国立大気研究センター) の CP2 レーダーを用いて観測した雷雲の構造の比較結果を示した。1995年7月25日の例で、雷雲の発達にともない正の電荷の位置は上昇するのに対して、負の電荷の高度は変わらないことなど、レーダーエコーと放電位置を重ねた図を多く見せてくれた。また、過冷却水滴が凍結した瞬間に放電を観測した事実があるとして、高橋(九州大学理学部)の「雷放電には凍結だけでは不十分で霰の存在が必要ではないか」という質問に答えていたのは注目された。Stasenko *et al.* (ボエイコフ地球物理学観測所, ロシア) は、波長 0.8, 3.2, 11 cm のレーダーと放射計(波長 0.8, 1.35, 3.2 cm)を用いて、雲と降水の構造及び雲水量と水蒸気量の観測、さらに、波長 35 と 200 cm のレーダーを用いた雷放電の観測結果を示した。厳しい研究環境のロシアでの観測研究なので今後の成果を期待したい。Georgis *et al.* (中央ピレネー観測所, フランス) は、自由落下する1個の水滴と相互作用する2個の水滴それぞれの電場中でのふるまいをシミュレートし、1個の水滴よりも、異なる符号の電荷を持つ水滴同志の相互作用がコロナの生成に有効であるという結果を得た。Carey and Rutledge (コロラド州立大学, アメリカ) は、マルチ

パラメーターレーダー(CSU-CHILLレーダー)観測と対地放電の位置、放電頻度、極性等を比較した。正極雷のクラスターの上の強い電場中に縦長の姿勢をとる氷粒子があるという結果は注目される。Ge and Dong(蘭州高原大気研究所, 中国)は、雨滴成長の数値実験により、雷放電によって水滴が電荷を得、雨滴が急成長し強い降雨になりうるという議論を行った。Krehbiel *et al.*(ニューメキシコ鉱工科大学, アメリカ)は、円偏波レーダーによって雷雲中の降水粒子の識別ができるということを示した。レーダーによる雷雲中の降水粒子の識別は重要な課題であり、広い範囲の降水粒子の識別法の開発を期待したい。Stanley *et al.*(ニューメキシコ鉱工科大学, アメリカ)は、NEXRAD(Next Generation Weather Radar)レーダーとLDARを用いた、1994年9月2日の雷雲の構造と雷放電の観測結果を示した。最初の雷放電は最新のセル内で開始し、しばしば後方の古いセルに雷放電が移ることを示していたのが注目された。Ramachandran *et al.*(地球水文気候学センター, アメリカ)は、観測された雷放電とシミュレートした雲中の氷の量の関係を調べた。TRMM衛星を意識して、雲の鉛直プロファイルを出して衛星観測に役立てるのがねらいのようであった。これらのセッションを通しての印象は、LDAR等の新しい観測システムによる雷放電の詳細な観測と各種のレーダーによる雷雲の構造の観測を同時に行うことにより、雷現象の理解に新しい展開が期待できそうだというところであった。

(上田 博)

3. セッション2, 4 大気イオン(I), (II)

大気イオンのセッション2は中江(東京理科大学理学部)が、セッション4はSalm(タルツ大学)が座長をつとめた。セッション2では日本5, エストニア3, スウェーデン2, アメリカ2, スリランカ1, カナダ1, ギリシャ1の計15件の発表が行われた。他にFinal Programにはロシア5件がエントリーされていたが、いずれもキャンセルされた。また、欧米の発表が少ないのも残念であった。内容は、イオン核生成やスペクトルなどの基礎研究、測定法・解析法に関する研究、エアロゾルも含めた大気汚染に関する研究、電極効果に関する研究、グローバルサーキットを念頭に置いた電気伝導率の観測に分けられる。

セッション2の最初の発表者のTammet(タルツ大学, エストニア)は、イオンの電氣的移動度を標準

状態に修正するLangevin則を大気イオンに適用した場合の誤差を準経験モデルにより評価した。実験的に評価できないかとの質問があったが、困難との解答があった。鈴木(中部大学)は、水蒸気均一核生成、およびイオンを核とする水蒸気不均一核生成に対してモンテカルロ法で計算した。まだ結論は得られていないが、核生成論の発展の一つの方向を示している。Horak *et al.*(タルツ大学, エストニア)らは、Tahkuse観測所で、移動度 $0.00032\sim 3.2\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ のイオンスペクトルを連続観測している。まず、Tammetが、1993年9月1日~1994年10月27日のデータを統計処理した結果について報告した。小イオン濃度は1988~1989年の20%減、1985~1986年の45%減であった。続いて同大学のSalm *et al.*は、中イオンの急激な増加について報告した。この増加は、日中最高気温を記録するときに現われ、何らかの微量気体が増加したときの気体粒子変換が、イオン核生成により加速されたためとしている。長門(高知工業高等専門学校)らは、ドリフトチューブ型移動度計により対流圏小イオンの成長過程を調べた。正イオンは生成後比較的短い時間にピークが現われ、反応時間とともに移動度の小さい方へ進行するが、負イオンのスペクトルの形の変化は複雑で、移動度の大きい方へずれる場合もあった。これらの変化は水蒸気量の影響を受けるとしている。Israelsson(ウプサラ大学, スウェーデン)らは、移動度スペクトルとイオンの進行時間との関係を調べるために新しい原理を用いた。空気の流れに逆向きかけられた電界中で生成されたイオンは、動力学的な力とそれと反対向きのクーロン力を受ける。電界強度を調整することにより測定グリッドに達する。電界強度とイオン流の関係から移動度スペクトルを求めた。浮遊時間が0.05秒から0.6秒に増すにつれ、 $1.5\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 以上のイオンは指数関数的に減少したが $0.5\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 以下のイオンは増加した。

セッション4でIsraelssonは、地表付近の空間電荷の生成に対する電界の影響を実験的に調べた。電界強度が 800 V m^{-1} 以下では、電極効果のみで、それを超すとコロナ放電の影響も見られた。これらの結果を電極効果に対する理論モデルと比較した。

中江(東京理科大学理学部)らは、平行平板型移動度計とガス比例計数管を組み合わせた放射性小イオン移動度スペクトルメーターを開発した。この装置では位置検出器を用いて、 α 粒子に対して3%の分解能で検出できる。通常、 $0.7\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ と $2.7\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ に

ピークを持つ二山分布であることがわかった。Ruhnke (元国立海洋大気庁, アメリカ) は, 定電圧を印加する代わりに, 定電流を流す方式の電気伝導率計を開発した。この方法は移動度の広い範囲にわたって飽和条件を一定に保つことができるので, 鉛直分布の測定に向いている。空地電流を一定と仮定すると, 同時に測定した電界強度と良い一致を示した。三浦 (東京理科大学理学部) らは, 過去10回の東京大学海洋研究所白鳳丸船上での観測結果から, 1) 西太平洋におけるエイトケン粒子濃度の緯度分布は, 北緯10度付近に最小濃度を示している。2) 1週間以上の定点観測の結果, 変動幅は気象条件により異なり, 一桁近いことを報告した。Lelwala (コロombo大学, スリランカ) らは, 地上0~1.6 m で空間電荷密度と α 粒子の放射能の鉛直分布を同時に測定し, 電極効果を確認した。Tuomi の電極効果モデルから計算した空間電荷の理論分布と比較した結果, 電離量が一定の時, 0.2~0.8 m の高度で一番良く一致していた。Godard (陸軍大学校, カナダ) らは, 成層圏の電極効果に対するモデルを再考し, バルーン観測における電気伝導率の値の妥当性について検討した。Driscoll *et al.* (アラバマ大学, アメリカ) は, 下部成層圏の幅広い緯度範囲にわたって大気電気伝導率の飛行機観測を行った。加えて, 離陸, 着陸地点上空において, 伝導率の鉛直分布を求めた。伝導率の変動は, 宇宙線による電離量, 気圧, 温度の変動に依るものである。Retalis *et al.* (アテネ国立観測所, ギリシャ) は, アテネにおいて, 大イオン濃度に対する大気汚染や風の影響について調べた。煙や SO_2 の増加は大イオンの増加を導くが, 大イオン濃度の日変化のパターンは, オゾンや NO_2 のパターンとは逆であった。松岡ほか (北海道大学大学院理学研究科) は, 冬季北海道西岸においてエアロゾル数濃度とドップラーレーダーを用いた観測により, メソスケールでの降雪を伴った擾乱 (収束場) が海塩粒子数濃度の増加と関係があることを明らかにし, その関係を定量的に示した。

(三浦和彦)

4. セッション6, 8 雷放電 (I), (II)

セッション6, 8のLightning Discharges (I), (II)は, それぞれ10件の論文があった。発表順の変更や1, 2の新たな論文が追加されたとはいえ, 当初21件の論文発表が予定されていたことを考えると, この種の国際会議にありがちなキャンセルが, その率から

見てとりわけ低かったことから本大会参加者のこのテーマに対する興味の深さが理解できよう。実際セッション8の開始時には, 総出席者が100名を優に越し, 発表論文に対する質疑応答も活発で, というよりはオーバーヒートするほどであった。

Bondiou-clergerie (国立宇宙物理学研究所, フランス) らの論文はPart I, IIから構成されており, 近年関連学会で話題になっている, 双方向性リーダ仮説を実験的に検証するとともに, 物理モデルを提唱し, 数値シミュレーションを実行してロケット誘雷実験結果 (特にAltitude Triggeringと呼ばれる, 国内では鉄塔誘雷実験) 等の理解に供しているものであった。道下 (静岡大学工学部) らは, 大地に対して傾きのある雷放電路からの, 帰還雷撃による電磁放射の問題を理論的に解析し, 測定される水平磁場の振幅は放電路の傾きに依存するが, Magnetic Direction Findingには影響しないことを示した。渡辺ら (岐阜大学工学部) の論文は, 火炎による誘雷を目指すための基礎実験であり, 室内実験及び野外実験の結果を報告した。野外では地上高50 m塔頂に火炎生成用のジェットエンジンを設置し, 冬季雷雲下で実験しているが, 現在のところまだ成功には至っていない。Ivanovsky (ロシア連邦原子核センター, ロシア) は, 通常の雷雲ではストリーマが発生するための電界強度には決してならないことに注目し, 理論的な立場からRun away Electronがストリーマ放電の開始に寄与するらしいことを導いている。Cooray and Scuka (ウプサラ大学, スウェーデン) 及びCoorayの他の2編を併せた3論文は, 論文タイトルの内容に関しそれぞれ理論的な立場から議論している。但し議論は純粹の理論的な展開にとどまらず, 観測されたデータをどう理解するかという観点に立った理論であり, 筆者としては多に興味を持って拝聴した。

セッション8のShao (ニューメキシコ鉱工科大学, アメリカ) らの2編, 大貫 (大阪大学工学部) ら, Laroche *et al.* (国立宇宙物理学研究所, フランス) の4論文は, 全て干渉計による雲内放電路及び放電進展を取り扱った論文で, 最初の2件は2次元マッピング, 残り2件は3次元マッピングによる放電機構の考察である。この4件の論文に関しての出席者の興味は全体的に高く, 本来平行セッションで行われるべきこの会議が, この4件に限り結果としては単独のセッションとなるように配慮された。今後, 雷放電機構を解明していくための手段として, 干渉計法がその時空間分解能

の高さから、ますます重要となってくるであろう事が予想され、我田引水ながら、干渉計観測に携わっている筆者としては、大いに勇気づけられた。道下(静岡大学工学部)らは、正極性落雷の第1雷撃に伴う電界変化のスペクトル(20 KHz~5 MHz)を観測結果に基づいて求めている。Kreissl *et al.*(プラズマ研究所, フランス)は、高圧送電線下でのオゾン発生を取り扱った論文で、本来なら他のセッションに組み入れられるべき主題であったろう。プログラム構成に携わった筆者としては、本音で大いに責任を感じている。寺本(名古屋工業大学工学部)らは、減流式避雷針と呼称される新しい型の避雷針の性能試験を、ロケット誘雷時に実施した結果の報告である。現在この避雷針の有効性について賛否両論があり、関連研究者の間で注目を集めているところであるが、本論文の結果のみでは依然として合意を得るには至らないというのが本当の所であろう。Borra *et al.*(プラズマ研究所, フランス)は2年以上に及ぶ気象条件と地上電界、尖端コロナ放電(著者はElectrical point dischargesと呼んでいる)の相関関係を調べた論文である。筆者らの結論によれば、低気圧下の降水時に尖端コロナ放電が起こり、前線の通過や前線の不安定さとの間に強い相関が認められるという。Price *et al.*(テルアビブ大学, イスラエル)は、雷活動により生成されるNO_xの地球規模的な分布の様相をシミュレーションにより求め、気候変化とNO_xの経年変化の関係を明らかにしている。地球温暖化と地球規模的な発雷分布という観点から、興味深い論文で、筆者個人としては前回のICAE(ロシア・セントペテルスブルグ)以来、この著者の論文・報告には注目している。Ruhnke *et al.*(元国立海洋大気庁, アメリカ)は、雷雲とその簡単化された電荷分布モデルを提案し、リーダチャンネル上の電荷分布による電界強度を数値的に求めることにより、雲間・対地放電の関係を明らかにしようとする論文であった。

(川崎善一郎)

5. セッション7 雷放電検出と防禦

このセッションの座長はMcGorman(オクラホマ大学)がつとめた。NASAの雷検出システムLDARと電界変化データを用いた解析がMaier(国立航空宇宙局, アメリカ)女史より発表され、雲間放電に10⁶ms⁻¹程の速度で上昇するストリーマや、さらに遅く10⁴ms⁻¹程の速度で水平方向に進展する長いストリーマ

の存在が指摘された。Richard(ディメションズ, フランス)はSAFIR(Systeme de Surveillance et d'Alerte Foudre par Interferometrie Radiotechnique)による雷観測結果と気象レーダーによる降水強度との相関解析から、雷活動度を基にした降水強度予測の可能性を報告した。Cummins(空電研究所(株), アメリカ)は米国大陸を網羅する電撃検出のNLDN(National Lightning Detection Network)と東北電力(株)のDF(Direction Finder)ネットワーク(LLS)に到達時間差法を導入し、評定精度を向上させた報告を行った。宮地(愛知工業大学)は、実運用の77 kV送電線と変電所で観測した結果を基に、鉄塔逆フラッシュオーバー機構を究明し、雷事故を減少させる方法について、また上田(中部電力)らは同観測システムの構成についての報告を行った。竹内(愛知産業大学)は、ステップモデルを用いた雷放電チャンネルの進展シミュレーションを報告した。北川(元埼玉大学工学部)は、人体に対する雷撃の性質と被害に対する安全策について明らかにし、特に死に至るエネルギー量を実験的に求めた。Cohen(パナマックス, アメリカ)は米国における雷防護の装置と法規制について報告した。このセッションの最後は、プログラムに掲載のない雷雲中の帯電機構の発表であった。日本に滞在したことがあるHandel(ミズーリィ大学, アメリカ)は小さなH₂O集合体の強誘電体分極が最終的に雲の帯電を決定するというPC(Polarization Catastrophe)機構についての報告をした。

(成田憲一)

6. セッション9, 11 雷放電の特徴(I), (II)

セッション9はChauzy(ポールサバチエ大学)が、セッション11は石井(東京大学生産技術研究所)が座長をつとめた。

先ずMacGorman *et al.*(国立中規模擾乱研究所, アメリカ)はWSR-88Dドップラーレーダーのデータと雷撃データを結合し、雷雲セルから得られるレーダ情報から1時間先までの雷撃を予測する手法について報告した。基本的には、国立中規模擾乱研究所で運用のWDSS(Warning Decision Support System)にSCIT(Storm Cell Identification and Tracking)ソフトウェアで識別されるセルの情報およびC-G(Cloud-to-Ground)フラッシュの情報も付加したものである。Koshak *et al.*(国立航空宇宙局, アメリカ), Christian *et al.*(国立航空宇宙局, アメリカ)の論文は、750

km 上空の軌道衛星から雷撃の光強度と位置を検出する OTD (Optical Transient Detector) に関するものであった。これは国立航空宇宙局の EOS (Earth Observing System) 用に開発された LIS (Lightning Imaging System) の初期モデルで、1995年4月から測定を始めている。今回は装置の概要、較正、検出効率並びに得られたデータについての報告であった。昼の太陽と夜の都市の影響を除去することで地球規模の雷撃分布を求めている。また C-G フラッシュを検出する NLDN より20倍も多く OTD が雷を検出することから、雷活動の大半は雲放電であるとした。さらに Baker (ワシントン大学, アメリカ) らは LIS から得られるデータを用いた簡単な雷活動を評価するコンピュータモデルを報告した。

アフリカ中央部ボツワナからは, Jayaratne and Ramachandran (ボツワナ大学, ボツワナ) が Gaborone における CGR3 雷放電カウンタによる5年間の観測データを, Finke and Hauf (大気物理研究所, ドイツ) は LPATS (Lightning Positioning and Tracking System) による南ドイツの雷活動度の観測結果を報告した。Janischewskyj *et al.* (トロント大学, カナダ) からは, トロントの CN タワーで観測された過去18年間で528回の雷撃を基にした雷パラメータの報告があった。セッション14で発表予定の Levin *et al.* (テルアビブ大学, イスラエル) は, テルアビブにおける対地雷放電を雷放電カウンタ (CGR3-SN5) と LPATS で観測し, 雷雲は日本海の冬の雷雲とよく似ていると報告した。TOGA-COARE と CaPE 観測データ, そして数値モデルを用いた熱帯の雷の解析報告が Solomon *et al.* (ワシントン大学, アメリカ) によって行われた。解析は雷雲中の電界強度の計算で, 上昇気流の速度や降水量と雷放電頻度の関係および雷放電が雲間放電になるか, さらに対地放電に進行するかを検討していた。前橋市立工業短期大学の宮崎らは, 対地雷放電と雲間放電によって放射される空電信号にカオス理論を適用し, 一見ランダムに見える雷放電現象にカオス的な性質を見出した。Petersen and Rutledge (コロラド州立大学, アメリカ) は, 対地雷放電密度と雨量の比である雨量出力 (Rain-yield) を乾燥地帯からモンスーン, 海洋までの広い気候帯で解析し, 対地雷放電密度から雨量を予測する報告があった。上田ほか (北海道大学大学院理学研究科) は TOGA-COARE の集中観測期間に観測した熱帯海上で発達する対流雲のドップラーレーダーのデータを, 2次元数

値シミュレーションにより解析した。雷の発生は, 対流雲の外側から半径方向に吹き出す湿った空気が霰を生成することが主因と報告している。

セッション11では, 仲野ほか (豊田工業高等専門学校) が, 地表面付近における雷放電チャンネルの光強度の空間的位置スペクトルを基に構造を解析し, ステップトリードの長さが0.5 m から2.5 m, 平均で1.2 m とかなり短いという結果を報告した。これは空気中の渦あるいはプラズマのピンチによるものと推定した。

この後, 木星の雷について3件の報告があった。保原ほか (電気通信大学) は探査機 Voyager で観測された木星上の雷による Whistler の解析結果について報告した。Whistler の伝搬中の減衰から, 大半の雷は高緯度で発生したものであった。一方, Yair *et al.* (テルアビブ大学, イスラエル) は, 木星の水雲の電気的な構造を各緯度毎に数値的に計算し, 中緯度では2.9 bar に正電荷, 4.5 bar に負電荷の領域を持つダイポール構造であるが, 赤道付近では電荷分離も弱く, 横向きのダイポールとなり雷活動が少ないという結果を示した。Uman *et al.* (フロリダ大学, アメリカ) からは探査機 Galileo の降下プローブに搭載された LRD (Lightning and Radio Emissions Detector) から得られた RF 信号の解析結果が報告された。木星大気中では雷活動は検出できなかつたようだ。和田ほか (電力中央研究所) は北陸地区の高煙突に落ちる雷の観測結果について報告した。測定は電流波形, 3種類の光学系 (カメラ, ビデオ, ALPS) による雷放電進展様相, 3種類のアンテナ (スローアンテナ, ファーストアンテナ, VHF アンテナ) による電界変化である。その結果, リターンストロークを伴わない上方向進展のリーダを観測していた。高木ほか (岐阜大学工学部) からは, 開発した HSLSC (High-Speed Line Scanning Camera) を用いた雷放電チャンネルが径方向へ 10^5 ms^{-1} 以上の速度で進展した放電を観測したとの報告があった。関岡ほか (関西テック) は, 冬季雷の EHV (500 kV) 送電線高鉄塔への雷撃観測結果について報告した。多回線事故の原因の一つは, 連続電流に重畳するパルス状の電流で, EMTF の計算からも裏づけられたとの発表であった。前川ほか (大阪電気通信大学工学部) からは, 雷雨による衛星電波 (19.45 GHz) の XPD (Cross-Polarization Discrimination) にみられる急激な変化が報告された。大半の変化は C-G 放電と一致するが, 急激な変化の中に観測される XPD の増加や減少は, 雷雲中の氷晶が電界により傾きを変える

ことよるとした。大古殿ほか(都立航空高等専門学校)はマイクロ波(2.4 GHz, 5 kW)を用い、大気圧中で球雷の発生を試みた。非金属導波管の出口付近のマイクロ波が存在している所で、ギャップ放電をさせると球雷らしきプラズマ炎が発生し、短時間ではあるが上昇して消える実験であった。問題は自然雷と違って、マイクロ波のエネルギーが非常に大きく、放電エネルギーが非常に小さいことである。2件の発表が取り止めとなり、最後に舟木(埼玉大学工学部)が雷放電チャンネルから放射されるスペクトル強度へABEL変換を加えることにより、チャンネル内の励起温度や電子密度を得ようとするものであるが、発表は本題から少々脱線したようであった。

(成田憲一)

7. セッション10 地震発生と電磁波

このセッションは電気通信大学の早川を座長として行われた。当初13編の論文が予定されていたが、ロシアからの3論文が中止となった。

一般に地震に伴う大気電気現象は大きく次の2つに分類される。(1)震源ないしその周辺(地表近くも含む)からの直接放射現象と(2)既存電波への間接的現象(効果)である。本セッションでも両効果の発表があった。まず、(1)に関しては、(a)直流測定(地表面での電位差測定、地電流の測定)、(b)ULF(周波数1 Hz以下)電磁変動測定、(c)ELF電磁波測定、(d)VLF(1~9 Hz)電磁波測定、(e)VHF電波測定などが報告された。以下ではその各々について若干の説明を行う。北海道東方沖地震(1994年10月4日、Ms~8.1)の際の仙台での地電流測定結果が竹内(東北大学工学部)らによって報告された。地震の前後数時間にわたり地電流にパルス状の異常と思われる信号が受信され、これらが地磁気変動、雷分布図やレーダーエコー分布と比較された。その結果、本地震の前後には雷の発生が多く、観測された地電流のパルス状信号は地震と関係するとは結論づけられなかった。次に、九州雲仙岳での火砕流に伴うAsh cloudの進展と電荷分離が三浦ほか(東京大学地震研究所)によって報告された。1993年9月25日の火砕流によって発生したAsh cloudの上部は火山ガス等を含み、正に帯電し、下部は負に帯電することが判明した。次に早川ほか(電気通信大学)によって、1993年8月8日のグアム地震(Ms~8)の際の前兆ULF放射が報告された。夜間でのULF(0.02~0.05 Hz)磁界強度と地磁気擾乱(ΣKp : 3時間毎の地磁気

活動の一日総和)との相関から地磁気脈動(スペースからの波動)は概ね分離できる。それに加えて、磁界の偏差比(垂直成分/水平成分)が地磁気脈動とその他を判別するのに極めて有用であることが発見され、地震の一週間前から10日前に第一の強度ピークがあり、直前に第二のピークが現れることが認められた。更に畑ほか(名古屋工業大学工学部)によって、高周波のELF帯(223 Hz)での観測結果が発表された。静岡県、長野県、長崎県での多点での観測結果に基づくもので、例えば、三陸沖地震(1994年12月28日、Ms 7.5)に対しても静岡県にて前兆の強度上昇が認められている。更に、前兆ELF波のウェーブレット解析から、ELF強度がULF波によって変調を受けていることが判明した。この事は前述のULF放射の発生を支持するものであろう。ELF電磁波の発生に関して二段階モデルが提案された。以上のULF波やELF/VLF波の地表での観測を説明するために、地下にダイポールを置いたときの地表での電界強度の計算を波動論を用いて行った結果が同じグループによって報告された。二層モデルによる結果は内陸型地震では数100 Hz前後までは透過できるが、海溝型地震では1 Hz程度までしか地上では受信できないことが明らかになった。更に高周波のVLF波の結果も藤縄(防災科学技術研究所)らによって報告された。例えば、1994年10月4日の北海道東方沖地震の際にも前兆VLF波(パルス状)がつくばで観測されている。これらの前兆VLFパルスが真に地震と関係するか否かを調べるため、雷放電の時間変化との比較が行われた。雷の対応がないときのものは地震と関係する可能性が高いことが示された。次に、地震雷に関するモデルも提案された。池谷ほか(大阪大学大学院理学研究科)のモデルは断層活動による応力解放によって岩石の圧電極が消滅し、分極に束縛されていた電荷が現れるというものである。また、テレビジョンにも神戸地震の際に電波障害があったとの報告もあった。ある局のテレビのビデオに神戸地震の6時間前に雑音があることが明らかになっている。

既存電波への間接的効果(2)の論文として、神戸地震の際にVLFオメガ局電波の異常が早川ほか(電気通信大学)によって報告された。九州対馬オメガ局VLF電波を犬吠にて受信した電波に神戸地震の前に異常が出ているとするものである。このVLF波は電離層・大地導波管内を伝搬するが、震央の上部で大気の導電率、ひいては下部電離層電子密度異常が発生し、その伝搬波の特性(振幅、位相)に変化を引き起こすものであ

ろう。日出、日没での位相最小の時刻(ターミネーター時刻)は地震の数日前に極めて顕著な異常を示す。この異常は地震の前後4か月(合計8か月)間で地震の数日前だけに発生し、その変化は 3σ (σ :標準偏差)を超える信頼できるものである。次に、その異常の発生機構がMolchanov(電気通信大学)らによって論じられた。地震の前にはラドンが放出されることが知られているが、ラドンによる電離とその後の上層への拡散により説明しようとするものである。セッションの最後のディスカッションでは、次の諸点が結論された。(1)異常とおぼしき現象と地震との因果関係を明らかにする観測が不可欠である(例えば、方位測定など)。(2)同時に各種異常の発生モデルの構築が重要である。

(早川正士)

8. セッション12 大気電場

このセッションはIsraelsson(ウプサラ大学)が座長をつとめた。従来、このセッションは晴天時(雷が無い場合)のグローバルサーキット(Global Circuit)として分類されていたが、今回は以下に示すように、発表内容のほとんどが大気電場、電流に関連したものであり、上記のようなタイトルとなった。

発表論文は12編、1人で複数の論文を発表しているので、発表者は7人であった。国籍はロシア5名、ポーランド、フィンランド、各1名と北欧の研究者だけで、日本からの発表はなかった。雷発生に関連した大気電気の研究は相変わらず盛んであるが、晴天時の大気電気についての関心の薄さがうかがわれた。今回の発表を研究内容で分類すると、測定法が2編、大気境界層を対象としたものが3編、電離圏、磁気圏を対象としたものが7編であった。

Struminsky(ノボシビルスク州立大学、ロシア)はロケットや気球搭載用大気電場測定器の開発、実用化を試みた。特に、ロケットや気球自身がもたらす大気電場のゆがみを最小限にする工夫をした。Tuomi(フィンランド気象研究所、フィンランド)は地表面付近の垂直電流測定のための、ロングワイヤーアンテナの測定原理、風による測定値への影響について論じた。Anisimov *et al.*(シュミット地球物理学研究所、ロシア)は地表面付近で観測される大気電場の脈動に着目し、その脈動を観測で得られる、構造関数(Structural function)で表し、その物理的な意味づけを試みた。また、同著者は大気境界層内での大気電場の垂直分布を対流の強さ、イオン移動度、垂直電流をもとにモデリ

ングを行った。Mareev *et al.*(ロシア科学アカデミー、ロシア)は地表面付近(10~100 m)における大気電場、空間電荷の変動要因について理論的な見地から研究した。イオン・エアロゾルが混在する大気中において、乱流混合の変化による大気電場、空間電荷の変化を見積もった。また、Mareevは弱い伝導性媒質中の電氣的な乱流ダイナモをモデル化した。Helical乱流が定常的な空間電荷密度の生成に重要な役割を果たすことを指摘した。同じ所属のBespalov *et al.*は地球とそれを取りまくプラズマから成る非剛体性の回転による、晴天時の大気電気発生理論を取り扱った。中心部とその周辺部との角速度の違いが、同じ角速度を持つ場合に比べて、異なった電離層電位をもたらすことを示した。Dmitriev *et al.*(シュミット地球物理学研究所、ロシア)は大気電気の一次元非定常モデルを提唱し、下層(1~2 km)での電気伝導度の急激な変化による中層大気、電離層での大気電場・電流への影響を見積もった。Michnowski(地球物理学研究所、ポーランド)らは北極圏に位置するHornsundにおいて、大気電気要素の観測を行い、地磁気嵐の発生時に地上大気電場の変化が観測されることを示した。また、同著者は極付近の地表で観測される大気電場のデータを太陽風の研究の補助的なデータとして用いることの可能性、その限界について論じた。Anisimov *et al.*は中緯度の地上観測地点で垂直電流の観測を行い、地磁気擾乱と相関があることを見いだした。その関係を大気層を通しての垂直電流(Field-Aligned Current)の伝搬によって説明を試みた。Struminskyはまた、大気電場の数年にわたる長期観測の結果をもとに、大気電場の日食時の変化、地震発生時の変化について報告した。

上記のように非常に限られた研究者による発表であったが、全体的な傾向として、従来の晴天時のグローバルサーキットの解明というより、大気電気の応用という面が強かったように思う。観測が比較的容易な地上での大気電場・電流のデータを大気境界層、電離圏、磁気圏での現象に結びつけ、地上データの有効な利用に目が向けられていたようであった。

(児島 紘)

9. セッション13 冬季雷

上田(北海道大学大学院理学研究科)が座長をつとめたこのセッションでは、12編の論文が発表された。論文の取り消しは1件もなかった。日本で行われる国際学会ということで、日本の冬季雷についての論文が

まとめられた。なかでも冬季雷雲の電氣的構造や雷雲の発達等に関する論文が主で、冬季雷の性質そのものに関しては、雷放電特性のセッションでも発表された。発表論文の内訳は、レーダー観測を中心としたものが3編、冬季雷雲の構造と気象要素や地上電界と雷活動の関係を論じたものが4編、冬季雷の放電パルスの位置を論じた論文が2編であった。他に上向き放電で始まる冬季落雷のリーダ進展の論文、冬季雷雲のビデオゾンデ観測の論文、降水粒子間の micro-discharge の論文がそれぞれ1編ずつであった。

このセッションの最後の論文だけがフランス人によるもので、他はすべて日本人の論文である。プログラムを見たとき、外国人がはたしてどれほど発表をきき、討論に参加するか、やや心配な面もあった。しかし、会場は盛況で、大変活発な討論が行われた。アメリカで活発に研究をすすめている研究者達が、大電荷の正極性落雷を発生する日本の冬季雷雲について、多くの関心を寄せていたのが、討論を活発にした理由と思われる。高橋(九州大学理学部)はビデオゾンデを冬季雷雲中に飛ばし、降水粒子の電荷を測定し、これまでの室内実験の結果を支持する観測結果を報告し、注目された。Chauzy *et al.* (中央ピレネー観測所, フランス)は、雷放電活動への降水粒子の影響について議論するため、降水粒子間の micro-discharge の室内実験を行い、外部電界と水滴間、氷粒子間の放電開始の関係を報告した。この論文の著者は、論文が冬季雷のセッションなので、特に結論のところ、放電開始に関与する夏季雷と冬季雷の違いに言及し、討論を盛り上げるのに一役買って大変協力的であった。なにしろこのセッションでただ一つ日本人以外の論文なのである。小林ほか(防衛大学校)、志村ほか(防衛大学校)、北川ほか(元埼玉大学工学部)、道本ほか(防衛大学校)は、冬季雷雲の発生と雷放電の発生、地上電界との関係を考察し、小林ほかが一例として示した50 kmをこえる広がり of cold airmass type のレーダーエコー・システムは、特にアメリカの研究者の注意を惹いていたように思う。上田ほか(北海道大学大学院理学研究科)と園井ほか(関西電力)は二重偏波レーダーを用いた冬季雷雲の観測について報告した。林ほか(北陸電力)は雷位置評定システムを用いて落雷特性を測定し、送電線への落雷と気象条件の関係について考察した。牛尾ほか(大阪大学工学部)と石井ほか(東京大学生産技術研究所)は手法と対象となる放電は異なるが、冬季落雷の帰還雷撃に先行する雲内の放電につい

て、放電パルスの位置についての観測結果を報告した。河崎ほか(大阪大学大学院工学研究科)は、50 mの塔から上向き放電で始まる落雷について、雷撃電流と干渉計法による放電パルスの進展様相から、両方向進展リーダについて考察した。

日本の発表者による発表がほとんどだったが、発表はいずれも大変よく準備されており、英語に関しても大変よかったという印象をもったことを付記しておきたい。

(仲野 貴)

10. セッション14 雲一電離層放電

雷雲の上端から上方に向かう放電に関しては、1950年代よりその存在の可能性が指摘されてきた。また、飛行機のパイロットが雷雲の上方で色のついたフラッシュが起こるのをみたとの報告も多数あった。しかし、近年雷雲から上方へ向かう放電が映像としてはじめて捉えられ、その物理機構の解明が精力的に主として米国の研究者によって進められている。Red Sprites, Blue Jets, Elves と名付けられた雷放電に伴う発光現象がそれである。本セッションではこれらに関係する多くの諸現象が議論された。

まず、中間圏で起こる発光現象の Red Sprites に関して、Sentman *et al.* (アラスカ大学, アメリカ)は、スプライトのつる(巻ひげ)の分枝構造が高感度ビデオ観測から明らかになったことを報告した。この分枝構造はすべてのスプライトにあるわけではなく、その時間変化は彼らのビデオ記録では分解できないとの事である。この分枝は高度55~65 km程度の高度(スプライトの明るい頭の下端)から発生し、一つ又は複数のチャンネルにそって下方と上方へ延びている。雷のステップドリーダと似ている。次に Heavner *et al.* (アラスカ大学, アメリカ)はスプライトの光学スペクトルの解析から、すべてのスペクトルは $N_2(1P)$ 放射特性を示し、最大放射は観測の75%に対しては780 nmであり、いくつかの大きなスプライトに対しては755 nmであったりすることを示した。この事はスプライト励起に関する電子分布がいろいろあることを示している。衛星からの雷観測は今後極めて重要な観測テーマとなることが予想される。OTD (Optical Transient Detector) は1995年4月4日に打ち上げられた Microlab-1 衛星搭載の観測装置である。本 OTD 観測システム(特に積分時間に関する考察)とその再生画像に関するビデオが Boeck *et al.* (ナイアガラ大学, ア

メリカ)によって紹介された。従来 Red Sprites と Blue Jets は観測されているが、それとは別の新しい発光現象 (Elves) が福西ほか (東北大学大学院理学研究科) によって報告された。即ち、高感度の光学観測により、継続時間 1 ms 以下で、下部電離層 (75~105 km 高度) で水平距離 100~300 km のディフューズ型の光学フラッシュがあるというものであり、Sprites の開始に先駆けて発生する。これは雷放電の電磁パルスに伴う下部電離層の直接加熱によるものと指摘されている。雷の電磁パルスによる下部電離層の加熱に関する理論解析も Nickolaenko (電波天文学研究所, ウクライナ) and Hayakawa (電気通信大学) によって報告された。この理論解析によると、垂直雷に対しては昼間電離層にて 50°K 以上、水平雷に対しては 100°K を越える加熱があることが明らかになった。これらの加熱、電離は Trimpi 効果 (VLF 電離層・大地導波管伝搬波の振幅、位相の異常変化として検出されるもの) として現れることが予想される。更には、ホイスラダクトの形成にもつながる可能性がある。これらの雷一電離層放電を模擬するため、低気圧、長ギャップでの空中破壊が均一電界中において、後藤ほか (東北大学工学部) によって測定された。この実験は均質電界中の 4 m と 1.5 m 長の放電管を用いて行われ、高層放電のような色の放電が得られた。また、発生機構の理論として、Electro-hydrodynamics (EHD) 概念、電気リコネクション、Critical Velocity の概念に基づく新しいモデルが菊地 (日本大学工学部) によって提案された。

Red Sprites は継続時間が数 10 msec で、しかも雷から電離層への距離を考えると、落雷の時の様な VLF 帯よりは、ELF (数 10 Hz~数 100 Hz) 帯電波が放射されることが予想される。1970年~1980年にかけて Q パーストと呼ばれる ELF 帯の過渡現象が知られていたが、その発生機構については十分に解明されないままであった。しかし、近年の研究によると、どうもこの Q パーストは Red Sprites の帰結である可能性が高いことがわかってきた。ELF Q パーストの電磁界三成分 (水平磁界二成分と垂直電界) 観測に基づいて、波動インピーダンス (E/H) と到来方位測定より、Q パーストの発生場所が山本ほか (東芝) によって同定された。正極性雷の方が負極性雷よりも多く、正極性雷は北半球により多く発生していることなどが明らかになった。更に、ELF 帯での未説明のもう一つの波 (スローレイル) も上層放電と関係する可能性が高いこと

も Inan *et al.* (スタンフォード大学, アメリカ) によって報告された。雷放電による下部電離層の直接加熱とその電離が Trimpi 現象として観測されたことが報告された。

シューマン共振現象は電離層と大地との空調共振器での交流の共振であるが、直流 (DC) で対応するものが電離層ポテンシャルである。グローバル回路は雷からの電流と帯電した雲とによって維持されているので、両者が地表面温度で支配されることを考えると、シューマン共振同様電離層ポテンシャル (V_1) も地球温暖化を測定する物理量となるのではないかと指摘が Markson ほか (航空研究協会, アメリカ) によってあった。事実 V_1 と三つの異なったデータセットから得られた温度とに正の相関が得られた (Markson and Price)。 V_1 の同時観測が米国とオーストラリアで行われ、サブ・オーロラ帯での電離層が等電位面という仮定のテストと単一点観測で全球的代表的な値を表すかが調査された。

(早川正士)

11. セッション15 誘雷実験

現在ロケットその他の手法を用いた誘雷実験は、日本、アメリカ、フランス、中国、インドネシアで行われているが、ここではそのうちの日本、アメリカ、中国から実験結果の報告があった。セッションの始めに座長の Beasley (オクラホマ大学) が、論文の著者数の多い順のリストを OHP で示し、このセッションの論文がベストスリーを占めていることを紹介した。即興で思いつくのはさすがアメリカ人かなと余計な感心をしてしまった。そうして最多の25名の著者によるアメリカでのロケット誘雷実験の論文が最初の発表であると紹介された。ちなみに No.1 はアメリカの25名、No.2 はこのセッションで4番目に発表された日本のロケット誘雷実験の論文の13名であった。5編がロケット誘雷実験結果の報告、2編がレーザー誘雷実験の報告で、あと2編はロケット誘雷条件等に関する論文である。さらに、雷放電の発生条件に関する論文と落雷結合過程に関する論文がそれぞれ1編ずつあった。

Uman *et al.* (フロリダ大学, アメリカ) は、アメリカのフロリダで行っているロケット誘雷実験の概要を報告した。著者の多いこともさることながら、6か国10機関が参加しており、Internationalであることを強調していたのが印象に残っている。堀井ほか (中部ハイテック) は日本におけるロケット誘雷実験の概要を

報告した。これらの実験は送電線や配電線への落雷・誘導や新しい避雷針の実験等共通の項目も多い。日本のロケット誘雷実験は、山岳での実験のため光学観測や多地点観測が難しいのに対して、フロリダの実験は平地の観測条件のよい施設での実験であることから、今後多くの成果がでてくるものと思われる。Rakov *et al.* (フロリダ大学, アメリカ) と Lalande *et al.* (フランス) は、雷撃点から至近距離で電界変化を測定し、放電機構を考察した。Liu *et al.* (蘭州高原大気物理学研究所, 中国) は中国におけるロケット誘雷実験の概要と結果を報告した。三木ほか (電力中央研究所) と内田ほか (レーザー研究所) はレーザー誘雷について、基礎実験と野外で冬季に行った実験について報告した。Qie *et al.*, (蘭州高原大気物理学研究所, 中国) や同じ所属の Zhang *et al.* は地上付近の空間電荷が誘雷に及ぼす影響や誘雷条件としての地上電界について報告した。菊地 (日本大学理工学部) は、Electric Cusp という概念を導入し、ロケット誘雷や鉄塔誘雷の両極性落雷や両方向性リーダの発生を説明した。Wang *et al.* (蘭州高原大気物理学研究所, 中国) は落雷結合過程近くにおける帰還雷撃の速度測定の事例解析を報告した。今後、日本やアメリカのロケット誘雷実験でこれらの結合過程に関するデータが増えてくれば、落雷結合過程の物理も明らかになってくるものと思われる。

(仲野 黄)

12. セッション16 シューマン共振と空電現象

電離層と大地とから成る空間は一種の空洞共振器となり、雷放電の電気パルスにより 8 Hz, 14 Hz, 21 Hz 等で共振し、シューマン共振と呼ばれる。1970年代は下部電離層の探査手段として研究されていたが、1980年代には VLF 送信機の登場によりその必要性がなくなり、消滅することとなった。数年前、地表面温度の上昇と雷放電頻度とが非線形な関係を示すことが指摘され、シューマン共振の強度が地表面温度をモニターする重要な物理量であることが示唆された。地球温暖化をモニターするものとしてシューマン共振が注目を集めることとなり、本学会でも数多くの論文が発表され、マサチューセッツ工科大学の Williams が座長をつとめた。

成層圏 (高度 30 km) での気球観測によってシューマン共振を観測することが地上観測に比して著しく有

効であることが楠瀬ほか (高知大学理学部) によって指摘された。Nickolaenko and Rabinowicz (電波天文学研究所, ウクライナ) は地上でのシューマン共振現象の第一モード周波数の季節変化を衛星による雷観測 (光学観測) と比較することにより、周波数変化が雷活動のスケールに関する情報を与えることを示した。全球的温度変化を調べる方法としてのシューマン共振強度に他の諸現象がどの程度の影響があるのかを調べる目的から、Sentman (アラスカ大学, アメリカ) らは太陽嵐の効果を調べ、顕著な影響がないことを明らかにした。従来の空洞共振器モデルでは昼夜の非対称などは無視してきた。しかし、15 Mm 離れた二点でのシューマン共振データが数年間にわたって得られ、著しく異なる日変化パターンを示していることが明らかになった。ピーク強度を電離層 D 層高度に太陽天頂角の補正を行うと、両観測点間の日変化の著しい相関の上昇が得られる事が Heavner (アラスカ大学, アメリカ) らによって示された。シューマン共振の周波数領域において、(1)背景雑音と(2)過渡現象との両者を活用する方法による、全世界雷活動モニターの方法が Williams (マサチューセッツ工科大学, アメリカ) らによって提案された。3~120 Hz までのスペクトルが雷によるとして10日間の観測電磁界の逆変換として全球雷活動を Heckman (フィリップス研究所, アメリカ) らが推定した。一点観測法によるシューマン共振による雷分布が衛星からの光学観測と比較され、1~2 Mm の精度にて全球雷が同定されていることが判明した (Boccippio *et al.*, マサチューセッツ工科大学, アメリカ)。ハンガリーでのシューマン共振現象から南アメリカの局所的な雷活動の異常が検出できるとの報告もあった (Satori *et al.* ハンガリー科学アカデミー, ハンガリー)。VLF 帯の空電に関する報告も数編あった。まず、電磁界 3 成分 (水平磁界 2 成分と垂直電界) を用いてポインティング電力を計測し方位を測定し、距離に関しては広帯域での位相スペクトルを利用する手法が Rafalsky ほか (電波天文学研究所, ウクライナ) によって提案された。また、VLF ホイスラーの地上からの電離層下端での到来方向を決める新手法も服部ほか (群馬工業高等専門学校) によって提案された。いわゆる、MUSIC 法を用いる方法である。

結論として、シューマン共振が地球温暖化や全球雷分布を導出する有用な手段であることは多くが認めるところであるが、使用しているモデルは極めて単純な

ものである。今後、電離層・大地導波管伝搬モデルの高度化と逆変換問題としての捉え方が必要であろう。
(早川正士)



「GPS 気象学」Workshopのお知らせ

千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究会

平成9年度から科学技術庁振興調整費の総合課題「GPS 気象学：GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究」（略称GPS/MET Japan）がスタートします。この課題では、全国に展開された1,000点におよぶ国土地理院GPS連続観測システムと気象庁数値予報システムとを有機的に結合することによって、日本域における水蒸気可降水量に関する情報の時間空間分解能を飛躍的に向上させ、その知見を用いてGPSによる地殻変動観測の精度向上およびメソスケール現象の数値気象予報の精度向上を図ること、さらに気象学、測地学、水文学等の研究を支援するためのデータベース「GPS 水蒸気情報システム」を試験的に構築し、その応用について調査研究を行うことを目的としており、国立研究機関および大学の研究者が多数参加します。

本プロジェクトのスタートに当たり、プロジェクトに参加する研究者だけでなく一般の研究者の方にも参加していただき、「GPS 気象学」に関する種々のテーマについて議論を深めたいと考えています。皆様の参加

をお待ちしています。

期 日：6月26日（木）～27日（金）

会 場：千葉大学自然科学研究科大会議室

日 程：6月26日13時00分～17時30分

- GPS/MET Japan の概要紹介
- セッション1：観測的研究
- セッション2：解析手法に関する研究

6月27日9時30分～15時00分

- セッション3：水蒸気データベース構築に関する研究
- セッション4：水蒸気データベースの利用に関する研究

参加費：無料

問い合わせ先：

〒305 茨城県つくば市長峰1-1

気象研究所予報研究部 中村 一

e-mail: hnakamur@mri-jma. go. jp

Tel: 0298-53-8638

Fax: 0298-53-8649