

時間に起こるトランジェントな現象のために取り扱いがむずかしく、本格的なシミュレーションはこれからという段階である。しかし、可視、赤外、紫外、X線、ガンマ線、ELF-VLF電波と、ほぼすべての電磁波が同時に放射されていると推測されることから、この現象の研究は地球大気理解に新しい切り口を提供してくれるものと思われる。

参 考 文 献

- Chang, B., and C. Price, 1995 : Can gamma radiation be produced in the electrical environment above thunder-storms? *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1117-1120.
- Fishman, G. J., P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, G. Kouvelitou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciasas, S. J. Goodman, and H. J. Christian, 1994 : Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin, *Science*, **264**, 1313-1316.
- Franz, R. C., R. J. Nemzek, and J. R. Winckler, 1990 : Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system, *Science*, **249**, 48-51.
- Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan, and W. A. Lyons, 1996 : Elves : Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2157-2160.
- Lyons, W. A., 1994 : Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunder storms as imaged by low-light video, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 875-878.
- Lyons, W. A., 1996 : The SPRITES'95 campaign : Initial results-characteristics of sprites and the mesoscale convection system that produce them, preprint.
- Pasco, V. P., U. S. Inan, and T. F. Bell, 1995 : Heating, ionization and upward discharges in the mesosphere due to intense quasi-electrostatic thunder cloud fields, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 365-368.
- Pasco, V. P., U. S. Inan, and T. F. Bell, 1996 : Blue jets produced by quasi-electrostatic predischARGE thundercloud fields, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 301-304.
- Sentman, D. D., E. M. Wescott, 1993 : Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2857-2860.
- Sentman, D. D., E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, 1995 : Preliminary results from the Sprites 94 campaign : 1. Red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1205-1208.
- Taranenko, Y. N., U. S. Inan, and T. F. Bell, 1993 : The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning : Excitation of optical emissions, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2675-2678.
- Vaughan, O. H., Jr., and B. Vonnegut, 1989 : Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the clear air above, *J. Geophys. Res.*, **94**, 13179-13182.
- Vaughan, O. H., Jr., R. J. Blakeslee, W. L. Boeck, B. Vonnegut, M. Brook, and J. Mckune, Jr., 1992 : A cloud-to-space lightning as recorded by the space shuttle payload bay TV cameras, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1459-1461.
- Wescott, E. M. D., D. Sentman, D. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, 1995 : Preliminary results from the Sprites 94 aircraft campaign : 2. Blue jets, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1209-1219.
- Wilson, C. T. R., 1956 : A theory of thunder-cloud electricity, *Proc. Roy. Soc. London*, **236**, 297-317.

203 (雷：電離層結合)

8. 「雷雲と電離層との結合」の研究の重要性*

早川正士**

* Importance of the study of cloud-to-ionosphere coupling.

** Masashi Hayakawa, 電気通信大学.

© 1996 日本気象学会

雷雲から上層へ延びる放電がありそうである事は昔から知られていた。数年前にはじめて上層への放電と思われる映像が捉えられ、これがこの分野の研究の端緒となった。主として米国の研究者がこの問題に注目し、精力的な研究が進められている。小生が訪れた1995

年12月のサンフランシスコでの AGU Meeting では、米国ではすべての人（気象屋、大気電気屋、電波屋）がこのテーマに集中しているような感じがした。即ち、現象に関する論文やその機構に関する論文などが50編程度発表されていた事を考えていただきたい。この発光現象は大規模雷活動が不可欠であると思われるので、日本でも同様の現象が存在するか否かには疑問があり、このテーマが日本ではそれほど注目されていないのかもしれない。

発光現象等に関しての詳細な記述は東北大学 福西氏によってなされていると思うので、小生は主として関連する他分野に重点を置いて述べよう。

1. 放電物理

発光現象 (red sprites, blue jets) の発生機構を解明しようとするものである。電荷分布に伴う大気電界の生成による放電現象を解明しようとするものである。すでに逃走電子 (runaway electrons) による説などが提案されているが、観測的には光学観測が最も重要であるが、粒子観測(ガンマ線など)、電波観測などの総合的観測が不可欠であろう。

従来の光学観測による Red sprites の特徴をまとめる。(i) 継続時間は数 10 ms 以下である。(ii) 明るさは 1050 kR である。(iii) 最高速度は 60 km (30~100 km) である。(iv) 水平方向の拡がりには 50 km にも及ぶ。(v) 正極の cloud-to-ground flashes に対してより高い発生頻度を示す。(vi) 雷雲内の "spider lightning" と相関が高い。これらの特徴的な事項を説明できるモデルが必要である。逃走電子モデルがすでに提案されているが、別の新しい考え方も考えられよう。従来の雷雲内電荷分布は雷雲上部が正極、下部が負極に帯電するモデルであるが、双ダイポールモデルを考えると電気力線が反対方向に向き、電気的カスプが形成され、地球磁気圏の尾部での磁気リコネクションと同様の電気リコネクションを引き起こすという考え方である。今後多くの研究が行われるであろう。

2. 大気電気学

前項の発光現象の解明ではその観測点でのローカルな現象だけに注目する事になるが、雷-電離層結合は全球的な効果をも持っている。即ち、雷雲を電流源とみなし、雷雲から離れた地点にて電流が電離層から大地へと流れるというグローバル電気回路 (global circuit) と呼ばれている。全球を1つの電気回路とみなす

ものである。雷雲電離層放電では電荷分布が通常の落雷とは異なり、これはグローバル電気回路にも大きく影響する事が予想されよう。勿論、上層放電の発生頻度が問題となるが、上層放電の頻度は従来の雷雲-大地放電の頻度に比して少ないと述べている論文もあるが、上層放電はかなり一般的であるとする研究者もある。

3. 電波物理学

上層放電は落雷の 50 s 程度の継続時間と異なり、数 ms から数 10 ms の継続時間を持つ。又、雷雲から電離層まで延びている事もすでに述べた。以上の事から、従来の落雷からの放射とはかなり異なった電波放射が予想される。従来の落雷からの放射ではその放射スペクトルは周波数 5~10 kHz の VLF 帯電波が卓越している事が知られている。前述した時間変化と空間分布を持つ雷雲-電離層放電を仮定した時の放射界を計算すると、周波数 1 Hz~100 Hz の ELF 帯のスペクトルが優勢である事が明らかになった。この予想が実測観測によって支持されている。即ち、ELF 帯での電波現象 (Qバースト (周波数 10 Hz) とスローレイル (数 100 Hz)) がどうも red sprites, positive lightning と関係する事を示す観測的論文も出てきている。これらの ELF 帯電波は1970年代に空電研究として大々的に研究されていたが、その発生機構は未解明であったが、実は上層放電に関係していたのではないかというのが現在の考えである。過去のテーマと考えられてきたものが最先端の仕事になっている。勿論、新しい概念の導入が必要である。更に、衛星観測により上層放電と関連すると思われる高周波の現象 (TIPP (Trans-Ionospheric Pulse Pairs)) が発見されている。即ち、HF 帯でのスペクトルに周波数が下降するトレースがペアとなって観測されるものである。

電波的にも極めて興味深いものであるが、電波と光学観測との有機的な協力が必要である。電波観測では方位測定によるなどして電波源を同定し、光学観測の結果と比較などが不可欠である。

4. 磁気圏物理学

地球電離層よりも上層の領域では磁場が重要な役割を果たす事から磁気圏とよばれている。この磁気圏プラズマ内での最も重要な研究テーマの一つが磁気圏内波動・粒子相互作用の研究で、磁気圏内粒子の損失機構である。即ち、雷からの電波がホイッスル波として電

離層・磁気圏へ侵入し、磁気圏高速粒子と相互作用し、その帰結として高速粒子が下部電離層まで降下し、異常電離を引き起こす。この異常電離を VLF 送信局電波の電離層・大地導波動伝搬による伝搬異常（振巾および位相）により検出する。この伝搬異常を Trimpi 現象と呼んでいる。通常の Trimpi 現象の時間変化は 1s 程度で始まり、30s 程度にてゆっくり回復するものである。

これらの Trimpi データの中に近年新しい現象が発見された。即ち、ms オーダにて変化し、数 s オーダにて回復するという RORD (rapid onset and rapid decay) と名付けられたものである。どうもこれらの RORD は上層放電と関連する事が指摘されている。直接的に電離層を加熱、電離するものと考えられる。勿論、イベントの数がまだ少ないので、今後多くの研究が待たれる。更には、これらの擾乱域を同定する様な Trimpi 観測システムの開発も望まれる。

5. 他研究分野との関連

前述の Trimpi 現象に対応して表現すると、Seismo Trimpi 現象とも考えられる現象を神戸地震に対して我々が発見した。即ち、九州対馬にある VLF オメガ局電波を犬吠観測所にて受信したデータにて明瞭な伝

搬異常を見出している。従来の夜間での位相（振巾）の変動解析ではなく、日出、日没での位相（振巾）最小の時刻（ターミネーター時）の変動に注目した。神戸地震の前後 4 か月間のデータを用いた、極めて信頼出来る前兆現象である。この異常を説明するには、VLF 電波の反射レベルが 1~2 km 程度低下すれば良いことを明らかにしている。それでは、この低下の原因は何であるかが問題である。勿論、完全な説明は今後の研究に待たなければならないが、現時点で我々は地震前のラドンなどの放射性物質の放出による大気導電率の変化、ひいては電離層下端での電子密度異常をその原因と考えている。上層放電でも本質的には如何なる電荷分布を考え、その電界生成を論ずるものであり、本質的にはよく似ていると考えて良い。

以上の結果から、Cloud-to-Ionosphere Coupling (雷雲と電離層との結合) テーマは極めて拡がりの多い研究課題であることが理解されると思う。大変学際的な研究テーマであると言っても良い。この数年は Cloud-to-Ionosphere Coupling に関する多くの観測や理論的研究が世界各国にて精力的に行われると思う。我々もこの分野において多くの貢献をしたいと考えている。