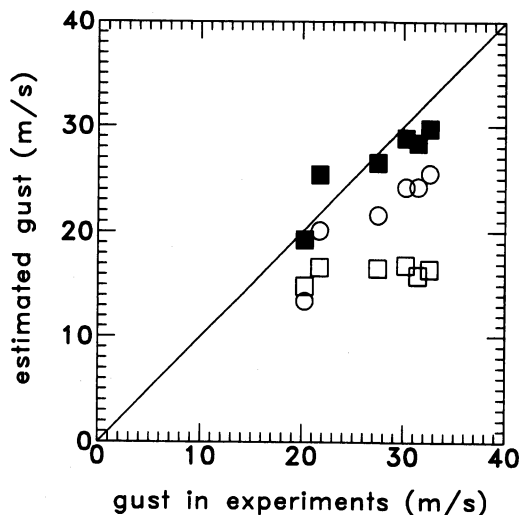




第3図 数値シミュレーションでのガストの評価。

わってくるからである。このケースでは、濃淡のトレーサーの分布から高度 5~6 km ぐらいからの空気が地表付近に降りてきているのがわかる。図は省略するが、実際、浮力のない粒子のトレーサーを入れて、その移動に沿って運動エネルギーの収支を調べると、この高度にいたときの風速に、浮力の効果による加速が加わって地表付近でのガストができることがわかった。

3. ガストの評価式

このシミュレーションでは、ガストは時間的に多少強くなったり弱くなったりするが、平均的には、対流の発達に伴ってだんだん強くなっていく。そのピークから6つの時刻を選んでその時のガストの強さを横軸にとり、様々な方法で評価されるガストの強さを縦軸にとったものが、第3図である。雨による重さと蒸発

による冷却によってできる浮力からガストを評価したときの結果が白丸で、一方、上層での風速から評価されるガストの強さが、白四角で表されている。これらの結果から、浮力だけ、もしくは、上層での風速だけでは十分強いガストが予測できないことがわかる。両方の効果を加えて評価したガストの強さが黒四角のプロットで、この方法がよくガストの強さを予測することがわかる。

実際、このケースでは、観測された温度降下は10度ぐらいで、風速は毎秒 30 m 程度の風が吹いており、第1図を見ると、この温度降下には、強めのガストが吹いた例と考えられるが、これは上層の風の効果が効いたためであると考えられる。

4. おわりに

ダウンバーストに伴って起きるガストには、2つの生成メカニズムがあり、その評価には、浮力の効果と上層の風速の効果の両方を入れる必要がある場合があることを示した。なお、下降流となる空気塊の起源がどの程度の高度になるかという問題は、上昇流中での雨・氷の成長、それらが上昇流から外へ落ちる過程、基本場の鉛直シアによって決まる対流の内外の風速差、などが絡みあって決まるもので、対流の力学的な構造・仕組みを考える上でもたいへん興味深い問題である。その解決には、最近、活発になっている観測と合わせてこれまでも増して活発な研究が必要であろう。

参考文献

- Fawbush, E. J. and R. C. Miller, 1954: A basis for forecasting peak wind gusts in non-frontal thunderstorms, Bull. Amer. Meteor. Soc., 35, 14-19.

108; 203 (雷放電; 発光現象)

7. 雷放電に伴う中間圏・電離圏の発光現象*

福 西 浩**

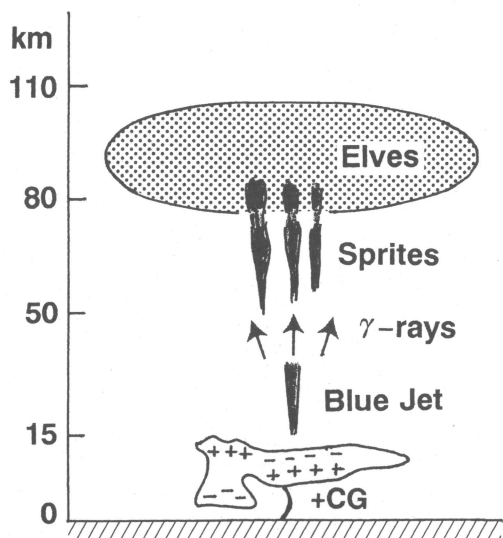
1. はじめに

雷雲の上端から上方に向かう放電に関しては、1950年代より何人かの研究者によってその存在の可能性が指摘されてきた。例えば、Wilson (1956) は、“雷雲の上端と電離圏間の放電は雷放電の際に当然起こるべき

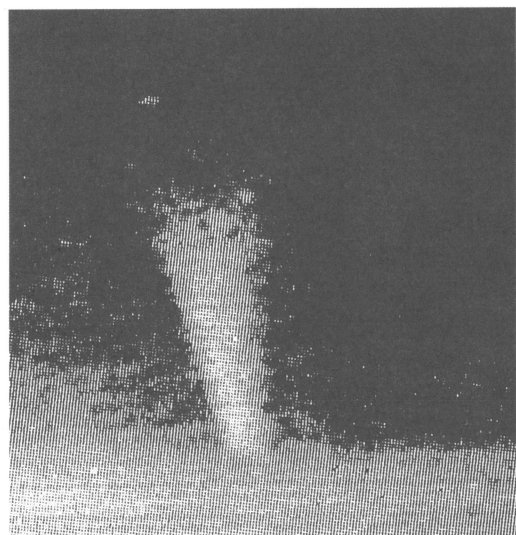
* Lightning-induced transient luminous events in the mesosphere and ionosphere.

** Hiroshi Fukunishi, 東北大学大学院理学研究科.

© 1996 日本気象学会

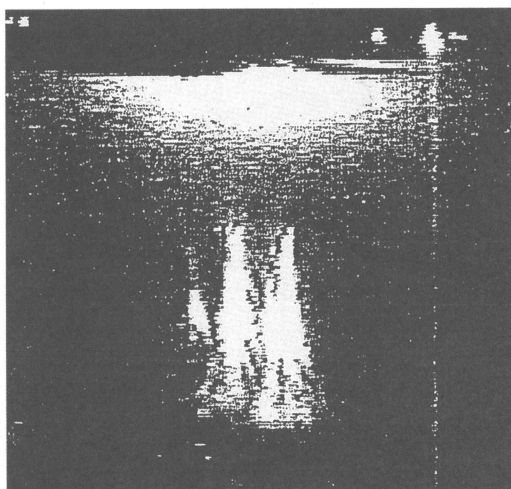


第1図 雷放電による高高度の発光現象.

第2図 Blue Jets の例 (Wescott *et al.*, 1995).

現象と考えられ、私自身、遠方の水平線下の雷放電に伴って起こったと思われる上方に扇形に延びる緑がかった発光を見た」と述べている。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見たとの報告例も多数ある (Vaughan and Vonnegut, 1989)。しかし、ごく最近までこれらの発光現象は、地震に伴う発光現象のように、はっきりとした映像記録がなかったことから、気象学や超高層大気物理学の研究対象にはならなかった。

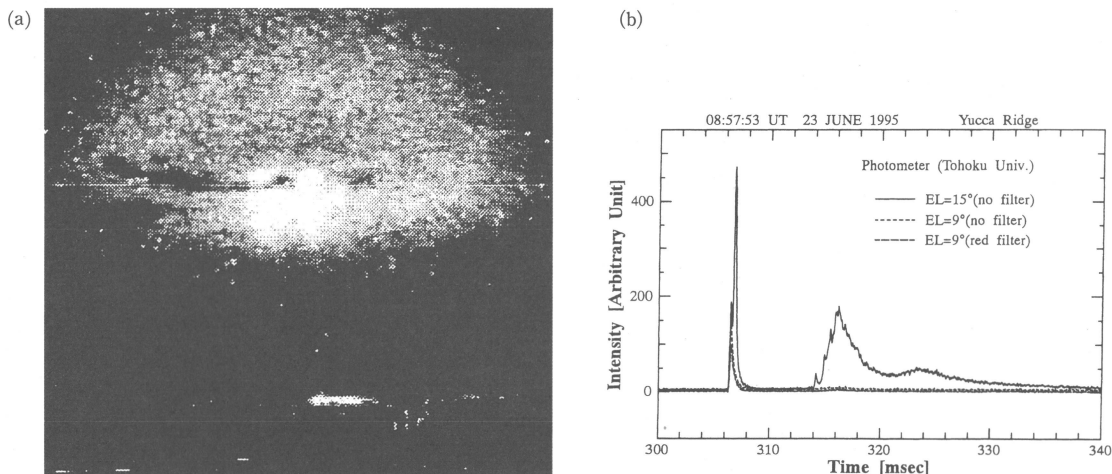
こうした状況を一変させたのは、ミネソタ大学の J.



第3図 Sprites の例 (Lyons, 1996).

R. Winckler, R. C. Franz, R. J. Nemzek によってとられた映像データである。彼らは、1989年7月6日に、ロケット搭載用の高感度カメラを検定するために夜間、星や遠方の雷を観測していたところ、偶然、雷雲の上から上方に2本の筋となって延びる閃光をとらえることに成功した (Franz *et al.*, 1990)。この奇妙な映像に刺激され、その後、スペースシャトル (Vaughan *et al.*, 1992)、航空機 (Sentman and Wescott, 1993)、地上 (Lyons, 1994; Fukunishi *et al.*, 1996) から続々と観測が行われ、雷放電に伴う高高度の発光現象には少なくとも3つのタイプがあることがわかってきた。それらは、成層圏で起こる“ブルージェット”，中間圏で起こる“レッドスプライト”，それに昨年筆者らが発見した下部電離圏で起こる“エルフ”である。これらの各称には一般に英語の複数形 “Blue Jets”, “Red Sprites”, “Elves” が用いられているので、ここではその表記を用いる。地上観測では CCD カメラや SIT カメラによる撮像観測と同時にフォトメーターや分光計による光学観測、ELF/VLF 電波観測、電場観測も行われており、さらに、計算機シミュレーションによる発光機構の研究も始まり、これらの発光現象の解明が急速に進展しつつある。

ここではまず、これまでの観測によって明らかにされた3つのタイプの発光現象の特徴をまとめ、考えられる発生機構について述べる。さらに、これらの現象を解明するためには今後どのような観測や理論的研究が必要となるかについて述べる。



第4図 Elves の例：(a), CCD カメラ画像, (b), フォトメータ強度記録.

2. 雷放電に伴う高高度発光現象の特徴

Blue Jets, Red Sprites, Elves と名付けられた雷放電に伴う高高度の発光現象の出現領域を第1図に示す. これらの発光現象に関連して, 強いガンマ線フラッシュも発生していることがわかってきた (Fishman *et al.*, 1994).

まず Blue Jets と呼ばれる現象は, 雷放電に伴って雷雲の上端から上方に向かって細いビーム状に発光する現象で, 航空機に搭載された高感度 TV カメラによって鮮明にとらえられた (Wescott *et al.*, 1995). 第2図はその例で, 以下の特徴をもつ.

- (1) 雷雲の頂上から上方にビーム状に光る成層圏の発光現象.
- (2) ビームの形状は上方に開いた円錐形で, 先端は約 100 km/s の速度で上方に伸び, 高度 40~50 km まで達する.
- (3) 発光の継続時間は約 200 ミリ秒, 明るさは約 500 キロレーリー, 色は青.

一方, Red Sprites と呼ばれる現象は中間圏で起こる発光現象で, 地上及び航空機観測によって複雑な構造がとらえられている. 第3図は Lyons (1996) が地上の CCD カメラによってとらえた映像である.

Lyons (1994) と Sentman *et al.* (1995) による地上・航空機観測から得られた Red Sprites の特徴は以下のとおりである.

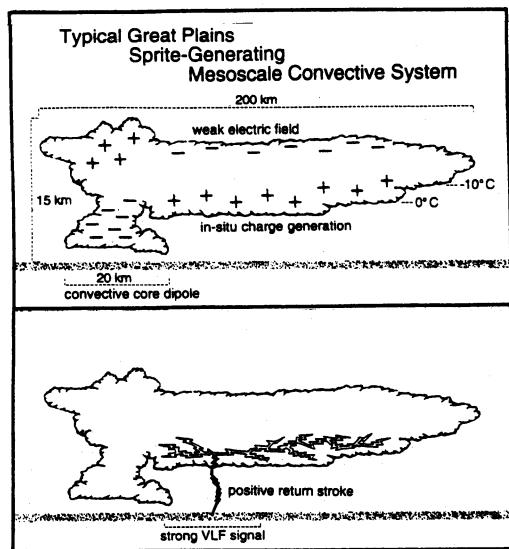
- (1) 雷雲・地上間の正電荷放電に伴って中間圏で発生する現象で, 発光領域の下限の高度は 40~50 km, 上限の高度は 85~95 km, 最も明るい部分

の高度は 65~75 km, 鉛直方向に延びた複数のフィラメントからなり, 水平方向の広がり全体として 10~50 km.

- (2) 色は主に赤, 発光の継続時間は数 10 ミリ秒から 160 ミリ秒程度.
- (3) 平均の発光のエネルギーは約 1~5 キロジュール, パワーは約 0.5~2.5 メガワット.

Elves は, 上述した Blue Jets や Sprites よりもずっと継続時間の短い現象 (約 1 ミリ秒) で, 1995 年 6 月~7 月に米国のコロラド州で実施されたスプライト共同観測で筆者らのグループが用意した高速フォトメーターによって初めてその存在が確認された (Fukunishi *et al.*, 1996). CCD カメラによってとらえられた Elves の映像を第4図(a)に, またフォトメーターによってとらえられた発光強度の時間変化を第4図(b)に示す. この現象の特徴は以下のとおりである.

- (1) 極端に強い (100 キロアンペア以上の) 雷雲・地上間正電荷放電に伴って下部電離圏が発光する現象で, 発光領域の下限の高度は約 75 km, 上限の高度は約 105 km, 水平方向の広がり約 100~300 km と大規模. 色は主に赤, Sprites のような微細構造をもたない.
- (2) 雷雲・地上間放電の直後に強い空電 (VLF 電波) を伴って発生し, 発光の継続時間は約 1 ミリ秒.
- (3) Elves の発生に引き続き約数ミリ秒から数 10 ミリ秒遅れて Sprites が発生する例が多い.



第5図 高高度発光現象を起す雷雲 (Lyons, 1996).

3. 発光メカニズム

雷放電に伴う Sprites と Elves は、水平スケールが 200 km 程度のメソスケール対流システムの雷雲・地上間正電荷放電に伴って起こる (第5図)。Sprites が発生するとき雷雲・地上間の放電電流は約 50~90 キロアンペアで、それ以上の放電電流になると Elves が発生する。Elves に関しては、この現象が雷放電の直後に 1 ミリ秒程度のきわめて短い時間しか発光しないことから、放電によって発生した強力な電磁波のパルスが上方に光速で伝播し、下部電離圏まで到達し、この高度領域の大気を広範囲に加熱・発光させる機構が考えられている (Taranenko *et al.*, 1993; Fukunishi *et al.*, 1996)。一方、Sprites に関しては、正電荷放電により中間圏高度に 2 次的につくり出された 500 V/m 程度の強い電場による加熱・発光の機構が考えられている (Pasco *et al.*, 1995)。Elves に比べ比較的長い継続時間 (数 10 ミリ秒) は、つくり出された電場の緩和時間で考えることができる。しかし、Sprites の複雑な構造をつくり出す機構はまだ全く検討されていない。さらに、Blue Jets に関しては、最近、雷放電によって生じた強い電場によりストリーマー型の電離チャンネルが形成されるモデルが提案された (Pasco *et al.*, 1996)。

一方、ガンマ線フラッシュに関しては、雷放電により 500 V/m 程度の強力な電場がつくり出されれば、1 MeV 程度のエネルギーをもつ宇宙線 2 次粒子がこの

電場によってさらに加速され、ガンマ線放射が起きる可能性が指摘されている (Chang and Price, 1995)。

4. おわりに

雷放電によって引き起こされる成層圏・中間圏・下部電離圏の発光現象の研究が始まったのはここ 4、5 年のことであり、まだまだ多くの謎が残されている。上述した発光機構に関しては、観測データが不十分なことから全くの推測段階であり、今後新しいアイデアで各種の観測を精力的に実施していく必要がある。特に重要な観測は、

- (1) 超高速撮像観測
- (2) 超高速分光観測
- (3) 日本を含むグローバルな地上・航空機観測
- (4) 衛星観測

などである。撮像観測に関しては、1 ミリ秒の継続時間しかない Elves はもちろん、数ミリ秒から数 10 ミリ秒の継続時間をもつ Sprites に対しても、発光領域の動きをとらえるには 1 ミリ秒あるいはそれ以上の時間分解能をもつ超高速カメラが必要となる。しかし、現在の高感度 CCD カメラの時間分解能は 17 ミリ秒であり、新システムの開発が必要となる。また、発光機構を解明するためには発光のスペクトル情報が重要であり、それらを取得するための超高速分光観測システムの開発も必要となる。さらに、これまでの観測は大部分がアメリカ合衆国の中部大平原で行われたものであり、今後は雷の多発地域であるアフリカ、アマゾン、インドネシア、日本等で観測を実施していく必要がある。特に、我が国の北陸地方は、冬に強力な正電荷雷放電が起こることがよく知られており、それに伴って高高度の発光現象が起こっている可能性が十分に考えられ、早期に観測を実施することが望まれる。グローバルな観測を実施していくことは、この電磁現象の地球環境への影響を調べる上できわめて重要と思われる。

雷放電に伴う高高度発光現象が注目されるのは、瞬間的ではあるがガンマ線が発生するほどの大気の強力な加熱が広い領域で起こることである。従ってこれらの現象により高高度の大気の組成が変化する可能性も十分に考えられ、地球環境変動においてこの電磁現象がどのような役割を担っているかを明らかにする必要がある。

計算機シミュレーションによる大気の加熱・発光の機構を解明する研究も始まっているが、きわめて短い

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、本格的なシュミ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. Paciesas, 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**

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

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

** Masashi Hayakawa, 電気通信大学.

© 1996 日本気象学会