

太陽活動—雷活動のリンクの可能性と 超高層雷放電が地球大気へ与える化学的インパクト

佐藤 光輝

(独立行政法人理化学研究所)

1. はじめに
2. 雷放電からの電磁放射 — Schumann 共鳴
3. 雷雲上空での放電発光現象
 - 3-1 スプライト、エルブス、ブルージェット
 - 3-2 化学的影響
 - 3-3 全球発生頻度
4. 太陽活動—雷活動のミッシングリンク
 - 4-1 雷活動の周期性
 - 4-2 太陽活動と雷活動との相関性
 - 4-3 気候変動と雷活動との相関性
5. おわりに

1. はじめに

雷は我々が日常経験することができる最も身近な自然現象の 1 つである。ベンジャミン・フランクリンが雷は放電現象であることを観測的に明らかにしたのは、実に 250 年前の 1752 年のことであり、雷研究の歴史が古いのはその身近さに一因があるといえる。それ以来、放電の素過程や雷雲内部における電荷生成機構などの解明が進む一方で、全地球規模での発生頻度や分布といったマクロな物理量については現在まで不明な点が多かった。

1970 年代になると衛星観測技術が発展し、宇宙空間から雷を観測することが可能になった。そのなかでも MicroLab-1 衛星に搭載された Optical Transient Detector (OTD) と、TRMM 衛星に搭載された Lightning Imaging Sensor (LIS) による雷観測によって、雷は主に夏半球の陸上で 1 秒間に約 50 発の頻度で発生していることが初めて明らかになった (Figure 1) [Christian et al., 2003; Ushio, 2003]。

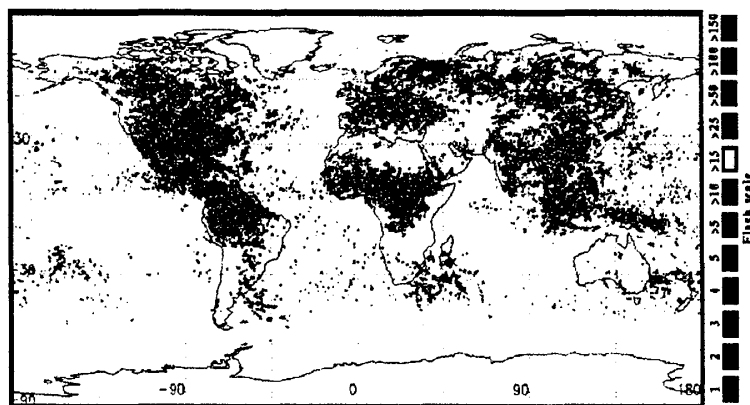


Figure 1. OTD によって観測された 1996 年 8 月の 1 月平均の全球雷発生頻度分布。
(<http://thunder.nsstc.nasa.gov/otd>)

その後も雷の観測的研究は世界中で精力的に行われており、雷雲上空で発生する放電発光現象や雷放電起源のガンマ線放射なども発見され、コンピュータシミュレーションによる物理プロセスの理解も飛躍的に進んでいる。また、雷放電起源の電磁波の観測から、雷活動—太陽活動—気候変動のリンクの可能性も指摘されている。本稿では、それら最新の研究成果を簡単に紹介する。

2. 雷放電からの電磁放射 — Schumann 共鳴

雷放電は雷雲内に蓄えられた電荷が放電という形態で中和される現象である。放電路の内部では数十から数百 kA の電流が、数百 μ sec という短い時間で流れる。そのため、この放電路がアンテナの役割を果たし、数 Hz から数百 MHz までの広い周波数帯域に電磁波を放射する。その放電の時間スケールから、最も放射強度が強くなるのは、3-30 kHz の VLF 帯と 8Hz-3kHz の ELF 帯となる。

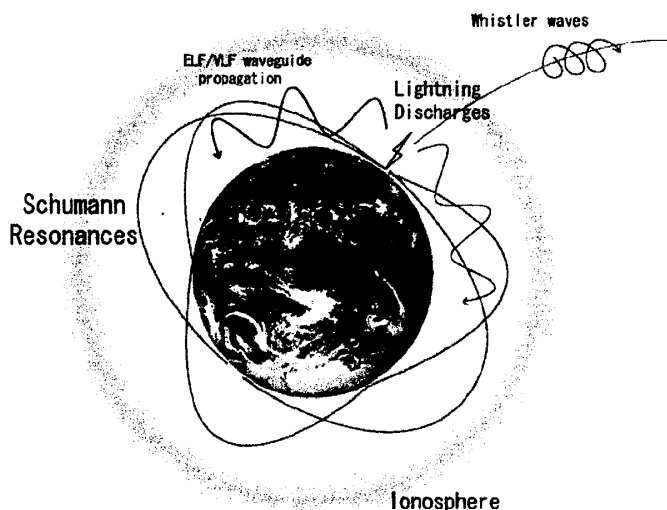


Figure 2. 雷放電から放射される ELF/VLF 波動の伝搬をあらわす概念図。

Figure 2 は、雷放電から放射された ELF/VLF 波動の伝搬の様子を表す概念図である。ELF/VLF 波動は、電離層と地表面に囲まれた導波管の内部を反射し長距離伝搬することができる。また、VLF 波動の一部は電離層を突き抜けホイッスラー波となり、磁力線に沿って地球磁気圏まで、あるいは磁気共役点まで到達することができる。近年では、ある特定の時間・場所で発生した雷の特性を調べることの重要性が増しており、定常的に地球上の雷を監視するための VLF 観測ネットワークや ELF 観測ネットワークの構築が世界的に進んでいる。

雷放電起源の ELF 波動のなかで最も周波数帯の低い 8-50 Hz 帯の電磁波動を、Schumann 共鳴とよんでいる。この波動の減衰率は 0.3 dB/Mm と極端に低いため[Burke and Jones, 1996]、電離層—地表面で閉ざされた導波管を長距離伝搬することが可能である。このため、たった 1 地点の観測であっても世界中の雷活動をモニターすることができることは大きな利点といえる。Schumann 共鳴の電磁波動は、全地球上で 50 flash/sec という割合で発生する雷放電により常に励起されており、これらが導波管を伝搬するとき互いに干渉し共鳴を起こす。Figure 3 上図に示す通り、典型的には Schumann 共鳴の波形は

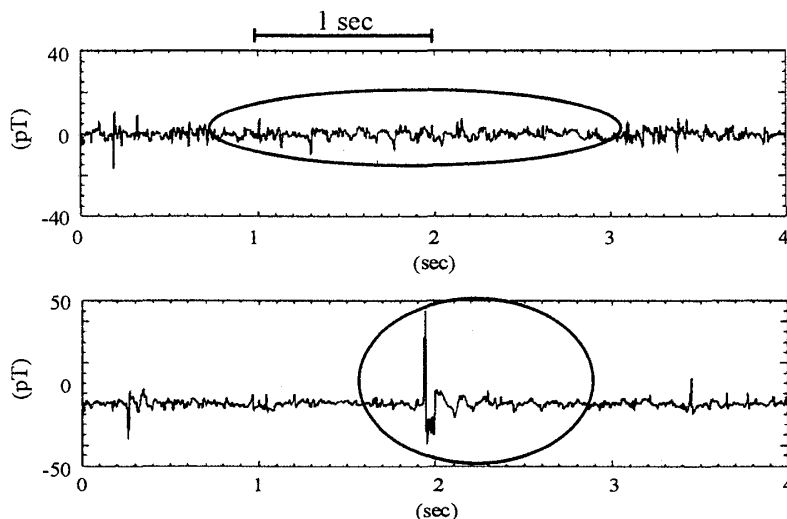


Figure 3. (上) 連続的な Schumann 共鳴波動. (下) トランジェントな Schumann 共鳴波動.

準周期的な連続波形になる。ところが、放電エネルギーの大きいスーパーボルトといわれる雷が世界のある点で発生すると、Schumann 共鳴波動は Figure 3 下図に示されるような、鋭い立ち上がりと共に続く減衰振動波形を示す。この特徴的な Schumann 共鳴波動を特に、トランジェントな Schumann 共鳴波動（もしくは、Q-burst）とよんでいる[Ogawa et al., 1966]。連続的な Schumann 共鳴波動は、多くの雷によって励起された波動の重ね合わせであるのに対し、トランジェントな Schumann 共鳴波動からは、それを励起した雷の発生位置を推定することが可能である。

Schumann 共鳴波動の伝搬速度は、ほぼ光速に等しい。光は 1 秒間に地球を 7.5 周するので、Schumann 共鳴の共鳴周波数の $n=1$ 次モードもほぼそれに等しくなっている。Figure 3 上図に示されるとおり、準周期的なパルスが 1 秒間に約 8 個存在している。厳密には、Schumann 共鳴波動のスペクトルのピークは 7.8, 14, 20, 26, 33, 39, 45 Hz に存在し[Sentman, 1995]、高調波構造を示している (Figure 4)。また、Schumann 共鳴のスペクトル強度は 1 日の間でダイナミックに変動している (Figure 5)。これは、Figure 1 でも示されるように雷多発域であるアフリカ・アメリカ・アジアの各地域の雷活動度に強く依存し、Schumann 共鳴の強度が変動していることを示している。

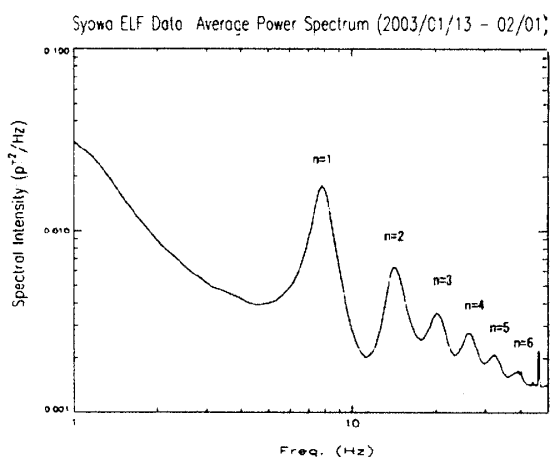


Figure 4. Schumann 共鳴波動のスペクトル構造。

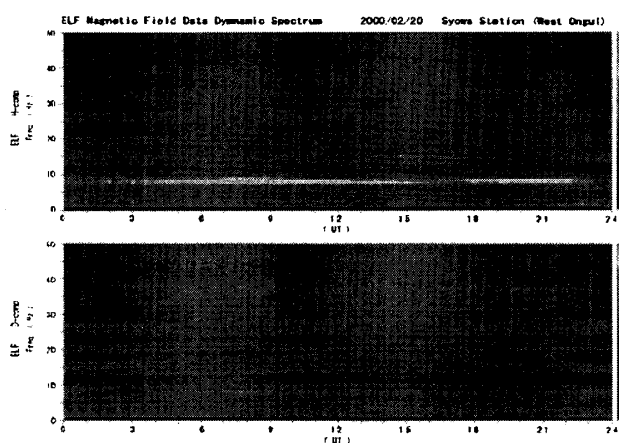


Figure 5. Schumann 共鳴波動のダイナミックスペクトル。

3. 雷雲上空での放電発光現象

20 世紀の初頭 C.T.R. Wilson によって、雷雲上空における放電の可能性が理論的に指摘された[Wilson, 1925]。しかしその後、雷雲上空での放電は観測的に特定されず長いこと忘れ去られていた。大発見がもたらされたのは、1989 年のことであった。米国ミネソタ大学の Franz が、ロケット搭載予定の高感度カメラを較正するために雷雲上空に向けて実験を行っていたところ、偶然、雷雲上空で瞬間的に発光する現象を捉えることに成功した[Franz et al., 1990]。この発光現象こそ、C.T.R. Wilson が予言した現象に他ならなかった。

3-1 スプライト、エルプス、ブルージェット

この現象は、妖精(sprite)のように気まぐれに発生することからスプライトと名付けられた[Sentman et al., 1995; Lyons, 1996]。その後の精力的な地上光学観測により、スプライトの発光高度は 40-90 km で (Figure 6)、発光継続時間は数 msec 程度であることが明らかになった。さらに、地上の雷検出ネット

ワークデータを解析したところ、スプライトは主に、雷雲内の正電荷が放電する正極性の雷雲地上間放電 (+CG) に伴って発生することが明らかになった。スプライトはさらに、その発生形態の違いによってキャロット・スプライトとカラム・スプライトに分類されている。

1990年代には、スプライトとは異なる形態をもつランジェントな放電発光現象が次々と発見された。東北大学の研究グループは1995年米国コロラド州において、高度約90 kmで円冠状に発光する現象を発見し、エルブスと命名した (Figure 7) [Fukunishi et al., 1996]。さらに、アラスカ大学の研究グループは、雷雲の雲頂から高度約40 kmの間で発光するブルージェットを発見した [Wescott et al., 1995]。また、米国と台湾の研究グループはほぼ同時期に、ブルージェットとスプライトが結合した現象を発見し、巨大ジェットと命名した [Pasko et al., 2002; Su et al., 2003]。これらの現象の発生形態をまとめた図が Figure 8 であり、現象の総称として TLEs (Transient Luminous Events) とよばれている。

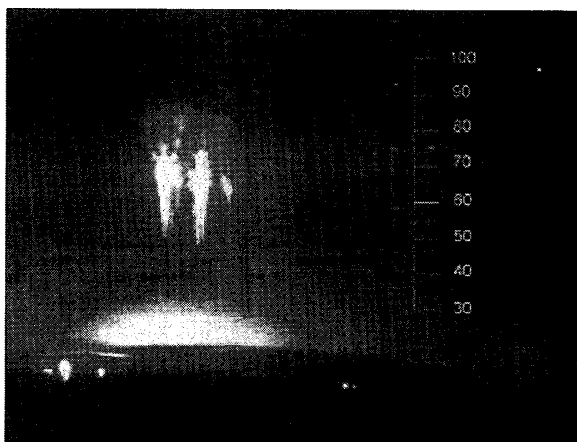


Figure 6. 高感度 CCD カメラにより撮像されたスプライト。
(<http://sprg.ssl.berkeley.edu/atmos/sprites.html>)

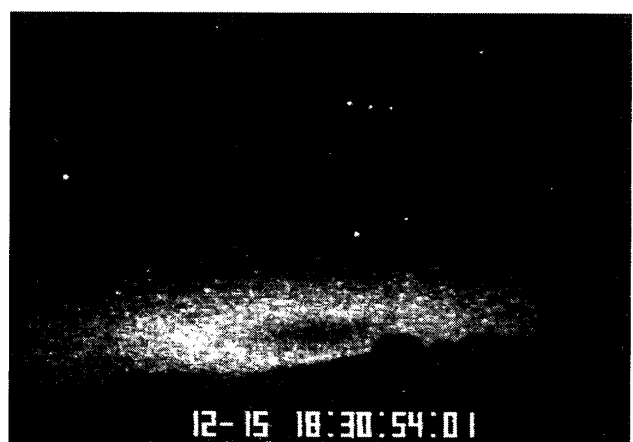


Figure 7. 高感度 CCD カメラにより撮像されたエルブス。
(<http://pat.geophys.tohoku.ac.jp/~thermo/sprites/indexj.htm>)

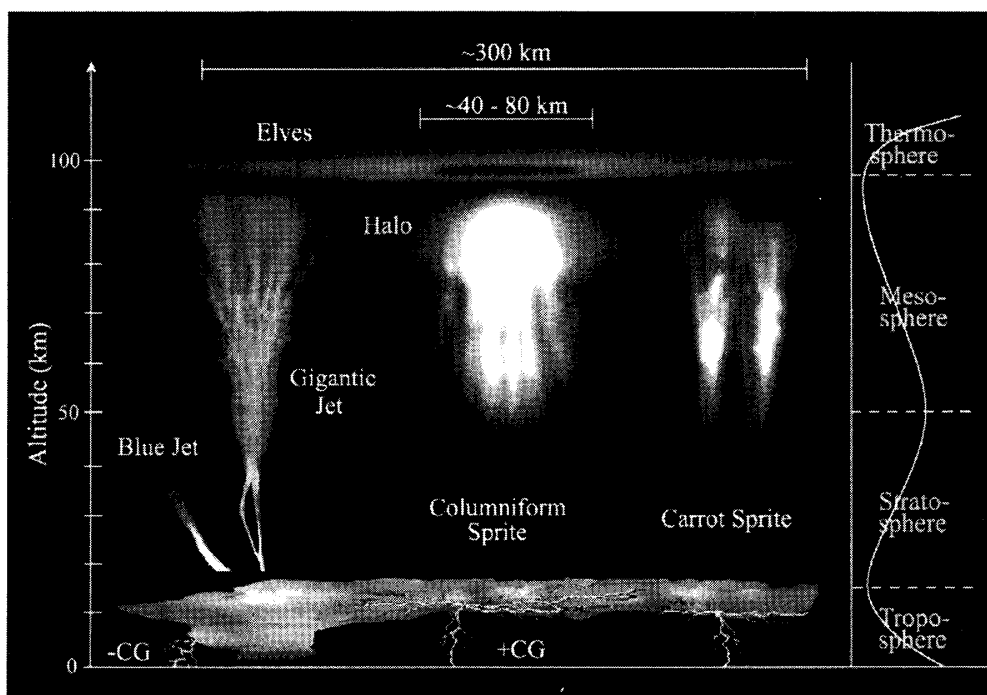


Figure 8. 雷雲上空で発生するランジェントな放電発光現象の発生形態。

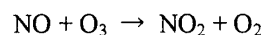
スプライトの発生メカニズムとして現在最も受け入れられているものは、米国スタンフォード大学の研究グループが発表した準静電場モデルである[Pasko *et al.*, 1997]。雷雲上空では、雷雲内の正電荷に引き寄せられて負電荷が存在しているが、+CG によって正電荷が突然失われると、雷雲上空の負電荷が取り残されるかたちとなる。この負の空間電荷によって、雷雲上空には強い下向きの準静電場が発生し、大気中の電子が上向きに加速される。この準静電場の大きさが各高度における絶縁破壊電場を越えている場合、加速された電子と周囲の大気との衝突による雪崩的な電子増殖（絶縁破壊）が進行する。この過程において励起された大気（主に窒素分子）が、基底状態に戻るとき光子を放出する。その光の“束”がスプライトと考えられている。スプライトの色は大気を構成する成分によって決まり、主に窒素分子の 1st positive バンド（赤色）と 2nd positive バンド（青色）の放射が強いことが解っている[Mende *et al.*, 1995; Heavner *et al.*, 1998]。

一方エルブスは、雷放電からの電磁パルス（EMP）によって発生すると考えられている[Inan *et al.*, 1997; Nagano *et al.*, 2003]。雷放電は数百 μ sec の時間内に数十～百 kA の電流が流れるが、これが強い EMP を励起する。この EMP は球殻状に雷雲上空に伝搬するが、電離層下部で反射した波動と上方に伝搬する波とが高度約 90 km 付近で干渉し、周囲の電子を加熱する。それが中性大気と衝突し励起することによって光子が放出されエルブスとして観測される。EMP は球殻状にほぼ光速に等しい速度で伝搬するため、エルブス発光部分の水平伝搬位相速度は、見かけ上光の速度を越える。EMP の強度は雷の極性によらないので、エルブスは+CG でも負極性雷雲地上間放電（-CG）のどちらでも発生することが確かめられている。

ブルージェットや巨大ジェットのメカニズムについては、不明な点が多い。その理由の一つに、これまでの観測事象数が圧倒的に少ないことが挙げられる。

3-2 化学的影響

Figure 8 に示されるとおり、スプライト、エルブス、ブルージェットは高度 10～90 km の成層圏、中間圏、下部熱圏で発生する放電現象である。近年、Pasko [2003]や Neubert [2003]で指摘されているように、地球大気組成に与える化学的影響が無視できないかもしれないという点で TLEs が重要視されている。特に、成層圏で発生するブルージェットや巨大ジェットによる成層圏オゾンへの化学的影響が注目されている。数値シミュレーションの結果によると、スプライトによって高度 60 km における窒素酸化物 (NO_x) や水素酸化物 (HO_x) の数密度が数倍から数千倍大きくなることが示されている[Hiraki *et al.*, 2002]。例えば下式の一酸化窒素とオゾンの反応式で表されるように、



微量気体の密度変化がオゾン破壊過程に重要な影響を与えられとされる。ところが、数値シミュレーションによると、スプライトによって原子状酸素が 10^7 倍大きくなるという結果も得られており、



という反応式で表されるオゾン生成過程も同時に進行すると考えられる。現在のところ、TLEs がオゾンの生成と破壊のどちらにより寄与するのか、どの程度地球全体の大气組成変化に影響を与えているのか、はっきりとした結論は得られていない。

3-3 全球発生頻度

スプライト、エルブス、ブルージェットによる全地球的な大气組成への化学的影響を定量的に推定するためには、2つの重要なパラメータを必要とする。1つは、各 TLEs による組成変化量で、もう 1

つは、TLEs の全球的な発生頻度分布である。各 TLEs による組成変化量については、3.2 章でみたように数値シミュレーションによって徐々に明らかにされつつある。一方、全球的な TLEs の発生頻度についても、地上の電磁波動観測ネットワークデータを用いて、あるいは衛星からの光学観測によって徐々に明らかにされつつある。

2 章で触れたように、Schumann 共鳴波動を用いると全地球的な雷活動を常時モニターすることができる。しかしそればかりでなく、Schumann 共鳴波動を用いると全地球的なスプライト活動をも監視することができる。スプライトを発生させるためには、+CG の放電エネルギー（電荷モーメント）はある程度大きくなくてはならない。なぜなら、+CG によって雷雲上空に発生する準静電場（ E ）の大きさは、

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qdl}{r^3}$$

によって表され、電荷モーメント（ Qdl ）の大きさに比例するからである。そのような大規模の+CG からはトランジェントな Schumann 共鳴波動 (Figure 3) が励起される。つまり、トランジェントな Schumann 共鳴波動を地上の ELF 波動観測ネットワークで検出し、Figure 9 で示されるように CG の発生位置を推定し、電荷モーメントを推定することで、確率的にスプライトの発生頻度分布を推定することが可能である。Sato and Fukunishi [2003] は、このようにしてトランジェントな Schumann 共鳴波動から全球的なスプライト発生頻度分布を推定した。その結果、スプライトはアフリカ、南北アメリカ、アジアの各域で頻発し、1 日あたり約 1300 イベント発生していることが明らかになった。しかしながらこの手法は、振幅が大きいトランジェントな Schumann 共鳴波動のみを選別していることや、+CG の電荷モーメントが小さくてもスプライトが発生することなどから、1 日あたり 1300 イベントというのはかなり過小評価した値と考えられる。実際、2003 年にスペースシャトル・コロンビアによって行われたスプライト観測では、1 日あたり約 17000 イベント発生しているという推定結果もある。

日本・米国が開発した TLEs 光学観測器 (ISUAL) が台湾の FORMOSAT-2 衛星 (Figure 10) に搭載され、2004 年に打ち上げられた。ISUAL の目的は、宇宙空間から TLEs を観測することによって、時間・空間・波長的な特徴を捉えることと、全地球的な発生分布を統計的に調べることにある。これまでに、約 2000 イベント以上の TLEs が ISUAL によって観測されており、詳細なデータ解析から、より精度高い全球的発生頻度分布が明らかにされると期待される。

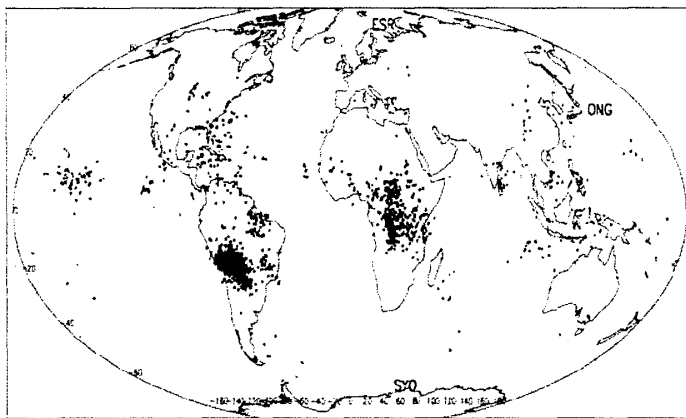


Figure 9. トランジェントな Schumann 共鳴波動から推定した全球的雷の発生点分布。

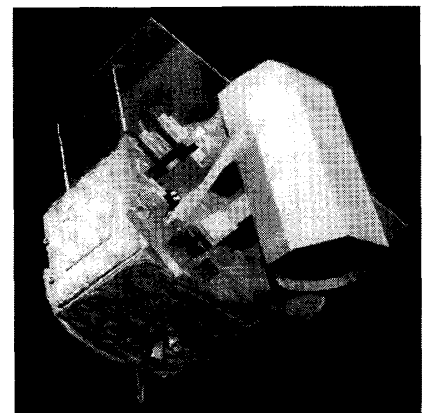


Figure 10. 台湾・日本・米国が打ち上げたスプライト観測衛星 FORMOSAT-2.

4. 太陽活動—雷活動のミッシングリンク

雷活動にはどのような周期性が存在するのかということは、ごく最近まで明らかになっていなかった。*Füllekrug and Fraser-Smith [1996]*は世界の3点で得られた ELF データを解析し、雷活動には数十日周期の変動が存在することを突き止めたが、解析データ期間の短さから明確なスペクトルを示すには至らなかった。*Sato and Fukunishi [2005]*ではこの問題を解決するために、3年分の ELF データを解析して周期性を明確に決定するとともに、その変動が気候変動や太陽活動とどのようにリンクしているのかを調べ、新たな事実を次々と発見した。

4-1 雷活動の周期性

水平2成分の磁場変動を検出する ELF 波動観測装置を南極昭和基地（南緯 69°，東経 39.6°）に設置し、2000年2月から定常的観測を行っている。Figure 3 に示すように雷放電起源の Schumann 共鳴波動の振幅は数 pT 程度と非常に微弱であるにも関わらず、Schumann 共鳴の周波数帯域は人間活動に起因する人工雑音レベルが桁違いに大きい。このため、なるべく静かな電磁環境でこの波動を観測することが重要となり、南極域は絶好の観測点の一つといえる。昭和基地で得られた質の高い磁場波形データを2000年2月から3年間分用いて、まず、Figure 5 に示されるように、FFT を用いて1日分のダイナミックスペクトルを計算し、Schumann 共鳴の $n=1, 2, 3$ 次モードのスペクトル強度を抽出した。この1日分のスペクトル強度変化を、縦軸 UT にとり横軸 Month 方向へ並べたダイアグラムが Figure 11(a) である。この図から、雷活動には明瞭な年変動が存在することが判明した。

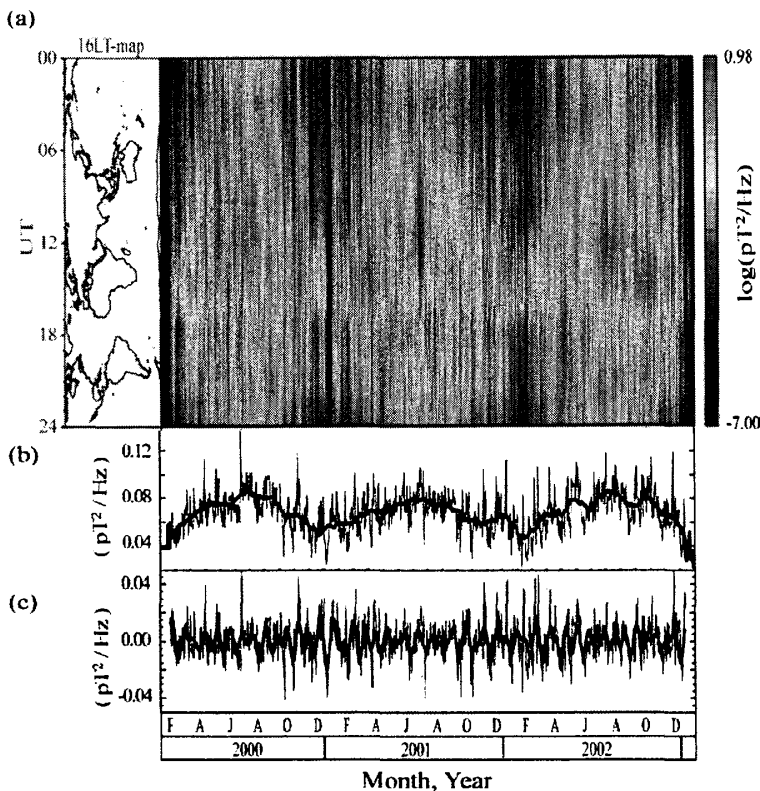


Figure 11. (a) Schumann 共鳴スペクトル強度の UT-Month ダイアグラム。左側の地図は 16LT に相当する地域を UT に対してプロットした図。(b) スペクトル強度変動の日平均値プロット。(c) (b)の波形から 40 日以上長周期成分を差し引いた波形。赤線は 20・40 日のバンドパス波形を示す。

一般的に雷活動は、16LT でピークを迎えると報告されていることから、16LT に相当する地域を UT に対してプロットした世界地図が Figure 11(a)の左側に示されている(例えば、日本の 16LT は 07UT に相当するように地図を描く)。この世界地図と、UT-Month ダイアグラムを対応させると、06-12UT のパワー上昇はアジア域の雷活動によるもので、同様に 12-16UT はアフリカ域の、18-24UT および 00-01 UT は南北アメリカ域の雷活動によるものであることが判明した。

次に、UT-Month ダイアグラムから、スペクトル強度の日平均値を求め3年間分プロットしたのが Figure 11(b)である。黒太線は 40 日の window で移動平均をとった波形を示す。この図をみ

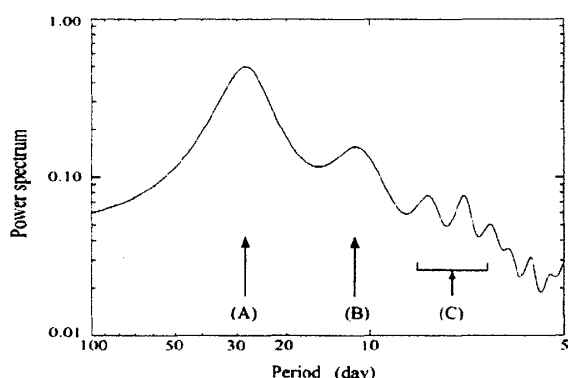


Figure 12. Figure 11(c)のMEM パワースペクトル.

次に、Figure 11(b)から移動平均波形を差し引いた波形を Figure 11(c)に示す。この波形の周期性を定量的に推定するため、パワースペクトルを MEM によって求めた結果 (Figure 12)、周期 28 日、11 日、4-6 日にピークをもつことが明らかとなった。この雷活動の約 10 日周期と約 5 日周期の変動については、近年いくつかの報告例があり、赤道域のプラネタリー波によって周期的に低気圧域と高気圧域が雷多発帯上空を通り過ぎ、雷の発生頻度が変調を受けたと解釈されている。しかし、明確な 28 日の周期性については過去に報告例が無く、世界で初めて明らかになった。Figure 11(c)の赤線は 20-40 日のバンドパス波形であるが、準周期的な変動が確かに存在していることが明らかである。Figure 11(b)のスペクトル強度変動の平均値に対し、約 40%もの大きさをもっている。

ここで注意すべき点が 1 つある。それは、Schumann 共鳴波動は電離層を反射して長距離伝搬するため、28 日の周期性は“雷自身の周期的変動”ではなく、“電離層効果の周期的変動”をみている可能性があるかもしれないことである。Schumann 共鳴の磁場強度は、波動方程式を解くことによって以下の式で表される [Sentman, 1995]。

$$H_{\phi} = \frac{Idl}{4\pi h R_E} \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)-\nu(\nu+1)} P_n^1(\cos \theta)$$

ここで、 Idl は電流モーメント、 R_E は地球半径、 n は共鳴の次数、 ν はモード固有値、 P_n^1 は Legendre 陪関数、 θ は雷から観測者までの角距離で、 h は電離層反射高度である。この式に従うと、電離層の電気伝導度に変化し波動の反射高度 h が 28 日周期で変化すると、Schumann 共鳴の磁場強度も 28 日で変化することになる。モデルを用いて電離層反射高度の変動を調べた結果、電離層反射高度にも約 30 日の周期性が存在するが、Schumann 共鳴の磁場強度変動とは位相や振幅が全く一致しないことが解った。このことから、Schumann 共鳴波動のスペクトル強度変動の原因は、電離層効果ではなく、雷活動自身の 28 日変動であることが確かめられた。

4-2 太陽活動と雷活動との相関性

太陽 11 年周期と気候変動との相関性については近年盛んに調べられている。中でも有名なのが、Svensmark and Friis-Christensen [1997]によって報告された、宇宙線入射量と雲量との相関関係の論文である。これによると、太陽 11 年周期に伴い宇宙線入射量も 11 年周期で変動し、雲量もまったく同位相で相関していることが示されている。また、Schlegel et al. [2001]は雷の年間発生頻度と太陽 11 年周期との相関関係を調べた結果、両者は正相関していることを示した。

雷活動の 28 日周期に最も興味を引かれるのは、その周期が地球から見た太陽の自転周期 (約 27 日) にほぼ等しい点である。太陽 11 年周期と気候変動が相関しているとすれば、太陽 27 日周期とも気候

ると、北半球が夏になる期間はスペクトル強度が上昇し、逆に北半球が冬となる期間はスペクトル強度が低下している。Figure 1 の全球雷分布を見ても解るとおり雷は主に陸域で発生するため、陸域が集中している北半球が夏の期間に雷が頻発することが原因と考えられる。

変動は相関しているのだろうか？もし、太陽活動と雷活動がリンクしているとするれば、どのようなメカニズムなのであろうか？この問題を解決するために、Schumann 共鳴スペクトル強度変動 (Figure 11(c)) と、太陽活動度を示す種々のパラメータ (太陽黒点数、F10.7 指数、宇宙線入射量、Kp 指数、Dst 指数、放射線帯の相対論的イオン・電子フラックス) との相関解析を行った。

ELF データ解析期間と同じ 2000 年 2 月から 2003 年 1 月の 3 年間分の太陽活動パラメータを用いて、Schumann 共鳴スペクトル強度変動波形を求めるとときと同様の移動平均波形の差し引き処理を施し、MEM によりパワースペクトルを求めた。その結果、いずれの太陽活動パラメータも雷活動 28 日周期にほぼ等しい 27-33 日周期にピークを示した。次に、位相関係を詳細に調べるために、Schumann 共鳴スペクトル強度変動波形とのダイナミッククロススペクトル解析を行った。しかし、いずれのパラメータとも明確な位相関係を見出すことはできなかった。波形を詳細に比較してみても、ある期間では位相や周期性が一致するが別の期間では全く異なるという非常に複雑な関係にあることが解った。現在も精力的に研究を進めているが、太陽活動と雷活動とのリンクメカニズムの解明には至っていない。

4-3 気候変動と雷活動との相関性

世界中で発生する雷の 80 %は、北緯 30 度から南緯 30 度の地域で発生していることが解っている。そのような地域では、雷を発生させる雷雲の雲頂高度は時として十数 km に達し、水平方向には数百～千 km の広がりをもっている。はたして、そのような雲頂高度の高い雲と雷活動との間には、何らかの相関関係があるのだろうか？相関関係があるとするれば、どのような位相関係になっているのだろうか？このような視点に立って、雷活動と雲量との相関関係を詳細に調べた。

ここでは北緯 30 度から南緯 30 度の領域を熱帯域と定義し、気象衛星によって得られている赤外雲画像から、熱帯域かつ雲頂高度が 8 km 以上となる領域を抽出した。赤外雲画像は 3 時間毎に得られるので、熱帯域で雲頂高度が 8 km 以上となる画素数の日平均値を 8 枚の画像から求める。このようにして、2001 年 7 月から 2003 年 1 月までの 1.5 年分のデータから雲量変動を求めた (Figure 13)。この雲量変動と Schumann 共鳴スペクトル強度変動のクロススペクトルを求めた結果、周期約 24 日にピークを示し、コヒーレンスは 0.7 となった。さらに位相関係を調べるために、ダイナミッククロススペクトル解析を行った。Figure 14 は、ダイナミック位相スペクトルから求めた位相ヒストグラムである。縦軸に周期を横軸に位相をとり、赤色であればあるほどその周期・位相の頻度がダイナミック位相スペクトル上で高かったことを示している。この図から明らかなおお、周期約 24 日 (およびその長周期帯) では、明瞭な逆位相の関係を示している。

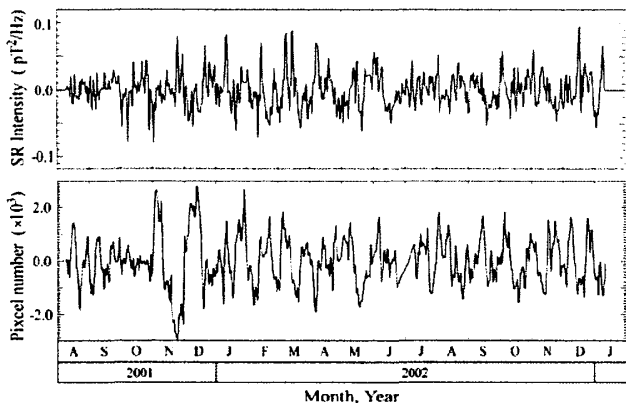


Figure 13. 上から Schumann 共鳴スペクトル強度変動, 熱帯域の雲量変動.

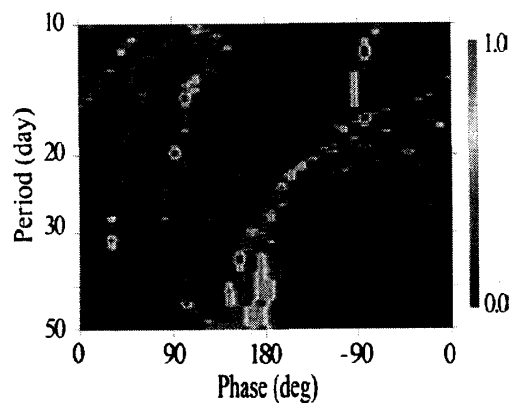


Figure 14. Schumann 共鳴スペクトル強度変動と雲量変動の位相ダイアグラム.

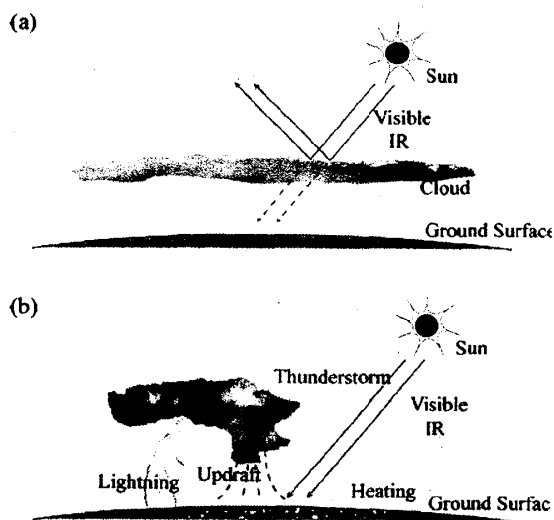


Figure 16. Schumann 共鳴スペクトル強度変動と雲量変動の位相ダイアグラム.

同様の解析を、熱帯域における雲頂高度が 10 km 以上の雲に対しても行った。その結果、クロススペクトルは周期約 27 日にピークを示し、コヒーレンスが 0.7 となった。さらに位相ダイアグラムも、Figure 15 のように逆位相の関係を示した。つまりこれらの結果は、雲頂高度の高い雲量が増すと雷活動は低下し、逆に、雲量が減ると雷活動は上昇することを示している。

この物理的解釈を模式的に表したのが、Figure 16 である。Figure 16(a)は、雲頂高度の高い雲が覆っている場合を示しているが、このとき太陽の可視光と赤外線は雲頂で反射して地表面へは届かず、地表面は温まらないため、夕立的な熱雷が発生しない。しかし、Figure 16(b)のように雲頂高度の高い雲がほとんどない場合、太陽の可視光と赤外線は地表面まで達し、上昇気流を発生させる。これにより雷雲が発生し雷活動が活発になる。雲量と雷活動の逆位相関係はこのように解釈される。

5. おわりに

Williams [1992]や Price [2000]で報告されているように、Schumann 共鳴波動を用いると熱帯域の温度変異や、成層圏における水蒸気量（温室効果ガス）をリアルタイムに検出することができる。さらに、Sato and Fukunishi [2005]で報告されているように、Schumann 共鳴波動は雲量変動などの気候変動をも検知することができる。雷活動は、地球の気候変動に敏感に反応することから、Schumann 共鳴波動などの雷放電起源の電磁波動の定常観測は、安価に地球環境変動をリアルタイムでモニタする手段として最も有効であるといえる。

雷研究はこの 30 年の間に劇的に進歩した。その大きな役割を担ったのが、衛星観測技術の進歩であり、雷雲上空で発生する放電発光現象の発見であった。近年では、雷放電から放射されたと考えられるガンマ線が衛星高度で観測されており、雷は地球電離圏や磁気圏へのエネルギー流入という観点からその重要性を増している。今後 5 年以内に、TLEs や地球起源のガンマ線を観測するための小型衛星を打ち上げるミッションが複数計画されており、ますますの発展が期待される。

参考文献

- Burke, C.P., and D.L. Jones, On the polarity and continuing currents in unusually large lightning flashes deduced from ELF events, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **58**, 531-540, 1996.
- Christian, H., R. Blakeslee, D. Boccippio, W. Boeck, D. Buechler, K. Driscoll, S. Goodman, J. Hall, W. Koshak, D. Mach, and M. Stewart, Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, *J. Geophys. Res.*, **108**, 4005, doi:10.1029/2002JD002347, 2003.
- Franz, R.C., R.J. Nemzek, and J.R. Winckler, Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system, *Science*, **249**, 48-51, 1990.
- Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U.S. Inan, and W.A. Lyons, Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2157-2160, 1996.
- Füllekrug, M., and A.C. Fraser-Smith, Further evidence for a global correlation of the Earth-ionosphere cavity resonances, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2773-2776, 1996.
- Heavner, M.J., D.R. Moudry, D.D. Sentman, E.M. Wescott, J.S. Morrill, C. Siefing, E.J. Bucsela, D.L. Osborne, J.T. Desroschers, H. Nielsen, J. Winick, J. Kristl, T. Hudson, L.M. Peticolas, and V. Besser, Ionization in sprites, *EOS Trans. AGU*, **79**(45), F165, 1998.
- Hiraki, Y., T. Lizhu, H. Fukunishi, K. Nanbu, and H. Fujiwara, Development of a new numerical model for investigating the energetics of sprites, *EOS Trans. AGU*, **83**(47), Fall Meet. Suppl., Abstract A11C-0105, 2002.
- Inan, U.S., W.A. Sampson, and Y.N. Taranenko, Space-time structure of optical flashes and ionization changes produced by lightning-EMP, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 133-136, 1996.
- Lyons, W.A., Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems, *J. Geophys. Res.*, **101**, 29641-29651, 1996.
- Mende, S.B., R.L. Rairden, G.R. Swenson, and W.A. Lyons, Sprite spectra; NS₂ 1 PG band identification, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2633-2636, 1995.
- Nagano, I., S. Yagitani, K. Miyamura, and S. Makino, Full-wave analysis of elves created by lightning-generated electromagnetic pulses, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **65**, 615-625, 2003.
- Neubert, T., On sprites and their exotic kin, *Science*, **300**, 747-749, 2003.
- Ogawa, T., Y. Tanaka, T. Miura, and M. Yasuhara, Observations of natural ELF and VLF electromagnetic noises by using ball antennas, *J. Geomag. Geoelect.*, **18**, 443-454, 1966.
- Pasko, V.P., U.S. Inan, T.F. Bell, and Y.N. Taranenko, Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 4529-4561, 1997.
- Pasko, V.P., M.A. Stanley, J.D. Mathews, U.S. Inan, and T.G. Wood, Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere, *Nature*, **416**, 152-154, 2002.
- Pasko, V.P., Electric jets, *Nature*, **423**, 927-929, 2003.
- Price, C., Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor, *Nature*, **406**, 290-293, 2000.
- Sato, M., and H. Fukunishi, Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1859, doi: 10.1029/2003GL017291, 2003.
- Sato, M., and H. Fukunishi, New evidence for a link between lightning activity and tropical upper cloud coverage, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12807, doi: 10.1029/2005GL022865, 2005.
- Schlegel, K., G. Diendorfer, S. Them, and M. Schmidt, Thunderstorms, lightning and solar activity -- Middle Europe, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **63**, 1705-1713, 2001.
- Sentman, D.D., E.M. Wescott, D.L. Osborne, D.L. Hampton, and M.J. Heavner, Preliminary results from the Sprite94 aircraft campaign: 1. Red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1205-1208, 1995.
- Sentman, D.D., Schumann resonances, in *CRC Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, edited by H. Volland, pp. 267--295, CRC Press, FLA., 1995.
- Su, H.T., R.R. Hsu, A.B. Chen, Y.C. Wang, W.S. Hsiao, W.C. Lai, L.C. Lee, M. Sato, and H. Fukunishi, Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere, *Nature*, **423**, 974-976, 2003.
- Svensmark, H., and E. Friis-Christensen, Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage -- a missing link in solar--climate relationship, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **59**, 1225-1232, 1997.
- Ushio, T., Lightning observation by the LIS aboard the TRMM satellite, *Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting*, Abstract E024-012, 2003.
- Wescott, E.M., D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton, and M. Heavner, Preliminary results from the Sprite94 aircraft campaign: 2. Blue jets, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1209-1212, 1995.
- Williams, E.R., The Schumann resonance: A global tropical thermometer, *Science*, **256**, 1184-1187, 1992.
- Wilson, C.T.R., The electric field of a thundercloud and some of its effects, *Proc. Phys. Soc. London*, **37**, 32D-37D, 1925.