

GLIMS ミッションに期待される科学： 高高度発光現象

佐藤光輝⁽¹⁾，牛尾知雄⁽²⁾，森本健志⁽²⁾，高橋幸弘⁽³⁾，Umran Inan⁽⁴⁾，芳原容英⁽⁵⁾，菊池雅行⁽⁶⁾，
石田良平⁽⁷⁾，吉田和哉⁽⁸⁾，坂本祐二⁽⁸⁾，奥山圭一⁽⁵⁾，河崎善一郎⁽²⁾，鈴木睦⁽⁹⁾，山崎敦⁽⁹⁾，阿部琢美⁽⁹⁾

(1)北海道大学 大学院理学研究院，(2)大阪大学 大学院工学研究科，(3)東北大学 大学院理学研究科，
(4)スタンフォード大学 電子工学科，(5)津山工業高等専門学校 電子制御工学科，(6)国立極地研究所，
(7)大阪府立大学 工学研究科，(8)東北大学 大学院工学研究科，(9)宇宙科学研究本部 / JAXA

1. 高高度発光現象(TLEs)

高高度発光現象は、対流圏で発生する雷雲地上間放電(CG: Cloud-to-Ground discharge)に伴いその上空の成層圏・中間圏・下部熱圏で発生する過渡的な放電発光現象(TLEs : Transient Luminous Events)のことであり、1990年代に相次いで発見された。その発生形態の違いによって、スプライト、エルブス、ブルージェットなどと分類されている(図 1)。TLEs のなかでもスプライトは、発生メカニズムとして次の準静電場モデルが考えられている。つまり、(1) 数10 Cを超える放電電荷量をもつCGが発生する、(2) 直後に雷雲上空に準静電的な下向きの電場が形成される、(3) 準静電場によって電子が加速され周囲の中性大気と衝突する、(4) 加速された電子との衝突によって励起した中性大気が基底状態にもどるときにエネルギーを光として放出する、(5) その光の束がスプライトとして観測される、というモデルである。しかし、このモデルによって完全に説明ができない多くの事例の存在や、全球発生頻度分布や発生条件などは、発見以来 20 年近くたっても未解明な問題として残されている。

GLIMS(GLIMS: Global Lightning and sprItE MeasurementS on JEM-EF)ミッションは、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験モジュール(JEM)曝露部(EF)から、雷放電とスプライトをはじめとする TLEs を軌道上から観測するミッションである。このミッションでは、雷放電とTLEsを光学観測器および電波観測器を用いて天底観測し、未解明の問題を解明することが目的である。このミッションによって得られる科学成果は大きく分けて3つあり、(I) TLEsの全球発生頻度分布を特定すること、(II) TLEsの発生条件とメカニズムの特定、(III) スプライトを励起する電子エネルギーおよび電場強度の推定、である。これらを順を追って説明する。

2. 期待される科学 - TLEsの全球分布の特定

TLEsの発見以来、精力的な地上光学・電波観測が行われている。しかしながら、TLEsがどこでどれほどの頻度で発生しているのかは、未だに明らかになっていない。この理由として、地上光学観測では観測点の場所や天候に大きく左右されることと、観測範囲が限定されることにある。海上からの継続的な観測は不可能であるし、雷放電の主発生領域であるアフリカなどではほとんど観測が行われていない。近年では、Sato and Fukunishi [2003]によって、ELF帯電磁波観測データからCGの鉛直電荷モ

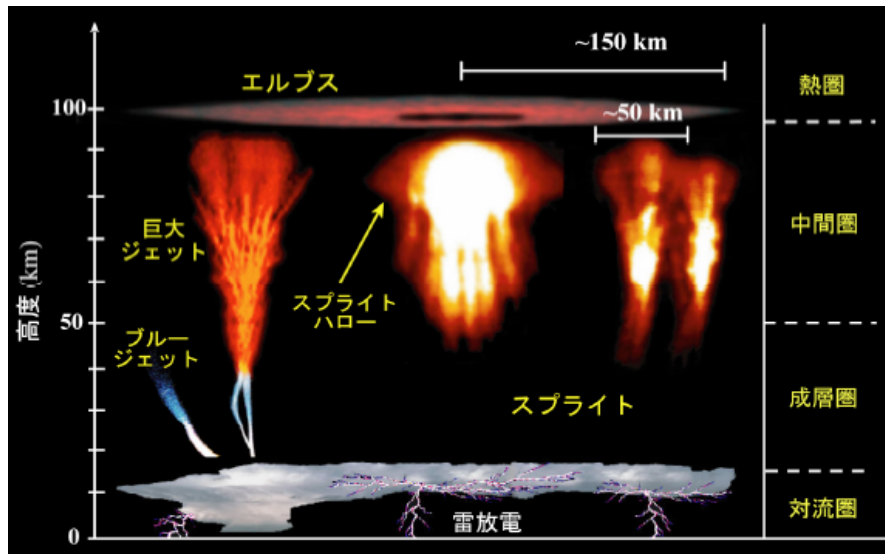


図 1. 高高度発光現象の発生形態.

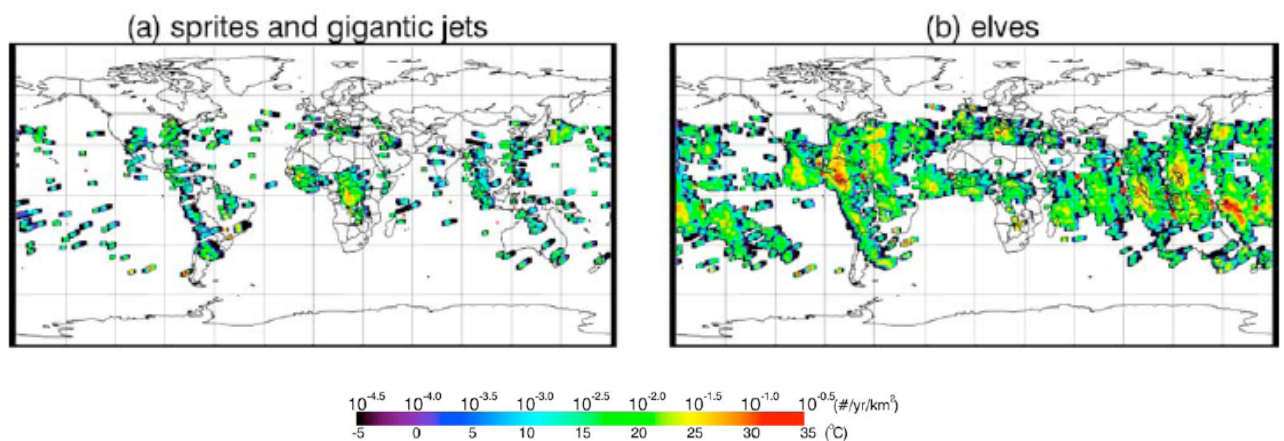


図 2. FORMOSAT-2 衛星の TLEs 観測データから推定されたスプライトとエルプスの全球発生頻度分布図.

ーメント(放電電荷量と放電路の積)を求め、スプライトの全球発生頻度分布を推定している。この手法では場所や気象条件を選ばずに全球の頻度分布を推定できるという利点があるが、スプライトの発生頻度を確率的にしか求められないという欠点がある。また、台湾の FORMOSAT-2 衛星が宇宙空間からの TLEs 観測を 2004 年から開始し、図 2 に示すような全球発生頻度分布を推定している[Chen et al., 2008]。しかし、FORMOSAT-2 衛星は太陽同期極軌道衛星であり固定 LT を周回するため、全球分布を推定する場合、雷活動の LT 依存性を仮定せねばならず、誤差が大きいと考えられている。一方、GLIMS が搭載される ISS は、軌道傾斜角が 51°であり全 LT 域を走査観測することが可能である。この観測方法は、NASA の OTD や TRMM/LIS などの雷放電観測衛星と同一であり、誤差の低い全球分布を世界で初めて導出することが可能であると考えられる。

特に、グローバルサーキットと呼ばれる地表面と D 層との間の 3 次元電流系に対し、雷放電のみならずスプライトがどのような寄与をしているのかを定量的に推定するためには、スプライトの全球発生頻度

分布が必要不可欠の情報であり、その発展系としての雲物理や気候変動への影響の評価に大きく貢献すると考えられる。

3. 期待される科学 - 発生メカニズム・発生条件の特定

スプライトの発生メカニズムとして、図 3 に示す CG により励起された準静電場による、電子加速と絶縁破壊のモデル(準静電場モデル)が最も有力と考えられている[Pasko *et al.*, 1997]。しかしながら、このモデルでは説明ができない観測的事実が次々と明らかになっている。例えば、(a)電荷モーメントが数 100 C·km と小さくてもスプライトが発生する点、(b)スプライトが必ずしも CG の直上で発生せずに最大 50 km の位置ずれが起こる点、(c)CG とスプライトには最大数 100 ms の遅延時間が存在する点、(d)カラム状やキャロット状など異なった発生形態をもつ点、(e)同時に複数のカラム状スプライトが発生する点、などである。つまり、何が発生条件を決めているのかという点と、それに関連するメカニズムが未だに確定していない。

この未説明の問題を解くカギとして考えられているのは、雷雲内部に流れる雷放電水平電流の役割である。Adach *et al.* [2004]は、カラム状スプライトが発生したときのカラムの本数および長さ、雷放電のピーク電流値と電荷モーメントとの関連性を調べた(図 4)。その結果、カラムの本数はピーク電流値に比例し、カラムの長さは電荷モーメントに比例することを突き止めた。つまり、雷放電の鉛直および水平雷放電電流から放射される電磁パルスがカラム発生種の種をつくり、カラムの規模は電荷モーメントが決めているという事実を強く示唆する。雷放電路から放射される複数の電磁パルスが局所的に強電界領域を形成して、スプライトの生成・水平空間分布構造を決めている可能性を示している。この可能性を観測的に明らかにするためには、スプライトと雷放電を真上から観測することが本質的であり、ISS は絶好の観測機会を与える。

過去に一度だけ、ISS からのスプライト光学観測が 1 週間程度のキャンペーン的に実施されたことがある[Blank *et al.*, 2004]。この観測から、数例の雷発光が検出され、筆者らはスプライトも観測されていると結論している。しかし、観測画像データにおいて、雷発光部分とスプライト発光部分が明確に重複しており、さらに、通常スプライトが発生した場合に検出されるべき ELF 帯のシューマン共鳴波動が、それらの事例において地上の観測網で検出されておらず、これらの観測においてスプライトが検出されたとはいえられていない。

GLIMS ミッションでは、ミッションライフを 2 年と設定しており、長期間にわたって多くの事例データを蓄積することによって、世界で初めてスプライトの天底観測に成功すると期待される。

4. 期待される科学 - 電子温度・電場強度の特定

スプライトを引き起こす電子のエネルギー推定は、スプライトの物理・化学プロセスを解明する上で、キーパラメータとなっている。スプライト発光を引き起こす電子のエネルギー推定は、これまでに地上の光学観測データを解析することによって求められている。Miyasato *et al.* [2003]では、スプライトの赤色帯発光強度および青色帯発光強度を観測する 2 台のアレイフォトメーターを用いてスプライトを観測し、そ

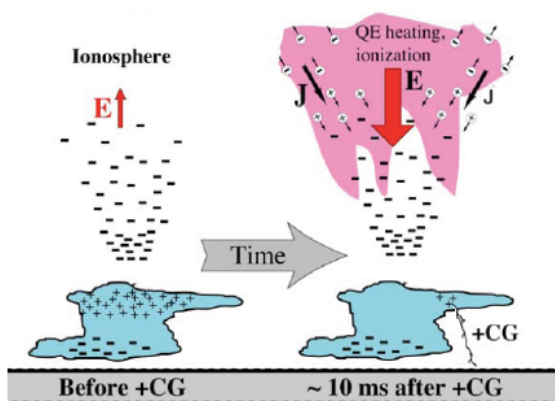


図 3. 準静電場モデルの概念図.

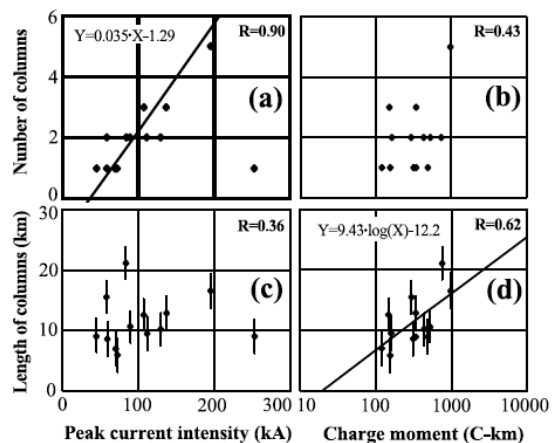


図 4. カラム状スプライトの発生本数・長さや雷放電のピーク電流値・電荷モーメントとの関係.

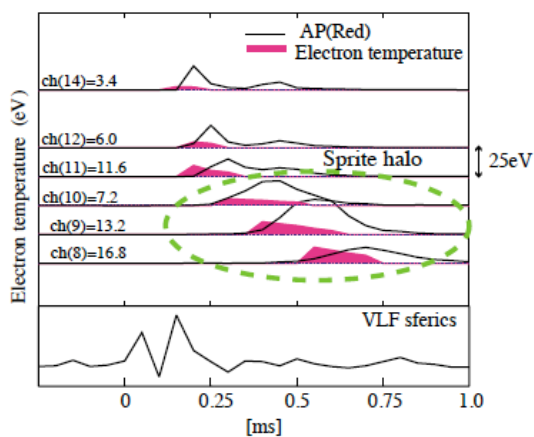


図 5. (左)スプライトの CCD 画像とアレイフォトメーターの視野. (右)アレイフォトメーターから推定した電子エネルギー.

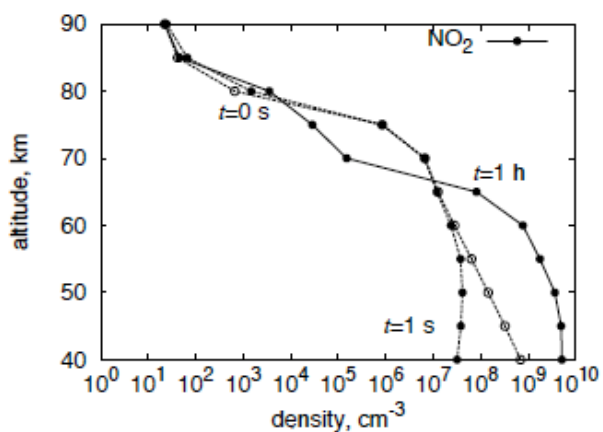
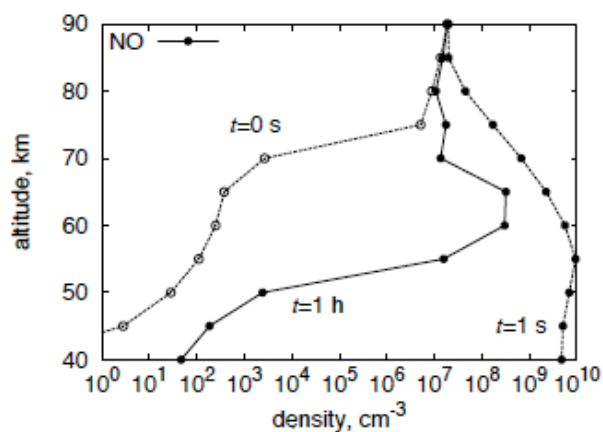


図 6. (左) スプライトが発生したときの NO と、(右)NO₂ の密度変化を計算したシミュレーション結果.

の発光強度の赤青比から電子のエネルギーを推定した(図 5)。その結果、電子は 6-24 eV のエネルギーをもつことが分かった。しかし、地上で観測されるスプライトの青色発光強度は、水蒸気やエアロゾルに依存した大気の透過率に大きく左右される。このため、6-24 eV のエネルギーの値と幅が、どれだけ確度が高いのかは、いまだに議論の余地が残されている。このため、衛星軌道上からのイメージング観測および多波長測光観測が必要である。

近年では、FORMOSAT-2 衛星によって観測されたスプライトの事例を解析し、電子エネルギーと電場強度を推定した結果が報告されている[Adachi *et al.*, 2008]。それによると、高度 75 km 以上のスプライト発光領域では中性大気の電子付着による発光が主で、高度 75 km 以下ではイオン化が進む絶縁破壊型の発光が主であることが判明した。またさらに、Hiraki *et al.* [2008]では、スプライトが発生したときの NO_x, HO_x の数密度変化をシミュレーションによって推定した。図 6 に示すとおり、スプライトが発生した 1 秒後に NO は高度 60 km で約 8 桁、1 時間後に NO₂ は同じ高度で約 3 桁も増加していることが予測された。このことから、スプライト発生によって引き起こされる NO_x や HO_x の密度変動が、オゾンの生成・消滅化学過程に与える影響を定量的に推定するために、つまり、地球大気組成変化に与える影響の定量評価のために、スプライトの全球発生頻度分布のみならず電子エネルギーの推定が極めて重要である。

GLIMS では 6 本のフォトメーターを搭載し、スプライトの多波長測光観測を行う。これによって、より確度の高い電子エネルギーの推定が可能になると考えられる。

5. まとめ

GLIMS の高高度発光現象観測により、次のことが明らかになると期待される。

1. TLEs の全球分布の特定

- ・ TLEs がグローバルサーキットに果たす役割の特定
- ・ 全球/局所的な大気組成変化の理解
- ・ 磁気圏への高エネルギー粒子流入

2. 発生メカニズム・発生条件の特定

- ・ 水平雷放電電流を考慮した TLEs 発生メカニズムの統一的理解

3. 電子エネルギー・電場強度の特定

- ・ 大気組成変化の定量的理解
- ・ 電離圏・磁気圏へのエネルギー流入過程

参考文献

- Adachi, T., H. Fukunishi, Y. Takahashi, and M. Sato, (2004), Roles of the EMP and QE field in the generation of columniform sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L04107, doi:10.1029/2003GL019081.
- Adachi, T., Y. Hiraki, K. Yamamoto, Y. Takahashi, H. Fukunishi, R-R. Hsu, H-T. Su, A. B. Chen, S. B. Mende, H. U. Frey, and L. C. Lee (2008), Electric fields and electron energies in sprites and temporal evolutions of lightning charge moment, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 234010, doi:10.1088/0022-3727/41/23/234010.

- Blanc, E., T. Farges, R. Roche, D. Brebion, T. Hua, A. Labarthe, and V. Melnikov (2004), Nadir observations of sprites from the International Space Station, *J. Geophys. Res.*, **109**, A02306, doi:10.1029/2003JA009972.
- Chen, A. B., et al. (2008), Global distributions and occurrence rates of transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, **113**, A08306, doi:10.1029/2008JA013101.
- Hiraki, Y., Y. Kasai, and H. Fukunishi (2008), Chemistry of sprite discharges through ion-neutral reactions, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **8**, 1–26.
- Miyasato, R., H. Fukunishi, Y. Takahashi, and M. Taylor (2003), Energy estimation of electrons producing sprite halos using array photometer data, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **65**, 573–581.
- Pasko, V. P., U. S. Inan, T. F. Bell, and Y. N. Taranenko (1997), Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**(A3), 4529–4561.
- Sato, M., and H. Fukunishi (2003), Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1859, doi:10.1029/2003GL017291.