

# 国際宇宙ステーションからの雷放電と高高度発光現象の

## 観測 (GLIMS) の概要と現状

牛尾知雄 (阪大工)、佐藤光輝 (北大理)、森本健志 (阪大工)、鈴木睦 (ISAS/JAXA)、  
芳原容英 (電通大)、石田良平 (大阪府大)、菊池雅行 (極地研)  
坂本祐二 (東北大)、Ivan Linscott、Umrhan Inan (Stanford Univ.)  
高橋幸弘 (北大)

### 1. はじめに

大きな中和電荷量を有する雷放電に伴って、雷雲上空で発光する高高度発光現象 (図 1 参照) が発見されたのは近年のことである。その代表的なものはスプライトと呼ばれ、雷放電に伴って放射あるいは変化する電界がその発生源と言われているが、未だその原因と構造を決定する要因はよく分かっていない。

このようなことから、雷放電から放射される電磁波が電離圏や磁気圏にどのような影響を及ぼしているのかその結合過程の理解、また宇宙空間から全球で生起している雷放電の位置を標定する装置の基礎開発を念頭に国際宇宙ステーションからの雷放電と高高度発光現象の観測計画 (Global Lightning and sprIte MeaSurements: GLIMS) が立案された。この計画は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォーム第二期ポート共有利用ミッションの一つとして選定され、2012 年の打ち上げとその後の数年間にわたり雷放電及び高高度発光現象の観測を行う予定になっている。本稿では、この GLIMS 計画の概要、背景および目的を述べる。

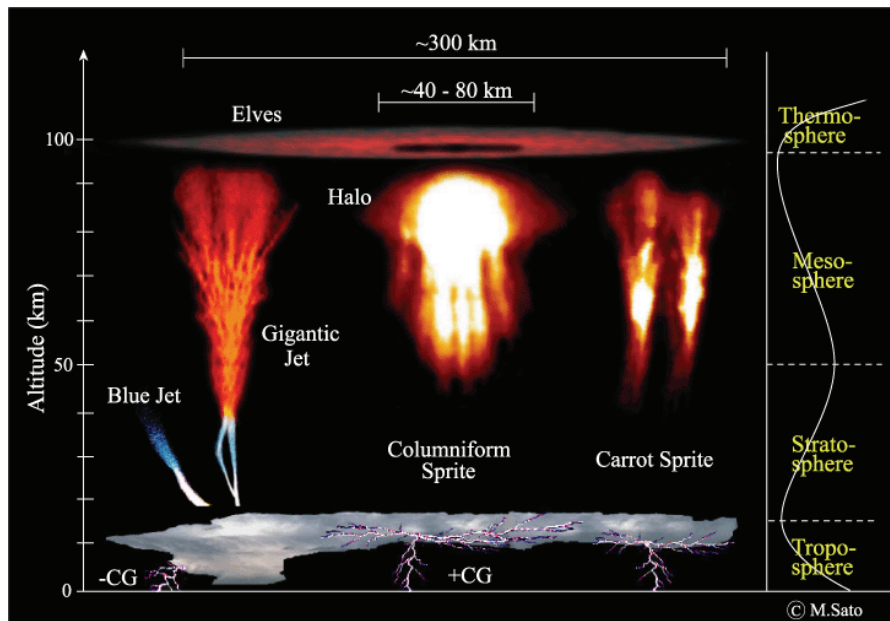


図1 雷放電と高高度発光現象の模式図

## 2. 科学的背景と目的

### 〈2・1〉 背景

対流圏の大気が地表からの加熱により不安定な成層を成すとき、その不安定を解消するため積乱雲あるいは雷雨が発達する。一般的に雷雨は対流セルあるいは降水セルと呼ばれる秒速十数メートル程度の激しい上昇気流、下降気流を含む対流の単位の集合体で構成されており、各々の対流セルは発達期、成熟期、消滅期という特有のライフサイクルを持つ。このライフサイクル中で、発達期のあられを主成分とする降水の形成に伴い雲内で電荷分離が進行し電荷が蓄積される。そして、大気の絶縁破壊強度を越えたとき放電という形態をとって、雲内の電荷が中和される。これを雷放電と呼び、以上を総称して雷放電現象と呼んでいる。

このような雷放電は我々に最も身近な自然現象の一つであるにもかかわらず、全地球規模での発生頻度や分布といった最も基本的な描像について、長い間明らかになっていなかった。衛星からの最初の雷放電観測は我が国の ISS-b 衛星による VHF 帯の観測である。この衛星による観測は、当初の目的の副産物として得られたものであるが、宇宙空間からの雷放電観測の可能性を示したものであり、全球の雷放電分布を初めて明らかにした。その後、雷放電を観測することに特化した最初の衛星は、NASA・マーシャル宇宙飛行センターによる MicroLab-1 衛星に搭載された OTD (Optical Transient Detector) や、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載された LIS (Lightning Imaging Sensor) である。これらの衛星観測によって得られた観測データから、例えば全球の放電頻度は約 50 flashes/s という結果が得られている<sup>(1)</sup>。これらの衛星による光学観測は、検出効率を 90% 近くにまで高めることに成功し

ており、雷放電の全球分布・時間変動のみならず、気象予測モデルに雷放電データを同化させることで、激しい気象現象の予測精度を大幅に向上させることがわかった。これらのことから、米国では次期静止気象衛星に雷観測センサを標準装備することが計画されている。

雷放電の分布とその変動は、OTD や LIS などの光学観測によって明らかになってきたが、放電の識別や放電過程の同定は、VHF 帯の観測によって可能となる。一般に、雷放電に伴って放射される電磁波の帯域は広く、中でも VHF 帯広帯域電磁波は、放電進展過程から放射される。この VHF 帯の電磁波動は電離層のプラズマ周波数より高いため、衛星高度からも観測が可能である。ロスアラモス国立研究所は、1997 年に FORTE (Fast On-orbit Recording of Transient Events) 衛星を打ち上げ、衛星軌道上から雷放電起源の広帯域 VHF 帯電波を観測することに世界で初めて成功している。この観測結果によると、a) Narrow Bipolar Events (NBEs) と b) Cloud-to-Ground events (CG) の 2 種類の放電形態に関する結果が公表されている<sup>(2)</sup>。NBE は、1 マイクロ秒以下の持続時間を持つ雲内起源の 100 m オーダーの放電イベントであり、放射エネルギーは EIRP 換算で 100 kW 以上である。衛星高度で観測される雷放電起源の VHF 放射ではもっとも強いが光の放射は弱い。一方、CG イベントは負極性リーダ或いは帰還雷撃過程からの放射であり、数十 kA の電流により放射される。しかしながら、FORTE 衛星には VHF アンテナが 1 成分のみ搭載されており、標定装置としての機能は有していない。このため、FORTE では、全球的に発生する雷からの VHF 電波を検出することはできるが、検出した VHF 帯電波がどの雷から放射されたのかという情報（位置情報）は得られない。

一方、雷雲上空で発生する過渡的な発光現象 (TLEs: Transient Luminous Events) の存在は、1989 年に米国の R. Franz らによって初めて確認された<sup>(3)</sup>。1990 年代初頭には、米国において精力的な地上光学・電波観測が行われ、この過渡的な発光現象は雷雲地上間放電 (CG: Cloud-to-Ground discharge) に伴って雷雲上空で発生することが明らかにされた<sup>(4), (5)</sup>。TLEs はその発生形態の違いから、スプライト、エルブス、ブルージェット、巨大ジェットなどに分類されている。このうちスプライトの発生メカニズムとしてこれまでに提唱されているのは、雷雲上空の準静電場による絶縁破壊メカニズム (準静電場モデル)<sup>(6)</sup> である。しかし、この準静電場モデルでは、例えば (a) スプライトを発生させる雷放電のエネルギーは数 1000 C·km を必要とするが、このような正極性 CG はごくまれにしか発生しない。しかし現実には、電荷モーメントは数 100C·km とエネルギーの小さい正極性 CG でもスプライトは発生する点<sup>(7)</sup>、(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) カラム状などスプライトの複雑な構造形成が説明出来ない点、等の問題点があることが指摘されている。これに対して、雷放電の水平方向への進展に伴う電流によって放射される EMP の効果などが注目されているが、この説を観測的に証明するためには、先行して生起する雷放電とスプライトを同時観測し、その水平空間分布を特定することが重要となる。

## (2.2) 目的

以上のことから、GLIMS ミッションでは、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)に設置されるポート共有利用実験装置内部に、CMOS カメラ 2 台、フォトメタ 6 台で構成する光学観測機器と、VLF レシーバ 1 台と、VHF センサ 2 台からなる干渉計機器を設置し、全球的な雷放電、高高度放電発光を観測する。その目的は、1) 雷放電および高高度放電発光の全球分布とその変動を太陽非同期観測から求めること、2) スプライト水平構造の観測と対応する雷放電進展過程の時間・空間分布の差及び放射される電磁パルス強度との対応関係の特定、3) 高高度放電発光現象の分光観測による窒素分子イオン発光の確認と電子エネルギーの特定、4) スプライトを含む TLEs の発生条件の特定、である。また、GLIMS では、サイエンスアウトプットを最大限にするために、JEM-GLIMS とほぼ同時期に打上げられる ISS での雷・地球ガンマ線観測ミッション(ASIM)と、小型衛星からの雷・地球ガンマ線観測ミッション(TARANIS)と連携した観測を行う予定になっている。

## 3. ミッション機器

スプライトは、典型的には 2-3 ms、長いもので 100 ms を越える発光継続時間と、50 km 程度の広がり、1 km 程度のカラム状のサブ構造から成っており、天底観測からこの水平構造とその時間変化を観測するには、1 km、1 ms 以上の分解能が要求される。また、対応する雷放電の放電過程も例えば、進展するステップトリーダ過程は平均 27 ms、帰還雷撃は数 10  $\mu$ s、K 変化は数 ms の持続時間を有しており、これらを分解するためには、ミリ秒単位の時間分解能が要求される。これに対して、本ミッションでは、CMOS カメラでは、最高 2 ms の時間分解能と 1 km 以下の空間分解能、フォトメタでは 50  $\mu$ s の時間分解能を装備することにより、高高度放電発光の水平構造の特定と雷放電撮像を行うこととしている。一方、搭載する VLF レシーバでは、雷放電から放射された VLF 帯電磁波のうちホイッスラー波となって電離圏を突き抜けてくるプラズマ波動を、10  $\mu$ s の時間分解能で観測し、VHF 干渉計では 10 km の空間分解能 10  $\mu$ s の時間分解能を想定し、雷放電から放射される EMP 放射過程を時間的・空間的に特定して、高高度放電発光現象との同期観測によってその時空間的差を求める。

各観測器の目的と性能を表 1 に、その外観写真を図 2 に示す。全ての観測機器のデータは、データ処理プロセッサの内部バッファメモリに逐次一時保存されるが、過渡発光が CMOS カメラによって検出されると、全機器にトリガ信号が発生され、過渡発光が発生した前後を含むデータを取り込む。トリガしたイベントに高高度放電発光現象が存在するかをデータ処理プロセッサにてソフトウェアで検出し、存在が確認されればデータを ISS のデータ通信回線を介して地上に伝送する。光学観測は ISS が地球の夜側を飛翔する間に行い、昼側

を飛翔するときには観測器の電源は切断し観測待機状態とする。VHF 干渉計観測は夜側・昼側ともに観測器は稼働状態にあり、雷放電の発生を検出する役を担う。

表 1 GLIMS ミッションの搭載機器の目的と機能

<p><u>CMOS カメラ</u></p> <p>(目的)</p> <p>(機能)</p>	<p>雷放電および高高度放電発光現象の発光形態の情報を得る</p> <p>視野 28.3°×28.3°内に発生する過渡発光の撮像観測 (512×512 pixels) を、</p> <p>2 波長 (<math>\lambda=762\text{nm}</math>, <math>785\text{nm}</math>), 時間分解能 2ms, 9ms, 34ms (可変) で行う。</p>
<p><u>フォトメタ</u></p> <p>(目的)</p> <p>(機能)</p>	<p>雷放電および高高度放電発光現象の絶対光量の情報を得て、窒素分子の電子温度の算出を行う。</p> <p>視野 87°, 43°内に発生する過渡発光の絶対光量の時間変化を 20 kHz のサンプリング周波数, 6 波長 (150-280nm, <math>337\pm 5\text{nm}</math>, <math>762\pm 5\text{nm}</math>, 600-900nm, <math>316\pm 5\text{nm}</math>, <math>392\pm 5\text{nm}</math>) で観測する</p>
<p><u>VLF レシーバ</u></p> <p>(目的)</p> <p>(機能)</p>	<p>雷放電および高高度放電発光現象からの VLF 帯電磁放射の情報を得る</p> <p>周波数帯 1 - 40 kHz の VLF 帯プラズマ波動を 100 kHz のサンプリング周波数で観測する</p>
<p><u>VHF 干渉計</u></p> <p>(目的)</p> <p>(機能)</p>	<p>雷放電からの VHF 電波を検出し雷放電路の時間・空間進展過程の情報を得る</p> <p>ポート共有利用実験装置の底面部に 2 台の VHF パッチアンテナを 1.8m 離して設置し、70-100 MHz の VHF 電波を検出し干渉計観測を行う</p>
<p><u>SHU</u></p> <p>(目的)</p> <p>(機能)</p>	<p>各観測機器の制御およびデータ処理とバスとのインタフェースを行う</p> <p>オンボードトリガ機能を装備し、トリガしたイベントの圧縮保存、バス部へのデータ転送を行う。また、テレメータ・コマンド処理機能も装備する</p>
<p><u>GPS レシーバ</u></p> <p>(目的)</p> <p>(機能)</p>	<p>GPS 衛星からの電波を受信し GLIMS 機器の時刻較正を行う</p> <p>GPS レシーバを搭載し 2 <math>\mu\text{s}</math> の絶対時刻精度を保証する</p>



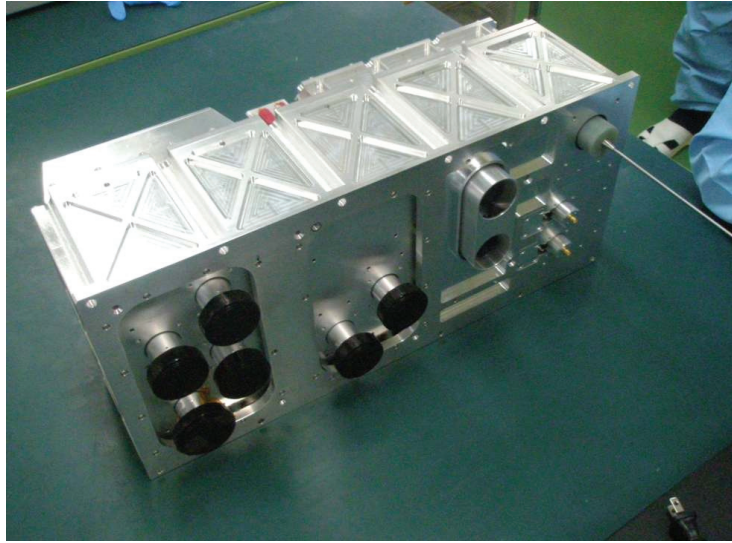


図2 観測機器の外観写真

#### 4. 経過と今後の予定

GLIMS ミッションは、2007年2月に行われたJEM 暴露部第二期利用ポート共有実験装置の公募において選定されて以来、同年11月暴露部分科会による選定、同年12月宇宙理学委員会内ワーキンググループの設立、2008年3月のミッション定義審査会(MDR)、システム要求審査会(SRR)、2008年8月のシステム定義審査会(SDR)を経て、2008年11月に開発移行した。その後、2009年7月基本設計審査会(PDR)、2010年1月詳細設計審査会(CDR)を経て、電磁適合性試験、振動・衝撃試験を実施した。そして、認定試験後審査会・出荷前審査会(PQR/PSR)を2010年11月に終了した。打上げは、2012年中を目指している。

これまで、非常にハードなスケジュールとハードルを研究開発チーム一同経験してきた。関係各所には多大な迷惑もおかけしてきた。心からお詫び申し上げますと共に、今後も試験を通過し、予定通り観測開始に無事移行できることを心から祈っている次第である。

#### 文 献

- (1) Christian, H. J., R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. L. Boeck, D. E. Buechler, K. T. Driscoll, S. J. Goodman, J. M. Hall, W. J. Koshak, D. M. Mach, and M. F. 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
- (2) Suszcynsky, Linford, Musfeldt, Jacobson, Heavner, and Pongratz, VHF lightning detection and storm tracking from GPS orbit, *Los Alamos workshop on lightning monitoring from space*, Santa Fe, 2004
- (3) Y 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

- (4) 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
- (5) 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
- (6) 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. Lett.*, 102, 4529-4561, 1997
- (7) Y. Hobara, N. Iwasaki, T. Hayashida, M. Hayakawa, K. Ohta, and H. Fukunishi, Interrelation between ELF transients and ionospheric disturbances in association with sprites and elves, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 935-938, 2001.