

JEM-GLIMS における雷放電及び高高度発光現象の光学・電磁波観測成果

菊池博史 (大阪大学), 佐藤光輝 (北海道大学), 牛尾知雄 (大阪大学), 森本健志 (近畿大学), 足立透 (気象研), 鈴木睦, 山崎敦 (ISAS/JAXA), 高橋幸弘 (北海道大学), Linscott Ivan, Inan Umran (スタンフォード大学), 芳原容英 (電気通信大学)

Global lightning and sprite measurements (GLIMS) mission had been conducted on Exposed Facility of Japanese Experiment Module (JEM-EF) of the International space station which is orbiting the earth at an altitude 400 km, from November 2012 to August 2015. Four types of sensors attached to the International Space Station are used to observe a lightning and transient luminous events (TLEs). All four types of sensors work synchronously. Two complementary-metal-oxide semiconductor cameras at two different wavelengths (lightning and sprite imager: LSI) are used to capture a position of optical emission from lightning and TLEs. Six photometers at six different wavelengths (PHs) record an optical emission intensity at high temporal resolution. Each photometer works to detect an altitude of optical mission through the use of the optical spectrum that are absorbed by atmospheric gases. A very low frequency (VLF) receiver is used for recording Whistler mode waves from lightning. Very high frequency interferometer (VITF) with two VHF sensors estimates the radiation source direction using phase interference technique. In JEM-GLIMS mission, it is notable that it is possible to conduct a simultaneous observation of optical and radio instruments. The mission has been conducted since November 2012. In this paper, we will show the findings of experimental work conducted during the past 3 years (2013-2015).

Keyword: Lightning, Radio observation, Satellite observation, Transient luminous event

1. はじめに

我々は国際宇宙ステーションから高高度発光現象・雷観測を行う JEM (Japanese experiment module) - GLIMS (Global lightning and sprite measurements) ミッション[1]を 2012 年 11 月から 2015 年 8 月まで行った。高高度発光現象は、雷雲上空高度 20km~100km に発生する過渡的な発光現象のことで、1989 年に初めて R. Franz らによって観測された。しかし、雲上の発光現象は、雲内の散乱により地上観測は難しく、発生条件の実験的証明はなされていない。更に全球的な発生頻度分布など観測的検証が不十分である。本ミッションでは、電磁波観測機器である VHF 帯と VLF 帯の電磁波観測機器と光学観測機器である CMOS カメラとフォトメータを国際宇宙ステーション日本実験棟暴露部に搭載している⁽¹⁾。本発表では、観測期間中に観測された雷放電の全球分布を示す季節依存性について述べる。更にスプライトの観測事例、VHF 帯電磁波の到来方向推定結果と光学観測機器で得られた雷放電由来の発光地点との比較について述べる。本稿では GLIMS における観測結果と

その研究成果について紹介する[2-4]。

2. GLIMS 観測機器

2-1 Lightning and Sprite Imager (LSI)

LSI は 2 つの異なる波長帯(762,785 nm)を観測対象とした CMOS カメラで、雷放電及び高高度発光現象の発生地点を得る。Fig. 1 に LSI の写真を示す。COMS カメラは視野角 $28.3^{\circ} \times 28.3^{\circ}$ を観測視野に含む。これは地上における高度に換算して、ISS の Nadir ポイントから約 160km に相当する。

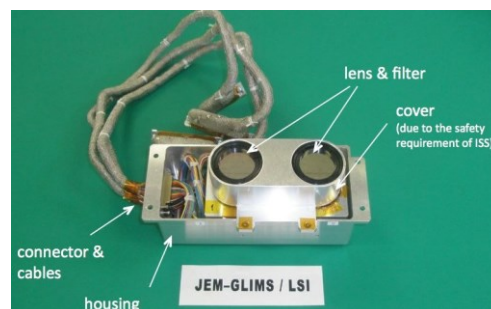


Fig. 1 Lightning and Sprite Imager (LSI)

2-2 Six-Channel Spectrophotometers (PH)

6つの異なる波長帯(150 - 280, 337 ± 5, 762 ± 5, 600 - 900, 337 ± 5, 337 ± 5 nm)を持つフォトメータは発光強度を測定し、高高度発光現象と雷放電の発生時間を時間的に分離することができる。これらの同期観測により高高度発光現象の時空間的な分布を明らかにすることが期待されている。サンプリング周波数は 20 kHz, 時間分解能 50 μs で測光観測を行う。特に近紫外域でのスプライト発光のうち発光強度が強い、窒素分子の 1st positive band および 2nd positive バンド、窒素分子イオンの 1st negative band を測定する。観測視野は 42.7° とし、更に視野を 87° とするフォトメータをもう 1 台搭載する。このフォトメータの波長域は、大気による吸収・散乱の影響を受けにくい 600 - 900 nm である。

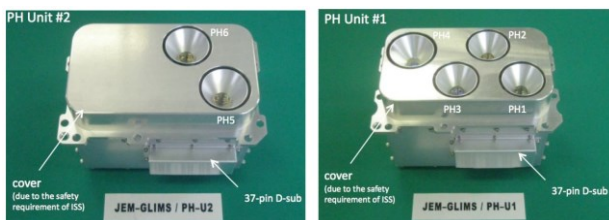


Fig. 2 Six-Channel Spectrophotometers (PH)

2-3 VHF interferometer (VITF)

VHF 帯干渉計は 2 台の VHF アンテナと、A 系・B 系と呼ばれる 2 系統分の帯域通過フィルタ・増幅器・A/D 変換機で構成される。VITF の諸元を表 1 に示す。2 系統の電磁波形から受信帯域内の周波数で位相差を求めることで到来方向を推定することができる。それぞれのアンテナは 1.6m のアンテナ間隔で国際宇宙ステーション日本実験棟曝露部に搭載されている。受信帯域は 70-100MHz で、受信信号はサンプリング速度 200MHz で時刻（正秒からの相対時刻）情報と受信波形データを記録する。記録される波形データは、前 128 サンプル (640nsec) 後 384 サンプル (1920nsec) の約 2.5 μ sec の時間間隔で記録される。この 2.5 μ sec の電磁波形を最大 130 波形記録することができる。2 系統の電磁波形から受信帯域内の周波数で位相差を求めることで到来方向を推定することができる。VHF 帯干渉計は時間分解能 1 μ s で非常に高時間分解能であることから、雷放電現象に関する考察にも利用できる。

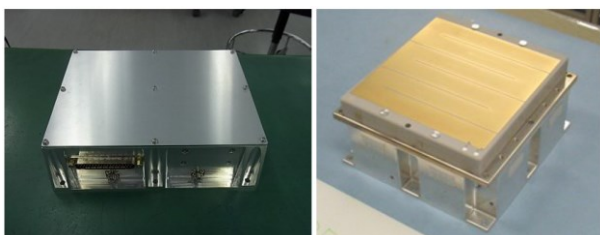


Fig. 3 Six-Channel Spectrophotometers (PH)

2-4 VLF Receiver (VLFR)

雷放電により放射される VLF 帯波動を受信するため、微小モノポールアンテナとエレクトロニクス部からなる VLF レシーバを JEM-GLIMS に搭載する。VLFR のエレクトロニクス部は、米国の Stanford 大学が開発したものであり、すでに RISING-1 (東北大が開発し、2009 年に打上げた超小型衛星) に搭載された実績があり、これと全く同型の装置を JEM-GLIMS にも搭載している。周波数帯域が 1-30kHz となっている。



Fig. 4 VLF Receiver (VLFR)

2-5 トリガシステム

GLIMS 観測機器のトリガシステムの概要を Fig. 5 に示す。これまでの多くの観測期間において GLIMS 観測機器はトリガ機器として PHs を用いている。各フォトメータの発光強度波形にある閾値を設定し、閾値を超えると SHU (Science Instruments Handling Unit) に対してトリガ信号を出力し、SHU から各理学観測機器にトリガ信号が出力される。VITF はそのトリガ信号を受ける直前まで観測を行い、トリガ信号を受信し観測を停止する。停止後、メモリ内に記録された最大 130 波形を SHU に転送する。観測期間の多くは PHs をトリガ機器として用いていたが、昼間の観測においては VITF をトリガ機器として用いた観測も行った。

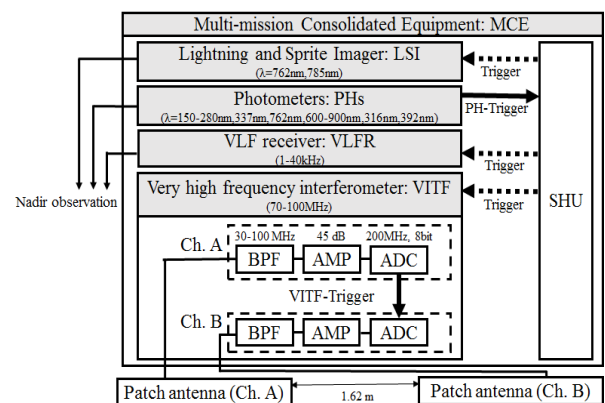


Fig. 5 トリガシステムと GLIMS 観測機器の構成 [4]

3. 観測結果と考察

3-1 全球観測結果

Fig. 6 に JEM-GLIMS で観測された 2013 年 1 月 1 日～12 月 31 日の全球雷放電分布を示す。南アメリカ大陸上空は南大西洋異常帯であるため、アメリカ大陸（ブラジル付近）は、South Atlantic Anomaly, SAA と呼ばれる地域で、地磁気軸が地軸の傾きによる磁気異常帯で、放射線量が異常に多く検出されるため、観測機器への影響を考慮し、観測していない。また、Fig. 7 に月ごとの雷放電頻度を示す。閾値の変更等で観測頻度が変動する箇所もあるが夏季と冬季の雷放電頻度に季節依存性があることが分かる。また、北半球と南半球における頻度の変化についても明らかになった [2]。

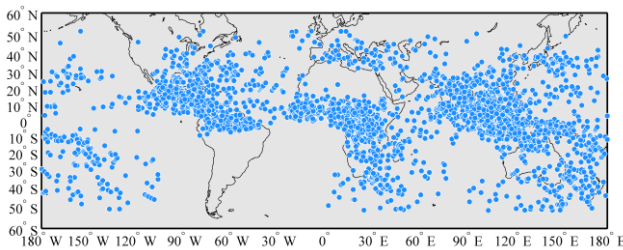


Fig. 6 2013 年 1 月 1 日～12 月 31 日の全球雷放電分布

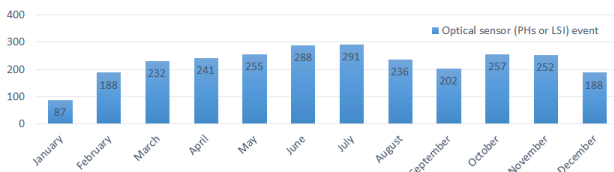


Fig. 7 月ごとの雷放電観測頻度 (2013 年)

特に PH1 の信号は高高度発光現象と関連すること示すため、PH1 の信号を基に全球分布を示すと Fig. 8 に示されるようになる。これらの雷放電イベントは高高度発光現象(スプライト等)を発生されたと考えることが出来る。その多くは赤道付近に集中しているが、雷放電頻度が比較的少ない高緯度でもイベントが観測されていることが分かる。

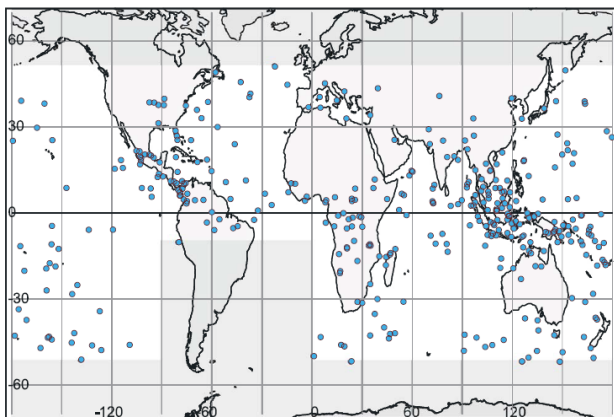


Fig. 8 雷放電に伴う遠紫外線放射が観測された地点 [2]

3-2 高高度発光現象の水平分布

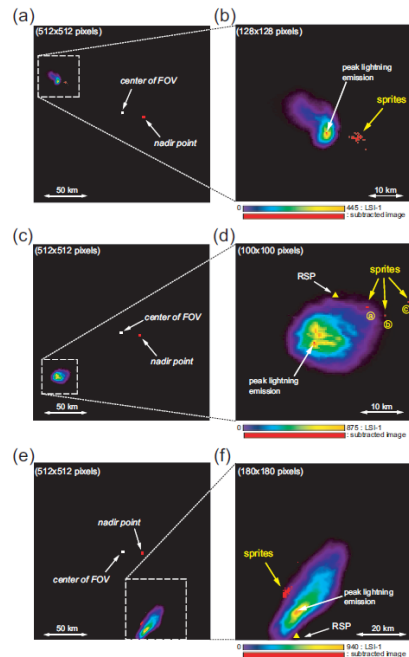


Fig. 9 スプライト観測事例[3]

Fig. 9 にスプライト観測事例を示す。(a,c,e)は LSI で観測された FOV における雷放電及びスプライトの観測事例である。(b,d,f)はその拡大図で、ISS の観測姿勢における偏角を考慮して、スプライトの位置を示した事例である。また△で World Wide Lightning Location Network の落雷地点を示す。これらの事例から落雷に伴う発光強度が最も強い地点から 10-20km 程度水平に離れた地点においてスプライトが観測されている。以上の結果はスプライトの水平分布を議論する非常に有益な観測結果であり、同時に宇宙空間からの観測がスプライト観測に対して有用な手段であることを示した。

4. むすび

本発表では、JEM-GLIMS で得られた研究成果として、雷放電の全球分布に関する研究結果と季節依存性、更には高高度発光現象の水平分布に関する観測結果に関して事例解析結果を示した。今後電磁波観測機器である VITF と VLFR の観測結果に関する解析を進め[4]、高高度発光現象の発生機構に関する研究成果を示すことが期待される。

参考文献

- [1] T. Ushio, et al, The Global Lightning and Sprite Measurement (GLIMS) Mission of the International Space Station - Concept and Overview, IEEJ Trans., 2011.
- [2] M. Sato, et al, Overview and early results of the Global Lightning and Sprite Measurements mission, J. Geophys. Res. Atmos., 2015.
- [3] M. Sato, et al, Horizontal distributions of sprites derived from the JEM-GLIMS nadir observations, J. Geophys. Res. Atmos., 2016. (Accepted)
- [4] H. Kikuchi, et al, Direction of arrival estimation of VHF signals recorded on the International Space Station and simultaneous observations of optical lightning, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016. (Accepted)