

# 国際宇宙ステーションからの雷放電・高高度発光現象 観測ミッション(GLIMS)の概要と現状 - 理学観測機器 -

佐藤光輝<sup>(1)</sup>, 牛尾知雄<sup>(2)</sup>, 森本健志<sup>(2)</sup>, 鈴木睦<sup>(3)</sup>, 山崎敦<sup>(3)</sup>, 芳原容英<sup>(4)</sup>,  
石田良平<sup>(5)</sup>, 菊池雅行<sup>(6)</sup>, 坂本祐二<sup>(7)</sup>, Ivan Linscott<sup>(8)</sup>, Umran Inan<sup>(8)</sup>, 高橋幸弘<sup>(1)</sup>

(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) ISAS/JAXA,  
(4)電気通信大学 大学院情報理工学研究科, (5)大阪府立大学 工学研究科, (6)国立極地研究所,  
(7)東北大学 大学院工学研究科, (8)スタンフォード大学 電子工学科

## 1. JEM-GLIMS の科学目的

雷雲地上間放電に伴う高高度放電発光現象(TLEs: Transient Luminous Events)を, 国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)日本実験モジュール(JEM: Japanese Experiment Module)曝露部(EF: Exposed Facility)から観測する計画が 2007 年から進行しており, このミッションを JEM-GLIMS (Global Lightning and sprItE MeasurementS on JEM-EF)と呼んでいる [Ushio *et al.*, 2011]。JEM-GLIMS は高度約 400 km の ISS 軌道上から, 高度 40-90 km の成層圏・中間圏で発生する TLEs を真上から観測するミッションであり, その科学目的は以下にまとめられる。詳細については, Ushio *et al.* [2011]および本シンポジウムの牛尾らの講演(5-4.pdf)を参照のこと。

### (A) TLEs の発生条件および発生メカニズムの特定

- ✓ TLEs の水平空間分布を観測的に特定
- ✓ TLE 励起雷放電の特性を JEM-GLIMS および地上観測網データで特定
- ✓ 数値シミュレーションによる雷雲上空の電場の時間・空間変化を推定
- ✓ 観測とモデルとの比較により TLEs の発生条件とメカニズムを解明

### (B) TLEs の全球発生頻度分布の特定

- ✓ 緯度 $\pm 51^\circ$ 帯, 全 LT の掃引観測による TLEs の網羅的検出
- ✓ 全球的な発生分布と頻度の特定
- ✓ TLEs が地球大気に与える化学効果の定量的推定

### (C) TLEs 励起電子のエネルギー推定

- ✓ TLEs 発光のスペクトル観測
- ✓ 中性大気励起電子のエネルギー推定と電場強度推定

## 2. JEM-GLIMS の理学観測機器

JEM-GLIMS の機器は, 表 1 に示す 5 つの理学機器で構成される。光学観測器は 2 種類あり, 1 つは CMOS センサを用いた CMOS カメラ(LSI: Lightning and Sprite Imager)で, もう 1 つは空間分解能をもたないが絶対光量を測定するフォトメタ(PH: PHotometer)である。一方, 雷放電からの電磁波動を観測する電波観測器も 2 種類あり, 1 つは 1-30 kHz 帯の VLF 波動を観測する VLF レシーバ(VLFR: VLF Receiver), もう 1 つは 70-100 MHz 帯の VHF 波動を基線長 1.5 m 離れた 2 式のアンテナで受信する

表 1 JEM-GLIMS 搭載理学機器の種類と仕様

名称	ID	仕様
CMOS カメラ	LSI	2 式の CMOS カメラ 512×512 pixels, FOV = 28.3°×28.3°, fps = 29 - 500, 10 bit LSI-1: $\lambda = 762 \pm 5$ nm, LSI-2: $\lambda = 740-830$ nm
フォトメタ	PH	6 式のフォトメタ (PH1 - PH6) $\lambda(\text{PH1}) = 150-280$ nm, $\lambda(\text{PH2}) = 337 \pm 5$ nm, $\lambda(\text{PH3}) = 762 \pm 5$ nm, $\lambda(\text{PH4}) = 600-900$ nm, $\lambda(\text{PH5}) = 316 \pm 5$ nm, $\lambda(\text{PH6}) = 392 \pm 5$ nm $f_s = 20$ kHz, FOV(PH1-3, -5, -6) = 43°, FOV(PH4) = 87°, 12 bit
VLF レシーバ	VLFR	1 式の VLF アンテナ $f = 1-30$ kHz, $f_s = 100$ kHz, 16 bit, L=15cm monopole アンテナ
VHF 干渉計	VITF	2 式の VHF アンテナ $f = 70-100$ MHz, 8 bit, patch アンテナ, 基線距離=1.5 m
理学機器制御 ユニット	SHU	機器電源 ON/OFF, パラメタ設定, トリガ, データ取得/圧縮, テレメトリ・コマンドインタフェース

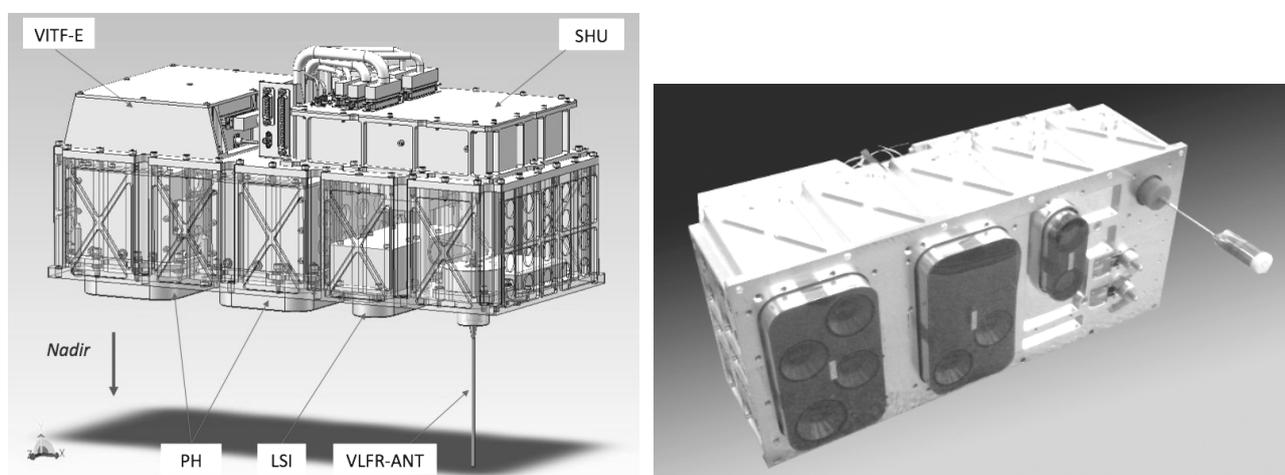


図 1. (左)JEM-GLIM の全体概念図(ただし, VITF アンテナ部を除く)。(右)JEM-GLIMS フライトモデルの完成状態の写真。

VHF 干渉計(VITF: VHF InTerFerometer)で構成される。これらの理学機器を制御し, イベントトリガ処理, データ取得・圧縮処理, コマンド受信, テレメトリ送信機能をもつ理学機器制御ユニット(SHU: Science instruments Handling Unit)で構成される。

これらの機器は, ポート共有実験装置(MCE: Multi-mission Consolidated Equipment)と呼ばれるバス部に搭載されるが, 搭載性を容易にするために箱構造をもつ 1 つの筐体に全理学機器を組付けることとした。図 1(左)に示すのは箱構造に組付けた状態の全体概念図であり, 図 1(右)は完成状態の JEM-GLIMS 機器フライトモデルの写真である。この図は JEM-GLIMS の地球指向面から撮影したものであり, LSI 光学系, PH 光学系, VLF アンテナ部は箱構造から突出した形状をとっている。

### 3. LSI

JEM-GLIMS では, 雷発光と高高度放電発光を天底観測する。スプライトは雷放電発生後に約 1 ms 程度の遅延時間をもって発生することから, 30 fps のビデオフレームレートで画像取得するカメラを用いた天底撮像観測では両者を時間的に分離することができない。しかし, 異なる観測波長帯を 2 台

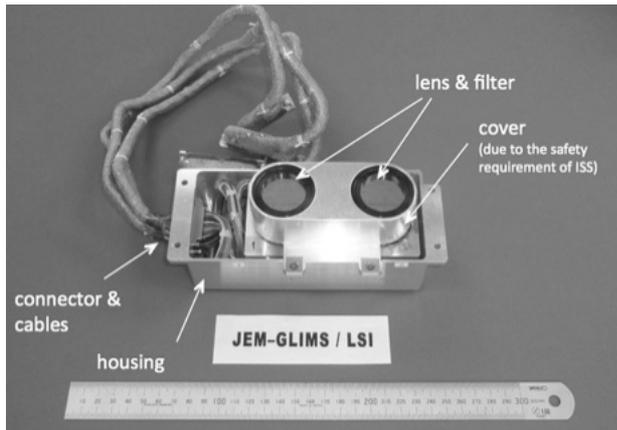


図 2. LSI フライトモデルの写真。

表 2. LSI の諸元

項目	数値
波長	740-830 nm (LSI-1) 762+/-5 nm (LSI-2)
FOV	28.3° × 28.3°
光学系	F=1.4, f=25mm
検出器	CMOS (STAR-250)
ピクセル数	512 × 512
感度@SNR=10	6.9E-6 W/m <sup>2</sup>
分解能	10 bit
空間分解能	0.55 km/pix @nadir @ground
時間分解能	34.5ms, 8.6ms, 2.1ms 可変
寸法	185 × 87 × 75 mm <sup>3</sup>
質量	0.7 kg
電力	0.8 W

のカメラによって同時撮像することで、これらを分離することが可能となる。このため、検出器に CMOS センサを用いた雷・スプライトカメラ(LSI: Lightning and Sprite Imager)を 2 台搭載することとした [Sato et al., 2011a]。図 2 に LSI の写真を、表 2 に LSI の仕様をまとめる。

雷放電の発光は可視域全体にわたってスペクトルのピークが存在するが、波長 740-830 nm の帯域にも窒素原子と酸素原子による発光輝線が存在する。一方、モデル計算により予測されているスプライトの発光スペクトルによると、波長 762 nm の発光は酸素分子によって吸収され、大気の透過率が 0.2 程度と低い。また、波長 762 nm の窒素分子の発光はスプライト発光のなかでも最も強度が高い。つまり、低高度の雷放電発光は酸素分子によって吸収され発光強度が減衰するが、酸素分子による吸収がほとんど寄与しない高高度で発生するスプライト光は、発光強度がほぼ減衰しない。以上のことから、1 台のカメラには波長 740-830 nm の広帯域フィルタを装着し、主に雷光を検出する。もう 1 台のカメラには波長 762 nm で FWHM=10 nm の狭帯域フィルタを装着し、主にスプライト光を検出する。このようにして、雷発光とスプライト発光を同時に分離検出する。カメラの検出器には STAR-250 型 CMOS センサを用いる。このセンサを使うことのメリットは、300 kRad ものドーズ量に耐えるほど圧倒的に耐放射線性に優れることと、能動的に冷却する必要がないので低消費電力を容易に達成できることである。CMOS センサのピクセル数は 512×512 であり、高度 400 km の ISS 軌道上から視野 28.3°×28.3°の範囲を観測した場合、1 ピクセルサイズの空間分解能は 0.5 km となり、これによって要求仕様である 1 km/pix の空間分解能を達成する。光学レンズに関しては、F1.4, f=25 mm の民生品 C-マウントコンパクトレンズを使用し、この光学系の前面にフィルタを装着する。また、CMOS センサの画像トリミングをコマンドであらかじめ設定しておくことによって、撮像時間分解能を最高 2 ms まで上げることができる。

#### 4. PH

LSI はスプライト発光の発生形態を撮像観測するが、これとは別にスプライトの発光強度を測光するフォトメタ (PH: PHotometer) も JEM-GLISM では搭載する[Sato et al., 2011b]。LSI では 2-34 ms の時間

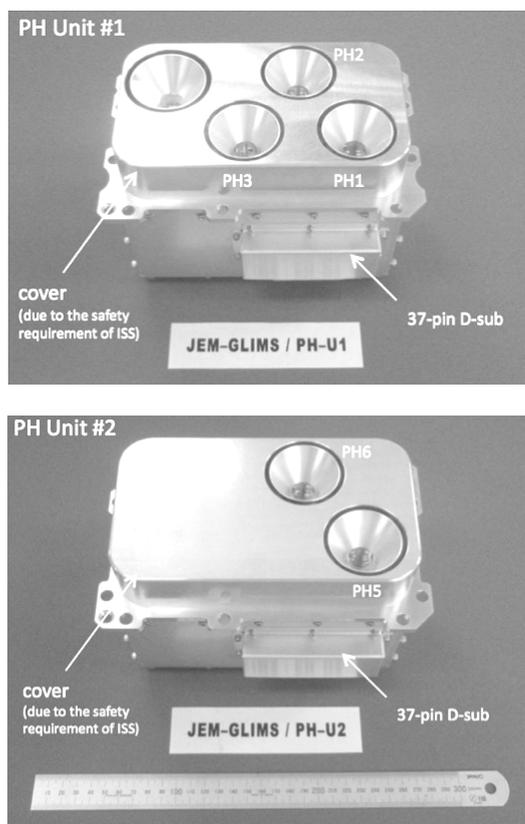


図3. PHフライトモデルの写真。(上)PH1-4を搭載したユニット#1, (下)PH5,6を搭載したユニット#2。

表3. PHの諸元

項目	数値
波長	150-280 nm (PH1) 337+/-5 nm (PH2) 762+/-5 nm (PH3) 600-900 nm (PH4) 316+/-5 nm (PH5) 392+/-5 nm (PH6)
FOV	42.7° (PH1,2,3,5,6) 86.8° (PH4)
光学系	F1.5 (PH1,2,3,5,6) F1.72 (PH4)
検出器	PMT (PH1,2,3,5,6) PDD (PH4)
ピクセル数	512 × 512
感度@SNR=10	6.9E-6 W/m <sup>2</sup> (PH1,2,3,5,6) 6.9E-6 W/m <sup>2</sup> (PH4)
高圧	0-1000 V
分解能	12 bit
サンプリング周波数	20 kHz
寸法	209 × 136 × 130 mm <sup>3</sup>
質量	2.3 kg (for Unit#1) 2.0 kg (for Unit#2)
電力	5.4 W

分解能で撮像観測を行うが、PHではより高速の20 kHz サンプリング、20 μs の時間分解能で測光観測を行う。図3にPHのフライトモデルの写真を、表3にPHの仕様をまとめる。

地上からの光学観測では、地球大気による吸収・散乱のため、スプライトの近紫外光の絶対強度測定は困難が伴った。このため、JME-GLIMSでは特に近紫外域でのスプライト発光輝線を重点的に測光観測する。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、LSIの視野28.7°×28.7°をほぼ包絡する。一方、地球ガンマ線(TGF)という雷放電に伴うガンマ線放射が存在し、JEM-GLIMSではTGFを引き起こした親雷放電も観測する予定である。雷放電によって加速された逃走電子は地球の磁場に沿って飛来するため、その元となる雷放電を検出するためには、より広範囲の領域を監視する必要がある。このため、視野を87°とするフォトメタをもう1台搭載する。観測する波長域は、大気による吸収・散乱の影響を受けにくい波長600-900 nmとする。このようにJEM-GLISMでは6台のフォトメタを搭載している。表3の仕様にあるとおり、フォトメタは広視野を要求する。このため光学系は、フィルタ位置で焦点を結ぶテレセントリック屈折光学系を採用する。PH1-3, PH5, PH6の光学系の有効口径は12 mmであり、F=1.5である。一方、PH4の光学系の有効口径は6 mmであり、F=1.72となっている。光検出素子には、浜松ホトニクス製のメタルパッケージ光電子増倍管(PMT)を用い、高圧電源供給素子として1 inch 型の超小型高電圧電源素子(HV)を搭載する。一方で、雷の光量はもともと大きいため、PH4の光検出器には、HVを使用しないフォトダイオード(PDD)を採用した。PMTは500 Vで駆動する予定で、ゲインは5-7×10<sup>5</sup>程度になる。PMTからの出力信号は、2段のアナログアンプによってさらに増幅され、A/D変換される。

## 5. VLFR

雷放電により放射される電磁波のなかでも最も強度が大きい 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(VLFR: VLF Receiver)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。VLFR のアンテナは、15 cm の長さをもつ微小モノポールアンテナで、MCE 底面から突き出るように設置している。雷放電から放射された VLF 波動は、電離圏でホイッスラー波に変換され、そのホイッスラー波は磁力線に沿って磁気圏を伝搬する。ISS が飛行するのは地理緯度 $\pm 51^\circ$ 帯であるが、この緯度帯では磁力線は傾斜しているため、地心方向に向いたアンテナでも十分にホイッスラー波を検出可能と考えている。図 4 に VLFR のエレクトロニクス部(VLFR-E)と VLFR アンテナ部(VLFR-ANT)の写真を載せる。また、VLFR の仕様を表 4 に示す。

## 6. VITF

雷放電の放電電流の進展過程で放射される VHF 波帯インパルス性電磁波を、2 台のアンテナで受信しデジタル記録する。これにより、2 台のアンテナで受信した電波の到達時間差から、雷放電位置に相当する電磁波の到来方向を推定することができる。このデジタル干渉法を用い、スプライトを励起した雷放電の放電進展過程を明らかにすることを目的として、2 台の VHF アンテナとデータ処理エレクトロニクスを開発し搭載した [Morimoto et al., 2011]。図 5 に VHF 干渉計 (VITF : VHF IntTerFerometer) のエレクトロニクス部とアンテナ部の写真をのせる。また、表 5 に VITF の仕様を載せる。

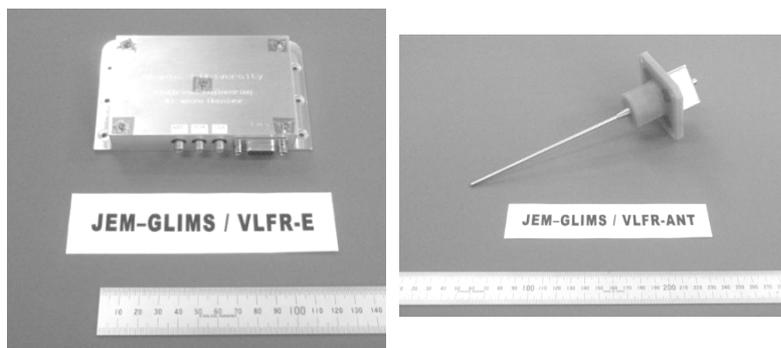


図 4. (左)VLFR-E, (右)VLFR-ANT の写真。

表 4. VLFR の諸元

項目	数値
周波数帯域	1-30 kHz
分解能	14 bit
サンプリング周波数	100 kHz
アンテナタイプ	微小モノポール
アンテナ長	15 cm
寸法	185 × 87 × 75 mm <sup>3</sup>
質量	0.3 kg
電力	8 W

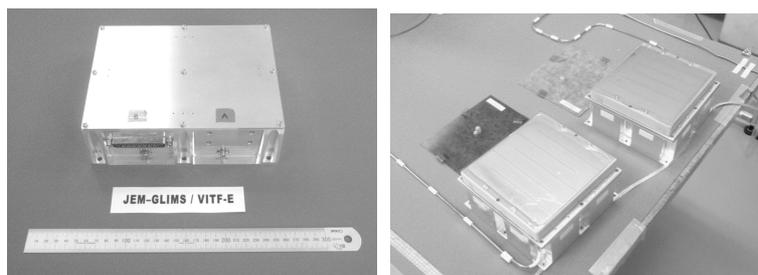


図 5. (左)VITF-E, (右)VITF-ANT の写真。

表 5. VITF の諸元

項目	数値
周波数帯域	70-100 MHz
分解能	8 bit
サンプリング周波数	200 MHz
アンテナタイプ	パッチ型
アンテナ長	15 cm
寸法(エレクトロニクス部)	208 × 180 × 57 mm <sup>3</sup>
寸法(アンテナ部)	192 × 192 × 105 mm <sup>3</sup>
質量	9.25 kg
電力	9.8 W

アンテナは ISS/JEM への搭載性の観点から、パッチ型のアンテナとし、ポート共有利用実験装置の底面に取り付け天底方向を指向するように設置した。観測する周波数は 70-100 MHz 帯とし、アンテナ後段に設置する帯域通過フィルタおよび増幅器もこれに順ずる。ポート共有実験装置内部に設置するデータ処理用のエレクトロニクスでは、受信信号をサンプリング周波数が 200 MHz、分解能が 8 bit で A/D 変換して記録する。雷放電から放射される VHF 波帯電磁波はインパルス的であるため、内部メモリを分割し、設定閾値を超えた際に数マイクロ秒間の波形を記録するシーケンストリガ手法を用いる。すなわち、外部コマンドにより計測を開始した A/D 変換器は設定した閾値を越える信号が入力された際に、1 フレーム(=数マイクロ秒)分のデータを記録する。電磁波の到来方向推定のためには、2 系統の完全同期が必須であり、両 A/D 変換器間でクロックを共通または同期し、一方の信号を基準として閾値判定を行い他方へのトリガを行う。一般に、一回の雷放電から放射される VHF 波帯の電磁波は数千パルスであることが知られており、本ミッションでは、このうち強い 100 パルス程度をターゲットに機器の設計を行った。到来方向推定精度は 1.5°を見込むが、これは想定視野内で発生した雷放電位置を、幅約 10 km の(楕)円状の地域に推定することに相当する。

## 7. SHU

JEM-GLIMS の全ての理学機器を制御するユニット装置を、理学機器制御ユニット(SHU: Science instrument Handling Unit)とよび、1 台搭載している[Kikuchi *et al.*, 2011]。この SHU の主要な機能は表 6 にまとめられるが、理学機器の電源制御、イベントトリガ機能、データ取得、データ圧縮、GPS との時刻同期、コマンド・テレメトリ機能に大別される。SHU は CPU と FPGA の両方のプロセッサを搭載しており、CPU は主にデータ圧縮、テレメトリへのサイエンスデータ送信・制御を担っている。一方、FPGA はそれ以外の機能を主に有している。図 6 に、SHU のフライトモデルの写真を載せる。

## 8. 観測モードとデータ量

JEM-GLIMS は、ISS が地球の夜側を飛行するときに観測を行う。この観測モードは TLE モードとよばれ、全理学機器を ON にし、LSI もしくは PH でトリガをかけて過渡発光現象発生時の全機器データ

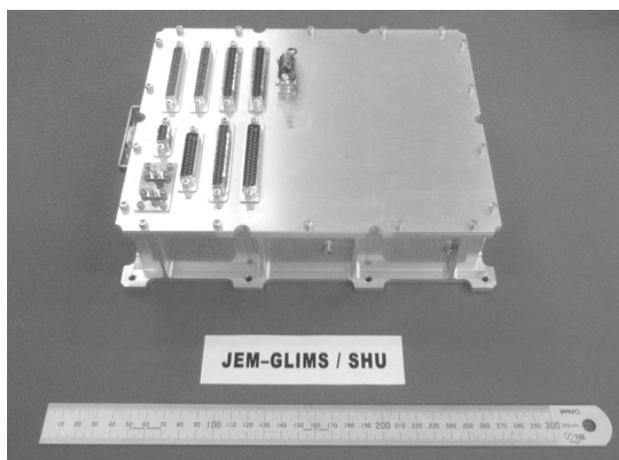


図 6. SHU フライトモデルの写真。

表 6. SHU の諸元

項目	数値
主要機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電源制御</li> <li>・ データ取得</li> <li>・ イベントトリガ</li> <li>・ データ圧縮</li> <li>・ GPS 時刻同期</li> <li>・ コマンド・テレメトリ I/F</li> </ul>
FPGA	Xilinx Vertex II
CPU	SH2
S-RAM	8 MB × 2 for FPGA 8 MB for CPU
Mass Memory	128 MB
寸法	208 × 180 × 57 mm <sup>3</sup>
質量	1.7 kg
電力	10.3 W

を取得していくモードである。1 イベント当たりのデータ量は、LSI 画像の圧縮を行わない場合は、4.35 MB であるが、SHU にて LSI 画像を可逆圧縮すると、データ量は 1.14 MB にまで圧縮される。テレメトリの回線速度は、通常運用では 5.8 kbps であるため、1 日あたり 53 イベントのデータを取得することができる。台湾の FORMOSAT-2 衛星の TLE 観測の実績からすると、強度の大きい雷発光でトリガをかけた場合、およそ 100 イベントあたり 1 イベントに TLEs が含まれている。このため、JEM-GLIMS の観測では、2 日で 1 イベントの TLEs を、1 月に 15 イベントの TLEs を検出することが可能であると期待される。

一方、1 年間の定常運用が完了後、ITF モードでも観測を行う。これは、ISS の飛行領域が昼側夜側を問わず VITF と LSI にて観測を行うモードであり、主に雷放電の全球発生分布のサーベイ観測を目的として行われる。トリガは VITF か LSI のどちらかの機器で行う。データ圧縮した場合、1 イベント当たりのデータ量は 346 kB であるため、1 日あたり 181 イベントの雷放電イベントを取得することが出来る。

## 9. まとめ

JEM-GLIMS は現在種子島宇宙センターに移送され、最終機能試験とノンフライトアイテム取り外しが完了した。今後は、MCE が曝露パレットに搭載され、HTV への組付け、HTV の組立て、フェアリング取付け、H-II B ロケットの組立てと進行していき、7 月 21 日 11:18 JST に ISS に向け打ち上げられる予定である。約 2 ヶ月の初期運用期間を経て、秋から定常運用を開始する予定である。

## 参考文献

- Kikuchi, M., M. Sato, A. Yamazaki, M. Suzuki, and T. Ushio, Development of Science Data Handling Unit (SHU) for Global Lightning and Sprite Measurements (GLIMS) onboard Japanese Experiment Module (JEM) of ISS, *IEEJ Trans. FM*, **131** (12), pp. 989-993, 2011.
- Morimoto, T., H. Kikuchi, M. Sato, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio, VHF Lightning Observations on JEM-GLIMS Mission - Gradual Approach to Realize Space-borne VHF Broadband Digital Interferometer -, *IEEJ Trans. FM*, **131** (12), pp. 977-982, 2011.
- Sato, M., Y. Takahashi, M. Kikuchi, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio, Lightning and Sprite Imager (LSI) onboard JEM-GLIMS, *IEEJ Trans. FM*, **131** (12), pp. 994-999, 2011a.
- Sato, M., Y. Takahashi, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio, Six-Channel Spectrophotometers (PH) Onboard JEM-GLIMS, *IEEJ Trans. FM*, **131** (12), pp.1000-10005, 2011b.
- Ushio, T., M. Sato, T. Morimoto, M. Suzuki, H. Kikuchi, A. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Hobara, U. Inan, I. Linscott, Y. Sakamoto, R. Ishida, M. Kikuchi, K. Yoshida, and Z. Kawasaki, The Global Lightning and Sprite Measurement (GLIMS) Mission of the International Space Station - Concept and Overview -, *IEEJ Trans. FM*, **131** (12), pp. 971-976, 2011.