

GLIMS ミッションに期待される科学 ～雷放電～

森本 健志, 牛尾 知雄(大阪大学) 佐藤 光輝(北海道大学) 高橋 幸弘(東北大学)
Umran Inan(Stanford University) 芳原 容英(津山高専) 菊池 雅行(極地研究所)
鈴木 睦, 山崎 敦, 阿部 琢美(ISAS/JAXA) 吉田 和哉, 坂本 祐二(東北大学)
奥山 圭一(津山高専) 石田 良平(大阪府立大学) 河崎 善一郎(大阪大学)

はじめに

JEM-GLIMS(Global Lightning and sprite Measurements on JEM-EF)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, フォトメーター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, 高高度放電発光および地球ガンマ線を観測する。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) 雷放電・スプライトとガンマ線放射の生起時間の差と放電過程の特定, である。雷放電を観測する装置は, CMOSカメラとVLFレシーバおよびVHFセンサである。

人工衛星からの雷観測

人工衛星からの雷観測例は, 米航空宇宙局(NASA)が運用する OTD(Optical Transient Detector, 1995)や LIS(Lightning Imaging Sensor, 1997)の光学観測が挙げられ, 全球的な雷活動の把握に貢献している。TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)衛星は, 1997年11月28日に打ち上げられて以来, 今日に至るまで8年にわたり観測を継続し, 科学的にも実用的にも多くの興味ある結果をもたらしている。大阪大学のグループ(Lightning Research Group of Osaka University, LRGOU)では, LIS(Lightning Imaging Sensor)のデータを中心に解析を進め, 以下の項目について知見を得ている。

(イ)エルニーニョ, ラニーニャ現象と雷活動

(ロ)日本周辺における雷活動

(ハ)雷活動と Snow Depth の普遍的5乗則

(ニ)TRMM/LISによるカーネギー曲線

まず(イ)に関しては, 西インドネシアの雷活動は, 総降水量の減るエルニーニョ期に却って増加するという, 一見理解し難く思われる傾向が発見された。解析領域を東アジア地域全体に拡大し, 各月の雷活動の偏差, すなわち各月の雷活動を TRMM の全観測期間の同じ月の平均値として定義する気候値との差と, SOI(Southern Oscillation Index)との間に逆相関(相関係数-0.7程度)のあることが示され, 西インドネシアで見られた傾向が, 概ね普遍的であるとの統計的結論が導かれた。更に, TRMM LIS/PR データを用いて雷活動及び降雨活動の, NCEP/NCAR 再解析データを用いて海面気圧及び風向・風速の解析を進めたところ, エルニーニョ現象時には東アジア, インドネシア及びオーストラリア西岸部で, ラニーニャ現象時にはオーストラリア東岸部で flash rate が増加しており, flash rate の増加する地域に対し海洋域から陸地域への風速偏差が生じていることが分かった。また, 西太平洋地域全体ではエルニーニョ現象時の方がラニーニャ現象時に比べ flash rate が増加しており雷活動が活発になっている。エルニーニョ現象時にはインドネシア, オーストラリア及び太平洋以東で降雨回数が減少しており, ラニーニャ現象時には逆に増加している。両現象時とも降雨回数が減少/増加している地域において海面気圧が高く/低くなっており, 海面気圧のより高い地域から低い地域へと風速の偏差が大きくなっている。このように, エルニーニョ発生とアジア地域の雷活動度とには普遍的な解釈が可能であることを示した。

(ロ)に関しては, 我が国周辺の冬季雷活動は, 良く知られていた北陸よりむしろ太平洋上で活発であることが明らかにされている点である。

(ハ)に関しては, 雷雲の電氣的活動, すなわち単位時間当たりの放電数 (flash rate) は, 対象とする積乱雲の雲頂よりは, 氷点から雲頂までの高さ

(これを Snow depth と定義)に依存するとの知見である。言い換えれば海洋性と大陸性の雷嵐活動のいずれにあっても、雷嵐の活動度は Snow Depth の五乗に比例するという経験則が得られ、これを「普遍的五乗則」と著者らは称している。この普遍則は 100 万を越す対流性の降水域(積乱雲)を対象に求めており、経験則として意義のある結果である確信している。

(二)に関しては、TRMM/LIS データから算出した flash rate の日変化曲線とカーネギー曲線との相関が高いというものである。日変化曲線については、第一の極大値は東南アジアの雷活動最頻時、第二の極大値はアフリカの雷活動最頻時、第三の極大値は南北アメリカの雷活動最頻時であり、カーネギー曲線の示す各極大値についても同様の解釈が可能となる。一方、雷活動そのものはアフリカ大陸でもっとも活発と考えられるが、アメリカは南北に大陸に存在し、それらを併せた合計では、南北アメリカのカーネギー曲線への寄与が最も高いと結論できる。近年の地球温暖化問題と関連して、雷活動の全球分布が経年的に変動してゆくのではないかとの議論があり、地球電気回路の経年変動に注目する研究も現れている。

電波観測では、我が国の通信総合研究所(当時)の ISS-b(うめ 2 号, 1978)による HF 波帯、米国ロスアラモス国立研究所の FORTE (Fast On-orbit Recording of Transient Events, 1997)による VHF 波帯の観測例が挙げられる程度である。FORTE は、衛星軌道上から観測される CID (Compact Intra-cloud Discharge) の痕跡である TIPP (Trans-Ionospheric Pulse Pair) の発見などの成果を挙げている。後継機では、複数機のアンテナによる電波源測位が計画されているが、現時点で成功例の報告はない。

GLIMS での雷放電観測

GLIMS は、雷放電および高高度放電発光現象からの発光を撮像および測光観測し、さらに雷放電からの電磁波も同時観測する機能を有する。GLIMS 機器配置概念図を図1に示す。このうち、雷放電を対象とした装置は、CMOSカメラ、VLFレシーバ、および VHF センサである。CMOS カメラは、雷放電および高高度放電発光現象の発光過程を、CMOS 検出器によって撮像観測する機能を有する。異なる透過波長帯域をもつフィルタを装着した 2 台の CMOS カメラ画像データから、オンボードでトリガ検出および画像演算処理を行う。VLF レシーバは、雷放電からの VLF 波動を観測する機

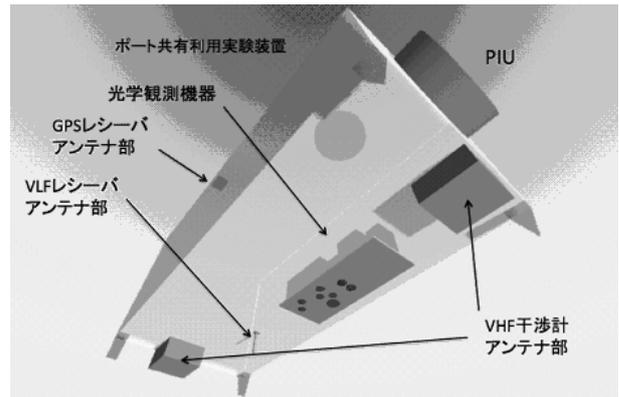


図 1. GLIMS 機器配置概念図

表 1. GLIMS 搭載雷放電観測機器の目的と機能

CMOS カメラ
(目的) 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
(機能) 最大 500 fps のスピードで視野 40°内に発生する過渡発光の撮像観測を行う
VLFレシーバ
(目的) 雷放電および高高度放電発光現象からの VLF 電磁放射の情報を得る
(機能) 周波数帯 DC - 40 kHz の VLF 電磁波を 100 kHz のサンプリング周波数で観測する
VHF干渉計
(目的) 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
(機能) 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(TBC)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

能を有する。VLF レシーバのアンテナは、ポート共有利用実験装置(バス部)の底面部に鉛直に取り付ける。VHF センサは、雷放電からの VHF 波動を干渉計観測する機能を有する。アンテナは、ポート共有利用実験装置の底面部に 2 台配置する。各観測器の目的と要求性能を、表 1 にまとめる。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。

VHF 広帯域干渉計

大阪大学のグループでは、1995 年から雷放電進展様相を可視化する観測機である VHF 波帯広帯域デジタル干渉計の開発を進めており、地上用システムとしては実用のレベルに達しているものと自負している。広帯域デジタル干渉法は、受信機などが不要で、アンテナ間隔も短くすることができるので、衛星単体から VHF 波帯電磁波源の測位を行うための唯一の手段であると考えられる。VHF 波帯広帯域観測からは、リーダ進展に伴う一般的なパルスに加えて、Narrow Bipolar Pulse (NBP) や TIPP, CID などに関する知見も得られるものと期待される。搭載する VHF 干渉計ではストームスケールである 10 km の空間分解能と 10 μ s の時間分解能で、これらの電磁パルス放射過程を時間的・空間的に特定し、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。これまで地上用システムとして実現してきた VHF 干渉計を、必要な改良を加え宇宙用とする方針で進めているもので、言わば地上システムが本研究開発における BBM に相当する。

GLISM/VHF 干渉計は、2 台のアンテナで受信する、雷放電進展により放射される VHF 波帯インパルス性電磁波を記録し、デジタル干渉法を用いて、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から成る。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する。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。混載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うこととする。

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。雷放電位置の VHF 干渉計単独での一意特定や、より高空間分解能の実現には、最低 3 台のアンテナ設置やアンテナ間隔の増加が望まれるが、本ミッションの制約において、これらは不可能となるため、上記を性能要求とし、GLISM 内の光学観測および地上観測データを利用して、雷活動を伴う雷雲セルを特定することとする。

VHF 干渉計開発グループは、平成 15 年度から東大阪宇宙開発協同組合 (SOHLA) の衛星プロジェクトにミッションサイエンティストとして参画し、小型人工衛星“まいど1号”で VHF 電磁波を受信する、1 系統のロッドアンテナ、帯域通過フィルタ、広帯域増幅器、および A/D 変換機からなる VHF センサ (Broadband Measurement for Waveforms of VHF Lightning Impulses; BMW) の開発と実験に成功している。本研究開発は、まいど 1 号/BMW を重要なヘリテージとして実施するものである。

おわりに

本稿では、VHF センサをはじめとする、GLISM ミッションにおける雷放電観測装置とその目的について述べた。2009 年度中の開発完了、および 2011 年度の打ち上げとその後の数年間にわたる観測を目指し、開発を進めている。