

## 電波で挑む雷放電と雷雲の科学

森本健志\*

## 1. はじめに

雷放電に伴い放射される電磁波は、極めて広い周波数帯に亘り、対象とする放電諸過程に応じて様々な成分が観測されている。このうち VHF 帯のインパルス性電磁波は、雷放電進展に伴いその先端付近から放射されるため、これらの放射源位置を標定することで雷放電進展の様相を雲内の現象を含めて詳細に理解することが可能となる。筆者らのグループは、デジタル干渉法<sup>1)</sup>による到来方向推定を採用し、VHF 帯広帯域干渉計の開発と高度化を行ってきた<sup>2)</sup>。地上装置としての広帯域干渉計は、双方向性リーダ仮説の実証<sup>3)</sup>や雷雲内正電荷分布推定<sup>4)</sup>、雲放電において先行する放電と同じ経路を辿り高速進展する放電現象の発見<sup>5)</sup>などの科学的成果を挙げている。

この広帯域干渉計は、受信機などが不要なシンプルなシステム構成である上、アンテナ間隔を短くすることができるので、衛星単体から VHF 帯電磁波源測位を行うために最適な手段であると考えられる。そこで筆者らは、地上用システムとして開発を進めてきた同干渉計に、宇宙で機能するために必要な処置を施し人工衛星等に搭載するという開発方針で、宇宙への展開を試みた。まず、雷放電進展に伴い無数に放射される VHF 帯インパルス性電磁波を宇宙空間において 1 台のアンテナで受信し記録したのが、東大阪の中小企業発として知られる小型衛星「まいど 1 号」に搭載した VHF 帯広帯域波形測定装置である。この成果を受けて、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟 (JEM: きぼう) で実施した GLIMS (Global Lightning and sprItE MeasurementS) ミッションでは、JEM の曝露部底面に 2 台の VHF アンテナ

を設置し、宇宙からの干渉法による雷放電源測位に世界で初めて成功した。本稿では、これらの取り組みを紹介する。

## 2. VHF 帯広帯域干渉計

広帯域干渉計はアンテナセンサ、帯域通過フィルタ、および線形増幅器 3 組と、GPS を用いた高精度時刻情報の記録を可能とした 3 チャンネル完全同期サンプリングの A/D 変換器、そしてパーソナルコンピュータで構成する<sup>2)</sup>。干渉法による到来方向推定の基本は、2 台のアンテナで受信する波形のアンテナ間位相差を求めることである。デジタル干渉法は、本来狭帯域が原則である干渉法を、広帯域信号を直接サンプリング記録しデジタル信号処理によって多くのフーリエ周波数成分に同時に適用する。このため、受信系は同調回路等が不要でシンプルな構成となり、メン

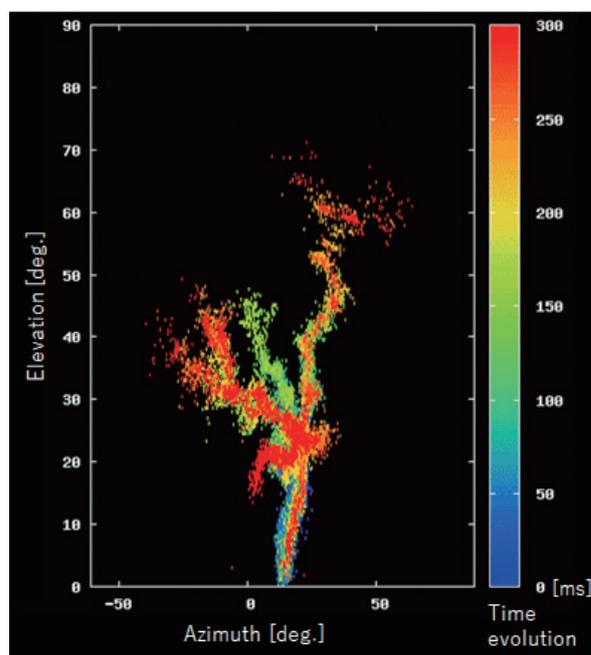


図 1. 広帯域干渉計で観測された落雷の放電路進展様相

\*近畿大学理工学部電気電子工学科教授

テナンスが容易で実用化に有利である。

1回の雷放電に伴い放射される VHF 帯電磁波は数千パルスに及ぶことから、これらの放射源を順次標定することで雷放電進展様相を再現することができる。広帯域干渉計で観測された雷放電進展様相の例を図1に示す。同図では時間進展を色で示しており、仰角 20° 付近から大地（仰角 0°）に向けて下向きに進展するのと並行して、雲内を仰角 70° 付近まで枝分かれしながら進展する様子や、同じ放電路を複数回通過し後続のものは初回に比べて速度が上がる様子が確認できる。

### 3. 小型人工衛星「まいど1号」/ VHF 帯広帯域波形測定装置

「まいど1号」は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から  $\mu$ -LabSat の技術移転を受け東大阪を中心とする中小企業群が製造し、2009年1月23日に打上げられた、一辺が 50 cm の立方体を包絡線とする八角柱形で質量 57 kg の小型人工衛星である<sup>6,7)</sup>。この衛星に、筆者らが開発した雷放電に伴う VHF 帯広帯域電磁波を受信・記録する VHF 帯広帯域波形測定装置を搭載して、雷観測を行った<sup>7,8)</sup>。これは、第2章で述べた地上システムとしての広帯域干渉計の宇宙への展開、すなわち適当な間隔で配置した複数のアンテナで電磁波を受信し、その到来方向を求めることで衛星軌道上からの雷監視を実現するための基礎実証として位置付けられる。地上用として開発し運用している広帯域干渉計を構成する技術をベースにして、宇宙空間の真空・熱・放射線および打上げ時の振動・衝撃などの環境に耐え得るための部品選定や構造変更を施し、環境試験を繰り返して耐性を保障する方法で開発を行った。

図2は、「まいど1号」の全運用期間で、VHF 帯広帯域波形測定装置による観測を行った場所と記録された電磁波波形数（トリガ回数）を示している<sup>8)</sup>。観測回数は 158 回、記録した電磁波波形数は 14,372 波形で、このうち 1,013 波形を地上にダウンロードした。観測の大半は、事前の気象状況

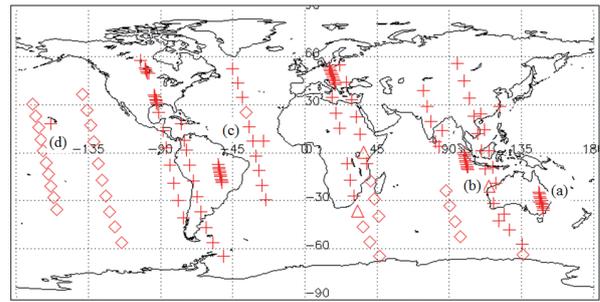


図2. 「まいど1号」の観測場所と取得した電磁波波形数 (◇: 50未満, △: 50-100, +: 100)

等から衛星通過時に雷活動が発生する可能性が高いと考えられる地域を中心に行ったものである。図2中の◇, △, +は、1回当たり高々数秒間の観測時間のうちに記録した電磁波波形数、すなわち設定した閾値を越える強度の電磁波が受信された回数が、それぞれ 50 未満、50 以上 100 未満、およびオンボードメモリの上限である 100 であったことを示している。線上に並ぶ一連の観測地域は、同一の衛星パス上での観測でほぼ同一の時刻に観測されたものである。一般に海洋上に比べて陸上で雷活動が活発であるとされることに一致した明瞭な対比が見受けられる。

図3に、図2中に示す (a) オーストラリア大陸東部、(b) 東南アジア、(c) 大西洋、(d) 太平洋の各地域で記録された代表的な電磁波波形を示す。(d) 太平洋では、非発雷地域での観測を目的とし、閾値を越える電磁波が記録されない環境下で強制トリガにより記録した波形である。すな

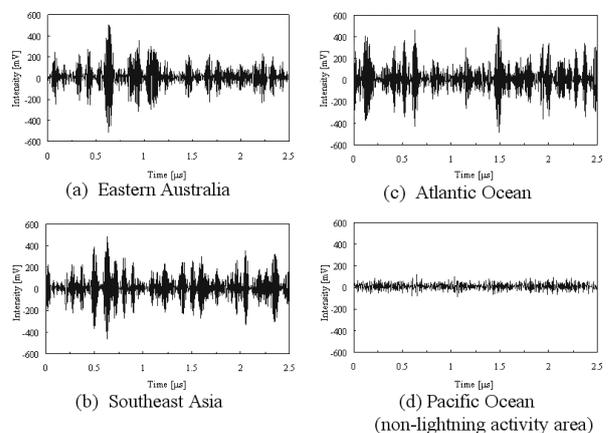


図3. 「まいど1号」により取得された電磁波波形 (a) オーストラリア大陸東部、(b) 東南アジア、(c) 大西洋、(d) 太平洋

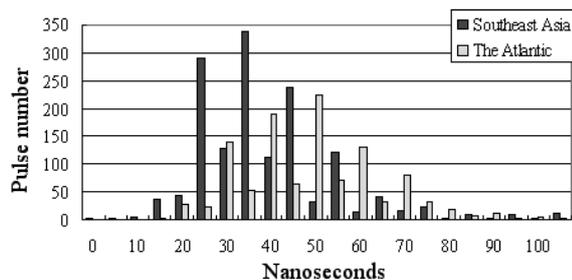


図 4. 「まいど1号」で取得された電磁波形のパルス幅度数分布 (■東南アジア, □大西洋)

わちこの波形は、「まいど1号」の視野内に雷活動のない背景雑音と考えられる波形で、宇宙空間における電波環境が雷観測実施可能なレベルであることを示すものである。ここで、(c) 大西洋では海洋上にも関わらず多くの電磁波が記録されている。図4は、(b) 東南アジアで記録した1,529パルスと、(c) 大西洋で記録した630パルスの半値幅を示したもので、当該地域での観測で記録された電磁波形から、その中に含まれる数百 ns 程度の幅のパルスとして認められるものを全て抜き出し、それぞれのパルスの半値幅を度数分布で示した。同図より、(c) 大西洋上で記録されたパルスの半値幅は、(b) 東南アジア上で記録されたそれより20 ns程度大きいことが分かる。波源が衛星直下から遠くなればなるほど、受信されるまでに電離層を伝搬する距離が長くなることで分散の効果が大きくなり、受信されるパルス幅は広がる。従って、半値幅の大きい(c) 大西洋上での記録波形は、より長い電離層伝搬を経ることになる電離層への斜め入射をしたものと見なすことができ、アフリカ大陸での雷活動により放射された電磁波を受信したものであると考えられる<sup>7)</sup>。

小型人工衛星「まいど1号」搭載VHF帯広帯域波形測定装置による観測では、

- ・宇宙空間において、前例のない広い帯域で電磁波を記録し、民生品や地上用機器ベースで開発した装置が正常に機能すること
- ・感度等の設計が妥当であったこと
- ・未知であった宇宙空間における電波環境が雷観測実施可能なレベルであることが確認でき

たこと

が主な成果である。これらに加えて、筆者が、設計、製作、試験から運用、データ解析まで一連の宇宙機開発に対する知識と経験を得ることができた。「まいど1号」で取得した電磁波形について、その地域特性やパルス幅、パルス対等の形状に認められた性質は、電離層伝搬の数値シミュレーション結果とよく符合し、得られた知見を用いた到来方向推定の提案に至っている<sup>9)</sup>。

#### 4. 国際宇宙ステーション JEM-GLIMS ミッション / VHF デジタル干渉計 (VITF)

2012年11月から2015年8月にかけて国際宇宙ステーション (ISS) において、電磁波観測と光学観測を併用したスプライト及び雷放電の高速撮像センサ (JEM-GLIMS) による観測を行った。GLIMS ミッション<sup>10)</sup> ではISSの日本実験棟「きぼう」曝露部に設置されているポート共有利用実験装置 (MCE) 内に、CMOSカメラ2台<sup>11)</sup> とフォトメータ6台<sup>12)</sup> で構成する光学観測機器、VHFセンサ2台からなる干渉計 (VITF)<sup>13)</sup> とVLF受信機1台からなる電波観測機器を搭載し、全球的な雷および高高度放電発光を観測している。GLIMS ミッション機器のひとつであり、筆者が開発および運用責任者を務めたVITFは、MCE底面に設置する2台の広帯域アンテナと、受信系エレクトロニクス部からなる。エレクトロニクス部は、前章で述べた小型衛星「まいど1号」搭載のVHF帯波形測定装置の実績を最大限活用して開発しており、2チャンネル同期や取得データのパルス時間間隔記録などの機能拡張を行った。エレクトロニクス部は、180 × 210 × 60 mmのサイズにユニット化し、他のGLIMS機器と一体で、MCE内部に取付けている。VITFアンテナはスペースや重量、および宇宙飛行士による船外活動も行われるISS特有の制約から、200 × 200 mmのパッチアンテナをMCE底面から約100 mm嵩上げした構造とし、1.6 mの間隔で2台設置している。

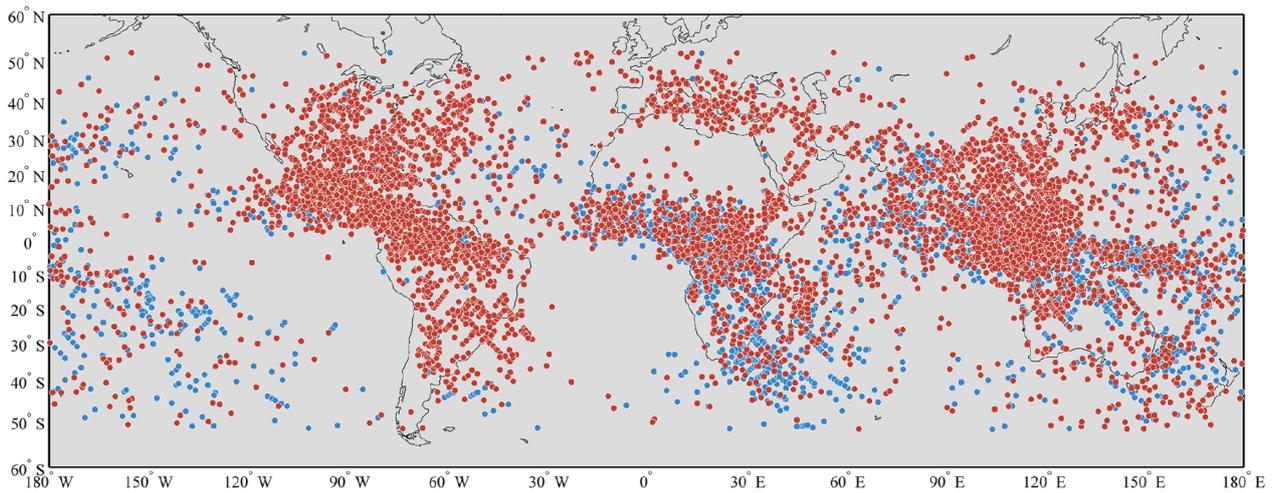


図5. GLIMS/ フォトメータが観測した発光 (VHF 電波を伴うもの ●, 伴わないもの ●)

MCEは2012年7月21日、種子島宇宙センターからH-IIBロケットにて打上げられ、宇宙ステーション補給機「こうのとり3号機」でISSに運ばれ、8月9日に「きぼう」に取付けられた。GLIMSミッションは試験期間や一部の不具合対応を経て同年11月から定常観測に移行した。2014年12月まで定常観測を継続した後、2015年8月まで後期運用を行い、MCEと共に大気圏へ投棄されるに至っている。これらの観測期間を通じて、VITFは多数のVHF広帯域波形を記録し、その数は定常観測期間の2013年1月から2014年7月の19か月間で4,071組394,407波形、これに続く13か月間では14,624組1,777,106波形に及んでいる。ここで、オンボードメモリが飽和する最大130の一連の波形をグループ化して、1組と呼んでいる。

図5に、2013年1月から2015年8月の32か月間に、GLIMS/フォトメータが発光を記録した際のISSの位置を示す。このうち高高度発光現象が認められた事例は約10%である<sup>14)</sup>。これらの期間を通じて、GLIMSのデータ取得タイミングを司るトリガ機器はフォトメータであった。図5に示す発光データのうち、赤で示すのがVITFによりVHF帯電磁波形が記録されたもの、青で示すのがVHF帯電磁放射は確認されず発光のみが記録されたものである。全発光データのうち約70% (5538/8049) が、VHF帯電磁波放射を伴っ

ていた。この間フォトメータやVITFのトリガレベルを変更していることもあるので、割合の数字そのものは意味のない値であるが、この値に地域や季節依存性は認められなかった<sup>15)</sup>。

2013年2月14日062836h (UT) にブラジル北部赤道域上空でVITFが記録したインパルス性電磁波形にデジタル干渉法を施し得られた到来方向 (赤曲線) を、同時時間帯にCMOSカメラが撮影した画像が高度10kmであると仮定して重ね描きしたのが図6である。世界初の宇宙からの干渉法による雷放電源測位事例で、光学観測結果とよく一致している。一方、この波形に対し電

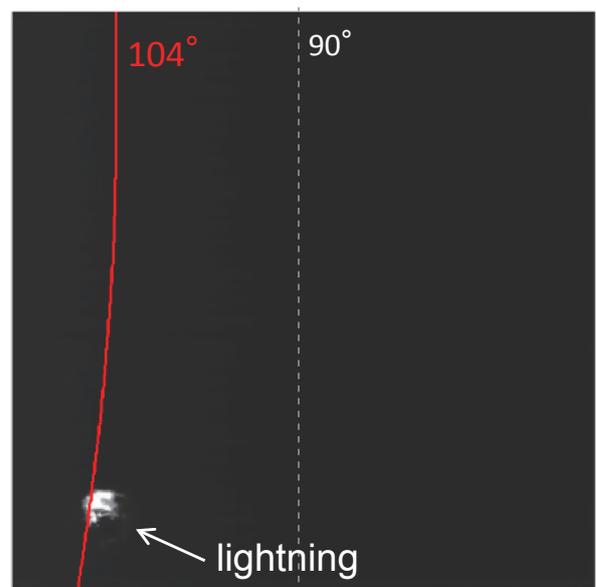


図6. GLIMS/VITFの取得波形にデジタル干渉法を適用した到来方向推定結果



図7. GLIMS/VITFの取得波形に電離層の群遅延効果を考慮した到来方向推定結果

離層の分散効果による群遅延を考慮した到来方向推定<sup>16)</sup>を行った結果を図示したのが図7である。この結果も光学観測結果と矛盾せず、これらを組み合わせることによって、広帯域観測であることを活かした単独衛星からのVHF帯電磁波観測による雷嵐監視が可能である。

## 5. おわりに

本稿では、地上システムとしての雷嵐観測用VHF帯広帯域干渉計と、この宇宙への展開を目指し行った小型人工衛星「まいど1号」搭載のVHF帯広帯域波形測定装置、およびISS JEM-GLIMS ミッションにおけるVITFの成果を概説した。筆者は約20年間これらの研究に従事できる幸運に恵まれている。ベンジャミン・フランクリンが凧を揚げて雷が電気現象であることを示して以来3世紀に渡る研究で雷放電現象に関する多くの知見が積み上げられてきた。その一方で、筆者が関わるものだけでも、冬季に100 kmを超える長距離進展する雷放電<sup>17)</sup>や、雷雲や雷放電と同期した放射線領域の高エネルギー放射の観測と雷発生起源の謎へのアプローチ<sup>18-20)</sup>など、まだまだ未解明な謎と新たな発見が多くある「古くて新しい」研究領域である。雷の源となる雲を対象と

した気象レーダ観測や、衛星観測等の技術の高度化も最大限取り入れ残された謎に挑むと共に、本稿のきっかけとなった小型ロケットを使って落雷を特定の場所に誘導するロケット誘雷技術を使った学際連携研究<sup>21)</sup>を推進したいと考えている。本誌での紹介の機会を与えていただいた代表理事宗林由樹先生、理事中口譲先生はじめ海洋化学研究所の関係諸氏に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) R. Mardiana and Z-I. Kawasaki, Broadband radio interferometer utilizing sequential triggering technique for locating fast-moving electromagnetic sources emitted from lightning, IEEE. Trans. Instrument. Meas., 49, 376-381, 2000
- 2) T. Morimoto et al., An operational VHF broadband digital interferometer for lightning monitoring, IEEJ Trans. FM., 124, 12, 1232-1238, 2004
- 3) Z. Kawasaki et al. Verification of bi-directional leader concept by interferometer observations, J. Atmos. Elec., 22, 2, 55-79, 2002
- 4) T. Morimoto et al., Lightning observations and consideration of positive charge distribution inside thunderclouds using VHF broadband interferometry, Atmos. Res., 76, 1-4, 445-454, 2005
- 5) M. Akita et al., Three-dimensional VHF observations using advanced VHF broadband digital interferometer, Proc. of 13th ICAE, 2, 815-818, China, 2007
- 6) Y. Nakamura and H. Hashimoto, Technology transfer program of Microlabsat, Proc. of 4S Symposium: Small Satellites, Systems and Services, ESA SP-571, France, 2004
- 7) T. Morimoto et al., Lightning observations of a small satellite "Maido-1" and the study

- on recorded VHF waveforms, *J. Atmos. Elec.* 36, 2, 39–53, 2017
- 8) H. Kikuchi et al., Wideband radio wave observations of lightning discharge by Mado-1 satellite, *IEICE Trans. Comm.*, E93-B, 8, 2226–2227, 2010
  - 9) H. Kikuchi et al., VHF radio wave observations by Mado-1 satellite and evaluation of its relationship with lightning discharges, *IEICE Trans. Comm.*, E96-B, 3, 880–886, 2013
  - 10) T. Ushio et al., The global lightning and sprite measurement (GLIMS) mission on International Space Station –Concept and overview–, *IEEJ Trans. FM*, 131, 12, 971–976, 2011
  - 11) M. Sato et al., Lightning and Sprite Imager (LSI) onboard J 369 EM-GLIMS. *IEEJ Trans. FM* 131(12), 994–999, 2011
  - 12) M. Sato et al., Six-channel spectrophotometers (PH) onboard JEM-GLIMS. *IEEJ Trans. FM* 131(12): 1000–1005, 2011
  - 13) T. Morimoto et al., VHF lightning observations on JEM-GLIMS mission—gradual approach to realizing space-borne VHF broadband digital interferometer, *IEEJ Trans. FM*, 131(12), 977–982, 2011
  - 14) M. Sato et al., Horizontal distributions of sprites derived from the JEM-GLIMS nadir observations, *J Geophys Res Atmos.* doi:10.1029/2015JD024311, 2016
  - 15) T. Morimoto et al., An overview of VHF lightning observations by digital interferometry from ISS / JEM-GLIMS, *Earth, Planets and Space*, 68, 145, doi:10.1186/s40623-016-0522-1, 2017
  - 16) H. Kikuchi, T. Morimoto et al., Direction-of-arrival estimation of VHF signals recorded on the International Space Station and simultaneous of optical lighting, *IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing*, 54, 7, 3868–3877, 2016
  - 17) 田尻他, 長距離進展する雷放電の放電過程の解析, 日本大気電気学会論文誌, 採録決定, 2021
  - 18) Y. Wada et al., Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash, *Communications Physics*, 2, 1, doi: 10.1038/s42005-019-0168-y, 2019
  - 19) Y. Wada et al., Downward terrestrial gamma-ray flash observed in a winter thunderstorm, *Physical Review Letters*, 123, 6, pp. 061103-1–6, doi: 10.1103/PhysRevLett.123.061103, 2019
  - 20) Y. Wada et al, High peak-current lightning discharges associated with downward terrestrial gamma-ray flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, 4, doi:10.1029/2019JD031730, 2020
  - 21) 森本他, 海洋への落雷と生命起源物質誕生に関する研究, *海洋化学研究*, 32, 1, 91–93, 2019