

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：特別推進研究
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19002002
 研究課題名（和文）マイクロサテライト・地上観測連携による高々度放電発光と地球ガンマ線現象の解明
 研究課題名（英文）Investigations on TLEs and TGFs using micro-satellite and ground observation network
 研究代表者
 高橋 幸弘 (TAKAHASHI YUKIHIRO)
 北海道大学・大学院理学研究院・教授
 研究者番号：50236329

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、雷放電に伴う高高度発光現象、地球ガンマ線現象、及び全球的雷放電活動と大気及び電磁圏への影響を定量的に解明するために、専用マイクロサテライトの新規開発・製作を行った。開始から1年余りで完了し、2009年1月に打ち上げ、初期運用に成功した。また世界及びアジア域における雷放電の地上観測網を整備・拡張し連続運用に入り、それらのデータ解析から諸現象のメカニズム解明に大きく貢献している。

研究成果の概要（英文）：

In order to investigate TLEs, TGFs, global lightning activities, and their effects on the atmosphere/ionosphere/magnetosphere, university microsatellite, named SPRITE-SAT (RISING) was developed successfully and launched in January 2009. Ground-based lightning observation networks using ELF and VLF radio wave were also developed and operated. Based on the data obtained by the ground-based instruments and previously launched satellites, various kinds of data analysis have been carried out, which contribute to the understanding of basic mechanisms of TLEs/TGFs, global lightning activity and their quantitative effects.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	132,400,000	39,720,000	172,120,000
2008年度	187,100,000	56,130,000	243,230,000
2009年度	19,400,000	5,820,000	25,220,000
年度			
年度			
総計	338,900,000	101,670,000	440,570,000

研究分野：理工

科研費の分科・細目：数物系科学

キーワード：TLE、スプライト、地球ガンマ線、TGF、大学衛星、超小型衛星、雷放電、地上観測

1. 研究開始当初の背景

1990年以降、雷放電に関する研究状況は大

きく変化した。地上の高感度カメラによって、1989年に偶然、スプライトと呼ばれる中層・

超高層大気放電現象が発見される。2004年にはスプライトなど高々度発光現象(TLEs と呼ぶ)の観測を目的とした観測器 ISUAL が台湾の衛星 FORMOSAT-2 に搭載され観測を開始した。また、雷雲活動に伴うガンマ線が、1994年、人工衛星に搭載された宇宙ガンマ線センサーCGRO/BATSE でも確認された(地球ガンマ線(TGFs)と呼ばれる)。これは当初スプライト現象に直接関連すると予測されたが、2004年の RHESSI 衛星が取得した大量のデータによって、大幅なモデルの変更に迫られている。また、ELF/VLF 帯の雷放電電波観測網の整備と、OTDやTRMM/LISなどの衛星観測によって、グローバルな雷放電活動についての知見が急速に増加している。それらは、TLE の大気への影響だけでなく、雷放電活動の地球環境モニター指標としての有効性を示唆している。

こうして数々の発見と精力的な研究が行われていたが、TLEs 及び TGFs のメカニズムについては依然不明な点が多かった。スプライトの発生位置と原因となる落雷の位置的・時間的ずれやスプライトの縦筋構造の数と分布は、単純な準静電場モデルでは説明がつかず、その解明には、雷放電から放射される電磁パルスとスプライトの水平構造の同時観測が鍵と考えられた。また TGFs は雷放電発生時刻との関係がメカニズム解明の上で不可欠とされていた。そうした背景から、TLEs の水平構造を真上から撮像すること、また TGFs と落雷を 1ms 以下の高時間精度で同時記録することを目的とした次世代の衛星観測計画が 2004 年頃から本格化した。代表的なものは、フランスの小型衛星 TARANIS、欧州宇宙機関(ESA)の国際宇宙ステーションミッション ASIM、台湾の超小型衛星 FORMOSAT-6 などであるが、どれも当初 2011 年前後の打上を目指していた。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の背景を受けて、次の3つのテーマを研究目的として設定した。

(1) 高々度発光現象(TLEs)のメカニズムの解明：スプライト発生の基本的なメカニズムとされる準静電場モデルでは、空間構造、落雷との空間的・時間的ギャップなど、多くの説明不可能な点がある。これらを解く鍵は、雷放電から放射される電磁波の役割と、地上観測で計測が困難な、雷雲内の水平電流にあると考えられる。

(2) 地球ガンマ線(TGFs)のメカニズムの解明：これまで TGFs と落雷のタイミングについて、衛星の時刻精度の不足から、決定的な観測がなされていない。これを明らかにすることで、どういったフェーズの放電プロセスが TGFs を生成しているかが判明し、メカニ

ズムの同定に決定的な上方を与える。

(3) グローバルな雷放電活動とそれらの大気及び電離圏・磁気圏への定量的影響の推定：雷放電は TLE、TGF およびそれ以外のプロセスによって、中層・超高層大気と電離圏・磁気圏に、物理的・化学的に大きな影響を与えている可能性が高い。しかしこれまで定量的にそれらを計測した例は非常に少ない。本研究では、衛星及び地上観測網を駆使して、それらの推定を試みる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究課題では以下の方法に基づいて研究を進める。

(1) 独自にマイクロサテライトを開発し、期間内に打上げ、データ解析を進める。この衛星は、TLEs を上方から撮像するための2色の CMOS カメラ、魚眼レンズを持つ高感度 CCD カメラ、雷放電起源電磁パルスを捉える VLF 電波受信機、地球ガンマ線を計測するガンマ線センサーを搭載し、雷放電と、TLEs 発光及び TGFs を同時観測する世界で初めての衛星である。

(2) 電磁氣的な観測手法によるグローバルおよびローカルな地上観測を組み合わせ、今回打ち上げるマイクロサテライトおよび既存の衛星観測と連携して継続及びキャンペーン観測を実施し、そのデータ解析を行う。それらの解析結果を、電磁気学、大気化学、ガンマ線物理学的観点から、数値シミュレーションに基づいて検討・議論する。

4. 研究成果

研究期間内に計画通り、マイクロサテライトの常識を破る高機能を有する 50kg クラス超小型衛星 RISING を開発、製作、打ち上げ、初期運用に成功した。しかしその後通信に障害が発生し、本格的な運用を前に仮眠状態にある。詳細な検討によって原因をほぼ究明し、数年以内に少なくとも機能の半分は回復し、科学観測を開始できる可能性が高いと判断している。しかしながら研究期間内に当初予定した科学的成果を出すことが困難なことから、本予算での研究継続は断念した(衛星の搬送波を利用した電離圏モニター(ビーコン観測)は継続)。しかしながら、諸外国の衛星計画の遅れから、復活が数年以内であれば、目指していた TGFs 観測は一番乗りの可能性があり、また、我々の開発している RISING の後継機が、TLEs 観測でも世界の戦陣を切る可能性は小さくない。さらに、今回開発された技術は多くの継続ミッションに反映され、衛星 BUS および観測機器の両方において、今日の我が国における超小型衛星発展の根幹を形成していると言って過言ではない。また、衛星と対をなす地上電磁場観測

網については着実に整備と維持を行い、それらによって得られたデータの解析及び既存衛星データとの比較から、TLEs 及び TGFs のメカニズムの解明とそれらの大気圏・電磁圏への影響、さらに太陽地球気候結合研究に対しても、ユニークかつ多大な貢献を達成している。以下に特に重要な成果について項目毎に述べる。

(1) 超小型衛星 BUS 及び衛星管制設備の開発・整備

東北大学は 50kg クラスの超小型人工衛星であるスプライト観測衛星 (SPRITE-SAT) の開発を完了した。SPRITE-SAT の打上時の全体サイズは 500 x 500 x 494mm であり、質量は 43.9 kg である。長さ 86cm の伸展マストを搭載し、磁気センサと磁気トルカを組み合わせることで姿勢制御する。衛星内部は中央支柱構造とし、主なバス機器は中央支柱外側に固定する。太陽電池セルはボディマウント方式で、側面 4 面および上面 1 面の計 5 面に貼り付ける。下面パネルに主なミッション機器を搭載し、中央支柱内部の上半分には伸展マストを収納する。伸展マストによる重力傾斜トルクにより、下面パネルが常に地球方向を指向する仕様である。

本計画では、衛星の地上管制設備も自分たちで整備、運用している。主局は東北大学の屋上に設置された 2.4m パラボラアンテナと最上階の部屋に設置された送受信設備である。さらに衛星との通信時間を大幅に増加させる目的で、スウェーデン・キルナの ESRANGE に 2.4m パラボラアンテナを持つ受信局を設置し、日本からのリモート運用を常時行う体制を確立した。

本衛星は H-IIA-15 号機のピギーバック衛星として種子島宇宙センターより無事打ち上げられた。打上時刻 2009 年 1 月 23 日 12 時 54 分 (JST) 後の最初の可視パスである同日 14 時 32 分～14 時 41 分の時間帯において、観測局のある東北大学にて衛星ハウスキーピングデータのテレメトリを受信し、コマンド系を含めて正常動作を確認した。

通信不良が発生するまでの約 12 日間、各種データの取得は正常に行われた。フライト成果は下記のとおりである。

- 1) バス機器の正常動作確認。ただし電力制御ユニットに関しては、特定条件下で仕様外動作する問題を確認。
- 2) ステータスデータ、姿勢データ (太陽センサ、磁気センサ、TAMU)、温度・電圧・電流データ、GPS データの取得
- 3) ミッションカメラの正常動作確認および画像の取得
- 4) 磁気トルカによるデタンプリング制御の成功。最大 6.2deg/s のスピン状態から、最小で 0.2deg/s までスピンが減衰。

5) マスト伸展の成功

運用時の計測温度を統計した結果、上面および側面パネルは 1 周回において -23°C ～ $+50^{\circ}\text{C}$ の間で変化した。またミッション機器を搭載する下面パネルは $+2^{\circ}\text{C}$ ～ $+23^{\circ}\text{C}$ 、バス機器を搭載する中央支柱は $+8^{\circ}\text{C}$ ～ $+27^{\circ}\text{C}$ であり、健全な温度範囲を維持できている。特に中央支柱は、地上試験に基づく推定値と比較して、 2.5°C の推定誤差である。

本研究開発を通じて、50kg 級超小型衛星の設計・製作・試験・打上・運用経験を蓄積した。こうした衛星 BUS の開発実績が高い評価を受け、同 BUS をベースにした新衛星提案が、文部科学省の超小型衛星研究開発事業の衛星計画の一つ採択されるとともに、最先端研究開発支援プログラム「日本発の「ほどよし信頼性工学」を導入した超小型衛星による新しい宇宙開発・利用パラダイムの構築」の次世代超小型衛星シリーズの基本衛星 BUS の候補として検討されるに至っている。

(2) 衛星搭載観測機器の開発

今回開発した衛星には、既存機器の大幅な軽量化や、民間技術を応用した極めて安価な装置など、これまでの科学衛星にはない画期的な技術が多数新たに試みられており、それらは記録的とも言える極めて短期間の中で、開発、校正、環境試験を完了し、衛星打ち上げに間に合わせることに成功している。これらの機器は、国際宇宙ステーションの JEM/GLIMS ミッション採択の前提となっている他、文部科学省の超小型衛星研究開発事業では衛星開発申請の広角カメラと、搭載宇宙望遠鏡のセンサー部の 2 課題で採択され、さらに台湾 FORMOSAT-6 衛星の搭載カメラにも採用されており、今後一層の広がりを見せる勢いである。またフランスの小型衛星 TARANIS 搭載機器の開発においても、今回の本研究課題で獲得した技術が活かされている。

あらたに開発された機器は、a) CMOS カメラ及び自己トリガロジック (既存の CMOS センサーを利用した狭帯域フィルターを装着した広角カメラと、その画像から雷放電発光を自動判別しデータ記録するトリガロジックを開発)、b) 魚眼レンズ付き高感度 CCD カメラ (民生品製作メーカーとの共同開発で、高機能・高感度・超安価な宇宙 CCD カメラを開発。本観測機器によって、前項の夜間の地球撮像に成功した)、c) 地球ガンマ線を計測するガンマ線センサー (これまでにない超小型・省電力のガンマ線センサーを開発)、d) VLF 電波受信機 (スタンフォード大学が学内で新規開発された集積回路を用いて開発した最初の宇宙用小型受信機) である。

(3) 世界 ELF 電波観測網の整備とデータ解析

本研究グループが2000年より構築を開始したELF観測ネットワークは、世界で最も高精度であり、また常時運用される唯一のネットワークである。本研究課題期間は世界4観測点の安定的運用のためにメンテナンスと必要な改修作業を行うと共に、これまでのデータベースの解析を行い、雷放電、TLEs、TGFs、さらに太陽気候結合について、多くの新たな知見を得た。

- ① 新たな手法を導入することで、落雷の位置評定精度を格段に向上させるとともに、検出限界強度を大幅に下げること成功した(投稿論文(J. Geophys. Res.)改訂中)。
- ② 落雷の規模(電荷モーメント)毎の年間平均発生数を世界で初めて導出した(投稿論文(J. Geophys. Res.)改訂中)。
- ③ 検出感度の一様性を確保した、雷放電発生世界分布を初めて描くことに成功し、その日々変動まで記述できるようになった(投稿論文準備中)。
- ④ 落雷の規模(電荷モーメント)別にTGFsの発生確率を初めて推定した(投稿論文準備中)。
- ⑤ 雷放電規模とカラム型スプライトストリーマ発光強度の間に明白な定量的関係があることを初めて示した(投稿論文(J. Geophys. Res.)受理)。これにより、スプライト発生メカニズムについて定量的な検証に道を開いた。
- ⑥ 雷放電規模とスプライトヘイロー発光強度の間に明白な定量的関係があることを初めて示し、同現象が絶縁破壊でないことを示唆した(投稿論文準備中)。
- ⑦ 雷放電や雲量など地球気象データに太陽自転周期の変動を見だし、それが太陽11年周期に依存することを発見した(投稿論文(Atmos. Chem. Phys.)掲載済み)。

(4) アジア VLF 雷放電観測拠点の整備

雷放電に伴うVLF帯の電磁波は地上・電離層間の導波管を長距離伝搬するため、広域に発生する雷放電のモニタリングが可能になるほか、伝搬経路上の電離圏D領域に発生する擾乱現象を捉えることができる。本研究では東南アジア域における雷放電と電離圏D領域のモニタリングを行うため、台湾、タイに観測局を設置した(論文(Advan. Space. Res.)投稿中)。インドネシア局の設置準備もほぼ整い、別財源により、2010年度に設置作業を行う予定である。

- ① 設置したVLF観測網により、2009年7月の日食の観測を実施し、電離圏の顕著な変動を検出した(論文レベルでは過去1例のみ)(論文投稿準備中)
- ② 特徴的な電離圏・大気圏擾乱現象がエルブス発生と対応していることを、地上観測と衛星撮像から初めて確認した(論文投稿

準備中)。

(5) 大気電場観測拠点の整備

雷放電及びTLEs研究の目的の一つは、大気圏から電離圏・磁気圏を包括する、グローバルな電流系の全容を定量的に解明することにある。本研究では、この大気電流系の最も重要な指標の一つである、鉛直大気電場を計測する拠点の整備を行っている。データ解析の結果、大気電場とELF電波にみられる雷放電活動の間に、高い相関関係が現れることを世界で初めて定量的に見いだした(論文投稿準備中)。

(6) 衛星及び高高度気球データの解析

本研究課題では、新規の超小型衛星の開発・運用を目指すとともに、既存衛星や過去の同グループの気球実験データの解析を平行して進め、将来の衛星観測の役割を明確化する研究を行った。

- ① 気球観測によるTLEsの撮像に初めて成功し、原因となる落雷からの放電VLF電波を同時記録しエルブスの発生電場条件を初めて定量的に明らかにした(論文投稿準備中)。これはRISING衛星によるVLF電波観測の役割と仕様を明確にすることに貢献した。
- ② TLEの全球分布
FORMOSAT-2衛星搭載ISUAL観測器の長期間データから、TLEsの世界分布を発光種別毎に明らかにした(J. Geophys. Res. 掲載)。
- ③ FORMOSAT-2衛星搭載ISUAL観測器のレイフォトメータによる測光データから、TLEsの原因となる雷放電電流値を推定する手法を確立した(J. Geophys. Res. 掲載)。

以上の成果以外に、本研究で扱う現象と観測データは極めて新規性が高いため、それらに関連する広い分野に周知し、研究領域を多角的に拡大することが必須であるとの判断から、本研究課題で得られた観測データをもとに、国内外の研究者との共同研究の展開に努力をしてきた。

現在、各研究機関・大学と面会の上で具体的な調整を進めているものを以下に示す。()は研究協力機関

- a. 雷放電とアジア域季節内変動の関係(名古屋大学)
- b. 雷放電と大気大循環の鉛直風との関係(国立環境研究所)
- c. 雷放電と山火事の関係(北海道大学・情報科学)
- d. TLEsの大気化学への効果(ボローニャ大学、茨城大学、国立環境研究所、名古屋大学)
- e. TLEsの物理モデルの構築(名古屋大学)
- f. VLFおよびELFネットワークによる落雷位置の精密評定(北海道大学・情報科学)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ①. Takahashi, Y., A Yoshida, M Sato, T Adachi, S Kondo, R -R Hsu, H -T Su, A B Chen, S B Mende, H U Frey, and L -C Lee, Absolute optical energy of sprites and its relationship to charge moment of parent lightning discharge based on measurement by ISUAL/AP, J. Geophys. Res., 2010, in print, 査読あり
- ②. Y. Takahashi, Y. Okazaki, M. Sato, H. Miyahara, K. Sakanoi, P. K. Hong, and N. Hoshino, 27-day variation in cloud amount in the Western Pacific warm pool region and relationship to the solar cycle, Atmos. Chem. Phys., 10, 1577-1584, 2010, 査読あり
- ③. Kazuya Yoshida, Yukihiro Takahashi, Yuji Sakamoto, Eriko Ujiie, Kei Takiuchi, Yasuhiro Nakazato, Tomoki Sawakami, Takeshi Sakanoi, Yasumasa Kasaba, Satoshi Kondo, Kozo Yamashita, Shinya Ueda, Takeshi Takashima, Kazuhiro Nakazawa, Takefumi Mitani, Teruaki Enoto, Mitsuteru Sato, Umran Inan, Ivan Linscott, Fredrik Bruhn, Yoshinari Masumoto, SPRITE-SAT: a Micro Satellite for Scientific Observation of Transient Luminous Events and Terrestrial Gamma-ray Flashes, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, Vol. 8, 2010, 査読あり
- ④. Yuji Sakamoto, Yasuhiro Nakazato, Tomoki Sawakami, Kazuya Yoshida, Yukihiro Takahashi, Pre-Flight Analysis, Test Evaluation and Flight Verification of the Thermal System of Tohoku University SPRITE-SAT, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, Vol. 8, 2010, 査読あり
- ⑤. Yuji Sakamoto, Tomoki Sawakami, Kazuya Yoshida, Yukihiro Takahashi, Development and Flight Data Analysis of the Attitude Determination and Control System of Tohoku University SPRITE-SAT, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, Vol.8, 2010, 査読あり
- ⑥. Yukihiro Takahashi, Present Status and Scope of TLE and TGF Studies, IEEJ Transactions on Fundamentals and

Materials, Vol. 128, 163-167, 2009, 査読あり

- ⑦. T. Adachi, S. A. Cummer, J. Li, Y. Takahashi, R.-R. Hsu, H.-T Su, A. B. Chen, S. B. Mende, and H. U. Frey, Estimating lightning current moment waveforms from satellite optical measurements, Geophys. Res. Lett., 36, L18808, 2009, 査読あり
- ⑧. Alfred B. Chen, Cheng-Ling Kuo, Yi-Jen Lee, Han-Tzong Su, Rue-Ron Hsu, Jyh-Long Chern, Harald U. Frey, Stephen B. Mende, Yukihiro Takahashi, Hiroshi Fukunishi, Yeou-Shin Chang, Tie-Yue Liu, and Lou-Chuang Lee, Global distributions and occurrence rates of transient luminous events, J. Geophys. Res., 113, A08306, doi:10.1029/2008JA013101, 2008, 査読あり

[学会発表] (計 113 件)

- ①. Kazuya Yoshida, Yukihiro Takahashi, Yuji Sakamoto, Eriko Ujiie, Kei Takiuchi, Yasuhiro Nakazato, Tomoki Sawakami, Takeshi Sakanoi, Yasumasa Kasaba, Satoshi Kondo, Kozo Yamashita, Shinya Ueda, Takeshi Takashima, Kazuhiro Nakazawa, Takefumi Mitani, Teruaki Enoto, Mitsuteru Sato, Umran Inan, Ivan Linscott, Fredrik Bruhn, Yoshinari Masumoto, SPRITE-SAT: a Micro Satellite for Scientific Observation of Transient Luminous Events and Terrestrial Gamma-ray Flashes, 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009年7月8日, 筑波
- ②. Y. Takahashi, T. Sakanoi, M. Sato, S. Kondo, K. Yoshida, Y. Sakamoto, E. Ujiie, T. Takashima, U. Inan and D. Smith, SPRITE-SAT mission for sprites and TGFs studies, European Geosciences Union 2008 general assembly, 2008.4.13018, Vienna, Invited.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 幸弘 (TAKAHASHI YUKIHIRO)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：50236329

(2) 研究分担者

吉田 和哉 (YOSHIDA KAZUYA)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00191578
坂本 裕二 (SAKAMOTO YUJI)

東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50431523
坂野井 健 (SAKANOI TAKESHI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80271857
藤原 均 (Fujiwara Hitoshi)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：50298741
村田 功 (Murata Isao)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：00291245

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

三谷 烈史 (MITANI TAKEFUMI)
宇宙航空研究開発機構・
宇宙科学研究本部・助教
研究者番号：70455468
中澤 知洋 (NAKAZAWA KAZUHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・講師
研究者番号：50342621
高島 健 (TAKASHIMA TAKESHI)
宇宙航空研究開発機構・
宇宙科学研究本部・准教授
研究者番号：10298193
土屋 史紀 (TSUCHIYA FUMINORI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：10302077
大矢 浩代 (OHYA HIROYO)
千葉大学・大学院工学研究科・助手
研究者番号：00241943
鴨川 仁 (KAMOGAWA MASASHI)
東京学芸大学・教育学部物理科学分野
研究者番号：00329111
佐藤 光輝 (SATO MITSUTERU)
北海道大学・大学院理学研究院・講師
研究者番号：50312541
足立 透 (ADACHI TORU)
スタンフォード大学・STAR LAB
研究者番号：なし