

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340117

研究課題名(和文) 宇宙・地上の連携観測による高高度放電発光現象の発生条件とメカニズムの解明

研究課題名(英文) Identification of the occurrence conditions and mechanisms of transient luminous events from space- and ground-based observations

研究代表者

佐藤 光輝 (SATO, Mitsuteru)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50312541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：高高度放電発光現象(スプライト)を国際宇宙ステーションから観測したJEM-GLIMSのデータと地上雷電波観測データを駆使して、スプライトの水平空間分布と親雷放電の放電特性を明らかにし、スプライトの発生条件を特定することが本研究の目的である。JEM-GLIMSの天底観測データからスプライトを識別する手法を世界に先駆けて確立し、詳細解析の結果42例のスプライトの水平空間分布と、親雷放電から10 km以上離れて発生するという空間偏差を初めて定量的に明らかにした。また、雷電流が放射するVHF帯電磁パルスの放射源も史上初めて特定し、スプライトの空間分布との比較から発生条件に関する知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this research is to identify the occurrence conditions of sprites. For this purpose, the horizontal distributions of sprites and the electrical properties of the sprite-producing lightning discharges are studied using the data obtained by the JEM-GLIMS measurements at the ISS and using ground-based lightning data. First, we established the analytical method to identify weak sprite emissions from the incomparably intense lightning emissions in the JEM-GLIMS data. Based on the detailed data analyses of the 42 sprite events identified by that method, the spatial distributions of sprites and the horizontal displacement of the sprites from the sprite-producing lightning discharges are quantitatively identified. From the detailed comparison between the sprite distributions and source locations of the VHF pulses excited by the sprite-producing lightning currents, which is the first result in the world, the occurrence conditions of the sprites are clarified.

研究分野：超高層物理学, 大気電気学

キーワード：雷放電 高高度放電発光現象 スプライト 国際宇宙ステーション

1. 研究開始当初の背景

(1) スプライトの発生条件とメカニズム

雷放電が励起する高高度放電発光現象の1990年代における相次ぐ発見によって、雷放電の研究は過去20年間で大きく変化した。特に高高度放電発光現象の一発生形態であるスプライトに対しては精力的な観測が行われ、準静電場モデルに代表される発生メカニズムに関する理論的な研究も進み、近年ではスプライトの微細構造(ストリーマ)の素過程が解明されつつある。ところが、①スプライトの空間的発生分布、②カラム型やキャロット型のような発生形態の違い、③雷雲直上からの位置ずれ、④親雷放電からスプライト発生までの遅延時間など、これらが生じる要因、即ち、何がスプライトの発生条件を決めているのかという、メカニズムに直結する根本的な問題は全く解明されていない。雷放電水平電流から放射された電磁パルスが上空で干渉し、スプライト発生の種類となっているという示唆がされている(図1)が、観測的裏付けが不十分で、最終的な結論には至っていない。

(2) これまでの研究の問題点

スプライトの発生条件を特定するためには、スプライトの時間的・空間的変化、水平空間分布、および親雷放電の放電特性を観測的に明らかにすることが重要となる。しかしこのためには、多点同時地上光学観測による三角測量が必要であるが、地理的・気象条件の制約から困難であった。雷放電の放電形態と放電電流を推定するためには、ELF・VLF帯電磁波の波形データが必要になるが、このような広帯域の連続波形データ取得システムの稼働は、世界的に整備が遅れており十分ではない。さらに、雷放電がスプライト発生高度に励起する電磁界はフルウェーブ法によって解かれるが、観測結果に即した雷放電水平電流の寄与を含めた計算は全く行われていない。以上のような問題点から、スプライトの発生条件とメカニズムに関する研究は世界レベルで進んでいない。

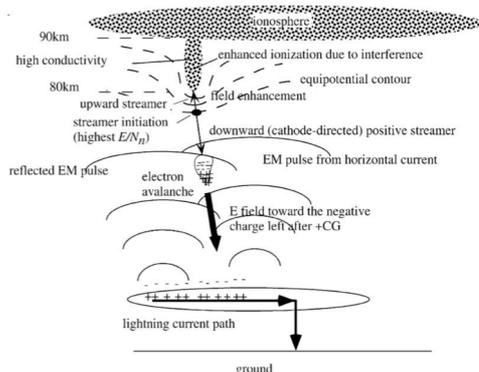


図1 雷放電水平電流によるスプライト発生の種類形成に関する概念モデル [Cho and Rycroft, 2001]

2. 研究の目的

2012年から開始する国際宇宙ステーション・日本実験モジュールからのスプライト観測(JEM-GLIMS)と、それと連携した地上光学・電磁波同時観測から、多角的にスプライトと親雷放電を捉える(図2)。得られるデータを駆使し、

- (1) スプライトの時間的・空間的変化、水平分布、および親雷放電の放電電流や放電形態を明らかにする。
- (2) それらの結果をもとに、時間領域差分法によって親雷放電が上空に励起する電磁界を推定し、観測結果とモデル計算結果との定量的比較からスプライトの発生条件を特定する。

以上の2点が本研究の目的である。

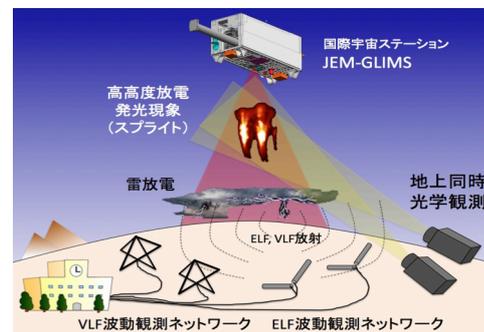


図2 宇宙・地上のスプライト連携観測の概念図

3. 研究の方法

本研究では、以下の4段階で研究を進める。

- (1) 国際宇宙ステーション曝露部搭載 JEM-GLIMSによるスプライト・雷放電の天底観測と、それと同期した地上光学・電磁波観測を実施し、スプライトの水平分布と時間・空間進展を明らかにする。
- (2) 次に、ELF帯・VLF帯電磁波観測データから、スプライトを励起した親雷放電の電荷モーメント変化、ピーク電流値、放電電流波形などの放電特性を明らかにする。
- (3) さらに、雷雲上空の静電磁界、放射電磁界、および電子密度変動を計算するシミュレーションコードを時間領域差分法に基づき新たに開発し、観測データを初期値としてスプライト発生時の電磁界・電子密度の時間・空間変動を推定する。特に、雷雲地上間放電のみならず、JEM-GLIMSの電磁波観測データから雷放電水平電流の空間分布と強度を推定しモデル計算を行う。
- (4) 最終的に、スプライト発生高度における電場や電子密度の空間的非一様性とその時間変動に着目し、観測結果とモデルの計算結果とを定量的に比較・検証することによって、スプライトの発生条件を明らかにする。

#### 4. 研究成果

JEM-GLIMS は、2012 年 11 月から 2015 年 8 月までの約 3 年間、軌道上での雷放電・高高度放電発光現象の観測を行い、8,357 例の雷放電発光、699 例の高高度放電発光現象、42 例のスプライトを検出した。JEM-GLIMS が検出した雷放電の全世界分布(図 3)は、過去に行われた雷放電衛星観測(MicroLab-1 衛星, TRMM 衛星)の結果と極めて良い一致を示した。

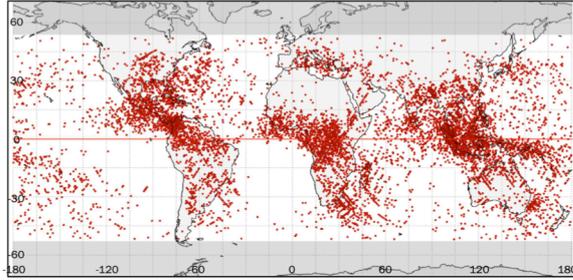


図 3 JEM-GLIMS が検出した雷放電の全球分布

本研究の第一の成果は、JEM-GLIMS の光学観測データからスプライト発光を識別する新たな手法を確立したことである。地球の水平線方向を観測する手法(リム観測)と異なり、天底観測では強烈な雷発光と微弱なスプライト発光を同時に観測するため、それらを分離・識別することが重要である。①JEM-GLIMS のカメラ画像の差引処理、②測光器データの強度比計算、③地上 ELF 帯電波データを用いた電荷モーメント変化量計算、という 3 つの手法を組み合わせることで、識別を可能とした。本研究で開発した手法は、数年後に打上げが計画される欧州の TARANIS ミッションや ASIM ミッションでも標準的に使用されると期待される。この成果は、査読論文にまとめられ発表された(5. 主な発表論文 [雑誌論文]①, ②, ⑤)。

第二の成果は、上記の手法を用いて 42 例のスプライトを識別し、水平空間分布と親雷放電発光との空間的差異を定量的に明らかにした点である。図 4 は、JEM-GLIMS によるスプライトの観測例である。多くの場合で、スプライトは雷放電発光の直上ではなく、ある程度の偏差をもって発生することが明らかとなった。空間偏差を定量的に推定した結果(図 5(左)), 中央値は約 13.6 km となることがわかり、世界初の成果を挙げることができた。また、スプライト励起雷放電の電荷モーメント変化量を ELF 帯・VLF 帯電磁波動データから推定した結果(図 5(右)), 中央値は 1096 C・km となることがわかった。

第三の成果は、JEM-GLIMS に搭載されている VHF 帯電波干渉計によって、主に雷雲内で水平雷放電電流が放射する VHF 帯電波の放射源を特定したことである(5. 主な発表論文 [雑誌論

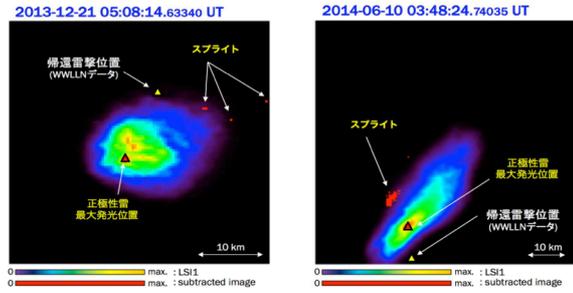


図 4 JEM-GLIMS が検出したスプライトの例

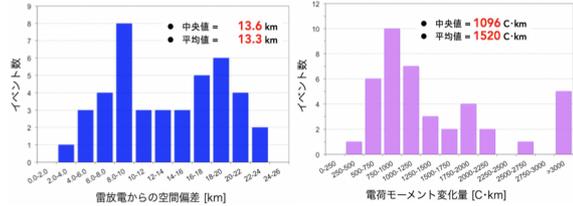


図 5 (左)スプライトと親雷放電との空間偏差, (右)親雷放電の電荷モーメント変化量

文]④)。これは過去に誰もなし得なかったことであり、史上初の快挙といえる。これによって、雷雲内で放射された VHF 帯電磁パルスの空間分布とスプライトとの空間分布の差異を定量的に明らかにすることができた。

第四の成果は、第二・第三の成果で得られた結果からスプライトの空間偏差や分布を決める要因(発生条件)についての知見を得たことである。図 6(a)は、JEM-GLIMS が観測した雷・スプライトと VHF 帯電磁パルス放射源の空間分布を示しており、なぜこのような分布になったのかを考察した結果が図 6(b)である。このような定量解釈が可能となったのは本研究が世界初である。

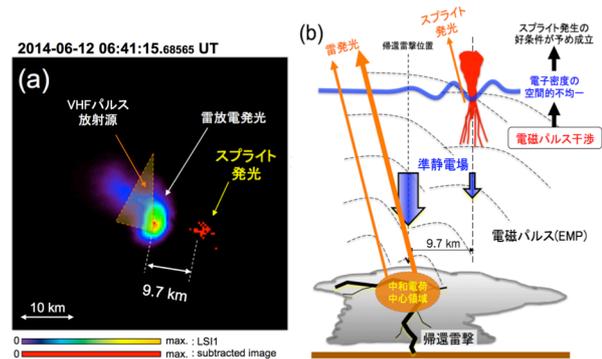


図 6 スプライトの発生条件に関する考察

一方、当初の計画では、JEM-GLIMS の光学・電波観測と時間領域差分法によってスプライトの発生条件を特定する予定であった。しかし 42 例のスプライトでは、期待に反し多くの例で VHF 帯電磁パルスの振幅が飽和しており、放射源の推定が困難であった。このため今後は方針を変更し、JEM-GLIMS のカメラ画像から水平電流の分布と時間発展を推測し、時間領域差分法によってスプライト発生条件の解明に迫る研究を、平

成 28 年度に新規獲得した科研費・基盤(B)で引き続き実施していく。

本研究から派生して得られた成果として、ELF 帯電波データから雷放電電流波形を直接的に推定可能とする手法を確立した点である。この成果は査読論文掲載決定と、特許申請に結びついている(5. 主な発表論文〔雑誌論文〕③,〔産業財産権〕)。

#### 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 27 件)

- ① Adachi, T., M. Sato, T. Ushio, A. Yamazaki, M. Suzuki, M. Kikuchi, Y. Takahashi, U. Inan, I. Linscott, Y. Hobara, 他 5 名, Identifying the occurrence of lightning and transient luminous events by nadir spectrophotometric observation, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 145 巻, 85-97, DOI: 10.1016/j.jastp.2016.04.010, 2016. (査読有)
- ② Sato, M., M. Mihara, T. Adachi, T. Ushio, T. Morimoto, M. Kikuchi, H. Kikuchi, M. Suzuki, A. Yamazaki, Y. Takahashi, 他 6 名, Horizontal distributions of sprites derived from the JEM-GLIMS nadir observations, *Journal of Geophysical Research*, 121 巻, 3171-3194, DOI:10.1002/2015JD024311, 2016. (査読有)
- ③ Shimizu, C., M. Sato, Y. Hongo, F. Tsuchiya, and Y. Takahashi, Relation between charge amounts of lightning discharges derived from ELF waveform data and severe weather, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 136 巻, 252-258, DOI:10.1541/ieejfms.136.252, 2016. (査読有)  
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieejfms>
- ④ Kikuchi, H., T. Morimoto, M. Sato, T. Ushio, M. Kikuchi, A. Yamazaki, M. Suzuki, 他 3 名, 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*, 99 巻, 1-10, DOI:10.1109/TGRS.2016.2529658, 2016. (査読有)
- ⑤ Sato, M., T. Ushio, T. Morimoto, M. Kikuchi, H. Kikuchi, T. Adachi, M. Suzuki, A. Yamazaki, Y. Takahashi, 他 11 名, Overview and early results of the Global Lightning and Sprite Measurements mission, *Journal of Geophysical Research*, 120 巻, 3822-3851, DOI:10.1002/2014JD022428, 2015. (査読有)
- ⑥ Yaniv, R., Y. Yair, C. Price, J. Bor, M. Sato, Y. Hobara, S. Cummer, J. Li, and A. Devir, Ground-based observations of the relations between lightning charge-moment-change and the physical and optical properties of column sprites, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 107 巻, 60-67, DOI:10.1016/j.jastp.2013.10.018, 2014. (査読有)
- ⑦ 高橋幸弘, 27 日太陽周期の雲変動と太陽活動, *Journal of Plasma and Fusion Research*, 90 巻, 128-131, 2014. (査読無)  
<http://www.jspf.or.jp/journal/>
- ⑧ 高橋幸弘, 大気電気学 - 全地球回路 -, *Journal of Plasma and Fusion Research*, 90 巻, 137-140, 2014. (査読無)  
<http://www.jspf.or.jp/journal/>

〔学会発表〕(計 173 件)

- ① Sato M. 他, An overview of three-year JEM-GLIMS nadir observations of lightning and TLEs, AGU Fall Meeting 2015, San Francisco (USA), 2015 年 12 月 15 日. (招待講演)
- ② 佐藤光輝 他, JEM-GLIMS による 3 年間の雷放電・高高度放電発光現象の観測成果, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 東京大学 (東京都・文京区), 2015 年 10 月 31 日.
- ③ Sato M 他, 2.5-years of observations of lightning and TLEs by JEM-GLIMS from the ISS, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 12th Annual Meeting, Suntec City (Singapore), 2015 年 8 月 3 日. (招待講演)
- ④ Sato M. 他, 2.5-years of observations of lightning and TLEs by JEM-GLIMS, 26th IUGG General Assembly 2015, Prague (Czech), 2015 年 6 月 28 日.
- ⑤ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMS 光学観測データから推定した雷放電・TLEs の全球発生頻度分布, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2015 年大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 2015 年 5 月 25 日.
- ⑥ 佐藤光輝 他, 静止軌道からの雷放電観測の重要性, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2015 年大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 2015 年 5 月 27 日.
- ⑦ Sato M., Results from the GLIMS mission, TEA-IS 2015 Workshop, Vienna (Austria), 2015 年 4 月 18 日. (招待講演)
- ⑧ Sato M 他, Relation between sprite distribution and source locations of VHF pulses derived from JEM-GLIMS measurements, EGU General Assembly 2015, Vienna (Austria), 2015 年 4 月 16 日. (招待講演)
- ⑨ Sato M 他, Spatiotemporal characteristics of sprites and sprite-related VHF signals measured by JEM-GLIMS, AGU Fall Meeting 2014, San Francisco (USA), 2014 年 12 月 17 日.
- ⑩ Ushio T 他, Lightning and sprite detection from International Space Station, AGU Fall Meeting 2014, San Francisco (USA), 2014 年 12 月 15 日.

- ⑬ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMS による雷放電・TLEs 観測:2年間の観測成果, 第28回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2014年12月8日.
- ⑭ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMSにより観測されたスプライトとそれに伴うVHF帯電波の特徴, 第136回地球電磁気・地球惑星圏学会, キッセイ文化ホール(長野県・松本市), 2014年11月3日.
- ⑮ Ushio T. 他, Global lightning and sprite measurements from International Space Station, 31st URSI General Assembly and Scientific Symposium, Beijing (China), 2014年8月21日. (招待講演)
- ⑯ Sato M. 他, Spatial and temporal characteristics of sprites detected by JEM-GLIMS, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, ロイトン札幌(北海道・札幌市), 2014年7月28日.
- ⑰ Mihara M. 他, The horizontal distributions of sprites measured by lightning and sprite imager onboard JEM-GLIMS, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, ロイトン札幌(北海道・札幌市), 2014年7月28日. (招待講演)
- ⑱ Hobara Y. 他, VLF subionospheric disturbances and causative lightning properties by using ground observations and ISS GLIMS mission, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, ロイトン札幌(北海道・札幌市), 2014年7月28日. (招待講演)
- ⑲ Sato M. 他, Nadir observation of lightning and TLEs by JEM-GLIMS, 2nd TEA-IS Summer School, Collioure (France), 2014年6月27日. (招待講演)
- ⑳ Sato M. 他, JEM-GLIMS: First qualitative nadir observations of lightning and TLEs from ISS/JEM, 3rd Annual International Space Station Research and Development Conf., Chicago (USA), 2014年6月19日. (招待講演)
- ㉑ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMS 光学機器で観測されたスプライト・エルブスの特徴, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2015年大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 2014年4月30日.
- ㉒ 三原正大 他, JEM-GLIMS 搭載のLSIカメラにより撮像されたスプライトの空間分布, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2015年大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 2014年4月30日. (招待講演)
- ㉓ 足立透 他, 宇宙からの多波長光学観測による雷放電特性の推定, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2015年大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 2014年4月30日. (招待講演)
- ㉔ 牛尾知雄 他, Introduction to GLIMS mission, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2015年大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 2014年4月30日. (招待講演)
- ㉕ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMS ミッションにおけるデータ処理と今後の発展, 平成25年度宇宙科学情報解析シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2014年2月14日.
- ㉖ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMSによるTLEsの光学観測:スプライト, エルブス観測例, 日本大気電気学会第90回研究発表会, 東京学芸大学(東京都・小金井市), 2014年1月9日.
- ㉗ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMSによって観測されたスプライトとエルブスの時間・空間変化, 第14回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2014年1月10日.
- ㉘ Sato M. 他, Photometric characteristics of sprites and elves derived from JEM-GLIMS nadir observations, AGU Fall Meeting 2013, San Francisco (USA), 2013年12月11日. (招待講演)
- ㉙ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMSによる雷・TLEの天底観測:スプライト, エルブス観測例, 第134回地球電磁気・地球惑星圏学会, 高知大学(高知県・高知市), 2013年11月3日.
- ㉚ Sato M. 他, Lightning current measurement based on ELF magnetic field observations, Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC) 2013, Taipei (Taiwan), 2013年9月7日. (招待講演)
- ㉛ Sato M. 他, JEM-GLIMS observations of lightning and TLEs from ISS, Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly (DACA) 2013, Davos (Switzerland), 2013年7月12日.
- ㉜ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMSによる光学観測の初期結果報告, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 2013年5月23日.
- ㉝ Sato M. 他, Nadir observations of lightning and TLEs by JEM-GLIMS, EGU General Assembly 2013, Vienna (Austria), 2013年4月9日. (招待講演)
- ㉞ 佐藤光輝 他, 国際宇宙ステーションからの雷放電と高高度発光現象の観測計画-初期観測結果:主に光学観測器-, 第27回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2013年2月28日.
- ㉟ 佐藤光輝 他, 国際宇宙ステーションからの雷放電と高高度発光現象観測(GLIMS)の概要と現状-光学観測機器-, 第13回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2013年1月9日.
- ㊱ 牛尾知雄 他, 国際宇宙ステーションからの雷放電と高高度発光現象観測(GLIMS)の概要と現状, 第13回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2013年1月9日. (招待講演)
- ㊲ 佐藤光輝, GLIMS機器の構成, 日本機械学会 実践セミナー「国際宇宙ステーションから

のspray観測」, 大阪府立大学 (大阪府・堺市), 2012年12月22日. (招待講演)

- ③⑥ Sato M. 他, Initial results derived from JEM-GLIMS observations, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012年12月6日.
- ③⑦ 佐藤光輝 他, 全球雷活動の時間・空間変化と電離圏・磁気圏への影響, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市), 2012年10月21日. (招待講演)
- ③⑧ Sato M. 他, Current status and future collaborative observation plan of JEM-GLIMS mission, Thunderstorm Effects on the Atmosphere-Ionosphere System (TEA-IS) Summer School, Malaga (Spain), 2012年6月19日.
- ③⑨ 佐藤光輝 他, JEM-GLIMS ミッションにおける運用計画とデータ処理システム, 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2012年大会, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), 2012年5月21日.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計4件)

名称: Lightning-strike electric charge estimation system and method

発明者: 本間規泰, 本郷保二, 高橋幸弘, 佐藤光輝, 土屋史紀, 鶴島大樹

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 14/443002号

出願年月日: 2015年5月14日

国内外の別: 国外(米国)

名称: Lightning-strike electric charge estimation system and method

発明者: 本間規泰, 本郷保二, 高橋幸弘, 佐藤光輝, 土屋史紀, 鶴島大樹

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 13855352.4号

出願年月日: 2013年11月14日

国内外の別: 国外(欧州)

名称: 落雷の電荷量推定システムと方法

発明者: 本間規泰, 本郷保二, 高橋幸弘, 佐藤光輝, 土屋史紀, 鶴島大樹

権利者: 同上

種類: 特許

番号: PCT/JP2013/080836号

出願年月日: 2013年11月14日

国内外の別: 国外

名称: 落雷の電荷量推定システムと方法

発明者: 本間規泰, 本郷保二, 高橋幸弘, 佐藤光輝, 土屋史紀, 鶴島大樹

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2012-251493号

出願年月日: 2012年11月15日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~jemglims>

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~msato>

[http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/140625\\_jem\\_glims.html](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/140625_jem_glims.html)

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/2013\\_top\\_discoveries/#.VyGuKyOLRGg](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/2013_top_discoveries/#.VyGuKyOLRGg)

[http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/121221\\_jem\\_glims.html](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/121221_jem_glims.html)

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/mce/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

牛尾 知雄 (USHIO, Tomoo)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50332961

森本 健志 (MORIMOTO, Takeshi)

近畿大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 60403169

芳原 容英 (HOBARA, Yasuhide)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 10303009

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

鈴木 睦 (SUZUKI, Makoto)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主幹研究員

研究者番号: 60142098

### (3) 連携研究者

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 (OYA, Hiroyo)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00241943

鴨川 仁 (KAMOGAWA, Masashi)

東京学芸大学・教育学部・准教授

研究者番号: 00329111

中田 裕之 (NAKADA, Hiroyuki)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30345011

### (3) 研究協力者

足立 透 (ADACHI, Toru)