

令和元年5月15日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04055

研究課題名(和文) 衛星直下視観測と数値モデルで迫る大気放電と全球電流回路の生成・駆動機構の解明

研究課題名(英文) Identification of Generation/Driving Mechanisms of Upper-Atmospheric Discharges and Global Electric Circuit Using Satellite Data and Numerical Simulation

研究代表者

佐藤 光輝 (SATO, Mitsuteru)

北海道大学・理学研究院・講師

研究者番号：50312541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：JEM-GLIMSミッションの光学観測データ、地上雷・大気電場観測データ、数値モデル計算を駆使し、(1)スプライトの水平空間分布の生成機構、(2)雲内放電と対地雷との発生比(Z値)及び全球電流回路における雷放電が担う電源の割合、これらを特定することが本研究の目的である。JEM-GLIMSと地上雷データからZ値の緯度・季節・地域依存性を世界で初めて定量的に明らかにした。さらに、高度範囲0-80km、空間分解能 0.2×0.2 度、時間分解能5分という三次元全球電流回路モデルを新規開発し、雷放電は全球電流回路の電流駆動源として約20%しか担っていないことを世界で初めて定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって明らかとなったZ値の緯度分布と季節・地域依存性は、過去の研究とは比較にならないほど圧倒的な統計量と定量性の観点から世界トップと言え、世界標準となり得る重要な成果である。また、新規に開発した三次元全球電流回路モデルは、雷放電のみならず衛星観測に基づく世界降水量分布・雲分布も初期値に組み込み、高い時間・空間分解能で世界のあらゆる点の大気電場強度を算出できる点で画期的である。本研究で明らかとなった、雷放電が全球電流系の電流駆動源として約20%しか担っていないという事実は、革新的な成果といえる。

研究成果の概要(英文)：The main objectives of this research are (1) to identify the generation mechanism of the horizontal distribution of sprites, and (2) to estimate the Z-value (occurrence ratio of intra-cloud to cloud-to-ground discharges) and to evaluate the contribution of the global lightning activities to the global electrical circuit (GEC) as the electrical current generator. For these purposes, JEM-GLIMS optical data, ground-based lightning and atmospheric electric field data are analyzed. From the JEM-GLIMS and ground-based lightning data, the latitudinal/seasonal/regional dependences of the Z-value are quantitatively and first estimated in the world. In addition, the 3-dimensional GEC model with the spatial and temporal resolution of 0.2×0.2 deg and 5 min in the 0-80km altitude range is newly developed. The quantitative comparison between the model results and observational data revealed that the global lightning activities contribute only ~20% of the total electrical current to the GEC.

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 全球電流回路 国際宇宙ステーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

<スプライト生成機構> 高高度放電発光(TLEs)の一発生形態であるスプライトは約25年前に発見されたが、水平空間分布と形状(カラム型、キャロット型)を決める要因は未だ明確でない。その理由の1つは、スプライトの立体分布を求める観測研究が不足しており、観測事実に基づく生成機構の理論的研究が十分でない事による。これを打開するため、国際宇宙ステーションからの雷放電・TLEs直下視観測ミッション(JEM-全球電流回路 GLIMS)を申請者が2012年に実現し、世界に先駆けスプライトの直下視検出に成功している。これまで(1)スプライトと親雷放電の水平空間分布と差違、(2)スプライト形状の差違、(3)雲内雷放電からのVHF電波の検出と放射源推定、などに関する知見を得た。これらの成果を踏まえ、数値モデルによる観測事実の忠実再現から理論的裏付けを得ることが、スプライト生成機構の不完全性解決のために必要となる。

<IC/CG比と全球電流回路> 雷放電研究における最大の未解決課題として、対地雷(CG)に対する雲内放電(IC)の比率(IC/CG比 = Z値)とその緯度依存性が挙げられる。地上雷放電観測からIC/CG比の緯度依存性が推定されているものの、地域・季節に依存した雷活動の多様性からすると極めて限定的な観測事実に基づいており、信頼性は低い。さらに、地上電波観測ではICが放射する電磁波を検出できない、TRMMなどの衛星光学観測ではICとCGの判定が困難、など、それぞれに固有の問題を抱えており、課題解決に向けた研究は全くと言って良いほど進捗していない。IC/CG比が重要なのは、地表・電離圏間に存在する三次元全球電流回路の駆動源における、雷放電・TLEsの寄与率の定量評価に直結するからであり、全球電流回路の観測・理論研究の世界的な遅れはこの問題に帰結する。

2. 研究の目的

本研究は、申請者が世界に先駆けて実現させた国際宇宙ステーションからのJEM-GLIMSミッションによって得られた光学・電波観測データを用いることにより、さらに、地上雷データ、大気電場観測データ、数値モデル計算手法も駆使することによって、

- ① JEM-GLIMSが明らかにしたスプライトの水平空間分布と形状を、雷放電上空の放射電界と電子密度の時空間変化と、準静電界による絶縁破壊を統一的に解く数値モデルによって再現すること、
- ② JEM-GLIMSデータからIC/CG比およびその緯度依存性を定量的に推定し、その結果を反映した三次元全球電流回路モデルの計算から実観測データの再現性を検証すること、

を目的とする。これらによって、スプライト発見以来不完全とされる生成機構を解決するとともに、誰もなし得なかった雷放電・TLEsの活動が全球電流回路で担う役割と寄与を定量評価することで、この分野に大きなブレークスルーをもたらすことを狙う。

3. 研究の方法

本研究計画は、以下に示す課題Iと課題IIで構成される。

課題I： JEM-GLIMSで観測したスプライトの空間分布と形状を数値モデルにより再現

- [1] JEM-GLIMSの観測結果を基に雲内放電進展路をモデル化し、励起された放射電界と高度60-90 kmにおける電子密度の時空間変化を時間領域差分法(FDTD)モデルで計算する。
- [2] 雷放電励起準静電界でスプライトを生起させる数値モデルを新規開発し、[1]の結果を初期値として計算を行う。[1]、[2]のイテレーションにより、JEM-GLIMS観測結果の数値モデルによる再現を行う。

課題II： IC/CG比の緯度依存性の推定と全球電流回路モデルによる実観測結果の再現

- [1] 800程度の雷発光事例について、JEM-GLIMS測光データと地上雷データからIC、CGに典型的な青色発光強度と赤色発光強度との比(青/赤比)を推定する。それを全雷発光事例に適用し、IC/CG比と緯度依存性を特定する。
- [2] 新規開発する三次元全球電流回路モデルに[1]の結果を組み入れ、地表高度の大気電場強度と時間変化を算出する。昭和基地の大気電場観測データと比較し、数値モデルによる再現性を検証する。

4. 研究成果

先ず**課題II**に関して、JEM-GLIMSのフォトメタデータと可視カメラデータを無作為に約940例抽出し、地上雷データ(NLDN, WWLLN, JLDN)との詳細比較を行うことで、ICとCGのそれぞれにおける青/赤比の違いを明らかにした。その結果、ICでは青/赤比が相対的に高くなり、CGでは相対的に低くなることを突き止めた。これらは、雷雲内で流れる放電電流の高度差を反映していると考察される。この結果は、JEM-GLIMSが検出した任意の雷放電事例に対しICとCGをフォトメタデータから判別することが可能となることを示す。この手法を詳細に示した論文をJournal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics誌に投稿し、査読の結果受理され掲載が決定した(5.主な発表論文等【雑誌論文】①)。

続いて、JEM-GLIMSで観測された8500例を超える雷発光イベントを全て解析し、地上雷放電データとの詳細比較も行った結果、**IC/CG比(Z値)の緯度依存性を世界で初めて定量的に推定**した(図1)。得られた結果から、Z値は赤道付近が最も高い値を示し、中・高緯度になるにつれて値が小さくなっていくことが明らかとなった。これは、赤道付近では地表面付近の温度が高く、アラレと氷晶による電荷分離が進行する高度が中・高緯度に比べて相対的に高くなり、結果としてより高高度の雲内に電荷が蓄積

される。このため IC が CG よりも多発しやすい状況にあることを反映していると考えられる。

さらに、Z 値の地域依存性を調べた結果(図 2)、Z 値は海域よりも陸域でより高くなる傾向が明らかになった。それぞれの Z 値は、平均して $Z_{(陸域)}=1.7$ 、および $Z_{(海域)}=1.1$ であった。また、Z 値の地域・季節依存性も調べた結果、雷多発域が北半球・夏(6-8 月)から南半球・夏(12-2 月)にかけて北半球側から南半球側に遷移するのに伴い、Z 値が高い領域も同期して遷移することが明らかとなった。さらに、南半球の陸上よりも北半球の陸上の方が、Z 値が高くなる傾向を示すことも初めて明らかとなった。これらの結果は [世界初の成果](#) であると同時に、[本分野における今後の研究において世界標準となりうる成果](#) である。これまで誰もなし得なかったが、本科研費による研究の実施があったからこそ得られた最大の成果といえる。これらの結果をまとめた論文を Journal of Geophysical Research: Atmosphere 誌に近日投稿する予定で、現在原稿の作成を進めている。

続いて、本研究による Z 値の推定結果と、VLF 波動世界雷観測網(WWLLN)による全球雷データ、全球降水観測計画(GPM)によって観測された世界降水量分布などを初期値とする、三次元全球電流回路モデルを新たに開発した。このモデルは、高度 0-80 km の範囲を、高い高度分解能(1 km)、高い空間分解能($0.2^\circ \times 0.2^\circ$)で分割し、高い時間分解能(5 分)で全球の任意の地点の鉛直大気電場強度を計算することができる [画期的な数値モデル](#) である(図 3)。このモデルによる計算結果と、南極昭和基地で観測された大気電場強度とを定量的に比較した。その結果、①時々刻々の大気電場の絶対強度、②ゆっくりとした 1 日周期の変化、の双方を [モデル計算で高い精度で再現することに成功した](#)(図 4)。このような事例解析を統計的に進めた結果、[雷放電は全球電流回路の電流駆動源として約 20%しか担っていないことを世界で初めて定量的に明らかにした](#)。現在は、昭和基地以外の場所で同時観測された大気電場観測データとモデル計算結果との比較を引き続き行っているところで、結果がまとまり次第、査読論文を投稿する予定である。

以上のような研究成果および関連する研究成果をまとめた査読論文は 15 本出版され、博士論文は令和元年に 1 篇提出予定、修士論文は 2 篇提出済み、国内・国際学会における講演も 59 件行うなど、積極的な成果公開に努めた。

一方、[課題 I](#) に関して、スプライトの発生メカニズムを解明するための、雷放電上空における放射電界と電子密度の時空間変化の数値モデル計算に関しては、大きな進捗を得ることができなかった。この原因は共同研究者が研究期間中に民間企業に就職したことが大きいですが、そうなることも含めたリスク管理とその後の対応が甘かったことが反省点である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Bandholnopparat, K., [M. Sato](#), T. Ushio, T. Adachi, and Y. Takahashi, Optical properties of intracloud and cloud-to-ground discharges derived from JEM-GLIMS lightning observations, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 査読有, Vol.189, 87-97, 2019. (doi: 10.1016/j.jastp.2019.04.005)
- ② Pérez-Invernón, F., A. Luque, F. Gordillo-Vázquez, [M. Sato](#), T. Ushio, T. Adachi, and A. Chen,

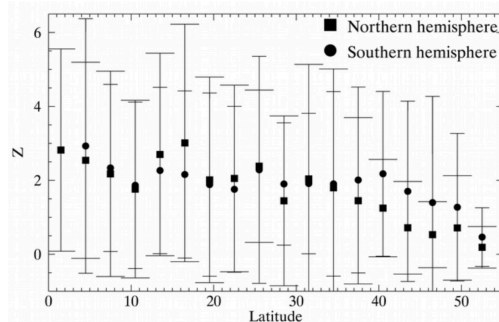


図 1. IC/CG 比(Z 値)の緯度依存性

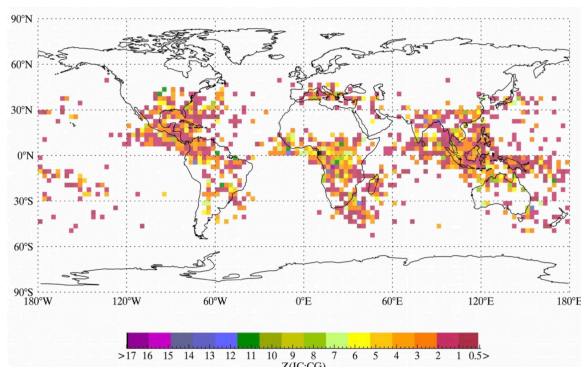


図 2. Z 値の全球分布

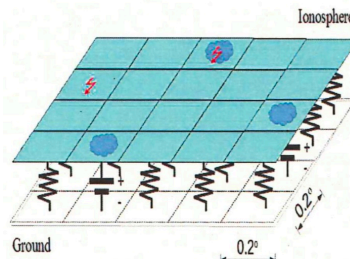


図 3. 三次元全球電流回路モデルの概念図

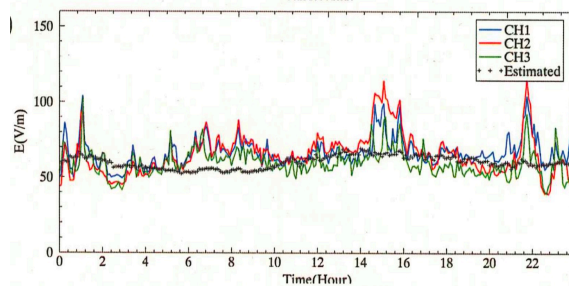


図 4. 昭和基地で観測された大気電場強度(色実線)とモデル計算結果(黒点線)

Spectroscopic diagnostic of halos and elves detected from space-based photometers, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, Vol.123, 12917-12941, 2018. (doi:10.1029/2018JD029053)

- ③ Yang, J., N. Liu, M. Sato, G. Lu, Y. Wang, and G. Feng, Characteristics of thunderstorm structure and lightning activity causing negative and positive sprites, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, Vol.123, 8190-8207, 2018. (doi: 10.1029/2017JD026759)
- ④ Yang, J., M. Sato, N. Liu, G. Lu, Yu Wang, and Zh. Wang, A gigantic jet observed over a MCS in middle latitude region, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, Vol.123, 977-996, 2018. (doi:10.1002/2017JD026878)
- ⑤ Enoto, T., Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, and H. Tsuchiya, Photonuclear reactions triggered by lightning discharge, *Nature*, 査読有, Vol.551, 481-484, 2017. (doi:10.1038/nature24630)
- ⑥ Sato, M., T. Adachi, T. Ushio, T. Morimoto, 他 9 名, Identification of sprites in JEM-GLIMS nadir observations and their spatial distributions, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 査読有, Vol.28, 545-561, 2017. (doi:10.3319/TAO.2016.09.21.02)
- ⑦ Kikuchi, H., M. Sato, T. Ushio, 他 8 名, Simultaneous observations of optical lightning from space and LF band lightning waveforms from the ground, *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol.44, 1123-1131, 2017. (doi:10.1002/2016GL071783)
- ⑧ Adachi, T., M. Sato, T. Ushio, 他 12 名, Identifying the occurrence of lightning and transient luminous events by nadir spectrophotometric observation, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 査読有, Vol.145, 85-97, 2016. (doi:10.1016/j.jastp.2016.04.010)
- ⑨ Sato, M., M. Mihara, T. Adachi, T. Ushio, 他 12 名, Horizontal distributions of sprites derived from the JEM-GLIMS nadir observations, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 査読有, Vol.121, 3171-3194, 2016. (doi:10.1002/2015JD024311)
- ⑩ 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*, 査読有, Vol.136, 252-258, 2016. (doi:10.1541/ieejfms.136.252)

[学会発表] (計 59 件)

- ① Sato, M., 他 5 名, Relation between lightning and typhoon activities in the western Pacific region, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2018, 2018.
- ② Enoto, T., 他 14 名, High-energy radiation phenomena from winter thunderstorms and lightning in Japan, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2018, 2018. (招待講演)
- ③ Bandholnopparat, K., 他 4 名, Estimation of the IC/CG ratio using JEM-GLIMS and ground-based lightning network data and its effect on the global electric circuit, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2018, 2018.
- ④ 佐藤光輝, 他 5 名, アジア域雷放電検出網で観測された雷活動と台風強度発達との関係, 第 144 回地球電磁気・惑星科学学会, 2018.
- ⑤ 佐藤光輝, 他 3 名, 惑星大気対流構造の解明にむけた雷放電探査観測計画, 気象学会 2018 年度秋季大会, 2018.
- ⑥ Sato, M., 他 5 名, Development of lightning observation network in the western Pacific region for the intensity prediction of severe weather and tropical cyclone, 16th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), 2018.
- ⑦ Enoto, T., 他 17 名, Multi-point measurement campaigns of gamma rays from thunderclouds and lightning in Japan, 16th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), 2018.
- ⑧ Bandholnopparat, K., 他 4 名, Latitudinal, regional, and seasonal dependences of IC/CG ratio derived from JEM-GLIMS and ground-based lightning network data, 16th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), 2018.
- ⑨ Sato, M., 他 5 名, ULAT project: Lightning observations in the Philippines and western Pacific region for the intensity prediction of severe weather, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, 2018. (招待講演)
- ⑩ Sato, M., 他 5 名, Lightning observations in the Philippines and western Pacific region for the intensity prediction of severe weather, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.
- ⑪ Bandholnopparat, K., 他 4 名, Latitudinal, regional, and seasonal dependences of the IC to CG ratio derived from JEM-GLIMS and the ground-based lightning network data, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. (招待講演)
- ⑫ Sato, T., 他 3 名, Global occurrence rates of lightning, elves, and sprites and their LT/monthly/seasonal dependences derived from JEM-GLIMS observations, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.
- ⑬ Sato, M., 他 5 名, ULAT project: Lightning observations in the Philippines for the intensity prediction of severe weather, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2018, 2018.
- ⑭ Enoto, T., 他 12 名, Photonuclear reactions triggered by lightning discharges in a Japanese winter thunderstorm, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2018, 2018. (ハイライト)

- ⑮ 佐藤光輝, 宇宙空間からの雷放電光学・電波観測, 「雷雲と宇宙線の相互作用に伴う高エネルギー現象」研究会, 2018.
- ⑯ 中澤知洋, 他 15 名, 地上と宇宙から探る雷放電に同期する突発ガンマ線観測への取り組み, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018.
- ⑰ Kono, S., 他 7 名, Lightning charge moment changes estimated by high speed photometric observations from ISS, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2017, 2017.
- ⑱ Bandholnopparat, K., 他 4 名, Estimation of the IC to CG ratio using JEM-GLIMS and ground-based lightning network data, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2017, 2017.
- ⑲ 源泰拓, 他 3 名, 極域で観測された大気電場・ELF 波動データの複合解析による全地球電気回路の研究, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2017.
- ⑳ Sato, M., 他 8 名, Optical and electromagnetic characteristics of lightning and TLEs derived from the JEM-GLIMS nadir observations, 32nd URSI General Assembly & Scientific Symposium, 2017. (招待講演)
- ㉑ 芳原容英, 他 12 名, 国際宇宙ステーションから観測された雷発光放射照度を用いた雷の電気的特性導出に関する研究, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017.
- ㉒ Shimizu, C., 他 2 名, Characteristics of downburst occurrences derived from ground-based lightning and meteorological observations, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017.
- ㉓ Tsurushima, D., 他 4 名, Matching algorithms of ELF-LEMPs and lightning geo-location data, 4th International Symposium on Winter Lightning (ISWL2017), 2017.
- ㉔ 佐藤光輝, 北海道大学における地球惑星観測装置群の現状と課題, 名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会「太陽地球系科学に於ける地上観測の現状と課題」, 2017.
- ㉕ 清水千春, 他 6 名, ELF 帯電波観測による雷放電の電荷量推定とダウンバーストの予測可能性について, 日本大気電気学会第 95 回研究発表会, 2017.
- ㉖ 鈴木克徳, 他 12 名, 国際宇宙ステーション GLIMS ミッションにより観測された雷発光強度を用いた雷の電気的特性導出に関する研究, 日本大気電気学会第 95 回研究発表会, 2017.
- ㉗ Sato, M., 他 7 名, Global occurrence rates and their LT/monthly/seasonal variations of lightning, elves, and sprites derived from JEM-GLIMS observations, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2016, 2016.
- ㉘ 佐藤光輝, 他 8 名, スプライトを誘起した雷放電による上空電子密度擾乱の再現, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2016.
- ㉙ 清水千春, 他 6 名, ELF 帯電波観測により推定した雷放電の放電電荷量を用いたダウンバースト現象の予測可能性, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2016.
- ㉚ Sato, M., 他 11 名, Global occurrence rates of lightning, sprites, and elves and their LT dependences derived from JEM-GLIMS nadir observations, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 13th Annual Meeting, 2016. (招待講演)
- ㉛ 佐藤光輝, 他 7 名, JEM-GLIMS 直下視観測から同定したスプライトの水平空間分布と親雷放電との関係, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
- ㉜ Sato, M., 他 5 名, Future observations of lightning-exciting ELF waves in Asian region for the nowcasting of severe weather development, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
- ㉝ Shimizu, C., 他 6 名, Relation between charge amounts of lightning discharges derived from ELF waveform data and severe weather, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
- ㉞ 佐藤剛志, 他 7 名, 雷放電・TLEs の全球発生分布および発生頻度と地方時間依存性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 2 件)

名称: 落雷の電荷量推定システム、落雷の電荷量推定方法、及び、プログラム
 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: 東北電力株式会社, 国立大学法人北海道大学, 国立大学法人東北大学
 種類: 特許
 番号: 特許第 6067741 号
 取得年: 平成 29 年
 国内外の別: 国内

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: 東北電力株式会社, 国立大学法人北海道大学, 国立大学法人東北大学
 種類: 特許
 番号: 第 EP2921887B1 号
 取得年: 平成 30 年
 国内外の別: 国外(ヨーロッパ特許庁)

[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>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 平木 康隆

ローマ字氏名: (HIRAKI, yasutaka)

所属研究機関名: 電気通信大学

部局名: 情報理工学部

職名: 研究員

研究者番号(8桁): 80514843

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: バンドルノパラト キッタナパト

ローマ字氏名: (BANDHOLNOPPARAT, kittanapat)

研究協力者氏名: 清水 千春

ローマ字氏名: (SHIMIZU, chiharu)

研究協力者氏名: 佐藤 剛志

ローマ字氏名: (SATO, tsuyoshi)

研究協力者氏名: 菊池 博史

ローマ字氏名: (KIKUCHI, hiroshi)

研究協力者氏名: 源 泰拓

ローマ字氏名: (MINAMOTO, yasuihiro)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。