

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：56301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22371

研究課題名（和文）木星探査機Junoと地上多点観測の連携による木星オーロラ電波と雷の物理過程の解明

研究課題名（英文）Study on Jupiter's auroral radiation and lightning as viewed from Juno and Earth-based telescopes

研究代表者

今井 雅文（Imai, Masafumi）

新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科・助教

研究者番号：10877260

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：木星極域オーロラや木星大気には、ローカルなプラズマと磁場の相互作用から木星オーロラ電波と放電現象から木星の雷が生成されている。本研究では、Juno探査機と地上低周波電波望遠鏡を組み合わせ、木星オーロラ電波が広範囲の木星の緯度に存在することを示した。さらに、探査機とハッブル宇宙望遠鏡を駆使して、木星雷の生成される時間スケールはサブミリ秒以下であることと雲の無い空間も木星雷の生成に寄与している可能を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木星に存在するオーロラや雷のような現象から様々な電波が発生している。2016年7月に米国・NASAのJuno探査機が初めて木星極周回軌道に投入され、地上望遠鏡と探査機を新たに組み合わせた木星オーロラ電波や雷の研究が行えるようになった。この利点を最大限に利用し、木星オーロラ電波の立体的なビーム構造の存在を明らかにし、さらに木星雷と大気との関係により新たな雷の時間的と空間的な情報を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Jupiter produces auroral radiation from the polar regions of the planet and lightning discharge in the atmosphere. By means of Juno spacecraft in the orbit of Jupiter and the Earth-based radio telescopes, we found that Jupiter's auroral radiation extends over a broad range of Jovicentric latitude. Additionally, using Juno and the Hubble Space Telescope, we showed a minimum duration of lightning processes on the order of submilliseconds, and the cloud-free clearings are another component for the signature of active convection.

研究分野：宇宙電波工学

キーワード：木星オーロラ電波 雷 Juno 地上電波望遠鏡 ハッブル宇宙望遠鏡

### 1. 研究開始当初の背景

木星極域オーロラや木星大気には様々な電磁波動が生成され、宇宙空間に電波伝搬している。それらの電磁波動はローカルなプラズマと磁場の相互作用（木星オーロラ電波）や放電現象（木星雷）を反映しているため、マクロな描像の木星オーロラや木星大気にも多大に影響を与えている。これまでに8機の惑星探査機が木星をフライバイや赤道周回探査を行ったが、2016年7月に米国・NASAのJuno探査機が初めて木星極周回軌道に投入され、極軌道でしか見ることができない木星オーロラや雷の新しい様相が明らかとなってきた<sup>①</sup>。しかしながら、オーロラや雷のような突発的な現象は空間的にも時間的にも変動するため、従来の1地点衛星観測からでは全貌を明らかにすることは未だに難しい。特に、木星オーロラ電波は図1のようなコーン状のようなビームを有していると考えられているが、立体的なビーム構造は未だ解明されておらず、また、木星雷の時空間的な特徴もはっきりされていない。

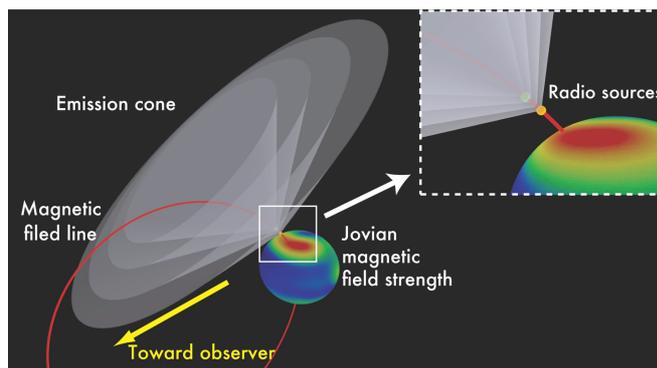


図1 木星オーロラ電波の考えられている放射モデル  
 ① 木星オーロラや雷の新しい様相が明らかとなってきた<sup>①</sup>。しかしながら、オーロラや雷のような突発的な現象は空間的にも時間的にも変動するため、従来の1地点衛星観測からでは全貌を明らかにすることは未だに難しい。特に、木星オーロラ電波は図1のようなコーン状のようなビームを有していると考えられているが、立体的なビーム構造は未だ解明されておらず、また、木星雷の時空間的な特徴もはっきりされていない。

### 2. 研究の目的

2016年7月、米国・NASAの木星探査機Junoが、史上初となる木星極軌道に投入された。高緯度での木星オーロラ観測は初めての試みであり、Juno探査機はオーロラに繋がる磁力線を横切りながらその場のプラズマや波動観測をすることができる。木星オーロラ電波は木星の極域からコーン状に数MHzから40MHzまでの広範囲の電波周波数で放射される自然電波である。一方、Juno探査機の木星接近時に観測できる3つの異なる雷起源の電磁波（Whistler波、JDP波、Sferic波）を解析することにより、木星雷の木星全球における分布がわかりつつある。図2にWhistler波、JDP波、Sferic波の電波伝搬の様子を示す。本研究では、Juno探査機に搭載されている複数の観測装置と地上望遠鏡を組み合わせた多地点連携観測から木星オーロラ電波と木星雷の多角的な側面を調べることである。

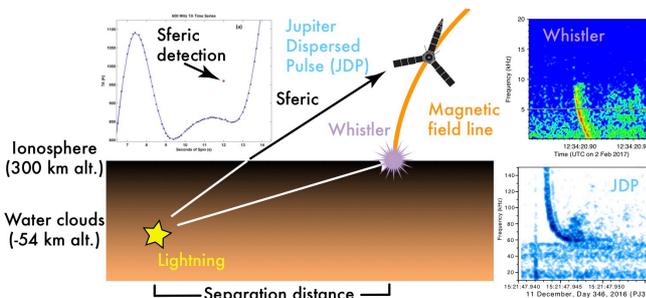


図2 Whistler波、JDP波、Sferic波の電波伝搬の様子

### 3. 研究の方法

木星オーロラ電波の放射構造を理解する上で重要となることは、緯度方向の電波の広がりがあるのようになっていくかを理解することである。Juno探査機は木星極軌道を航行しているため、幅広い緯度範囲をスキャンするのに対して、地球から木星を見るとほぼ木星赤道面付近をスキャンしている。この両者の緯度の違いを利用して、木星オーロラ電波の立体的なビーム構造を調べる。Juno探査機に搭載されている波動観測装置(Waves)はダイポールアンテナを用いて50Hzから40MHzまでの波動を観測することができる。地球での低周波電波観測は、地球の電離層の影響が少ない10MHz以上の電波観測を行うことができ、本研究では、世界トップレベルの超高感度広帯域低周波電波望遠鏡である、フランスのNançay Decameter Array (NDA) 電波望遠鏡とアメリカのLong Wavelength Array station One (LWA1) 電波望遠鏡を用いる。

一方、木星雷観測では、雷由来の電磁波動と大気を複合的に捉えることが重要である。Wavesでは、Whistler波とJDP波が観測されているのに対して、マイクロ波放射計(MWR)では、1.2GHzと600MHzのSferic波を観測することができる。時間分解能は100msに固定されており、直線1偏波成分のみを記録したスペクトラムデータになっている。本研究では、600MHzのSferic波を扱い、直線伝搬を仮定すると、Sferic波の電波源は木星大気(5-bar)で推定する。さらに、広範囲な木星大気モニタリングはハッブル宇宙望遠鏡(HST)に搭載されている紫外から近赤外の波長領域をカバーしたWFC3/UVIS機器により実施されており、631-nm、727-nm、889-nmのフィルターは高度の異なる雲やもやを推定することに利用する。HSTで観測された木星大気は1-barレベルでマッピングする。木理緯度60度付近において、マッピングの空間分解能は東西に400km、南北に700km程度であり、精度は80 x 160kmである。

#### 4. 研究成果

先行研究<sup>②</sup>をもとに、2016年5月から2020年12月の間に、Juno 探査機と地上低周波電波望遠鏡で共通した木星オーロラ電波を観測したイベントを目視で調査した。そのイベントの一つとして、図3ではJuno 探査機と地上低周波電波望遠鏡 NDA と LWA1 で観測された共通の木星オーロラ電波がそれぞれ観測した例を示す。共通の木星オーロラ電波は両者のスペクトラムデータを相互相関することにより、遅延時間を求めている。そして、木星緯度はJuno 探査機が8-9度に対して、低周波電波望遠鏡 NDA と LWA1 は-2.6度であった。その結果、木星緯度約11度の範囲で木星オーロラ電波の電波構造が広がっていることが観測的に示された。他にも3例のイベントを解析したが、木星緯度は約4-6度の範囲に広がっていた。このように、木星オーロラ電波が立体的に放射していることを観測的に明らかにした。

一方、木星雷の多地点連携観測例として、2019年4月6日正午UTC頃にWavesとMWR両機器が観測したデータを解析した<sup>③</sup>。解析期間中はJuno 探査機がMWR クロストラック姿勢を行う関係で、同探査機に搭載された全ての光学カメラの電源はシャットダウンされていた。そのため、HSTで得られた木星大気データを併用した。図4にJuno 探査機が航行した軌道を木星磁場座標系で表している。本研究で扱うデータはピンク色の領域を航行した時のものである。

図5に示すように、Wavesがサブミリ秒オーダーで変動する稀な電波パルス群(周波数<150kHz)を観測した。電波パルスの持続時間は0.277-0.715msであった。これらのパルスはWhistler波かJDP波のいずれかと考えられる。準同時多地点観測データより、それらの磁力線の麓はMWRが観測したSferic波の電波源の近くであることが示された。さらに、HSTの木星大気観測から、従来の衛星観測で知られる対流雲及び深い水雲に加え、新たに雲の無い空間が雷現象と密接に関連していることを示唆した。一方、VLF/LF帯電波パルスの検出は雷放電がサブミリ秒以下のタイムスケールで発達することを意味する。Juno 探査機とHSTを組み合わせた多地点観測より、木星雷の物理過程を解明する糸口を見出した。

以上のように、本研究では、Juno 探査機と地上望遠鏡を用いて、多地点連携観測を行い、木星オーロラ電波の立体的なビーム構造の観測事例と木星雷に関するサブミリ秒以下の放電と雲の無い空間との重要な関係性について、明らかにすることができた。

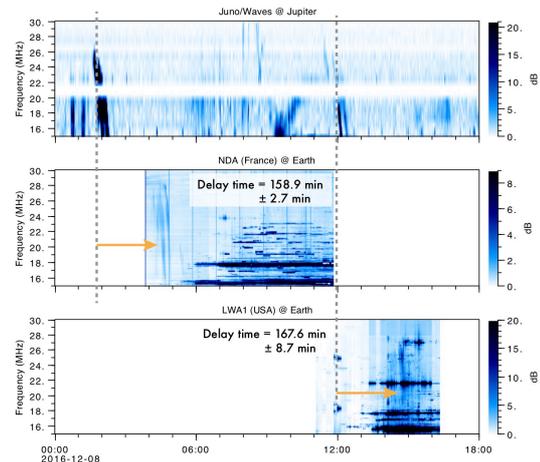


図3 Juno 探査機と地上低周波電波望遠鏡で共通して観測された木星オーロラ電波

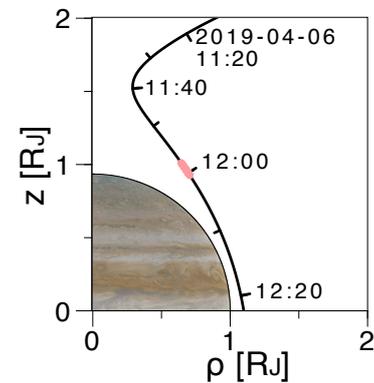


図4 Juno 探査機の航行軌道

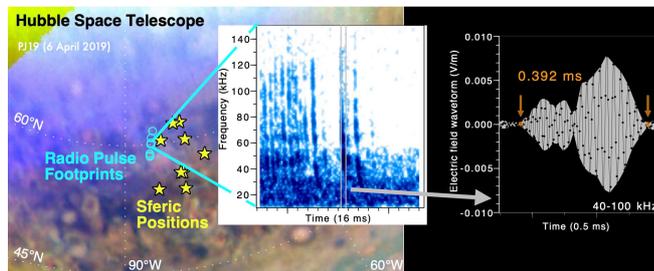


図5 木星大気と木星雷の準同時多地点観測

#### <引用文献>

- ① Bolton, S. J., J. Lunine, D. Stevenson, J. E. P. Connerney, S. Levin, T. C. Owen, F. Bagenal, D. Gautier, A. P. Ingersoll, G. S. Orton, T. Guillot, W. Hubbard, J. Bloxham, A. Coradini, S. K. Stephens, P. Mokashi, R. Thorne, and R. Thorpe (2017), The Juno Mission, *Space Sci. Rev.*, 213, 5-37, doi:10.1007/s11214-017-0429-6.
- ② Imai, M., W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, S. J. Bolton, J. E. P. Connerney, S. M. Levin, A. Lecacheux, L. Lamy, and P. Zarka (2017), Latitudinal beaming of Jovian decametric radio emissions as viewed from Juno and the Nançay Decameter Array, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 4455-4462, doi:10.1002/2016GL072454.
- ③ Imai, M., M. H. Wong, I. Kolmašová, S. T. Brown, O. Santolík, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, S. J. Bolton, and S. M. Levin (2020), High-Spatiotemporal Resolution Observations of Jupiter Lightning-Induced Radio Pulses Associated With Sferics and Thunderstorms, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088397, doi:10.1029/2020GL088397.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Allegri F., Gladstone G. R., Hue V., Clark G., Szalay J. R., Kurth W. S., Bagenal F., Bolton S., Connerney J. E. P., Ebert R. W., Greathouse T. K., Hospodarsky G. B., Imai M., Louarn P., Mauk B. H., McComas D. J., Saur J., Sulaiman A. H., Valek P. W., Wilson R. J.	4. 巻 47
2. 論文標題 First Report of Electron Measurements During a Europa Footprint Tail Crossing by Juno	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL089732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL089732	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sulaiman A. H., Hospodarsky G. B., Elliott S. S., Kurth W. S., Gurnett D. A., Imai M., Allegri F., Bonfond B., Clark G., Connerney J. E. P., Ebert R. W., Gershman D. J., Hue V., Janser S., Kotsiaros S., Paranicas C., Santolik O., Saur J., Szalay J. R., Bolton S. J.	4. 巻 47
2. 論文標題 Wave Particle Interactions Associated With Io's Auroral Footprint: Evidence of Alfvén, Ion Cyclotron, and Whistler Modes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL088432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL088432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Clark G., Mauk B. H., Kollmann P., Szalay J. R., Sulaiman A. H., Gershman D. J., Saur J., Janser S., Garcia Sage K., Greathouse T., Paranicas C., Allegri F., Bagenal F., Bolton S. J., Connerney J. E. P., Ebert R. W., Hospodarsky G., Haggerty D., Hue V., Imai M., Kotsiaros S., McComas D. J., Rymer A., Westlake J.	4. 巻 47
2. 論文標題 Energetic Proton Acceleration Associated With Io's Footprint Tail	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL090839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL090839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Imai Masafumi, Wong Michael H., Kolmar Ivana, Brown Shannon T., Santolik Ondrej, Kurth William S., Hospodarsky George B., Bolton Scott J., Levin Steven M.	4. 巻 47
2. 論文標題 High Spatiotemporal Resolution Observations of Jupiter Lightning Induced Radio Pulses Associated With Sferics and Thunderstorms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL088397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL088397	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Menietti J. D., Averkamp T. F., Imai M., Kurth W. S., Clark G. B., Allegrini F., Groene J. B., Faden J. B., Bolton S. J.	4. 巻 126
2. 論文標題 Low Latitude Whistler Mode and Higher Latitude Z Mode Emission at Jupiter Observed by Juno	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2020JA028742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JA028742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Menietti J. D., Averkamp T. F., Kurth W. S., Imai M., Faden J. B., Hospodarsky G. B., Santolik O., Clark G., Allegrini F., Elliott S. S., Sulaiman A. H., Bolton S. J.	4. 巻 126
2. 論文標題 Analysis of Whistler Mode and Z Mode Emission in the Juno Primary Mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2021JA029885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029885	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ebert R. W., Greathouse T. K., Clark G., Hue V., Allegrini F., Bagenal F., Bolton S. J., Bonfond B., Connerney J. E. P., Gladstone G. R., Imai M., Kotsiaros S., Kurth W. S., Levin S., Louarn P., Mauk B. H., McComas D. J., Paranicas C., Sulaiman A. H., Szalay J. R., Thomsen M. F., Wilson R. J.	4. 巻 126
2. 論文標題 Simultaneous UV Images and High Latitude Particle and Field Measurements During an Auroral Dawn Storm at Jupiter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2021JA029679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029679	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hue, V., Szalay, J. R., Greathouse T. K., [and 24 others, including M. Imai]	4. 巻 49
2. 論文標題 A Comprehensive Set of Juno In Situ and Remote Sensing Observations of the Ganymede Auroral Footprint	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL096994
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL096994	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mauk B. H., Allegrini F., Bagenal F., Bolton S. J., Clark G., Connerney J. E. P., Gershman D. J., Haggerty D. K., Hue V., Imai M., Kollmann P., Kurth W. S., N?non Q., Paranicas C. P., Rymer A. M., Smith H. T., Sulaiman A. H.	4. 巻 127
2. 論文標題 Loss of Energetic Ions Comprising the Ring Current Populations of Jupiter's Middle and Inner Magnetosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2022JA030293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022JA030293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 M. Imai, W. S. Kurth, I. Kolmasova, O. Santolik, M. H. Wong, S. T. Brown, G. B. Hospodarsky, T. Guillot, H. N. Becker, S. J. Bolton, S. M. Levin
2. 発表標題 New understanding on Jupiter's lightning in the atmosphere as revealed by Juno
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. W. Ebert, T. K. Greathouse, G. Clark, V. Hue, F. Allegrini, F. Bagenal, S. J. Bolton, B. Bonfond, J. E. P. Connerney, G. R. Gladstone, M. Imai, Stavros Kotsiaros, W. S. Kurth, S. Levin, P. Louarn, B. H. Mauk, D. J. McComas, C. Paranicas, A. H. Sulaiman, J. R. Szalay, M. F. Thomsen, R. J. Wilson
2. 発表標題 Simultaneous UV Images and High-Latitude Particle and Field Measurements During an Auroral Dawn Storm at Jupiter
3. 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 B. H. Mauk, F. Allegrini, F. Bagenal, S. J. Bolton, G. Clark, J. E. P. Connerney, D. J. Gershman, D. K. Haggerty, V. Hue, M. Imai, P. Kollmann, W. S. Kurth, C. P. Paranicas, A. M. Rymer, H. T. Smith, A. Sulaiman
2. 発表標題 Loss Processes of Energetic Ring Current Ions in Jupiter's Inner and Middle Magnetosphere
3. 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Imai, K. Imai, N. Hirakoso, M. Nishio, T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Murakami, M. Tokumitsu, M. Wakabayashi
2 . 発表標題 Planetary Radio Observation CubeSat: Current Step on Earth to Next Step on Moon
3 . 学会等名 ISAS Planetary Exploration Workshop 2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 G.B. Hospodarsky, W.S. Kurth, M. Imai, I. Kolmasova, O. Santolik, J.E.P. Connerney, S.J. Bolton
2 . 発表標題 Juno Waves Observations of Long Dispersion Lightning Whistlers Associated with the Io Torus
3 . 学会等名 American Geophysical Union (hybrid) meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 V. Hue, J.R Szalay, T. Greathouse, [and 24 others, including M. Imai]
2 . 発表標題 A Comprehensive Set of Juno In Situ and Remote Sensing Observations of the Ganymede Auroral Footprint
3 . 学会等名 American Geophysical Union (hybrid) meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 I. Kolmasova, O. Santolik, M. Imai, W.S. Kurth, G.B. Hospodarsky, S.J. Bolton, J.E.P. Connerney
2 . 発表標題 Electromagnetic Evidence of Stepwise Extension of the Jovian Lightning Channels
3 . 学会等名 American Geophysical Union (hybrid) meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y.M. Martos, J.E.P. Connerney, M. Imai, W.M. Farrell, W.S. Kurth
2 . 発表標題 Jupiter 's magnetic field and the generation and control of decameter radiation observed by the Juno spacecraft
3 . 学会等名 American Geophysical Union (hybrid) meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Imai, K. Imai, N. Hirakoso, Y. Ito, T. Sugawara, S. Suzuki, M. Nishio, T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Murakami, M. Tokumitsu, T. E. Clarke, C. A. Higgins, J. F. Helmboldt, KOSEN-1 team
2 . 発表標題 KOSEN-1 Jupiter radio observation campaign with ground-based radio telescopes
3 . 学会等名 SGEPSS Fall Meeting 2021
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Masafumi Imai, Michael H. Wong, Ivana Kolmasova, Shannon T. Brown, Ondrej Santolik, William S. Kurth, George B. Hospodarsky, Scott J. Bolton, Steven M. Levin
2 . 発表標題 広域・高時間分解観測から迫る空電と雷雨に関連した木星雷由来の電波パルス
3 . 学会等名 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 ( オンライン )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Masafumi Imai, Taiki Soga, Kazumasa Imai, Charles A. Higgins
2 . 発表標題 A single-baseline analysis of Jupiter's decametric radiation with LWA-1 and LWA-SV
3 . 学会等名 Technology for Next Generation Space-Earth Environmental Radio Science, OnLine ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Iowa	University of California, Berkeley	Southwest Research Institute	他1機関
チェコ	Institute of Atmospheric Physics	Charles University		