

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：56401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05570

研究課題名(和文)木星極軌道探査機JUNOとLWAの同時観測による木星電波放射ビーム構造の研究

研究課題名(英文) Research on the beaming structures of Jupiter's decametric radio emissions observed by Jovian polar orbiter Juno and LWA

研究代表者

今井 一雅 (IMAI, Kazumasa)

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・嘱託教授

研究者番号：20132657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：2016年7月に木星に到達したNASAの木星極軌道探査機Junoによる長期間の木星電波観測データ解析と、世界最高レベルの感度を持つ低周波電波望遠鏡LWAを使った木星電波観測により、Voyagerで発見された孤立したアーク構造のRiddle Arcが、衛星イオを貫くイオ・フラックス・チューブ(IFT)の近傍からの電波放射であることが明らかとなった。また、このRiddle Arcは、緯度が北に高くなるほど明瞭に観測されることも明らかとなり、木星電波放射機構を解明する上で重要となる3次元的な木星電波放射ビーム構造の重要な情報を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1955年に発見された木星からの短波帯の自然電波放射である木星デカメートル波は、地球上でも観測可能なほど強力な電波放射である。この放射機構を解明するためには、その3次元的なビーム構造を調べるのが重要な鍵となると考えられている。本研究では木星探査機Junoと地上の低周波電波望遠鏡LWAの木星電波観測データを総合的に解析することにより、Riddle Arcと呼ばれる特徴的な電波放射の3次元的な木星電波放射ビーム構造を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：Using Long Wavelength Array (LWA) data we analyzed the modulation lanes and the Riddle arcs and found that almost all of the Riddle arcs correspond to a zero-degree lead angle. This means that the radio sources related to the Riddle arcs are located along the instantaneous Io flux tube. This result is consistent with the conclusion of Riddle paper using Voyager data. With the advantage of Juno's unique polar orbit, the dynamic spectra recorded by the Waves instrument show the latitudinal dependence on the Riddle arcs, clearly. The appearance of these Riddle arcs remains isolated from the other groups of the radio arcs. The Riddle arcs occur during the time of positive Jovigraphic latitude, and their existence implies sharp beaming from the northern hemisphere radio source. We consider this finding of Riddle arcs recorded by Juno to be important because it would provide a direct link with the brightness of Io's footprint at the ultraviolet wavelength for a further study.

研究分野：宇宙電波工学

キーワード：木星電波 放射機構 木星探査機 地上観測 電波源の位置 ビーム構造 モジュレーションレーン 偏波特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1955年の木星電波の発見は、惑星に磁気圏が存在することを初めて知るきっかけとなり、惑星磁気圏研究の重要な出発点となった。この木星電波は、木星からのデカメートル波帯における自然電波放射であり、地上観測において偶然に発見されて以来、国外や国内でも地上観測や惑星探査機により様々な木星電波の観測が行われてきた。これらの観測によって、その強力な電波放射は、サイクロトロンメーザー理論をベースにした電波放射モデルで説明できることがわかってきた。しかしながら、サイクロトロンメーザー理論は、まだ基礎理論の段階であり、複雑な木星電波放射特性を詳細に説明できる理論的な展開は未だになされていない。この木星電波放射機構を解明する上で、明らかとなっていない重要な課題が二つある。その一つが、木星電波のビーム方向が木星の磁力線に対してある角度を持つとして軸対称のコーン状になると多くの研究者が考えているが、その3次元的なビーム構造が実際の観測では確認されていないことである。二つ目は、木星電波源の位置が明確となっていないことである。

2. 研究の目的

木星からのデカメートル波領域の自然電波である木星電波は、その電波放射機構が未だに解明されていない。この放射機構解明への重要な鍵となるものとして、3次元的な電波放射ビーム構造がある。本研究では、2016年7月に木星の極軌道に投入されたNASAの木星極軌道探査機JUNOとアメリカにある世界最高レベルの感度を持つ低周波電波望遠鏡LWA^①を使って同時に観測し、木星デカメートル波の緯度方向の電波放射ビーム特性を調べることで、木星電波放射機構を解明する上で重要な情報となる木星電波放射ビーム構造を3次元的に明らかにすることを目的とする。特に、木星電波のビーム構造については、木星の磁力線に対して約60度から70度程度の一定の角度(Cone Half Angle)でコーン状に電波が放射され、そのコーンの厚みは数度程度の大変薄いビーム構造を持っていることがモジュレーションレーン法[Imai et al., 1992a, 1992b, 1997, 2002, 2006]によって推定されてきた。また、木星電波源の位置も、このモジュレーションレーン法により、衛星イオを貫く木星の磁力線よりも下流の磁力線上に木星電波源が位置し、そこからコーン状の電波放射があり、そのビームが地球方向にクロスすることにより地球上において強力な電波放射が受信されることが推定されている^②。しかしながら、今までに、3次元的にコーン状になっているかどうかを直接確認する手段がなかったが、今回、初めて極軌道により探査を行うJUNOと超高感度低周波電波望遠鏡LWAとの同時観測が実現し、3次元的なビーム構造を調べることが可能となった。

3. 研究の方法

木星電波源の位置を考える上で重要なのは、図1のように実際の衛星イオを貫く木星の磁力線(IFT)と電波源を貫く磁力線の間を経度の間隔となるLead Angle(α)と、電波源の電波放射方向と磁力線の間角度であるCone Half Angle(β)で、この二つが決まると木星電波源の磁力線となる木星磁場経度 Source Longitude(θ)を求めることができる。モジュレーションレーン法では、木星電波のダイナミックスペクトラム上に現れる、斜めの縞上構造の傾きを測定することにより、木星磁場モデル(JRM09/VIP4/VIPAL/O6)をベースにシミュレーションを行い、この α と β を求めることができる。この方法により、LWAで観測される特徴的な木星電波源について α と β を求めておいて、JUNO探査機の観測データと比較する。

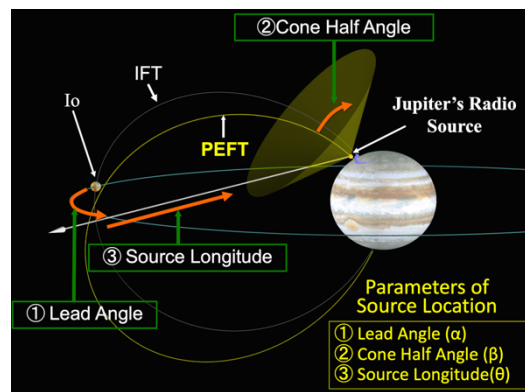


図1 木星電波源の位置情報に対応するパラメータとなる α β θ

4. 研究成果

図2は、低周波電波望遠鏡LWAで観測されたIo-Aと呼ばれる木星電波源のダイナミックスペクトルである。緑の部分で木星電波放射で、そのモジュレーションレーンの傾きを測定することにより求められたLead Angle(L: α)とCone Half Angle(C: β)が図2に記されている。なお、この時のモジュレーションレーンのパターンから、木星の北からの電波放射であることもわかっている。このダイナミックスペクトラムの右端は、Riddle Arcと呼ばれる部分に対応し、Lead Angleが0度に近くCone Half Angleが60度であることがわかる。他のLWAデータも同様の傾向を示すことから、Riddle Arcは衛星イオを貫く木星の磁力線(IFT)の近傍での電波放射であることがわかる。

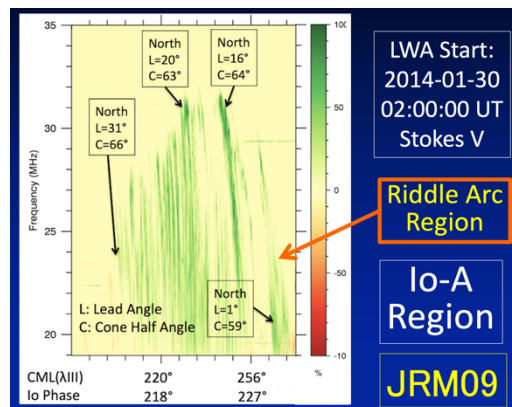


図2 木星電波源Io-AのLWA観測データ

図3は、Voyager 探査機で観測された Io-A 電波源の領域で孤立的に存在する Riddle Arc のダイナミックスペクトラムの例 [Riddle, 1983]で、観測周波数の 20MHz において、木星の System III 経度の約 260 度付近をクロスする傾向が強いことがわかる。Riddle は、この Arc 状の周波数特性の解析から衛星イオを貫く木星の磁力線 (IFT) からの電波放射であることを示唆している。

一方、図4のように J U N O 探査機でも、この Riddle Arc が、観測されたダイナミックスペクトラム (Voyager のものと縦軸の周波数が逆になっている) 上に明瞭に見られることがわかった。図4の上が J U N O の周回軌道の 5 番目の Orbit05、下が 8 番目の Orbit08 に対応しており、同じような周波数特性を示していることがわかる。特に 20MHz の周波数チャンネルのポイントでは木星の System III 経度が Voyager 探査機の観測と同じ約 260 度付近となっている。このような特徴を持つ Riddle Arc は、Orbit01 から Orbit18 の間の軌道において沢山見られこともわかった。

このユニークな Riddle Arc に注目して解析を進めた結果、20MHz の周波数において J U N O から見た System III 経度は、255 度から 268 度の範囲となり、Io Phase は、253 度から 258 度の範囲で Riddle Arc が観測されることがわかった。これに対応する衛星イオから見た System III 経度は、177 度から 195 度となり極めて局所的な現象であることがわかる。特に重要なのは、J U N O が南の磁気緯度にいる場合には、Riddle Arc は全く観測されないということから電波源は木星の北極域にあることがわかった。

図5の上は、J U N O が最も緯度が高い時 (18.7 度) に観測された Orbit14 の Riddle Arc の例で非常に強力であること、3つの細かい Arc 構造の組み合わせでできていることがわかった。また、図5の下の緯度が 9.9 度の場合の Orbit08 の例 (図4の下と同じ) と比較すると、20MHz の周波数をクロスするポイントの System III 経度が Orbit14 では、268 度であるのに対して、Orbit08 の場合は 258 度となり、10 度の大きな差がある。これは、緯度方向の木星電波ビーム構造を反映したものであると考えられる。

以上のことから、史上初となる極軌道に投入された J U N O 探査機の観測により、初めて木星電波の 3 次元的なビーム構造を直接探査することが Riddle Arc を使うことにより可能となった。また、この Riddle Arc が衛星イオを貫く木星の磁力線 (IFT) 近傍の電波放射であることから、IFT の根元に見られる UV オーロラの強度変動との比較が可能になると考えられる。

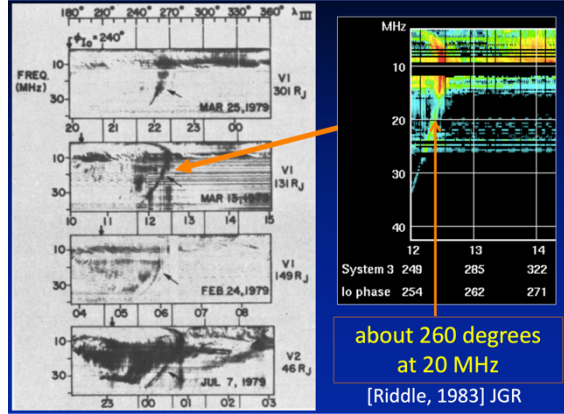


図3 Voyager 探査機で観測された Riddle Arc

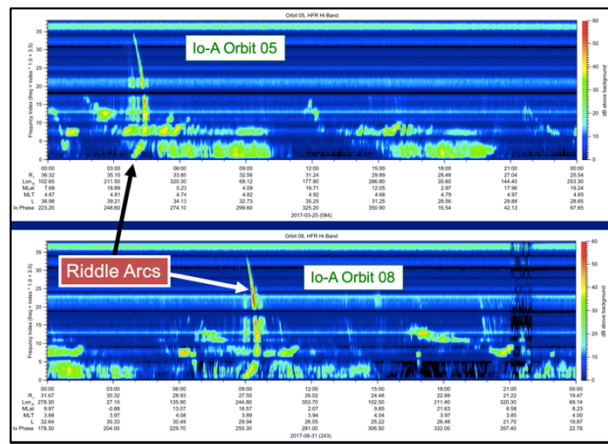


図4 JUNO 探査機で観測された Riddle Arc

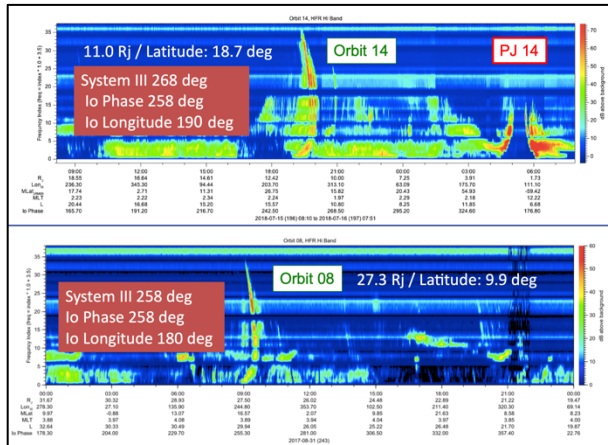


図5 観測された Riddle Arc 構造の緯度の違い (上: 緯度 18.7 度、下: 緯度 9.9 度)

<引用文献>

- ① Clarke, T.E., C.A. Higgins, Jinhie Skarda, Kazumasa Imai, Masafumi Imai, Francisco Reyes, Jim Thieman, Ted Jaeger, Henrique Schmitt, Nagini Paravastu Dalal, Jayce Dowell, S.W. Ellingson, Brian Hicks, Frank Schinzel, and G.B. Taylor, Probing Jovian decametric emission with the long wavelength array station 1, Journal of Geophysical Research, Space Physics, Vol. 119, pp. 9508-9526, doi:10.1002/2014JA020289, 2014.
- ② Imai, Kazumasa, C.A. Higgins, Masafumi Imai, and T.E. Clarke, Jupiter's Io-C and Io-B decametric emission source morphology from LWA1 data analysis, in Planetary Radio Emissions VIII, edited by G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, pp. 89-101, doi: 10.1553/PRE8s89, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 K. Imai, C.A. Higgins, M. Imai, and T.E. Clarke	4. 巻 none
2. 論文標題 Jupiter's Io-C and Io-B decametric emission source morphology from LWA1 data analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Planetary Radio Emissions VIII, edited by G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna	6. 最初と最後の頁 89-101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1553/PRE8s89	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
1. 著者名 C. Higgins, T. E. Clarke, K. Imai, M. Imai, F. Reyes, and J. Thieman	4. 巻 none
2. 論文標題 Morphology of the Jupiter Io-D decametric radio source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Planetary Radio Emissions VIII, edited by G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna	6. 最初と最後の頁 77-88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1553/PRE8s77	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
1. 著者名 T. E. Clarke, C. A. Higgins, M. Imai, and K. Imai	4. 巻 none
2. 論文標題 Jovian decametric emission with the Long Wavelength Array station 1 (LWA1)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Planetary Radio Emissions VIII, edited by G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna	6. 最初と最後の頁 31-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1553/PRE8s31	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
1. 著者名 B. Cecconi 他48名（K. Imaiを含む）	4. 巻 none
2. 論文標題 Juno-ground-radio observations support	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Planetary Radio Emissions VIII, edited by G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna	6. 最初と最後の頁 27-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1553/PRE8s27	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

1. 著者名 Masafumi Imai, Alain Lecacheux, Tracy E. Clarke, Charles A. Higgins, Mykhaylo Panchenko, Jayce Dowell, Kazumasa Imai, Anatolii I. Brazhenko, Anatolii V. Frantsuzenko, Alexandr A. Konovalenko	4. 巻 826
2. 論文標題 Beaming structures of Jupiter's decametric common S-bursts observed from LWA1, NDA, and URAN2 radio telescopes	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/826/2/176	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23件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kazumasa Imai, Nobuto Hirakoso, Taku Takada, Kentarou Kitamura, Masafumi Imai, KOSEN-1 Team, Charles A. Higgins, James R. Thieman, NASA Radio JOVE Team
2. 発表標題 Development of KOSEN-1 CubeSat for Jupiter's decametric radio observation
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Imai, Charles A. Higgins, Tracy Clarke, Masafumi Imai, W.S. Kurth
2. 発表標題 Characteristics of Jupiter's decametric Riddle arcs observed by LWA and Juno
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Imai, C.A. Higgins, T.E. Clarke, M. Imai, W.S. Kurth
2. 発表標題 Jupiter's decametric Riddle arcs observed by LWA and Juno
3. 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Boulder, Colorado, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Imai, N. Hirakoso, T. Takada, K. Kitamura, M. Imai, KOSEN-1 Team, C.A. Higgins, J.R. Thieman, NASA Radio JOVE Team
2. 発表標題 KOSEN-1 CubeSat mission for Jupiter's decametric radio observation
3. 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Boulder, Colorado, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井一雅、Higgins Charles、今井雅文、Clarke Tracy
2. 発表標題 Jupiter's radio Riddle arcs observed by LWA and Juno
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井一雅、平社信人、高田 拓、北村健太郎、今井雅文、KOSEN-1 Team、Higgins Charles、Thieman James、NASA Radio JOVE Team
2. 発表標題 KOSEN-1 CubeSat mission for Jupiter's radio science
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井一雅、Higgins Charles、今井雅文、Clarke Tracy
2. 発表標題 Frequency dependence on the beaming angle of Jupiter's decametric radio emissions based on LWA1 data analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kazumasa Imai, Charles A. Higgins, Masafumi Imai, Tracy Clarke
2 . 発表標題 Frequency dependence on the beaming angle of Jupiter's decametric radio emissions
3 . 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Boulder, Colorado, USA (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 LWA1 Observations of Jupiter ' s Left-Hand Polarized Decametric Emission
2 . 発表標題 C. Higgins, T.E. Clarke, K. Imai, M. Imai, F. Reyes, J. Thieman
3 . 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Boulder, Colorado, USA (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kazumasa Imai, Nobuto Hirakoso, Kentarou Kitamura, Taku Takada, KOSEN-Space-Renkei Group, Charles A. Higgins, James R. Thieman, NASA Radio JOVE Team
2 . 発表標題 CubeSat project for Jupiter's radio science
3 . 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Boulder, Colorado, USA (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kazumasa Imai, Charles A. Higgins, Masafumi Imai, Tracy Clarke
2 . 発表標題 Frequency dependence on the beaming angle of Jupiter ' s decametric radio emissions
3 . 学会等名 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 今井一雅、中山雄晟、Higgins Charles、今井雅文、Clarke Tracy
2. 発表標題 LWA1 Jupiter radio monitoring during the Hisaki observation campaign
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Baptiste Cecconi、他50名、19番目 Kazumasa Imai
2. 発表標題 Juno-Ground-Radio observation support tools
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 熊本篤志、土屋史紀、三澤浩昭、鍵谷将人、北元、木村智樹、埜千尋、今井一雅、中城智之、Baptiste Cecconi
2. 発表標題 Development status of the metadata server and data archives at Tohoku University for collaborative studies using planetary radio and spectroscopic data
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa Imai, Charles A. Higgins, Masafumi Imai, Tracy Clarke
2. 発表標題 Source locations of Jupiter's decametric radio emissions measured by the modulation lane method
3. 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Uppsala University, Sweden (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Kazumasa Imai, Lkhagvadorj Sukhtsoodol, Mizuki Ando, Nobuto Hirakoso, KOSEN-Space-Renkei Group
2 . 発表標題 CubeSat project for the observation of Jupiter's decametric radio emissions
3 . 学会等名 Magnetospheres of the Outer Planets, Uppsala University, Sweden (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Kazumasa Imai, Lkhagvadorj Sukhtsoodol, Mizuki Ando, Nobuto Hirakoso, Taku Takada, Kentarou Kitamura, Charles A. Higgins, James R. Thieman
2 . 発表標題 CubeSat project for the investigation of the beaming structures of Jupiter 's decametric radio emissions
3 . 学会等名 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(京都大学)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Clarke, C.H. Higgins, M. Imai, and K. Imai
2 . 発表標題 Jovian decametric emission with the Long Wavelength Array Station 1
3 . 学会等名 8th International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 C.H. Higgins, T. Clarke, K. Imai, M. Imai, F. Reyes, and J. Thieman
2 . 発表標題 Spectral Characteristics of Jupiter's Io-D Decametric Radio Source from the Long Wavelength Array Station1
3 . 学会等名 8th International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Imai, C.H. Higgins, M. Imai, and T. Clarke
2. 発表標題 Io-C and Io-B Source morphology of Jupiter's Decametric Emissions from LWA1 Modulation Lane Data Analysis
3. 学会等名 8th International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今井一雅、Charles A. Higgins、今井雅文、Tracy Clarke
2. 発表標題 LWA1モジュレーションレーンデータにより測定したIo-CとIo-Bの木星デカメートル波電波源のパラメータについて
3. 学会等名 第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中山雄晟、今井一雅
2. 発表標題 LWA1で観測された木星電波モジュレーションレーンのデータ解析の半自動化について
3. 学会等名 第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今井一雅、今井雅文、Charles Higgins、Tracy Clarke
2. 発表標題 LWA1モジュレーションレーンデータによる木星デカメートル波電波源の位置測定について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016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
研究協力者	ヒギンズ チャールズ (HIGGINS Charles H.)		
研究協力者	クラーク トレーシー (CLARKE Tracy)		
研究協力者	今井 雅文 (IMAI Masafumi)		
研究協力者	カース ウィリアム (KURTH William S.)		