

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：56401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400480

研究課題名(和文) 超高感度偏波観測システムLWA1による木星デカメートル波放射機構に関する研究

研究課題名(英文) Study on the Emission Mechanism of Jupiter's Decametric Radio Waves by using a High Sensitive Dual-Polarized Antenna System LWA1

研究代表者

今井 一雅 (IMAI, Kazumasa)

高知工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：20132657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：木星デカメートル波の放射機構を解明するために、超高感度偏波観測システムLWA1で観測されたデータの解析を行った。解析した木星電波のダイナミックスペクトラムにおいて、右回り偏波と左回り偏波のモジュレーションレーンの微細構造を調べることにより、木星の北と南の二つの場所から独立に電波放射が起こっている電波成分をとらえることができた。また、木星のイオ・プラズマ・トーラスに起因したオーロラ現象と関係のある領域からの木星電波放射成分を初めて分離することに成功し、木星電波の放射モードを特定する上で極めて重要な情報を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The radiation mechanism of Jupiter's decametric radio emissions has not been fully understood. We analyzed the data observed by a high sensitive dual-polarized antenna system LWA1. The measured fine structures of modulation lanes on the both right and left hand polarization components of the dynamic spectrum show the existence of two components coming from different hemisphere radio sources. We successfully identified the Jupiter radio components coming from the regions related to the UV auroras of the Io plasma torus. These results add important information regarding the emission mechanism of Jupiter's decametric radio waves.

研究分野：宇宙電波工学

キーワード：地球惑星科学 宇宙プラズマ波動 木星電波 電波放射機構 偏波観測 モジュレーションレーン

## 1. 研究開始当初の背景

1955年の木星電波の発見は、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、デカメートル波帯における自然電波放射で、地上観測で偶然に発見されて以来約60年となる。この間、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、その強力な電波放射がプラズマレーザ機構によるものであることが明らかとなってきた[Carr et al., 1970, 1983]。

この電波放射機構を説明するために、サイクロトロンメーザ理論[Treumann, 2006]が提案されているが、その詳細についてはまだ未知の部分が多く、電波放射機構の解明によって宇宙空間プラズマ物理学の重要な本質に迫ることが可能になると考えられている[Zarka, 1998]。

この木星電波は、筆者等によって開発されたモジュレーションレーン法[Imai et al., 1992a, 1992b, 1997, 2002, 2006]によってその電波源の特性が明らかにされてきた。それによると、木星デカメートル波放射源は、アクティブ領域(Active Radio Region)と呼ばれる経度方向に広がった特定の経度の範囲の領域に存在し、それぞれの電波源からは図1のように、木星の磁力線に対して約60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示されてきた。図1は、衛星Ioに関連する電波放射源(Io-B)の場合の北磁極側での木星電波放射の様子を表しており、衛星Ioを貫く木星の磁力線のIFT (Io Flux Tube)よりも下流の磁力線であるPEFT (Previously Energized Flux Tube)上に木星電波源が位置し、そこからコニカルシート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で強力な電波放射が受信されることを示している。以上のようにマクロな木星電波源の描像は明らかとなったが、そのマイクロな木星電波放射機構の解明が重要な課題となっている。

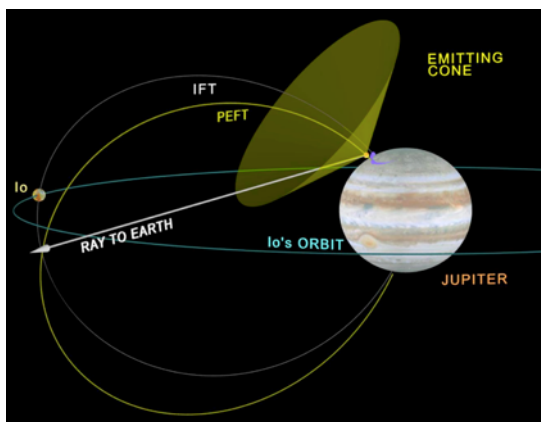


図1 木星電波放射源(北磁極側)とコーン状のビーム構造

## 2. 研究の目的

木星電波は、電波放射が観測される時点で、木星磁場の経度に対応する System III 経度

と、木星の衛星イオの位相角である Io Phase によって電波源が分類されているが、System III 経度によって、三つの電波源 A,B,C があり、さらに、これら電波源が衛星イオの Io Phase の位置によって、特に電波強度が強くなっている Io-A, Io-B, Io-C の三つの領域がある。Io-A と Io-B に関しては、右回り偏波が卓越しており、木星の北磁極側からの電波放射であると考えられている。一方、Io-C に関しては左回り偏波が卓越しており木星の南磁極側からの電波放射であると考えられているが、Io-C 電波源を観測すると、左回り偏波だけでなく右回り偏波に切り替わる現象が観測されてきた。

この解釈としては、木星電波がサイクロトロンメーザ理論で卓越されるとされる R-X モードで出ており、南磁極側からの電波だけでなく北磁極側からの電波も同時に受けているとすれば説明できる。しかしながら、電波源が北か南の位置の違いによるものであるかどうかは、地球の電離層のゆらぎによる位相変動の関係で超長基線電波干渉計(VLBI)観測においても、結論を得ることができていない状況である[Lynch et al., 1972]。

このような状況の中、アメリカのニューメキシコ大学のグループが中心となって建設されてきた LWA1(Long Wavelength Array 1)という低周波帯における超高感度の宇宙電波偏波観測システムが、2011年の12月から観測を開始し、研究協力者である Tracy Clarke 等によって、木星電波の偏波強度観測に成功している。この LWA1 では、その観測データの中に、上記の Io-C 電波源からの電波放射もあり、図2のような偏波情報の入ったダイナミックスペクトラムが示されている[Clarke, 2014]。このダイナミックスペクトラムの重要な点は、23MHz よりも上の部分に、右回り偏波の成分(赤で表示)があり、下の部分には、左回り成分(青で表示)が見えていることで、23MHz においては、左回り偏波と右回り偏波が混在するという現象がはっきり見えていることである。そして、左上から右下にモジュレーションレーンの縞状構造があり、上の右回り偏波成分のものから下の左回り偏波成分までの間を、その縞状構造がつながっているように見こともできる。これは、非常に重要な観測結果で、モジュレーションレーンの構造を両偏波成分が共有する場合は、「同じ磁極付近からの電波放射」であることを意味している。つまり、R-X モードだけが卓越しているだけでなく、L-O モードも卓越していることを意味している。したがって、今までのサイクロトロンメーザ理論の単純なモデリングでは、この観測結果を説明できないことを示唆している。このような LWA1 による新しい観測データを3年間の研究期間の間に多数蓄積し、モジュレーションレーンが含まれるような各種電波源の偏波ダイナミックスペクトラムを調べることにより電波源の放射モードを

調べ、サイクロトロンメーザ理論を検証するのが、本研究の目的である。

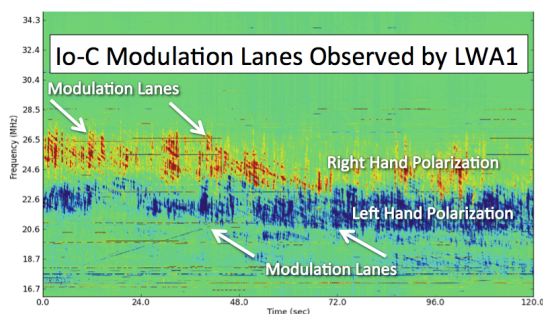


図2 Io-C電波源の偏波成分とモジュレーションレーン構造 (2012年3月10日のLWA1観測データ)

### 3. 研究の方法

LWA1(Low Wavelength Array 1)は、LWA計画の最初のアンテナシステム (1号機、図3)として、ニューメキシコ大学のグループによりアメリカのNSFやNRLのサポートにより建設された低周波の宇宙電波観測をターゲットとした大型のアレイアンテナである[Taylor, 2006]。LWA1は、256基のアンテナで構成されており、その感度は、10MHzから30MHzにおいて10mJyという低周波の宇宙電波観測においては世界最高レベルの超高感度な観測システムである。それぞれのアンテナは右回りと左回りの偏波観測が可能のように、広帯域な2系統のアクティブ・ダイポールアンテナで構成されており、受信されたアナログ信号は、1カ所に集められ、全ての帯域を超高速サンプリングされてデジタル化される。このデジタル化された信号は、デジタル信号処理ボードによって、リアルタイムに相関を行い、偏波観測に必要なストークスパラメータを計算し、前述の図2のような偏波特性を表すことのできるダイナミックスペクトラム表示を行うことができる。

初年度の計画としては、LWA1を使った木星電波観測を最初に行った研究協力者のTracy Clarkeと一緒に、このLWA1による木星電波観測の観測時間の割当を申請し、特にIo-C電波源を集中的に観測する。このために、研究協力者のChuck Higgins、Francisco Reyesと一緒に、観測のスケジューリング等についての検討を行う。LWA1は、木星電波だけでなく多くの低周波宇宙電波源がターゲットになっているので、観測のスケジューリングが最も重要なステップとなる。初年度は、いくつかの観測期間に分けて観測を行い、観測した生のデータをコピーして日本に持ち帰るために、大容量のUSBポータブルハードディスクを複数用いる。日本では、この観測したデータを効率よく解析するために、専用の高性能パソコン(MacPro)を用意する。観測により得られたデータについては、初期結果を出すために、Io-C電波源のデータについて、左回りと右回りの偏波成

分が見られるダイナミックスペクトラムのデータを探し、それにモジュレーションレーンが存在するかどうかの確認作業を行っていく。このモジュレーションレーンは、図4のようなダイナミックスペクトラム上に見られる斜めの縞状構造である。図5のように前述のPEFTに沿って電波源が分布し、衛星Ioの軌道周辺の密度分布に不均一性のある高密度プラズマが磁力線に沿ってスタレ状に存在することから、この縞状構造の傾きを測定し、木星磁場モデルをベースにコンピュータシミュレーションを行うことにより電波源の存在する磁力線の位置を特定することが可能となる[Imai et al., 1997, 2002]。このモジュレーションレーン法を用いて、Io-C電波源の左回りの偏波成分と右回り偏波成分を示すダイナミックスペクトラム上に現れるモジュレーションレーンの構造について詳細に解析を行うことにより、同じ磁力線上の電波源であるかどうかの判定を観測された全データに対して行っていく。

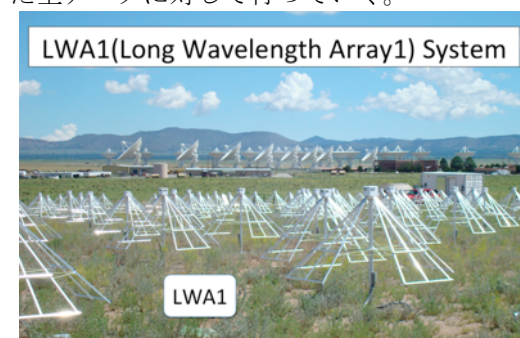


図3 ニューメキシコ大学のLWA1観測システム (アメリカ・ニューメキシコ州)

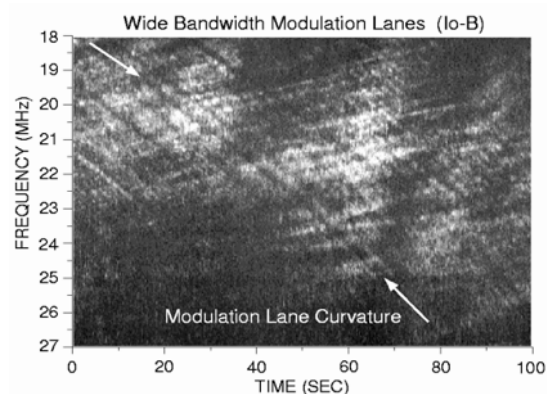


図4 木星電波のモジュレーションレーン (左上から右下方向の縞状構造)

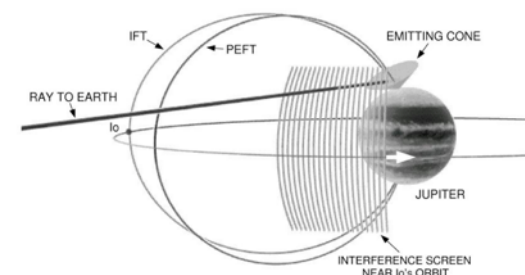


図5 プラズマのスタレ構造によるモジュレーションレーン生成モデル



#### 4. 研究成果

(1) LWA 1 の重要な観測データとして、図 6 の Io-B 電波源のダイナミックスペクトラムがある。これは、11MHz から 32MHz までの 21MHz の広い帯域に渡って観測されたモジュレーションレーンで、過去に他の観測システムでは観測されなかった広い帯域のものである。このモジュレーションレーンに対して、木星磁場モデルを用いてシミュレーションした結果、左下から右上の方向に湾曲しながら変化する縞状構造を正確にトレースすることができた。これは、モジュレーションレーン法のモデルが正しいことを示すもので、モジュレーションレーン法により求められる電波源の位置の精度が高いことを意味している。

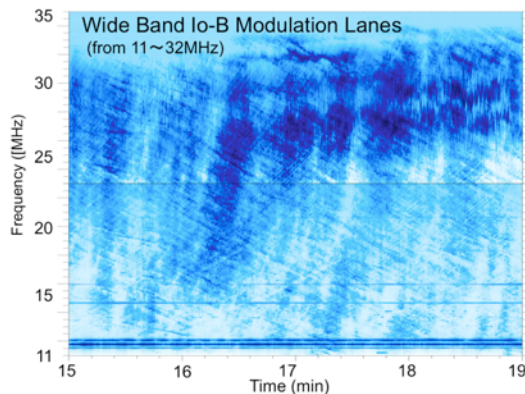


図 6 LWA1 で観測された 2013 年 12 月 30 日の Io-B 電波源のダイナミックスペクトラム上のモジュレーションレーン (左下から右上方向の縞状構造)

(2) 図 7 の Io-C 電波源のダイナミックスペクトラム構造の中で、青の左回り偏波成分と赤の右回り偏波成分が重なった所を注目し、両者のモジュレーションレーンの傾きについて調べた。図 2 は、初めて解析した観測データの例で、赤の右回り偏波成分上のモジュレーションレーンと青の左回り偏波成分上のモジュレーションレーンに連続性があるかどうか重要なポイントになる。図 8 は、4 例の新たな Io-C 電波源のモジュレーションレーンの観測データで、解析の結果、右回り偏波成分上のモジュレーションレーンと青の左回り偏波成分上のモジュレーションレーンには連続性が認められないことがわかった。これは、同じ磁力線上に右回り偏波成分と左回り偏波成分の電波源が分布しているという解釈ではなく、右回り偏波成分の電波源は、R-X モードとして、北半球側の磁力線上に位置し、左回り偏波成分の電波源は、L-O モードとして、南半球側の磁力線上に位置していることを示していることになる。また、モジュレーションレーン法による電波源の位置測定によって、左回り偏波成分の電波源のリードアングル (電波源の磁力線である PEFT と衛星イオを貫く磁力線である IFT の経度の差の角度) がほぼ 0 度であり、右回り

偏波成分の電波源のリードアングルは、平均して 330 度程度あることがわかった。この 330 度のリードアングルは極めて大きい、Io-A の後に Io-C 電波放射があることから、Io-A の影響を考慮すると、このリードアングルを小さめに解釈することも可能であると考えている。

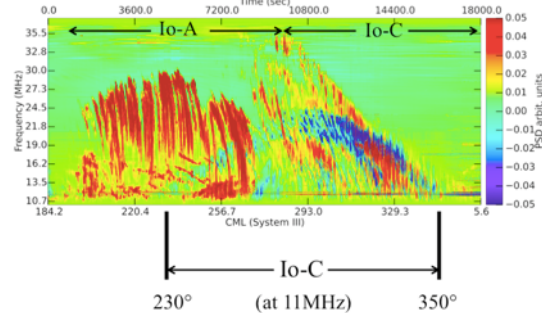


図 7 LWA1 で観測された 2012 年 12 月 1 日の Io-A/Io-C 電波源のダイナミックスペクトラム (赤：右回り偏波、青：左回り偏波)

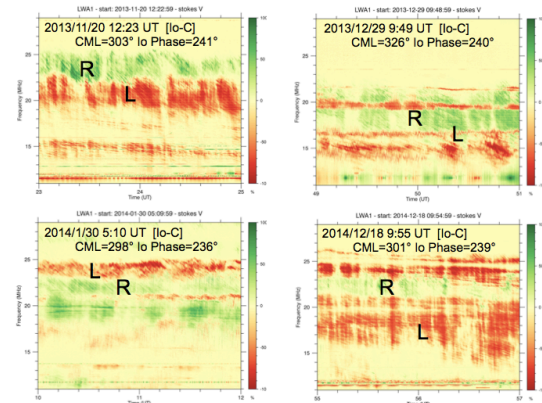


図 8 4 例の Io-C 電波源についてのモジュレーションレーンの比較 (緑：右回り偏波、赤：左回り偏波)

(3) これらのことから、Io-C 領域内にある左回り偏波成分 (南半球側) は、右回り偏波成分 (北半球側) とは、独立したものであると考えられるので、図 9 のように、Io-C' という名称により区別をすることにした。同様に、Io-B のダイナミックスペクトラムについても、3 例の観測データについてモジュレーションレーン法で解析した結果、図 10 のように、Io-B 領域の System III 経度が小さな領域 (左側) と、System III 経度が大きな領域 (右側) の電波源の経度が異なることがわかった。そこで、この Io-B 領域の System III 経度が小さな領域を Io-B' という名称で区別することにした。この Io-B' の領域の電波放射の強度は、System III 経度が大きなメインの領域の電波放射に比べて相対的に弱いこともわかった。今回、高感度な LWA1 システムにより、初めて Io-B' のモジュレーションレーンを調べることが可能となり、このような結果を得ることができたことになる。

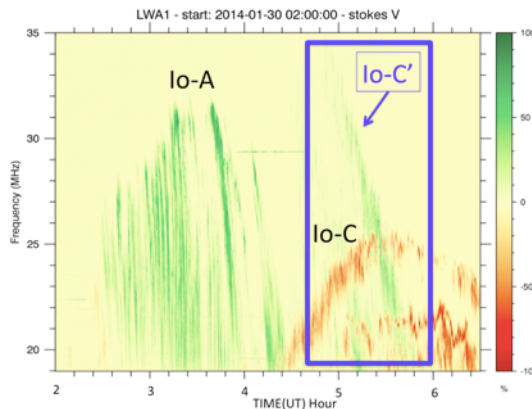


図9 Io-C領域内にあるIo-C'成分(緑:右回り偏波、赤:左回り偏波)

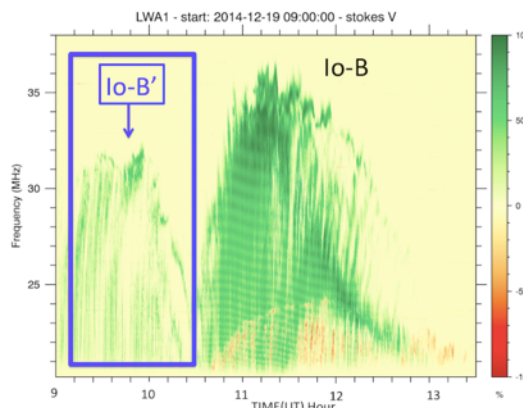


図10 Io-B領域内にあるIo-B'成分(緑:右回り偏波、赤:左回り偏波)

(4) LWA1システムで、Io-CとIo-B領域のモジュレーションレーンを調べることで、Io-C'とIo-B'という新しい表記により電波源の違いを示すことができるようになった。このIo-C'とIo-B'の電波源の経度(Source Longitude)の範囲を図11に示した。

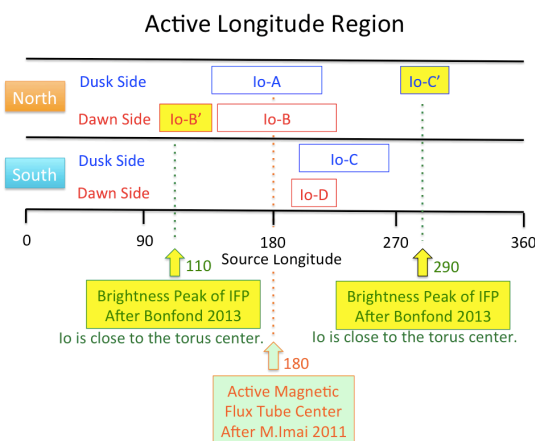


図11 Io-B'成分とIo-C'成分の電波源の経度分布

この図からわかるように、Io-B'の中心は、衛星イオのフットプリント(IFP)のUVオーロラの明るさのピーク[Bonfond, 2013]である110度に対応し、Io-C'の中心は、もう一つ

のピークである290度に対応している。この110度と290度のSystem III経度は、衛星イオがイオ・プラズマ・トーラスの中心に位置する特別な経度であることも重要で、Io-AとIo-Bの電波源の経度の中心となる180度[M.Imai et al., 2011]と大きく離れていることになる。

以上のような新しい結果は、木星電波放射機構を統一的に考える上で極めて重要な情報になると考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Modeling Jovian hectometric attenuation lanes during the Cassini flyby of Jupiter, M. Imai, A. Lecacheux, M. Moncuquet, F. Bagenal, C.A. Higgins, K. Imai, and J.R. Thieman, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol.120, pp.1888-1907, DOI:10.1002/2014JA020815, March 2015.
- ② Probing Jovian decametric emission with the long wavelength array station 1, T. E. Clarke, 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, *Journal of Geophysical Research, Space Physics*, 査読有, Vol. 119, pp.9508-9526, DOI:10.1002/2014JA020289, December 2014.

[学会発表] (計22件)

- ① LWA1モジュレーションレーンデータによる木星電波源の位置の測定について、今井一雅、今井雅文、Charles A. Higgins、Tracy Clarke、第138回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(東京大学)・講演予稿集R009-11、平成27年11月1日
- ② Probing Jovian decametric emission with the Long Wavelength Array Station 1, T.E. Clarke, C.A. Higgins, J. Skarda, K. Imai, M. Imai, F. Reyes, J. Thieman, *Magnetospheres of the Outer Planets 2015*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 平成27年6月2日
- ③ Jupiter's decametric radio common observation campaign from LWA1, NDA, and URAN-2 in late 2014 and early 2015, M. Imai, A. Lecacheux, C.A. Higgins, T.E. Clarke, M. Panchenko, A.I. Brazhenko, A.V. Frantsuzenko, A.A. Konovalenko, K. Imai, *Magnetospheres of the Outer Planets 2015*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 平成27年6月2日

- ④ Characteristics of the Jupiter decameter Io-D source, C. Higgins, T. Clarke, F. Reyes, J. Thieman, M. Imai, K. Imai, D. Typinski, Magnetospheres of the Outer Planets 2015, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 平成 27 年 6 月 3 日
- ⑤ Characteristics of Jupiter's decametric modulation lanes observed by LWA1 K. Imai, Y. Shimanouchi, M. Imai, T. Clarke, C.A. Higgins, F. Reyes, J.R. Thieman, Magnetospheres of the Outer Planets 2015, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 平成 27 年 6 月 4 日
- ⑥ LWA1 で観測された木星電波モジュレーションレーンの微細構造、今井一雅、島内良章、今井雅文、Tracy Clarke, Charles A. Higgins, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (幕張メッセ) PCG32-17、平成 27 年 5 月 26 日
- ⑦ 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、島内良章、今井一雅、今井雅文、Tracy Clarke, Charles A. Higgins, Jinhie Skarda, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(松本)・講演予稿集 R009-P019、平成 26 年 11 月 2 日
- ⑧ LWA1 で観測された木星電波モジュレーションレーンについて、今井一雅、島内良章、今井雅文、Tracy Clarke, Charles A. Higgins, Jinhie Skarda, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(松本)・講演予稿集 R009-16、平成 26 年 11 月 1 日
- ⑨ LWA1 で観測された木星電波 Io-C モジュレーションレーンについて (2)、今井一雅、島内良章、T. Clarke, C. A. Higgins, 今井雅文、日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (パシフィコ横浜 会議センター) PCG38-25、平成 26 年 5 月 1 日
- ⑩ LWA1 で観測された木星電波のデータ解析、島内良章、今井一雅、T. Clarke, C. A. Higgins, 今井雅文、日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (パシフィコ横浜 会議センター) PCG38-P14、平成 26 年 5 月 1 日
- ⑪ Modulation lanes of Jupiter's decametric radio emission observed by LWA1, K. Imai, Y. Shimanouchi, T. Clarke, C. A. Higgins and M. Imai, Symposium on Planetary Science 2014, Sendai, 平成 26 年 2 月 21 日
- ⑫ Jovian decametric emission observations: New data from the LWA1 and 50 years of older data from UFRO, Charles A. Higgins, Tracy Clarke, Jinhie Skarda, Kazumasa Imai, Francisco Reyes, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(高知大学)・講演予稿集 R009-04, 平成 25 年 11 月 5 日
- ⑬ Modulation lanes of Jovian decametric radio emission observed by the Long Wavelength Array Station 1 (LWA1),

- Kazumasa Imai, Tracy Clarke, Masafumi Imai, Charles A. Higgins, Francisco Reyes, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(高知大学)・講演予稿集 R009-05, 平成 25 年 11 月 5 日
- ⑭ Ray tracing study on Jovian hectometric attenuation lanes, Masafumi Imai, Charles A. Higgins, Alain Lecacheux, Kazumasa Imai, James R. Thieman, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(高知大学)・講演予稿集 R009-06, 平成 25 年 11 月 5 日
- ⑮ LWA1 で観測された木星電波 Io-C モジュレーションレーンについて、今井一雅、Clarke Tracy, 福島光一、氏原明也、今井雅文、日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (幕張メッセ国際会議場) PCG31-24、平成 25 年 5 月 23 日

[その他]  
ホームページ等  
<http://jupiter.kochi-ct.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今井 一雅 (IMAI, Kazumasa)  
高知工業高等専門学校・電気情報工学科・教授  
研究者番号：20132657

### (2) 研究協力者

Tracy Clarke (Naval Research Laboratory)  
Chuck Higgins (Middle Tennessee State University)  
Francisco Reyes (University of Florida)  
今井 雅文 (IMAI, Masafumi)  
京都大学大学院