

平成23年1月24日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19340142  
 研究課題名（和文） 月－地球間木星電波VLBIに向けてのe-VLBI地球観測網  
 による木星電波源の研究  
 研究課題名（英文） Study of Jupiter's Radio Source by Using e-VLBI Global Network toward  
 the Moon-Earth Baseline Jupiter Radio VLBI  
 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

研究成果の概要（和文）：木星電波放射機構を解明するために、インターネットでデータ交換が可能な新しい方式の超長基線干渉計(e-VLBI)を開発し、木星電波 VLBI 観測データの相関処理に成功した。これにより、サーチライトビームを持つと考えられる木星電波放射源の空間的な情報を得ることが可能となり、我々のグループが提案している月－地球間木星電波 VLBI 観測実現に向けて大きなステップを踏むことができた。

研究成果の概要（英文）：The radiation mechanism of the Jupiter's decametric radio emissions has not been fully understood. We developed a Jupiter radio e-VLBI system over the Internet. We successfully received Jupiter radio emissions by using this e-VLBI system. The micro structures of Jupiter radio source are also considered by the model of Jupiter radio searchlight beam. This study is very important step toward the moon-earth baseline VLBI to investigate the Jupiter radio source in detail.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：超高層物理学 電波天文学 惑星電波 月探査 磁気圏・電離圏

## 1. 研究開始当初の背景

地球や木星等の惑星の磁気圏から放射される自然電波は様々なものがあるが、その放射機構解明のためには、まだ多くの謎が残されている。これらの自然電波放射には多くの共通点があり、木星電波の謎を解くことは、全ての惑星電波の放射機構を統一的に解明

していくための突破口を切り開く大きな科学的インパクトがあると考えられる。

この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る木星電波は1955年に発見されて以来、様々な観測が行われ、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少しずつではあるが明

らかとなってきた。この電波放射機構の詳細についてはまだ未知の部分が多く、電波放射機構を解明すること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。

この木星電波放射機構を解明するためには、木星電波放射源の空間的な情報を得ることが最も重要なポイントとなる。しかしながら、この電波源の空間的な情報を得るための地球上からの超長基線干渉計 (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) 観測は、地球上で行う VLBI 観測であるために、十分な分解能を得るための基線長 (数千 km 程度まで) がとれないだけでなく、地球の電離層の電子密度のゆらぎによる大きな制約があり、アメリカの観測所で 1970 年代に行われた木星電波 VLBI 観測でも、木星の電波源の大きさが 400km という上限が得られたにすぎない。

一方、日本では、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状構造であるモジュレーションレーン (Modulation Line) を説明することのできるモデルが提案された。これは、衛星イオの軌道近くを貫く木星の磁力線に沿ってあたかもスダレのように分布するプラズマのスクリーンによりビーム状に放射される木星電波が変調を受ける伝搬現象に起因するというモデルである。そして、このプラズマのスダレ構造が木星の磁力線に沿って存在することから、逆にこれを利用することにより木星デカメートル波電波源の空間的な情報を高精度に得られることに世界で初めて成功し、モジュレーションレーン法という新しいリモートセンシングの手段を開拓した。[Imai et al., 1992, 1997, 2002]

このモジュレーションレーン法によって、木星電波源の位置に関する情報が飛躍的に増え、新しい木星電波放射の様子が明らかとなってきた。このモジュレーションレーン法による木星電波の探査により、木星電波のビームが磁力線に対して 60 度程度方向に数度以内の幅の鋭い指向性を持つことがわかり、電波源の大きさも 140km 以内であることがわかってきた。この新しい観測方法により、木星電波源が存在する領域と、木星の紫外線オーロラとの対応が初めて可能となってきた。

ここで重要なのは木星電波放射機構を解明するためには、電波源のコヒーレントな領域の大きさを求めることである。つまり電波放射がわずかに数度以下となる鋭いビーム状の指向性は、電波源のコヒーレントな領域の大きさと密接に関係していると考えられるからである。一方、日本においては、2004 年に月面低周波電波天文研究会 (LLFAST: Lunar Low Frequency Astronomy Study Team) が発足し、将来の月面電波天文台の実現に向けて活発な議論が行われている。この月面天

文台の第 1 ステップとして提案されている月-地球間木星電波 VLBI 観測は、最大 38 km の基線長により、観測周波数 24MHz において 20km という驚異的な分解能で、この木星電波源のコヒーレントな領域の大きさを調べることが可能となる。これは、惑星探査機が木星に行ったとしても直接測定することができない分解能であり、電波源のコヒーレントな領域の大きさを調べることにより、電波放射機構解明のための重要なパラメータを得ることが可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究においては、3 年間の研究期間内に、この月-地球間木星電波 VLBI 観測の実現に向けての重要なステップとなる地球上の木星電波 VLBI 観測網として、今までの方式とは異なる、インターネットに接続されて自動的に VLBI 観測及びデータ収集できるインターネット木星電波 VLBI 観測システム (e-VLBI) を構築する。この観測システムのユニークな点は、各観測点の右旋円偏波成分と左旋円偏波成分の独立した観測データの位相情報の相関だけでなく、各観測点の広帯域のダイナミックスペクトラムの情報を同時に得ることである。これは、木星電波の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傾きを調べることにより電波源の位置の情報を得ることが可能となるモジュレーションレーン法による観測と VLBI 観測を同時に行うことにより、木星電波源の情報を高精度に収集することが可能となるという大きな長所がある。

この木星電波 VLBI ネットワークを構築するために、情報通信研究機構で開発されてきた e-VLBI システムの技術をベースに、月-地球間木星電波 VLBI 観測を視野に入れて、低周波数帯でのフロントエンドを含めた世界標準となる VLBI システムの開発を本研究で行う。次に、国内の観測拠点として、極めてノイズレベルの低い山間部に位置する高知県の吾川木星電波観測所 (高知高専) に、専用のアンテナシステムを新しく設置する。そして、この吾川木星電波観測所と、すでに国内の木星電波観測の拠点となっている、東北大学、福井工業大学、情報通研究機構 (鹿島) の合わせて 4 カ所に本研究で開発された木星電波 VLBI システムを設置し、既設のインターネットで接続した国内木星電波 VLBI ネットワークを立ち上げて、定常観測に入る。

次のステップとしては、世界的な木星電波観測所であり、インターネットに接続されているアメリカのフロリダ大学とハワイ大学、フランスのナンセイ宇宙電波観測所に、本研究で開発された VLBI システムの設置の検討を行う。これによって、世界規模の木星電波 VLBI ネットワークの定常的な運用を可能と

し、木星電波源の高精度なモニタリングが定常的に可能となる。また、この観測システムにより、右旋円偏波成分と左旋円偏波成分の電波源の位相的な変動とモジュレーションレーン法で得られる電波源の位置情報との正確な対比が初めて可能となり、木星電波放射機構を解明する上で重要な情報を得ることが可能となる。

本研究では、木星電波 VLBI ネットワークにより、今までに得られていなかった VLBI での偏波情報のストークスパラメータを完全計測することが可能となり、右旋円偏波成分と左旋円偏波成分の木星電波源が、北磁極側にあるのか南磁極側にあるのかを、あるいは同じ磁極側で両方の円偏波成分が出ているのかを、VLBI による位相情報とモジュレーションレーン法の位置情報を組み合わせることにより、世界で初めて明らかにできると考えている。この情報は、デカメートル波領域の木星電波放射機構を解明するための極めて重要な情報となり、惑星電波放射機構を統一的に解明していく新しい惑星電波科学の突破口を日本が中心となって切り開いていくことができると考えている。

また、本研究は日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)における、月探査プロジェクトの将来計画に密接に関係している。前述の月面低周波電波天文研究会(LLFAST)では、将来の月面電波天文台の最初のステップとして、月周回機に木星電波 VLBI 用のアンテナと受信システムを搭載し、月と地球の間での木星電波 VLBI を実現することを考えている。VLBI が基線長に比例して電波源の分解能を上げることができるので、月と地球の間の基線長(38 万 km)により究極の分解能に迫ることが可能となる。この月-地球間木星電波 VLBI 観測による木星電波源の探査は、地球規模では得られなかった新しい知見をもたらしてくれると期待されており、本研究は、月を舞台にし、日本が世界をリードする新しい惑星電波の研究探査を展開していくための重要な基礎研究として位置づけられるものである。

### 3. 研究の方法

本研究の目標とする木星電波 VLBI ネットワークを構築するために、平成 19 年度は、情報通信研究機構鹿島宇宙技術センターの研究分担者である近藤のグループで開発されてきた e-VLBI システムの技術をベースに、低周波数帯でのフロントエンドを含めた世界標準となる VLBI システムの開発を行った。

この VLBI システムのプロトモデルは、平成 17 年度から 18 年度の科研費・基盤研究(C)による「次世代インターネット VLBI による木星電波源の超微細構造に関する研究」(代表者:今井)で開発が進んでおり、新しい VLBI

システムにおいては、VLBI での偏波情報のストークスパラメータを完全に計測でき、モジュレーションレーン測定が可能な、広帯域 VLBI 受信系とデータ解析プログラムを新たに開発を行った。また、可搬性を考え USB で簡単に接続が可能な VLBI サンプラユニットをノートパソコンに接続する新しい方式を採用した。

次に、国内の観測拠点として、極めてノイズレベルの低い山間部に位置する高知県の吾川木星電波観測所(高知高専が設置)に、広帯域偏波観測が可能なクロス型ログペリオディックアンテナシステムを新しく設置した。この吾川木星電波観測所は、平成 18 年 1 月より木星電波観測を中心とした NASA の教育プロジェクトである RadioJOVE の観測点として運用されており、観測データの蓄積の結果、その電波環境の良さは特筆に値することがわかった。今回、専用のアンテナシステムを設置することにより、世界的な木星電波 VLBI ネットワークの中心となる観測拠点として位置づけられることになる。この吾川木星電波観測所と、すでに国内の木星電波観測の運用を行っている東北大学、福井工業大学、情報通研究機構(鹿島)の合わせて 4 カ所に本研究で開発された木星電波 VLBI システムを設置し、既設のインターネットで接続した国内木星電波 VLBI ネットワークを立ち上げて、定常観測に入りデータ収集を行った。

### 4. 研究成果

(1) e-VLBI では、得られた観測データをインターネットや JGN2plus 等の高速回線を用いて一箇所に集めることで、それぞれの観測地点が非常に離れた位置で行う VLBI 観測でも観測から短時間に相関処理をすることが可能となる。本研究では、最初のステップとして高知高専と鹿島宇宙技術センターを JGN2plus、吾川木星電波観測所をインターネットで結び、3 地点間での木星電波 e-VLBI システムを構築した。図 1 には吾川木星電波観測所、図 2 には鹿島宇宙技術センターの受信アンテナ系の写真を示す。



図 1 吾川木星電波観測所



図2 鹿島宇宙技術センター

図3に、本研究のVLBI観測で使用している受信系のブロック図を示す。なお、この図には吾川観測所で用いている右旋・左旋両円偏波成分を観測するための2系統のものが表示されている。アンテナで受信された信号は、低雑音増幅器により増幅されフィルタで観測周波数である26~28MHzに帯域を制限する。サンプラーユニットは、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)鹿島宇宙技術センターによって開発されたものであり、受信信号をA/D変換し、時刻信号のラベルを付けて観測サーバに保存する機能を持っている。

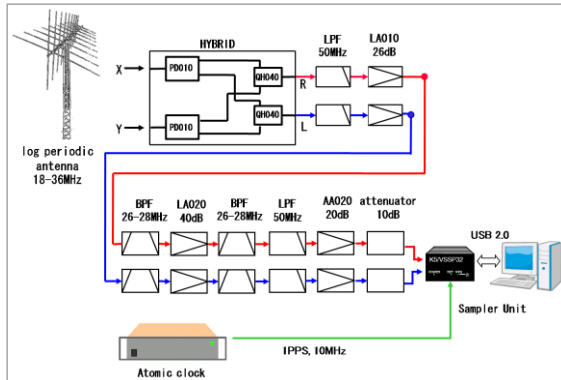


図3 観測システムのブロック図

(2) 木星電波のVLBI観測例として、2008年2月から6月にかけて行われたものについて説明する。この観測期間においては、世界時(UT)の5月29日19:50頃と7月7日17:10頃に木星電波の観測に成功した。そこで、この2日間のデータのうち、ダイナミックスペクトラム上で確認して特にはっきり現象が現れている時間帯のデータを利用して相関処理を行った。

5月29日の鹿島宇宙技術センター、高知高専、吾川木星電波観測所で得られた観測データのうち、図4の19:50から1分間の観測データの比較を行うと鹿島と高知高専のダイナミックスペクトラム上より、19:50:00付近や19:50:30付近において木星電波の特徴的

なスペクトラムが確認できる。吾川のデータには、鹿島や高知で見られるようなはっきりとした現象が見られない。この原因として、非常にレベルの高い人工ノイズが入っており、木星電波の現象が埋もれてしまっていたと考えられる。この1分間のデータに対して、鹿島宇宙技術センター、高知高専、吾川木星電波観測所の3地点間でそれぞれ相関処理を行った。その結果得られた鹿島と高知との間の相関の例を図5に示す。

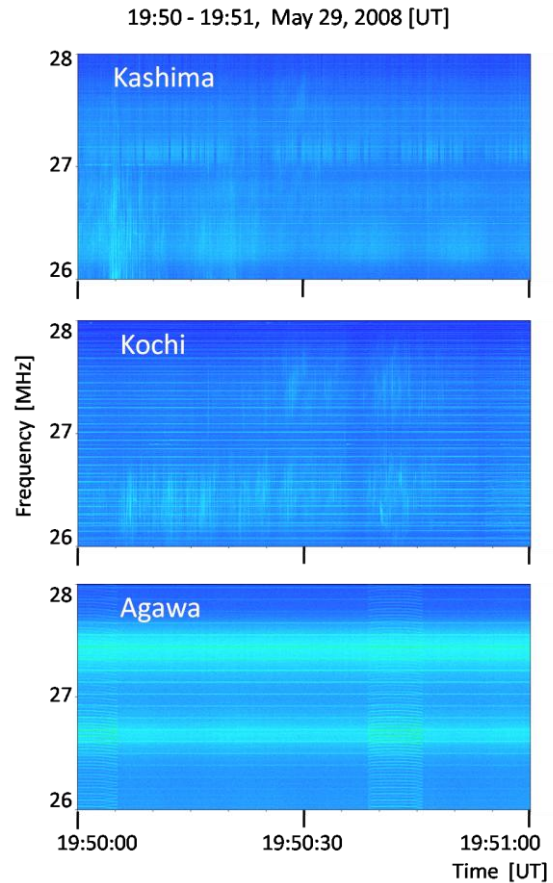


図4 各観測点のダイナミックスペクトラム

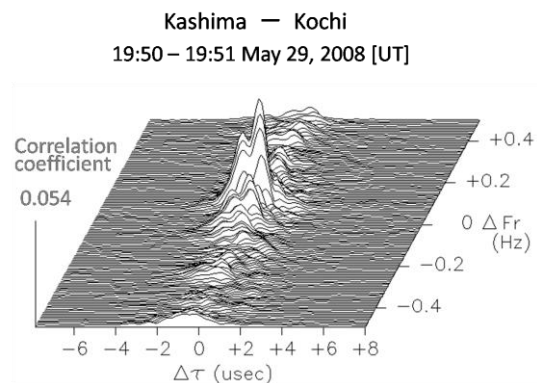


図5 鹿島と高知の間の相関



図5からわかるように、グラフの中央にははっきりとピークが現れていることがわかる。これは2地点の信号の中に同じ木星電波が受信されていたことを意味する。また、吾川木星電波観測所との相関も得られたことから、鹿島宇宙技術センターと高知高専の間だけでなくダイナミックスペクトラム上からは直接確認できなかった吾川木星電波観測所でも木星電波の同時観測に成功していたということがわかる。

ここまでの相関処理は、処理に使うデータ長である積分時間を60秒とした相関処理の結果であった。この積分時間を1秒として相関処理を行い、時間軸方向に並べて描画することでフリンジの時間変化を見ることができる。5月29日の観測データに対してこの処理を行った画像と高知高専のダイナミックスペクトラムを比較したものが図6である。フリンジの画像は、相関強度の値をカラーコードで表している。高知高専のダイナミックスペクトラム上で現象が見られる時間帯では、フリンジの結果が強い相関を示したことを表す赤い色がはっきりと出ている。また、フリンジの図からは後半のピークがはっきりスプリットしていることがわかった。

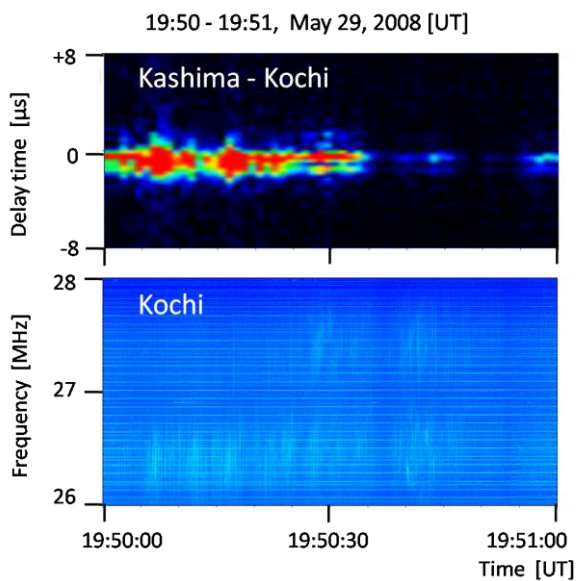


図6 相関の遅延時間の時間変化とダイナミックスペクトラムとの対比

本研究により開発したシステムで、実際に木星電波のVLBI観測に成功した。得られたフリンジには、相関処理を行った時間帯全体にわたってフリンジの山が二つに分かれている現象が見られた。この現象の原因として考えられるものは、電波源が離れた場所に複数存在する可能性や、帯域制限を行った観測データでの相関処理により Sinc 関数のパターンが出力結果に現れている可能性などが考えられる。

以上の例のように、本研究の目的である木星電波 VLBI 観測に成功し、平成 20 年度からは、東北大学、福井工業大学にも木星電波 VLBI システムを設置し、継続的に VLBI 観測を行っている。本研究においては、多くの木星電波 VLBI データの蓄積を行うことができ、そ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と相関の時間変化を調べて行くことにより、様々な電波源の構造に関する情報を得ることができる基盤を整えることができた。

(3) 本研究においては、木星電波 VLBI 観測だけでなく、木星電波源の構造のモデル化も行った。これは、木星電波のビーム構造がサーチライト状になっていることを提案し、このサーチライトビームを説明するために、木星電波源は、木星の磁力線方向に 1km、緯度方向に 200m のコヒーレントな領域を考える必要があることを示した。このモデルは、LLFAST で提案されている月周回機に木星電波用のアンテナと受信システムを搭載し、月と地球の間での木星電波 VLBI を実現することにより、検証することが可能であると考えている。以上のことから、本研究は、月を舞台にし、日本が世界をリードする新しい惑星電波の研究探査を展開していくための重要なステップとなった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① A study on the Observation System for the Lunar Low Frequency Astronomical Observatory, T. Iwata, H. Noda, H. Misawa, K. Imai, T. Kondo, H. Takeuchi, F. Tuchiya, T. Nakajo, Y. Nariyuki, K. Asari, and N. Kawano, The 27th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2009-k-42, Proceeding (CD-ROM), 査読無, July 9, 2009.
- ② M. Imai, K. Imai, C. A. Higgins, and J. R. Thieman, Angular Beaming Model of Jupiter's Decametric Radio Emissions Based on Cassini RPWS Data Analysis, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol. 35, L17103, doi:10.1029 /2008 GL034987, 2008.

[学会発表] (計 31 件)

- ① 今井一雅、岩田隆浩、近藤哲朗、石井敦利、三澤浩昭、土屋史紀、中城智之、大野敏光、今井雅文、野田寛大、竹内央、熊本篤志、成行泰裕、河野宣之、LLFAST 計画:木星電波 e-VLBI 観測ネットワークとその将来計画、地球電磁気・地球惑星

- 圏学会第 126 回総会及び講演会、B009-02、金沢大学、2009 年 9 月 27 日
- ② 岩田隆浩、今井一雅、野田寛大、竹内 央、三澤浩昭、土屋史紀、熊本篤志、近藤哲朗、中城智之、成行泰裕、浅利一善、河野宣之、LLFAST 計画：木星電波観測のための月－地球スペース VLBI、地球電磁気・地球惑星圏学会第 126 回総会及び講演会、B009-01、金沢大学、2009 年 9 月 27 日
- ③ T. Iwata, H. Noda, H. Misawa, K. Imai, T. Kondo, H. Takeuchi, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, T. Nakajo, Y. Nariyuki, M. Inoue, and N. Kawano, A Study on the Observation System for LLFAST: the Lunar Low Frequency Astronomical Observatory, Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) 2009, PS17-A017, Singapore, August 12, 2009.
- ④ K. Imai, T. Iwata, H. Takeuchi, H. Noda, N. Kawano, H. Misawa, F. Tsuchiya, T. Kondo, T. Nakajo, and LLFAST team, Jupiter Radio VLBI Science Using the Lunar Low Frequency Astronomy Study Telescope (LLFAST), Magnetospheres of the Outer Planets (MOP) 2009 Meeting, Keln, Germany, July 27, 2009.
- ⑤ M. Imai, A. Lecacheux, and K. Imai, Polarization Analysis of Jupiter's Decametric and Hectometric Radio Emissions from Cassini RPWS Data, Magnetospheres of the Outer Planets (MOP) 2009 Meeting, Keln, Germany, June 27, 2009.
- ⑥ 岩田隆浩、竹内 央、野田寛大、浅利一善、砂田和良、今井一雅、成行泰裕、三澤浩昭、土屋史紀、熊本篤志、近藤哲朗、中城智之、井上 充、河野宣之、LLFAST：次期月探査低周波電波望遠鏡計画、第 9 回宇宙科学シンポジウム、P2-36、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部、2009 年 1 月 6 日
- ⑦ K. Imai, L. Garcia, F. Reyes, M. Imai, J.R. Thieman, M. Ikuta, A Searchlight Beam Model of Jupiter's Decametric Radio Emissions, AGU 2008 Fall Meeting, SM41B-1673, San Francisco, USA, December 15, 2008.
- ⑧ M. Imai, K. Imai, C.A. Higgins, J.R. Thieman, The Relationship of Jupiter's Non-Io-DAM Emissions and Aurora Phenomena, AGU 2008 Fall Meeting, SM41B-1668, San Francisco, USA, December 15, 2008.
- ⑨ T. Iwata, H. Noda, H. Misawa, F. Tsuchiya, K. Imai, T. Kondo, N. Kawano, H. Ujihara, M. Inoue, A Study on the

Observation System for the Lunar Low Frequency Astronomical Observatory, 2008 URSI GENERAL ASSEMBLY, Chicago, USA, August 7, 2008.

- ⑩ K. Imai, L. Garcia, F. Reyes, M. Imai, J.R. Thieman, A New Beaming Model of Jupiter's Decametric Radio Emissions, The 2007 Magnetospheres of the Outer Planets (MOP) Meeting, San Antonio, USA, June 25, 2007.

[その他]

ホームページ等

<http://jupiter.kochi-ct.jp/vlbi/>

## 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) 研究分担者

近藤 哲朗 (KONDO TETSURO)

独立行政法人情報通信研究機構・新世代ワイヤレス研究センター鹿島宇宙技術センター・センター長

研究者番号：10359052

三澤 浩昭 (MISAWA HIROAKI)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90219618

土屋 史紀 (TSUCHIYA FUMINORI)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10302077

中城 智之 (NAKAO TOMOYUKI)

福井工業大学・工学部・講師

研究者番号：00367509

河野 宣之 (KAWANO NOBUYUKI)

国立天文台・RISE 推進室・教授

研究者番号：00367509

野田 寛大 (NODA HIROTOMO)

国立天文台・RISE 推進室・助教

研究者番号：10353426

岩田 隆浩 (IWATA TAKAHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：20201949