アルマーの冒険 ALMAr

第11回 ソフトウェアラジオを使って木星の電波観測 前編

おもな登場人物

千里奈央（せんり・なお）

アルマー（ALMAr）

いざよい（十六夜）

★おもな登場キャラクターのプロフィールはバックナンバーをご覧ください

前回（「アルマーの冒険」第10回）は、電波による流星の観測を実際に行いました。ただしそれは、地上から流星観測用に発信された電波を利用するという手法で、天体が発する電波を直接捉えたわけではありません。また、以前には太陽からの電波の観測を2回行っていますが（「アルマーの冒険」第04回と第09回）、いずれもほぼ既存の観測機器を用いていました。

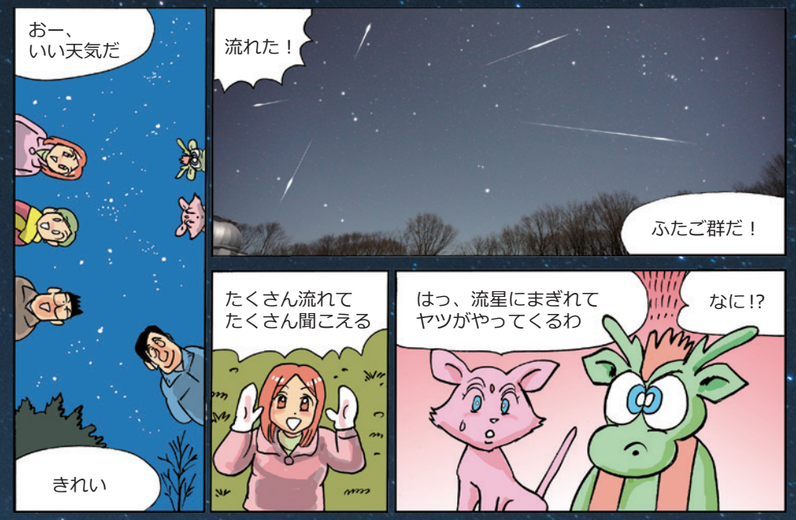
そこで、これからは前回の流星の電波観測のように、アンテナを自作したり、安価な受信機を活用することで、様々な天体から届く電波の直接受信にチャレンジしていきます。まずは手始めに、木星からの電波の観測を試みます。流星の電波観測で用いたものと同様なSDR（Software-Defined Radio）を受信機として観測装置を製作し、実際に木星電波の検出を目指します。

「アルマーの冒険」制作ユニット
絵／藤井龍二
写真・文・星図作成・構成／川村 晶
監修・制作協力／熊本篤志、土屋史紀、笠羽康正、加藤雄人（東北大学）、
石黒正人（国立天文台）、唐崎健嗣（合同会社プラネタリウムワークス）
編集／高田裕行

★前号・第10回

「ソフトウェアラジオを使って流星の電波観測」までのあらすじ

太陽からの電波を捕らえることに成功した蒼天高校天文部のメンバーたちは、次の観測目標を流星と定めた。観測用に送信されているアマチュア無線の電波を流星が反射するのを受信するという観測だ。奈央の親戚であるクニタチ天文台のワレナベ先生らの手ほどきでダイポールアンテナを設置し、観測は大成功。しかしその夜、いざよいが流星にまぎれて宇宙からやってくる「ヤツ」の存在に気づいたのだった。（※下のまんがは第10回の最後のシーンです）

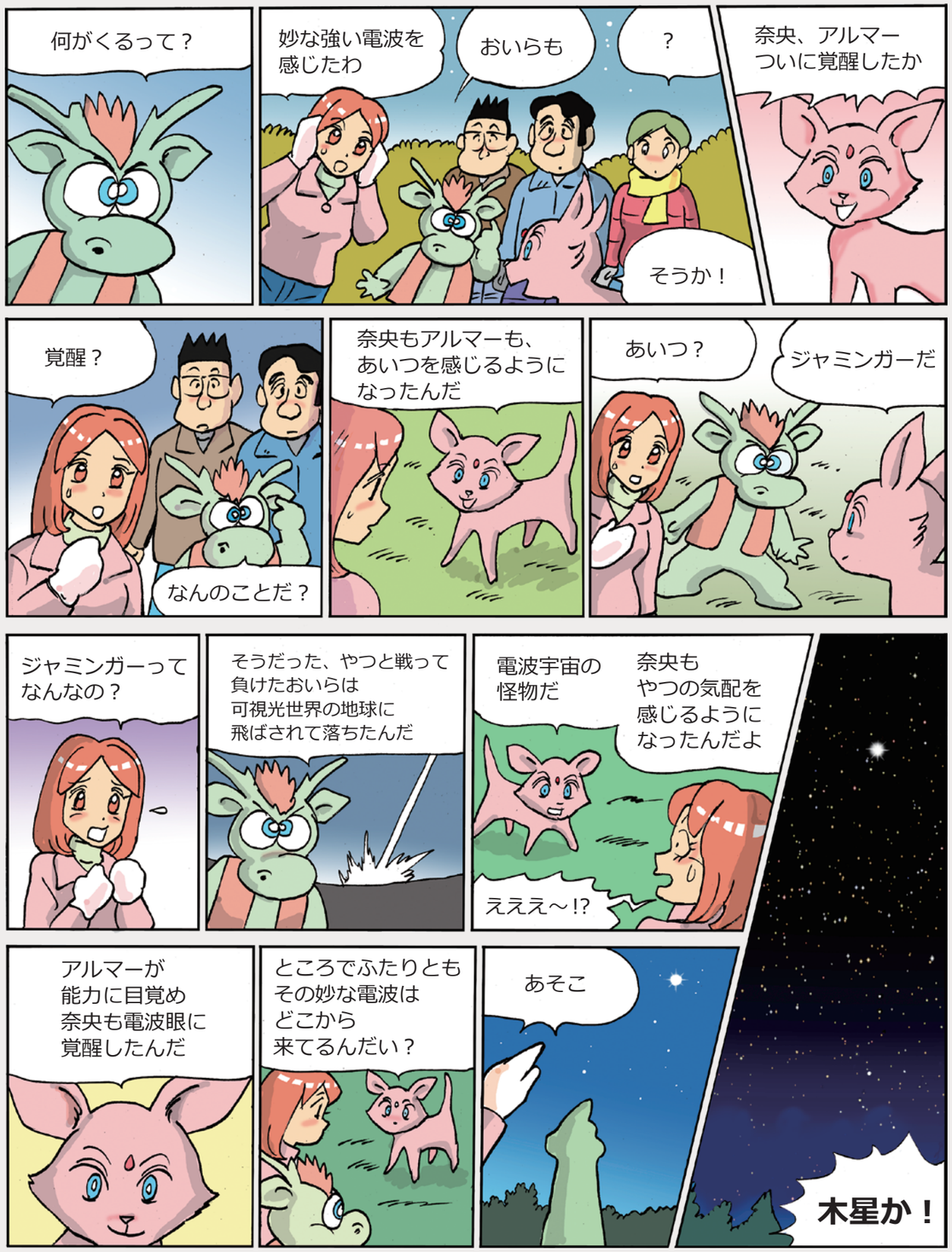


電波天文まんが「アルマーの冒険」バックナンバー
https://www.nao.ac.jp/about-naoj/reports/naoj-news/almar/

2022年11月には東京大学木曽観測所構内をお借りして木星のデカメートル波の観測を行った。画面中央が −2.7等級という明るさで輝く木星。

第11-1章 覚醒した奈央が感じた電波は木星からやってきた

アルマの冒険 ALMA



1　偶然に発見された木星からの電波

かに星雲の観測中に捉えたノイズの発生源は木星だった

現在では、光と同様に様々な天体から電波が放射されていることが知られています。きっかけは、電波天文学の歴史（「アルマーの冒険」第05回参照）でも記したように、アメリカ・ベル研究所の技術者だったカール・ジャンスキーが、1931年に銀河中心方向からやってくる電波を偶然に捉えたことです。その後、電波を放射する天体が数多く見つかりました。実は、木星からの電波の発見も偶然によるものでした。

1954年のことです。アメリカ・ワシントンDCのカーネギー研究所に所属するバーナード・バーク（B. F. Burke）とケネス・フランクリン（K. L. Flanklin）は、メリーランド州セネカにある約40ヘクタール（東京ドーム8つ分）の土地に建設された電波望遠鏡で、おうし座にある「かに星雲」からの電波を観測していました。

電波望遠鏡は「ミルズクロスアレイ」と呼ばれ、624ｍにわたって66基のダイポールアンテナ★を2列、X字型に並べたアンテナアレイで、その観測周波数は22.2 MHzでした。

図01　オーストラリアの電波天文学者であるミルズ（B. Y. Mills）と後に干渉計の開口合成でノーベル賞を受賞したイギリスのライル（Martin Ryle）が設計したアンテナで、66対の木製のマスト上端に電線を張ったものだ。使われた電線は総延長8kmにもなったという。受信機器は、もともと現場に置かれていた陸軍の余剰トラックに載せられていた。残念ながら現在は撤去され、観測所もアンテナも残っていない。
Credit: Carnegie Institution for Science Archives

観測を進めていたバークとフランクリンは、かに星雲からの電波ではないと思われるノイズが、時折現れることに気がつきました。原因を探るうちに毎日ではないが、ほぼ同じ恒星時（地球の自転1回転の周期）に1～2時間ほどのノイズが現れることも見いだしました。そこで、このノイズは人工的な電波ではなく、天体に由来するものとの仮説を立てます。

さらに観測を続けると、実際には恒星時よりも少しだけ早い周期間隔でノイズが現れることが分かりました。もしも宇宙からやってきているのであれば、そのノイズの発生源は天球上を東から西へと動いていることになります。ちょうどその頃、かに星雲の近くには木星がありました。木星は、1954年11月中旬にかに座で留を迎えて逆行に転じ、そこから翌年3月まで天球上を西へと移動していたのです。バークとフランクリンは、謎のノイズの時間的な変化と木星の天球上での動きが一致していることに気がつき、ノイズは木星からの電波であることを突き止めたのです。この観測は、惑星が放射する電波を初めて確認したことになりました。

1955年に論文が発表されると、多くの電波天文学者が過去の観測データの見直しを行いました。なかでも、オーストラリア出身の電波天文学者であるシャイン（C. A. Shain）が、その5年も前からこれまで認識されていなかった木星からの電波と思われる記録を見つけ出しました。天文学者たちは、さっそく木星からやってくる電波の存在を確信したのです。

しかし、これだけでは、なぜ木星が電波を放射しているのかは分かりませんでした。後に様々な仮説が立てられ、詳細な観測が行われるようになって、その原因が少しずつ解明されていったのです。

ちなみにこの木星からの電波は、後におよそ10～40 MHzの周波数であることが明らかになります。波長にすると、およそ30ｍ～7ｍで、おおむね10ｍ（＝デカメートル）台の範囲であることから、「木星のデカメートル波（Jovian DecAMetric Radiation＝Jovian DAM）」と呼ばれるようになりました。

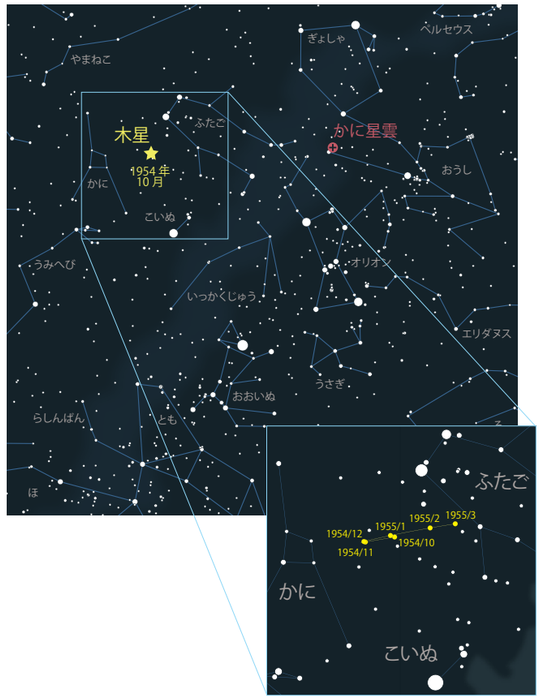
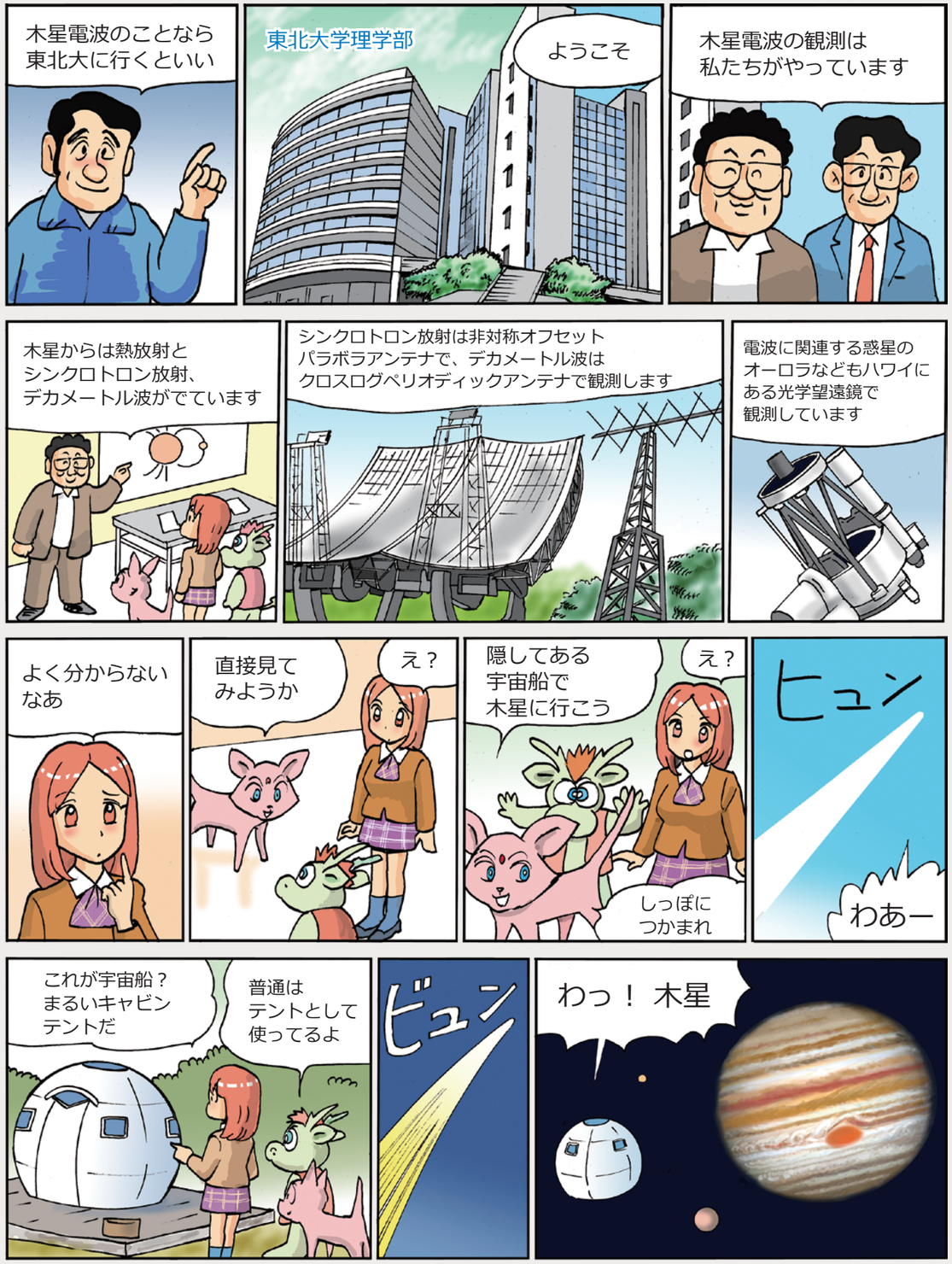


図02　1954年から1955年にかけて、バークとフランクリンが謎のノイズについて観測を行っていた頃の星図。かに星雲のある「おうし座」に近い「かに座」付近に木星があるのが分かる。拡大星図には、各月1日の木星の位置を記した。木星は1954年12月から1955年3月にかけて、天球上を西へ向かって10度ほども移動していた。

★ダイポールアンテナ：受信波長の1/4の長さを持つ直線状のエレメント（導線）を2本、電波を導くためのケーブル（同軸ケーブル）の先端（給電点）に取り付け、エレメントを左右対称に展開したアンテナ。シンプルな構造のため、自作するのが容易である。

第11-2章 木星での異変を調査するため、木星までひとっ飛び

アルマの冒険 ALMA



2 木星のデカメートル波の正体とは？

謎の電波の正体を探るため、光と電波で詳細に木星を観測

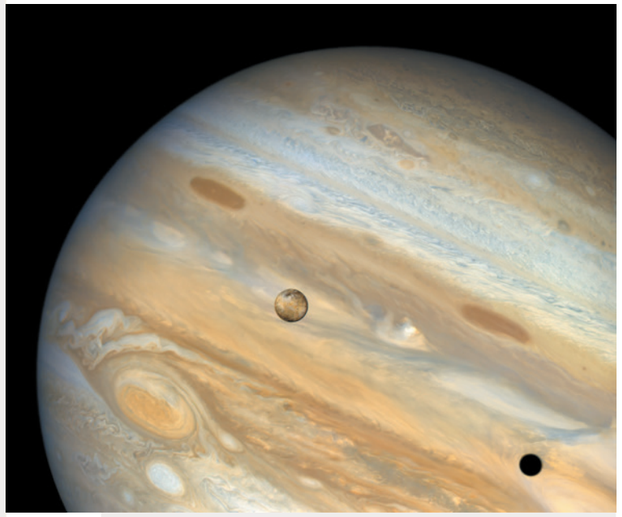


図03 木星は太陽系の第5惑星で、太陽系の惑星の中では最も大きく、その直径は地球のおよそ11倍もある。主に水素やヘリウムなどが集まった巨大ガス惑星で、地球からは小さな天体望遠鏡でも、その表面に縞状の模様や大赤斑と呼ばれる模様を見ることができる。これらは主にアンモニアの結晶などでできた雲による模様である。図は1979年に惑星探査機ボイジャー1号によって、約100万kmの距離から撮影された木星と衛星のイオ。木星の表面にはイオの影が落ちている。
Credit: NASA/Jet Propulsion Laboratory/Ian Regan

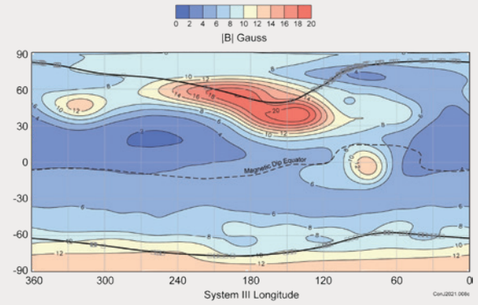


図04 木星の表面上の磁場の強さ（ガウス）の等高線を緯度経度の直角図法で示した図。木星探査機ジュノーの観測データより作成された。青い部分は磁場が弱く、赤い部分は磁場の強いところ。かなりの偏りがあることが分かる。
Connerney et al. (2022) Fig. 5より引用。

天文学者たちは、観測から木星のデカメートル波の存在を確信し、さらにその電波放射の仕組みを突き止めるため、電波の波長と強度、観測時刻の記録を続けました。また、同時に光学観測も行いました。地上からは、光学望遠鏡を用いて木星表面の雲の模様を観測することができます。この模様の位置と電波の強度の観測結果を比較すると、相関関係があることが分かってきました。地球上の位置を示すのに緯度と経度を用いますが、木星も同様に表面の模様を基準にして緯度と経度を定めることができます。地球から見える木星正面の経度を中央経度と呼びますが、電波はその中央経度に対応して強度が変化していたのです。

また、木星のデカメートル波は右回りの円偏波でした。偏波とは、電磁波の振動の様子です。電波は、電場と磁場の振動（時間的な変化）が波として伝わる現象ですが、円偏波は進行方向に向かって電場が回転している状態です。

偏波の観測からは、電波の発生原因や木星から地球までの空間の状態についての情報を引き出せます。また、偏波の原因の1つとして、木星のデカメートル波の発生に磁場が関わっていることが予測されました。そこから、木星には磁場が存在する可能性が示唆されたのです。

現在では、探査機などによる直接探査で、木星に磁場の存在が確認されています。惑星の磁場の成因は、基本的に惑星内部にあると考えられます。地球にも磁場がありますが、場所によって磁場の強いところや弱いところがあります。原因についてはいくつかの説がありますが、詳細は不明です。木星も同様に磁場に部分的な強弱があって、自転による周期的なデカメートル波の強度変化に関連していると考えるのが自然でしょう。

ところが、木星のデカメートル波を長期にわたって観測を続けていくと、電波強度と中央経度にずれが生じることも分かってきました。木星表面の雲の模様は、それ自体が時間とともに変化しますし、赤道付近と極付近でも自転周期にわずかに違いが見られます。木星内部と表面上の自転速度に違いのあることも電波の観測で明らかになりました。

さらに、観測データから興味深いことが見つかりました。同じ中央経度の時でも木星のデカメートル波には強度に大きな変動があって、しかもそれに周期性があるのです。その原因は、木星の衛星のイオでした。特定の木星の中央経度とイオの位相（軌道上の位置）との組み合わせによって、周期的に木星のデカメートル波が特に強く放射されるのです。木星にはたくさんの衛星がありますが、イオの軌道は木星の磁場の強い磁力線の中にあったのです。

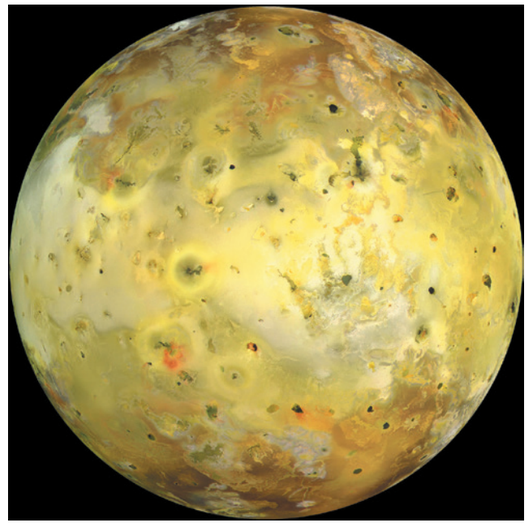


図05 1999年にNASAの探査機であるガリレオが撮影した木星の第一衛星イオの画像。複数の波長で撮影された画像を肉眼で見える色に近い色調に調整して、さらに色を強調したもの。黒っぽく見えるのが火山の噴火口で、表面の多くが主に硫黄やその化合物で覆われていて、黄色みを帯びている。Credit: NASA/JPL/University of Arizona

第11-3章 ジャミンガー出現で 木星電波大混乱、地球も危ない!?

アルマの冒険 ALMA

3　木星のデカメートル波の発生原理

衛星イオと木星電離圏の間（の磁力線）に電流が流れて、強力な電波が周期的に発生？

木星の衛星のイオは、地球の月よりもやや大きな天体です。イオは太陽系内では珍しく、火山を持つ衛星です。木星に比較的近い公転軌道を巡っているイオは、木星の強大な潮汐力によって内部に熱が生まれ、内部の物質が噴出しているのです。ただし、火山といっても地球のそれとは様子が異なります。その噴出物の成分は、主に硫黄や二酸化硫黄の気体で、他にナトリウムやカリウム、塩素なども含まれます。噴出物の多くは宇宙空間へと飛び出すと、主に太陽からの紫外線でイオンと電子に分かれたプラズマの状態になります。そして、それらのプラズマは、イオの軌道上にまるで木星を取り巻く浮き輪の形のように分布しているのです。これを「イオトーラス」と呼んでいます。

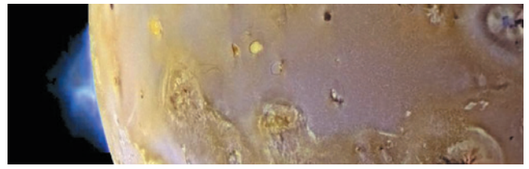


図06　木星探査機ガリレオが捉えたイオの噴火の様子。噴火による噴出はプルームと呼ばれているが、イオのプルームははるか上空の宇宙空間へまで物質を吹き上げている。
Credit: NASA/JPL/University of Arizona

イオはそのトーラスの中で、自身の火山の噴出物で構成される薄い大気をまとって木星の周りを回っています。この大気は物質がプラズマの状態なので導電性を持っています。そこで、磁場を持つ木星を磁石と見立てると、イオが木星の磁場の中を移動する（実際には木星の自転周期のほうがイオの公転周期よりも短いために磁力線がイオを追い越す）と電流が発生するのです。磁石と電線を巻いたコイルを用いる発電機は、コイルの内側で磁石を回すことで、コイルの電線に電流が流れますが、イオの大気（プラズマ）と木星の磁場はまさに巨大な発電機と言えます。

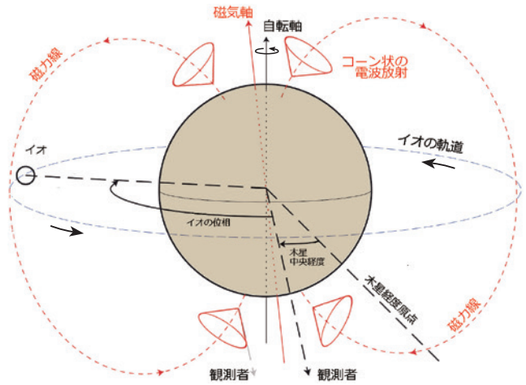


図07　木星のデカメートル波発生原理の模式図。イオの公転周期よりも木星の自転周期が短いので、プラズマを伴ったイオを磁力線が追い越すことで起電力が発生し、磁力線を経由して電離層との間に電流回路が生じる。さらに磁力線に沿って加速されたイオンが電離層でオーロラを、電子がコーン状に電波を発生させると考えられている。イオよりも高緯度の磁力線上でも、より遠方の磁気圏（図11参照）との間に電流が流れて電子が加速されるために電波が放射されるが、イオに関連したものよりは微弱である。
Louis, C. K., et al., ExPRES: an Exoplanetary and Planetary Radio Emissions Simulator, A&A, 627 (2019) A30, Fig. 2より引用し一部改変。

こうして、イオと木星の電離層を繋ぐ木星の磁力線上に電流が流れる条件が出来上がります。そして磁力線に沿って加速された電子がらせん状に運動しながら磁力線に沿って進んで行く時に、電波を放射すると考えられています。こうした電波の発生の仕組みは「サイクロトロン放射★」と呼ばれています。

残念ながら、木星のデカメートル波の発生原理は完全には解明されていませんが、デカメートル波は木星の極に比較的近い位置で、磁力線と交わる電離層付近から放射されていることも分かってきました。電波は開いた傘を逆さまにしたようなコーン状に放射され、コーンの頂点とコーンの縁を結ぶ直線上に地球が位置する時のみ、木星のデカメートル波が受信できるというわけです。

ちなみに地上から観測可能な木星のデカメートル波の周波数は、およそ18 MHzから40 MHz です。サイクロトロン放射による電波発生の仕組みでは、その電波の周波数が磁場の強さに依存することから、木星のデカメートル波の周波数は、木星の磁場の強さを知るための指標にもなり得るのです。

木星のオーロラとイオフットプリント

木星でも地球と同様に、極域にオーロラが見られます。地球のオーロラの発生原理は完全には解明されていませんが、おもに太陽風のプラズマ（荷電粒子）が、複雑な過程を経て、地球の磁場の磁力線に沿って加速され、地球大気と衝突することで励起された大気分子が基底状態に戻る時にオーロラとして発光すると考えられています。木星のオーロラも基本的な発生原理は地球のものと同様と考えられています。波長は幅広く、X線から紫外線、可視光線、赤外線の領域まで広がっています。

興味深いのは、イオ付近を通る磁力線が木星の大気と交わる付近（電離層）には、特に明るい発光部分が現れます。この部分を「イオフットプリント（＝イオの足跡）」と呼んでいます。木星のデカメートル波は、イオフットプリント付近から放射されていると考えられています。

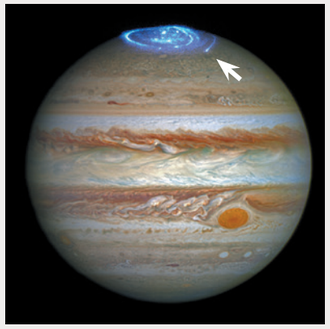


図08　木星の極域に発生したオーロラと「イオフットプリント（＝イオの足跡）」（矢印）
Credit: NASA, ESA, and J. Nichols (University of Leicester); Acknowledgment: A. Simon (NASA/GSFC) and the OPAL team

★宇宙を飛び交う電波の多くは、熱的放射、シンクロトロン放射、輝線の3種です。木星からは、それ以外のサイクロトロン放射による電波が最も強く放射されています。シンクロトロン放射もサイクロトロン放射も、磁力線に沿ってらせん運動する電子によるものですが、シンクロトロン放射のほうがエネルギーのはるかに大きな（光速に近い速度を持つ）電子によるものです。

4 木星が放射する3種の電波と他の惑星からの電波

デカメートル波以外の木星からの電波と惑星電波観測の現在

後年の観測で、木星はデカメートル波とは異なる種類の電波も放射していることが分かってきました。1つは、表面の雲の熱放射です。物体からは、その温度に依存する電磁波が放射されています。木星の雲の温度はおよそ130 K（マイナス140 ℃ほど）です。この熱放射による木星からの電波は20 GHz前後で、理論的に求められる130 Kの黒体放射の数値とほぼ一致しています。

もう1つ、木星の周囲には、磁場によって閉じ込められた非常にエネルギーの高い粒子が存在する放射線帯と呼ばれる場所があります。ここからシンクロトロン放射と呼ばれるメカニズムで電子が電波を放射していることも分かっています。

シンクロトロン放射は、おもに光に近い速度の高いエネルギーの電子が磁場に捉えられて放射する電波です。その周波数は、サイクロトロン放射による電波よりも高く、数百MHzから数GHzほどです。

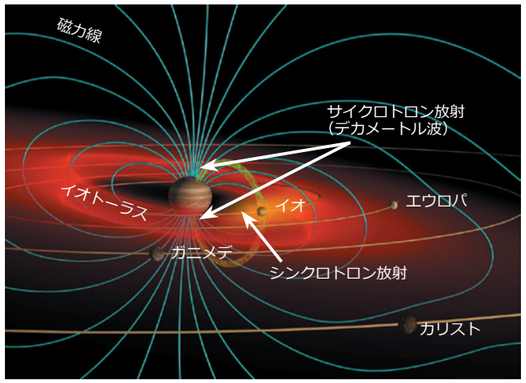


図09 木星の磁場と4大衛星の軌道、さらにイオトーラスとそこから磁力線に沿って流れる電子などを模式的に示した図。デカメートル波は木星の両極に近い電離層から、シンクロトロン放射による電波はイオの軌道よりもさらに内側にある放射線帯から放射されている。Wikimedia Commons（https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupiter_magnetosphere_schematic.jpg）より引用し、日本語解説を追加。

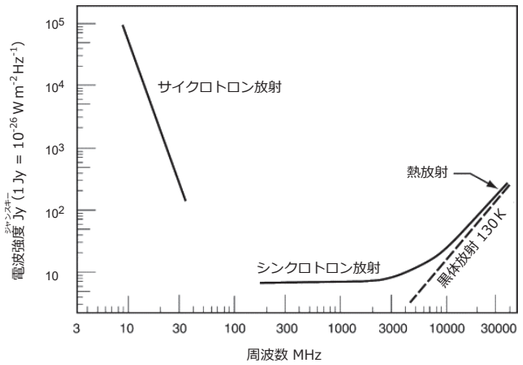


図10 木星から放射される電波は、その放射のプロセスによって異なる周波数帯に広がっている。木星からは、表面からの熱放射、放射線帯からのシンクロトロン放射、イオトーラスと磁場によるサイクロトロン放射の3種類の電波が存在している。単純な電波強度の比較では、サイクロトロン放射がより強く観測される。
Mark S. Marley, Jonathan J. Fortney, in Encyclopedia of the Solar System (Second Edition), 2007（https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/jupiter）Fig. 11より引用し日本語化。

実は、地球にも発見者の名にちなんでバンアレン帯と呼ばれる放射線帯が存在しています。木星の磁場は地球よりもはるかに強力なため、強いシンクロトロン放射による電波が放射されているのです。もちろん、地球でも磁気圏で電波が発生しています。しかし、電離圏による反射で、その電波を捉えることがむずかしく、熱放射以外の惑星からの電波の存在が認められたのは、木星のデカメートル波が最初だったのです。

また、電波による惑星の観測の手法としては、大気の吸収線などもあります。大気の熱放射による電波は、大気中に含まれる分子に応じて特定の周波数の電波のみが吸収されるので、それを観測します。電波によって、間接的に大気中に存在する物質を知ることが可能になるのです。

惑星の磁場

地球上では、方位磁針（磁気コンパス）を用いて南北の方角を知ることができます。これは、地球がまるで棒磁石のような磁場を持っているからです。地球の磁場の発生原理は、完全には解明されていませんが、地球内部の外核を構成する溶けた状態の金属（主に鉄やニッケル・導電性を持つ）が熱や物質の移動によって対流を起こしたり、さらに地球の自転も加わることで外核内部に電流が流れ、磁場が生まれるとされています。このような磁場発生の仕組みは、「ダイナモ理論」と呼ばれています。複雑な仕組みですが、大局的には地球の自転による影響が最も大きく、比較的地軸の両極に近い位置に磁場の両極が位置しています。

木星も内部は主に導電性のある液体の金属水素で満たされていると考えられていて、地球と同様なプロセスで磁場が発生しているようです。ただし、磁場の強さは地球の2万倍もあります。強力な磁場により、高エネルギーの放射線帯が形成されるので、探査機で近づくには、搭載した機器が影響を受けないような対策が必要になります。

惑星で磁場を持つのは、地球と木星の他には水星、土星、天王星、海王星です。火星と金星には磁場がありませんが、探査機による観測では、火星にかつて磁場があったことが分かっています。

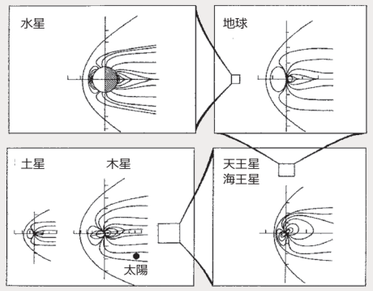


図11 惑星の磁場が及ぶ範囲を磁気圏と呼んでいます。この図は、惑星ごとの磁気圏の大きさを示しています。木星の磁場がどれほど強いかがよく分かります。天王星と海王星は、なぜか磁極が自転軸から大きく傾いています。
Andrew J. Coates, The Solar System in the next millennium（https://www.researchgate.net/publication/243688353_The_Solar_System_in_the_next_millennium#pf12）Fig. 4より引用し一部改変。

日本の惑星大気観測「SPART」

日本の惑星大気による電波の吸収線観測としては、大阪府立大学電波天文学研究室のSPART（Solar Planetary Atmosphere Research Telescope）がありました。このプロジェクトは国立天文台の野辺山宇宙電波観測所に設置されていた野辺山ミリ波干渉計の運用終了後に、干渉計を構成していた6基の口径10 mパラボラアンテナのうち1基を改装し、世界初の惑星大気観測専用の地上ミリ波電波望遠鏡として観測を行いました。現在は、すでにプロジェクトを終了していますが、大気の特定の成分が電波を吸収することを利用して、金星や火星の大気成分の季節変化や太陽活動に起因する変化などの長期のモニタリングで成果を上げています。

図12 大阪府立大学電波天文学研究室が使用していた野辺山宇宙電波観測所のミリ波干渉計F号機。ミリ波干渉計は口径10 mパラボラアンテナを6基で観測を行っていましたが、運用終了後にF号機だけを単独で使用できるように改修して活用されてきました。後ろに見えているのは野辺山45 m電波望遠鏡です。

アルマ望遠鏡によるイオ大気の観測

イオは、火山から噴出される一酸化硫黄や二酸化硫黄の大気を持っていることが知られています。地球の10億分の1ほどというごくわずかな大気ですが、それが直接火山から噴き出したものか、地表に降り積もった物質が太陽光に温められて昇華し、大気に混じるのかは分かっていませんでした。そこで研究チームは、木星の影の中では大気がイオの表面に固体となって堆積すると考え、アルマ望遠鏡を用いてイオが木星の影に入る前と影から出た後で大気の観測を行うことにしました。そして、高い解像度と感度を持つアルマ望遠鏡により、イオの火山から噴きあがる二酸化硫黄と一酸化硫黄のガスを捉えることに初めて成功。観測結果から、イオの大気の30~50 %は火山から直接供給されていると見積もられました。また、アルマ望遠鏡は、二酸化硫黄や一酸化硫黄が検出されない場所で、火山から噴出する新たな種類のガスとして、塩化カリウムも検出しています。研究チームでは、イオの内部でマグマの組成が異なっている証拠と考えています。

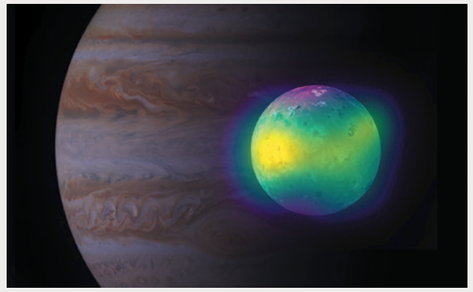


図13 にじんだような黄色の部分がアルマ望遠鏡が電波で観測したイオの二酸化硫黄。さらに探査機カッシーニが撮影した木星とボイジャー1号とガリレオ探査機によって得られたイオの表面画像も合成しています。
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), I. de Pater et al.; NRAO/AUI NSF, S. Dagnello; NASA/JPL/Space Science Institute

右上のイオ大気を観測したアルマ望遠鏡はチリのアタカマ砂漠に建設された電波干渉計です。
山頂施設に並ぶアルマ望遠鏡モリタアレイ（アタカマコンパクトアレイ）のアンテナ群。
密に並んでいるのが日本製7mアンテナ、右手前が日本製12 mアンテナです。
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

5 アメリカの市民科学アウトリーチ「Radio JOVE」

木星電波観測を利用したNASA主導の体験型教育プロジェクト

アメリカには1999年から市民科学へのアウトリーチとして、Radio JOVE（ラジオジョーブ／JOVEはローマ神話のユピテル＝Jupiterのこと）と呼ばれるプロジェクトがあります。これは、学生や教師、一般市民が電波望遠鏡を作ったり、インターネットを通じて遠隔地の電波望遠鏡を利用することで、電波天文学について学ぶことができる体験型の教育プロジェクトです。すでに2500を超える学生団体や個人が参加しているそうです。

Radio JOVEの参加者は、ネットワーク上で交流したり、データの共有を通じて協力しあうこともできます。また、プロジェクトのパートナーとして、NASAゴダード宇宙飛行センターを始め、フロリダ大学天文学部やミドルテネシー州立大学などの研究機関や教育機関、いくつかの企業がサポートをしています。

2016年からは、Radio JOVEプロジェクトの範囲は、太陽物理学の市民科学研究を取り込むために拡張され、現在では「Radio JOVEプロジェクト2.0」として、木星や太陽、天の川銀河、および地球上の電波放射からデータを収集し、科学的分析とアーカイブまでを行うことができるようになっています。

最大の特徴は、参加者へ安価な電波望遠鏡のキットを非営利で提供していることでしょう。電波望遠鏡とはいえ、簡素なデュアルダイポールアンテナとSDRを受信機として、PCを活用した簡単な構成ですが、木星のデカメートル電波の観測を行うには十分な性能を有しています。また、観測に必要なソフトウェアも提供されていて、誰もが電波天文学分野の観測を体験することが可能です。受信機は当初、オリジナルで設計されたもので、電子部品をはんだ付けして組み上げるシステムを採用していました。しかし、安価で観測波長範囲が広く、波長も時間も高分解能で、なによりスペクトルが取得できるSDRの登場で、より本格的で有意義な観測を行えるようになっています。

図14 Radio JOVEのウェブサイト。もちろん英語のみだが、最近はウェブブラウザの翻訳機能も充実してきたので、内容を理解するのはさほどむずかしくないだろう。木星のデカメートル波の発見から現代の観測手法まで、たくさんの情報が詰まっている。
https://radiojove.gsfc.nasa.gov/

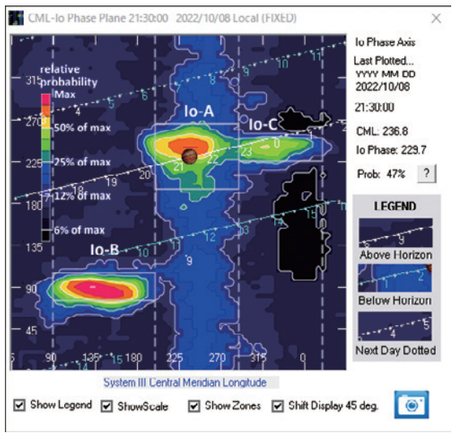


図15 木星のデカメートル波の観測計画の立案に欠かせないのが、Radio-Sky Publishing社より提供されている「Radio-Jupiter Pro 3」だ。木星の中央経度とイオの位相から、デカメートル波が強く放射されるタイミングを予測することができる。
https://radiosky.com/rjpro3ishere.html

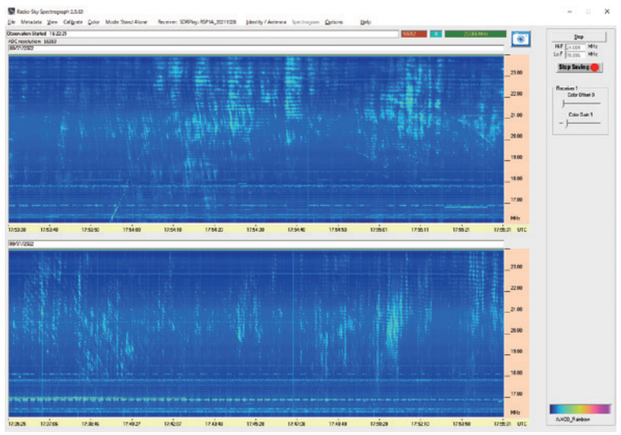


図16 「Radio-Sky Spectrograph」は、アナログデジタルコンバーターを使用してPCでデータを収集できるインターネット対応のストリップチャートレコーダー。「Radio-Jupiter Pro 3」と同様にRadio-Sky Publishing社より提供されている。SDRとの接続用アプリと併用することで、木星のデカメートル波の比較的広範囲なスペクトルの観測が可能となる。
https://www.radiosky.com/specdownload.html

実際に観測を行うソフトウェアに加え、木星の中央経度とイオの位相から、木星のデカメートル波のストームを予測するソフトウェアなども無償で用意されていて、まさに至れり尽くせりです。

Radio JOVEが提供する電波望遠鏡キットをアメリカから日本へ輸入することは不可能ではありませんが、残念ながら送料なども考えるとあまり現実的ではないようです。そこでアルマーの冒険制作チームは、Radio JOVEの電波望遠鏡キットの構成を踏襲したシステムを作り上げ、実際に木星のデカメートル波の観測を行ってみました。Radio JOVEが指定するSDRはイギリス製ですが、国内の代理店が扱っていて通販で購入できます。また、アンテナは日本国内で比較的簡単に入手可能な材料を用いて組み上げました。観測システムの構築から実際の観測結果までは、後編にて紹介の予定です。

図17 左上は、Radio JOVEが発行する木星電波観測のマニュアル（上はアンテナ設置マニュアル、下はSDR受信での観測マニュアル）。充実した内容で、PDFファイルをダウンロードできる。また、写真はアルマーの冒険制作チームが、予備観測の前に設置したノイズ環境調査用のダイポールアンテナ（写真中央右に木星）。アンテナマストは現地調達の物干し台だ。今回の木星のデカメートル波観測では、天文分野以外の電波の専門知識を持った協力者が必要となり、無線技術アドバイザーとして唐崎健嗣さん（プラネタリウムワークス）が参加。アマチュア無線に親しんだ経験を活かして大いに活躍していただいた。まんがパートの新キャラクターの「カラフィン」（左下・後編に登場）は、唐崎さんがモデルである。

6 歴史ある日本の木星電波観測のエキスパート

東北大学大学院理学研究科の「惑星圏飯舘観測所」を訪問

日本の木星電波研究は、東北大学や前田耕一郎氏（元兵庫医大）、今井一雅氏（高知高専）によって進められてきました。特に1970年代から継続的に木星電波の観測を行ってきた東北大学では、現在も大学院理学研究科の地球物理学専攻／惑星プラズマ・大気研究センターが最前線で研究をしています。そこで、アルマーの冒険制作チームで木星のデカメートル波観測を行うにあたり、地球物理学専攻／惑星プラズマ・大気研究センターのみなさんに、ご協力とアドバイスをいただきました。

また、惑星プラズマ・大気研究センターには多数の天体観測施設がありますが、なかでも特に惑星電波観測の中心となっている「惑星圏飯舘観測所」を見学させていただきました。ここでは、観測所の様子や研究成果などをご紹介しましょう。

惑星圏飯舘観測所は、福島県相馬郡飯舘村の山中に建設された施設で、東北大学大学院理学研究科のある仙台市からは、車で2時間ほどです。ここには、「木星・銀河デカメートル電波観測施設」と「惑星電波・分光観測施設」の2つの施設が隣接しています。

木星・銀河デカメートル電波観測施設では、木星はもちろん、銀河からのデカメートル波の観測を行っています。電波をより高感度に受信するために、森の中に9基のクロスログペリオディックアンテナが設置され、アレイ干渉計システムが構築されています。これによりイオに関連した木星のデカメートル波の詳細な振る舞いを記録したり、イオとは関係のない微弱な電波源の全貌を明らかにするべく、観測を続けています。

さらに、東北大学には木星のデカメートル波の観測を行う施設として、宮城県内に米山観測所（登米市）、川渡観測所（大崎市）、蔵王観測所（刈田郡蔵王町）があり、飯舘の施設と合わせた4局での長距離干渉計網を構築しています。干渉計として使うことで、より高い分解能で、木星のどちらの極が放射源かを調べることが可能になっています。

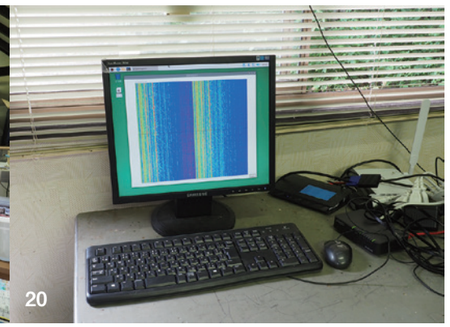


図18　木星・銀河デカメートル電波観測施設には、9基の短波帯（HF）アンテナが設置されているが、そのうちの6基のクロスログペリオディックアンテナで、木星からの電波の強度と偏波をモニタリングしている。観測波長は15〜40 MHz。

図19+20　それぞれのアンテナからケーブルが引き込まれた建屋の中には、受信機とPCが置かれて電波のスペクトルが記録されている。観測データは、インターネット上でも公開されている。
http://ariel.gp.tohoku.ac.jp/~jupiter/

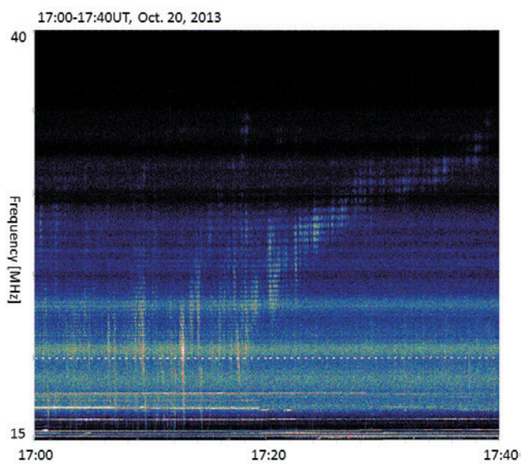
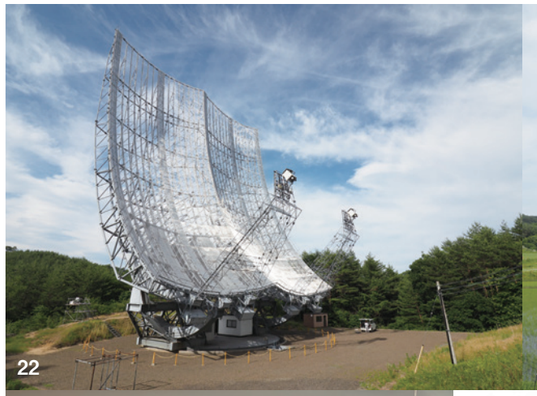
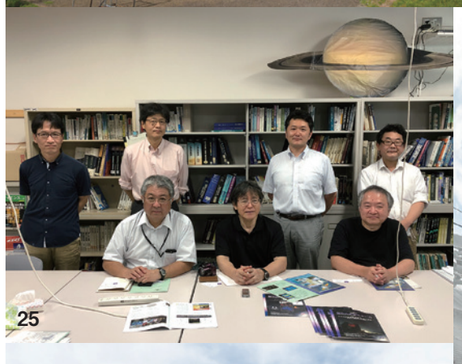


図21　観測データの一例。木星のデカメートル波のうち、Io-Bと呼ばれるラジオストーム（電波嵐）を捉えたもの。アーチ状に周波数が変化していくのが大きな特徴だという。

惑星電波・分光観測施設には、大きさが31ｍ×16.5ｍを2面で並べ、開口面積が1000平方メートルを超える大型の非対称オフセットパラボラ式の惑星シンクロトロン電波望遠鏡があります。こちらは現在、木星放射線帯内の高エネルギー電子から放射される電波（シンクロトロン放射）を観測しています。さらに、太陽のコロナ大気中のプラズマが加速する際に放射する電波バーストも観測しています。観測から得られた電波強度やスペクトルの変化を解析し、木星と太陽周辺のプラズマ粒子の加速過程、輸送過程の解明が進められています。

また、東北大学では、アメリカのRadio JOVEを手本として、木星電波観測を市民科学へのアウトリーチとするべく、大学院生を中心として活動を開始しています。さらに、他大学と協調しての活動も進められていて、今後は多くの人に木星のデカメートル波の観測の体験を通し、地球を含むそれぞれの惑星の「惑星圏」への興味と理解を深めてもらえるように働きかけていくとのことです。





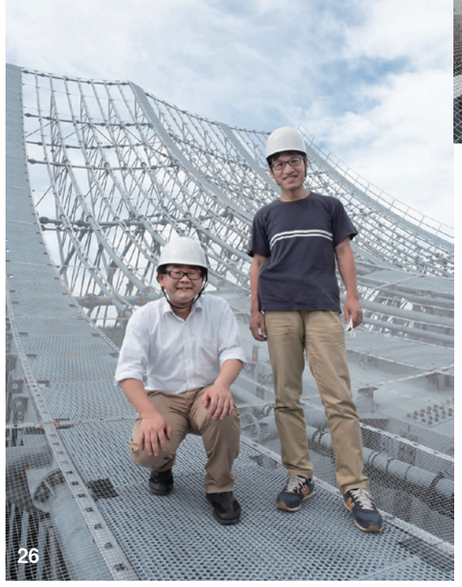


図22　惑星電波・分光観測施設の主力観測装置は、変わった形の非対称オフセットパラボラアンテナを持つ惑星シンクロトロン電波望遠鏡だ（アンテナサイズ 31ｍ×16.5ｍ2面）。木星放射線帯内の高エネルギー電子から放射される電波（シンクロトロン放射）を観測し、電波強度やスペクトルの変化から、放射線帯粒子の加速過程や輸送過程の解明に使用されている。

図23+24　県道315号線から、林道を進んだ先に惑星圏飯舘観測所がある。残念ながら、一般公開はされておらず、道沿いから施設のアンテナ群を眺めることはできない。林道に沿って送電用の電柱が並んでいるが、これらは観測所への電力供給のために設置されたもの（林道の先には民家や施設はない）で、なんと「木星線」と記されたプレートが付けられている。

図25　仙台市にある東北大学青葉山キャンパスにて、木星電波についてのレクチャーをいただいた。写真は、後列左から土屋史紀准教授（惑星プラズマ・大気研究センター）、笠羽康正教授（惑星プラズマ・大気研究センター）、加藤雄人教授（地球物理学専攻）、熊本篤志准教授（地球物理学専攻）、前列はアルマーの冒険制作チームの3名。

図26　土屋史紀准教授（写真右）と熊本篤志准教授（写真左）には、惑星圏飯舘観測所をご案内いただいた。（写真提供：東北大学）

図27　惑星圏飯舘観測所の訪問には石黒正人国立天文台名誉教授（左から二人目）も参加。

次回予告

木星のデカメートル波の受信を目指して、いよいよアンテナを製作し、SDRとPCを用いての観測を試みます。
はたして、木星からの電波を検知することはできるのでしょうか、次回をお楽しみに！