

AMATERASが切り拓く 新しい太陽の電波天文学

岩井 一 正



〈国立天文台野辺山太陽電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山462-4〉

e-mail: kazumasa.iwai@nao.ac.jp

太陽電波望遠鏡 AMATERAS. 東北大学で開発され、太陽研究業界に燦然と現れたこの新望遠鏡は、太陽コロナで起きるさまざまな電波現象を解き明かしつつあります。しかし、設計、開発、観測、震災そして復旧と続くここまでの道のりは決して平坦ではありませんでした。今回は、この望遠鏡がいかにして生まれ、何を成し遂げ、これからどこを目指すのか、開発秘話を交えてご紹介していきます。

1. はじめに

明日も朝になれば今日と同じ太陽が昇ってくる。皆さんの中にはこのように思っている人もいらっしゃるのではないのでしょうか。だとすれば、その認識を改めていただく必要があるでしょう。私たちが普段目にする太陽*1は文字どおり「可視光」による太陽です。可視光で見る太陽は、人間の目が感じとれるほどの変化はありません。一方、可視光以外の波長では、太陽はもっとダイナミックな変動をする天体であり、その最たる例が「電波で見た太陽」です。太陽面でひとたび爆発が起きると、太陽からの電波放射は、一瞬で100倍にも1,000倍にもなります。

1.1 知られざる太陽電波の世界

太陽の大気は100万度にも達する高温の大気「コロナ」に覆われています。コロナはあまりにも高温で、ほとんどの粒子がイオンと電子に電離した「プラズマ」と呼ばれる状態で存在しています。このプラズマが、太陽の強力な磁場と交わり太陽フレアに代表される大爆発を繰り返し起こし

ているのです。コロナでの爆発現象によって周辺の電子は急激に加速され、その影響で突発性の電波が放射されます。これが太陽電波バーストです。今回お話するのは電波の中でも「メートル波」と呼ばれる1メートル程度の波長をもった電波で、周波数に換算すると100 MHz（メガヘルツ、1メガヘルツは1,000,000ヘルツに相当）程度になります。メートル波帯域では太陽面での爆発現象に伴い、さまざまな特徴をもった電波バーストが放射されることが知られています¹⁾。

太陽面での爆発によって、爆発領域の電子の一部は光速の10-30%にまで加速され、この高エネルギー電子が、荷電粒子で満たされた太陽コロナの中を猛スピードで駆け抜けます。このときに伝播経路の周囲にある荷電粒子を振動させます(図1)。この振動が電波に変換されたものがプラズマ放射と呼ばれるもので、メートル波の電波バーストのほとんどはプラズマ放射で発生していると考えられています*2。プラズマの振動は周囲の密度が濃いほど細かい振動（短波長＝高周波数）、密度が薄いほど大きな振動（長波長＝低周

*1 危険なので直接太陽を目にしてはいけません。

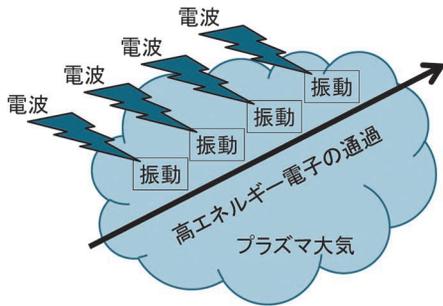


図1 高エネルギー電子の通過によるプラズマ振動励起と電波発生の様式図。

波数) となるため、観測周波数が電波源の密度に変換できます。太陽の大気も地球大気と同じく太陽面に近いほど密度は濃く、離れるにつれて薄くなります。つまり、大気密度は太陽面からの距離の関数に置き換えられます²⁾。よってスペクトル観測(分光観測)を行うと、バーストの周波数から、電波発生領域のおおよその高度を知ることができます。また、メートル波帯域では大気や水蒸気の影響が小さいため、曇りや雨の日でも観測できます。まさに地上観測に適した波長と言えます。

太陽の爆発を地上から観測できる電波バースト観測は研究者にとって十分に魅力的であります。加えて、太陽面での爆発の中には地球の周辺環境に影響を与えるものもあります。電波は爆発による噴出物よりも早く到来するため、その影響の予報にも有効です。そのため世界各国で古くから太陽電波バーストのモニタリング観測が行われてきました^{*3)}。

1.2 太陽電波最大の謎

太陽電波バーストはそのスペクトル形状からいくつかの種類に分類されI型、II型などと呼ばれます。なかでもI型は最も頻繁に発生する電波

バーストです³⁾。太陽表面に黒点と呼ばれる活動的な領域があれば、何日間にもわたって観測されることもあります。I型は頻繁に観測される一方、なぜこのバーストが発生するのか、発生のエネルギー源すらわかっていない最後の種類の電波バーストです。それ以外の種類の電波バーストは、何らかの太陽面現象に伴って発生します。例えば太陽の爆発現象フレアに伴いIII型が、またコロナ質量放出と呼ばれる太陽大気の噴出現象に伴いII型が発生します。しかしI型の場合、黒点の周囲でこれといった変化が全く見られないにもかかわらず観測されることがあります。電波バーストの発生には高エネルギー電子が必要です。高エネルギー電子は太陽大気中に何時間もとどまてはいられないため、何時間も電波バーストを発生させ続けるには、何時間もわたって高エネルギー電子を作り続ける必要があります。それは何なのか? 観測できないだけで、実は小さな爆発が発生しているのか? ほかの要因があるのか? 発生頻度が高いだけに極めて重要な問題です。

従来、その謎を解くカギの一つはスペクトルの周波数や振幅の時間変化にあると言われていました。I型バーストには継続時間0.1秒程度と言われる強度の微細な変化が無数に埋め込まれています。この微細な変化は、I型を起こすエネルギー解放現象の基本過程と考えられています。そのため、この微細なスペクトルの変化を個々の構成要素にまで分解し解析すれば、その発生要因がわかるかもしれません。しかし、あまりにも継続時間が短く、時間的にも周波数的にも複雑にスペクトルが変化することから、その分解は難しく、今まで詳しい調査ができていませんでした。

さて、これからお話する太陽電波望遠鏡

*2 より周波数の高いマイクロ波と呼ばれる電波帯域では高エネルギー粒子が放射するシンクロトロン放射が卓越すると考えられています。太陽フレアで発生したシンクロトロン放射は国立天文台野辺山太陽電波観測所の電波ヘリオグラフで観測され、太陽フレアのさまざまな謎を明らかにしています。

*3 日本では情報通信研究機構の平磯太陽観測施設において、20年以上にわたりメートル波帯域の太陽電波バーストの観測と、それらを利用した太陽面爆発の監視業務が行われています。

AMATERASの歴史は2006年から始まります。当時学部学生だった筆者は所属研究室で太陽電波を観測する試験に参加していました。この試験観測で得られたのはI型バーストでした。当時は、ありあわせの受信機を組み合わせで観測しただけで、まだ詳しい分析ができる質のデータではありませんでしたが、複雑に強度変化するこの自然電波現象に強く興味をひかれました。そこで、この最も複雑なスペクトル構造を分解し、太陽電波に残された最大の謎を解き明かすことを研究の目的としました。また最も難しいI型バーストを観測できるということは、同じ帯域で観測されるII型以降の多様な電波バーストの観測にも十分適していることを意味します。

2. 電波望遠鏡の開発

太陽電波バーストは、一般的にはほかの自然電波現象と比較して強度が大きく、観測自体は容易です。アマチュア無線の知識があれば商用品を組み合わせただけでも受信可能ですし、高校や学部学生の実験にも太陽電波観測が取り入れられることがあります。しかし、今回必要なのは太陽電波バーストの中に埋め込まれた極めてかすかな高エネルギー電子の痕跡です。観測はそう簡単にはいきませんでした。

2.1 長い試行錯誤の期間

長時間・高周波数分解な分光観測を、安定して長時間行うには、従来の周波数掃引式の解析機や音響光学式の分光器では限界がありました。折しもアナログデジタル変換とフーリエ変換を組み合わせたデジタル分光器が、大学の研究室でも手の届く金額で利用でき始めた頃でした⁴⁾。まだメートル波帯域の太陽電波観測の実績はあまり報告されていませんでしたが、思い切ってこの分光器を導入することにしました。

しかし、なぜ海外のライバルたちがこの帯域の太陽電波観測にデジタル分光方式を使っていなかったのか思い知らされます。厄介なのは放送波

の存在でした。AMATERASが観測する100 MHz帯域はテレビ放送のような商用通信に割り当てられた周波数が多数あり、このような人工電波は電波天文観測にとってはノイズとなります。太陽電波は天体電波放射の中では最強クラスですが、人工電波はそれに対してさらに桁違いの強さです。よって受信機や分光器がすぐに飽和（サチレーション）してしまいます。分光観測が重要な太陽電波観測の場合、フィルタ回路で一つひとつ放送波を切り落とすこともできません。よって受信機や分光器は放送波によるサチレーションを回避するため、信号を十分に増幅したり分解したりできなくなります。特に分解できる強度の幅が比較的狭いデジタル分光方式にとっては致命的です。

パラボラアンテナは、まっすぐに入ってきた電波を1カ所（＝焦点）に集める性質をもっています。大きなパラボラを使うと、見たい天体からより多くの電波を集められます。一方、ノイズとなる放送波は観測している天体とは別の方向から混入してくるため、その電波は焦点には集まりません。よって大きなパラボラを使っても、放送波の受信強度はあまり変化しません。つまり、大きなパラボラを使うと太陽電波と人工電波の強度比が小さくなるために、分解できる強度の幅が比較的狭くても観測ができます。強い太陽電波の観測にこそ大口径の望遠鏡を使う。ちょっとした逆転の発想です。このことから、大口径なパラボラアンテナと高分解なデジタル分光器を組み合わせることで、放送波によるサチレーションを回避しつつ、高分解なスペクトル観測を実現するという発想にたどり着きました。

コンセプトが決まれば、設計製作に入ります。観測に使う望遠鏡は、筆者が所属していた東北大学惑星プラズマ・大気研究センターが福島県飯舘村内に所有する電波望遠鏡（図2）です。木星電波観測用に作られたこの望遠鏡のパラボラの口径は33メートルと、メートル波帯域の他の太陽電波望遠鏡と比べると1桁大きいサイズで、放送波

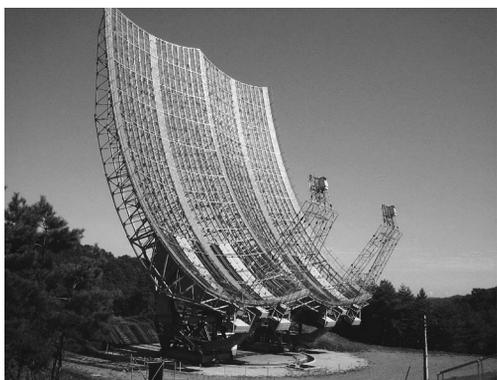


図2 飯館観測所にある電波望遠鏡。角状に伸びた二つの突起部は二つのパラボラ面の焦点部分である。



図3 AMATERASのバックエンド受信機の外観。

の影響を低減し太陽電波を観測するのに十分です。ところで図2の写真は多くの人にとって見られない形状だと思います。このアンテナは31×16.5メートルの長方形に切り出された2枚のパラボラ面を合体させたものです。木星観測ではこの2枚のパラボラで得られた信号を特定の周波数において合成してデータを得ます。太陽電波では片方の長方形を使って分光観測を行います。

開発では、アンテナの焦点に付ける給電部（電波を受信し電気信号に変えるセンサー）や受信機的设计から製作まですべて手作りとなりました。デジタル分光器が1台しか買えなかったわれわれは、円偏波成分（左回りと右回りの2系統）を同時に分光するために、片方の周波数をあえて高い周波数に変換した後、もう片方の信号と合成することで、2倍の帯域をもつ一つの信号として分光することにしました。この構成は受信機をやや複雑にしましたが、左右の円偏波信号の同期が常に取れている点が解析において役に立ちました。

回路作りは回路シミュレーション機能をもったソフトをいじくるところから始まります。そして目的にかなう結果が出たら製図ソフトで基板の図面を書いて、機械で基板を切り出します。最後に基板上に抵抗やコンデンサーといった素子を半田

付けします。しかし、どんなに作り直しても、シミュレーション結果と実際に出来上がったフィルタ回路の検査結果が合いません。試行錯誤して、やっと素子と素子の間にある有限の距離が回路シミュレータに入っていないというミスに気づきました。シミュレータに素子間の距離に対応する位相遅延を入れると出来上がった回路にずっと近い特性が得られました。このときに初めて、高周波回路の特徴を実感したものです。最終的には、この特性を利用して、フィルタのカットオフ周波数を自在に変えられることに気づき、上記のバックエンド受信機（完成時の外観：図3）を作るときに活かされました。

ハードができれば次はソフトです。高速に分光観測するためのデジタル分光器の制御システムや、観測からデータベース化まで全自動で行うサーバの構築などなど、工夫した点、苦労した点はたくさんあります。特にAMATERASの場合、無人・遠隔操作・全自動運用を前提としてシステムを作り、現在すべての操作をスマートフォンでできてしまう点はちょっとした自慢です。ただ全部書くといけないことになるので、このあたりで割愛します。

上記のように、筆者の研究室では、一つの仕事を大人数で役割分担するのではなく、一人がある

観測系を全部作るという独特の方針をもっていました。さらに自作教育主義も徹底していて、受信機に使う電源のように電子部品店で買えそうな物でも、トランスから自分で作るよう教育されました。これらは一見時間の無駄のようにみえ、論文数がものを言う現在の研究業界においては実際無駄な面もあります。しかしこうして得たノウハウは、卒業後、野辺山太陽電波観測所で新しい研究生生活を始めたときに、望遠鏡や観測手法が変わっているにもかかわらず、驚くほど役立ちました。

2.2 ついに完成

装置がある程度出来上がると試験観測を始めます。試験観測を始めたのは2009年の下半期でした。予定なら、すぐに何らかの電波現象が受信できるはずでしたが、折しも異常に長い太陽活動極小期の真っただ中で、電波バーストの観測になかなか成功しませんでした。観測開始から数カ月は静穏太陽から放射されるほとんど変化しないスペクトルばかりが観測され、もどかしい日々が続きました。電波バーストの観測に初めて成功したのは2009年12月13日、それは私がサンフランシスコで開かれた国際会議に参加中のことでした。AMATERASは全自動望遠鏡なので開発者が初めての観測に立ち会わないという結末もありうるのです！ 日中は会議に参加し、夜（つまり日本の日中）に観測データを見ていると朝になってしまいます。結果、不眠不休でデータ処理にいそしんだことを今でも覚えています。実際には装置の完成までそれから半年、データの較正や解析ツールの整備、データベース化までさらに半年かかりましたが、試験観測で電波バーストの観測データが得られ勝算が取れたことは気力の維持につながりました。

足かけ5年の歳月を要し完成した本装置の性能は、時間分解能10ミリ秒、周波数分解能0.061 MHz、最小検出感度は静穏時太陽の100分の1と、2013年現在、世界の太陽電波スペクトル計で最高の性能をもっています。これは従来最も高

性能だった同帯域の太陽電波望遠鏡に対して、時間-周波数空間で約10倍の分解能があり、かつ10倍の感度があることに相当します。完成した太陽電波望遠鏡はそのコンセプトを英語にして、the Assembly of Metric-band Aperture TElescope and Real-time Analysis System（メートル波帯域の開口アンテナとリアルタイム解析システムの複合体）、その頭文字を取ってAMATERASと名づけられました⁵⁾。

3. 今明かされるI型バーストの正体

ここからはAMATERASで得られた研究成果の一部を紹介します⁶⁾。図4はAMATERASで観測されたI型バーストのダイナミックスペクトルと呼ばれる図です。この図の横軸は時間軸を、縦軸は周波数軸を、色は強度を意味します。よって電波強度の時間-周波数変動を表現しています。図中の100から300 MHz周辺で電波強度が強くなっているのがI型バーストです。図5aは図4の黒枠で囲った部分を拡大したものです。この図を見てわかるように、特徴なく放射が継続しているように見えるI型バーストは、実は無数のバーストで埋め尽くされていました。I型のスペクトルがこれほど明瞭に分解できたのは、これが初めてです。しかし白黒の図ではこの感動を十分にお伝えできず残念です。ぜひ元論文のカラーの図⁶⁾をご覧ください！

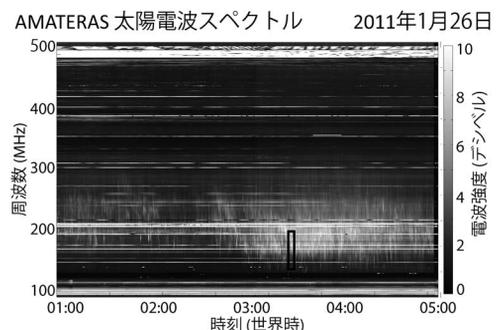


図4 2011年1月26日に観測されたI型バーストのダイナミックスペクトル。

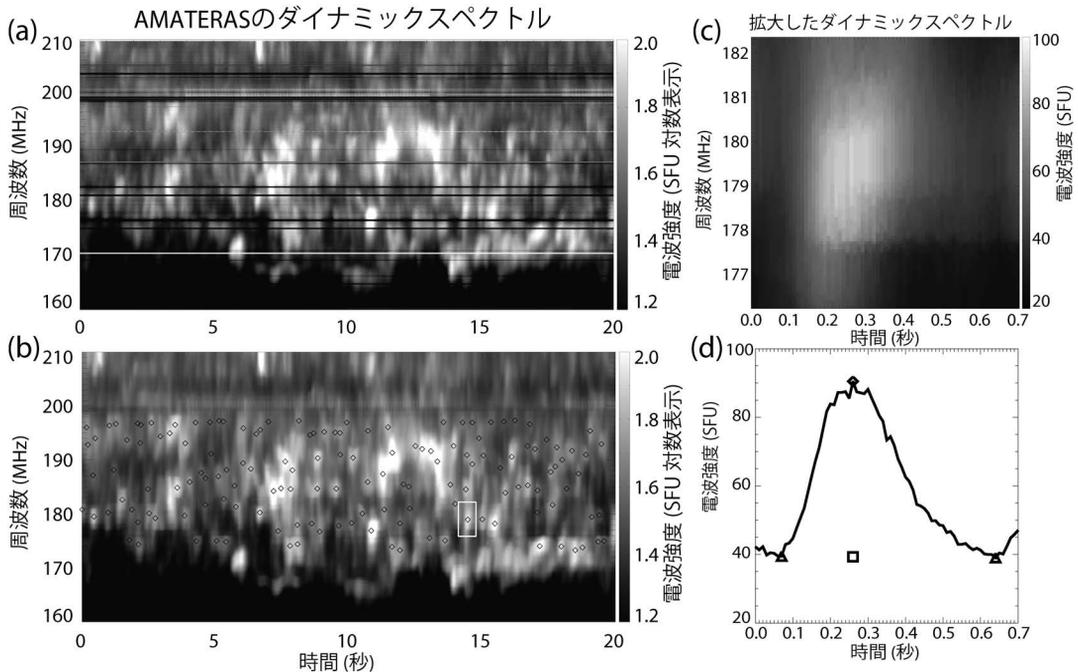


図5 (a) 図4中で枠で囲まれた領域を拡大したダイナミックスペクトルと (b) そこから放送波だけを取り除いたダイナミックスペクトル. 黒いひし形は検出されたバーストのピークを示す. (c) 図5b中の白枠内を拡大したダイナミックスペクトルと (d) その中心周波数の電波強度の時間変動*4.

図5a中には横軸と並行に無数の線が入っています。これが常に決まった周波数で放射される人工の放送波です。上述のとおり AMATERAS の帯域は無数の人工電波で埋め尽くされ、このままでは詳しい解析ができません。この放送波をすべて取り除いたのが図5bです。縦軸（周波数軸）に沿って中位値フィルター（ある周波数の観測点に対して、同じ時間に観測された前後の周波数点で電波強度の分布を作り、分布の中間にある値「中位値」をその点の値とするアルゴリズム）を施しました。AMATERASはI型バーストに対して十分に細かい周波数分解能があるので、中位値フィルターを掛けてもバーストの形状はほとんど崩れません。ここでも高分解スペクトルの威力が発揮されています。図5b中の白枠で囲んだ領域を拡

大したスペクトルが図5cです。また図5cの中心の周波数を切り出し、その強度の時間変動を現したのが図5dです。少なくとも AMATERAS の分解能である 10 ms, 61 kHz のスケールでは、この中により小さい構造はないようです。そこで、この構造をバーストの基本構造とし、解析を進めることにします。

次に、バーストの基本構造をダイナミックスペクトルから抽出するために、極大値検出と極小値検出を組み合わせた特殊な計算アルゴリズムを新たに開発しました。図5bの黒いひし形が、今回のアルゴリズムで検出されたI型バーストの基本構造の中心です。170から200 MHzの間にある個々のバースト構造が過不足なく認識されているのがわかります。

*4 太陽では電波の絶対強度の単位にSFU（太陽電波単位）が用いられます。1 SFUを一般的な電波天文学で使われる単位ジャンスキー（ $10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ ）で表現すると1 SFU=10,000 ジャンスキーです。

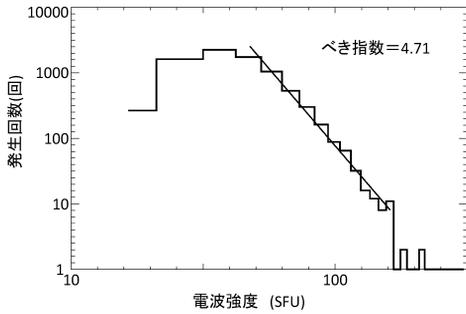


図6 I型バーストの発生強度の頻度分布.

このバーストがどのようにして作られているのか？ その謎を解くために今回は電波バースト強度の発生頻度分布を調べました。例えば地球で発生する地震の場合、その規模別の発生頻度はべき乗^{*5}に分布します。よって大きな地震も小さな地震も同じメカニズムで発生していると考えられています。太陽で起きる爆発現象であるフレアもべき乗則に分布することが知られています⁷⁾。もしI型バーストが小さなフレアが無数に折り重なってできているのなら、個々の基本構造の頻度分布もフレアやフレアに伴って発生する電波バーストであるIII型と同様なべき乗分布を示すはず。そこで、抽出されたバーストの強度別の発生頻度分布を作りました。その結果が図6です。図6の横軸が電波バーストの強度、縦軸がある強度の発生回数に対応します。この図は両対数表示であるため、傾きが直線で近似できることは現象がべき乗分布していることを表します。よってI型バーストは、フレアに代表される太陽面爆発現象と同様にべき乗分布していることがわかりました。しかし、そのべき指数は4~5であり、一般的な太陽面の爆発現象（2以下）と比べて非常に傾きが急峻であることが新たに発見されました。このべき指数は通常の太陽面爆発を説明するため

に作られた、いかなるモデルも予想していなかったものです。べきの傾きが異常に大きいということは、小さい現象が大きい現象に対してすさまじく頻繁に起きていることを意味します。

太陽面でフレアと比べ極めて小規模ながら頻繁に起きる爆発現象の存在を予言したナノフレア仮説⁸⁾というものがあります。I型バーストはナノフレアの一種なのでしょうか？ 太陽電波バーストの発生には、さまざまなプラズマ素過程が複雑に関連し合っているため、今回の結果から結論づけるのは時期尚早です。ただ少なくとも、今までの爆発モデルでは説明できない電波バーストの発見は、未知の太陽現象の発見につながる可能性を秘めていることは確かです。現在、より詳細な解析を進めています。今後I型バーストやそれを引き起こす太陽現象の理解が進むことが予想されます。

4. さらなる成果へ

AMATERASによる成果は、バーストの微細構造解析だけにとどまりません。電波観測の結果を太陽観測用の人工衛星STEREOやHinodeで得られた画像データと組み合わせることで、I型を発生させる太陽コロナの磁場構造や、I型発生に由来する太陽面の変化について新しい知見が得られ始めています^{9), 10)}。さらに、今回はI型バーストに注目してきましたが、AMATERASではII型、III型、IV型と呼ばれる別の太陽電波バーストも多数観測されています。I型バーストの描像が明らかとなりつつある今、より多様な現象が次の研究ターゲットになっていくでしょう。^{*6}

AMATERASは予算規模的には小規模なプロジェクトになります。一研究室による手作りの望遠鏡でも、独自の視点で独自の工夫を凝らせば、

^{*5} べき乗分布とは発生頻度 N が発生強度 F のべき乗に分布する関数のことで $N(F) = F^{-\alpha}$ と表現されます。式中の α がべき指数です。

^{*6} AMATERAS の観測データは全て Web で公開しています。私たちと一緒に太陽の謎を解き明かしませんか。
<http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/data/iprt/index.html>

いまだに世界最先端の研究が可能であることを実証したことは筆者たちの誇りです。しかし小規模プロジェクトの場合、賞味期限切れも早いです。AMATERASは今のところ世界最先端の望遠鏡ですが、改良を加えなければすぐに海外勢に追い越されることでしょう。AMATERASやその後継計画には、今後も独自の開発、独自のサイエンスを目指し、小粒でもピリリと辛い望遠鏡であり続けてほしいと思います。

5. 震災そして復旧

観測所の所在地を紹介したときにお気づきかもしれませんが、AMATERASが設置されている福島県飯館村は、福島第一原発事故により計画的避難区域に指定されました。観測所付近は今なお居住制限区域になっていますが、観測所への昼間の立ち入りは許されており、震災後に発生した駆動系不具合の修理も行うことができ、2013年5月からは望遠鏡が再稼働されています。全自動で遠隔操作が可能であることを生かし、現在、AMATERASによる日々の太陽電波の観測が実施されています。観測の再開にあたりご尽力いただきました関係者の皆様には心より御礼申し上げます。そして、観測だけでなく、村の生活そのものが一日も早く復興されますことを心よりお祈り申し上げます。

謝 辞

この記事は筆者の博士論文および投稿論文^{5), 6), 9), 10)}に基づいて構成されています。AMATERASは東北大学惑星プラズマ・大気研究センターが中心となり筆者および筆者の指導教員である三澤浩昭准教授、土屋史紀助教、森岡 昭名誉教授らで作りました。私一人では到底なしえなかったこの仕事の遂行に当たり、長きにわたってご指導くださりましたことに心より御礼申し上げます。また研究の推進に際しては名古屋大学太陽地球環境研究所の増田 智准教授、三好

由純准教授にもご指導いただきました。加えて筆者およびAMATERASプロジェクトは日本学術振興会、東北大学国際高等教育研究院、名古屋大学太陽地球環境研究所、超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究 (IUGONET) から支援を受けました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) McLean D. J., Labrum N. R., 1985, *Solar Radiophysics* (Cambridge University Press, Cambridge)
- 2) Allen C. W., 1947, *MNRAS* 107, 426
- 3) Elgaroy O., 1977, *Solar Noise Storms* (Pergamon, New York)
- 4) Benz A. O., et al., 2005, *A&A* 442, 767
- 5) Iwai K., et al., 2012, *Solar Physics* 227, 447
- 6) Iwai K., et al., 2013, *ApJ* 768, L2
- 7) Shimizu T., 1995, *PASJ* 47, 251
- 8) Parker E. N., 1988, *ApJ* 330, 474
- 9) Iwai K., et al., 2012, *ApJ* 744, 167
- 10) Iwai K., et al., 2012, *ASP Conf. Series* 454, 249

New Solar Radio Astronomy by AMATERAS

Kazumasa Iwai

*Nobeyama Solar Radio Observatory, National
Astronomical Observatory of Japan, Nobeyama,
Nagano 384-1305, Japan*

Abstract: The solar radio telescope, AMATERAS. This is a new telescope that has been developed by Tohoku University. This telescope is now used for various scientific studies of the solar corona. However, there have been several difficulties in the design, development, and observation phases, including the earthquake and the telescopes' recovery. This paper describes how the telescope was developed, what achievements had been attained via its use, and prospective objectives for this telescope, together with some episodes in the development phase.