

コロナホールのほとりから放射される 極微弱太陽タイプ III 電波バースト



森 岡 昭

〈東北大学大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉
e-mail: morioka@pparc.geophys.tohoku.ac.jp

三 好 由 純, 増 田 智

〈名古屋大学太陽地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: miyoshi@stelab.nagoya-u.ac.jp
e-mail: masuda@stelab.nagoya-u.ac.jp

かつて「太陽タイプ III 電波バースト嵐」として扱われていた太陽電波現象に注目して、キロメートル波帯電波の最新の衛星観測データを用いた解析が行われました。タイプ III 電波バースト嵐の個々のエレメントはいわゆる通常の太陽タイプ III 電波バーストとは異なることが明らかにされ、極微弱太陽タイプ III 電波バーストと命名されました。この電波の特性と太陽面現象の対応から、太陽面の活動領域からの電子ビーム放出過程には意外な側面があることが見いだされました。

1. はじめに

1989年に「あけぼの」という名の日本の極軌道衛星が打ち上げられました（そして現在も活躍中です）。この衛星は地球のオーロラ発生の謎を解明することを目的として、電波やプラズマ波動、粒子観測をはじめとした観測装置を搭載した衛星です。打ち上げ当初から、これまで見たことのない様相をもつオーロラ電波や直接オーロラを光らせている加速粒子の有様が次々と衛星から送られ、関係者は勇んでデータ解析を始めました。電波の観測を担当していた筆者たちも、次々に送られてくる電波データにワクワクしながら研究を開始しました。

データが蓄積され始めてしばらくして、オーロ

ラ電波に混ざって、強度は非常に弱く、しかし一度観測され始めるとかなりの長時間にわたって継続して現れる電波が時折受信されていることに気がつきました。スペクトルが時間とともに周波数が高いほうから低いほうへ数分間でシフトしていく特長ある様相です。太陽がこの電波の源であることはすぐ確認できたのですが、よく知られている太陽タイプ III 電波バースト^{*1}に比べるとその強度は非常に小さいものでした。オーロラ電波に重なって出現するこの電波はなにやら気になるものの、オーロラ電波の研究にとっては邪魔な「雑音」のような存在でした。「あけぼの」衛星のあとから地球磁気圏を観測する目的で打ち上げられた日米共同の「Geotail」衛星も全く同様の電波スペクトルを観測しました。

^{*1} 太陽フレアにともなって放射される電波バーストは、その発生の特徴から四つのタイプに分類されている。本稿で紹介するタイプ III 電波バーストとは、フレアの発生とほぼ同時に出現し、電波の強度は高い周波数から低い周波数に向かって時間とともに次第に変化する様相を示すものをさす。

「あけぼの」が打ち上げられてしばらくして、太陽観測衛星「ようこう」が打ち上げられました。そこから送られてくる素晴らしいデータに、太陽研究者はわかかえていました。そんな興奮が私たち地球のオーロラ研究者たちにも伝わってくるなか、「ようこう」衛星が見つけた軟 X 線の「マイクロフレア」が太陽コロナ加熱の謎を解く鍵をもっているかもしれない¹⁾、ということで大きな話題になっていることを知りました。そしてこの「マイクロフレア」という言葉を初めて耳にしたそのとき、筆者らが観測している、あのミニチュア版太陽タイプ III 電波バーストのことが思い浮かびました。もしかして、あの電波は「マイクロフレア」に伴って放射されているかもしれない、調べてみよう。これが、筆者たちの、本稿で紹介する研究の始まりでした。

2. 極微弱太陽タイプ III 電波バーストとは？

図 1(a) を見てください。この図は「Geotail」衛

星が観測した 24 時間の電波スペクトルです。丸で囲んだスペクトルが、太陽タイプ III 電波バーストです。この太陽タイプ III 電波バーストと呼ばれる電波現象はすでに 1950 年に報告²⁾されて以来、多くの研究が進められています。そして図 2 に示すように、フレアに伴って放出された電子ビームが太陽コロナから惑星間空間へと走っていく際にその場その場で周囲のプラズマを振動させ、そのプラズマ振動がもたらす電磁波が太陽タイプ III 電波バーストとして観測される、と広く理解されています。太陽を取り巻くプラズマは、太陽から遠ざかるに従って希薄になっていきますから、放出された電子ビームが誘起するプラズマ振動の周波数も太陽から遠ざかるにつれしだいに低くなります。図 1 の太陽タイプ III 電波バーストが時間とともに周波数が低くなっていくのはこの事情によるものです。図 1 の中段も「Geotail」衛星が観測した 24 時間の電波スペクトルです。上段の図と同様、大小取り混ぜて 7 個の太陽タイプ III 電波バーストが周波数 800 kHz から 30

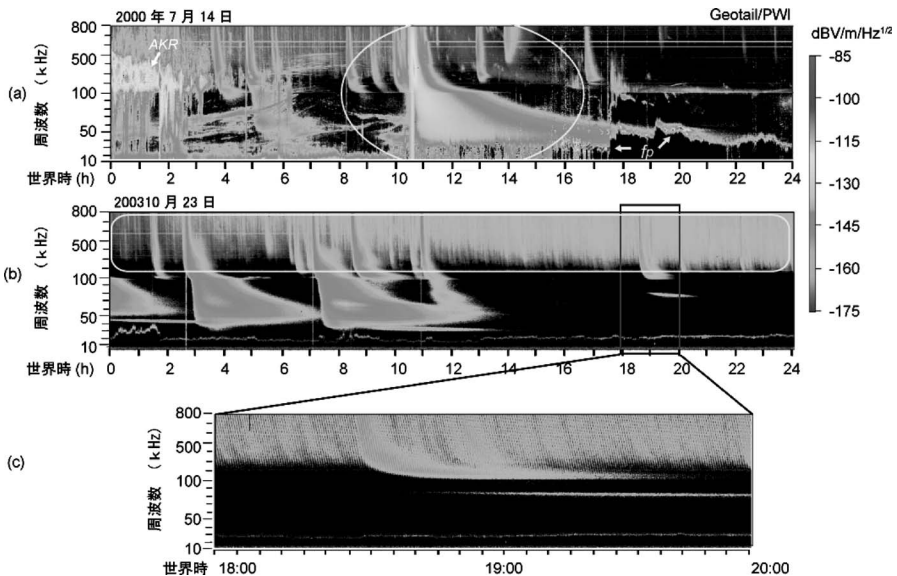


図 1 (a) 2000 年 7 月 14 日、Geotail 衛星によって観測されたヘクトメートル波帯の電波スペクトログラム。丸で囲まれている電波が太陽タイプ III 電波バースト。(b) 2003 年 10 月 23 日に観測された太陽電波。矩形で囲まれた電波が極微弱太陽タイプ III 電波バースト。(c) (b) 図の世界時 18 時から 20 時の間を拡大したスペクトログラム。

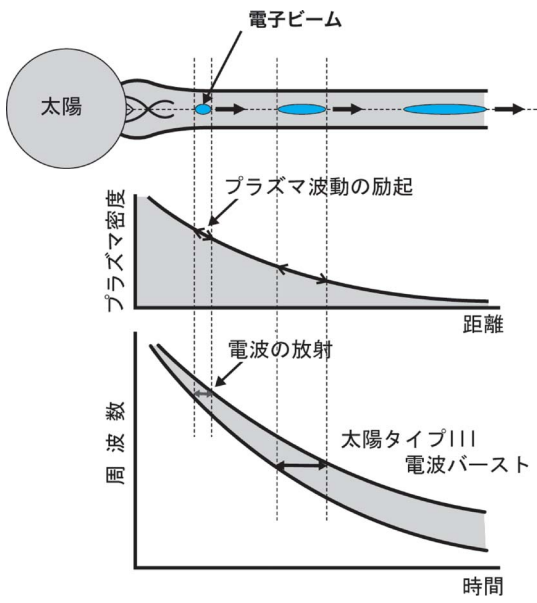


図2 太陽タイプ III 電波バーストの放射模式図。太陽から放出された電子ビームがコロナから惑星間空間に向かって走るとき、その場その場でプラズマ振動を励起し、そのプラズマ振動が電波を放射する。

kHz にかけて出現していることがわかります。そしてそれに加えて、周波数 100 kHz より高い周波数帯に弱い連続した電波放射（横長の枠で囲まれた部分）が観測されています。その一部（2時間）を拡大したものが下段の図です。弱い連続した放射のように見えた電波は、実は細かい筋のような構造をもっていて、その一つ一つは通常の太陽タイプ III 電波バーストのスケールを小さくしたもののように見えます。これが冒頭で述べた「変な」太陽電波のスペクトルです。この電波は通常の太陽タイプ III 電波バーストと同様、電子ビームが惑星間空間を走ることによって放射されているであろうことは容易に想像できます。そこで筆者らは、この微弱なバーストの個々のエレメントを極微弱太陽タイプ III 電波バースト³⁾と呼ぶことにします。ところで、ここで断っておかねばなりません。いま注目している電波バーストそのものは、筆者らの発見によるものではありません。す

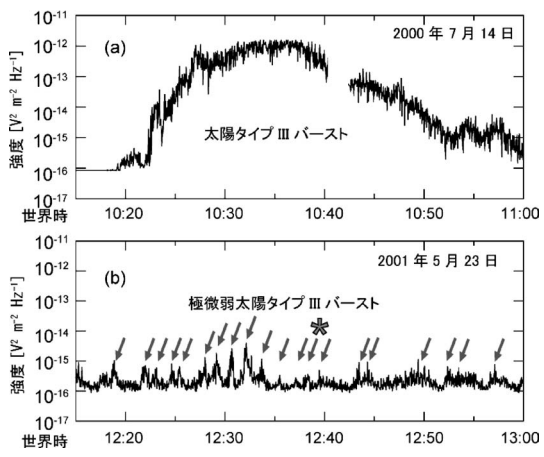


図3 周波数 1.34 MHz における、強い太陽タイプ III 電波バースト（上段）と極微弱太陽タイプ III 電波バースト（下段）の強度-時間変化。上段のバーストの強度は、下段のバーストの約 10 万倍。

でに 1970 年代に、RAE1 という月周回の電波天文衛星が非常に弱い太陽タイプ III 電波バーストが群をなして発生することを報告⁴⁾し、「太陽タイプ III 電波バースト嵐」と名づけました。しかしその後の研究では、「嵐」としての出現特性の研究はありましたが、個々の弱いバーストに注目した研究は、スペクトル観測の精度の問題などからほとんど議論されず、また 1984 年⁵⁾以降この方面の研究はほとんど報告されていません。

さて、「極微弱」というからには、通常の太陽タイプ III 電波バーストに比べてどのくらい弱い電波であるのか、示さねばなりません。その前にここで少し、「あけぼの」衛星と「Geotail」衛星の電波観測の特徴を述べておきます。「Geotail」衛星は時間分解能 8 秒、周波数帯域 10-800 kHz の電波スペクトルを 24 時間欠測なく観測します⁶⁾。一方、「あけぼの」衛星は高い時間分解能（2 秒）で広い周波数範囲（20 kHz-5 MHz）を計測します⁷⁾が、連続観測が苦手です。したがってこの両衛星の特徴を活かしながら解析を進めます。長い時間にわたる観測に基づく統計処理を行うような解析

では「Geotail」データを、細かい電波スペクトルの構造を見たいときは「あけぼの」衛星データを用いる、と言うような使い分けをします。また、両衛星が観測できる電波の波長はキロメートル波長です。したがってここでの研究では、キロメートル波長の太陽電波を扱うことになります。

図3は、太陽電波バーストについて、「あけぼの」衛星で観測された周波数 1.34 MHz における強度-時間変動です。上段の強い太陽タイプ III 電波バーストは、一つのバーストが始まってから終了するまで 40 分以上かかっていることを示しています。一方、下段の図は、1 個のバーストの継続時間は 1 分以下でありそれらが多数出現していることが確認されます。いま、上段の 1 個の大きなバーストと、下段のバースト群のうちの一つ（アスタリスク印を付けたバースト）について、それぞれその強度を継続時間にわたって積分し、その比を取ってみる、すなわち 1.34 MHz の周波数における放射電力を比較すると、下段のバーストは、上段の太陽タイプ III 電波バーストの約 10 万分の 1 ということになります。大きなフレアのあるときにはもっと大きな太陽タイプ III 電波バーストが発生することを考えると、この小さなバーストは、「極微弱太陽タイプ III 電波バースト」（「マイクロ（100 万分の 1）太陽タイプ III 電波バースト」という呼称を与えて良いということになります。

3. 兄弟か他人か？

極微弱太陽タイプ III 電波バーストは、通常の太陽タイプ III 電波バーストと同様、電子ビームがプラズマ中を走ることによって放射されると考えられますが、その電子ビームの作られ方（電子の加速過程）はどうなのでしょう？ 太陽タイプ III 電波バーストの単なるミニチュア版なのだろうか、それとも形は似れども親（電波放射のエネルギー源）の異なる現象なのだろうか？ 最初に浮かぶもっとも基本的な疑問です。これを調べる

一つの方法は、放出エネルギーに対する出現頻度の特徴を調べることです。例えば、よく知られているように、地震のマグニチュードと発生頻度の関係にはべき乗則の関係があり、このことから大きな地震も小さな地震も基本的には同じメカニズムで発生していることが示されます。もし極微弱太陽タイプ III 電波バーストと通常の太陽タイプ III 電波バーストとが同族であれば、「バーストのエネルギー」対「頻度分布」の関係を調べると一つのべき乗カーブに乗ると予想されます。また異なるエネルギー源をもつのであれば、それぞれ独立のべき乗の関係を示すはずですが、このような目論見で調べた結果を図4に示します。1998 年のある時期、太陽が 4 自転する間に検出された約 6 万個のバーストについてその強度と発生頻度を両対数グラフにプロットしたものです。明らかにバースト群は二つのグループに分かれました。緩やかな傾きをもつ直線が通常の太陽タイプ III 電波バーストの分布で、急な傾きをもつ分布が極微弱太陽タイプ III 電波バーストです。これにより、極微弱太陽タイプ III 電波バーストは通常の太陽タイプ III 電波バーストと全く異なる電子加速過程をもっているであろうことが示されま

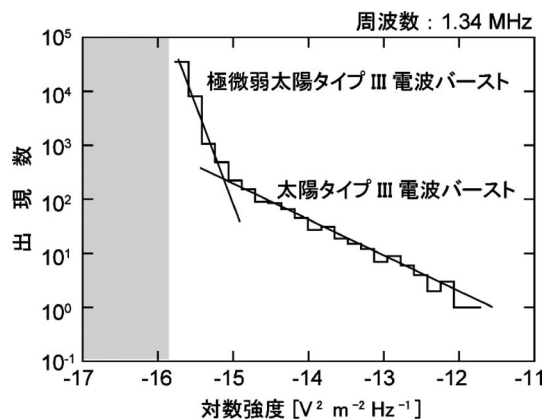


図4 太陽電波バースト（周波数 1.34 MHz）の強度分布。通常の太陽タイプ III 電波バーストと極微弱太陽タイプ III 電波バーストとは異なる強度分布を示す。

した。さらにこの図はもう一つ重要なことを示しています。これまでの観測から、マイクロフレアは通常の太陽タイプ III 電波バーストを伴い、また通常のフレアと同族であることがわかっています。したがってマイクロフレアと極微弱太陽タイプ III 電波バーストは、独立な系の現象と結論されます。冒頭で述べました本研究の動機（極微弱太陽タイプ III 電波バーストは「マイクロフレア」に伴って放射されているかもしれない）そのものは崩れたこととなります。しかし、話はもっと面白い方向に進んだと言えます。これまで言われていなかった、マイクロフレアよりさらに微小なエネルギー放出機構が太陽面で極めて頻繁に発生していることを示したことになるからです。

4. 極微弱太陽タイプ III 電波バースト放射の出現特性

ここまでの記述では、極微弱太陽タイプ III 電波バーストは「頻繁」に出現し「長時間」継続する、などとあいまいな表現がされてきました。そこでここで、少しきちんと整理します。まず極微弱太陽タイプ III 電波バーストの出現率を表現するために、一日毎に極微弱太陽タイプ III 電波バーストのインデックス（以下、バーストインデックスと略します）を定めました。24 時間を単位として、その間に 3分の1（8時間）以下の出現、2分の1（12時間）以下の出現、およびフル（24時間）出現を、それぞれバーストインデックス 1, 2, 3 と定めます。この定義に基づいて、1997 年 10 月から 2005 年 11 月までのほぼ 8 年間の日々のバーストインデックスを折れ線グラフで太陽自転の 27 日ごと（バーテルス日）に折り返しながら示したのが図 5 です。これを見ると、極微弱太陽タイプ III 電波バーストはかなりの出現頻度をもっていることがわかります。規模の大小はあるものの、太陽の 1 自転に一度は出現することが多いといえます。また一度出現すると数日にわたって継続しますが、平均をとると約 5 日が平均

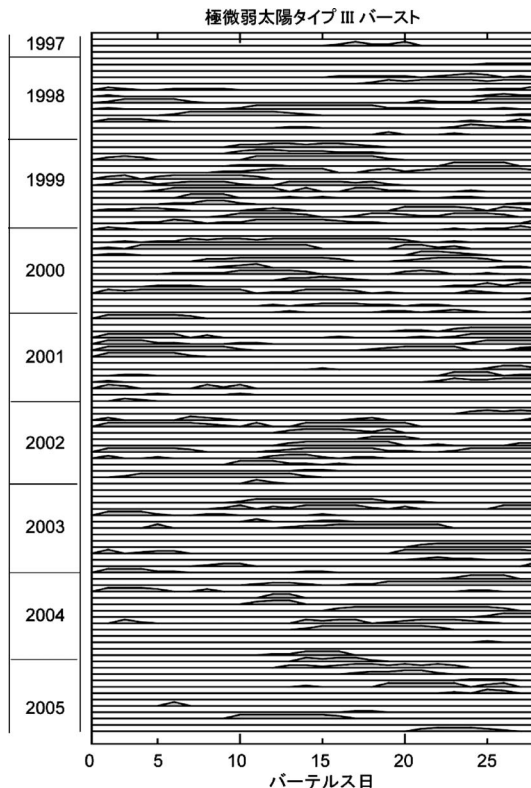


図 5 8 年間にわたる、太陽自転ごと（バーテルス日）のバーストインデックス（本文参照）の変化。

継続時間ということになります。さらにその活動は数回の太陽自転のあいだ繰り返します。たとえば 2002 年の例を見ますと、少なくとも 5 太陽自転のあいだに繰り返し出現しています。このことは、極微弱太陽タイプ III 電波バーストは、長く持続する活動領域から放射されていることを暗に示しています。太陽活動との関係で見ますと、太陽活動が極大であった 2000 年から 2002 年にかけて特段に極微弱太陽タイプ III 電波のインデックスが増加していないことからわかるように、太陽活動と極微弱太陽タイプ III 電波バーストとの関連はあまり強くないようです。

極微弱太陽タイプ III 電波バーストを特徴づける特性の一つに、その放射の下限周波数がほぼ一定であるということが挙げられます。図 1(b) に

出現している通常の太陽タイプ III 電波バーストについてみると、それぞれの下限周波数はまちまちです。バーストの下限周波数は、バーストを作り出す電子ビームが太陽系空間のどこまで走ったかを表していますので、下限周波数がまちまちということは、電子ビームの強さはバーストごとに異なり走る距離も異なるということを示しています。これに対して、図 1 の中段・下段の極微弱太陽タイプ III 電波バーストでは、その下限周波数は 200 kHz を下ることはなく、かつほぼ一定です。このことは、たくさんの観測例から確認されますので、極微弱太陽タイプ III 電波バーストを作り出す電子ビームはいつも太陽から一定距離進んだ辺りで勢いを失う、という性質をもっていることとなります。200 kHz という周波数は、太陽からおおよそ 50 倍の太陽半径の位置でのプラズマ振動に相当しますので、この辺りで極微弱太陽タイプ III 電波バーストを作り出す電子ビームは勢

いを失ってしまうこととなります。

また、通常の太陽タイプ III 電波バーストはフレアに伴って出現するため、太陽 X 線の変動とも良い対応を示すことが知られていますが、極微弱太陽タイプ III 電波バーストは、ほとんど太陽 X 線の活動を伴わないことも確認されています。

5. 活動領域との関係

極微弱太陽タイプ III 電波バーストの出現の様子と太陽面の磁場や X 線・紫外線像の様相から、この電波の源となる活動領域を特定することができます。図 6 を見てください。図の (b) は「Geotail」衛星で観測された極微弱太陽タイプ III 電波バーストのスペクトルグラムを 12 日分示したものです。8 月 6 日から 200 kHz より高い周波数帯にかすかに極微弱太陽タイプ III 電波バーストが見られ始め、8 月 7 日にははっきりとその存在がわかるようになります。そして翌日の 8 月 8 日か

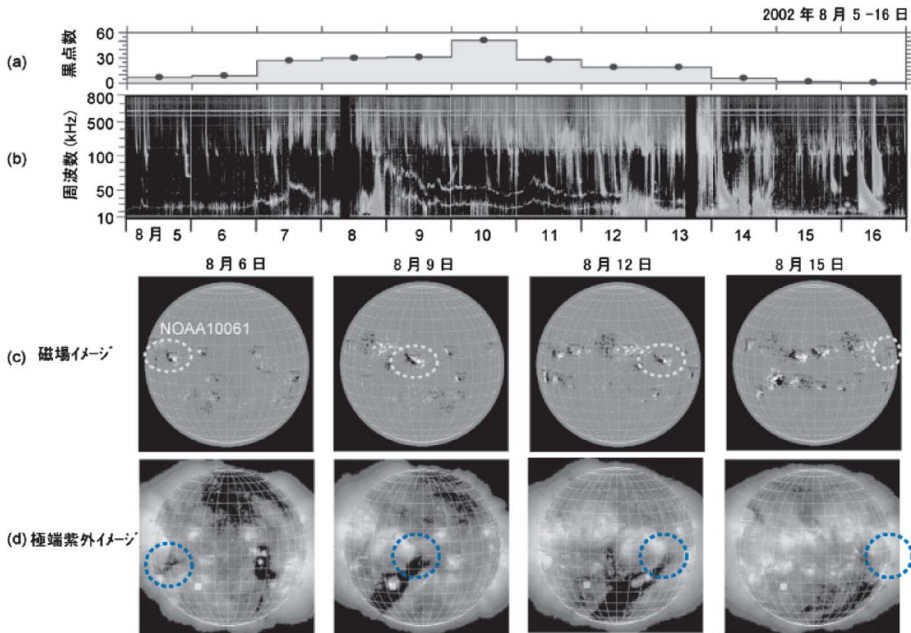


図 6 (a) 活動領域 NOAA10061 における黒点数。 (b) 太陽電波スペクトログラム。 (c) SOHO 衛星によって得られた太陽磁場イメージ図。 (d) SOHO 衛星によって得られた極端紫外線イメージ図。点線の丸で囲まれた領域は活動領域 NOAA10061 を表す。

ら13日まではかなりの密度で極微弱太陽タイプ III 電波バーストが出現しています。その後8月15日にはほとんど観測されなくなります。図の(c)と(d)はそれぞれ、太陽面の磁場とコロナの熱いプラズマから放射される極端紫外線像を示したものです。磁場のイメージから黒点群の様子を、紫外線イメージから活動域の様子を、知ることができます。極微弱太陽タイプ III 電波バーストが出現し始めるのと時を同じくして太陽の東のリムから出現した黒点群/活動領域(活動領域 NOAA10061 と命名されています)を点線の円で囲んであります。またこの活動領域の中でカウントされた黒点数を図の(a)に示してあります。これらの図から、活動領域 NOAA10061 が東のリムに現れるとともに極微弱太陽タイプ III 電波バーストが観測され始め、活動領域の黒点が増えるに従い、極微弱太陽タイプ III 電波バーストは極めて頻繁に放射されることがわかります。また、黒点群の活動が低下するに従い、極微弱太陽タイプ III 電波バーストの頻度も減ります。そして、活動領域 NOAA10061 が西のリムに消えるとともに極微弱太陽タイプ III 電波バーストの活動も終焉します。ここで面白いことが気がつきます。図の(c)の8月15日の磁場イメージを見てください。すでに活動領域 NOAA10061 は西のリムに消え入らばかりですが、ディスクの中央にはよりさらに大きな活動領域が二つあります。しかしこれ

らの活動領域は極微弱太陽タイプ III 電波バーストの放射に関与していません。いったい何が、極微弱太陽タイプ III 電波バーストにかかわる活動領域とかわからない活動領域とに区別しているのでしょうか? そのヒントは図(d)に求められます。この図で示される活動領域 NOAA10061 はコロナホールと呼ばれる極端紫外線が弱くマップでは黒くなっているところに接していることがわかります。コロナホールとは磁力線が惑星間空間に向かって開いているため高速のプラズマが吹き出している領域(低密度高速太陽風域)をさします。したがって活動領域 NOAA10061 は低密度高速太陽風と高密度低速太陽風の境界に位置していることとなります。このことは系統的な調査からも確認されます。2002年から2005年の3年間で極微弱太陽タイプ III 電波バーストが8日以上継続した現象を11例を取り上げ、コロナホールとの関係を調べたところ、11例中8例が図(d)と同じようにコロナホールに接した活動領域に対応していることが示されました。なぜコロナホールに接した活動領域からは極微弱太陽タイプ III 電波バーストを生む電子ビームが放出されているのか、いまのところわかりません。しかし、無数の弱い電子ビームが長時間放出されている領域が特定されたことは、今後この現象を解明していくうえでたいへん重要です。

もう一つ面白いことが指摘されます。図7を見

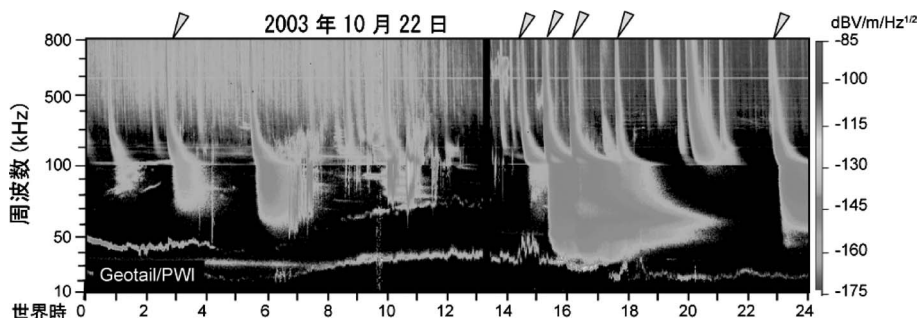


図7 群発する極微弱太陽タイプ III 電波バーストの中に通常の太陽タイプ III 電波バーストが重なって出現している例。同一の活動領域から放射されているにもかかわらず、互いに干渉なく放射されている。

てください。図中にはほぼ 24 時間出現している極微弱太陽タイプ III 電波バーストと、図の上に矢印で示した通常の太陽タイプ III 電波バーストはいずれも活動領域 NOAA10484 がかわっていることが確認されました。つまり、一つの活動領域が、通常型と極微弱型の二つの太陽タイプ III 電波バーストにかかわっている例です。そのこと自体は不思議ではありませんが、注目したいのは、極微弱太陽タイプ III 電波バーストが出現している最中に、これに比べて 10 万倍ものエネルギーをもつ大きな太陽タイプ III 電波バーストが発生しても、極微弱太陽タイプ III 電波バーストは、全くその影響を受けずに何事もなかったかのように活動を続けているということです。このことは、活動領域の中で、本来なら通常の太陽タイプ III 電波バーストの電子ビームの生成に費やされるべきエネルギーが極微弱太陽タイプ III 電波バーストを生む微小・多発の電子ビーム生成に振り向けられているのではないということです。言い換えると、蓄えられたフレアのエネルギーを小刻みに放出する過程が存在するのではなく、エネルギー源を異にする別種の電子加速・放出過程が存在しているということを示唆しています。

6. おわりに

この研究で注目した極微弱太陽タイプ III 電波バーストは、どうやら活動領域における極めて微小なエネルギー解放過程の情報をもたらしているらしいことが見えてきました。個々のエネルギーは微小ながら、放射頻度がマイクロフレアに比して格段に大きい電子ビームの放出が生じていることとなります。百万度を超えるコロナの加熱に一役買っている可能性もあります。今後さらに「ようこう」衛星の後継機である「ひので」衛星のデータと付き合わせた解析により、太陽コロナの研究に貢献していくことが期待されます。

なお、この研究は筆者らの他に、共同研究者

(東北大学惑星プラズマ・大気研究センター・三澤浩昭准教授、土屋史紀助教、京都大学・松本紘理事、同生存圏研究所・橋本弘蔵教授、および福井工業大学・大家 寛教授)によって進められました。

参考文献

- 1) Shimizu T., 1995, PASJ 47, 251
- 2) Wild J. P., 1950, Australian J. Sci. Res. A3, 541
- 3) Morioka A., et al., 2007, ApJ 657, 567
- 4) Fainberg J., Stone R. G., 1970, Sol. Phys. 15, 222
- 5) Bougeret J.-L., Fainberg J., Stone R. G., 1984, A&A 136, 255
- 6) Matsumoto H., et al., 1994, J. Geomagn. Geoelectr. 46, 59
- 7) Oya H., et al., 1990, J. Geomagn. Geoelectr. 42, 411

Micro-type III Radio Bursts as Observed in Kilometer Wavelength

Akira MORIOKA,^{*1} Yoshizumi MIYOSHI,^{*2} and Satoshi MASUDA^{*2}

^{*1} *Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan*

^{*2} *Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan*

Abstract: Micro-type-III radio bursts are characterized by short-lived, continuous, and weak emissions. The occurrence distribution of these bursts with respect to the emitted power flux is different from that of ordinary type III bursts, indicating that they are not just the weaker components of the ordinary bursts. We found that both micro and ordinary type-III bursts emanated from the same active region without interference, indicating the coexistence of independent electron acceleration processes. It has been suggested that the active regions responsible for micro-type-III bursts border the coronal holes.