

スプリット型太陽電波の発生機構

東北職業能力開発大学校 青 山 隆 司

Generation Mechanism of Split-Band Solar Radio Bursts

Takashi Aoyama

要約 本論文では、惑星間空間衝撃波から放射されるスプリット型太陽電波（Ⅱ型太陽電波の一種）のスペクトルデータを解析することにより、その発生機構に対する新しい提案をする。新機構を提案する根拠は、複数のスプリットバンドの強度変動の同期性と、各スプリットバンド間の周波数差がサイクロトロン周波数に等しいと考えられることである。これらの条件を満たすメカニズムとして、サイクロトロン共鳴型の非線型波動粒子相互作用を提案する。また、データ解析の際に用いられるデータの可視化技術、画像処理技術についても触れる。

I はじめに

我々が目で見える太陽（可視光の太陽）は一見穏やかに見える。しかし、高温のプラズマ（電離大気）と黒点に集中する強い磁場が存在するため、電磁環境としては非常に不安定な状態にある。このため、太陽表面では大規模な磁気エネルギー解放現象（例えばフレアー、質量放出現象（CME）等）が頻繁に発生している。図1に日本の太陽観測衛星「yohkoh（陽光）」によって捕らえられた太陽のX線写真を示す。筋状に見えるのは磁力線であり、白く光って見える点でフレアー（太陽面爆発）が起こっている。このような電磁環境のもとで、太陽およびその周辺のコロナから、いろいろな種類の電磁波が放射されることになる。これらの電磁波を観測、解析する電波天文学の手法は太陽面現象を解明する有力な武器となっている。

本報告では、フレアーに伴って生成される惑星間空間衝撃波から放射される、Ⅱ型太陽電波の1種であるスプリット型太陽電波の発生機構について述べる。また、観測により得られたデータからカラーダイナミックスペクトルを作成したり、必要な情報を画像（スペクトル）データから取り出す画像処理技術についても

言及する。

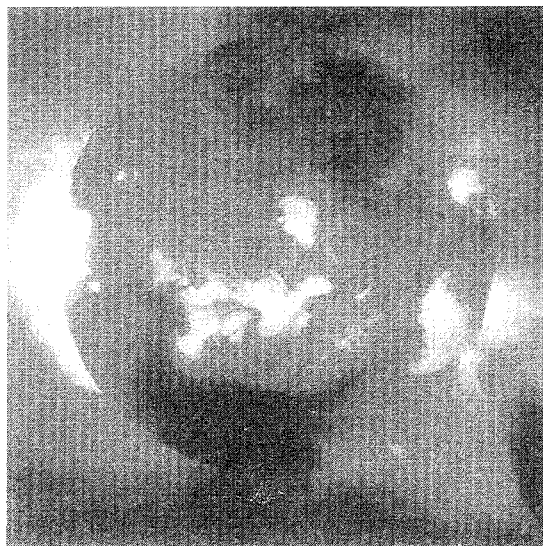


図1 軟X線で見た太陽（yohkoh）

Ⅱ 太陽電波とは

太陽活動を原因とする電波放射は図2（ダイナミックスペクトル形式）に示すように幾つかのタイプに分類されている。ここで、横軸はフレアー発生からの時

間(分)を示しており、縦軸は電波の周波数(MHz)を示している。太陽電波は典型的なものとして、I型からV型までに分類される。その中で、最も頻繁に発生するのがⅢ型太陽電波で、フレアにより加速された電子ビームにより放射される。一方、Ⅱ型太陽電波は惑星間空間衝撃波から放射されていることが過去の研究から解っているが、そのダイナミックスペクトル上の形態は多様であり、発生機構の詳細はまだ謎が多い。今回報告するスプリット型太陽電波もⅡ型太陽電波が示す多様な形態の1種であり、その発生機構について現在も盛んに研究されている現象である^{(1),(2),(3),(4),(9),(10),(11),(12),(13)}。

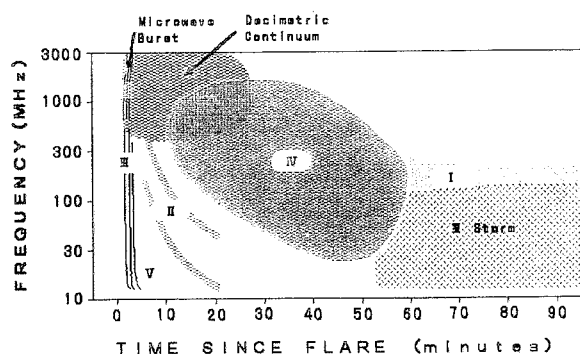


図2 太陽電波の分類

Ⅲ 太陽電波観測システムと画像データの処理

東北能開大において現在稼働中の太陽電波観測システムのブロックダイアグラムを図3に示す。外来電波は20-40MHzの広帯域アンテナ(ログペリオディックアンテナ)で受信される。その後、通信による混信を

防ぐためハイパスフィルターを通り、プリアンプで増幅され、スペクトラムアナライザー(スペアナ)で掃引受信される。スペアナは20-40MHzの間を200msで掃引受信している。スペアナの出力は、掃引周波数を示す鋸歯状波とその周波数に対応する信号強度の2種類で、ともにアナログ信号である。これらの信号からダイナミックスペクトルを作るため、鋸歯状波で同期をとって強度信号を200msの間に200点づつA/D変換(1kHzサンプリング)する。次にこのデジタルデータ(強度信号)をコンピュータに取り込み、信号強度をカラーテーブルを使い色(黄から黒まで16レベル)に変換する。この色付けされた点を、周波数が低いものから順に下から上に1列づつ(200ms毎)CRTおよびカラープリンターに出力する。

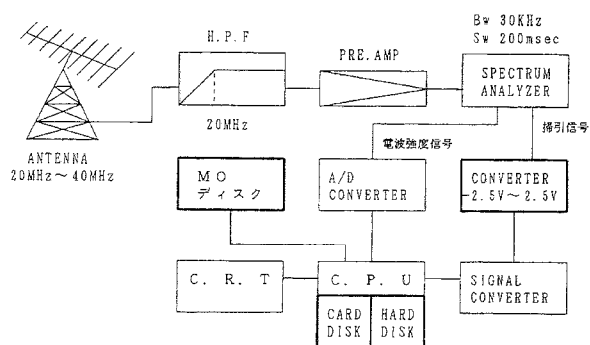


図3 太陽電波観測システム

図4に示したのが上記の方法で作成されたカラーダイナミックスペクトルであり、横軸が時間、縦軸が周波数で、強度は擬似カラー(この場合は黄色から黒色に向かうにつれて強度が高くなる)で表示されている。

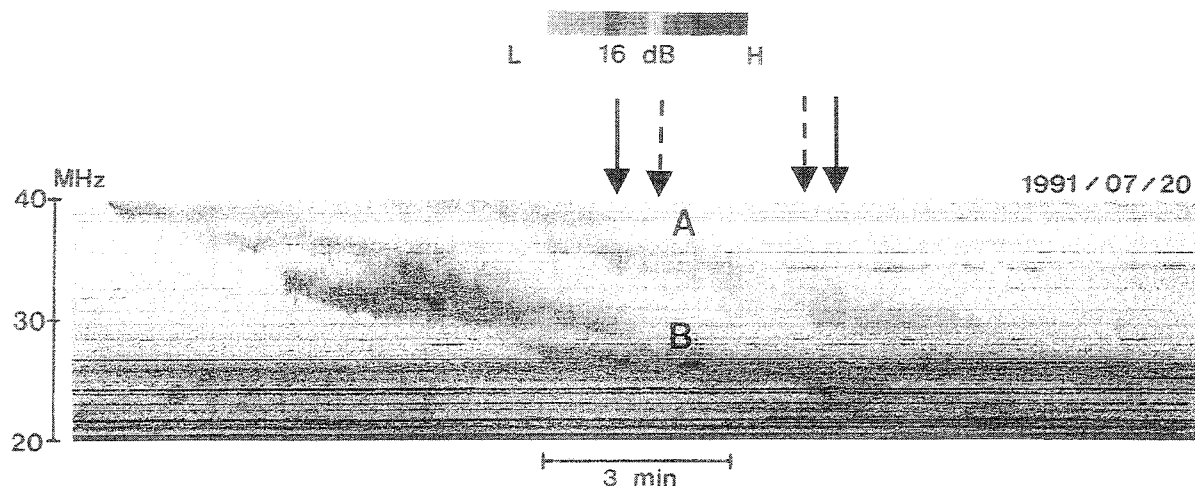


図4 スプリット型太陽電波のダイナミックスペクトル表示と強度変動(東北能開大)



図5 スプリット型太陽電波の観測例 (HiRAS)

つまり、3次元のデータをカラー表示された2次元画像として可視化したものである。

また、最近のインターネット技術の浸透により、各研究所で観測されたデータをホームページ上で画像データとして公開するケースが増えてきた。以下に、公開された太陽電波データ（カラーダイナミックスペクトル形式）から、必要な情報を抽出した例について述べる。

図5にスプリットバンド構造を持つⅡ型太陽電波（Split band Type II bursts）の観測例を示す。これは通信総合研究所のHiRASで観測されたⅡ型太陽電波（ホームページ上で公開されたもの）で、縦軸が周波数（25-2500MHz）、横軸が時間、電波強度を擬似カラーで示している。次節で、各スプリットバンド間の周波数間隔の時間変化を解析するため、各スプリットバンドの任意の時刻における強度分布を取り出す必要が生じる。

与えられた画像データでは、強度をカラーテーブルにより擬似カラーに変換している。我々の目的のためには、擬似カラーによる強度表示より、生（変換前）の強度値を任意の時刻のパワースペクトルとして取り出せた方が都合がよい（直感的に理解しやすい）。そこで、図5で与えられたカラーバー（強度と色との対応テーブル）を使い、各色を強度値に逆変換する。つまり、カラー画像をモノクロ画像に戻し、その輝度で強度を表すわけである。このような処理をした例を図

6（図5とデータは異なる）の上のパネルに示す。そして、上のパネルのモノクロススペクトル中に、白い縦線を入れた時刻（左から2本目、3本目の白線は接近している）における強度ヒストグラム（パワースペクトルに対応）を、下の3つのパネルに時間軸を一致させて示している。対応する時刻は、それぞれ、(a) 05:04:54、(b) 05:05:10、(c) 05:05:17である。

Ⅳ Ⅱ型太陽電波のBand Splitting

惑星間空間衝撃波から放射されるⅡ型太陽電波の特徴は、基本波（Fundamental band）とその2倍の周波数を持つ高調波（Second harmonic band）の2つのバンドを持つことである。今回取り上げる現象は、この基本波と高調波のそれぞれがさらに2つあるいは3つに分離する現象であり、Band Splittingと呼ばれている。ここでは、スプリットした各バンドの強度変動およびその周波数間隔について議論する。

1 強度変動

図4には、時間とともにゆっくり周波数が下がっていく典型的なⅡ型太陽電波の例を示している。この例では、基本波がはっきり2つのバンドにスプリット（AとBで表している）した状態で観測されており、高調波部分は観測周波数範囲を超えており見えてい

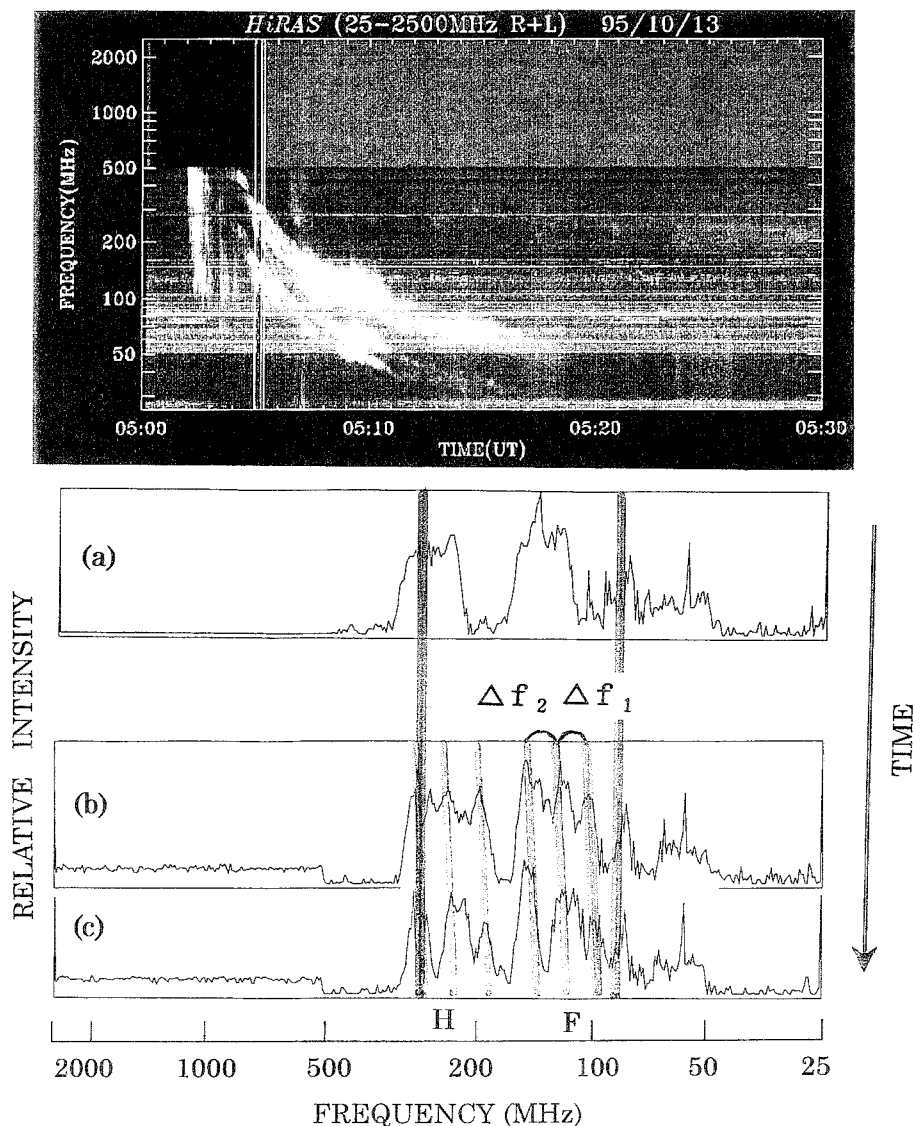


図6 3つに分離したスプリット型太陽電波 (HiRAS)

い。A、Bで示した各バンドの強度変動を詳細に解析した結果(参考文献(15)参照)、Aのバンドの強度が上昇したときはBのバンドの強度も上昇し(図中実線の矢印で示す部分)、逆にAのバンドの電波強度が弱まる時にはBのバンドの強度も減少する(図中破線の矢印で示す部分)ことが解った。つまり、両バンドの電波強度の変動は同期していることが多くのスプリット型太陽電波の観測例に対し確認された。また、図6の上のパネルからも、スプリットした2組(基本波と高調波)のバンドが同期して強度変化していることが分かる(時刻05:10UTあたりの強度の強い部分参照)。ただし例外もあり、全く同期していない観測例も少数であるが存在する。

ここで見られる強度変動の同期は、分離した各バンドが別々の場所で励起されたものではなく同一場所

(電磁環境)で生成されたことの強い証拠となる。

2 スプリット周波数

図5の例(00:46~01:00 UTの時間帯に見られるのがスプリットバンド波)では、基本波と高調波がそれぞれ2つに分離した場合を示している。このスペクトルデータから直ちに解ることは、時間とともに各スプリットバンドの周波数が下がっていても、スプリットした2つのバンド間の幅は一定であるということである。この事実は、縦軸(周波数軸)がログスケールであることを考えると、スプリットした下側のバンドの周波数(f_L)に対し、上のバンドの周波数(f_U)が比例関係($f_U = k f_L$, k :一定)にあることを示している。

図4(縦軸はリニアスケール)も基本波がA、Bの

2つのバンドに分離した観測例である。この例では、Bのバンドの周波数を1.3倍するとAのバンドに非常によく一致し、この場合 $k=1.3$ となる。この比例関係は、 $\Delta f (=f_L - f_U)$ がサイクロトロン周波数であることの1つの根拠になる。これ以上の詳しい議論は専門的過ぎるので、ここでは省略するが（参考文献(14)参照）、スプリットの間隔 Δf が、基本波の場合は、電波発生領域でのサイクロトロン周波数(f_c)にほぼ等しい（高調波の場合は $2f_c$ に等しい）ことが詳しい解析によって確かめられている。

図6には、基本波と高調波がそれぞれ3つに分離した例を示す。上のパネルがモノクロススペクトルを示し、下のパネルはスペクトル上に引いた白線に対応する時刻の電波強度プロファイルを、時刻が若い順に(a)、(b)、(c)のパネルに示している。ただし、縦軸は電波の相対強度、横軸は右から左へ周波数をログスケールで示している。下の3つのパネルの中で、濃い2本の縦線は、観測地でのローカルなFM放送波と航空管制用通信波の混信を防ぐためのノッチフィルターが入っている周波数帯(83.2MHz帯、280MHz帯)を示している。また、斜めの短い6本の線は、各電波強度プロファイルのピークの点を結んだもので、右の3本は基本波(図中Fで示す)が3つに分離した部分に対応し、左の3本が高調波(図中Hで示す)部分を表している。この場合、(a)の時刻では明確なスプリットは見られないが、(b)、(c)の時刻では3つに分離していることが見て取れる。基本波(F)におけるこのスプリット間隔 Δf_1 、 Δf_2 はほぼ等しく

$$\Delta f_1 = \Delta f_2 = f_c \quad (1)$$

が成り立っている。このことは、スプリット型太陽電波の発生機構にサイクロトロン周波数に関わっていることを強く示唆している。

V スプリット型太陽電波の発生機構

我々が提案するスプリット型太陽電波の発生機構は、サイクロトロン共鳴型の非線型波動粒子相互作用を考えるもので、

$$\omega_H - \omega_P - (k_H - k_P) \cdot V = n \omega_c \quad (n=1, 2, 3)$$

で表される。ここに、 ω_H 、 ω_P 、 ω_c 、 V はスプリットバンド波の角周波数、プラズマ角周波数、サイクロトロン角周波数、粒子速度であり、 k_H 、 k_P は波数である。つまり、サイクロトロン共鳴型の非線型波動粒子相互作用により、プラズマ周波数の波とそれよりほぼサイ

クロトロン周波数の整数倍だけ大きな周波数の波が選択的に増幅される。

このメカニズムは、前節で述べたスプリットバンドの持つ周波数の関係を満足するだけでなく、電波の強度変動の同期性（同一場所での生成）をもよく説明できる。

スプリット型太陽電波の発生機構について、過去に提出されている理論の大半は、スプリットした各バンドを異なった場所で生成された電波として説明したものであった^{(5),(6),(7)}。しかし、このような前提を基にした理論では、各スプリットバンドの強度変動が同期していることに対する合理的な説明が困難である。また、同一場所での生成を前提にした理論⁽⁸⁾もあるが、この場合は周波数の間隔に対する制限が強いことや、3つ以上に分離（スプリット）することに対する説明が出来ない等の欠点がある。

また、いずれの理論も、スプリットした周波数間隔がサイクロトロン周波数に等しいことの説明は与えられていないし、3つ以上に分離した場合の周波数間隔が一致する(①式)ことの説明も出来ない。

VI おわりに

惑星間空間衝撃波から放射されるスプリット型太陽電波について、サイクロトロン共鳴型の非線型波動粒子相互作用による発生機構を提案した。過去に多くの理論が提出されているが、図6に示したように基本波、高調波のそれぞれのバンドが3つ以上にも、同一の周波数間隔をもって分離する現象を、合理的に説明できる理論はまだ存在しない。ここに提案したメカニズムは、このような現象を説明できる現時点では唯一のものである。

画像データの処理に関しては、観測されたアナログ信号（電波強度信号）から、擬似カラーのダイナミックスペクトルを作成するプロセスについて紹介した。また、画像データとして擬似カラーのダイナミックスペクトルとカラーバー（強度と色の対応表）のみが与えられた場合に、色変換前の生データに逆変換する例についても紹介した。

[参考文献]

- (1) Aoyama and Oya : Observation of Solar Radio Bursts Using Swept-Frequency Radiospectrograph,

- J. Geomag. Geoelectr., 39, 571-589, (1987)
- (2) Aoyama and Oya : Decametric radiations from a large scale magnetic loop in the solar corona, J. Geomag. Geoelectr., 46, 97-105, (1994)
- (3) 地球電磁気・地球惑星圏学会 第104回講演会、茨城県青少年会館、(1998)
- (4) McLean, D. J. and N. R. Labrum, Solar Radiophysics, 516 pp., Cambridge University Press, Cambridge, (1985)
- (5) McLean, D. J., Band splitting in Type II solar radio bursts, Proc. Astron. Soc. Aust., 1, 47-49, (1967)
- (6) Wild, J. P. and S. F. Smerd, Radio bursts from the solar corona, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 10, 159-196, (1972)
- (7) Smerd, S. F., K. V. Sheridan and R. T. Stewart, On split-band structure in Type II radio bursts from the sun, In 'Coronal Disturbances' (ed. G. Newkirk) (Proc. IAU Symp. No. 57), 389-393, (Reidel: Dordrecht), (1974)
- (8) Treumann, R. A. and J. Labelle, Band splitting in solar type II radio bursts, Astrophys. J. Part2-Letters, vol. 399, no. 2, L167-L170, (1992)
- (9) Kundu, M. R. and T. E. Gergely, Radio Physics of the Sun, 475 pp., D. Reidel Publishing Company, (1980)
- (10) Kundu, M. R., B. Woodgate and E. J. Schmahl, Energetic Phenomena on the Sun, 632 pp., Kluwer Academic Publishers, (1989)
- (11) Newkirk, G. Jr., Coronal disturbances, IAU symposium No. 57, 508 pp., D. Reidel Publishing Company, (1974)
- (12) Tandberg-Hanssen, E. and A. G. Emslie, The Physics of Solar Flares, 273 pp., Cambridge University Press, Cambridge, (1988)
- (13) Priest, E. R. and V. Krishan, Basic Plasma Processes on the Sun, 540 pp., Kluwer Academic Publishers, (1990)
- (14) 地球電磁気・地球惑星圏学会 第98回講演会、京都市北文化会館、(1995)
- (15) 地球電磁気・地球惑星圏学会 第91回講演会、京都大学、(1992)