

研究ノート

吸収バンドを持つIII型太陽電波バースト

宮城職業訓練短期大学校 青山隆司

Type III Solar Radio Bursts with Absorption Bands

Takashi Aoyama

要約 太陽電波バーストのダイナミックスペクトル観測を続けているが、最も発生頻度が高いIII型バーストの中に、複数の電波吸収帯(電波強度が減少する周波数領域)を持つような例が数多く見つかった。これらの観測データを解析した結果、この吸収帯は、以下に示す様な特徴を持っていることが判明した。

- (1) 個々のIII型バーストについては、ほぼ等しい周波数間隔で電波吸収が起こっている。
- (2) 電波吸収帯の間隔は、約2.8MHz以上であり、それ以下のものが全くない。

これらの条件を満たす電波吸収メカニズムとして、電子のサイクロトロン共鳴吸収が提案され、その妥当性が示された。

この結果をもちいて、コロナ中の電波発生域における磁場を決定する方法が導かれた。さらに、この方法を観測されたデータに適用し、妥当な結果を得た。

I 序

宮城職業訓練短期大学校では物理実験の一環として、約6年間にわたり太陽電波の観測を継続してきている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。太陽電波バーストは、大きく5つの型(I型~V型バースト)に分類されているが、その中で最も発生頻度が高く、その発生メカニズムも比較的良く知られているのがIII型バーストである。このIII型バーストの観測データの中に、時々複数の電波吸収帯を持つ例が見出される。本報告では、この様なバーストのスペクトルデータから、太陽コロナ中の電波発生域における磁場の情報を取り出す可能性について報告する。

II 観測例

太陽電波の観測およびデータ解析システムについては、注(1)および(2)に詳しく報告したのでここでは省略するが、周波数帯域20MHz~40MHzでのダイナミックスペクトルの形で最終データを得ている。図1にその形式でのIII型バーストの例を示す。図1の(a)に示したのはノーマルなIII型バーストの例で、周波数が下がるとともにバック

グラウンドのレベル上昇も加わり強度が上がっている。図1の(b)に示したのが吸収バンドを持つIII型バーストの例で、周波数軸に沿った電波強度の変化が(a)のようには滑らかではなく、波動状に変化しているのがわかる。以下で、このようなIII型バーストの物理的意味を考察する。

図2に、同じ日に約30分の時間間隔で発生した2つのIII型バースト((a)および(b))を示す。図中に矢印で示した周波数部分で電波強度が極小になっている。((a)と(b)で、電波強度が極小になる周波数が全く異なることに注意されたい。)このような電波強度の変化は、観測システムの不備によって起こる可能性もあるが、30分程度の時間差で、全く異なる周波数で強度減衰が起こることは、観測システムのせいではない事を示している⁽⁴⁾。また、電波発生域(コロナ)から地球の表面まで電波が伝わる間に、図2のような選択的な電波強度の減衰が起こると思われない。残る可能性は、電波の発生源における吸収である。つまり、電波強度が極小になる周波数に対応するコロナ域において、何らかのメカニズムにより電磁波のエネルギーの吸収が起きていると考えるのが妥当である。

図2からわかるように、ダイナミックスペクトル上で

これらの吸収バンドの周波数間隔は、ほぼ同じになっている。このことは、コロナ中での何らかの特性周波数の高調波における吸収である事を強く示唆している。このような特性周波数の最も有力な候補は、電子のサイクロトロン周波数である。図 2 (a) では吸収バンド間の周波数間隔は平均 5.18MHz であり、この吸収が上に述べた電子サイクロトロン周波数の高調波で発生しているとすれば、対応する磁場強度は 1.85gauss となり、この周波数帯 (20 MHz—40MHz) の電波を発生するコロナ域での磁場強度として妥当な値である (バーストが起きている場所での磁場強度は良くわかっていないのが現状である)。

今までの観測から得られた吸収バンドを持つバースト 88 例を統計的に処理した結果を図 3 に示す。それぞれのバースト例の平均的な吸収バンドの間隔 Δf および Δf が電子サイクロトロン周波数であると仮定した場合の対応する磁場強度 B を縦軸に、バーストの強度を横軸に取ってプロットしたものである。この図からわかるように、バーストの強度には関係なく、吸収バンドの間隔がおよそ 2.8MHz (1.0gauss の磁場強度に対応) 以下のものが全くない。それでは我々の観測帯域に対応するコロナの磁場が、1.0gauss 以下になる事はないかというとしてではなく、十分起こりうる事である。従って、この原因は他に求めねばならない。考えられる事は、ある程度以上高い次数の高調波に対しては電波吸収の効果が弱くなり、吸収が効かなくなる事である。以上のようなデータ解析の結果を満す吸収メカニズムを以下で考察する。

III 電波吸収メカニズム

観測データの解析結果を説明しうる最も可能性の高い吸収メカニズムは、電子のサイクロトロン共鳴吸収である (詳細は専門書に譲るが、1970年頃ソ連の学者達が熱心に研究した分野である(5))。電子ビームが作り出すプラズマ波動と電子のサイクロトロン周波数およびその高調波の周波数が一致した場合に、プラズマ波動のエネルギーが電子のサイクロトロン運動のエネルギーに移ってゆく過程で電波の吸収が起きるというものである。

このメカニズムをわかりやすく示したのが図 4 である。縦軸は周波数、横軸は太陽中心からの距離を太陽半径を単位にして表わしている。 f_p がプラズマ周波数の変化を、 sf_c (s はハーモニックナンバーで整数値) で示した曲線が s 倍の電子サイクロトロン周波数を表わしている。この両者が交わった点 (図中の (a), (b) および (c)) における周波数および場所で、効率の良い電波の吸収が起きる。

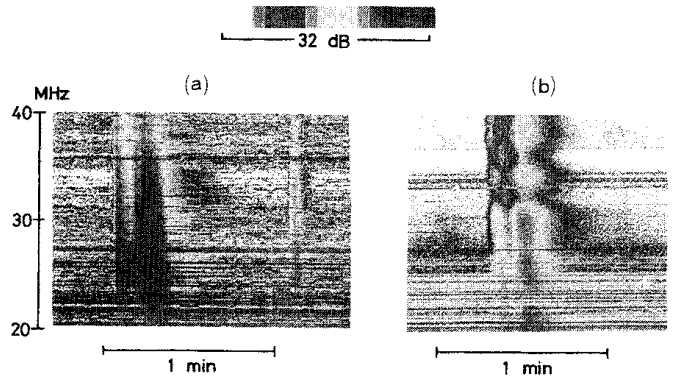


図 1 III型太陽電波バーストのカラーダイナミックスペクトルの例。(a)がノーマルなIII型バースト、(b)が吸収帯を持つバーストを示している。

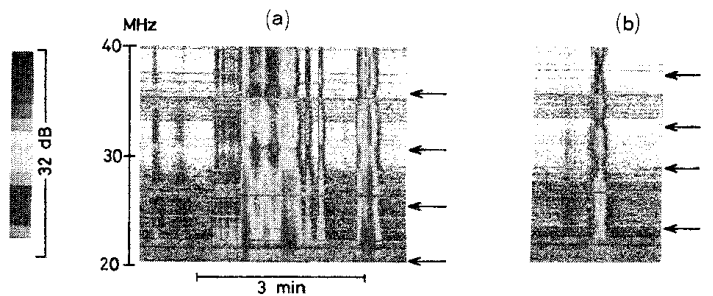


図 2 吸収バンドを持つIII型バーストが群発した日の例で、(a) のバースト群の発生から約30分経過してから (b) のバーストが観測された。矢印で示した周波数において、電波強度が極小になっている。

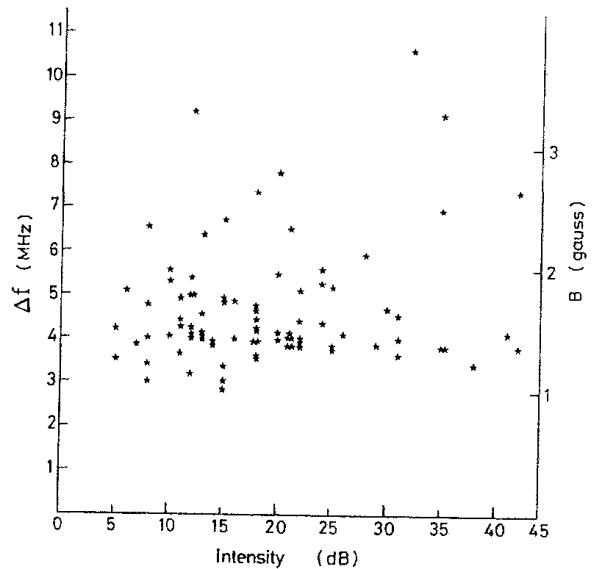


図 3 吸収バンドを持つIII型バースト 88 例について、吸収バンド間の平均的な間隔 (Δf) をバースト強度に対してプロットしたものである。横軸の強度は、銀河のノイズレベルに対する強度比を dB 表示したものである。右側の軸は、 Δf が電子サイクロトロン周波数に一致していると仮定した場合の対応する磁場強度 B を示している。

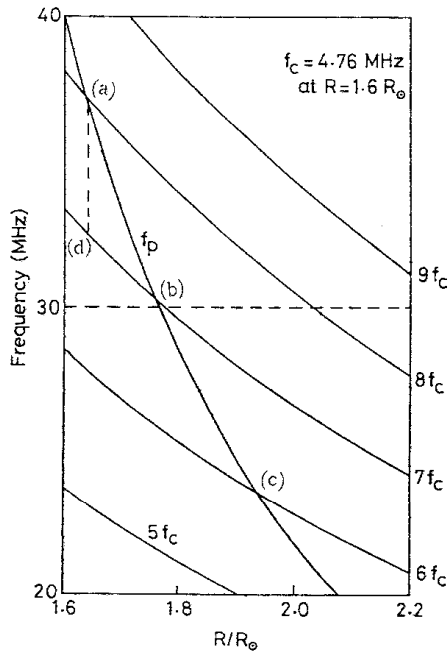


図4 太陽コロナ中のプラズマ周波数 f_p と電子のサイクロトロン周波数の高調波 sf_c (s はハーモニックナンバー) を、太陽中心からの距離 (太陽半径 R_\odot を単位として) に対して描いたもの。それらの交点 ((a), (b) および (c)) に対応する場所および周波数で効果的に電波の吸収が起きる。

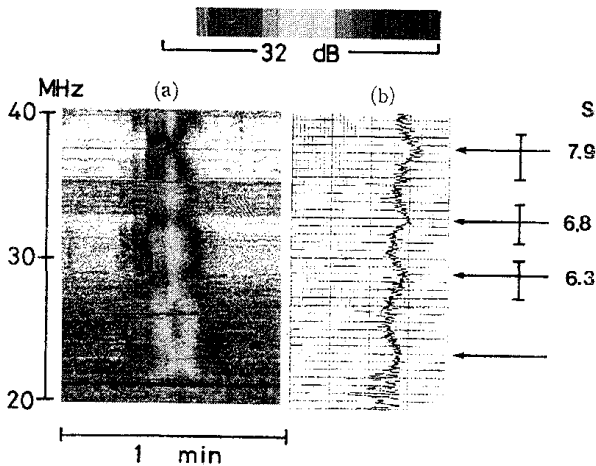


図5 磁場強度を求めるのに使ったデータ。右端の矢印に重ねて書かれた垂直バーは、吸収バンドの巾を示している。

この (a) と (b) 又は (b) と (c) の間の周波数間隔がデータから読み取れる訳であるが、実はこの間隔はサイクロトロン周波数 f_c に等しくない (図4からわかるように、吸収帯 (a) に対応する場所での電子サイクロトロン周波数は、(a) と (b) の間隔ではなく (a) と (d) の間隔である)。つまり、吸収メカニズムとしては、電子サイクロトロン共鳴吸収であるが、各吸収帯はそれぞれ異なる場所で吸収を受けているので、それぞれの場所での f_c の整数倍の周波数で吸収を受ける。もし、 sf_c で示

された各曲線が距離 (横軸) に対し変化しなければ (磁場が一定)、データから読み取った周波数間隔がそのままサイクロトロン周波数 f_c に一致する。しかし、太陽コロナにおける磁場強度は、一般に距離とともに弱くなるので、図4のように sf_c の曲線は右下がりとなり、吸収帯の周波数間隔は f_c より拡大されて見えることになる。従って、この点を考慮してデータ解析を行なう必要がある。

また、 s (ハーモニックナンバー) の大きい場合には吸収係数が減少し、 $s = 10 \sim 12$ 程度以上では電波吸収が事実上生じないことが理論的に示されており、図3で吸収バンドの間隔が 2.8 MHz 以下のものが全く無いことを良く説明できる。このことも、観測された電波吸収がサイクロトロン共鳴吸収であることを強く支持している。

IV 磁場強度の評価

上述のように電波吸収がサイクロトロン共鳴吸収によるものであるとすれば、電子ビームの速さ、吸収バンドの巾および吸収バンド間隔をダイナミックスペクトルから求め、さらに比較的良くわかっているコロナ域でのプラズマの密度分布および温度を妥当な値に仮定する事により、コロナ域の磁場強度を求める事ができる。詳細は省略し、以下に最終結果だけを示す。ハーモニックナンバー s は次式で与えられる。

$$s \approx \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\delta\omega}{\Delta\omega} \frac{\beta_s}{\beta_T} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\omega$ は吸収バンドの間隔、 $\delta\omega$ は吸収係数が $1/e$ に落ちる周波数巾であり、 β_T および β_s はそれぞれコロナ中での電子の熱速度およびプラズマ波動を励起する電子ビームの流速をそれぞれ光速で割ったものである。 β_T は比較的良くわかっているので妥当な値に仮定し、 $\Delta\omega$ 、 $\delta\omega$ および β_s をダイナミックスペクトルから求め、(1)式を用いて s を計算する。 s が求めれば次の関係式から、直ちに磁場強度が得られる。

$$f_0 \text{ (MHz)} = sf_c = 2.84 sB \text{ (gauss)} \quad (2)$$

ここに、 f_0 はデータから得られる電波強度が極小になる周波数、 B が周波数 f_0 に対応するコロナ域の磁場強度 (磁束密度) である。

これらの関係式を用い、実際に磁場を求めた例を図5に示す。(a) がバーストのダイナミックスペクトル、(b) は (a) のまん中あたりの時刻でのパワースペクトルを示している。右側の数字は (1) 式から求めた s の値である (この際、 $\beta_T = 10^{-2}$ (約60万度Kの温度に対応) と仮定し

ている)。これらの s の値はデータから求めたものである
ので整数にはなっていないが、上から順に整数値 8、7、
6 に十分近い。この s の値と(2)式から求めた磁場強度は、
3つの吸収帯の平均として約1.7gaussであった。このよ
うにして地上観測によりコロナ域の磁場強度を求める事
が可能となる。

V 結論

III型バースト中に時々みられる電波吸収帯について、
その吸収機構を考察し、その結果を利用して電波発生域
であるコロナ中の磁場を評価する方法を示した。このよ
うな試みは、1970年頃にも行なわれたが、その時代には図
2や図5で示したような高分解能の太陽電波のスペクト
ルデータが得られていなかったために、あまり有効な手
段とは考えられず、その後もそのような試みは成されて
いない。コロナの磁場強度を観測から正確に求める事は
現在でも困難で、ここで示した方法を使った太陽コロナ
磁場の研究は、今後重要になると考えている。

(注)

- (1) Aoyama, T. and H. Oya, "Observation of
Solar Radio Bursts Using Swept-Frequency
Radiospectrograph in 20-40 MHz Band", J.
Geomag. Geoelectr., 39, 571-589, 1987.
- (2) 青山 「技能と技術」 Vol.21, 4/1986.
- (3) 青山 「技能と技術」 Vol.22, 6/1987.
- (4) 現在、受信システムの再点検と、他の観測ステー
ションとの同時観測を計画し、その準備を進めて
いる。そのため、現時点では、システムの影響が全
くないとはいえない状態である。
- (5) Zheleznyakov, V. V. and E. Ya. Zlotnik,
Solar Physics, 20, 85-94, 1971.