

# カルグーラ・ラジオヘリオグラフ

—電波でみた太陽の姿—

甲斐敬造\*

## 1. はじめに

過去10年程の間とくに電波天文学では世界の観測所で装置の大型化が競われてきた。太陽電波の分野もこの例に漏れない。太陽からくる電波は他の天体からくる電波に比べて充分強いから大型化は主に分解能の向上という点に絞られてきた。前回の太陽活動期では強度計、偏波計、動スペクトル計、2~3アンテナの簡単な干渉計が有効な観測手段であったが、今回の活動期に入るや多要素高分解能干渉計なしには世界の仲間入りができない趨勢になってきた。フランスの169, 408メガヘルツ(MHz)の二つの干渉計、オーストラリアの80MHz円形干渉計(通称80MHzラジオヘリオグラフ)、マイクロ波帯の名古屋大学空電研究所の3750, 9400MHzの二つの複合干渉計が太陽電波天文学でトップクラスの結果を次々に出しつつあることはこの考えを実証している。代表的装置であるオーストラリアのカルグーラ太陽観測所にあるラジオヘリオグラフについては、その初期の観測結果を本誌(1968年7月号:第61巻7号)に紹介したが、ここにふたたびそれ以後の観測状況および結果を報告しようと思う。マイクロ波における花形、空電研究所の二つの大干渉計については本誌(1968年10月号:第61巻10号)に鯉目氏の紹介があり、近い将来詳しい報告があると思うのでここでは触れないことにする。

カルグーラ太陽観測所が発足(1967年9月に開所式が行なわれた)してから約半年間は試験観測およびその結果に基づくデータ処理解析の検討に主力が注がれた。研究者・技術者が集まってどのような形でデータを処理したら最も有効に結果を出せるか何度となく討論した。何しろ左右円偏波で毎秒1回太陽を掃査するのであるから1日6時間観測すると約4万フレームものぼう大なデータが得られる。その中から有用なデータを取り出して解析する。前回の太陽活動期になされた仕事を礎えにするとはいえ、始めは手探りに近い状態であった。幾度か検討・改良を加えて、(i) 毎日すべてのデータを8秒間の時定数をかけ約5千のヘリオグラムに納めて保存する、(ii) とくに重要と思われる現象は磁気テープに保存し、1秒毎のヘリオグラムを撮り、必要とあれば計

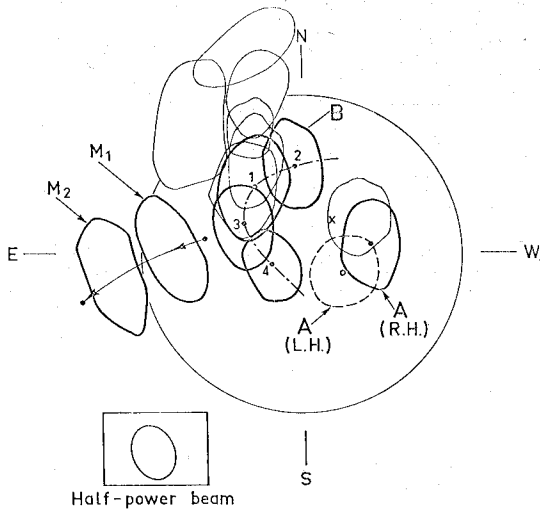
算機で処理する、(iii) データ解析のための計算プログラムを目的に応じて数種類作製する、が決められ実行されている。保存される磁気テープは1日平均1本(約3千フレーム納められる)で1年間に300本以上も溜ってくる。前にも述べたようにデータの取捨選択は非常に重要な問題で当然興味の対象が研究者(=観測者)によって異なってくるが、出来る限り研究者全体の最大公約数となるよう選択を行なう。そのために、補助観測装置である動スペクトル計を広帯域・高感度に整備すると同時に、近い将来に観測中にバーストのスペクトル型がわかるようなディスプレイ方式が採用されるであろう。さらに黒点の写真やH $\alpha$ フレヤー・バトロールの写真も同じ観測所内の光学部内の協力を得て完備されている。ヘリオグラフのデータのディスプレイにはとくに細心の配慮がなされ、たとえば二つの円偏波で撮られた二枚の写真を一枚のカラー写真に撮して輝度・偏波の空間分布が一目でわかるようにしたり、ムービー写真にしたり色々工夫がなされている。このようにデータ処理方式の改良を行なうと同時に、データ解析を進め、開所式から2年たった現在、数々の新しいアウトプットが出されている。ここではこれらの成果を一つ詳しくお話しできないが、新兵器ラジオヘリオグラフがその威力をいかに発揮したかをかいつまんで報告しようと思う。

## 2. 予想以上に複雑であったバーストの電波源

メーター波に現われるバーストが空間的および時間的にいかに複雑であるか、簡単な2アンテナ干渉計による観測が無力とまではいわないまでも、それによる観測結果の解釈がどんなにむづかしいか抽象的に語るより、第1図をみれば直ちにわかっていただけだと思う。図は重要度1Bのフレヤーによってひき起された種々のバーストの電波源を一括して描いたものである。H $\alpha$ フレヤーが起って数分後に、フレヤー中心のすぐ西側にIII型バーストが発生する。しかしIII型バーストは太陽面のほぼ中心付近にも飛び、それから約 $1R_{\odot}$ ( $1R_{\odot}=7\times 10^5$  km)北へ、さらに太陽面周辺に沿って北西へ飛火する(細線で描かれた輪廓はすべてIII型バーストの電波源を表わす)。電波源の移動する速さは $10^4\sim 10^5$  km/sである。次に動スペクトルでみるとIII型バーストと入れ代って二つのII型バーストが現われる。まず最初のII型パー

\* 東京天文台

K. Kai: Calgoora Radioheliograph



第1図 重要度1Bのフレージャー(x印)につづいて起った種々のバーストの電波源の分布図。電波源のアウトラインは最大輝度の1/2レベルを表わす。細い線で描かれたアウトラインはすべてⅢ型バーストを、B<sub>1</sub>~B<sub>4</sub>はⅡ型バーストを、Aは動かないⅣ型バーストを、Mは動くⅣ型バーストを表わす(矢印の向き太線はⅣ型バーストの運動を、線の両端の二点は、出現時および消滅時の位置を表わす。M<sub>1</sub>とM<sub>2</sub>は、その途中の異なる二つの時点でのアウトラインを表わす)

ストはフレージャー中心の東側 B<sub>1</sub> に現われ、1分後電波源は不連続的に B<sub>2</sub> に移動する。第2のⅡ型バーストは5分後 B<sub>3</sub> に現われ、第1の場合と同じように1分後に電波源は B<sub>4</sub> に移動する、80MHz でわれわれがみているⅡ型バーストが完全に終る頃 (Hα フレージャーの始まりから約30分後) B<sub>3</sub> からさらに4' 東側に弱い電波源 M が現われ、明るさを増しながらほぼ一樣な速度 (~500 km/s) で東に動いていく。これは謂ゆる“動くⅣ型バースト”で約25分間に東方へ約1R<sub>0</sub> 動いたあと消滅する。一方Ⅱ型バーストが終った直後にフレージャー中心の西側(電波源 A)に強いバーストが現われる。きわめて息の長いバーストで、5時間後観測を終った時もおお続いていた。バーストの位置は移動せず、強い円偏波を示すことから“動かないⅣ型バースト”と考えられる。このバーストを右廻りおよび左廻り円偏波成分で観測すると、電波源はたがいに3'~4' ずれている(図の A(R.H.) および A(L.H.); 電波源 A は逆向きの偏波をもつ二つの電波源から成る双極構造をもつ(メーター波でバーストが双極構造をもつことはラジオヘリオグラフで始めて観測された)。これに対してほかの型のバーストはすべて単極構造を示している。動かないⅣ型バーストは全体として強い右廻り円偏波(初期に ~50% 次第に偏波率は上昇し約1時間後には 90% に達する)を示すのに対し、動くⅣ型バーストは左廻りの強い円偏波を示す。因

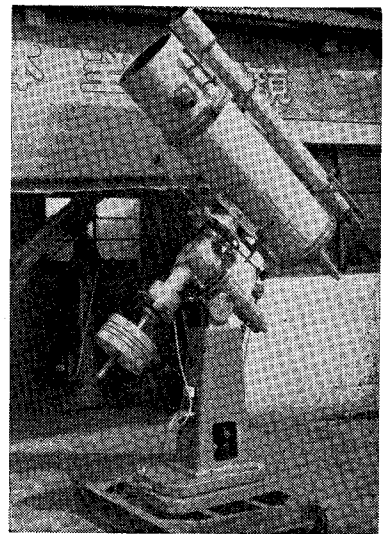
## 西村製の反射望遠鏡

- |                   |               |
|-------------------|---------------|
| 30cm “A”          | カセグレン・ニュートン兼用 |
| 10cm 屈折望遠鏡 (f/15) |               |
| “B”               | カセグレン焦点       |
| 15cm 屈折望遠鏡 (f/12) |               |
| 40cm “A”          | カセグレン・ニュートン兼用 |
| 15cm 屈折望遠鏡 (f/15) |               |
| “B”               | カセグレン焦点       |
| 20cm 屈折望遠鏡 (f/12) |               |

株式会社 西村製作所

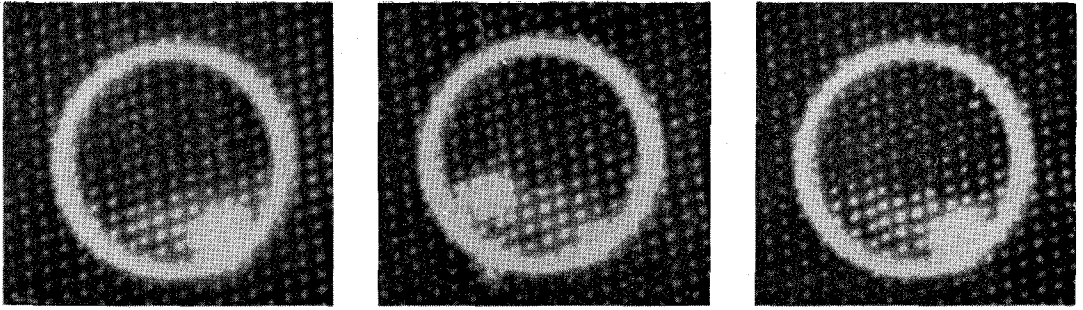
京都市左京区吉田二本松町27  
電話 (771) 1570, (691) 9589

カタログ実費90円郵券同封



30 cm 反射望遠鏡

ニュートン・カセグレン兼用



第2図 II型バーストの電波源内の速い輝度分布の変化 (1968年2月25日)、2秒おきに撮られた写真。(上が北、左が東)。

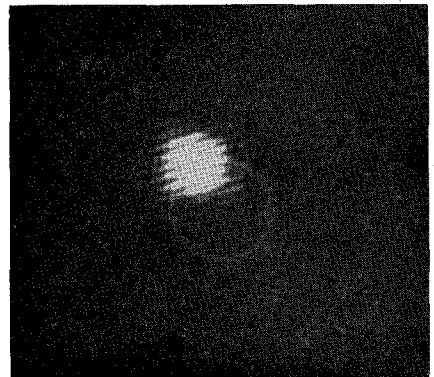
みに動くIV型バーストの強度は動かないIV型バーストの強度の約10分の1で、二アンテナ干渉計では二つの電波源が同時に存在した場合強度比で内分した重心の位置を観測するから弱い動くIV型バーストは検出不可能であったであろう。以上が重要度1Bのフレージャーに伴って起きたバーストのストーリーである。このイベントをa)二アンテナ干渉計で、b)一次元の多要素干渉計で観測したらどのような情報が失われるであろう? a) 前述の如くこのイベントできわめて重要な動くIV型バーストの存在が、強い動かないIV型バーストに隠されて検出できない(たとえ左右円偏波の切替で観測を行なっても)、a), b)ともフレージャーを中心とした色々な型のバーストの電波源の位置関係が明確にわからない。とくにII型バーストの四つの電波源を結んでできる立体的とも思われる磁気衝撃波の波面(第1図の鎖線)が求められない。この点はイベントの解釈にきわめて重要である。

この例で明らかのように80MHzラジオヘリオグラフ(=2次元高分解能)の威力は、一つのフレージャーに伴って起る種々のスペクトル型をもつバーストが、フレージャー中心に対してどのように空間的に分布しているかを直接知り得る点にある。バーストのスペクトル型の差異は、バーストをひき起す擾乱の物理的性質の違いによって生じるものであるから、フレージャーに伴って起るバーストの空間的分布を知ることは擾乱の空間分布を知ることであり、フレージャーの理論に新しい手掛りを与えることは間違いないであろう。

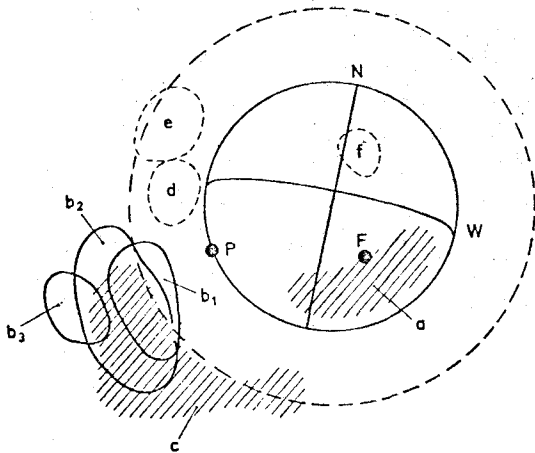
### 3. II型バーストはコロナ磁気衝撃波のモニター

大きなアウトバーストの水先案内役をするのがII型バーストであり、フレージャー初期に起る爆発で生じる磁気衝撃波によって作られることも知られている。II型バーストはコロナの磁気衝撃波がどのような振舞をするかをみるモニターであり(光ではみえない!), その詳しい観測は彩層におけるモートン波の観測とともにフレージャーの構造を研究する上にきわめて重要である。前回の太

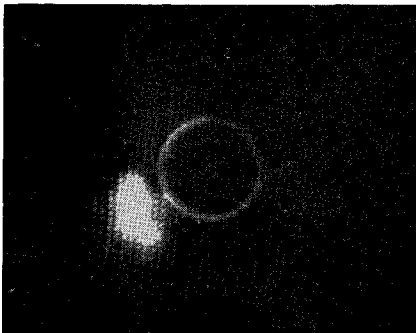
陽活動期になされた簡単な干渉計による観測で、II型バーストの発生位置がしばしば不連続的に且つ大幅に変化することが知られており、電波源の複雑さが予想されていた。実際ラジオヘリオグラフで新しく得られた約10個のII型バーストの例から、II型バーストが実に複雑な構造をもっていることが確認された。第2図は全体として扁平で大きな拡がりをもつII型バーストの例である。電波源内の明るい部分が数秒の時間スケールで激しく変化する。第3図はサイズの大きいII型バーストの例である。このバーストを起したフレージャーは他のフレージャーによって誘発されている。“誘発フレージャー”(Sympathetic flare)にみられるように、磁気衝撃波が遠方の物体に影響をおよぼす現象も観測されている。前回に報告したII型~IV型バーストをまとめたのが第4図である。フレージャーは太陽面中心付近(図のF)に起り、約10分後にフレージャーのすぐ南にII型バーストが発生する。さらに8分後にフレージャー中心から約 $1R_{\odot}$ 離れた太陽東側周辺にある静常プロミネンスが爆発を起す。この爆発したプロミネンスの上空にIV型バーストが発生する。これら一連の現象はすべてフレージャー近くにII型バーストを起した磁気衝撃波の仕業と解釈されている。ふたたび



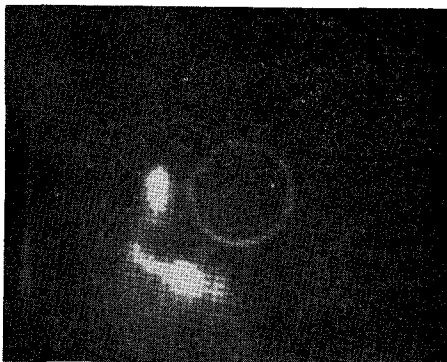
第3図 大きな拡がりをもつII型バーストの電波源 (1968年6月17日)



第4図 1968年2月25日03時58分(世界時)に起ったアウトバーストの電波源を要約した図。F: H $\alpha$  フレーヤーの中心。P: プロミネンス。a: II型バースト。b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>: IV型バースト。c: II型バースト? d, e, f: 時々起るIII型バースト(このフレーヤー現象に直接関係があるかどうか不明)。破線は80MHzプラズマレベルを表わす。



(a) フレーヤー発生後12分



(b) フレーヤー発生後20分

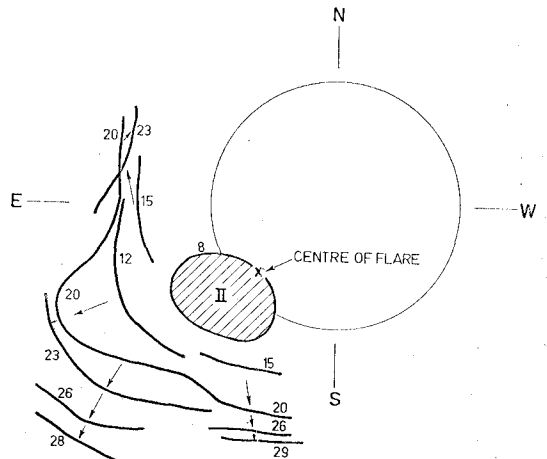
第5図 アーチ状電波源の出現と膨脹。(1968年10月24日)

第2図に戻ろう。二つのII型バーストの四つの電波源を結ぶと H $\alpha$  フレーヤーを中心とした扇形が東側に描ける。この扇形は光球からの高さ約  $4 \times 10^8$  km (80 MHz のプラズマレベル) における磁気衝撃波の波面を表わすものであろう。一方フレーヤーの西側にはII型バーストは現われず、したがってこの方向に衝撃波は伝播しなかったのであろう。そこには安定な動かないIV型バーストがある(電波源 a)。後に述べるようにこのIV型バーストの双極構造は黒点上の強い双極性磁場が浸透した領域を表わすと考えられる。この例は、“黒点の強い磁場が磁気衝撃波に対し固い‘壁’となってその伝播を妨げる”という予想を裏付ける格好な証拠であろうか?

4. アーチ状電波源

フレーヤーのあと、ときどき極めて大きな拡がり(1~2 R $\odot$ ) をもつアーチ状の電波源が現われることがあり、多くの場合アーチは膨脹運動をする。表紙に掲げられた一連の写真はアーチの出現から消滅するまでの過程を示す代表的な例である。アーチ状電波源は二次元高分解能の装置によってのみその存在が検出され得る。

ほかの例を第5図に示す。(a) はフレーヤーの12分後に現われたアーチ状電波源で、アーチはその後膨脹を始め、(a) から8分後には (b) のような形となる。その後も膨脹運動は続き、フレーヤー発生から30分後にアーチの一部は太陽周辺から 2 R $\odot$  も離れる。第6図は、アーチの膨脹のようす、およびアーチ出現に先立って起ったII型バースト(図中のIIと印された領域)、H $\alpha$  フレーヤーの中心(x印)との空間的關係を描いたものである(図中の数字はフレーヤーが起ってから時間を



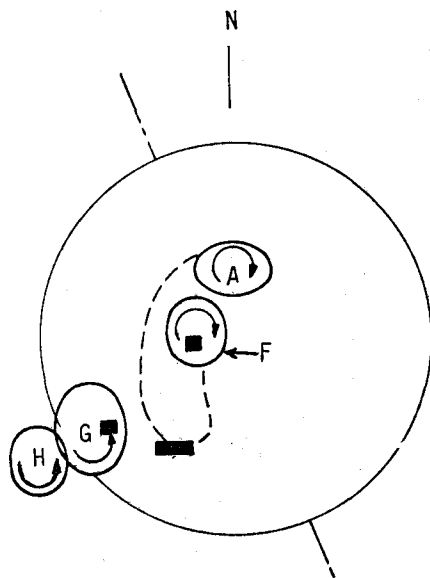
第6図 膨脹するアーチ状電波源とII型バーストの電波源との位置関係。(1968年10月24日)  
太線はアーチ状電波源を模式的に表わしたもので、傍の数字はフレーヤー(x印)発生後の時間を分で表わす。

波源の励起および膨脹運動がこの磁気衝撃波と密接な関係にあることを示唆している。表紙のカラー写真で良くわかるようにアーチのふもとにある二つのバーストが互いに逆向きの偏波を示していることから、アーチ状電波源の本体は磁力線のアーチであろうと推定できる。このアーチの中で加速された高エネルギー電子が磁力線に捕えられ、そのときに出すジャイロシンクロトロン輻射が電波源であろう。電波源の高さの拡がりから推してこの磁力線アーチは黒点上の強い磁場ではなく、日食の時撮影された写真にみられるような二つの活動領域にまたがる弱い磁力線によるアーチと思われる。このアーチが磁気衝撃波によってどのような影響を受けるかを調べるのは面白い問題である。

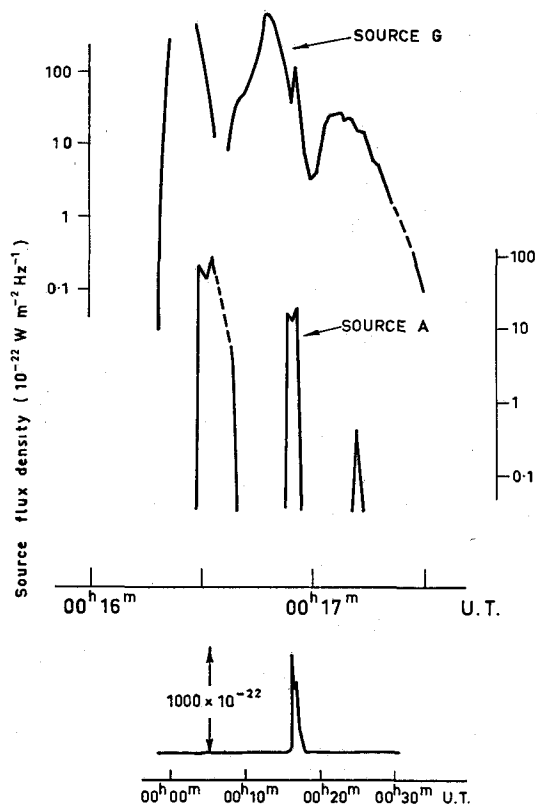
### 5. 電波による黒点群間の相互作用の観測

およそ10年前までは太陽面上に現われる活動領域は互いに独立なものとして扱われていた。黒点が光球下の磁力線で結ばれているであろうとは考えられていたが、しかしその後の観測により異なる活動領域の間に大気を通じて相互作用が行なわれていることが見出された。その一つは1960年ロッキード観測所のモートン等により発見された。フレージャーが遠方の暗縁におよぼす影響を巧妙な方法で観測し、それがフレージャーの際生じる波によってひき起されることを見出した。後にこの波はコロナを伝わる磁気衝撃波の波面が彩層を叩くとき起る現象であることが理論家により示された。波の伝播速度は約1000 km/sである。あるフレージャーが遠方の活動領域に別のフレージャーをひき起す謂ゆる“誘発フレージャー”とよばれる現象もこの波の仕業と考えられる。ラジオヘリオグラフによるこの種の相互作用の例としては、前述のアウトバースト(第4図)がある。

他の形の相互作用はラジオヘリオグラフにより発見された。波による相互作用の伝達時間が10分の程度であるのに対し、この新しい種類の相互作用は10秒程度で伝達される。互いに遠方にある二つの電波源から発生するバーストの強度変化の間に何らかの関連がありそうだという事は予備観測の頃から気付かれていた。その後観測を積み重ねるにつれてこの種の関連は偶然によるものではなく、実際に、異なる活動領域間の相互作用によるものであろうと考えられている。ただバーストの強度が雑音レベル(静かな太陽が出す電波強度)すれすれであったり、また常に相互作用をするのではなく時々思い出したように起るので、明らかに関連があるとみられる例は少なく、約10例に過ぎない。第7図はその一例である。(b)図の下段の全強度変化(太陽全体からくる電波強度)に示されたように、太陽は長い間静寂を保ったあと、突然強いバーストがまず電波源G(a図参照)に起



(a) コリレーションを示すバーストの電波源の分布図矢印は円偏波の向きを、黒い矩形は黒点群を表わす。



(b) バースト強度の時間変化、上段・中段の図はそれぞれ電波源GおよびAの強度変化を、下段は太陽全体からの強度変化(圧縮した時間スケール)を示す。

第7図 関連したバースト。

る。10秒後約 $1R_{\odot}$  ( $7 \times 10^5$  km) 離れた電波源Aに強度変化の酷似したバーストが起る (b図の上段および下段はそれぞれ電波源GおよびAから発生したバーストの分を表わしたもの)。この図からまず気が付くことは、アーチ状電波源の出現・膨脹がフレアー中心からII型バーストの電波源をみた扇形内に限られている点である。II型バーストはフレアーの際生じる磁気衝撃波によって引き起されるから、上の空間的關係はアーチ状電強度変化を示す)。これら二つの電波源は異なる活動領域に属している。距離および時間差から電波源Gより電波源Aへの擾乱の伝播速度は $\sim 10^5$  km/s (光速の1/3) となり、前記の波による擾乱速度より2桁も速く、コロナ中をこのような高速で伝わるものは高速粒子以外に考えられない。この例のように短かい時間差で起る誘発現象では、引金となる最初のバーストはIII型バーストである。III型バーストは動スペクトル上で極めて速い割合で低い周波数へドリフトを示し、コロナ下層で加速された電子が光速の1/2~1/3の速度で上方へ逃げ出すとき、各層で次々にバーストを励起していき、これがIII型バーストであると解釈されている。上記の擾乱の伝播速度が同程度の速さであることは擾乱の本体が高速電子であるとする考えと一致する。フレアーで加速された電子がまず80 MHzのプラズマレベルで、III型バーストを励起し、電子の一部または全部が問題の活動領域間を結ぶ弱い磁力線に沿って他の活動領域に流れ込み、そこでふたたび80 MHzのプラズマレベルを通るとき他のバーストを誘発する。事実、問題の二つの電波源から発生するバーストの偏波は逆向きとなっており、ますます辻褃の合う話となっている。

この種の相互作用に関連してとくに興味のある事柄を一つ。ときどき電波的に重要なフレアーが起る前に、フレアーを起す活動領域と他の活動領域との間に弱いバーストによる相互作用が行なわれている節がみられる。もしこれが事実であれば、フレアーの引金はコロナ上空で引かれるのかも知れない。

## 6. バーストの偏波構造 (双極性構造)

第1図で、フレアーによって引き起された動かないIV型バースト (電波源A) が双極構造をもっていることは前に簡単に触れた。同様な偏波構造は黒点磁場との関連が強いと考えられるI型バーストおよび動かないIV型バーストで観測されている。したがってこの双極構造はコロナに延びた双極性の黒点磁場を表わすと考えて良いであろう。これらのスペクトル型を示すバーストは、他のスペクトル型をもつバーストに比べて桁違いに寿命の長い現象であることは注目に値する (一つ一つのバース

トの寿命は秒以下であるが、ここではバーストの集まり全体としての寿命を考える)。一方フレアーに伴なって起るII, III, V型バーストは数秒から数分の短命でそれらのバーストの電波源はすべて単極構造 (左右円偏波の輝度分布が同じ) をもち、偏波率も低い。ここで寿命の長短、偏波率の大小および偏波構造の違いでバーストを二つの範疇にわけると、両者の電波的性質の差異は電波源の磁場の状態の差異によるという解釈が可能である。もしそうであるなら、たとえ同じ活動領域からI型、III型バーストが同時に出ていても、発生場所は互いに異なる筈である。事実このことは新しい観測で確められており、III型バーストは強い黒点磁場の浸透した領域を避けて起るようであり、そのまわりの磁場の弱い領域 (多分ニュートラルシート) から発生するのであろう。観測された全電波エネルギー (強度 $\times$ バンド幅 $\times$ 寿命) は二つの型のバーストでさほど違わないが、エネルギーの消費の仕方は大いに異なる。III型バーストでは短時間に派手に使われ、I型バーストでは長時間にわたってちょびりちょびり使われる。粒子が加速される詳しい機構はわからないが、究極的には磁場のエネルギーが粒子加速に費されるのであろう。I型バーストの電波源のように強い準定常的な磁場の浸透したところでは、磁気エネルギーは少しづつしかひき出せないであろうが、ニュートラルシートのような不安定な弱い磁場からは、大部分の磁気エネルギーを短時間にひき出すことも可能であろう。

以上ラジオヘリログラフで得られた新しい結果をかいつまんでお話しした。今後データが蓄積されるにつれて、電波現象を統一的に眺めた結果も出てくるであろう。世界をリードするオーストラリアの太陽電波天文学の現状はすなわち世界の太陽電波天文学の現状といえよう。

### バーストの型について

太陽バーストはいろいろな周波数の電波を同時に観測するダイナミックスペクトルで分類される。ここにてくるI型バーストは、黒点の活動にともなって数時間から数日続くノイズストームのときに見る継続時間1秒くらいの短かいバースト。II型III型は時間とともに周波数が低い方に移動するバーストで移動の速度がII型はおそく、III型ははやい。II型はフレアーから打ち出された衝撃波、III型は高速粒子がコロナの中にプラズマ振動をおこして発生すると考えられている。IV型バーストは大きなフレアーにともなって起こる太陽コロナの大きな擾乱である。