

X線・粒子線・電波によるフレアの種類と予報

大木 健一郎*

FLARE CLASSIFICATION WITH X-RAY, PARTICLES, AND RADIO BURSTS

By

Ken-ichiro OHKI

Some important works are concisely reviewed on flare classification with the observational results from various satellites during the last solar maximum. First, the observational definitions of impulsive and gradual types of flares are given. Next, the phenomena pertaining to meter-wave bursts are described and explained. When these meter-wave phenomena are taken into account, it is shown that clear classification can be achieved. Basically, all the flares are classified into two types of events, that is, impulsive and gradual flares. This simple classification may help to understand the relationships among the various phenomena on the sun and those in the interplanetary space.

1. 序 論

わが国の太陽フレア観測衛星「ひのとり」(1981年2月-1982年6月にフレアの連続観測)による硬X線, 軟X線, γ 線を中心とした観測結果により, 1983年にはフレア現象は, 少なくともインパルシブ型とグラジュアル型の2種類に明確に分けられることが示されている⁽¹⁾. その後, 米国のSMMとISEE-3衛星を中心とした衛星観測及び地上からの電波観測等により, このフレアの種類については, 多くの論文が発表されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾. 本報告の大部分は, それらのフレア分類の仕事のうち重要なものいくつかを, レビューすることに充てる. それと共に, もう一度, 筆者達が最初に行った「ひのとり」データによる仕事⁽¹⁾に戻って, 観測されているすべての現象をインパルシブ型とグラジュアル型の2種類だけに大別してみる. すると惑星間空間-地球へと大きな影響を与えているフレア, つまり衝撃波やCMEないしは磁気嵐, そして地球での磁気嵐, SC, PCA等を引き起こすフレアが, 殆ど例外なく, 上記の分類ではグラジュアル型に相当するという面白いことも分かってくる. 勿論, 詳細に調べると, 全てのフレアがこの2種類のみ

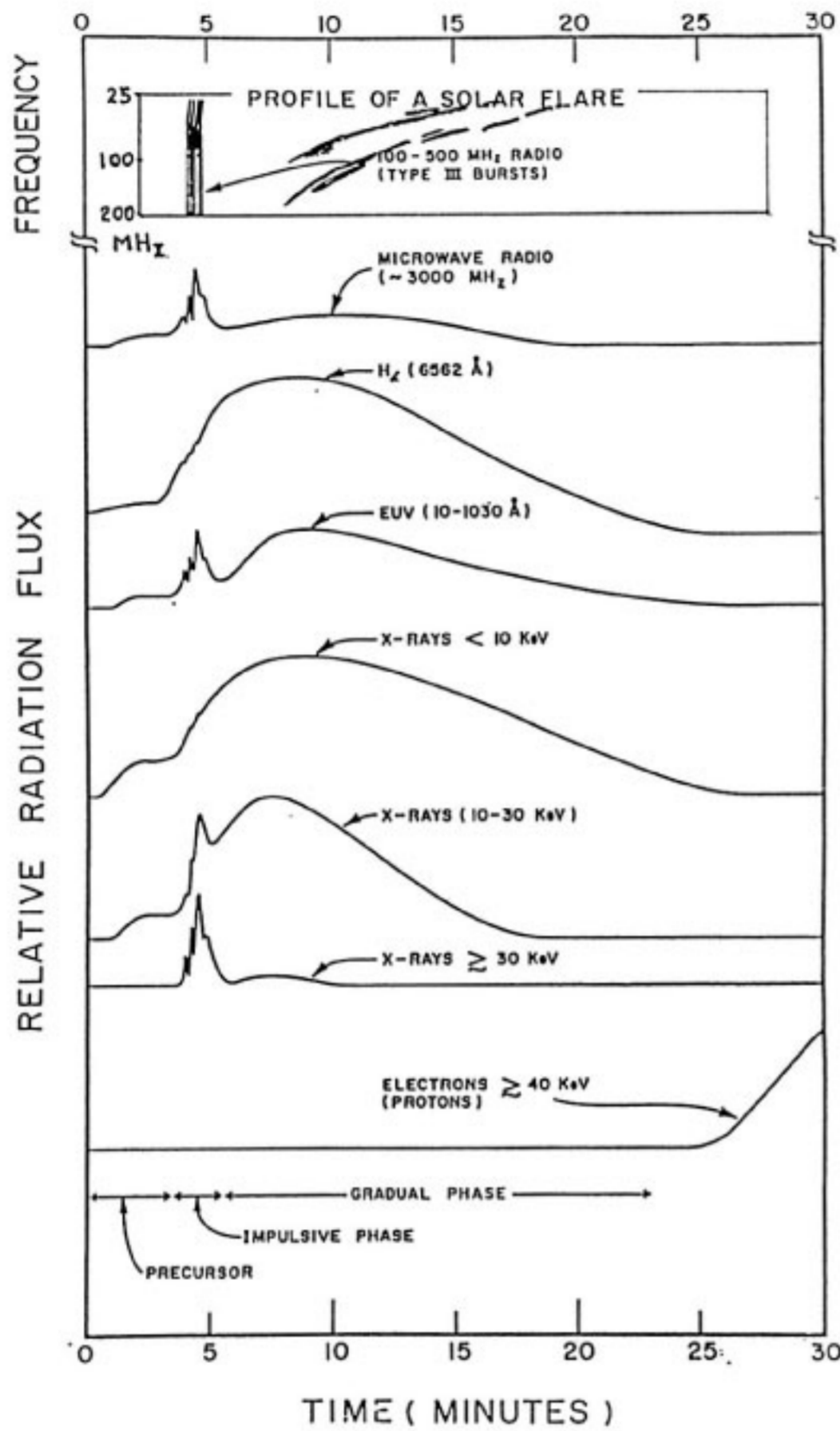
分類は出来ないという意見もある. しかし, 大きなフレアではインパルシブとグラジュアルの両方の型が複合して起こることがあるという考え方を導入すれば, 殆ど全てのフレアを上記の分類で理解することが可能となる.

2. インパルシブ型とグラジュアル型の特徴

インパルシブ型フレアの定義に関しては, 現在でも正確な定義が与えられているわけではない. しかし, 多くの観測的論文の中で, ある種のコンセンサスは得られている. この小論の中では, そのコンセンサスについて, 物理的意味付けを行いたい.

まず, 観測的にインパルシブバーストと呼ばれているものには, 大きく分けて, 硬X線と軟X線というように2つの異なったエネルギー域での定義が存在する. その1つは, フレアの非熱的現象を示すと考えられる硬X線バースト及びマイクロ波バーストによる定義であるが, 典型的なインパルシブバーストの例が, 第1図に模式的に示されている. 図の中で, 硬X線(>30 keV)とマイクロ波(~3000 MHz)でフレア初期の1~2分間だけ急に増加している部分がインパルシブ相である. これらの非熱的ふく射に特有のエネルギー域で, インパルシブ相だけが目立っており, それが10分以内しか続かないフレアが, インパルシブ型フレアと呼ばれている. 反対

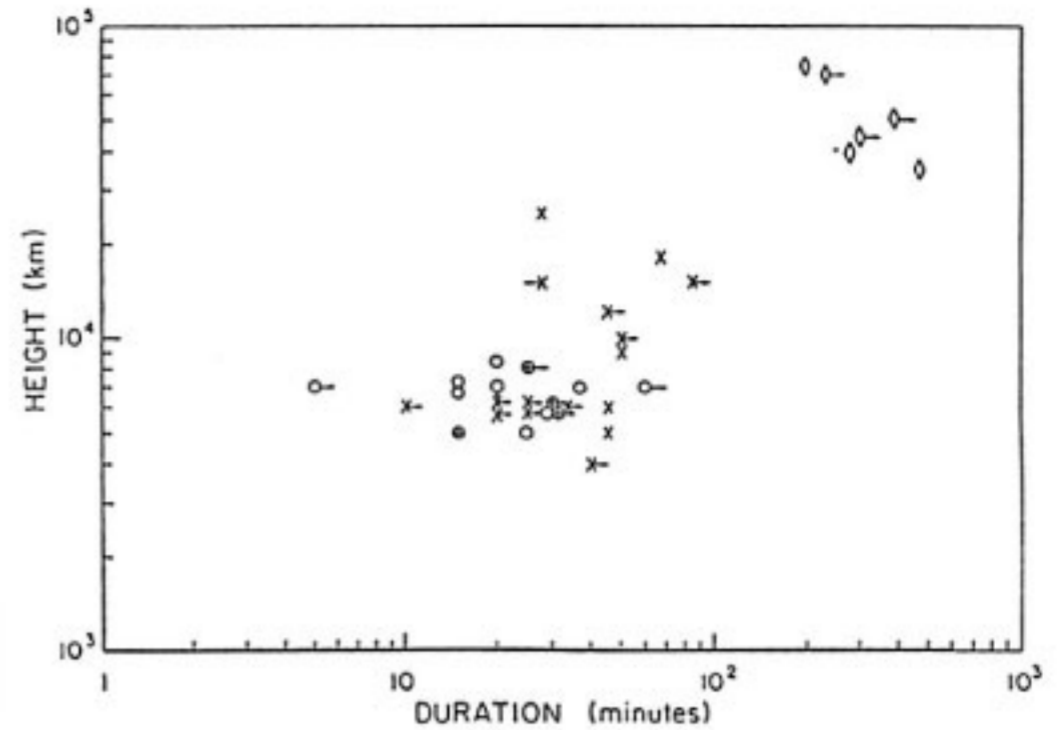
* 国立天文台
National Astronomical Observatory



第1図 典型的なインパルシブ型フレアにおける各種のふく射の時間変動の様子を模式的に示す。図中、上部の小さい囲みの中は、200-25 MHz のメートル波ダイナミックスペクトルの様子で、インパルシブ相のⅢ型バーストと、それに引き続いてグラジュアル相に起きるⅡ、Ⅳ型バーストとが、示されている。

に、これらの非熱的ふく射が10分以上にわたって長く続き、その時間的変動も比較的ゆるやかなバーストが、グラジュアル型フレアと呼ばれている。但し、ここで注意すべき点は、第1図に示されているグラジュアル相というのは、単に非熱的なインパルシブ相に続く熱的な相を見ているに過ぎない。この相は、すべてのフレアの H α や軟 X 線 (<10 keV) に共通に見られる現象で、上記のグラジュアル型フレアとは何の関係もない。つまり、注意すべきことは、すべてのフレアに付随するグラジュアル相と特定タイプのフレアの呼称としてのグラジュアル型フレアとは、お互いに何の関係もない別々の概念である。では、グラジュアル型フレアに於けるグラジュアル相とはどのようなものかと言うと、H α や軟 X 線がイ

軟 X 線で見えた 2 種類のフレア



第2図 スカイラブの軟 X 線望遠鏡のリム・フレアについての観測結果のまとめ。図中の◇印は、約2分角くらいの大きなループ・システム。×印と○印とは、約10秒角程度かそれ以下の小さな軟 X 線源を示す。前者が、グラジュアル型、後者がインパルシブ型フレアと考えられる。(Pallavicini et al.(1977)⁽⁹⁾より引用)

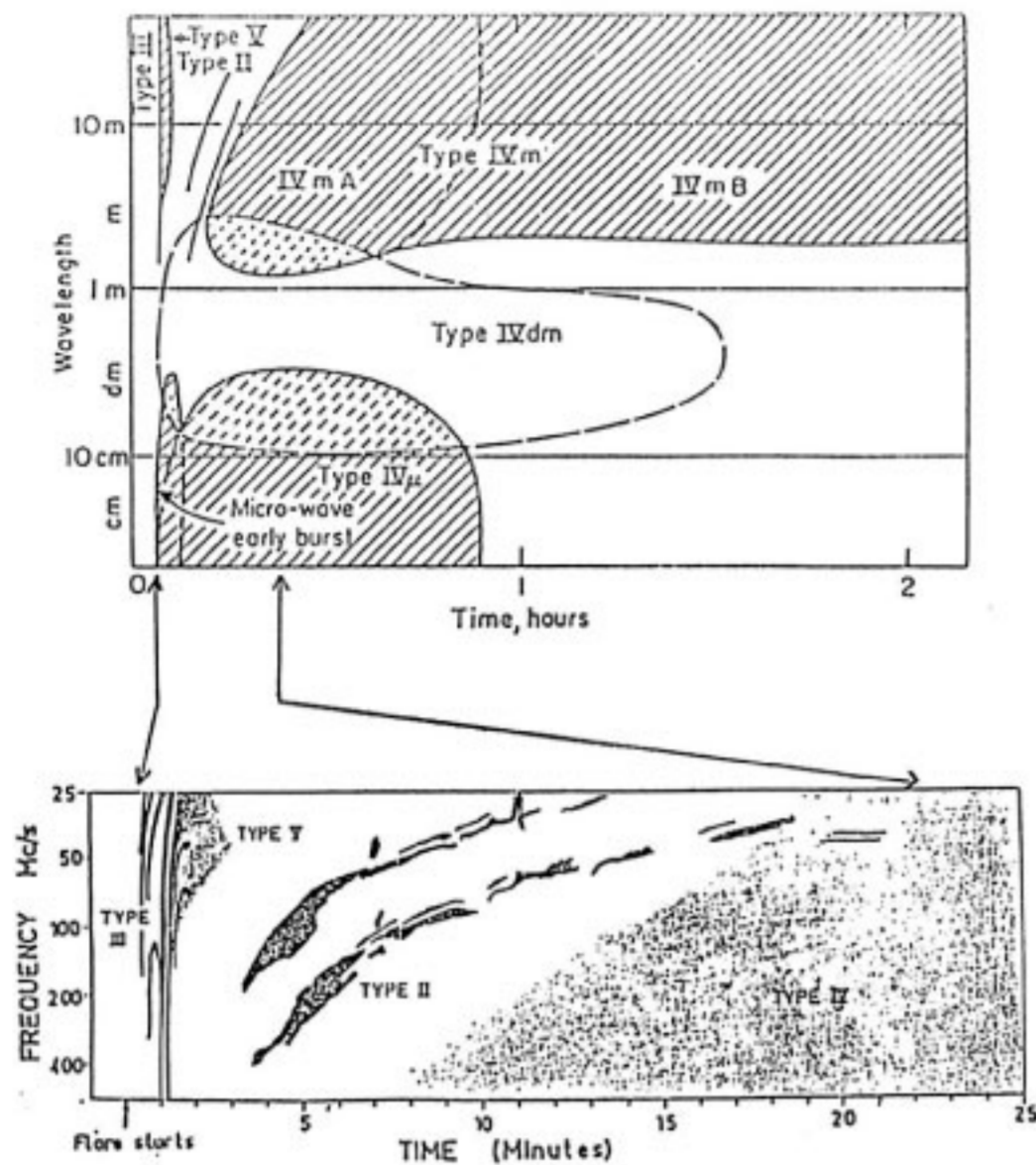
ンパルシブ型フレアより、ずっと長く続いて放射される。大部分のグラジュアル型フレアでは、1時間くらいから数時間にわたって放射が続く。

そこでつぎに、軟 X 線バーストによるインパルシブ型とグラジュアル型の定義が、必要となってくる。軟 X 線のグラジュアル型バーストは、LDE (Long Duration Event) と呼ばれ、惑星間プロトン、CME、惑星間衝撃波と、関連の深い現象としてみつけられた^{(6)~(8)}。しかし、軟 X 線バースト独自でも、LDE 独特の性質を持っていることが見つけられている⁽⁹⁾。LDE は線 X 像としては、大きなループ・システムであり、第2図に示されているように、LDE 以外の小さなループや、点状 X 線源 (大部分がインパルシブ型フレアに属する) とは、はっきりと異なったグループに属することが分かる。即ち、光球面からの高さも数万 km と高く、継続時間も100分以上と長い。

3. フレアのタイプとメートル波電波バースト

この章では、インパルシブ型とグラジュアル型のフレアの2つの型への分類に役立つメートル波電波バーストについて述べる。まず最初に、この章での説明に用いられる、いくつかのタイプの電波バーストの特徴について、簡単にまとめてみる。

Ⅱ型バースト：彩層から下層コロナにかけてのフレアの爆発そのもので衝撃波がつけられることがある。その波面にて発生する電子流で形成されたプラズマ不安定による電波放射が、Ⅱ型バーストと考えられる。約1000



第3図 メートル波電波バースト (II-V) 型の模式図。下図は、上図の部分的拡大図となっている。

km/s のオーダーの速度で、コロナ中を上昇して行く。

III型バースト：フレアの初期に起きる電子加速の結果、開かれた磁力線に沿ってコロナから惑星間空間へと逃げ出して行く電子流の引き起こすプラズマふく射。

IV型バースト：多分、衝撃波の通過に伴って加速された高エネルギー電子が、閉じた磁力線内に閉じ込められ、シンクロトロンふく射またはプラズマふく射によって、比較的長時間（ときには数時間）電波を、ふく射している。

V型バースト：フレア初期に短時間だけ起きる電子加速の結果、閉じた磁力線内に閉じ込められ、比較的短時間（2～3分以内）の連続的ふく射が起きる。ふく射強度の強いIII型バーストの直後に伴って起きることが多い。III型と共通の電子流が、閉じた磁力線か、乱れた電磁プラズマ内の波に捕獲されたものが起こすプラズマふく射と考えられているが、なぜ電子流が、かなりの時間、捕獲されるのか良く分かっていない。

電波のみの観測からも、上に挙げた電波バーストのうち、II型とIV型が関連して起こり、III型とV型が関連していることが知られている。これらのII～V型の観測例を表す模式図が、第3図に示されている。

つぎに、これらの電波バーストと2章で述べたインパルス型とグラジュアル型との関連について考えてみよう。この方面の研究で、最も多数のデータの統計を行ったのが、Cane et al. (1986)⁽⁴⁾である。彼らは、1978年

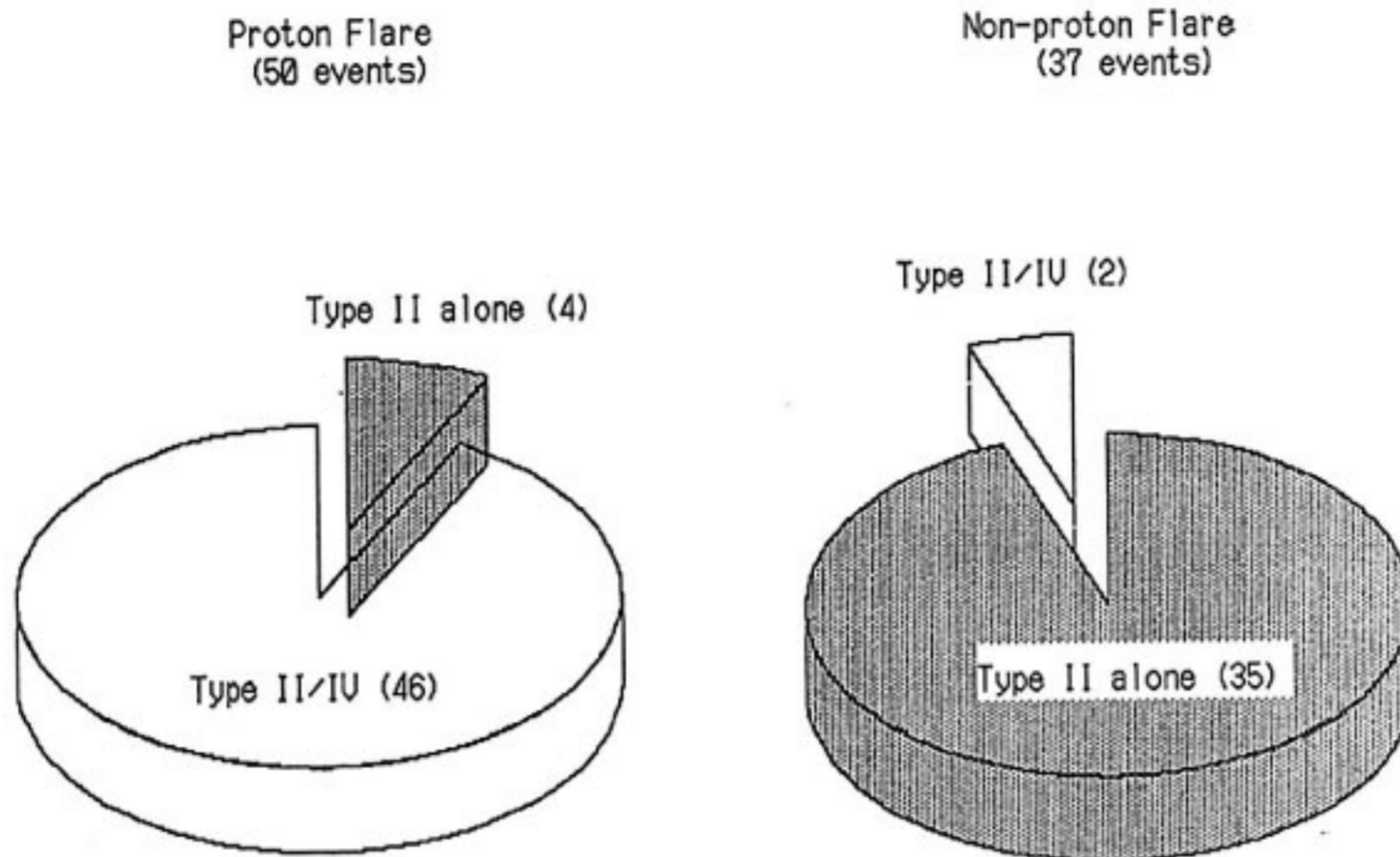
9月から31ヵ月に起こったメートル波電波バーストについて調べて、661個のイベントについての結果を得ている。最も顕著な結果は、III/V型が同時に起きたイベントとII/IV型が同時に起きたイベントは、重ならないことである。彼らによって調査された661個のイベントのうち、III/V型とII/IV型が重なって同じイベントの中で起きた例は、僅かに9例(1.4%)のみである。このように、フレアに關係の深いII～V型のメートル波バーストが、全部揃って起きるイベントのことは、「完全な電波イベント」(Complete Radio Event)と呼ばれていて⁽¹⁰⁾、かなり珍しいイベントとされている。Cane et al. (1986)⁽⁴⁾によって調べられた結果でも、1978年9月～1983年12月の間に、何千個という電波バーストの中に僅か22例しか見つかっていない。これら22例の完全な電波イベントが、インパルス型かグラジュアル型かについては、一つ一つのフレアに両方の型が、共存しているように見える。では、この種のバーストだけは、分類の出来ない特別なイベントなのだろうか？ この答を得るには、個々のフレアをインパルス型とグラジュアル型とに分類する場合の定量化を、更に厳密に行う必要があり、今後の問題として残されている。しかし、これらの、ごく少数の複合型イベントを除くと、フレア・イベントというのは、本質的には、インパルス型とグラジュアル型の2種類に、分類されてしまうというのが、この小論で主張したい主要な点である。

4. 議論及びまとめ

前の章までの議論と、その関連現象をまとめたのが、第1表である。この表で気がつくことは、惑星間空間を経て、地球上の磁気嵐、SC、PCA等に影響を及ぼすような現象は、すべてグラジュアル型の方に属していることである。このことから従来のプロトン・フレアとか、惑星間空間衝撃波や磁気雲を介して地球で見られる現象

第1表

グラジュアル型フレア	インパルス型フレア
LDE (Long Duration Event) in Soft X-ray (>1 hour)	Impulsive Soft X-ray (<1 hour)
CME, IP—shock wave	
Filament Eruption	
Type II/IV Burst	Type II (alone) Burst Type III/IV Burst
Gradual Hard X-ray (>10 min.)	Impulsive Hard X-ray (<10 min.)
Proton Flare	Electron-rich Particle Event



第4図 II型バーストのうち、惑星間プロトンを伴うフレアと伴わないフレアに分けたとき、各々のグループについて、IV型バーストが起きたかどうかを調べた結果を示す。プロトン・フレアでは、IV型バーストを伴うものが圧倒的に多いことが分かる。

を予報する為には、太陽面で起きたフレアが、グラジュアル型かどうかを見きわめさえすれば、よいことになる。

ところで、第1表に分類された種々の現象の中で、両タイプの違いを最も、はっきり示すのは、メートル波バーストによる分類である。ただし、唯一の例外は、II型バーストである。II型は、グラジュアル型のみならずインパルス型イベントにも、よく見られることがあるので、両型に属する例外的現象のようにも考えられる。しかし、各々の型に起きたII型バーストを、もう少し注意深く調べてみると、インパルス型に起きたものは、継続時間が半分くらいで短いとか、ダイナミック・スペクトル上で、より低い周波数の方まで伸びていることは少ないとか、かなりの差異が見られる。その理由については、今後の研究に待ちたい。現在のところ、最も大きな差（インパルス型とグラジュアル型の各々に分類されたII型バーストの性質の違い）は、やはり第1表にも示されているようにIV型が同時に起こるか、またはII型のみが単独で起こるかの差である。第4図は、ある期間に起きたII型バーストについて、まず惑星間プロトンが観測されたかどうかを調べ、プロトン・フレアと非プロトン・フレアに分類し、今度は、各々について、IV型バーストが伴っていたかどうかを調べたものである。この図からも、グラジュアル型の大きな特徴である惑星間プロトンが伴うフレアでは、IV型も同時に起こることが多いのが分かる。

上の統計結果と、第1表の意味するところは、惑星間で観測されるようなプロトンは、CME というピストン

に押され、惑星間に出ても衰えないような衝撃波で加速される。一方、CME が放出された後には、コロナでは、「フレア後期にみられる磁気ループ・システム」(Postflare Loop System, LDE の実体) を発生させるような、大規模な磁力線の繋ぎ変わりが起こり、光学的フレアが終わった後でも、エネルギー放出と、粒子加速が続き、IV型バーストが観測されることになる。他方、インパルス型のフレアは、多分、閉じた磁場の中で起こり、CME は放出しないので、この場合は衝撃波のタイプも爆風波 (Blast Wave Shock) 的となり、閉じた磁気ループの中でのみ粒子を加速するので、いわゆるプロトン・フレア (惑星間空間でプロトンが検出される) とは、ならない。この場合II型バーストも、硬X線バーストも、比較的短時間で終わる。

参考文献

- (1) Ohki, K., Takakura, T., Tsuneta, S., and Nitta, N., "General Aspect of Hard X-ray Flares Observed by Hinotori: Gradual Burst and Impulsive Burst", *Solar Phys.*, **86**, p. 301, 1983.
- (2) Bai, T., "Two Class of Gamma-Ray/Proton Flares: Impulsive and Gradual", *Ap. J.*, **308**, p. 912, 1986.
- (3) Kahler, S. W., "Radio Burst Characteristics of Solar Proton Flares" *Ap. J.*, **261**, p. 710, 1982.
- (4) Cane, H. V., McGuire, R. E., and von Rosenvinge, T. T., "Two Classes of Solar Energetic

- Particle Events Associated with Impulsive and Long-Duration Soft X-ray flares", *Ap. J.*, **301**, p. 448, 1986.
- (5) Takakura, T., Tanaka, K., and Hiei, E., "High Temperature Phenomena in Flares", *Adv. Space Res.* **4**, No. 7, p. 143, 1984.
- (6) Sheeley, N. R., and other 13 authors, "Coronal Changes Associated with a Disappearing Filament", *Solar Phys.*, **45**, p. 377, 1975.
- (7) Kahler, S., "The Morphological and Statistical Properties of Solar X-ray Events with Long Decay Times", *Ap. J.*, **214**, p. 891, 1977.
- (8) Care, H. V. and Stone, R. G., "Type II Solar Radio Bursts, Interplanetary Shocks, and Energetic Particle Events", *Ap. J.*, **282**, p. 339, 1984.
- (9) Pallavicini, R., Serio, S., and Vaiana, G. S., "A Survey of Soft X-ray Limb Flare Images: The Relation between Their Structure in the Corona and Other Physical Parameters", *Ap. J.*, **216**, p. 108, 1977.
- (10) Wild, J. P., Smerd, S. F., and Weiss, A. A., "Solar Bursts", *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **1**, p. 291, 1963.

