

宇宙環境予報におけるマイクロ波の役割： プロトンフレアの主成分解析

柴崎清登*

ROLES OF MICROWAVE DATA IN SPACE ENVIRONMENT FORECASTING: PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF PROTON FLARES

By

Kiyoto SHIBASAKI

A correlation study has been done among solar flare observables associated with proton events. The principal component analysis method is used for the study to find the relationships among observables independent of flare intensities. The first principal component corresponds to the flare intensity, and the following components are independent of the first component. Using these components, we can study the statistical relationships among observables without being disturbed by the "Big Flare Syndrome" hypothesis proposed by Kahler⁽¹⁾.

1. 序 論

宇宙環境予報に於けるマイクロ波データの役割としては、バーストのマイクロ波スペクトルとプロトンフラックスとの関係 (U型バースト, Castelli et al.⁽²⁾等), プロトンセンターとS成分のフラックス比 (Tanaka and Kakinuma⁽³⁾), 円偏波の空間分布 (Tanaka and Enome⁽⁴⁾) との関係等である。

ここでは多変量解析の手段を用いて、マイクロ波強度、プロトン強度を含む更に一般的な関係をさぐる。

太陽フレア現象に伴う観測量間の定量的相関を議論する場合、Kahler⁽¹⁾の提唱している Big Flare Syndrome (BFS) 仮説 (「エネルギー量に関わる現象は大きなフレアにおいては物理過程によらず強い」) があり、この BFS にまどわされずにプロトンフレアの統計的特徴を求める必要がある。

そのために多変量解析の一手法である主成分解析法を用いることを提案する。

2. 主成分解析の原理

主成分解析法については統計の教科書 (河川⁽⁵⁾; Murtagh and Heck⁽⁶⁾等) に示されているので、ここでは必要な部分のみをまとめる。

太陽フレアの場合、ひとつのイベントについて各種の観測量が対応しており、これらをイベント毎に並べる。

$$A = \{a_{ij} : i=1, \dots, n, j=1, \dots, m\}$$

a_{ij} : 観測データ

n : イベント数

m : 観測量の種類

次に観測量の線形結合:

$$Z_k = u_1 a_{k1} + u_2 a_{k2} + \dots + u_m a_{km}$$

$$\{k=1, \dots, n\}$$

を仮定し、 $\sum u_i^2 = 1$ の条件下で Z の分散が最大となる時、 Z を第一主成分と呼ぶ。第一主成分と相関がなく (第一主成分の係数ベクトル (\mathbf{u}) と直交する係数ベクトルを持つ) しかも分散が最大となる時、 Z を第二主成分と呼ぶ。以下同様。

Z の分散は以下のように表される。

$$(\mathbf{Xu})' (\mathbf{Xu}) = \mathbf{u}' \mathbf{X}' \mathbf{Xu} = \mathbf{u}' \mathbf{Su}$$

$$\mathbf{X} = \{x_{ij} = a_{ij} - \bar{a}_j\}$$

\bar{a}_j : 平均値

* 国立天文台豊川観測所
Toyokawa Observatory, National Astronomical
Observatory

$S = X' X$: 分散共分散行列

分散を最大にするためには,

$$\frac{\partial}{\partial u} \{u' Su - \lambda(u' u - 1)\} = 0$$

λ : 未定係数

である. よって,

$$Su = \lambda u$$

となる. つまり, 分散共分散行列 (S) の固有値 λ を大きさの順に並べ, 対応する固有ベクトル (u) を係数ベクトルとする Z が主成分である. 固有値 λ は各主成分の分散に相当する.

3. 主成分解析の手順

観測量はフレアによって桁数の大きく異なるものがあり, 真数で統計を行うと大きなフレアの影響が大きい. また, 主成分は観測量の一次結合となるので, それに物理的意味をもたせるために, 観測量の対数を用いることとする.

さらに, 次元及び変動範囲の異なる観測量を平等に扱うため, データの標準化を行う.

$$a_{ij}^* = (a_{ij} - \bar{a}_j) / s_j$$

\bar{a}_j : 平均値

s_j : 不偏標準偏差

標準化された変量の分散共分散行列は相関行列となる. 相関行列は, 対角成分が1の対称行列である.

次にこの相関行列の固有値と固有ベクトルを求め, 固有値の大きさの順に並べた固有ベクトルを係数ベクトルとして, 第1, 2……主成分を求める.

4. プロトンフレアのデータセット

ここで解析に用いたイベントは, Kahler⁽¹⁾が BFS 仮説を提案した時に用いたイベントのうち, データのそろったものである. 注目した観測量は, H α フレアの面積 (重要度), 20~40 Mev プロトン, 軟X線 (1~8 A), マイクロ波 10 cm, 3 cm の各ピークフラックスの5種類である. 第1表に用いたデータセットを示す.

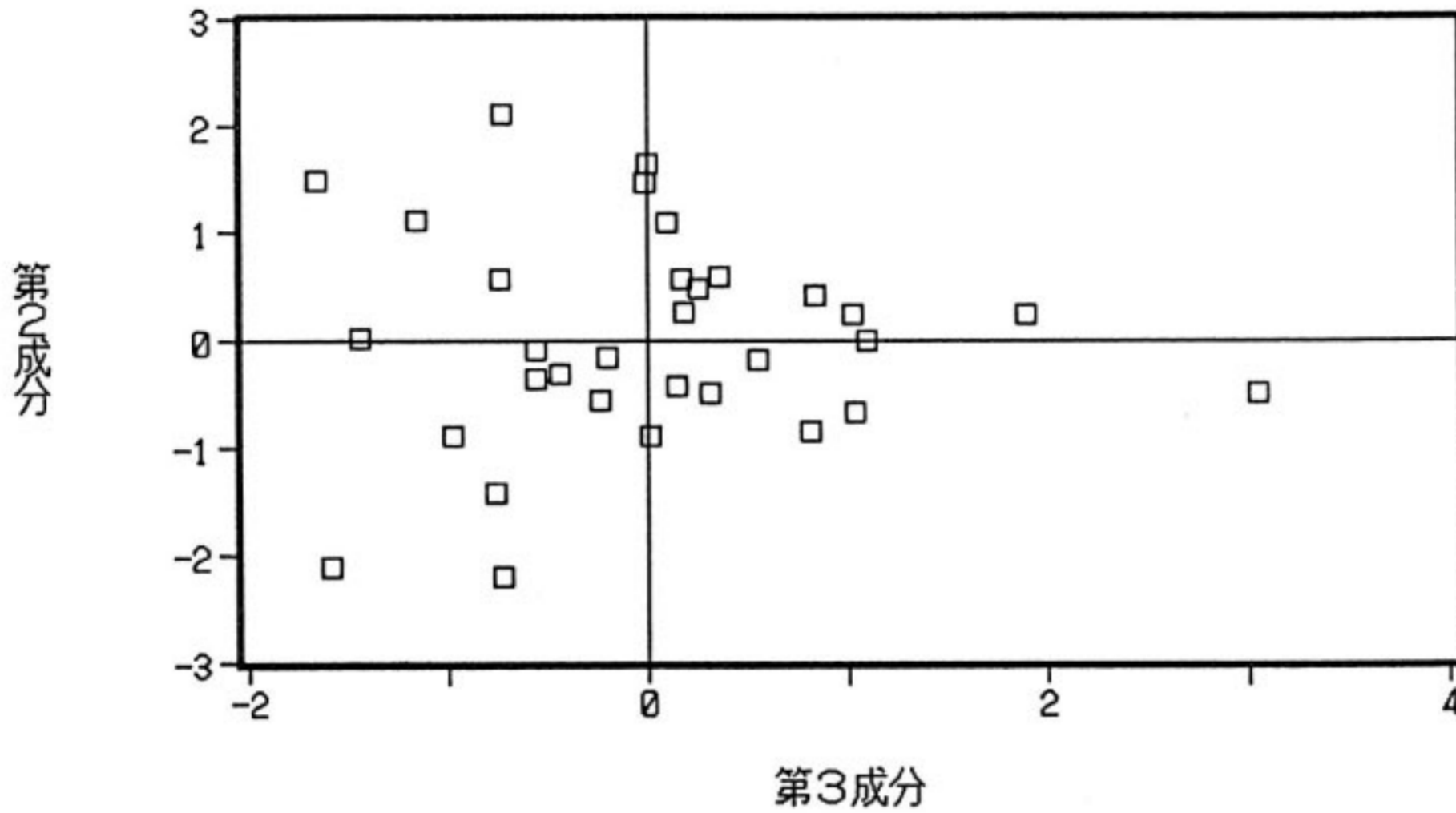
H α とプロトンフラックスのデータは Kahler⁽¹⁾の論文より引用した. 軟X線データは, SGD (Solar Geophysical Data) より, マイクロ波 10 cm, 3 cm データは豊川観測所の発行している太陽活動月報と SGD より引用した. H α フレアの面積として重要度を用いたので, このデータについては対数をとらなかった.

5. 解析結果

得られた相関行列を次に示す.

第1表 プロトンイベントリスト

EVENT No.	Ha 重要度	PROTON 1/(CM**2*sr*s*Mev)	Soft X W/m**2	10 cm SFU	3 cm SFU
1	3	1.5E-02		98	55
2	3	1.6E-01		330	200
3	2	2.5E-04		55	18
4	2	4.0E-02		250	200
5	2	1.6E-01	8.0E-04	1400	4000
6	0	1.8E+00		142	190
7	2	4.5E-01	2.0E-04	2500	9700
8	2	6.0E-01	2.0E-04	2500	3000
9	0	1.3E-01	6.0E-07	670	30
10	1	1.0E-03		470	2000
11	1	5.5E-01	1.3E-04	94	350
12	1	9.0E-04	4.0E-06	18	
13	1	8.0E-04	5.0E-07	49	10
14	1	6.0E-02	1.0E-04	223	1300
15	1	1.0E-01	9.0E-05	300	700
16	1	4.0E-03	2.0E-05	182	80
17	0	1.3E-03	1.0E-04	400	1600
18	1	4.5E-03	1.0E-04	600	3600
19	1	2.3E+00	2.0E-04	1000	3200
20		3.0E-02	2.0E-04	1900	4600
21	2	5.0E-01	6.0E-05	1200	600
22	3	3.5E+00	2.0E-04	400	2200
23	1	7.0E-04		104	250
24	1	5.0E-02	1.0E-04	560	1800
25	2	4.0E+00	1.0E-04	1200	4000
26	1	9.0E-03	1.0E-04	155	80
27	2	4.0E-02	3.0E-05	650	200
28	2	8.0E-03	1.0E-04	160	2000
29	1	8.0E+00	7.0E-05	620	280
30	1	9.0E-03	4.0E-05	144	280
31	2	1.2E-02	1.0E-04	300	130
32	3	8.0E-01	2.0E-04	1400	1200
33	3	2.5E+00	5.0E-04	3100	8000
34	1	1.0E+00	2.0E-04	1100	3800
35	3	7.0E-02	6.0E-05	123	60
36	2	4.3E-02	1.5E-03	2800	7500
37	3	1.0E+00	1.0E-04	380	620
38	2	4.0E-03		300	300
39	1	2.5E-01		108	400
40	2	4.0E-03		220	480
41	2	5.0E-02		118	45
42	0	9.0E-04			
43	0	6.0E-04		147	70
44	3	2.2E-02	2.0E-04	132	300
45	3	2.5E-02	1.0E-04	330	700
46	1	4.0E-04	1.5E-04	900	9400
47	2	2.2E+00	2.0E-04	3500	2200
48	1	2.6E-04		33	40
49	0	4.5E+00		490	1200
50	2	3.0E+00		39	20



第1図 第2, 第3成分の相関

-1.00	0.36	0.42	0.18	0.19
0.36	1.00	0.33	0.52	0.31
0.42	0.33	1.00	0.50	0.78
0.18	0.52	0.50	1.00	0.71
-0.19	0.31	0.78	0.71	1.00

変数の順序は, H α , プロトン, 軟X線, 10 cm, 3 cm である. 最大の相関値は軟X線と3 cmのピークフラックスが0.78である. Kahler⁽¹⁾がBFSの基準に用いたプロトンフラックスと軟X線フラックスの相関値は0.33で彼の得た値0.48より小さい. あいにく彼の論文には軟X線フラックスの値が掲載されていないので確認することはできない.

相関行列の固有値と固有ベクトルを固有値の大きさの順に以下に示す.

	固有値	固有ベクトル
第一成分	2.78	(0.30, 0.39, 0.51, 0.49, 0.52)
第二成分	0.97	(0.78, 0.37, -0.07, -0.27, -0.41)
第三成分	0.78	(-0.35, 0.69, -0.47, 0.37, -0.20)
第四成分	0.34	(0.39, -0.47, -0.47, 0.64, -0.03)
第五成分	0.13	(0.15, 0.11, -0.55, -0.38, 0.73)

第一成分は固有ベクトルの係数がすべて正であり, イベントの大きさを示している. 第二成分以降はこの成分と相関がゼロであるから, イベントの大きさに関係ない量である. よってこれらの成分を扱う限りにおいては, BFS 仮説に影響されることはない.

プロトンのフラックスが大きく関与している成分は第三成分である.

第三成分は軟X線やH α 面積に対するプロトンフラックスの大きさとマイクロ波のスペクトルに関する量であ

るが, 後者の寄与は前者に比べて小さい. よっておもに軟X線やH α フレアの面積に対するプロトンフラックスの過多を示す量と考えられる. この成分と他の成分との相関図を作ったところ, 第二成分との相関に顕著なものがみられた. 第1図に相関図を示す.

図によると第三成分 > 0.1の部分において第二成分の分散が小さくなっているのがみられる. よってこの部分について第二成分 ~ 0 とすると,

$$\log(F_{\text{プロトン}}) \sim 0.7 \cdot \log(F_{10\text{cm}}) + 1.1 \cdot \log(F_{3\text{cm}}) - 2.1 \cdot (\text{H}\alpha \text{ 重要度})$$

となり, プロトンフラックスの大きなフレアについてはマイクロ波強度とH α の面積の比がプロトンフラックスと関係を持つことが示される.

その他に, プロトンフラックスはあまり関与しないが, 第五成分の分散は0.13と非常に小さいので, ~ 0 とすると, 軟X線の強度とマイクロ波のスペクトルが関係していることが示される.

$$\log(F_{\text{soft-X}}) \sim 0.7 \cdot \log(F_{3\text{cm}}^{**2} / F_{10\text{cm}})$$

以上は統計的結果である. この結果の物理的解釈は今後の課題としたい. また, この解析方法ではデータのそろったイベントのみを扱うことになり, プロトンの検出されないイベントを含めることができない. 今後プロトンの検出されないイベントを含めた解析方法を考えたい.

参 考 文 献

- (1) Kahler, S. W., "The Role of the Big Flare in Correlations of Solar Energetic Proton Fluxes and Associated Microwave Burst Parameters",

- J. Geophys. Res., 87, pp. 3439-3449, 1982.
- (2) Castelli, J. P., Aarons, J. and Michael, G. A., "Flux Density Measurements of Radio Bursts of Proton-producing Flares and non Proton Flares", J. Geophys. Res., 72, pp. 5491-5498, 1967.
- (3) Tanaka, H. and Kakinuma, T., "The Relation between the spectrum of slowly varying component of Solar Radio Emission and Solar Proton Event", Rep. Ionosph. Space Res. Japan, 18, pp. 32-44, 1964.
- (4) Tanaka, H. and Enome, S., "The Microwave Structure of Coronal Condensations and its Relation to Proton Flares", Solar Phys., 40, pp. 123-131, 1975.
- (5) 河口至商, "多変量解析入門 I", 森北出版(株), 1973.
- (6) Murtagh, F. and Heck, A., "Multivariate Data Analysis", D. Reidel Publ. Co., 1987.

