

太陽活動サイクル22の期間内のフレア発生頻度

久保田諄¹、當村一朗²、時政典孝³

- 1) 大阪経済大学
- 2) 大阪府立工業高等専門学校
- 3) 兵庫県立西はりま天文台

Periodicity of the Occurrence of Solar Flare during the Activity Cycle 22

Jun KUBOTA¹, Ichiro TOHMURA², Noritaka TOKIMASA³

- 1) *Osaka University of Economics Institute Higashiyodogawa, Osaka 533, Japan*
- 2) *Osaka Prefectural College of Technology Neyagawa, Osaka 572, Japan*
- 3) *Nishi-harima Astronomical Observatory Sayo-cho, Hyogo 679-53, Japan*

E-mail: tokimasa@nhao.go.jp

(Received 1995 December 12)

Abstract

The time series of the daily rate for the occurrence of H_{α} and soft X-ray flares during the activity cycle 22 was analyzed. The 210 days periodicity in the northern hemisphere was most significant, while the 155 days periodicity, which was remarkable during the cycles 20 and 21, was minor in the cycle 22.

Key words: Solar activity, flare, sunspot

1. 序論

太陽面に現れる黒点やフレアの蝶型ダイアグラムには、これらの発生の時間的な周期性がはっきりと認められる。図1は太陽活動サイクル22の期間内(1986-1995年)に H_{α} 光で観測された重要度1以上のフレアの蝶型ダイアグラムである。縦軸は太陽面赤道を中心とした日面緯度で、N40-0-S40の範囲を示す。横軸は1985年から1995年までの期間の年月の経過を示す。この期間内に太陽面上に現れ、記録された重要度1以上のフレアの発生場所の緯度を日付に対してプロットしたものである。小さい点は重要度1、中円は重要度2、そして、大円は重要度3のフレアを示している。また、図2は同じ期間内の軟X線フレアの蝶型ダイアグラムである。小点はcクラス、中点はmクラス、そして、大点はxクラスの軟X線フレアを示す。

図3は鈴木美好氏の作成による、太陽活動サイクル22の同じ期間内の黒点の蝶型ダイアグラムである。これは一回の太陽自転内に現れた黒点の緯度範囲を縦の線で示している。これと図1および図2を比較すれば、黒点のダイアグラムと全く同様に、太陽活動サイクルの進行にともなって、高緯度から低緯度の方にフレアの発生緯度が移動して行く有様がわかる。つまり、フレアの発生は完全に黒点と関連していることを示して

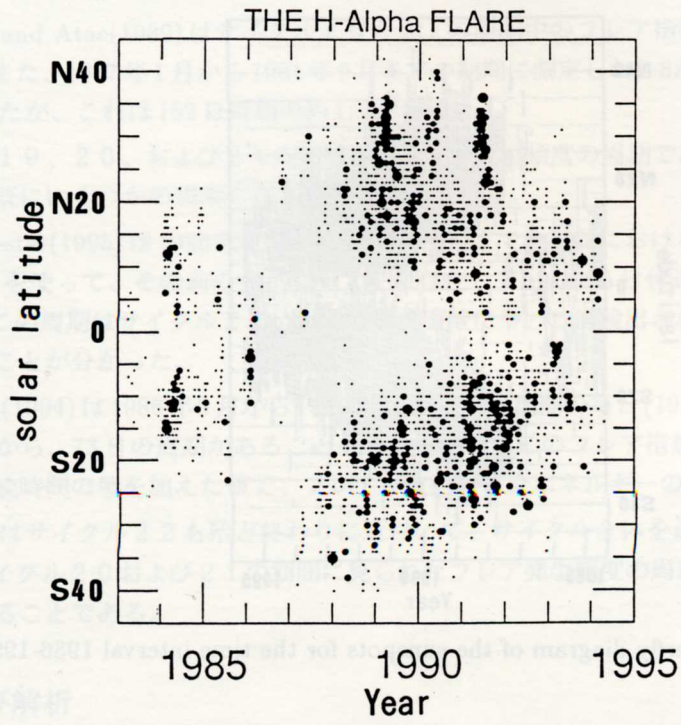


Fig. 1. The butterfly diagram of the H_{α} flares ($Imp \geq 1$) for the time interval 1986-1995.

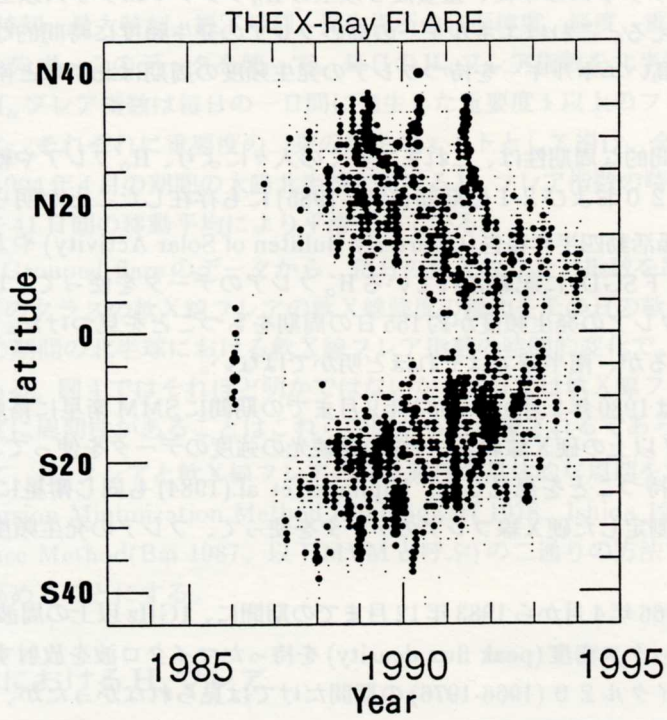


Fig. 2. The butterfly diagram for the soft X-ray flare for the time interval 1984-1994.

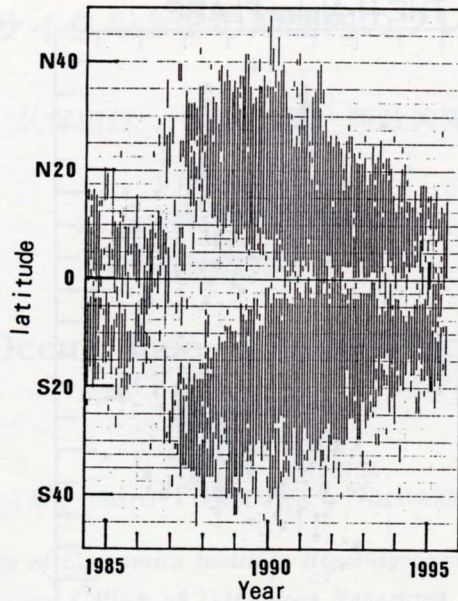


Fig. 3. The butterfly diagram of the sunspots for the time interval 1986-1995.

いる。これは Chistyakova and Chistyakov(1978)による H_{α} フレアの統計的な研究の結果とも一致し、ほとんど(95%以上)のフレアの発生位置が黒点とその近傍であることから考えると当然の結果である。

図1および図2の蝶型ダイアグラムの中に、重要度2以上の H_{α} フレアやmクラス以上の軟X線フレアによる縦縞のようなパターンが見える。これはエネルギーの高いフレアの発生頻度に時間的な周期のあることを示唆している。また、これらの高いエネルギーを持つフレアの発生頻度の周期は北半球と南半球で異なることも示している。

このようなフレア発生の時間的な周期性は、これまで多くの人々により、 H_{α} フレアや軟X線フレアのデータを使って、太陽活動サイクル20および21の期間(1965-1985)にも存在したことが明らかにされてきた。

Ichimoto et al.(1985)は太陽活動四半年報告(Quarterly Bulliten of Solar Activity)や太陽地球物理学データ(Solar Geophysical Data: 以下SGD)に記載されている H_{α} フレアのデータを使って、1965-1985年の期間に発生した重要度1以上の H_{α} フレアの発生頻度が約155日の周期をもつことを見つけた。この周期は北半球で発生したフレアでは顕著であるが、南半球ではそれほど明かではない。

また、Rieger et al.(1984)は1980年2月から1983年9月までの期間にSMM衛星に搭載された γ 線スペクトロメーターで観測した300keV以上の硬X線および γ 線の連続光の強度のデータを使って、 γ 線フレアの発生頻度が154日の著しい周期性を持つことを発見した。Kiplinger et al.(1984)も同じ衛星に搭載された硬X線バーストスペクトロメーターで測定した硬X線フレアのデータを使って、フレアの発生頻度の周期158日を求めている。

Bogart and Bai(1985)は1966年4月から1983年12月までの期間に、1GHz以上の周波数で10太陽フラックス単位より大きいピークフラックス密度(peak flux density)を持ったマイクロ波を放射するフレアを統計的に解析した。152日の周期はサイクル20(1966-1976)の期間だけでは見られなかったが、サイクル20と21を通じて見ると存在していることが確認された。

また、サイクル19の期間中に観測された主要フレア(major flare)の発生頻度の解析から、Bai(1987)は51日の周期を見つけたが、これはサイクル20と21のフレアの発生頻度から求めた152日周期の約1/3である。

さらに、Ozguç and Ataç(1989)はサイクル20と21の期間中のフレア指数を使って、152日周期の存在を確認している。また、1977年1月から1981年9月までの期間に測定した1-8Å X線の時系列データからは78日の周期が得られたが、これは152日周期の約1/2である。

以上はサイクル19、20、および21の期間中のフレア発生頻度の周期であるが、サイクル22中のフレア発生についても既にいくつかの周期の存在が報告されている。

Oliver and Ballester(1995)は1986年9月から1993年7月までの期間における太陽両半球の毎日の黒点面積のデータ(2528個)を使って、その前のサイクル21に存在していた155日付近の周期が見られるかどうかを調べた。しかし、この周期はサイクル22における黒点面積については検出されず、代わって、85日あたりの短い周期性のあることが分かった。

Ozguç and Ataç(1994)は1986年9月から1991年12月までの期間の毎日(1948日)のフレア指数の時系列のパワースペクトルから、73日の周期があることを示している。このフレア指数は毎日、発生するそれぞれのフレアの強度と継続時間の積を加えた値で、フレアが放射する全エネルギーの指標値であると考えられる。

この研究の目的はサイクル22も殆ど終わりに近付いて、サイクル全体を通じたデータの解析が可能となっているので、サイクル20および21の期間に見られたフレア発生頻度の周期性がこのサイクルにも存在したかどうかを調べることである。

2. データおよび解析

われわれが時系列の解析に使ったデータは1986年1月から1994年4月までの期間に発生した重要度1以上の H_{α} フレアである。アメリカ商務省大気海洋局(NOAA)発行のSGDに所載のGrouped flareの章には、観測された H_{α} フレアの発生時刻、最大時刻、終了時刻、発生場所の日面緯度、経度、重要度および軟X線強度などの値が記載されている。まず、このデータを使って、毎日の H_{α} フレア指数を北半球と南半球でそれぞれ別に計算した。われわれの H_{α} フレア指数は毎日の一日間に発生した重要度1以上のフレアについて、フレアの発生個数を重要度別に数え、それぞれに重要度の二乗の数をウェイトとして掛け、全部を加え合わせた値である。図4は1986年1月-1994年4月の期間の太陽北半球における H_{α} フレア指数の時間的変化を示す。ただし、この図では毎日の指数を41日間の移動平均により平滑化している。

次に同じSGDのGrouped flareのデータから、毎日の軟X線フレア指数を計算した。北および南半球別に、毎日のC、M、Xのクラスの軟X線フレアの軟X線強度の総和をその日の軟X線フレア指数とした。図5は図4と同様に、同じ期間の北半球における軟X線フレア指数の時間的変化で、41日間の移動平均による平滑化を行った曲線である。図4ではそれほど明かではないが、図5では軟X線フレア指数の周期性は顕著である。フレアの発生頻度に周期性があることはこれらの図からも示唆されるであろう。

周期解析を行って、 H_{α} フレアと軟X線フレアの発生頻度の具体的な周期を求める。パワースペクトルの計算はPhase Dispersion Minimization Method (Stellingwerf 1978、Ishida 1993 以下PDMMと呼ぶ)およびMaximizing Variance Method(Bai 1987、以下MVMと呼ぶ)の二通りの方法で行って互いに比較し、得られた周期の信頼度を高めることにする。

2-1. 南北両半球における H_{α} フレア

図6は1986年1月-1994年4月の期間における北半球の H_{α} フレア指数の時系列のPDMMパワースペクトル、同じく図7もMVMパワースペクトルである。また、南半球における H_{α} フレア指数の時系列のパワースペクトルは図8(PDMM)および図9(MVM)に示している。図6と図7から明らかなように、サイクル22の北半球では H_{α} フレアの発生頻度に140、210および280日の周期がある。しかし、図8と図9を見れば、南半球

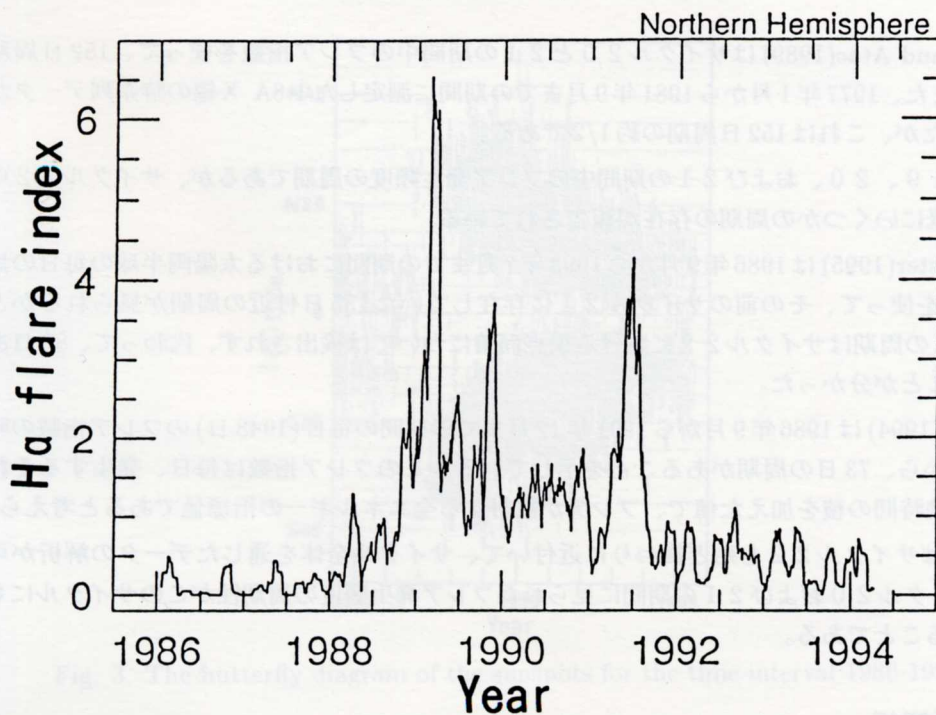


Fig. 4. The time change of the H α flare index in the northern solar hemisphere during the solar activity cycle No.22 using 41 days moving averaged values.

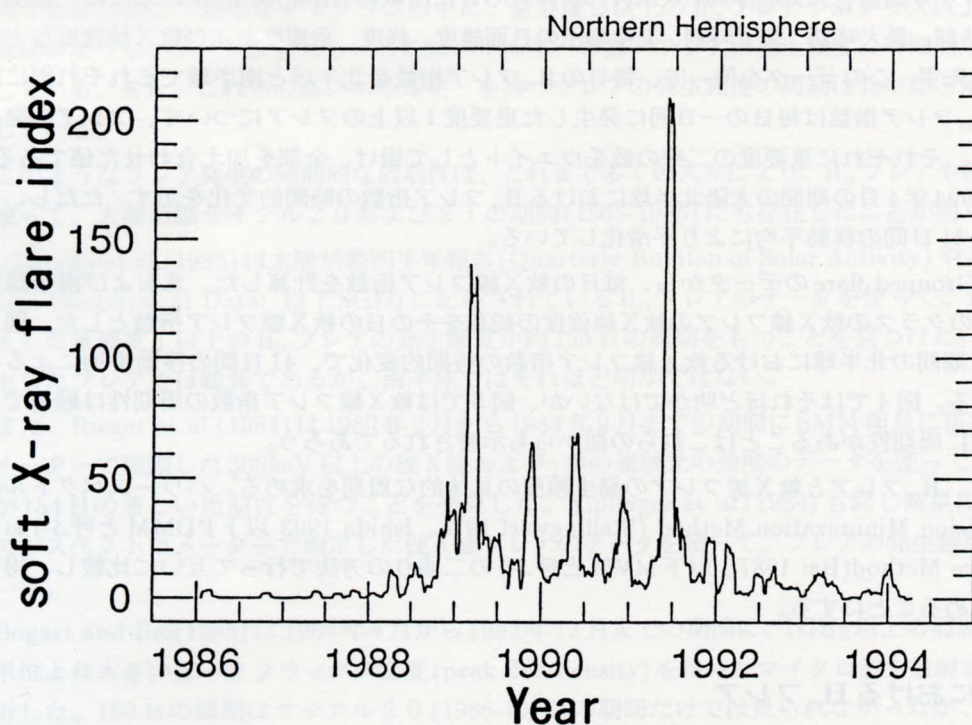


Fig. 5. The time change of the soft X-ray flare index in the northern hemisphere for the time interval 1986-1994 using 41 days moving averaged values.

Northern Hemisphere(1986.1-1994.4)

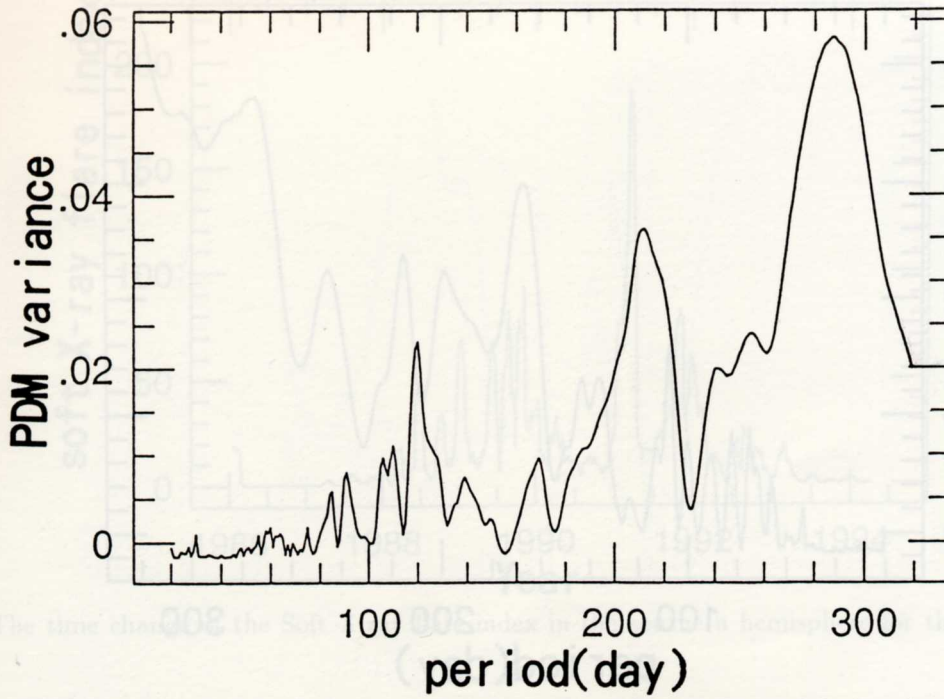


Fig. 6. PDM spectrum of the H_{α} flare index in the northern hemisphere during the cycle 22.

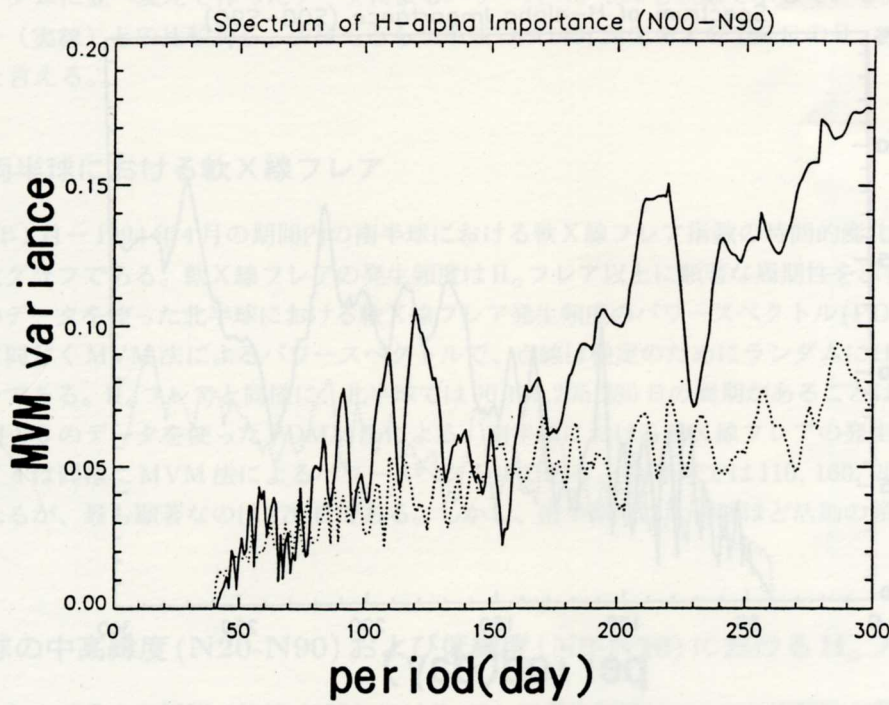


Fig. 7. MVM spectrum of the H_{α} flare index in the northern hemisphere during the cycle 22.

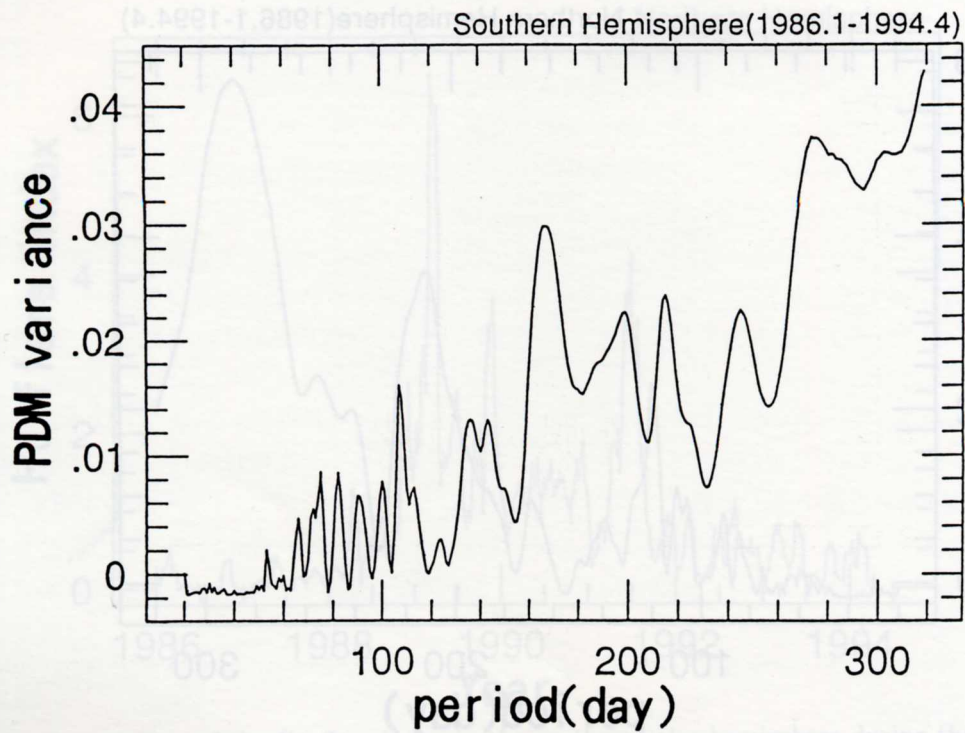


Fig. 8. PDM spectrum of the H_{α} flare index in the southern hemisphere during the cycle 22.

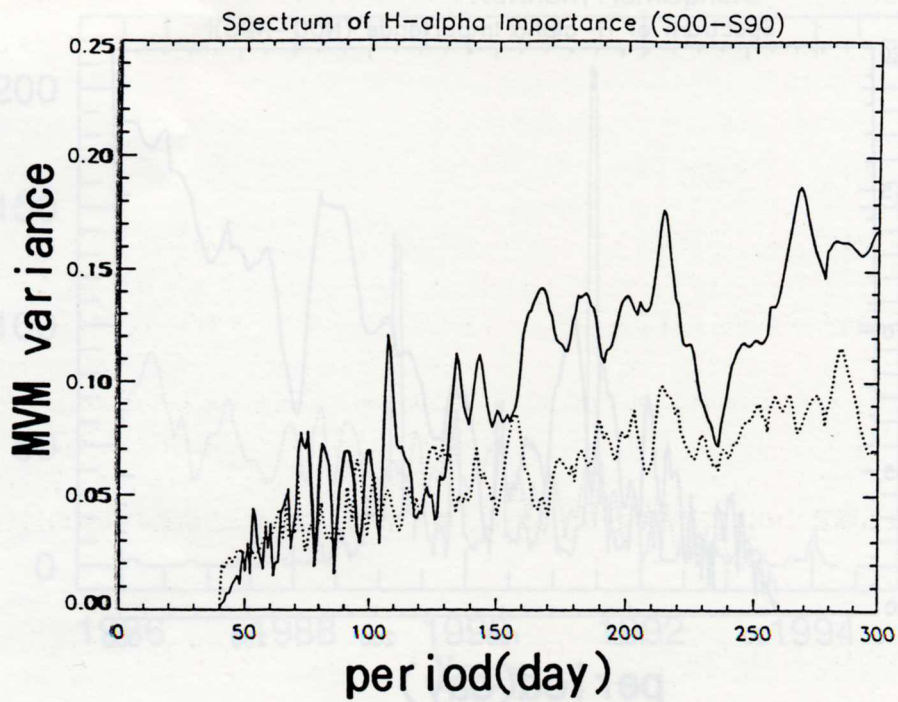


Fig. 9. MVM spectrum of the H_{α} flare index in the southern hemisphere during the cycle 22.

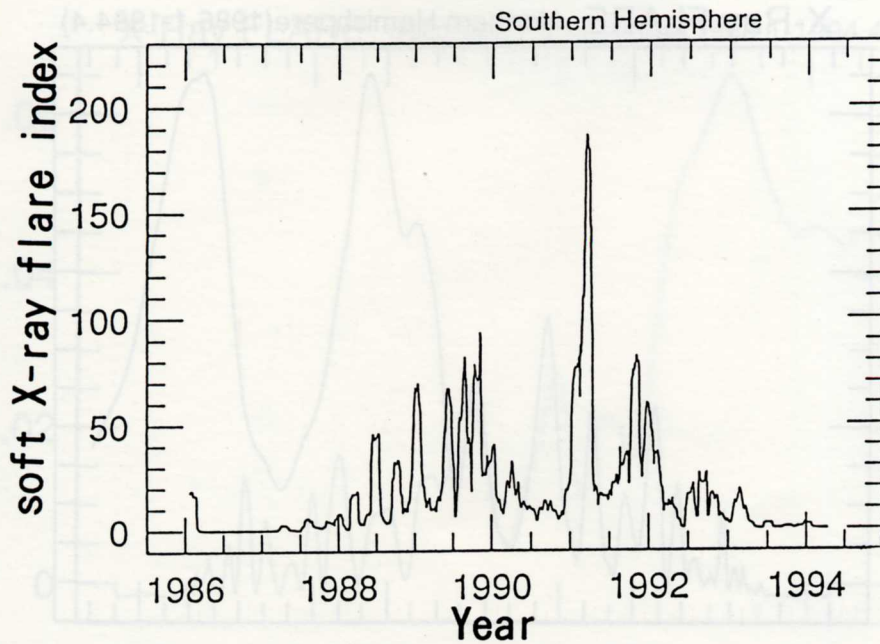


Fig. 10. The time change of the Soft X-ray flare index in the southern hemisphere for the time interval 1986-1994.

では110, 160, 210および270日の周期を示すピークが見られるけれども、特に顕著な周期の存在を示す大きいピークはないと言える。MVM法で計算した図7と図9では結果の検定のために、元の時系列データから日付の順序をランダムに並べ変えて作ったデータによるパワースペクトルも点線で示している。これと H_{α} フレア指数のパワー(実線)との比較から、少なくとも北半球では140, 210, および280日の H_{α} フレア発生頻度の周期性があると言える。

2-2. 南北両半球における軟X線フレア

図10は1986年1月-1994年4月の期間内の南半球における軟X線フレア指数の時間的変化で、41日の移動平均を行ったグラフである。軟X線フレアの発生頻度は H_{α} フレア以上に顕著な周期性を示すことがわかる。図11は図5のデータを使った北半球における軟X線フレア発生頻度のパワースペクトル(PDMM法)である。また、図12は同じくMVM法によるパワースペクトルで、点線は検定のためにランダムに日付を変えたデータによるパワーである。 H_{α} フレアと同様に、北半球では90, 135, 205, 280日の周期があることは明かである。また、図13は図10のデータを使ったPDMM法による、南半球における軟X線フレアの発生頻度のパワースペクトル、図14は同様にMVM法によるパワースペクトルである。南半球では110, 160, 200, 270日などのピークが見られるが、最も顕著なのは270日である。しかし、南半球では北半球ほど活動の頻度の周期性は明かではない。

2-3. 北半球の中高緯度(N20-N90)および低緯度(N0-N20)における H_{α} フレア

サイクル20、および21の期間(1965-1985)には H_{α} フレア発生頻度に155日の周期性が顕著であった。しかし、サイクル22ではこの周期は前のサイクルほど明かではない。また、複数の周期がパワースペクトルに見られるのは奇妙である。この原因は図1および2を見ると、太陽面の高緯度と低緯度、および、サイクルの上昇期と下降期で、フレアの発生頻度に異なった周期性のあることから見当がつく。それ故、両半球におい

X-Ray FLARE Northern Hemisphere(1986.1-1994.4)

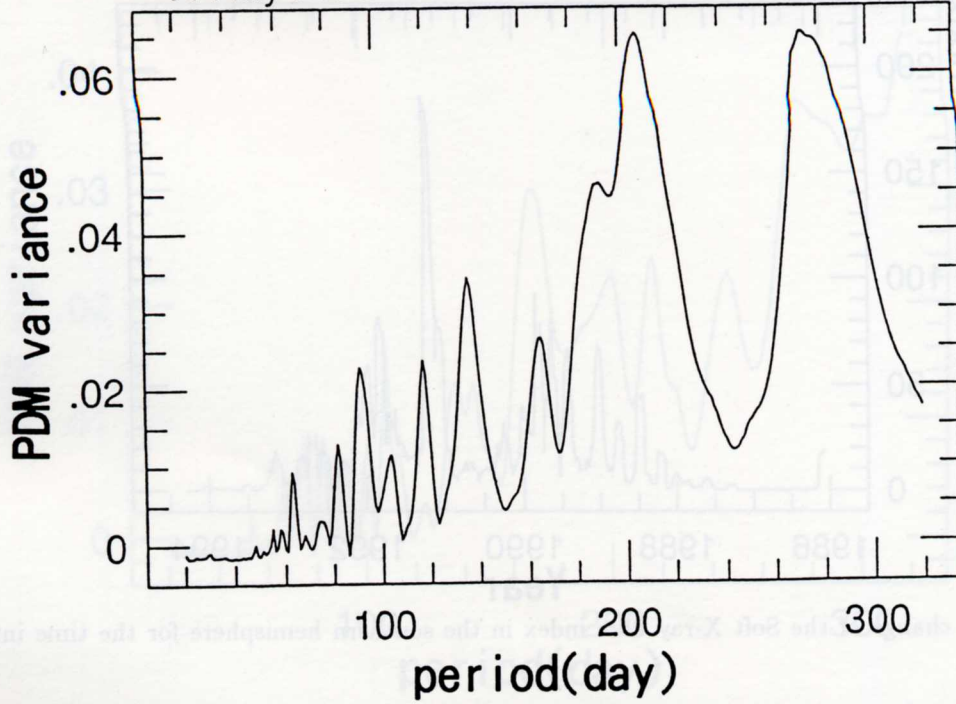


Fig. 11. PDM spectrum of the soft X-ray flare index in the northern hemisphere during the cycle 22.

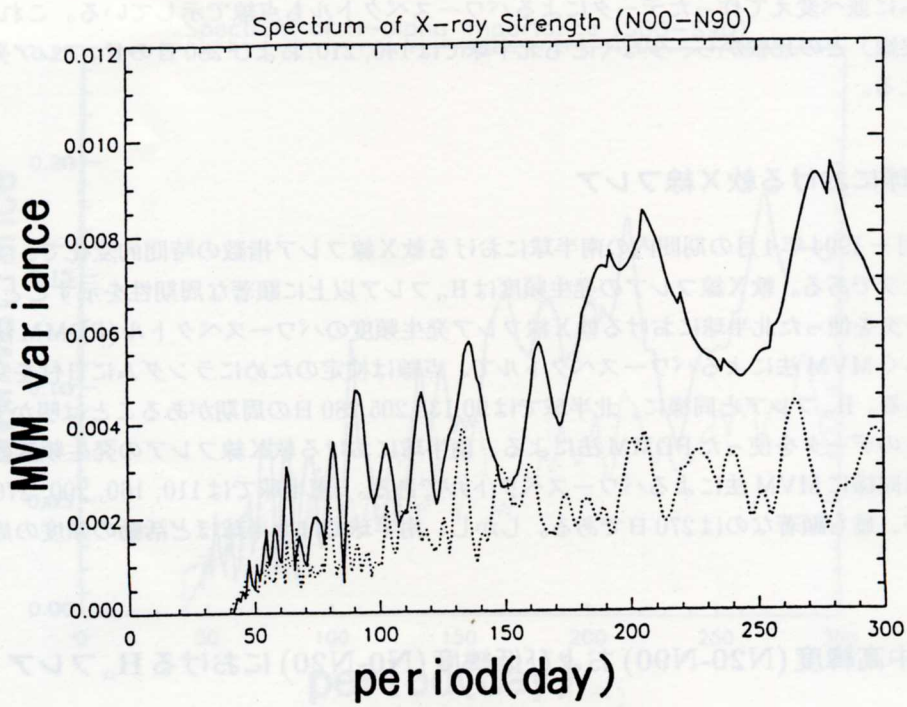


Fig. 12. MVM spectrum of the soft X-ray flare index in the northern hemisphere during the cycle 22.

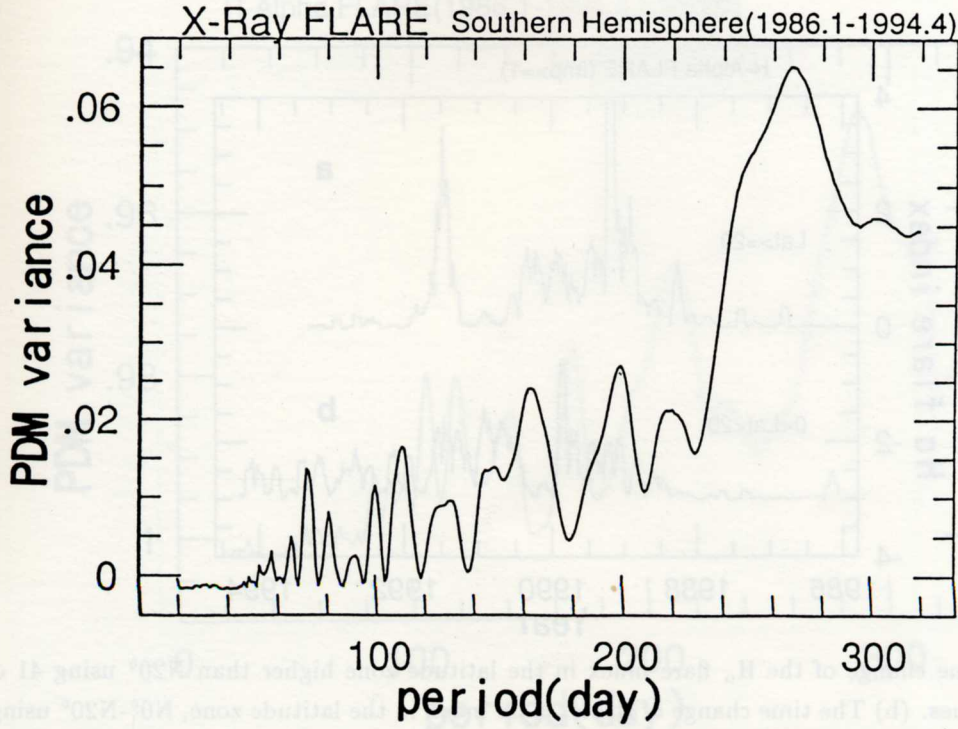


Fig. 13. PDM spectrum of the soft X-ray flare index in the southern hemisphere during the cycle 22.

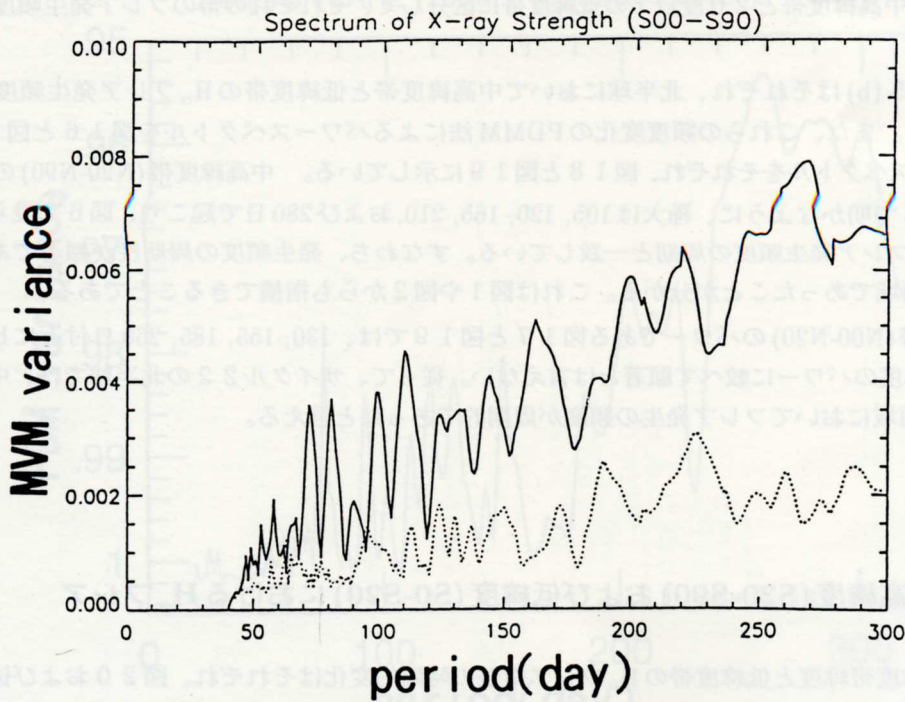


Fig. 14. MVM spectrum of the soft X-ray flare index in the southern hemisphere during the cycle 22.

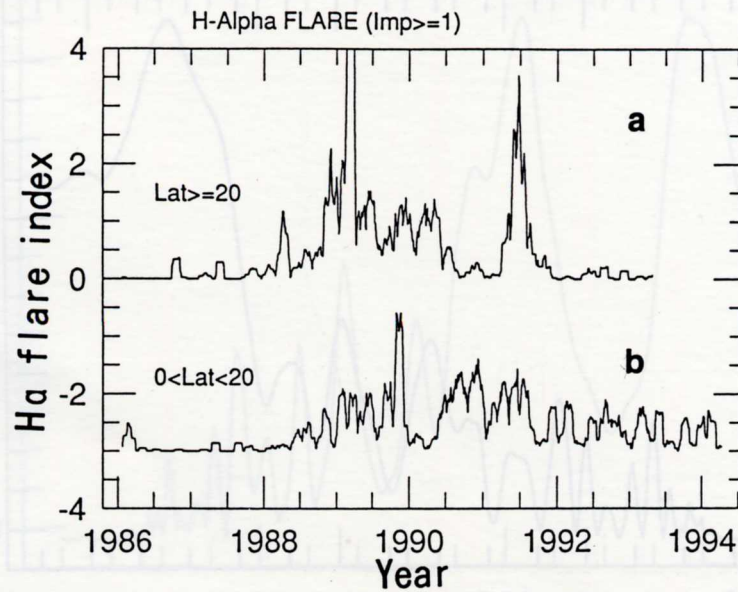


Fig. 15. (a) The time change of the H_{α} flare index in the latitude zone higher than $N20^{\circ}$ using 41 days moving averaged values. (b) The time change of the H_{α} flare index in the latitude zone, $N0^{\circ}$ - $N20^{\circ}$ using 41 days moving averaged curve.

て、緯度 20 度以上の中高緯度帯と 20 度以下の低緯度帯に区分して、それぞれの帯のフレア発生頻度の周期を求めることにする。

図 15 (a) と図 15 (b) はそれぞれ、北半球において中高緯度帯と低緯度帯の H_{α} フレア発生頻度の時間的な変化を示している。また、これらの頻度変化の PDMM 法によるパワースペクトルを図 16 と図 17 に、MVM 法によるパワースペクトルをそれぞれ、図 18 と図 19 に示している。中高緯度帯 ($N20$ - $N90$) のパワーである図 16 と図 18 で明かなように、極大は 105, 120, 165, 210, および 280 日で起こり、図 6 で見られた北半球全体における H_{α} フレア発生頻度の周期と一致している。すなわち、発生頻度の周期性が顕著であったのは中高緯度帯の活動領域であったことが分かる。これは図 1 や図 2 から指摘できることである。

しかし、低緯度帯 ($N00$ - $N20$) のパワーである図 17 と図 19 では、130, 155, 185, 260 日付近にピークがあるが、中高緯度帯緯度のパワーに較べて顕著とは言えない。従って、サイクル 22 の北半球では、中高緯度帯 ($N20$ - $N90$) の活動領域においてフレア発生頻度が周期的であったと言える。

2-4. 南半球の中高緯度 ($S20$ - $S90$) および低緯度 ($S0$ - $S20$) における H_{α} フレア

南半球における中高緯度帯緯度と低緯度帯の H_{α} フレア指数の時間的な変化はそれぞれ、図 20 および図 21 に示している。また、MVM 法によるそれぞれのパワースペクトルは図 22 と図 23 に掲げている。中高緯度帯では 110, 135, 165, 205, 220, 270 日のピークがあり、低緯度帯では 110, 145, 180, 210, 280 日のピークが見られる。サイクル 22 の南半球ではフレアの発生頻度の変化は非常に複雑で、特に顕著な周期が中高緯度帯あるいは低緯度帯に存在するとは言えない。

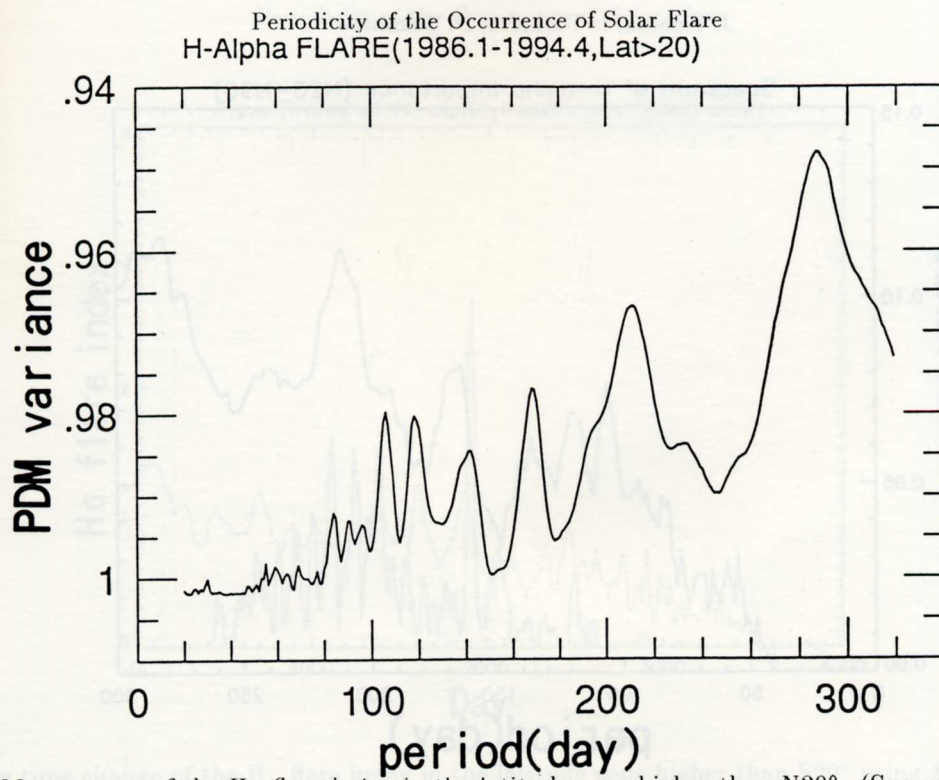


Fig. 16. PDM spectrum of the H_{α} flare index in the latitude zone higher than $N20^{\circ}$. (See curve (a) of Fig. 15.)

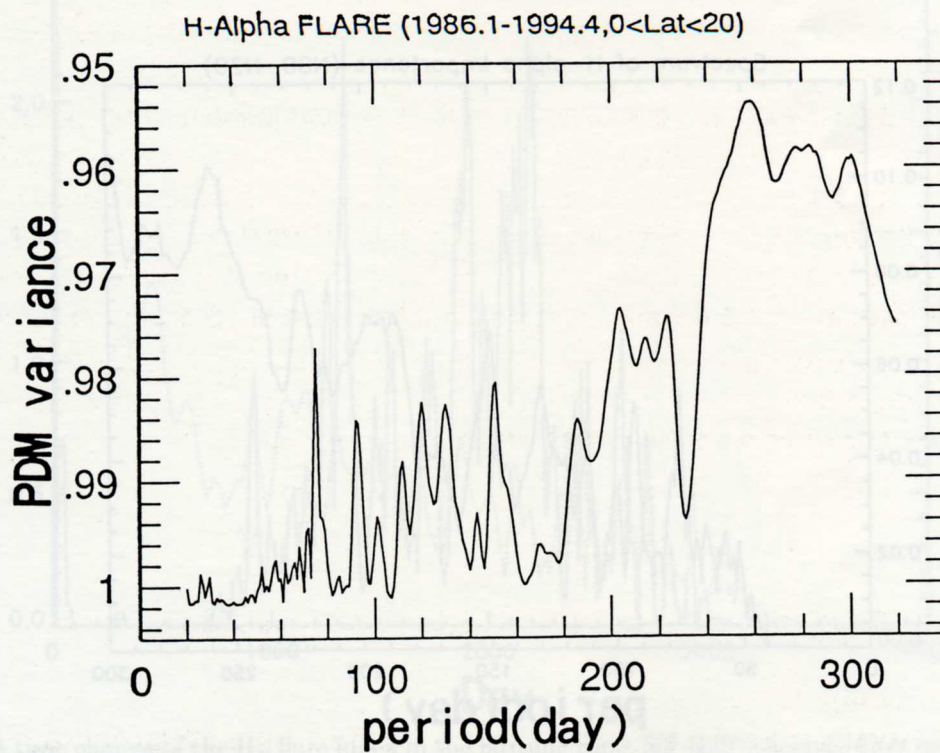


Fig. 17. PDM spectrum of the H_{α} flare index in the latitude zone, $N0^{\circ}$ - $N20^{\circ}$. (See curve (b) of Fig. 15.)

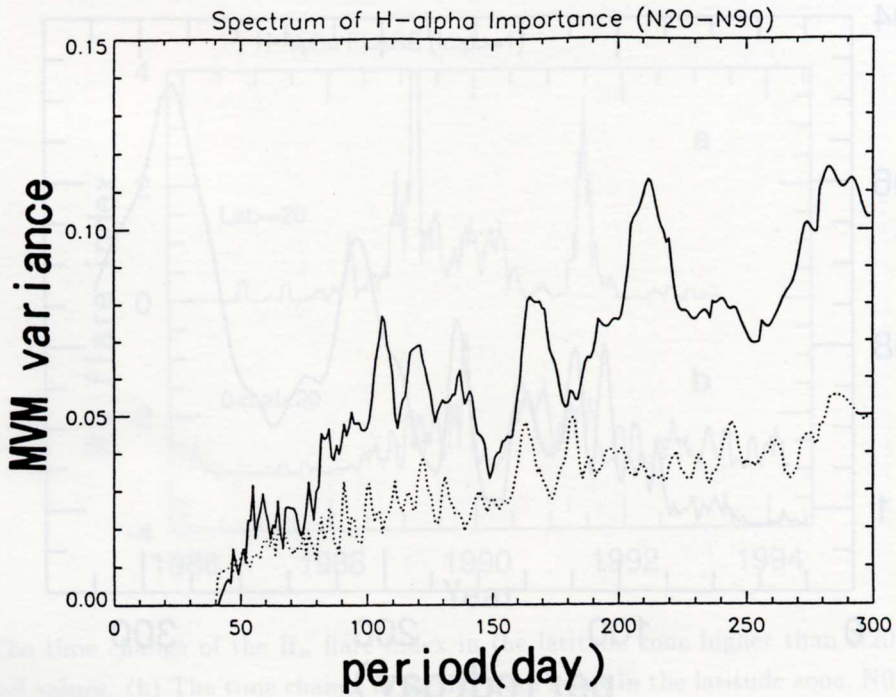


Fig. 18. MVM spectrum of the H_{α} flare index in the latitude zone higher than $N20^{\circ}$.

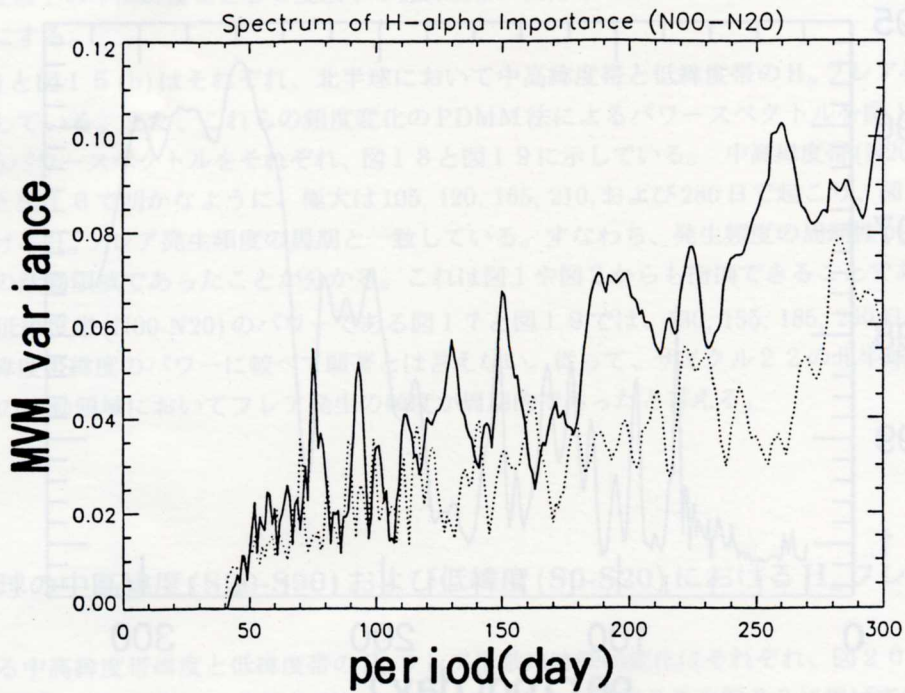


Fig. 19. MVM spectrum of the H_{α} flare index in the latitude zone, $N0^{\circ}$ - $N20^{\circ}$.

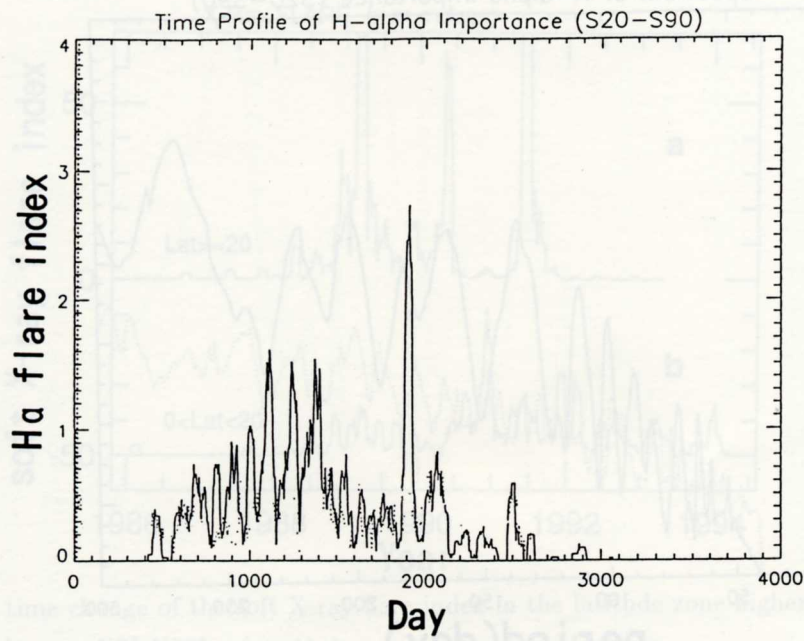


Fig. 20. The time change of the H α flare index in the latitude zone higher than S20 $^\circ$ using 41 days moving averaged values.

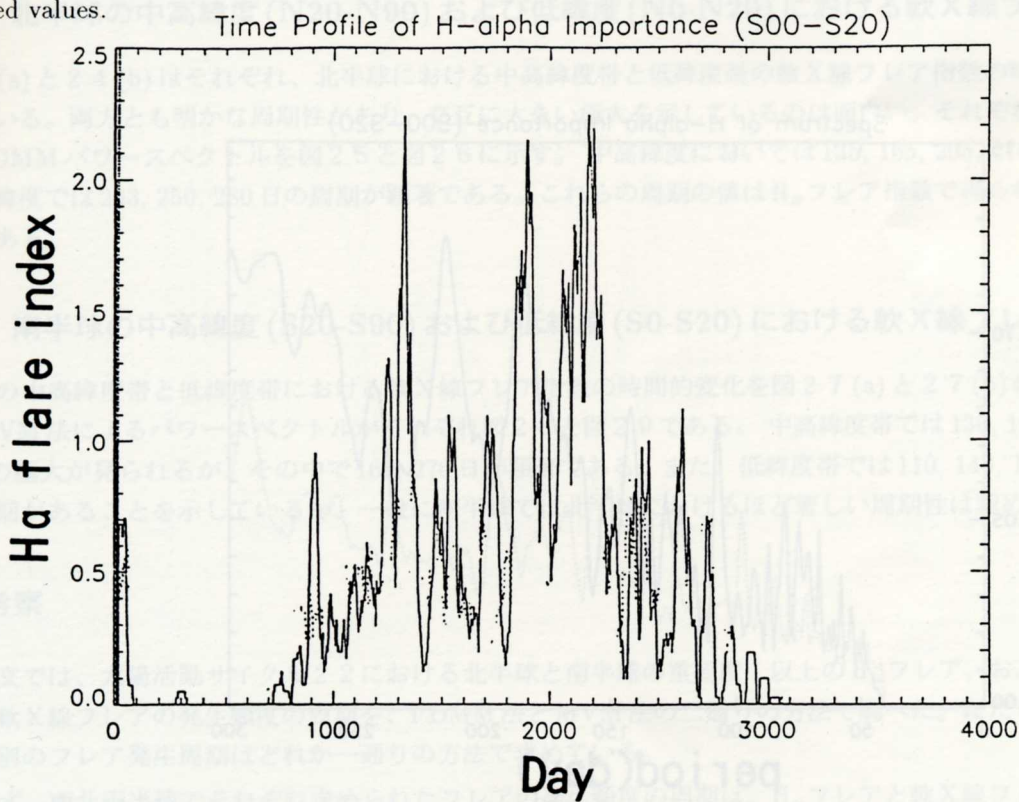


Fig. 21. The time change of the H α flare index in the latitude zone, S0 $^\circ$ -S20 $^\circ$ using 41 days moving averaged values.

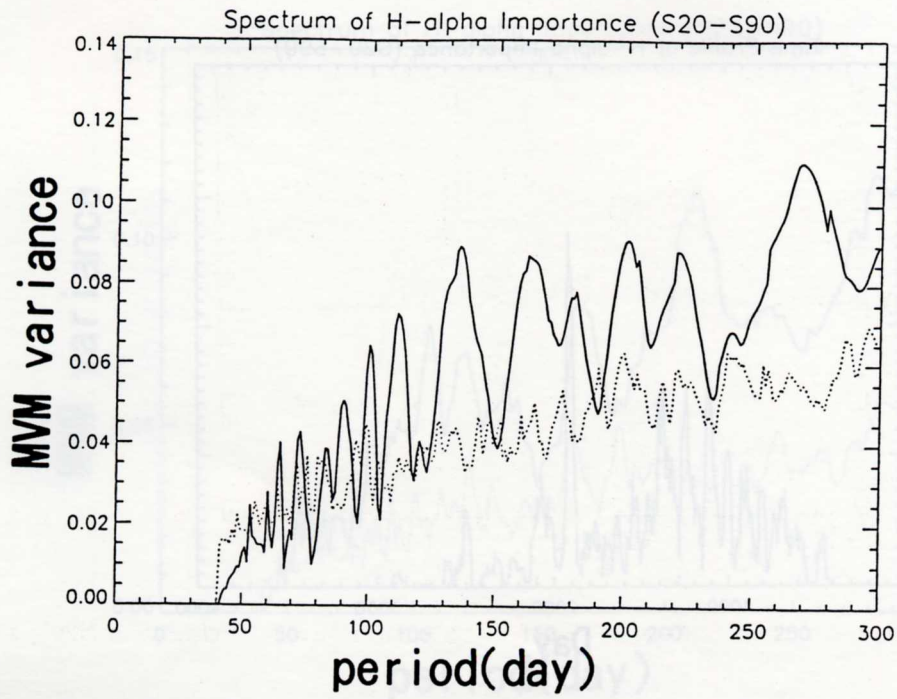


Fig. 22. MVM spectrum of the H_{α} flare index in the latitude zone higher than $S20^{\circ}$. (See Fig. 20.)

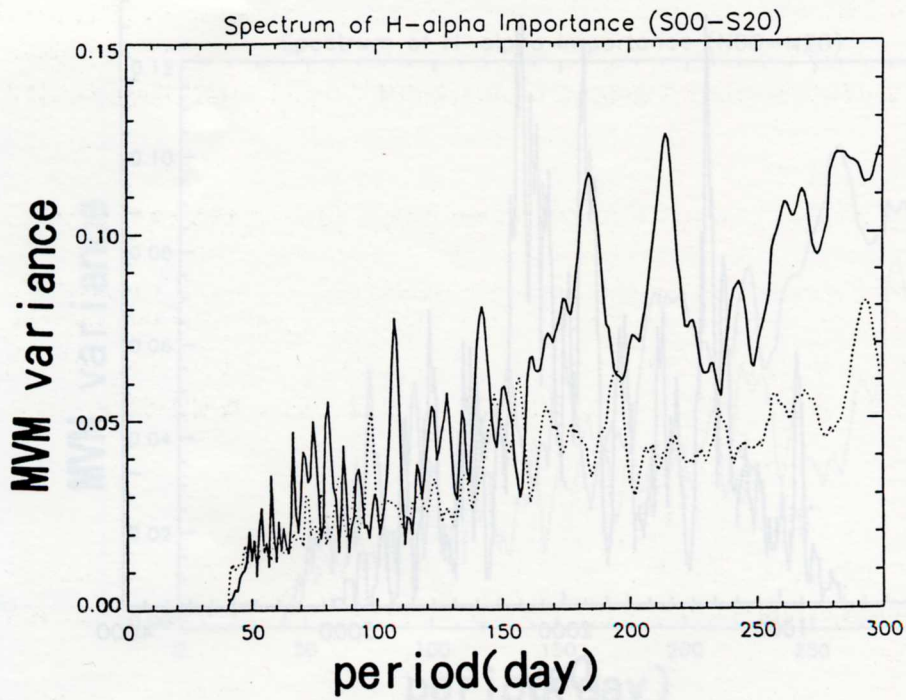


Fig. 23. MVM spectrum of the H_{α} flare index in the latitude zone, $S0^{\circ}$ - $S20^{\circ}$. (See Fig. 21.)

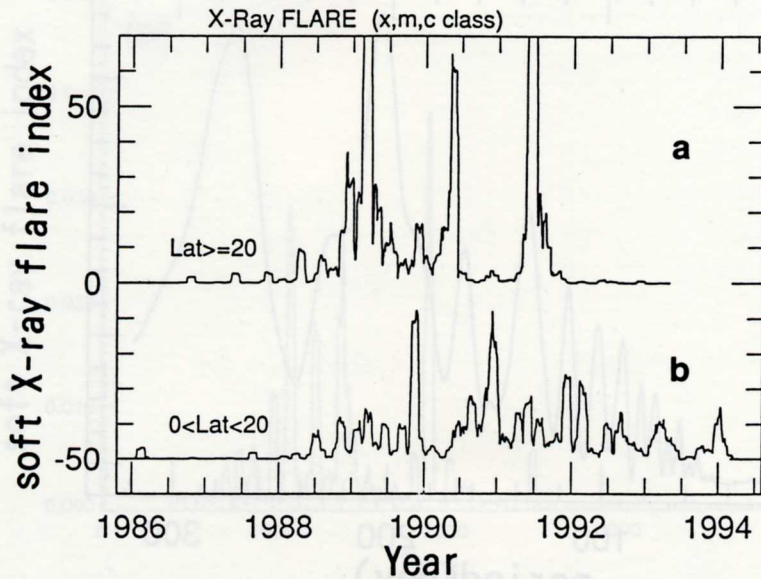


Fig. 24. (a) The time change of the soft X-ray flare index in the latitude zone higher than $N20^\circ$, and (b) that in the latitude zone $N0^\circ$ - $N20^\circ$ using 41 days moving averaged values.

2-5. 北半球の中高緯度 ($N20$ - $N90$) および低緯度 ($N0$ - $N20$) における軟X線フレア

図24(a)と24(b)はそれぞれ、北半球における中高緯度帯と低緯度帯の軟X線フレア指数の時間的変化を示している。両方とも明かな周期性があり、交互に大きい極大を示しているのは面白い。それぞれの時間的変化のPDMMパワースペクトルを図25と図26に示す。中高緯度においては135, 165, 205, 270日のピークが、低緯度では203, 250, 280日の周期が顕著である。これらの周期の値は H_α フレア指数で得られた値とほぼ同じである。

2-6. 南半球の中高緯度 ($S20$ - $S90$) および低緯度 ($S0$ - $S20$) における軟X線フレア

南半球の中高緯度帯と低緯度帯における軟X線フレア指数の時間的変化を図27(a)と27(b)に示す。これらのMVM法によるパワースペクトルがそれぞれ図28と図29である。中高緯度帯では130, 160, 205, 220, 265日の極大が見られるが、その中で160, 270日が顕著である。また、低緯度帯では110, 140, 190, 215, 265日の周期があることを示しているが、一般に南半球では北半球におけるほど著しい周期性は認められない。

3. 考察

この論文では、太陽活動サイクル22における北半球と南半球の重要度1以上の H_α フレア、およびCクラス以上の軟X線フレアの発生頻度の周期を、PDMM法とMVM法の二通りの方法で調べた。ただし、南半球の緯度帯別のフレア発生周期はどれか一通りの方法で求めている。

まず、南北両半球でそれぞれ求められたフレアの発生頻度の周期は、 H_α フレアと軟X線フレアについて表1にまとめている。

また、両半球において緯度20度以上の中高緯度帯と20度以下の低緯度帯に分けて計算したパワースペクトルから、表2の周期が得られた。

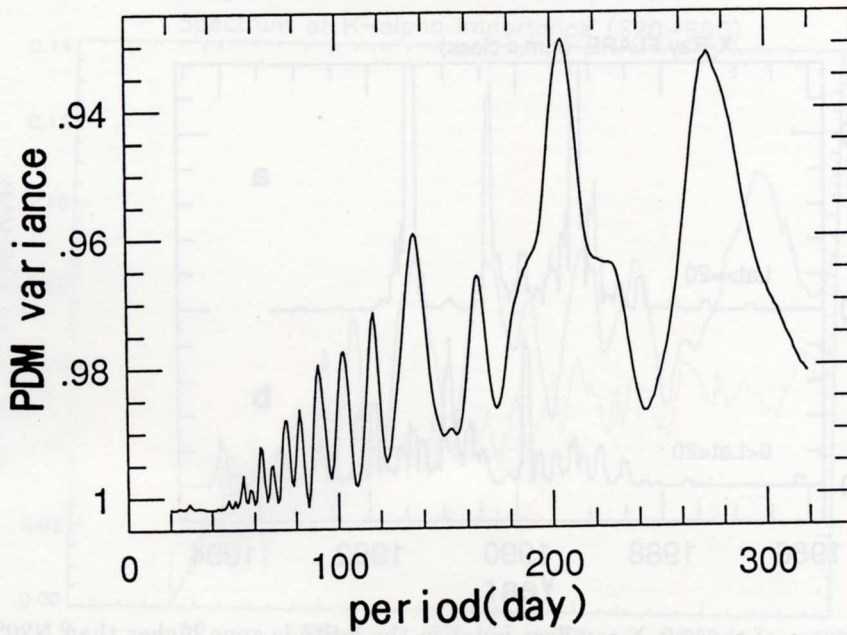


Fig. 25. PDM spectrum of the soft X-ray flare index in the latitude zone higher than N20°. (See curve (a) of Fig. 24.)

X-Ray FLARE(1986.1-1994.4,0<Lat<20)

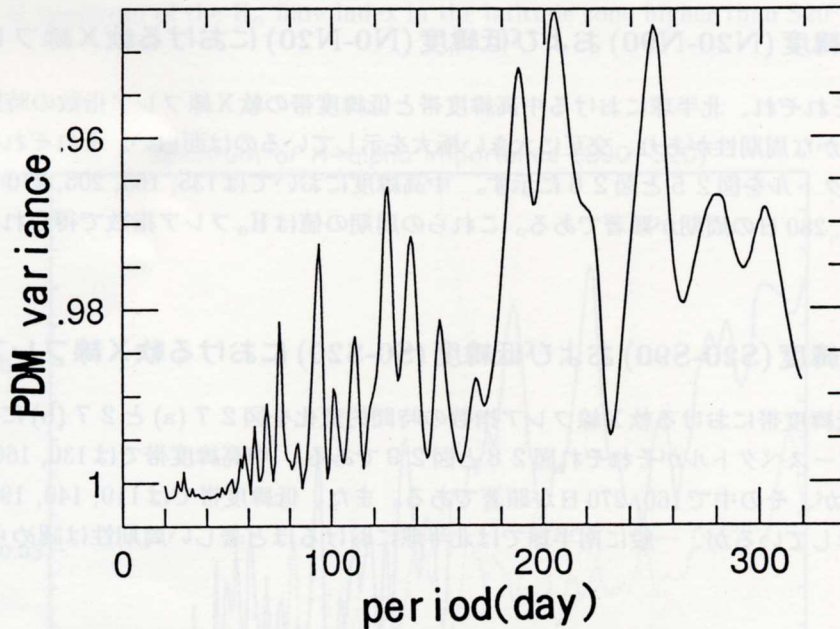
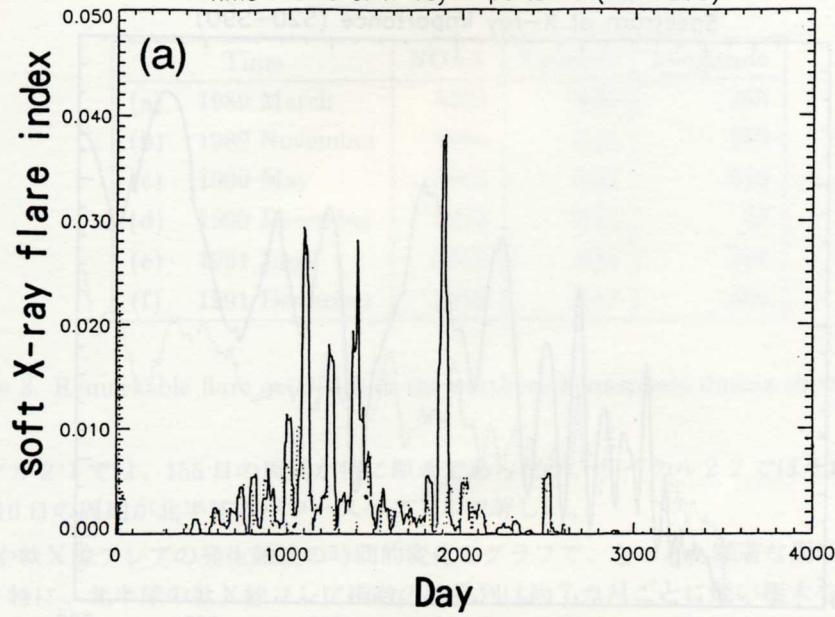


Fig. 26. PDM spectrum of the soft X-ray flare index index in the latitude zone, N0°-N20°. (See curve (b) of Fig. 24.)

	H α flare	Soft X-ray flare
N hemisphere	140, 210, 280	90, 135, 205, 280
S hemisphere	110, 160, 210, 270	110, 165, 200, 270

Table 1. The periodicities of flare occurrence in each hemisphere(days).

Periodicity of the Occurrence of Solar Flare
Time Profile of X-ray Importance (S20-S90)



Time Profile of X-ray Importance (S00-S20)

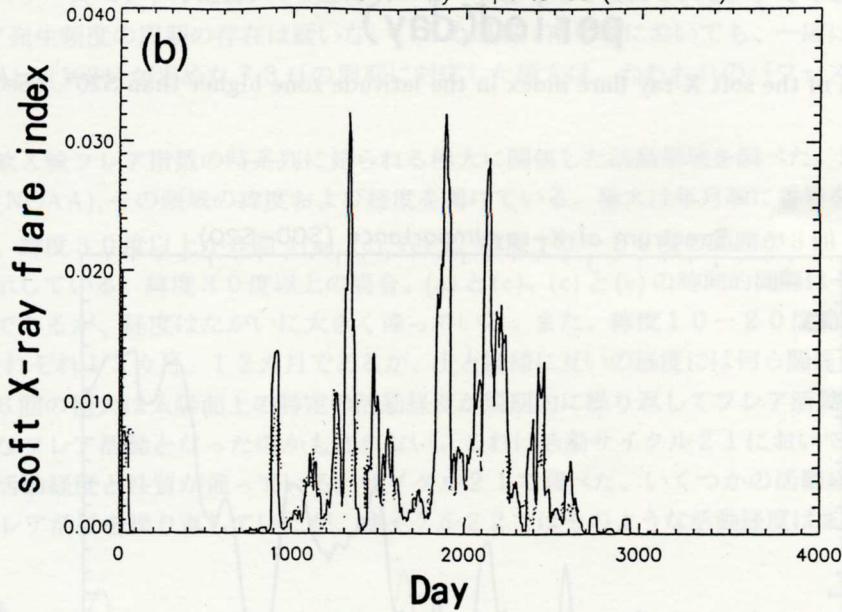


Fig. 27. (a) The time change of the soft X-ray flare index in the latitude zone higher than S20°, and (b) that in the latitude zone S0°-S20° using 41 days moving averaged values.

Hemisphere	Region	H α flare					Soft X-ray flare				
N hemisphere	Mid-higher latitude	105,	120,	165,	210,	280	135,	165,	205,	270	
	Lower latitude	130,	155,	185,	260		203,	250,	280		
S hemisphere	Mid-higher latitude	110,	135,	165,	205,	220	130,	160,	205,	220,	265
	Lower latitude	110,	145,	180,	210,	280	110,	140,	190,	215,	265

Table 2. The periodicities of flare occurrence in the mid-higher and the lower latitude zones(days).

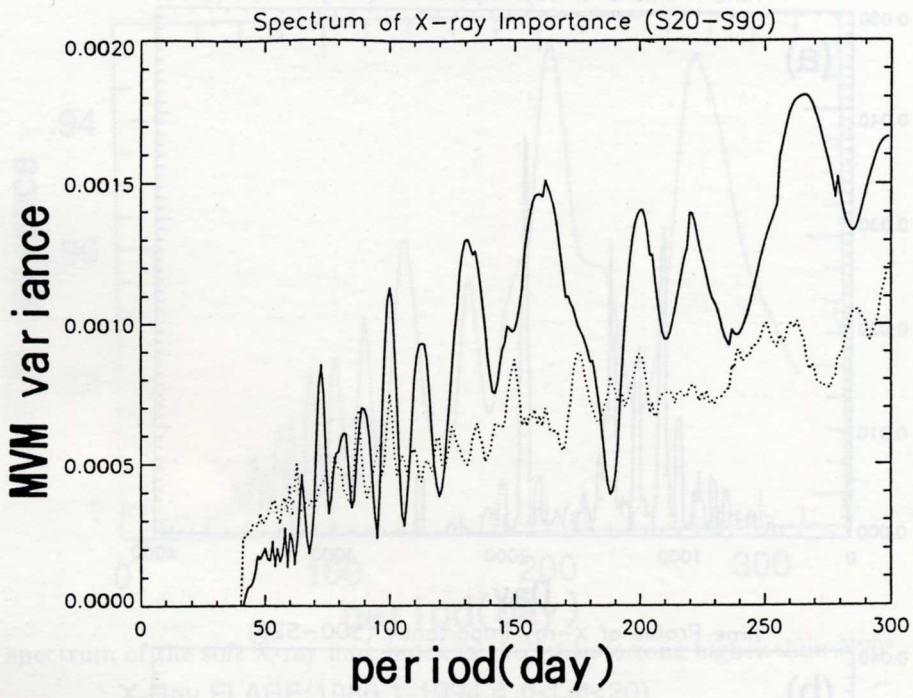


Fig. 28. MVM spectrum of the soft X-ray flare index in the latitude zone higher than $S20^\circ$. (See panel (a) of Fig. 27.)

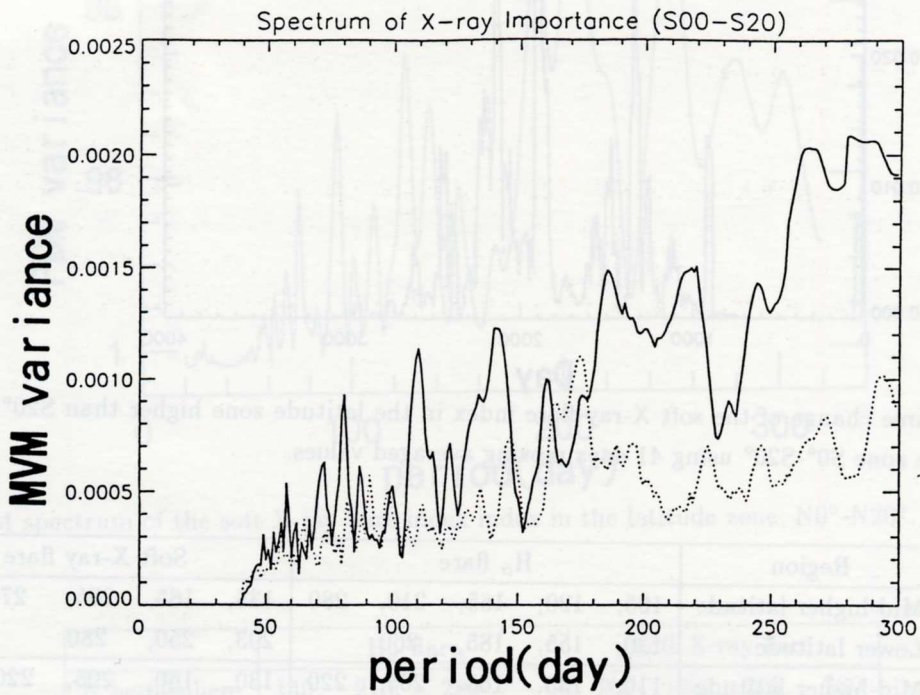


Fig. 29. MVM spectrum of the soft X-ray flare index in the latitude zone $S0^\circ$ - $S20^\circ$. (See panel (b) of Fig. 27.)

	Time	NOAA	Latitude	Longitude
(a)	1989 March	5395	N30	265
(b)	1989 November	5786	N15	250
(c)	1990 May	6063	N35	316
(d)	1990 December	6412	N12	23
(e)	1991 June	6659	N34	248
(f)	1991 December	6952	N17	350

Table 3. Remarkable flare activities in the northern hemisphere during the Cycle 22.

活動サイクル21では、155日の周期が特に顕著であったが、サイクル22ではそれほど明かではなく、代わって200-210日の周期が北半球のパワースペクトルで著しい。

H α フレアや軟X線フレアの発生頻度の時間的変化のグラフで、もっとも顕著な周期性を示すのは北半球の場合である。特に、北半球の軟X線フレア指数の時系列は約7カ月ごとに鋭い極大を示している。この周期的な極大はパワースペクトルにおいて約210日のピークとなって表れている。少なくとも、北半球において210日のフレア発生頻度の周期の存在は疑いない。この周期は南半球においても、一応は存在している。しかし、OzgucとAtac(1994)が求めた73日の周期に対応した極大は、われわれのパワースペクトルには見られない。

北半球の軟X線フレア指数の時系列に見られる極大に関係した活動領域を調べた。表3には極大の時期、活動領域番号(NOAA)、その領域の緯度および経度を掲げている。極大は年月順に番号を付けている。

すなわち、緯度30度以上が3回((a), (c), (e))、緯度10-20度の範囲が3回((b), (d), (f))あり、交互に極大を示している。緯度30度以上の場合、(a)と(c)、(c)と(e)の時間的間隔はそれぞれ14カ月、および13カ月であるが、経度はたがいに大きく違っている。また、緯度10-20度範囲も、(b)と(d)、(d)と(f)の間はそれぞれ13カ月、12カ月であるが、上と同様に互いの経度には何ら関係はないと言える。従って、これらの6回の極大は太陽面上の特定の活動経度が周期的に繰り返してフレア活動を行ったのではなく、偶然に周期的なフレア活動となったのかも知れない。これは活動サイクル21において、一本ら(1985)が調べた北半球の活動経度と性質が違っている。サイクル21で調べた、いくつかの活動経度はほぼ一定の周期(155日)でフレア活動を繰り返していたが、サイクル22ではそのような活動経度はまだ見つかっていない。

《参考文献》

- Bai T. 1987, ApJ 318, L85
 Bogard R.S. and Bai T. 1985, ApJ 229, L51
 Chistyakova K.G. and Chistyakov V.F. 1978, Soln. Dannye. Byull. 1, 76
 Ichimoto K. Kubota J. Suzuki M. Tohmura I. and Kurokawa H. 1985, Nature 316, 422
 Ishida T. 1993, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 3, 57
 Kiplinger A.L. Dennis B.R. and Orwig L.E. 1984 Bull. Am. Astron. Soc. 16, 891
 Oliver R. and Ballester J.L. 1995, Solar phys 156, 145
 Ozguc A. and Atac T. 1989, Solar Phys. 123, 357

Ozguç A. and Ataç T. 1994, Solar Phys. 150, 339

Rieger E. Share G.H. Forrest D.J. Kanbach G. Reppin C. and Chupp E.L. 1984, Nature 312, 623

Stellingwerf R.F. 1978 ApJ 224, 953

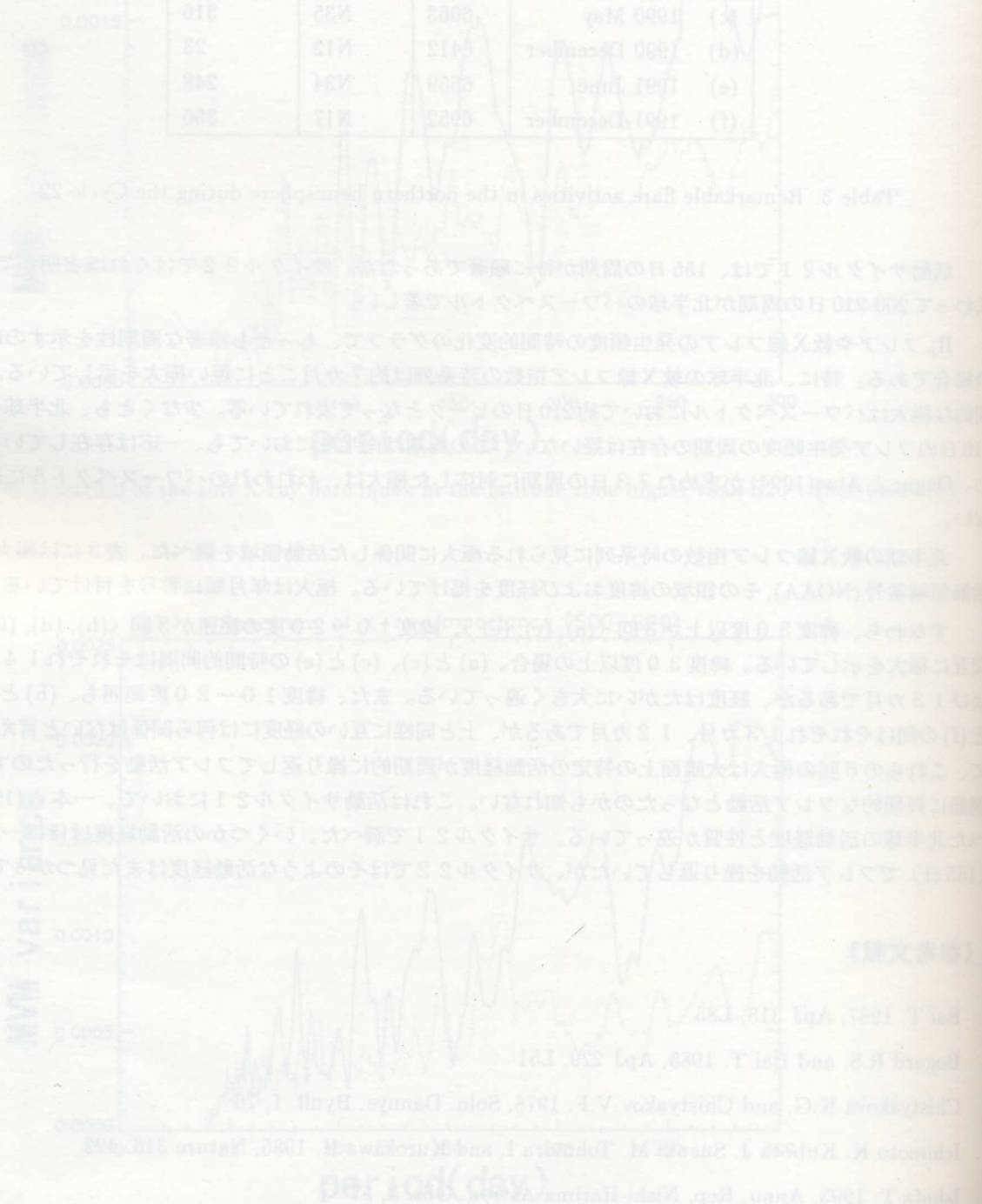


Fig. 2. MVM variation during the period of the solar cycle 23. The MVM values are taken from the MVM data of the solar cycle 23. The MVM values are taken from the MVM data of the solar cycle 23. The MVM values are taken from the MVM data of the solar cycle 23.