

地球磁気圏擾乱の回帰性

大木 俊夫* 斎藤 尚生*

PERIODICITY CHANGE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES

By

Tosio OKI and Takao SAITO

A normalized running frequency analysis is carried out for daily activity of geomagnetic indices for seven solar cycles. A systematic rule is found in the recurrence of the disturbances: mainly 28, 27, and 25-day (also, sometimes 35-day) recurrence periods coexist in a sunspot maximum phase, while almost only the 27-day period is observed in other phases throughout all the cycles. The reason for this alternating nature is discussed briefly.

要 旨

磁気圏サブストームは、地球磁気圏の最も基本的な擾乱現象である。従ってサブストーム群、即ち磁気圏擾乱の回帰性は太陽活動と共に消長するはずであるが、回帰性の特徴および機構の詳細は知られていない。本研究ではオーロラ嵐の活動度に密接に関連している地磁気擾乱 C 9 指数の一世紀間のデータから、動的自己相関図を作成し、回帰性を検討した。その結果、次の特性が明らかになった。

- (1) 太陽活動極小期には回帰性が一時消失し、上昇期には28日の回帰周期が現れる。
- (2) 極大期には長周期から短周期 (35日～0日) にいたる各種の周期が交替に、または同時に現れ、回帰性がおとろえてくる。しかしこのような状態の中でも、弱いながら～28日の周期が存在する。
- (3) 下降期には、次第に27日の周期が卓越しはじめ、極小期の直前になってもっとも顕著になる。
- (4) C 9 指数のうち、 $C \leq 2$ のものだけを選んで解析すると、上記のうち短周期部分はきわめて弱くなる。このことから、10日より短い周期を持った部分は、フレア等の突発的・非周期的な現象にともなうものであることがわかる。

これらの特性の原因を調べるためには太陽磁場と太陽

風との関連を調べる必要がある。そこで、太陽風流源面 ($2.5 R_{\odot}$) における磁気極性と、地球付近での太陽風磁気極性を比較した。その結果、2-セクターの時には28日、4-セクターの時にはおもに27日の周期が強まるという性質が判明した。

従来太陽活動極大期には地磁気擾乱が周期性を失うところから、この時期に太陽磁気圏は組織的構造が消失するといわれていた。しかし太陽風磁場極性には極大期にも明瞭な周期性が見られる。従って太陽磁気圏は11年間を通じて基本的な構造が保たれており、極大期には突発的フレアによって、磁気圏擾乱だけが見かけ上周期性を失うにすぎないことが明らかになった。

1. 観測資料

1.1 C 9 指数

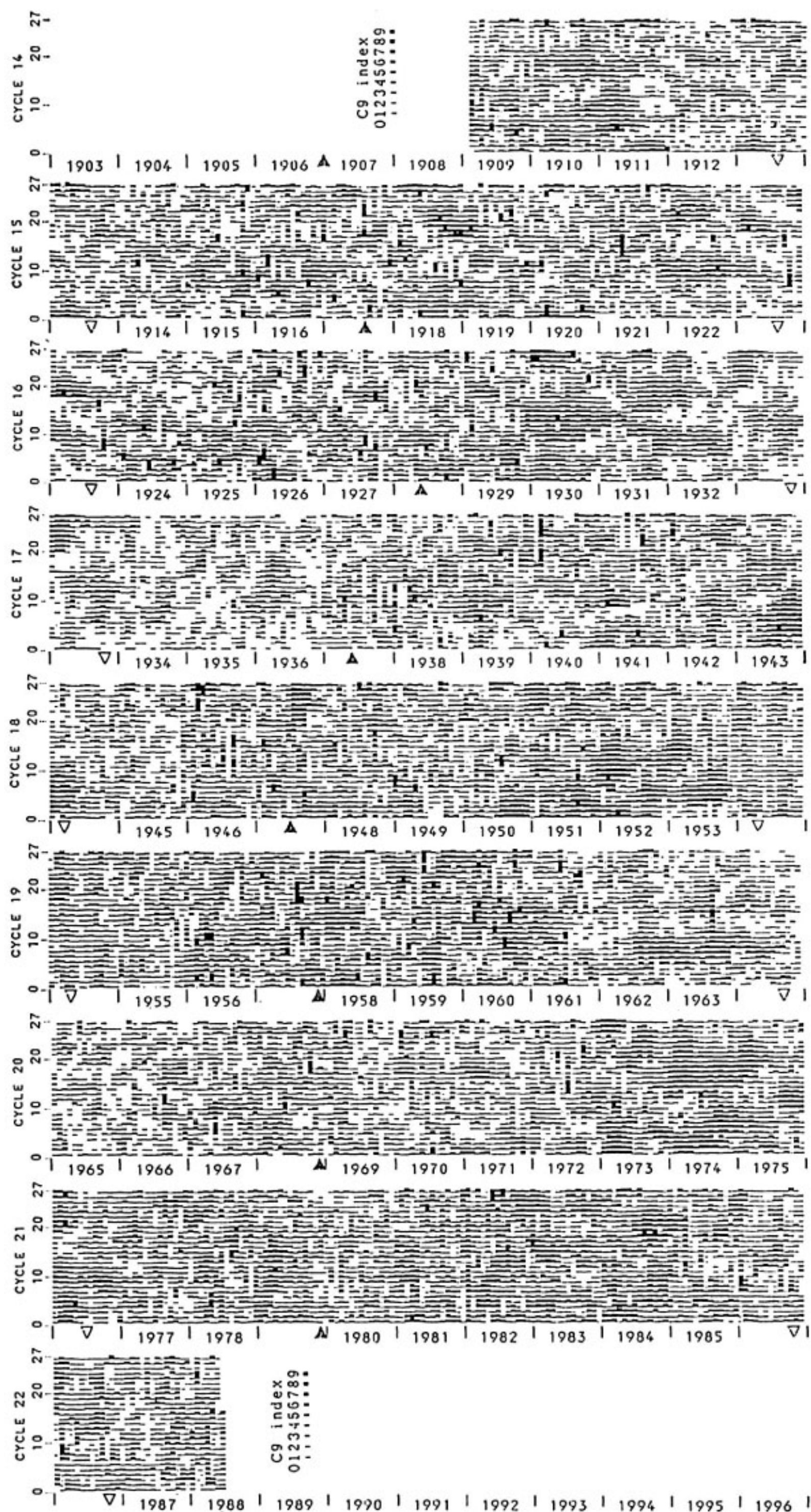
地磁気擾乱を表す指標には K_p , AE, D_{st} , C 9 指数など各種あるが、AE 指数はオーロラルオーバル近辺の変動に重点がおかれ、 D_{st} 指数の方は逆に赤道付近にウェイトがかかっている。これに対し、C 9 指数は全地球的に平均した擾乱を代表しており、なによりも約1世紀にわたる (1884～現在) 値が得られるので、この研究のように長期間の解析を要する時に適切な資料である。

第1図はC 9 指数を太陽活動サイクルごとに並べたものである。黒三角は極大期、白三角は極小期である。

一見して、極大期だけではなく下降期の方にもC 9 指数の大きい値がみられる。

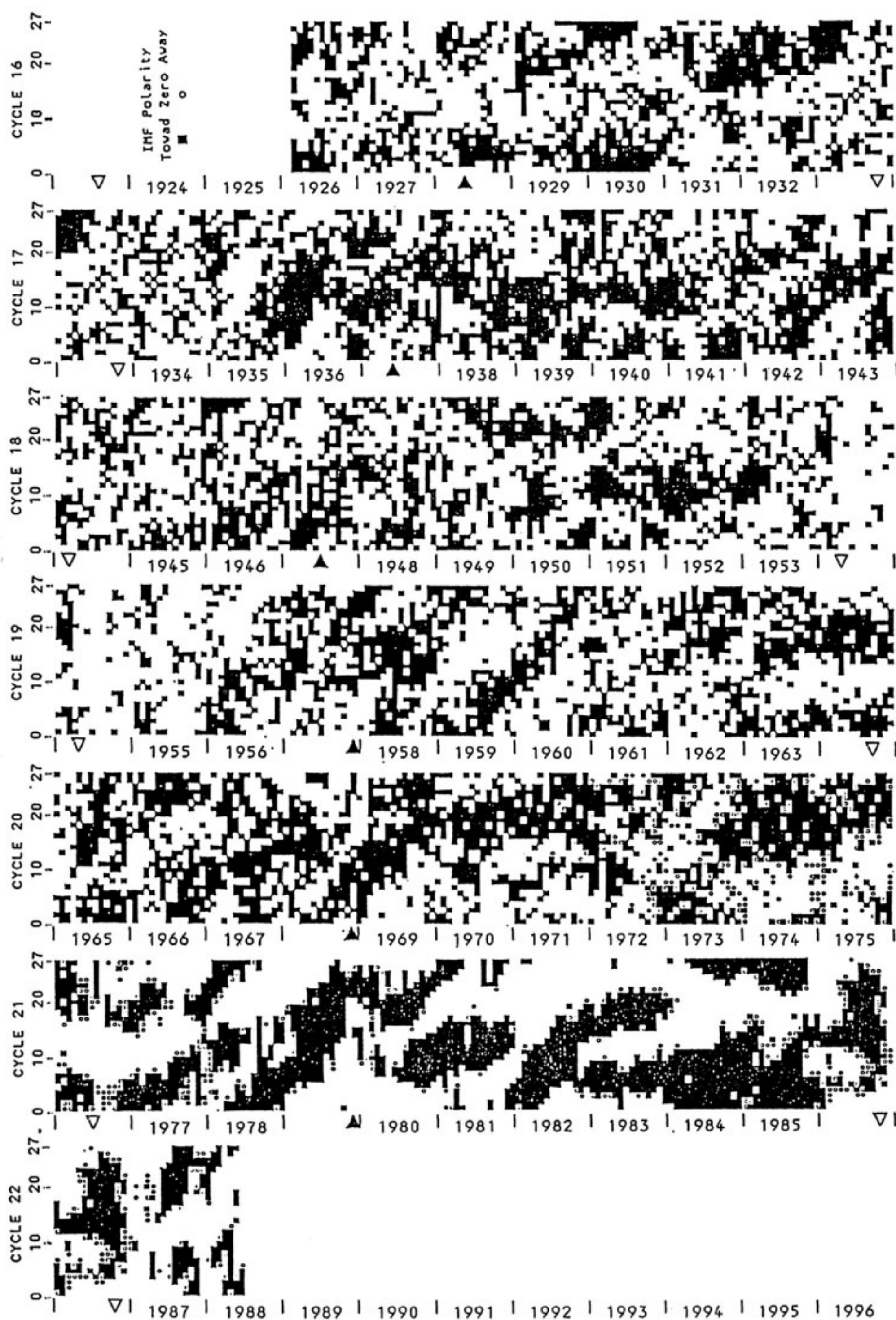
* 東北大学理学部
Onagawa Magnetic Observatory and Geophysical
Institute, Tohoku University

27-DAY RECURRENCE DIAGRAM OF C9 INDEX

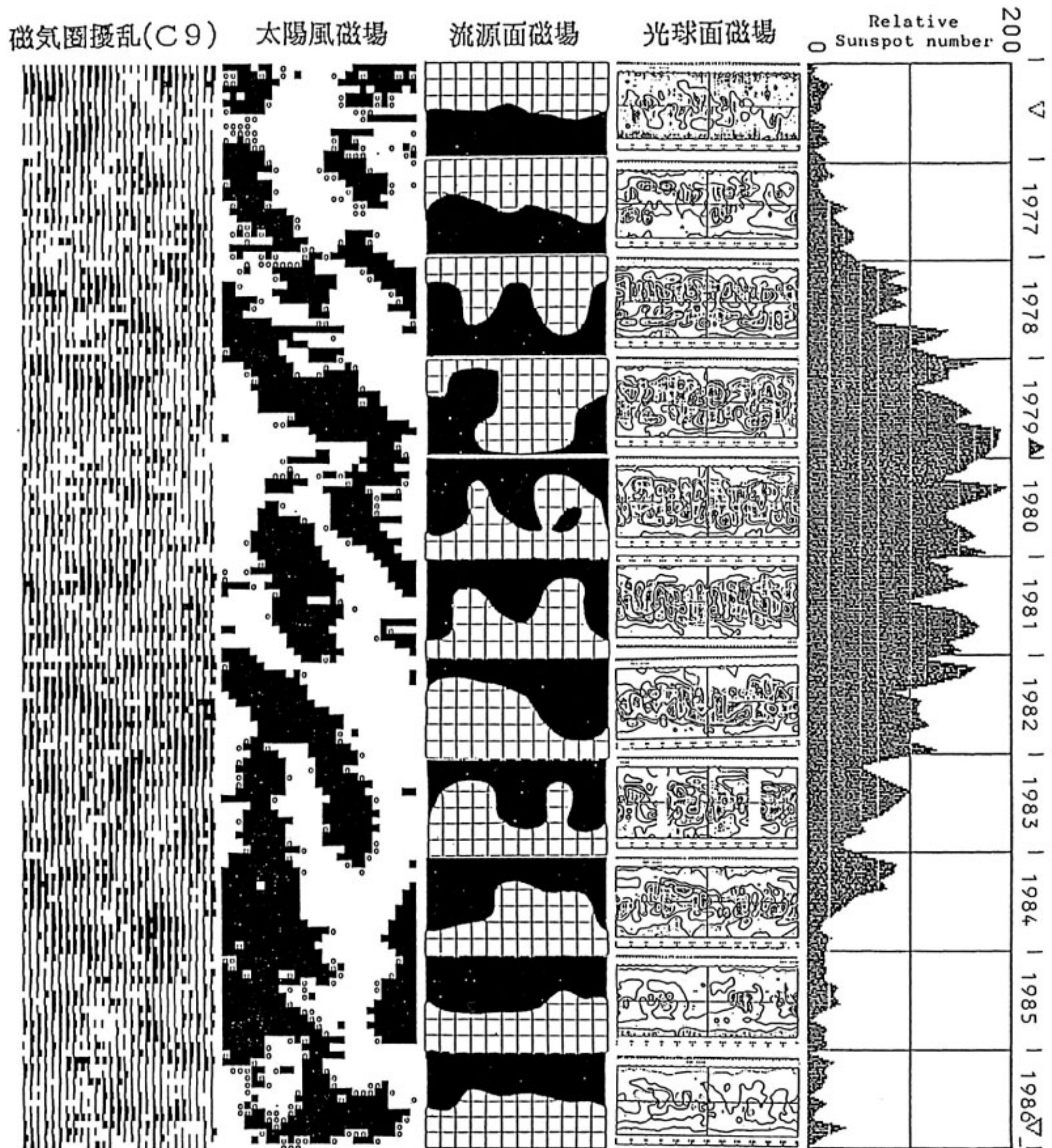


第1図 地磁気活動指数C9の1909年から80年間の27日回帰図。太陽サイクル番号別に別のパネルにし、黒三角と白三角はそれぞれ太陽活動極大期と極小期を表している。

27-DAY RECURRENCE DIAGRAM OF IMF SECTOR POLARITY



第2図 太陽風磁場セクター極性の1926年から1988年までの27日回帰図。太陽サイクル番号別のパネルにし、黒三角と白三角はそれぞれ太陽活動極大期と極小期を表している。



第3図 磁気圏擾乱指数 (C9), 太陽風磁場セクター極性, 流源面磁場, 光球面磁場, および黒点相対数の太陽サイクル変化. 太陽サイクル番号21について例示してある.

1.2 IMF

IMF の磁気極性は1926-1969年については Svalgaard により, それ以降は Solar Geophysical Data に与えられているものを用いた. Svalgaard⁽¹⁾ のもの および S. G. D. の 1975 以前の値は地磁気擾乱から推定されたものであり, 外向き (Away), 内向き (Toward) の 2 値で示されている. ところが1976以降のものは人工飛翔体によって測定された太陽風磁場や光学的に求められた光球面磁場から得られたものであって, 外向き, 内向き

の 2 値の他に, 0 および欠測がある. 従って1975以前と以後の値をそのままつないで用いることは一様ではないが, 傾向を知るためにはやむを得ない. 後に述べるとおり, この不均一性は結果に本質的影響を与えていないと思われる.

欠測は解析に不都合であるのでその前後の値を線型に内挿し, 連続したものにした. その結果が第2図である.

1.3 光球面および流源面磁場

光球面磁場はウィルソン山天文台及びスタンフォード

大学で1959年以来連続測定している。また、これをともにした流源面（半径 $2.5 R_{\odot}$ と仮定）の磁場⁽²⁾は、Marubashi et al.⁽³⁾により1959-1973年が計算されており、また Hoeksema et al.⁽⁴⁾により1976年以後のものが与えられている。たとえばサイクル21について、C9指数、太陽磁場、流源面磁場、光球面磁場および黒点相対数を並べたのが第3図である。

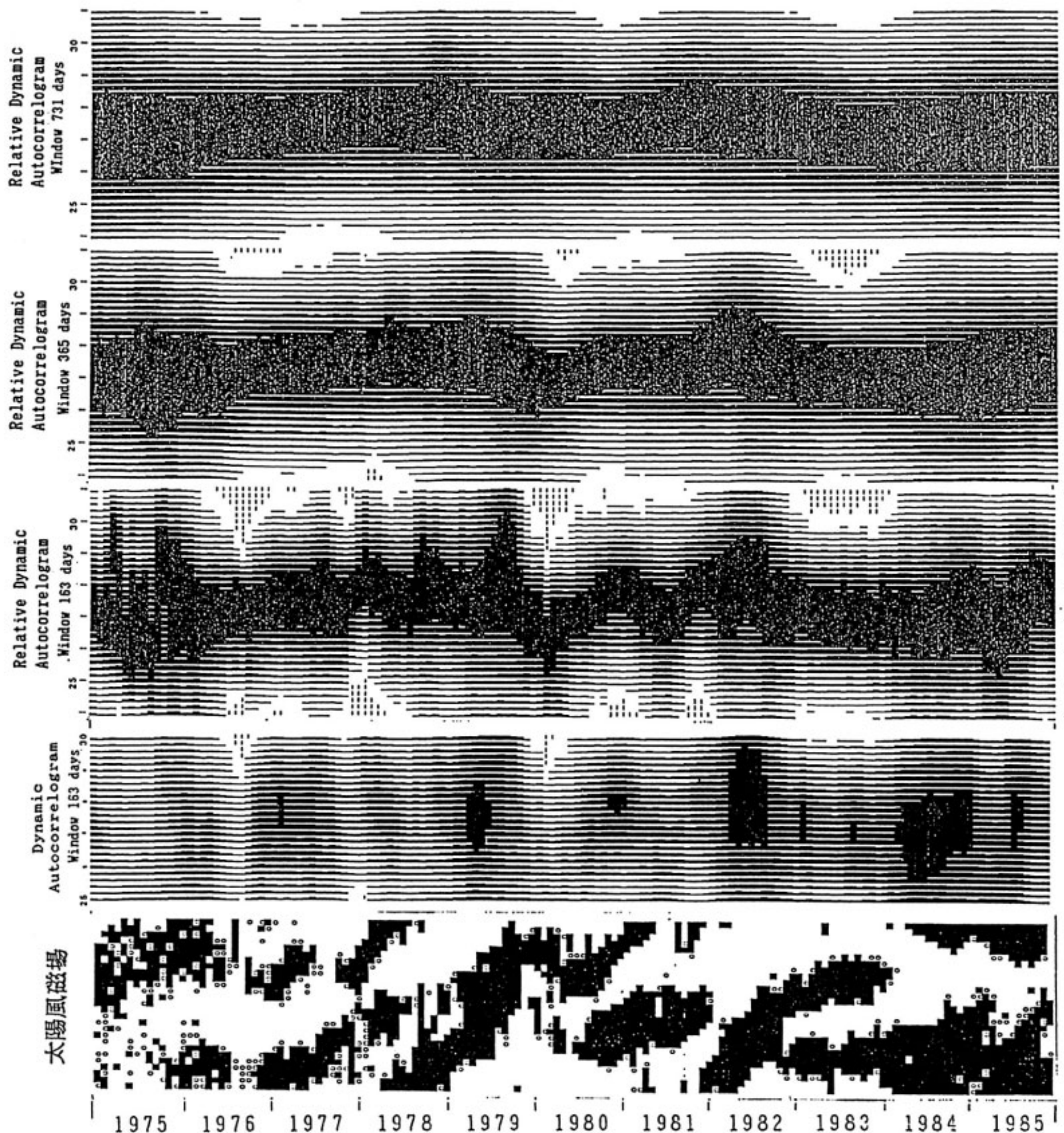
2. 自己相関図 (Autocorrelogram)

2.1 自己相関図

これらのデータにどのような周期性があるかを見るた

めに動的自己相関図 (Saito (1989)⁽⁵⁾の第5.2図参照)を作成した。スペースの関係で、そのうち IMF 及び C9 指数それぞれについてサイクル21のそれを第4図、第5図に示す。

それぞれの図の左から2番目が動的自己相関である。しかしこの図は相関係数の絶対値であらわしているため、(特にC9指数の場合)周期変動の流れが追跡しにくい。そこで、各パーテルス周期に対する自己相関係数の最大値で規格化して、相対自己相関図を作成する(図の3番目)。ウィンドーを大きくとれば当然のことながら変化はスムーズになる(図の4および5番目)が、細



第4図 太陽風磁場セクター極性とその動的自己相関図の太陽サイクル変化 (本文参照)。

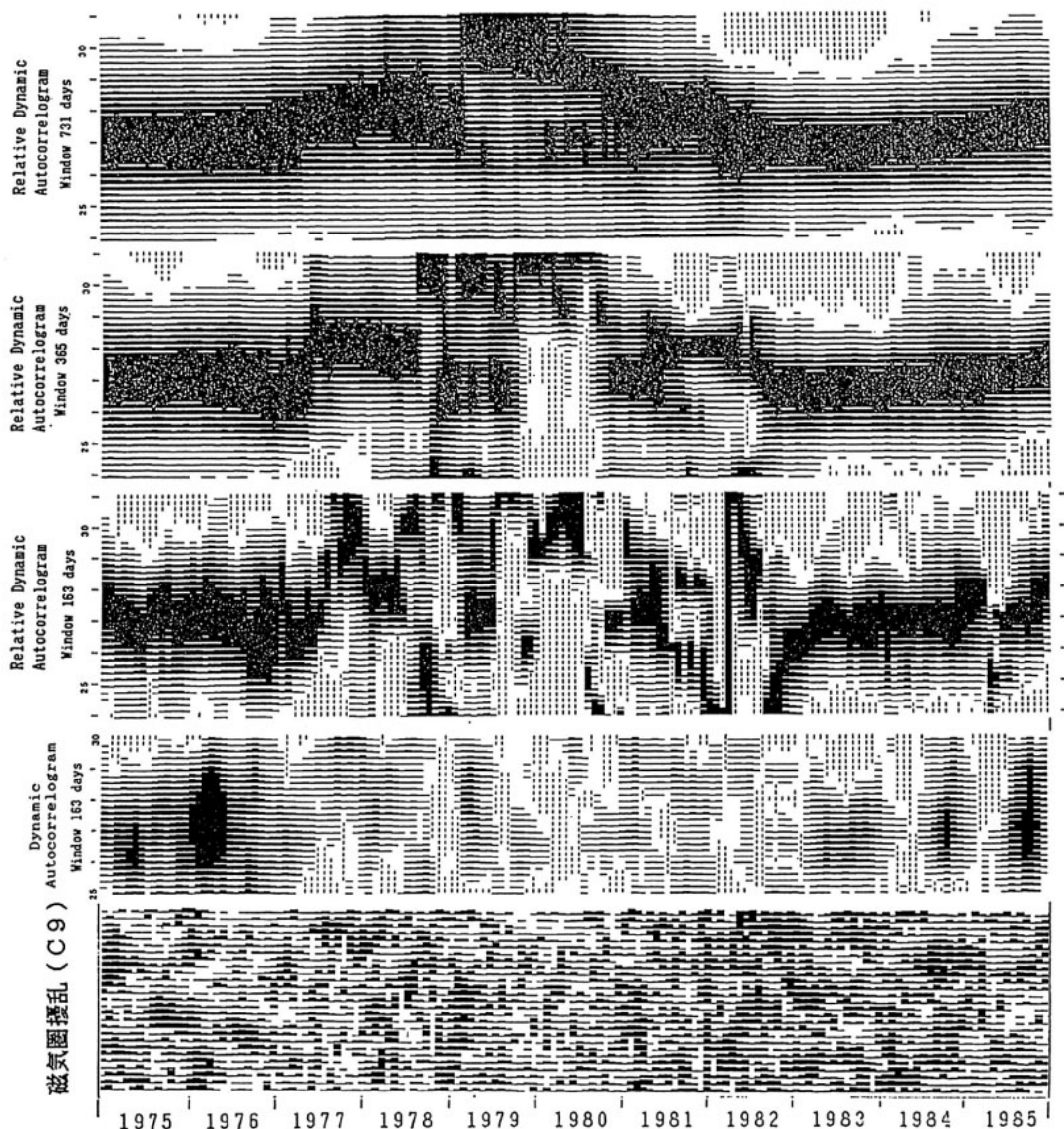
かい変動は見えにくくなる。

2.2 静穏日解析

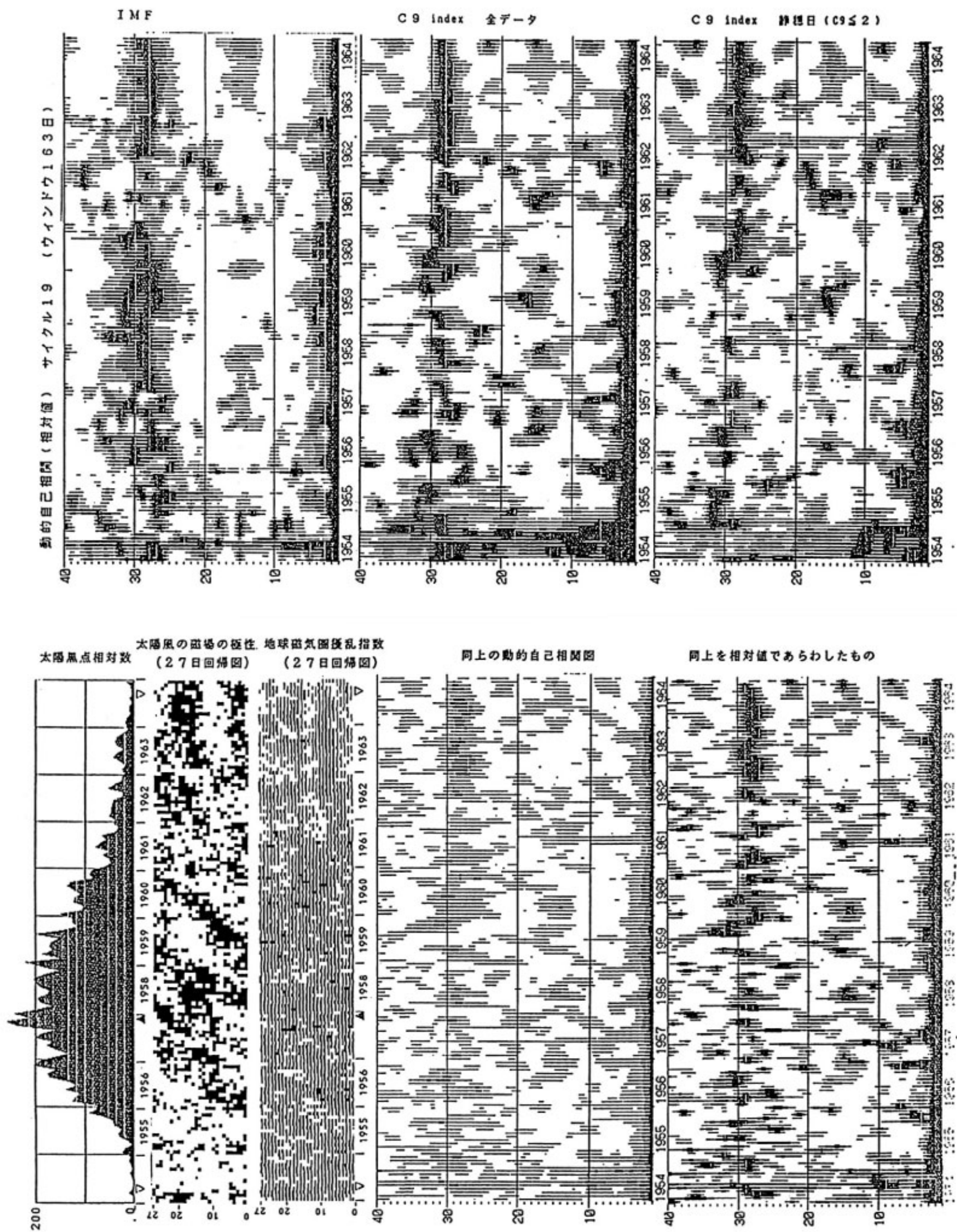
これまで地磁気擾乱について、太陽活動極大の時期には周期性が失われるといわれていた。更にこのことから、その時期には太陽磁気圏にも組織的構造が失われると考える研究者も多数いた。確かに動的自己相関図による解析ではその時期、相関係数がきわめて小さい。しかし、この時期には突発性磁気嵐が頻発し、しかもその時のC9指数は大きな値になることが多い。このことが相関係数を引き下げていると考えられる。そうだとする

と、C9指数の小さい値の日（言い替えばフレアの影響を受けていない“静穏日”）だけ取り出して解析すれば相関が現れる可能性がある。そこでC9指数 ≤ 2 のものだけを選んで処理をした（C9指数 > 2 のものはすべて $= 2$ と置き換える）。これを静穏日解析と呼ぶことにする。

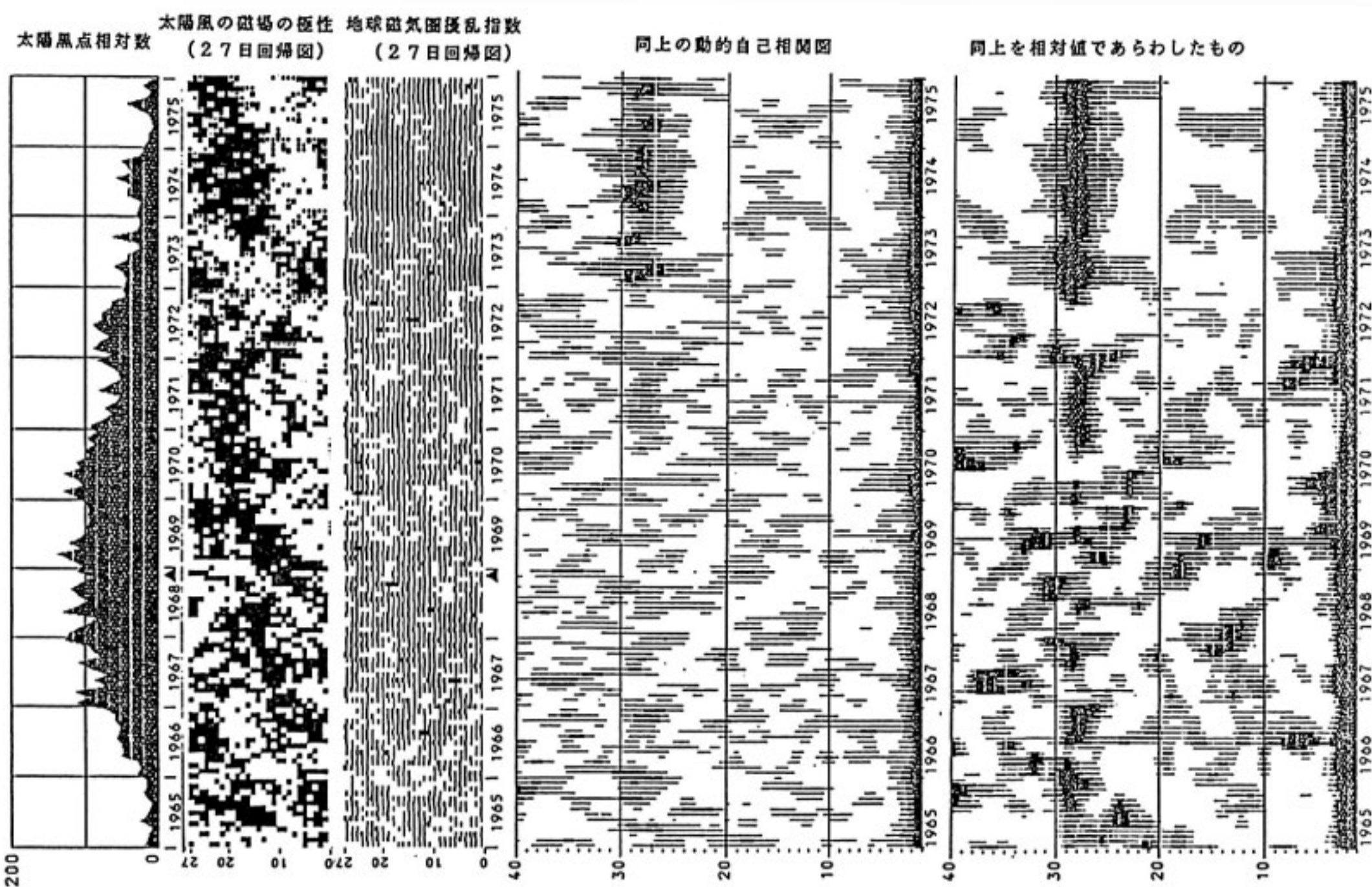
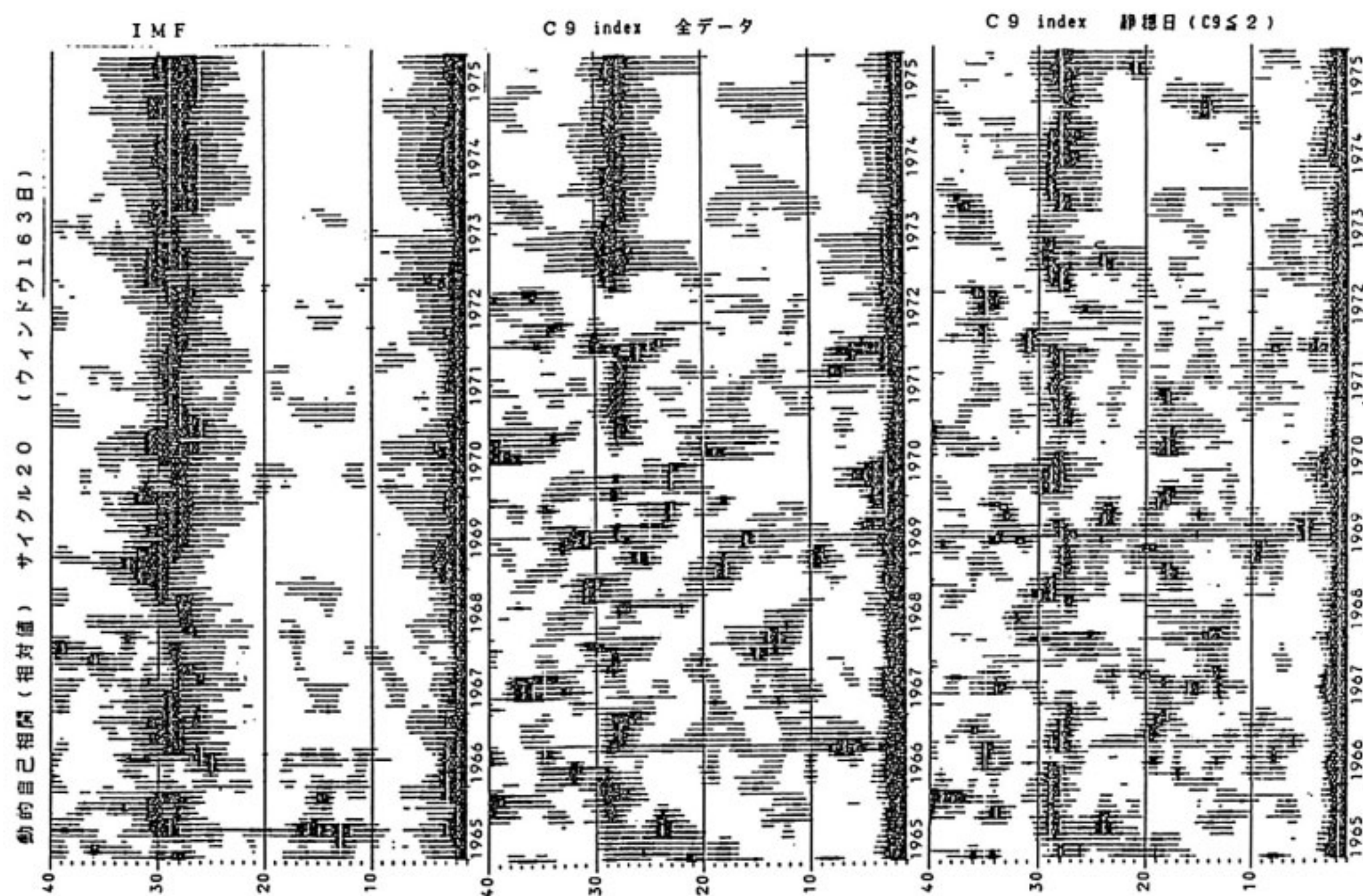
C9指数についての動的自己相関図、相対自己相関図及び静穏日解析の結果をサイクル毎に並べたのが第6, 7, 8図である。



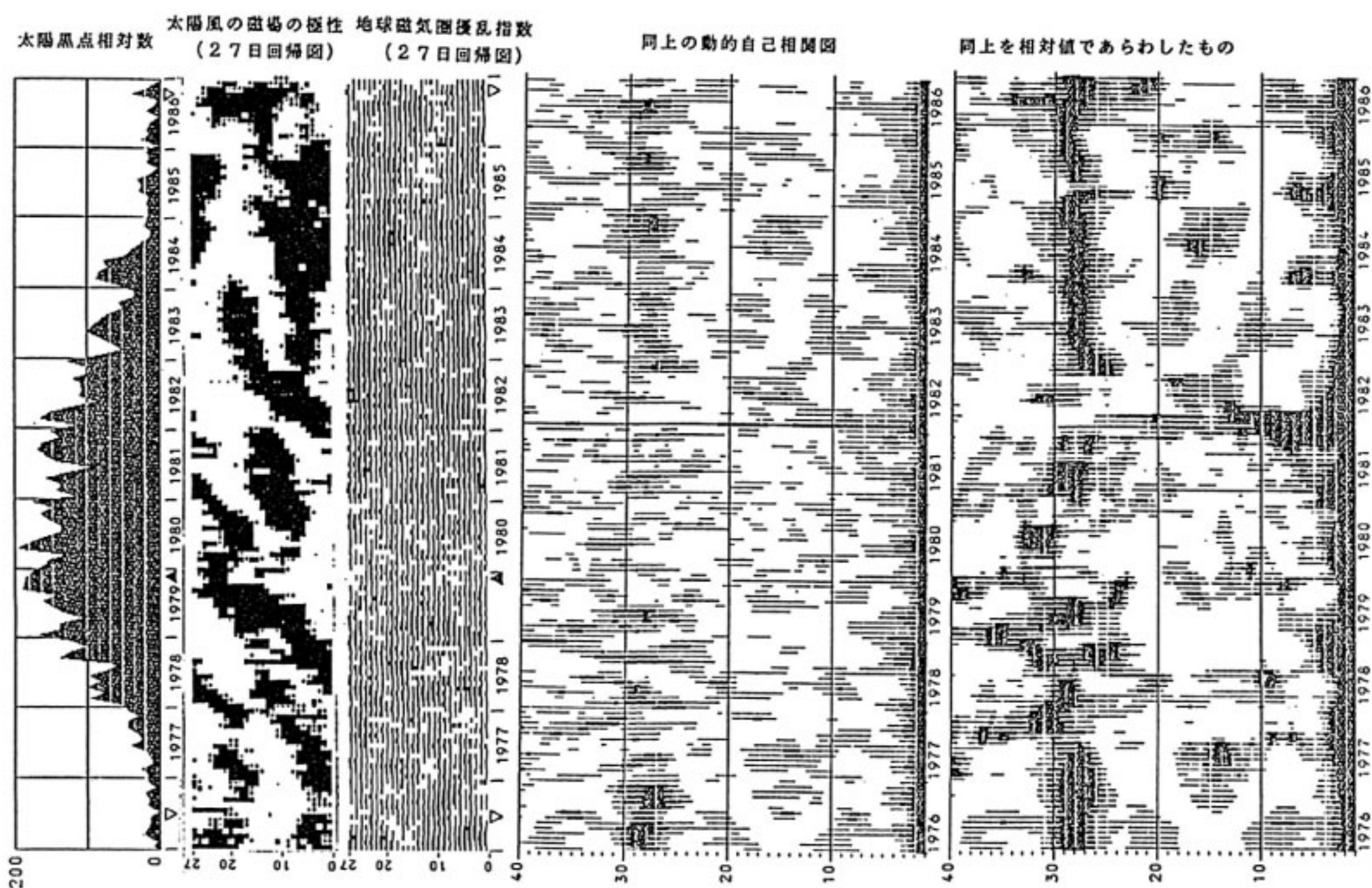
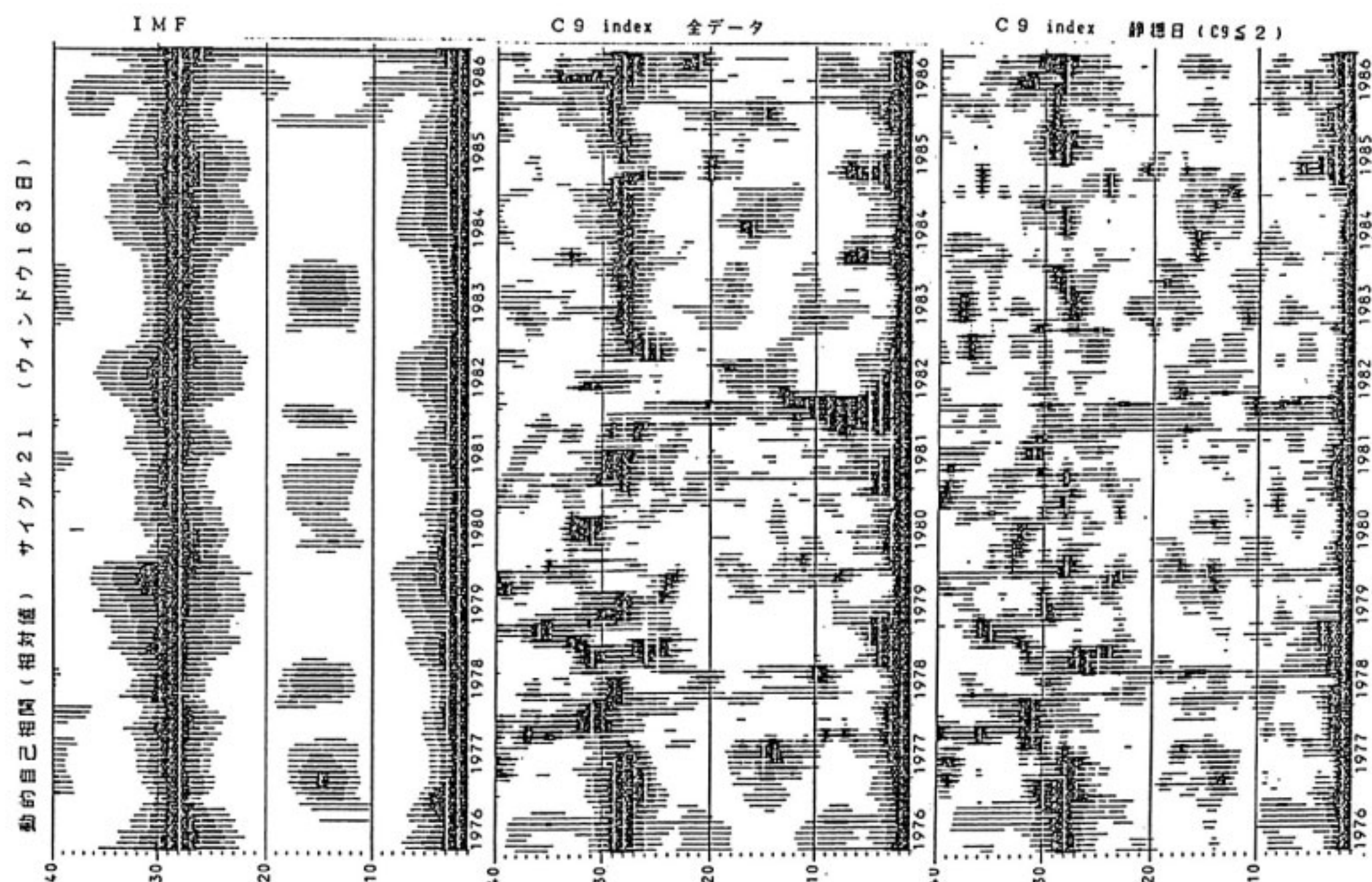
第5図 磁気圏擾乱指数C9とその動的自己相関図の太陽サイクル変化（本文参照）。



第6図 磁気圏擾乱指数C9とその動的相対自己相関図(太陽サイクル番号19).



第7図 磁気圏擾乱指数C9とその動的相対自己相関図 (太陽サイクル番号20).



第8図 磁気圏擾乱指数C9とその動的相対自己相関図(太陽サイクル番号21).

2.3 結 果

以上の解析から一般に次のことが指摘される。

- ① 太陽活動極小期あるいはその直後に一旦周期性が消失し、むしろ春秋にピークを持つような半年周変化が卓越してくる。
- ② 上昇期には周期が28~29日ジャンプする。
- ③ 極大期には回帰性が殆ど見られなくなるが、相対自己相関図の方法によると弱いながらも28日の周期が存在することがわかる。
- ④ 極大期の前後から下降期にかけて、27日と28日の周期が交替に、あるいは同時に現れる。白色雑音的に全周期にわたって相関が見える場合もある。
- ⑤ 下降期にはいると、次第に27日周期が強まり、極小期直前で最も強くなる。
- ⑥ 以上の周期変化はC 9 指数についてはかなり突然に起こるが、IMF については変化は徐々にであり、C 9 指数と IMF 間の対応はかならずしも明瞭ではない。

特に静穏日解析で明瞭であるが、極大期において23日、27日~28日、32日等の系列が明確に現れている（とくにサイクル21で顕著であるが、ほかのサイクルにも見られる）。この事実はこの解析で初めて明らかになったものである。

3. 討 論

3.1

常識的には地磁気擾乱の原因が太陽風である以上、太陽風の周期性が地磁気のそれにも反映されるように思われる。ところが IMF の方にはほとんど見られない二重周期がC 9 指数に現れるのはどのように解釈されるのだろうか？

地磁気擾乱は太陽風磁場と共にその風速の変動にもとづいて起こるものである。したがってこのことを考える上で、太陽風速度の分布を考慮しなければならない。極大期においては、極でのコロナホールが消滅して赤道付近に散在してくる。したがって極からの低速流と低緯度からの高速流の両方の影響を受けることとなる。太陽本体の微分回転は極近辺では33~35日周期であるので、それとともに磁力線も自転をするとすれば、それがこのことに影響している可能性も考えられる。また、地球軌道面に対する太陽の自転軸、地球の自転軸そして地磁気軸の傾きも考慮しなければならない。以下、これに関して考察する。

3.2 Deflection Model

よく知られているように極小期において赤道型のコロナが現れるのに対して極大期ではたくさんのコロナレイ

(Coronal ray) やストリーマー (Streamer) から成る極冠型コロナとなる。それらの Ray は必ずしも太陽中心から動径方向に放出せず、動径方向に対してさまざまな偏向角を持つ。このことに着目して Saito⁽⁶⁾ は太陽・地球間電磁関係 (STR) に関する偏向 (Deflection) モデルを唱えた。Saito⁽⁷⁾ は更に実際の皆既日食の写真から測定して多くのコロナストリーマーの偏向角を実測し、その分布を求めた (同論文 Fig. 4 参照)。極端な例としては太陽の自転極から地球方向に向かうような、つまり光球面での偏向角 (θ_0) が 90° に達するようなストリーマーさえも存在する。

惑星間空間シンチレーション (IPS) の観測結果によると、太陽風流速ベクトルはほとんど動径方向である (すなわち偏向角が 0° である) という。しかし仮に光球面近くで大きい偏向角があったとしても、太陽からはなれると急激に小さくなる。光球面を出発した太陽風が直線的に運動するような極端な場合を考えても、 $r(R_\odot)$ における偏向角は、 $\theta = \arctan(R_\odot \sin \theta_0 / r)$ となる。ここで θ_0 は、光球面における偏向角である。第9図に示した通りいずれの場合にも、 $r > 30R_\odot$ (0.1 AU 以遠) で θ は 2° 以下という小さな値になって観測精度からすると動径方向の流れとしか結論できないからである。それゆえ偏向モデルは IPS などの実測結果と矛盾しない。

こうしてたくさんのストリーマーの中には極付近から黄道面付近まで偏向しながら太陽とともに自転しているものがあると考えれば、極大期や下降期の初期に短期間みられる長周期擾乱も説明できる。太陽本体の地球に対する微分回転は、極付近で33~35日周期だからである。

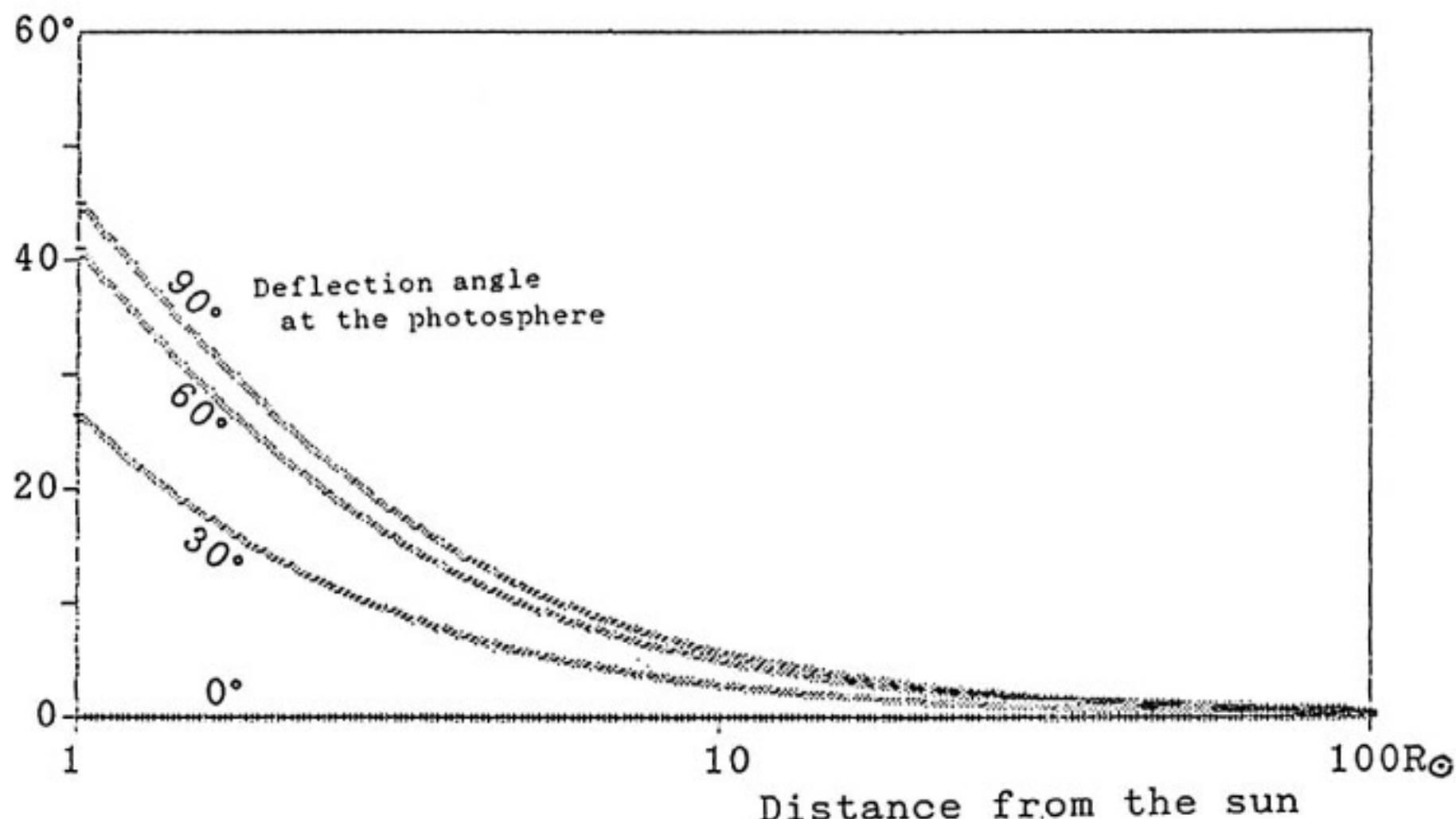
このように、基本的には $m=1$ の28日周期が卓越し、短期的に高緯度ストリーマーによる >28 日周期が重なるというのが極大期や、下降期の初期の特徴であると結論できるであろう。

3.3 見かけの周期

C 9 指数における30数日の回帰性は、次に述べるように見かけ上のものである可能性もある。

太陽活動極小期周辺では、太陽磁場は自転軸と磁軸が一致した双極子 (Aligned dipole) 的になり、太陽磁気圏は平行期 (Aligned phase) になる (Saito and Oki⁽⁸⁾ の3.18図参照)。従ってこの時期には自転赤道が低速領域になるので、太陽と地球を結ぶ線が流源面と交わる点が最南 (北) に位置する3 (9) 月に地磁気活動が最大になる。これは ARS 効果と言われ、図1で各極小期付近に見られるC 9 の半年変化はこの効果によるものである (Saito⁽⁹⁾)。

一方、太陽の地理的座標系 (Solar equatorial system : SEQ) と太陽の地磁気座標系 (Solar magneto-



第9図 太陽からの距離による偏向角の変化.

spheric system : SM) との座標系のくいちがいによる4月と10月に最大になる効果もある. これを一次元的に扱ったのが Russell-McPherrn 効果であり, 二次元的に拡張したのが SEQSM 効果である. 即ち地磁気は ARS-SEQSM 効果を受ける (Saito⁽⁹⁾).

ここでもし太陽の南北半球に1個ずつの M-region があり, 経度が $4L$ だけ離れているとする. ($4L \sim 180^\circ$ である場合が多い). すると27日回帰図上で回帰性擾乱をおこすエポックが春から秋にかけて $274L/360$ だけジャンプする. このジャンプは見かけ上回帰周期の変化となり, 条件によっては30数日のにせ周期となってしまう. これが ARS-SEQSM と経度の複合効果である.

参 考 文 献

- (1) Svalgaard, L. (1975), An Atlas of interplanetary sector structure 1957-1974, *Stanford University, Institute for Plasma Research Report*, No. 629.
- (2) Saito, T., T. Oki, C. Olmsted and S-I. Akasofu (1989b), A representation of the magnetic neutral line on the solar source surface in terms of the sun's axial dipole at the center and two equatorial dipoles in the photosphere. *J. Geophys. Res.*, 94, Submitted.
- (3) Marubashi, K. and Watanabe, S. (1983), *Radio and Space Data, Synoptic maps of open magnetic fields in the solar corona from August 1959 to January 1974*. Publ. by Rad. Res. Lab., M. P. T., Tokyo, 1.
- (4) Hoeksema, J. T., J. M. Wilcox and P. H. Scherrer (1983), The structure of the heliospheric current sheet: 1978-1982, *J. Geophys. Res.* 88, 9910-9918.
- (5) Saito, T. (1989), Solar cycle variation of solar, interplanetary, and terrestrial phenomena, *Laboratory and Space Plasmas*, ed. by H. Kikuchi, Publ. by Springer-Verlag, 473-528.
- (6) Saito, T. (1965), A new index of geomagnetic pulsation and its relation to solar M regions, II, Analysis of the data from 1959 to 1964. *J. Geomag. Geoelectr.* 17, 23-44.
- (7) Saito, T. (1975), Two-hemisphere model of the three dimensional magnetic structure of the interplanetary space, *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, Ser. 5, 23, 37-54.
- (8) Saito, T. and T. Oki (1989a), Interaction between the heliomagnetosphere and the cometary magnetosphere. *Laboratory and Space Plasmas*, ed. by H. Kikuchi, Publ. by Springer-Verlag, 351-578.
- (9) Saito, T. (1972), Recurrent magnetic storms in relation to the structure of solar and interplanetary magnetic fields, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 26, 245-266.