

地磁気の静穏日変化と擾乱の自己／相互相関

門 倉 真 二*

AUTO/CROSS-CORRELATION IN GEOMAGNETIC REGULAR VARIATION AND DISTURBANCE

By

Shinji KADOKURA

A method to derive the geomagnetic index K is applied to separate the geomagnetic variation into solar regular variation (S_R) and disturbances. The powers of S_R (QP) and disturbance (DP) are calculated, and the time series of QP and DP are analyzed by means of correlation. The analysis presents the following preliminary results: (a) DP is in weak recurrence of 27 days; (b) auto-correlation of QP is consistent with the variations of S_R amplitude, i. e. predominantly annual variation, semiannual variation and 27 days recurrence; (c) QP is correlative with DP one day before; and (d) DP seems to be correlative with QP one solar rotation before.

1. 序

従来、地磁気変化の様子を表わす指標としては、K指数など擾乱を表わす指数のみが有り、静穏日変化 (S_R) については、顧みられることはなかったようである。これは、 S_R は S_q という平均的な日変化の場合とほぼ同じだとする考え方が基になっているのであろう。しかしながら、実際の S_R は、季節変化はもとより、その日その日の、太陽地球環境 (Solar Terrestrial Environment: STE) の状況により異なる様相を示す。例えば K指数は、地磁気変化から S_R の分を差し引いた変化の3時間毎の振幅で決める⁽¹⁾のだが、このときの S_R の推定には多くの経験を必要とするので、各観測所でも熟練した観測者が担当することになっている。そのうえ、K指数を決める際の S_R はその日のアナログ記録を参考にして決めるべきであり、固定したものをを用いてはいけないという指摘もはっきりされている⁽²⁾。これらのこともあって、地磁気記録がデジタル化されても、K指数の決定は相変わらず人手に頼らざるを得ないという背景のもとで、これをコンピュータで自動的に求めようという動きが近年活発である (IUGG meeting, 1986 等)。著者も K指数自動読取のアルゴリズムを考案し、よい結

果を得ている⁽³⁾。そのアルゴリズムには、必然的に各日の S_R を推定する部分がある。すなわち、地磁気変化を S_R とそれ以外の擾乱に分離している。すでに観測されている量 (地磁気) から新たに2つの量 (S_R と、残差=擾乱) が生成されたことで、いろいろ利用方法が考えられる。今回は STE 擾乱予測に適用することを試みた。方法は、 S_R や擾乱変化のパワーを日毎に求め、それぞれの自己相関と相互相関を調べるというものである。

2. 解 析

まず、ここで用いた S_R の決定方法の概要を示そう。

(1) あらゆる日変化の全体 X を線形空間として扱い、内積を定義する。

(i) $X \ni x, y, z, R \ni \alpha, \beta$ のとき $z = \alpha x + \beta y$ とは

$$z(t) = \alpha x(t) + \beta y(t),$$

$$0 \leq t \leq t_0 (=24\text{時間}=1440\text{分})$$

(ii) $X \ni x, y$ のとき内積 $(x \cdot y)$ は

$$(x \cdot y) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} x(t)y(t)dt$$

(2) データ使用可能な日より静穏日を選び、そのデータを $\{q_i\}_{i=1, N}$ とする。対称行列 $Q_{ij} = Q_{ji} = (q_i \cdot q_j)$ を直交変換により対角化する。

$$A = 'TQT, \quad 'TT = 1$$

* 柿岡地磁気観測所

The Kakioka Magnetic Observatory

ここで, $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & 0 \\ & & \cdot & \\ & 0 & & \cdot \\ & & & & \lambda_N \end{pmatrix}$

この A, T を用いて

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_N \end{pmatrix} = \Psi^t T \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ q_N \end{pmatrix}$$

但し, $\Psi = \begin{pmatrix} \psi_1 & & & \\ & \psi_2 & & 0 \\ & & \cdot & \\ & 0 & & \cdot \\ & & & & \psi_N \end{pmatrix}, \psi_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}$

により, 正規直交系 $\{b_i\}_{i=1, N}$ を得る.

$$\begin{aligned} \therefore (b_i \cdot b_j) &= \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \psi_i T_{ki} (q_k \cdot q_l) T_{lj} \psi_j \\ &= \psi_i \lambda_i \delta_{ij} \psi_j = \psi_i^2 \lambda_i \delta_{ij} \\ &= \delta_{ij} \end{aligned}$$

(3) $\{b_i\}_{i=1, N}$ の張る空間 $B (= \{b | b = \sum_{i=1}^N \beta_i b_i; \beta_i \in R\})$ を S_R 全体の集合 S とみなし, 任意の日のデータ $x(t)$ に対し, これに最も近い S の要素 q_x でその日の S_R を近似する. すなわち

$$q_x = \sum_{i=1}^N \xi_i b_i; \xi_i = (x \cdot b_i)$$

ところで, 磁気嵐等の際に b_i に同期したパターンの現象があると, ξ_i が異常に小さかったり大きかったりすることがある. そのままの ξ_i を使うと, 得られる q_x も異常な変化をするようになるので, ξ_i の範囲を制限する必要がある. 具体的には $B \cap S$ を前提に, 更に, $\{(s \cdot b_i)\}_{s \in S}$ の分布を $\{(q_j \cdot b_i)\}_{j=1, N}$ の分布 (平均値 μ_i , 標準偏差 σ_i) で近似する. $|\xi_i - \mu_i| \leq 2\sigma_i$ は 99% 以上の確率で成り立つはずだから, この範囲をはずれる ξ_i を異常値として扱う. すなわち,

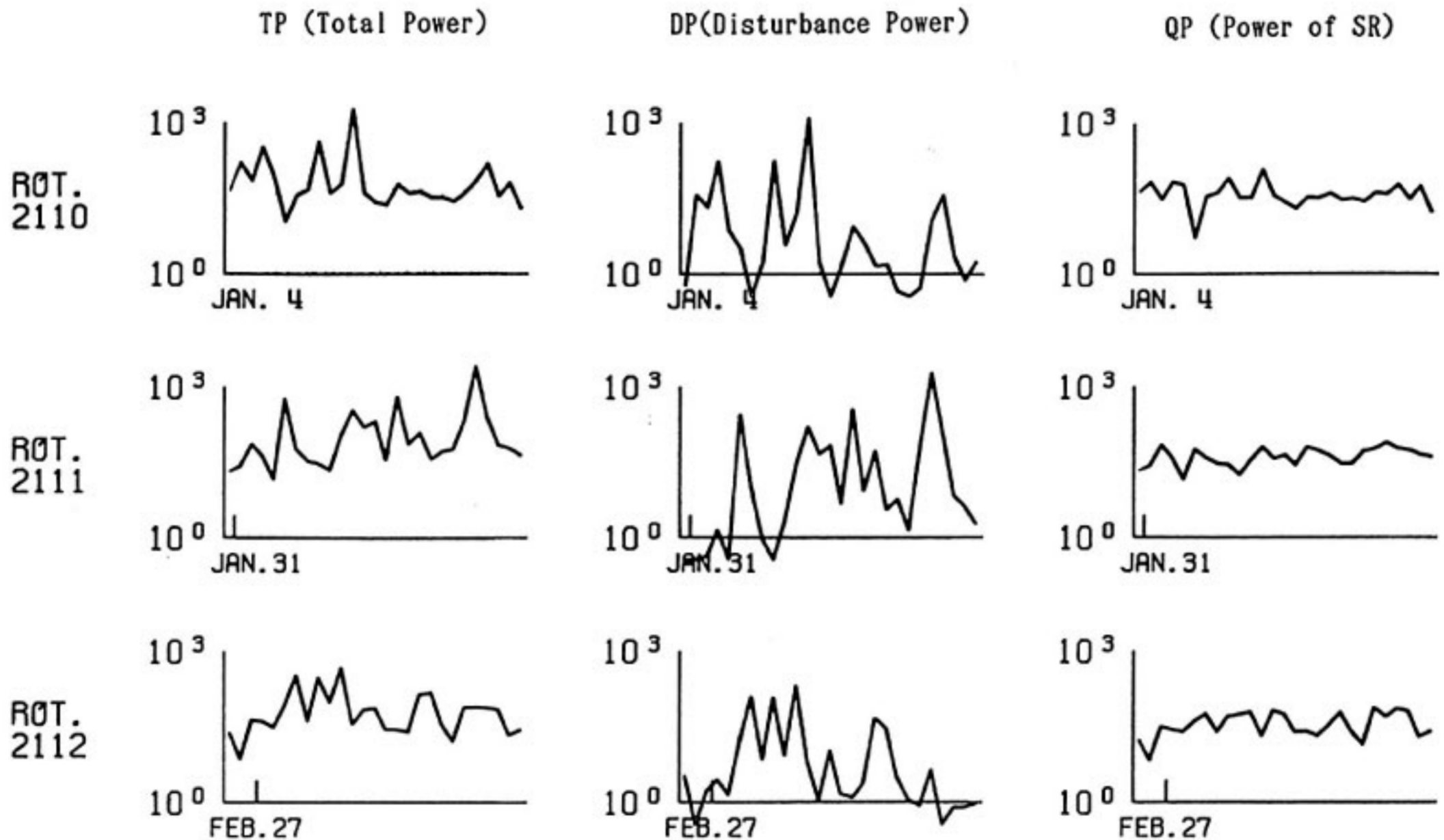
$$\xi_i' = \begin{cases} \mu_i + 2\sigma_i & (\xi_i < \mu_i - 2\sigma_i) \\ \xi_i & (\mu_i - 2\sigma_i \leq \xi_i \leq \mu_i + 2\sigma_i) \\ \mu_i - 2\sigma_i & (\xi_i > \mu_i + 2\sigma_i) \end{cases}$$

として, ξ_i の代わりに ξ_i' を用いるようにした. この操作により, 擾乱のある日でも, 尤もらしい S_R を得ることが出来るようになる.

以上のようにして得られた $S_R (= \sum_{i=1}^N \xi_i' b_i)$ を用いて, その日の全日変化, 静穏日変化, 及び擾乱分の, パワー (各々 TP, QP, DP) を求める.

$$TP = (x \cdot x) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} x(t)^2 dt$$

$$QP = (q \cdot q) = \sum_{i=1}^N \xi_i'^2$$



第1図 楠岡の1988年1月4日~3月25日のTP, DP, QPの時系列: 左からTP, DP, QPの順に並べた. 1段で27日 (太陽自転周期) の時系列を示した. どのパワーについても, この期間は27日回帰性に乏しいことがわかる.

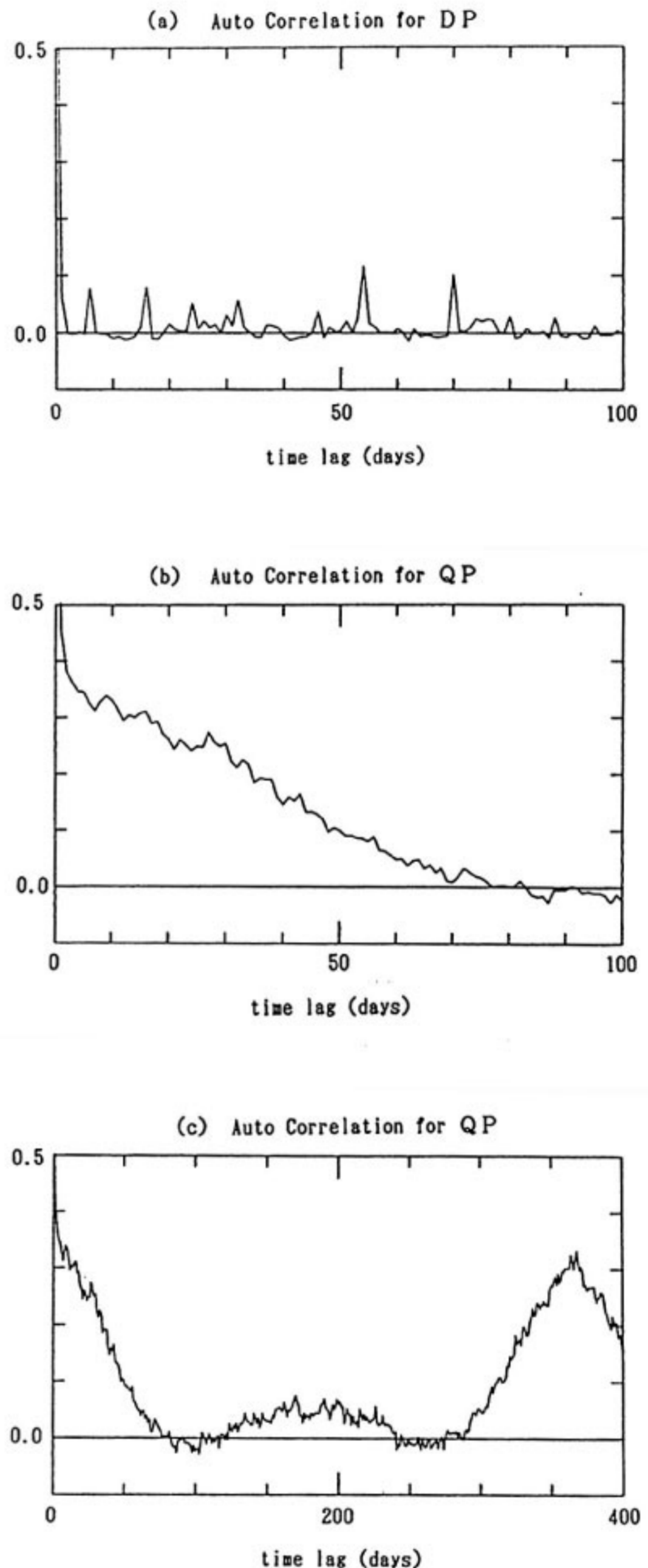
$$DP = ((x-q) \cdot (x-q))$$

$$= TP - QP + \sum_{i=1}^N (\xi_i - \xi'_i)^2$$

柿岡のデータについてこのように解析した例を第1図に示す。左から TP, DP, QP で、太陽自転周期の27日ずつで区切った。解析方法の性質上、各値は1日1ケずつ決まる。左の番号は太陽自転の番号である。縦軸は対数目盛りで $1 \sim 10^3$ [nT²] である。DP は 1 nT^2 以下から 10^3 nT^2 以上まで大きく変化する。言うまでもなく、この項は地磁気静穏日であれば殆ど0となるので小さく、磁気嵐が起これば 10^3 以上、場合によっては 10^4 以上を記録することもありうる。本図でも、1月13~15日、2月21~23日の磁気嵐では 10^3 を越えている。DP には早い変化よりも3~24時間程度の周期の変動成分が効くので、おもに D_{st} を反映するレンジとの相関はよい。ここに掲げた時期は擾乱の27日回帰性が弱く本図の様子と一致する。

QP にはあまり大きな変動はみられず、季節ごとに S_q 振幅が一定していることに対応している。1月15日には、平均的な日に比べて3倍近いパワー（振幅では約1.7倍）が出ているが、この日は磁気嵐があったので計算された S_R の誤差が大きくなったためと考えられる。一般に擾乱の強い日について得られた S_R の信頼性はやや低いが、このことは人間がK指数を読みとるときでも同じことであり、ここで用いたアルゴリズムのみの問題ではない。ところで、各太陽自転周期の初めの方の1月9日、2月4日、2月28日のQPは、平均的な値の1/4~1/5程度しかない。これらの日はいずれも静穏日だから、得られた S_R の誤差も少なく、またアナログ記録を見ても実際に変化が殆どない。電離圏ダイナモ電流系の焦点 (Focus) の緯度がちょうど柿岡と同じくらいになったとすれば、このようなことが起こることは説明できる。このような特異日が月に1回程度あるのは興味深いことで、今後の詳しい解析が望まれる。

以上のように得られたQP, DPの時系列についての、自己相関を第2図に示した。データは同じく柿岡のもので、期間は1976年から1987年の12年間である。(a)ではDPの自己相関について τ (time lag) = 0~100日まで示した。27日や54日付近を中心に弱い山がみられ太陽自転起源の27日回帰性のあることを示しているが、12年間おしなべてしまうとそれほどはっきりしているものではないことがわかる。6, 16, 54, 70日に鋭いピークがあるが、これらの周期の回帰性がDPにあるわけではない。DPの時系列を調べると、1982年7月14日にこの12年で最大の値 ($1.02 \times 10^4 \text{ nT}^2$) を記録し、同じ年の9月6日、9月22日にもほぼ $8.0 \times 10^3 \text{ nT}^2$ となってい



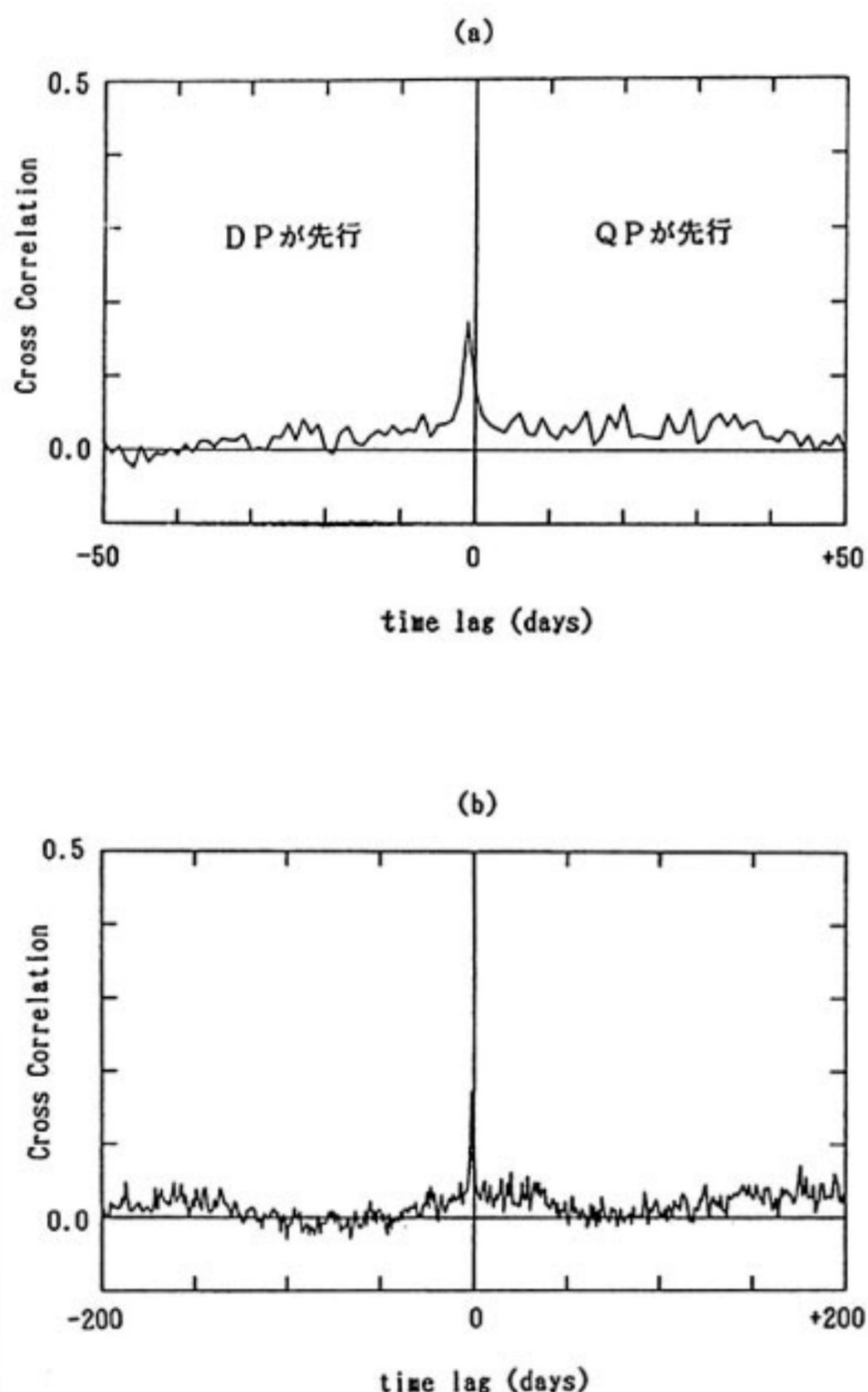
第2図 柿岡の1976年から1987年のDPとQPの相互相関：(a)はDPについて、時間差 τ (time lag) が0~100日の部分を示した。(b)と(c)はどちらもQPについて示したが、横軸のスケールを変えてある。

る。この3つは磁気嵐のためにでた値だが、これだけで16, 54, 70日のピークが生じた。同様に、1976年3月26日と4月1日に各々DPが 9.8×10^3 , 6.6×10^3 となったために、6日のピークが生じた。このように特定の極

端に大きな擾乱のペアによって、自己相関に鋭いピークがあらわれるので、注意を要する。

第2図(b)に、同様の形式でQPの自己相関を示した。概ね τ の小さいところで自己相関が強く、また27日付近にやや強調がみられて太陽自転起源の回帰性をうかがわせる。この横軸をもっと広い範囲($\tau=400$ 日)に広げたのが第2図(c)である。明らかに $\tau=365$ 日付近にピークがあり、 S_q の振幅に季節変化のあることを示している。また、半年周期の変動もあることがわかる。

第3図にQPとDPの相互相関を示した。(a)では $\tau=-50\sim+50$ 日の範囲を示した。ここでは τ の符号は正で先行するQPとその後のDPの相関を表わしている。 $\tau=0$ 日でやや相関が大きいことから、 S_R の分離が完全にできているわけではないこと(DPからQPへの



第3図 柿岡の1976年から1987年のDPとQPの相互相関：正符号で、先行するQPと後続のDPの相関を表わす。 $\tau=-1$ 日に抜きんでたピークがみられる(本文参照)。(a)と(b)とは、横軸のスケールを変えている。

干渉)がわかるが、その値は0.08程度で $\tau=0$ 付近の平均的レベル(0.05)やそのばらつきを考えると、概ね成功しているといえる。 $\tau=-1$ での値は0.18で、平均的レベルに比べても抜きんでて大きく、有為な差と認められる。このことは擾乱の大きかった翌日の S_R の振幅が大きくなる傾向を示している。DPの自己相関でも、 $\tau=1$ で0.07程度しかないし、DPからQPへの干渉漏れも少ないので、DP(当日) \rightarrow DP(翌日) \rightarrow QPへの干渉というようなプロセスで生じた見かけ上のピークではない。物理的な機構としては、 S_q 電流系の焦点(Focus)の移動や、極域の粒子降下による加熱が熱圏の風系を増強するなど、が考えられる。このうち前者については異なる緯度の観測点のデータを解析することで確かめられるであろう。

(b)に $\tau=-200\sim+200$ 日の広い範囲を示した。概ね τ の正負で対称だが、 $\tau=25\sim40$ 日付近に弱い盛り上がり認められる。これはQPの増加の1太陽自転後に擾乱が起こる傾向を意味するので、STE擾乱予測の一つの可能性として評価できる。但し、12年間おしなべてその結果極く弱い相関がみられるというものだから、すぐに使えるというのではなく今後の研究を要する。

3. ま と め

地磁気変化を静穏日変化と擾乱に分離する手法を応用し、各々の日毎のパワーQPとDPの時系列を得た。これの、柿岡での1976年~1987年の12年間の自己相関及び相互相関を調べ以下の初期結果を得た。①DPには27日回帰性がみられるが12年間おしなべてしまうと弱くなってしまふ。②QPでは1年周期の季節変化が支配的で、他に半年周期、27日周期がみられ、従来からいわれる S_q の性質に一致する。③DPとQPの相互相関では擾乱が1日後の S_R に影響することが示されており、新しい発見である。④QPと1太陽自転後のDPに相関がみられ、STE擾乱予測に1つの可能性を示した。

参 考 文 献

- (1) Mayoud, P. N., Atlas of K-indices, IAGA Bull., No. 21, 113pp., IUGG Publication Office, Paris, 1967.
- (2) Menvielle, M., About the scalings of K-indices, IAGA News, No. 20, 110-111, IUGG, 1981.
- (3) 門倉真二, 地磁気デジタル毎分値を用いて K-index を求める方法, Memoirs. Kakioka Mag. Obser., 22, 45-61, 1988.