

7 - 2 地震前兆現象の分類と前兆出現頻度の規則性

Classification of Earthquake Precursors and Regularity of Precursor Appearances

国立防災科学技術センター

浜田 和郎

Kazuo Hamada

National Research Center for Disaster Prevention

地震前兆現象の分類

これまでに集められた地震の前兆現象^{1), 2)}は観測の項目および見かけのパターンによって表1の如く分類される。前兆期間の項においては、前兆期間(T_p)の過半数が30日を超えれば長期(L)、それ以内なら短期(S)に分けてある。短期は T_p の過半数が3日以内の直前(SS)の前兆も含む。このように表中の各項目はLかSにわけられ、それぞれの数はL:222, S:528(内SSは395)*となる。データの少ないものは今後分類が変わるかも知れないが、測地と検潮は全て長期であり、地殻変動連続観測は全て短期である。他の分野、地震・地球電磁気・地球化学には長期と短期が混在している。前兆期間 T_p と本震のマグニチュード(M)との関係で最も特徴的な例は前震と異常地震活動であり、前者は T_p がMとは独立な例であり、後者は $\log T_p$ がMと見事なりニアな関係をなす。他の前兆はこれらほど特徴的ではなく、これらの性質がまじったものである²⁾。

短期と長期の前兆の違いは非常に明瞭であり、それは T_p の累積確率(P_c)グラフ(図1)に示されている。図1において、 $T_p \leq 30$ 日の場合の短期前兆現象の P_c は85%であるが、長期前兆現象では14%にすぎず、 $T_p \leq 1,000$ 日でやっと59%である。

短期前兆現象の P_c に与える本震のマグニチュードの影響

Mの増加に伴って $\log T_p$ が増加する傾向のある前兆現象は短期の前兆の中にも混在している。その影響を調べるために作成したのが図2である。

$M \geq 6$ と $M < 6$ のデータ数は殆んど同数で、全データの平均は $M = \text{約}6$ である。 $M \geq 6$ のデータの平均は $M = \text{約}7$ であり $M < 6$ のデータの平均は $M = \text{約}5$ である。従って、この図では、白丸は $M = \text{約}6$ 、黒丸は $M = \text{約}7$ 、黒三角は $M = \text{約}5$ の P_c を与えている。このように $M = 6$ の前後では、Mの1の違いは大きくても P_c で10%程度であることがわかる。比較的 P_c の違いが大きくなるのは、 $T_p = 1 \sim 10$ 日の範囲であり、その範囲から離れるにつれて違いは減少している。

前兆出現確率の規則性

図3は短期前兆現象の単位時間当りの相対出現頻度(RF)を表わす。ここでは T_p を適当な

* T_p がわかっているものの数、宇津のクライテリオンは前震と重複するのでカウントされていない。

区間に分けてその中の平均の相対値を RF としている。区分の境界は $T_p = 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1,000$ 日である。この図において RF は、 $T_p \leq 0.1$ 日の場合の単位時間当りの前兆出現頻度を 1 とした時の相対値である。図からは明瞭な規則性が読取れる。即ち、 $T_p = 0.1 \sim 30$ 日の範囲では階段状の RF は $\log T_p$ の増加に伴って、実に見事なりニアな関係を保ちながら、減少している事がわかる。 $T_p = 30$ を超えると、RF の減少は急に大きくなる。本震の M を 6 未満と 6 以上に分けて調べた場合もそれぞれ点線と細い実線で合わせて図示されているが、それぞれ同様な規則性を示している。

図 4 は、図 3 における RF 減少の様子に、最小二乗法により直線をあてはめたその結果を示している。RF 値は区分した T_p の範囲の中心の位置に白丸でプロットしてある。これらの点は前兆出現の確率密度分布の形を与えるものと考えて表記を Pd (probability density) に変えてある。この図から明らかに、 $T_p = 0.1 \sim 30$ 日の範囲では図中の式で表わされる見事な線形関係が見られる。

ここで、確率密度分布が確率変数 T_p の或る区間において図 4 の式で表わされる場合の一般について、その累積確率 P_c (cumulative probability) との関係を考察すると、次の様になる。

確率密度分布関数

$$P_d (T_p) = 10^a T_p^{-b} \dots\dots\dots(1)$$

$$\log_{10} P_d (T_p) = a - b \log_{10} T_p \dots\dots\dots(2)$$

$$a, b : \text{const.}, \alpha \leq T_p \leq \beta$$

↑ ↓

累積確率関数

$$P_c (T_p) = 10^a (1 / (1 - b)) T_p^{1-b} + A (b \neq 1) \dots\dots\dots(3)$$

$$P_c (T_p) = 10^a \ln 10 \cdot \log_{10} T_p + B (b = 1) \dots\dots\dots(4)$$

$$A, B : \text{const.}, \alpha \leq T_p \leq \beta$$

即ち、(1)式の確率密度分布関数 Pd が、(2)式の様になるので $\log Pd - \log T_p$ 平面では定数の値にかかわらず直線で表わされる。対応する累積確率関数 P_c は(3)又は(4)式の様になり、 $P_c - \log T_p$ 平面においては、 $b > 1$ ならば上に凸、 $b < 1$ ならば下に凸のグラフで表わされ、 $b = 1$ ならば直線で表わされる。

ここで累積確率関数の推定が出来たので、次にその最適パラメタを求め観測結果との比較を行った。その結果は図 5 に示してある。ここで白丸は T_p のわかっている全ての短期前兆現象の P_c であり、図 1 と 2 の白丸と全く同じである。実線は図中に示してあるパラメタを用いた(3)式の計算値である。ここで b 値は図 4 に示してあるものであり、a 及び A は目測によって P_c の観測値に対する最適値を探ったものである。図 5 が明瞭に示しているように、 $T_p = 0.1 \sim 40$ 日の範囲にわたって、 P_c の観測値と計算値は実に良く一致している。観測と計算の違いは、 $T_p \leq 40$ 日の領域で、最大 2.4% 平均 1.2% にすぎない。「図 4 及び 5 の結果は、(1)~(4)式で表わされる前兆発生確率の規則性が実在することを示唆しており、単なる数値あわせの問題ではない」と筆者は考えている。もちろん、この規則性は本震前の 40 日間のことであり、それを超

える長期の前兆現象を説明するものではない。しかし、この期間は短期前兆現象の約 90% が集中している前兆発生過程の主な部分である。

前に提出した経験式 $P_c = (T_p / (T_p + 9))^{1/2}$ は^{1), 2)}, T_p の全域にわたって簡単な式で P_c の値を近似したものである。本論文で明かにした規則性こそはより本質的と考えられる。

前兆現象の信頼性

ここで取扱ったデータは現在までに蓄積された日本とその周辺で発生した地震の前兆現象であり、その殆どは観測者によって、「前兆らしき現象」として報告されたものである。従って、不可避免的にノイズの混入は避けられない。特に地震の直前には種々の異常現象がその後の地震と結びつけられてしまう心配は大きい。そのため、現在では最も信頼出来る前震とその他の短期前兆現象について累積確率の比較をして見た。図 6 はその結果であるが、ここに 287 個の前震（黒丸）とそれ以外の 241 個の全ての短期前兆現象（白丸）がプロットされている。驚くほど両者は良く一致している。特に $T_p = 0.1 \sim 10$ 日の間では両者の間には何らの有意な違いもなくかつ規則的に並んでいる。おそらく殆どどの地震学者は前震を最も信頼できる前兆と見るに違いない。しかし、他の全ての短期前兆も、累積確率の点では、殆ど同じ分布をしている。従って、種々の報告された短期前兆現象というものは、「もっと素直に信頼して良い」というのが筆者の感じである。おそらく地震の直前には多くのノイズに騙されているに違いない。しかし、同時に真の前兆は更に多く発生するために、大勢にはあまりノイズの影響はないと思われる。

短期前兆現象の意味

短期前兆現象は図 1 に見られるように長期前兆現象と明瞭に分離される。又図 4 と 5 に見られるように T_p を確率変数とする前兆発生確率 P_d のべき関数 ((1)式) の性質は顕著である。このような短期前兆現象の中には前震をはじめとする地震学的現象の他に、地殻変動連続観測、地球電磁気、地球化学等々の諸異常現象を含んでいる。一見ばらばらに見えるこれらをまとめ、種々の違いを持っている個々の地震の例を重ね合わせて見ると、上記の様な規則性が明らかとなった。

これは、おそらく、見かけ上異なる種々の前兆もその背後にある本質的な過程、即ち震源域とその近傍における「応力の蓄積→歪みの進行→前駆的破壊および又はディスロケーション→主破壊＝本震の発生」の反映と考えられ、前兆現象発生を確率過程として見た場合の規則性は実在のものと考えられる。短期前兆現象の主なものは、前駆的破壊および又はディスロケーションの段階に対応していて、それらの開始と相前後して急に発生確率が増加するものと思われる。

石橋^{3), 4)} は物理学的前兆とテクニクな前兆について議論をしている。筆者もその議論の大筋には賛成であるが、短期前兆現象の多くはこの物理学的前兆に相当するであろう。

前兆発生確率に関連する議論

前兆現象出現の確率 P_d が前兆期間 T_p の関数として図 4 の如く表わせる事がわかったが、

ここで岩石破壊に関する茂木の次の様な実験に基づく経験式と比較検討を試みる。

$$\text{破壊発生確率 } \mu(\sigma) = A \exp(B\sigma) \dots\dots\dots(5)$$

σ : 応力

A, B : const.

両辺の対数を取ると $\log_{10} \mu = A' + B'\sigma \dots\dots\dots(6)$

A', B' : const.

$\log_{10} \mu$ と σ の見事なリニアな関係が花崗岩資料に対して得られている。大変面白いことには、(6)式の σ の代わりに $\log_{10} T_p$ と置くと(2)式と同じ形になる。

短期前兆現象の代表的なものである前震を考えて見れば、前震発生確率は実験で得られている破壊発生確率に対応している可能性は考えられる。従って、ここで $P_d = \mu$ と仮定すれば、(2), (6)式から次の様になる。

$$\log_{10} P_d = A' + B'\sigma \dots\dots\dots(7)$$

$$\sigma = A'' - B'' \log_{10} T_p \dots\dots\dots(8)$$

A', A'', B', B'' : const.

つまり、次の様な推定ができる。前兆発生確率 P_d の対数がリニアに増加することは震源域での応力のリニアな増加に対応している。その応力のリニアな増加は $\log_{10} T_p$ のリニアな減少に対応している。即ち、始めのうちはゆっくりしているが、本震が近づけば近づく程震源域の応力はより一層急激に増加し前兆発生確率も更に一層増加する。

結 論

1. 日本とその周辺で発生した地震の計 750 個の前兆現象はその前兆期間 T_p によって、各分野の項目ごとに短期 (S) か長期 (L) かに分けられる。つまり、前兆期間の過半数が 30 日以内であれば短期それ以外は長期である (表 1)。このように分けると、前兆期間の累積頻度分布図 (図 1) で見られるように両者は明瞭に分離される。
2. 短期前兆現象出現の確率密度 P_d は本震の接近に伴って急激に増加しているが、前兆期間 T_p の(1), (2)式の関数で驚くほど良く近似される (図 4)。
3. (1), (2)式の確率密度に対応する累積確率関数は(3)又は(4)式で表わされるが、 $T_p = 0.1 \sim 40$ 日の範囲にわたってこれも見事に観測と一致する (図 5)。
4. (2)式で表わされる前兆発生確率 P_d が、茂木が実験で得た(5)式の破壊発生確率 μ に等しいと仮定すれば、 $\log P_d$, $\log T_p$, σ (応力) に関するリニア関係式(7), (8)が得られる。即ち、 $\log P_d$ の増加は震源域での σ のリニアな増加に対応するものであり、その σ の増加は $\log T_p$ の減少に対応している事が推定される。

参 考 文 献

- 1) 浜田和郎 : a, 日本の被害地震の前兆現象—前兆現象観測の現状—, 連絡会報, **37** (1987), 363 - 371.
- 2) 浜田和郎 : b, 日本の地震の前兆現象に関する統計, 地震予知研究シンポジウム (1987), 243 - 249.

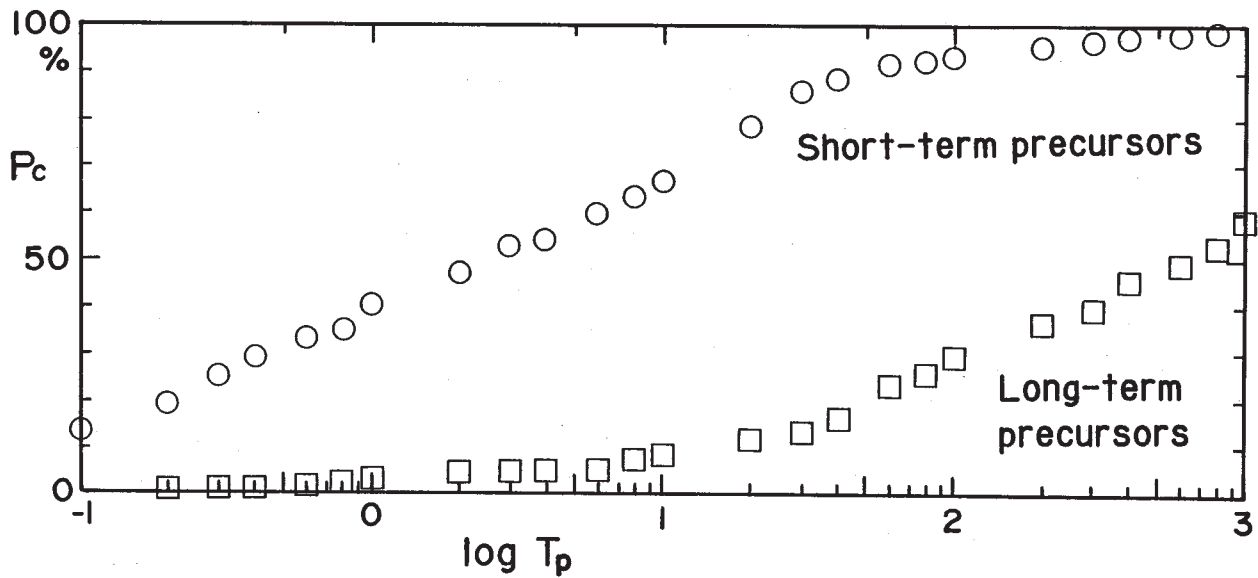
- 3) Ishibashi, K. : Two Categories of Earthquake Precursors ; Physical and Tectonic, Proceedings of 5th Joint Panel Meeting The U. J. N. R. Panel on Earthquake Prediction Technology, 1986, Tsukuba, Geographical Survey Institute, (1986) , 130 - 137.
- 4) 石橋克彦 : 2種の地震前兆現象 : 物理的前兆とテクトニクス的前兆, 地震学会講演予稿集, (1987) , No.2 , 176.
- 5) Mogi, K.: Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relations to Earthquake Phenomena, Bull. Earthq. Res. Inst., **40** (1963) , 125 - 173.

第1表 日本の地震の前兆現象，括弧内の数字は分野ごとの小計を示す

Table 1 Precursors to Earthquakes Occurring in and around Japan. Numerals in parentheses are subtotal in that discipline.

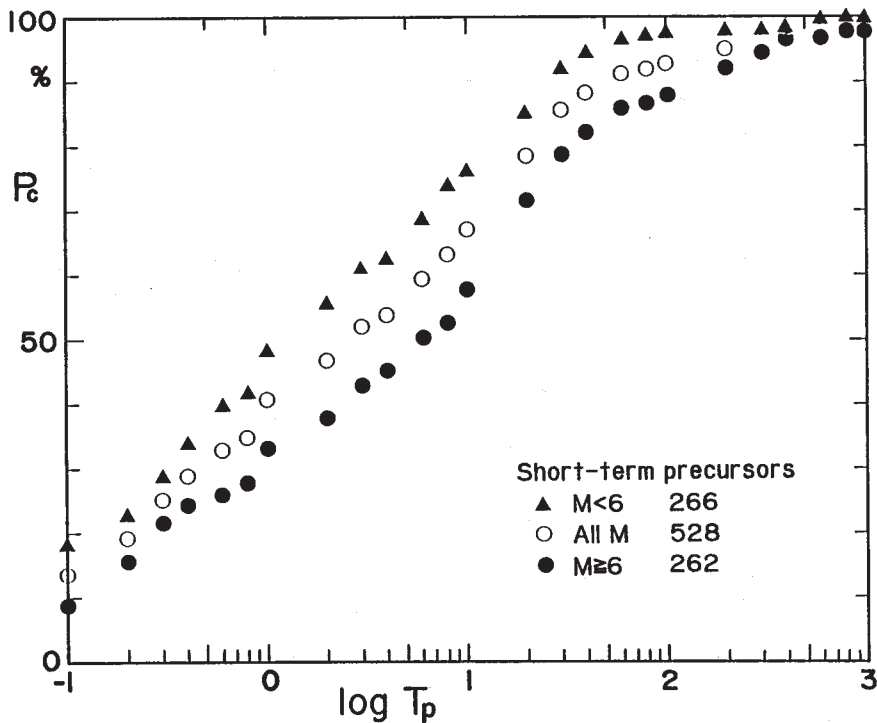
| 地震前兆現象の分類 | | 前兆期間 の分類 | 前兆期間の数 | | | |
|----------------|-----|--------------------|------------|-----------|----------|--------|
| 大分類 | 小分類 | | 計 | 30日 以内 | 3日 以内 | |
| 重力 | GR | S | 1 | 1 | 0 | |
| 測地 | GD | | (20) | (2) | (0) | |
| | | 水準測量・隆起 三角・三辺測量 | u t | 16 1 | 2 0 | 0 0 |
| | | その他 | blank | 3 | 0 | 0 |
| 検潮 | TD | | (11) | (2) | (2) | |
| | | 隆起 その他 | u blank | 9 2 | 1 1 | 1 1 |
| 地殻変動 連続観測 | CN | | (108) | (77) | (39) | |
| | | 伸縮計 | s | 21 | 16 | 5 |
| | | 傾斜計、振子 水管 | t tw | 51 11 | 32 6 | 9 6 |
| | | 体積歪計 | v | 25 | 23 | 19 |
| 地震 | SS | | (504) | (331) | (181) | |
| | | 異常地震活動 | a | 71 | 4 | 0 |
| | | 微動振幅の増大 | A | 1 | 1 | 1 |
| | | b値 | b | 25 | 13 | 8 |
| | | 前震 | f | 287 | 265 | 151 |
| | | 地震波形 | F | 7 | 4 | 2 |
| | | 微小地震 | m | 16 | 8 | 1 |
| | | 地震活動の続発性 | nu | 14 | 14 | 12 |
| | | 地震活動のパターン | p | 31 | 0 | 0 |
| | | 地震活動空白静穏化 | q | 20 | 5 | 3 |
| | | 地震波の減衰・散乱 | Q | 2 | 0 | 0 |
| | | 地鳴り | r | 5 | 5 | 2 |
| | | 発震機構の変化 | s | 1 | 1 | 1 |
| * 宇津の基準 | U | 11 | 11 | ? | | |
| 地震波速度変化 | v | 13 | 0 | 0 | | |
| 地球電磁気 | EL | | (63) | (50) | (47) | |
| | | 地磁気 | g | 4 | 0 | 0 |
| | | 地電流 | e | 11 | 9 | 8 |
| | | 海底地電位 | ps | 1 | 1 | 1 |
| | | 比抵抗、山崎メータ | r | 30 | 30 | 30 |
| | | 比抵抗、その他 電磁放射 | R w | 10 7 | 3 7 | 1 7 |
| 地球化学 | CH | | (44) | (21) | (10) | |
| | | ラドン | Rn | 15 | 11 | 3 |
| | | 塩素イオン | cl | 5 | 0 | 0 |
| | | 水温 | t | 11 | 3 | 2 |
| | | 水位 その他 | l blank | 7 6 | 3 4 | 2 3 |
| 火山活動 | VL | L | 1 | 0 | 0 | |
| 動物異常行動 | AN | SS | 2 | 2 | 2 | |
| 植物生体反応 | BT | S | 2 | 2 | 1 | |
| その他目視に よるもの | NK | | (5) | (5) | (4) | |
| | | 隆起 その他 | u blank | 4 1 | 4 1 | 4 0 |

OKADA/CLASSIFY 9/28/87



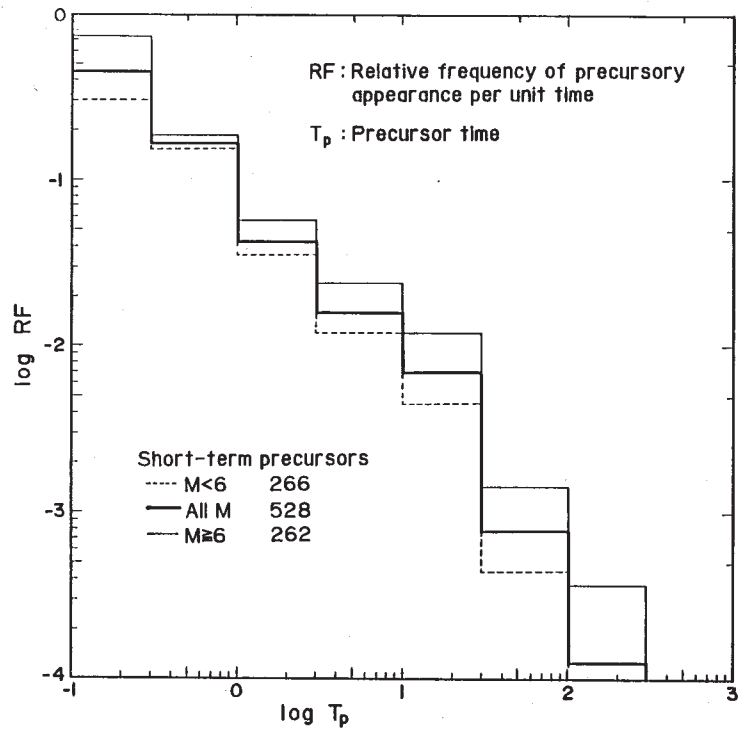
第1図 短期及び長期前兆現象の P_c と $\log T_p$ の関係, T_p : 前兆期間 (前兆の出現から本震までの時間間隔 (日単位), P_c : 前兆出現の累積確率

Fig. 1 Cumulative probability of precursor appearances (P_c) vs. $\log T_p$ plot for short-term and long-term precursors. T_p is a precursor time in day.



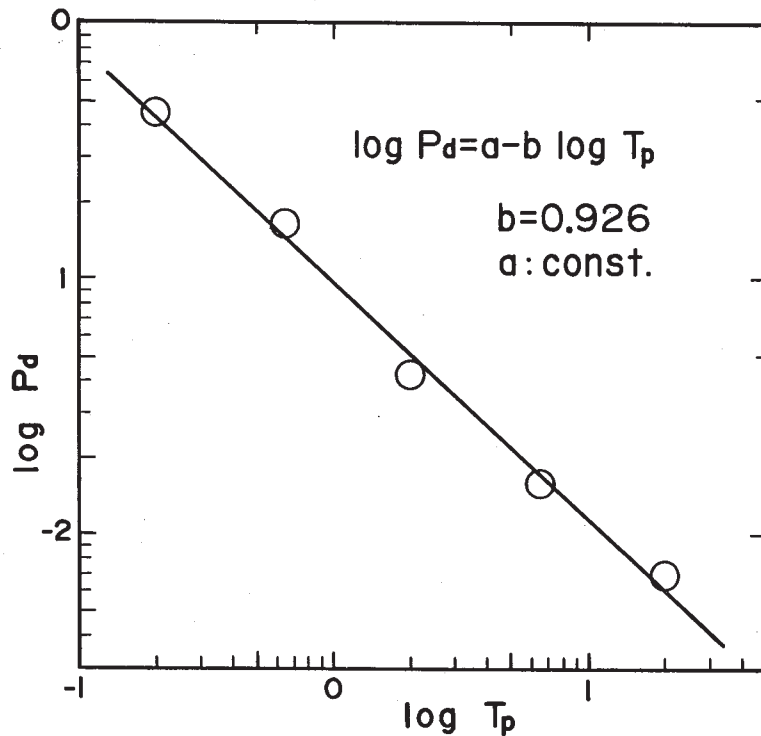
第2図 マグニチュード・クラス別短期前兆現象の P_c と $\log T_p$ の関係, 数字はそれぞれマグニチュード・クラス別のデータ数

Fig. 2 P_c vs. $\log T_p$ plot of short-term precursors for different magnitude (M) ranges of the main shock. Numerals show the number of data in each M range.



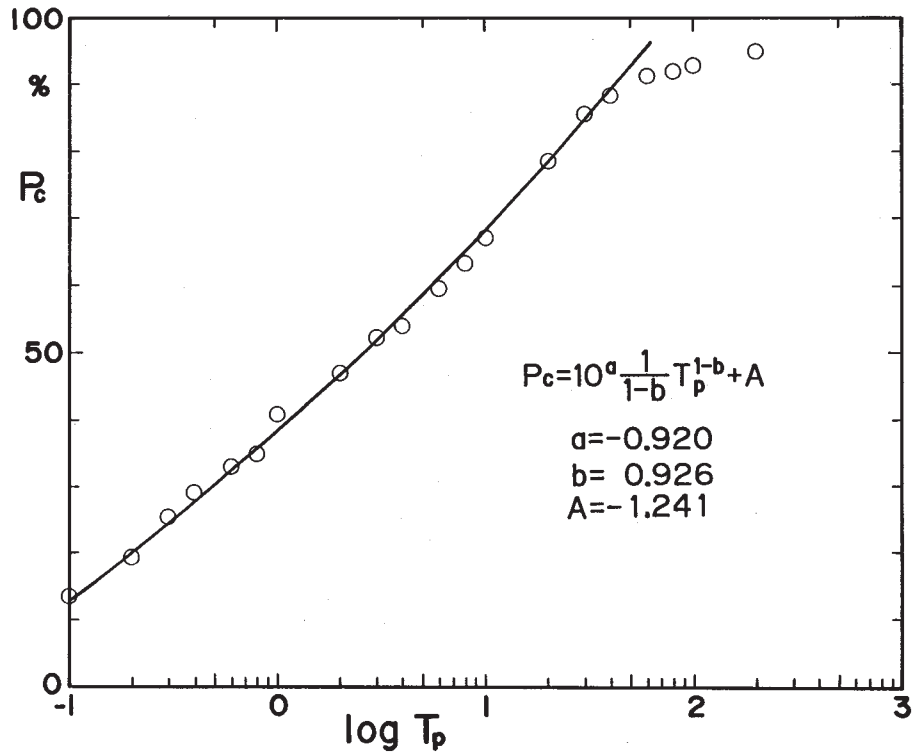
第3図 マグニチュード・クラス別短期前兆現象に対する、相対的単位時間当りの前兆出現頻度 (RF)

Fig. 3 Relative frequency of precursor appearances per unit time (RF) for short-term precursors in different M ranges.

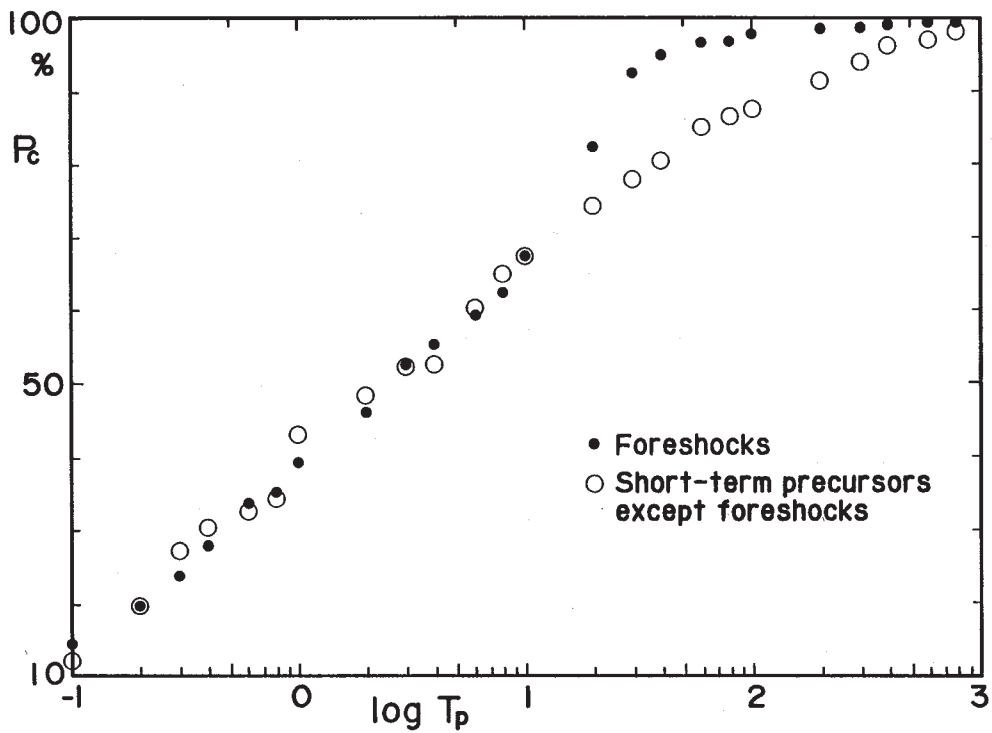


第4図 全ての短期前兆現象に対する、 $\log Pd - \log Tp$ 関係と経験式、Pd: 前兆出現の確率密度分布 (相対値)

Fig. 4 $\log Pd$ vs. $\log Tp$ plot for all the short-term precursors and the estimated formula. Pd: probability density distribution (relative value).



第5図 全ての短期前兆現象に対する、 $P_c - \log T_p$ 関係と経験式
 Fig. 5 P_c vs. $\log T_p$ plot for all the short-term precursors and the estimated formula.



第6図 前震と他の全ての短期前兆現象に対する P_c の比較
 Fig. 6 Comparison of P_c for foreshocks with that for all the other short-term precursors.