

時系列解析による地すべりの変動特性について

小川 滋*・平松 晋也*

Studies on Characteristics of Variation in the Slope Movement by Landslides using Time Series Analysis

Shigeru OGAWA and Shinya HIRAMATSU

Summary: The slope movements in ground by landslides are accompanied with the irregular movement which takes place off and on, therefore the values of the slope movements are largely scattered in time and the characteristics on the slope movements by landslides can not be known exactly.

Therefore, in present, the analysis of the variation on slope movements is mainly based on the qualitative characteristics on it.

We regarded the slope movements as the synthetic movements, which were composed of the trend, periodical movement and irregular movement to treat the variation quantitatively, and meant to clear up the properties on the slope movements.

And the relationship between the slope movements and the precipitation was obtained using the cross-correlation analysis and the cross-spectrum analysis.

The ten days cumulative maximum inclined angle which was measured using tilting gauge, was used as the values of slope movements. This method was applied to the slope movements on Tatsukawayama landslides in Ehime prefecture.

The results may be summarized as follows:

- 1) The trend property detected by the trend index method indicated that the slope movements by the landslides were gradually decreasing.
- 2) The periodical movements had a one-cycle-per-year periodical property.
This landslides area was divided into three blocks by further short term periodical variation properties. And the persistency of the slope movements was showed about two months by the correlograms.
- 3) The results of the power-spectrum analysis showed that the slope movements in this area were composed of the dominant one year periodical movements, one a two months periodical movements and the irregular movements.
- 4) The results of the cross-correlation analysis showed that the amount of the slope movements was great in the rainy season (from June to September) and was less in the dry season (from December

* 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

to March).

These results can be used to predict of the tendency and the periodicity on the long-term slope movements.

要 旨 地すべりによる地盤の変動は、断続的に起る不規則な変動を伴っていることから、観測の結果得られた変動量のデータのバラツキが非常に大きく、その変動特性を正確に把握することが困難である。そのため、現在の変動量の解析では、主として定性的な変動特性から、変動種別をおこなっている。そこで、地すべり変動を時系列的に、傾向変動、周期変動、不規則変動からなる合成変動と考えることにより、変動特性を明らかにすることとした。また、地すべり変動と降雨量との対応関係は、相互相関分析により求めることができる。

この方法を、10日間累積最大傾斜角を変動量として、愛媛県立川山地すべりに適用した結果は、以下のようである。

- 1) トレンド示数による傾向変動検出結果より、本地区は、変動収束傾向にある。
- 2) 周期変動は、1年を周期とする変動特性をもつが、さらに、3ブロックに分割できることを示した。また、変動の持続性は、約2ヶ月である。
- 3) パワースペクトル解析結果は、1年を卓越周期とするが、1～2ヶ月の短周期変動および、不規則変動で構成されていることを示した。
- 4) 地すべり変動量と降雨量は、降雨期（6～9月）に変動量が増大し、少雨期（12月～3月）に減少を示した。これらの結果は、本地すべりの長期変動の傾向性、周期性の予測を可能とするものであり、今後の地すべり防止・対策上極めて有効であると考えられる。

I はじめに

土砂石礫の移動現象の1つである「地すべり現象」に対しては、古くから多くの研究がおこなわれ、地すべり地における地盤の変動量、地下水位、降雨量等についても数多くの資料が集積されている。しかしながら、「地すべり現象」は、個性性が強く、また、不規則変動も伴っており、一般的な変動特性の把握方法が確立されているとはいえない。

地すべりは、地下深部に起因する地盤の移動現象であるため、地表面の変動が、地すべり変動をそのまま表現しているとはいえないが、地表面下におけるすべりの内部機構は、何らかの形で地表面に表現されるものと考えられる。

地すべりは、一般に現象が長期にわたる場合が多いことから、地下内部の地盤変動が、表面における変動の計測によって把握できることもある。しかしながら、その時系列的な変動は、不規則変動の影響を受けることが大きく、地すべり変動の実態的把握を困難としていると考えられる。

本論文においては、地すべりの地盤変動特性を次のように考えた。

$$\text{変動} = \text{傾向変動} + \text{周期変動} + \text{不規則変動} \text{———(1)}$$

そこで、これらの変動特性を、時系列解析およびスペクトル解析の手法をもちいて、変動の各成分を明らかにすることにより、地すべり地のブロック分割、長期予測、周期性あるいは、降雨量との相関関係などを明らかにすることにした。

なお、本解析にもちいた資料は、愛媛県西条地方局林業課より提供をうけた。ここに記して謝意を表します。

II 解析対象地すべり地および地盤変動量

解析地すべり地区は、図-1に示すように、愛媛県新居浜市立川山地すべり地で、幅350m、延長700mの古い崩壊地形に位置しており、昭和51年9月の台風17号により発生した。地質は、三波川帯に属する基盤岩とこれを覆う

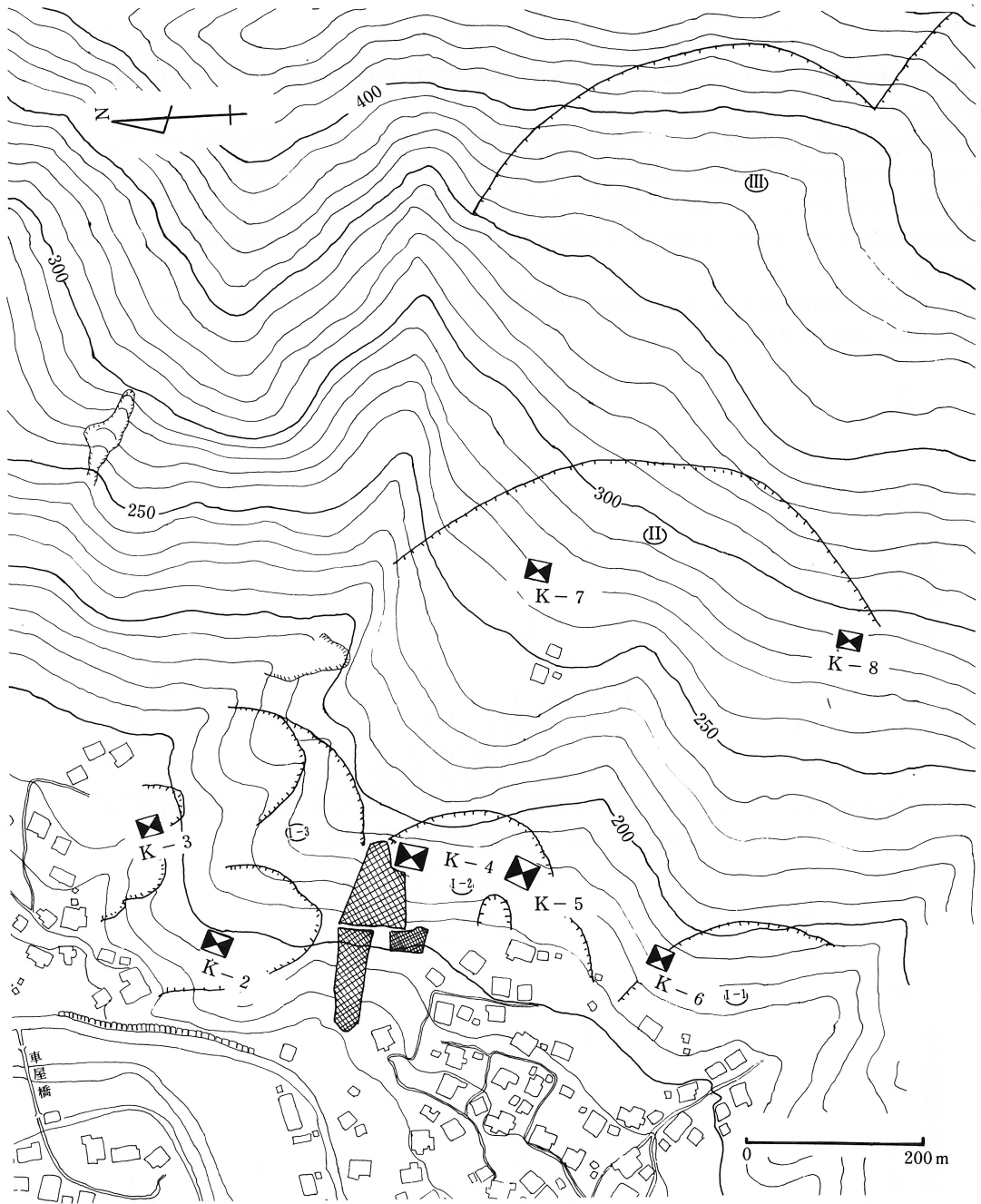


図-1 立川山地すべり平面図

礫層と崩積土から成っている。

地すべり変動量として、地盤傾斜計による10日間の累積最大傾斜角を変動量としてみちいることとした。すなわち最大傾斜角 θ_n は、N-S方向の変動量(x)とE-W方向の変動量(y)をもちいて、(2)式で示される。

$$\theta_n = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{—————(2)}$$

つぎに、観測点は、図-1に示すように7点であり、観測期間は、昭和52年10月より昭和54年12月までの約3ケ年¹⁾である。

降雨量は、本地区では観測されていないため、約1km南方にある鹿森ダムの日降雨量資料をもちいた。

当地すべり地区の各点で観測された地すべり変動量を図-2～図-4に、降雨量を図-5にそれぞれ示した。これらの図から明らかなように、地すべり変動は、各地点を通じて類似した動きを示しており、6月から9月にかけて動きが活発になり、12月から3月にかけては緩慢になっている。また、地すべり変動量と降雨量との対応も明らかである。

N-S方向の累積変動量をX、E-W方向の累積変動量をYとすると、日平均変動量 $\bar{\theta}_n$ および合成変動量Zは、それぞれ(3)、(4)式で示される。

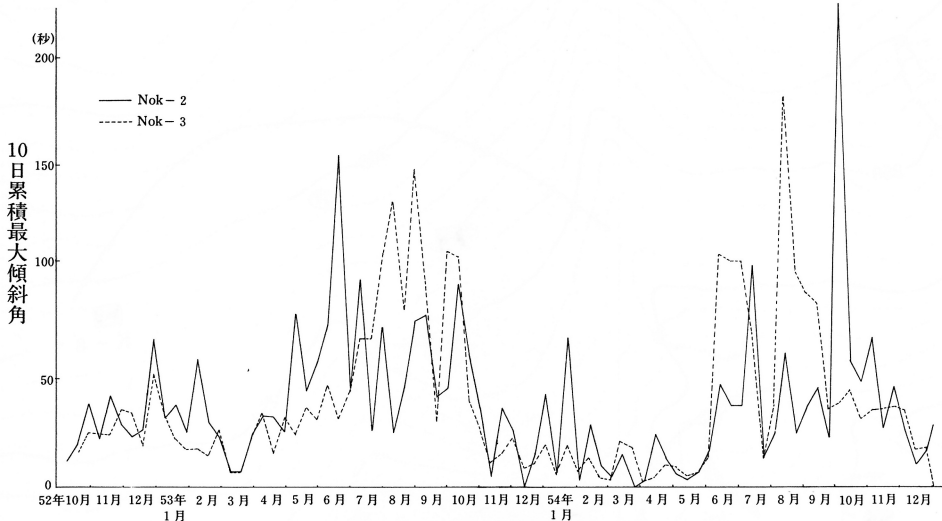


図-2 地すべり変動 (K-2, K-3)

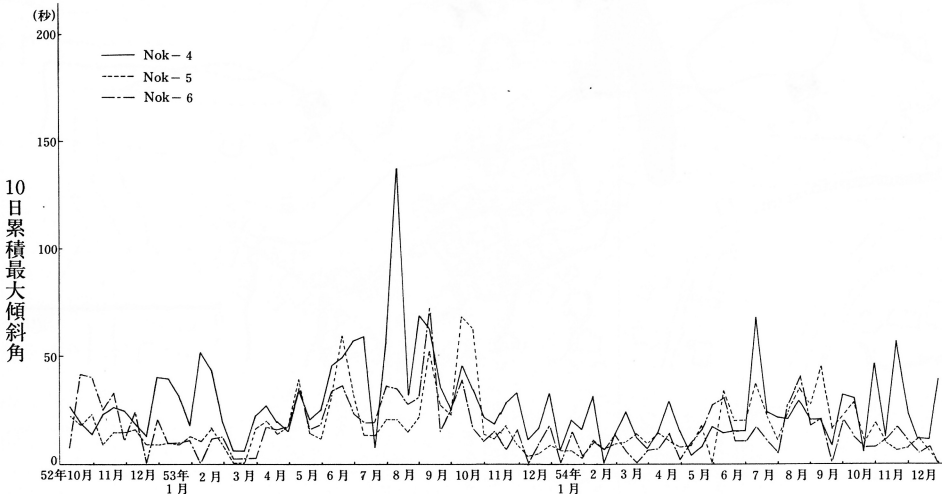


図-3 地すべり変動 (K-4, K-5, K-6)

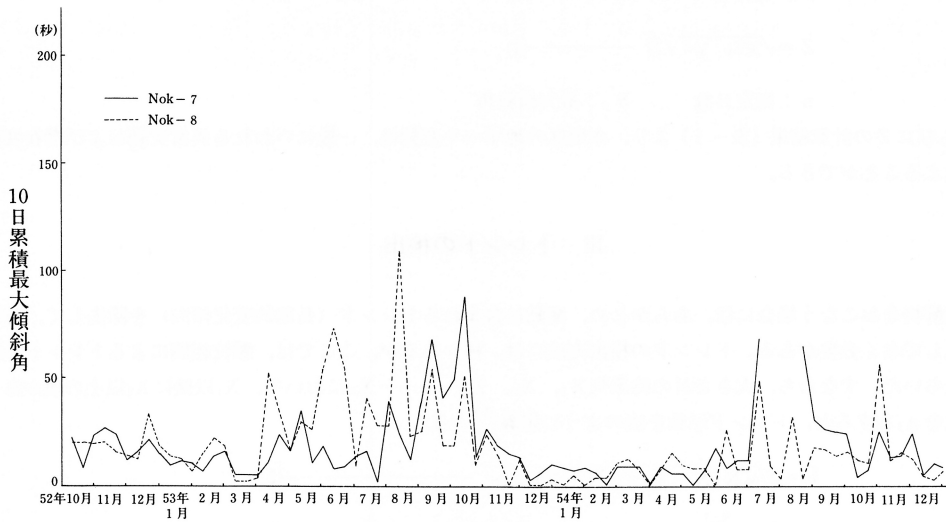


図-4 地すべり変動 (K-7, K-8)

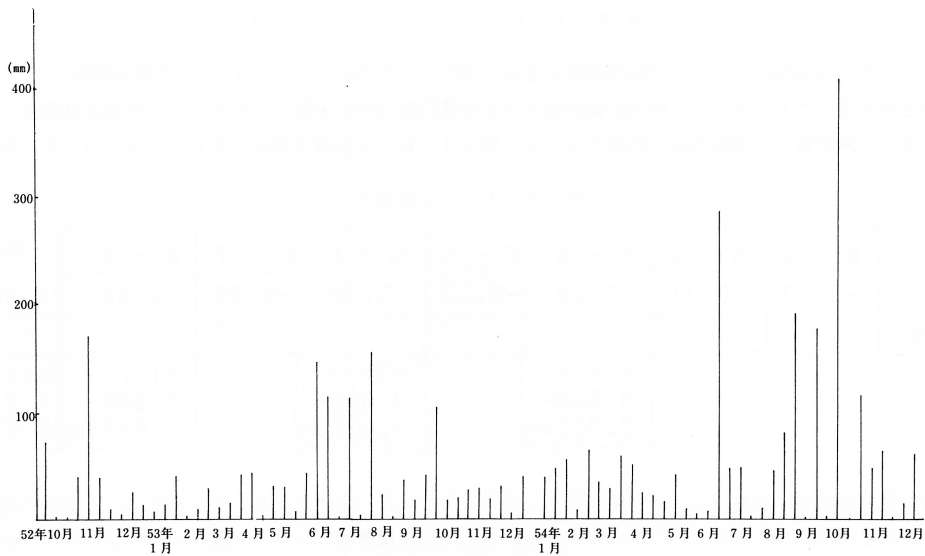


図-5 10日累積降雨量

表-1 日平均変動量ならびに合成変動量

観測点	N-S 累積量 (X)	E-W 累積量 (Y)	日平均変動量	合成変動量	傾斜方向	変動種別
NoK-2	- 871.0	- 249.0	4.03	33.55	N16°E	異常変動
NoK-3	-1466.0	20.0	3.99	54.30	N1°W	異常変動
NoK-4	- 294.0	- 269.0	2.69	14.76	N42°E	潜在変動
NoK-5	- 62.0	- 38.0	1.72	2.69	N32°E	潜在変動
NoK-6	- 300.0	72.0	1.61	11.43	N13°W	潜在変動
NoK-7	228.0	-1034.0	3.22	39.22	N78°W	異常変動
NoK-8	- 35.0	- 61.0	1.84	2.60	N60°E	潜在変動

$$\bar{\theta}_n = \Sigma \theta_n / n \quad \text{—————(3)}$$

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} / \text{月} \quad \text{—————(4)}$$

n : 測定日数 θ_n : 最大傾斜角

$\bar{\theta}_n$ ならびにZの計算結果(表-1)より、本地区の地すべり変動は、一般にいわれる異常変動および潜在変動²⁾として考えることができる。

III トレンドの検出

時系列解析をおこなう場合には、あらかじめ、変動に含まれるトレンド(長期的変化傾向)を除去して、時系列を定常化しておく必要がある。トレンドの検出方法には、種々あるが、ここでは、順位相関によるトレンドの検出方法をもちいた。すなわち、大きさNの時系列 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ において、 X_i 以後に X_i 以上の値があらわれた回数を n_i とすると、トレンド示数を次のように定義³⁾する。

$$I_T = S / \sqrt{N(N-1)(2N+5)/18} \quad \text{—————(5)}$$

ここで、
$$P = \sum_{i=1}^{N-1} n_i \quad \text{—————(6)}$$

$$S = 2(P - N(N-1)/4) \quad \text{—————(7)}$$

である。 $S > 0$ で増加傾向、 $S < 0$ で減少傾向となる。また、 I_T の値によって、 $I_T > 1$ で増加傾向、 $I_T < -1$ で減少傾向と考えることもできる³⁾。傾斜計観測地点および降雨量(10日累積)のSおよび I_T の算定結果は、表-2のようであり、降雨量は、増加傾向、観測点K-4、K-6、K-8は減少傾向を示しているといえるであろう。

表-2 トレンドの検定

観測点	K - 2	K - 3	K - 4	K - 5	K - 6	K - 7	K - 8	降雨量
I_T	-0.03	-0.31	-1.39	-0.17	-1.70	-0.29	-2.48	1.68
傾 向	/	/	-	/	-	/	-	+
			$X(t) = 3.148 - 0.0116t$		$X(t) = 2.084 - 0.0122t$		$X(t) = 2.549 - 0.0179t$	$X(t) = 2.238 + 0.0578t$

降雨量は、増加傾向で、観測点は、減少傾向を示していることから、全体として、この期間は、安定化の方向にあると考えられる。しかしながら、この点に関しては、さらに内部機構的なものとも関連して考慮していく必要がある。

なお、トレンドの検出された、K-4、K-6、K-8、および降雨量については、直線回帰式によって、トレンドの除去をおこなった。

IV 周期変動および不規則変動

(1) コレログラム分析による持続性および周期性

変動の周期性あるいは持続性を分析する方法としては、遅れ時間(τ)の自己相関係数(r_τ)と遅れ時間(τ)とをプロットしたコレログラムがもちいられる。すなわち、時系列 $x(t)$ ($t = 1, 2, \dots, N$)に対して、遅れ時間 τ の自己相関係数(r_τ)は、

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x(t) - \bar{x}_1)(x(t+\tau) - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x(t) - \bar{x}_1)^2} \sqrt{\sum_{t=\tau+1}^N (x(t) - \bar{x}_2)^2}} \quad \text{—————(8)}$$

ここで

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{N-\tau} \sum_{t=1}^{N-\tau} x(t) \quad (9)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{N-\tau} \sum_{t=\tau+1}^N x(t) \quad (10)$$

で与えられる。

各観測点におけるコレログラムは、図-6~図-12に示すようである。持続日数³⁾は、 r_τ が急激に低下する時

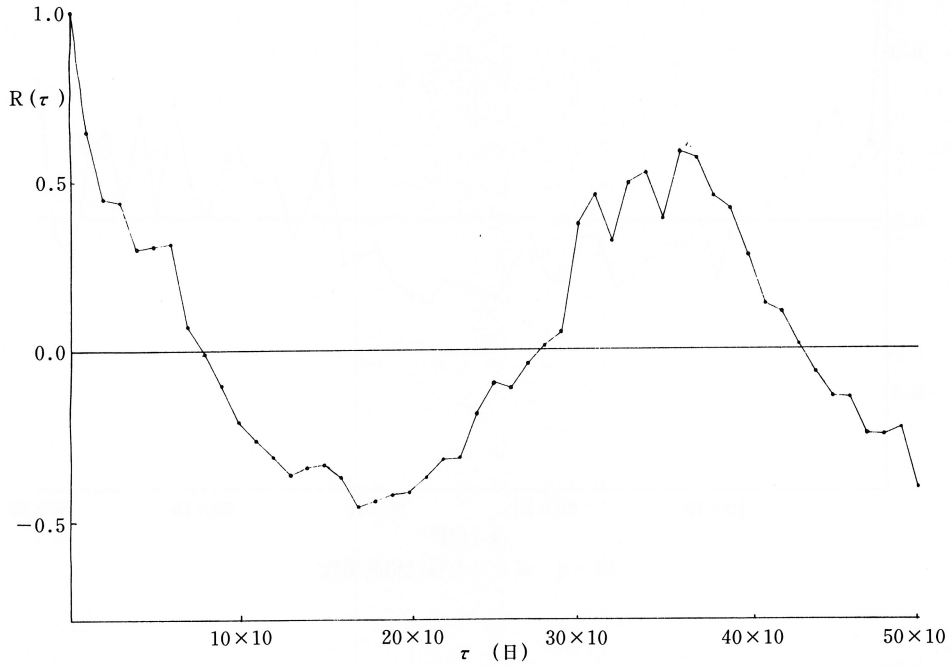


図-6 K-2の自己相関係数

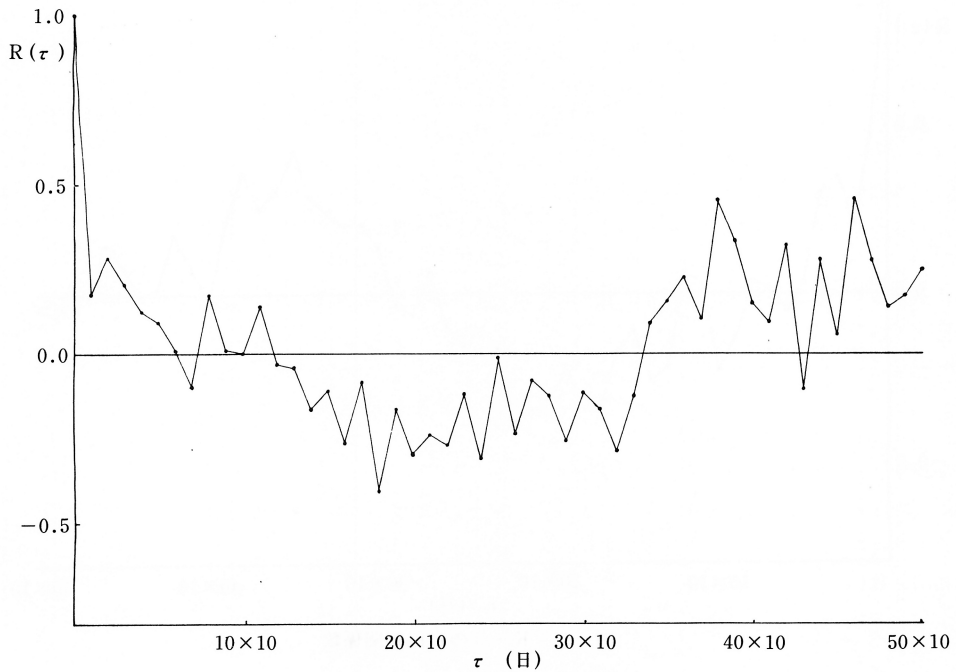


図-7 K-3の自己相関係数

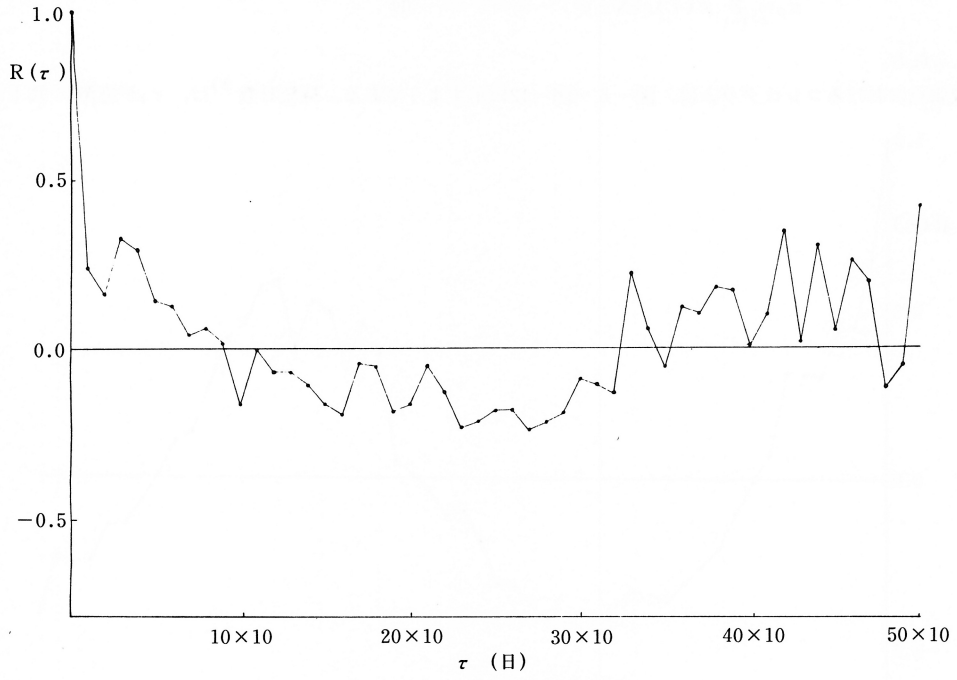


図-8 K-4の自己相関係数

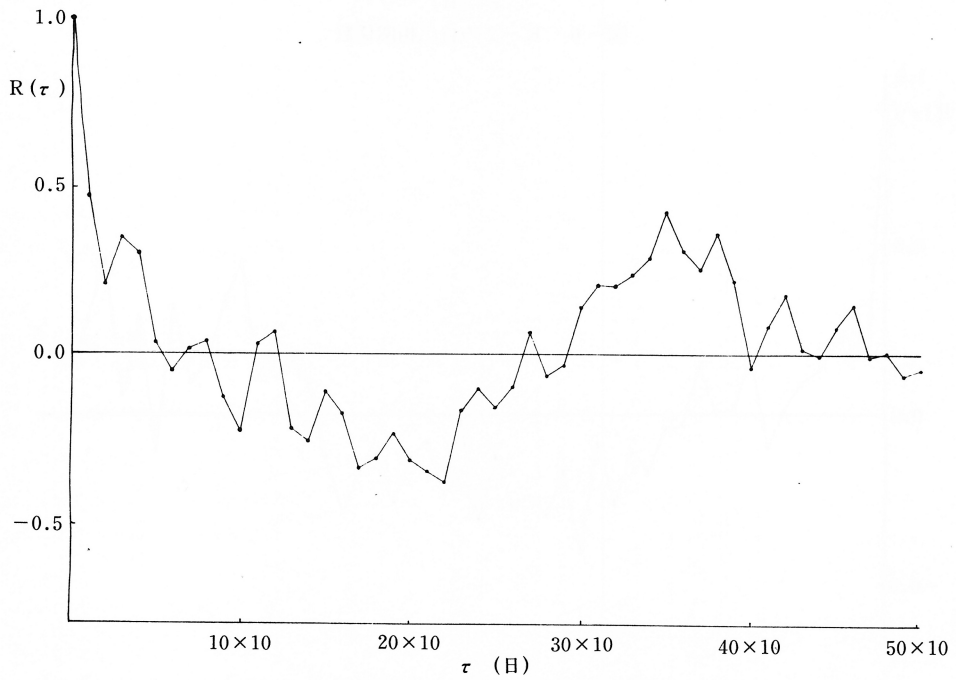


図-9 K-5の自己相関係数

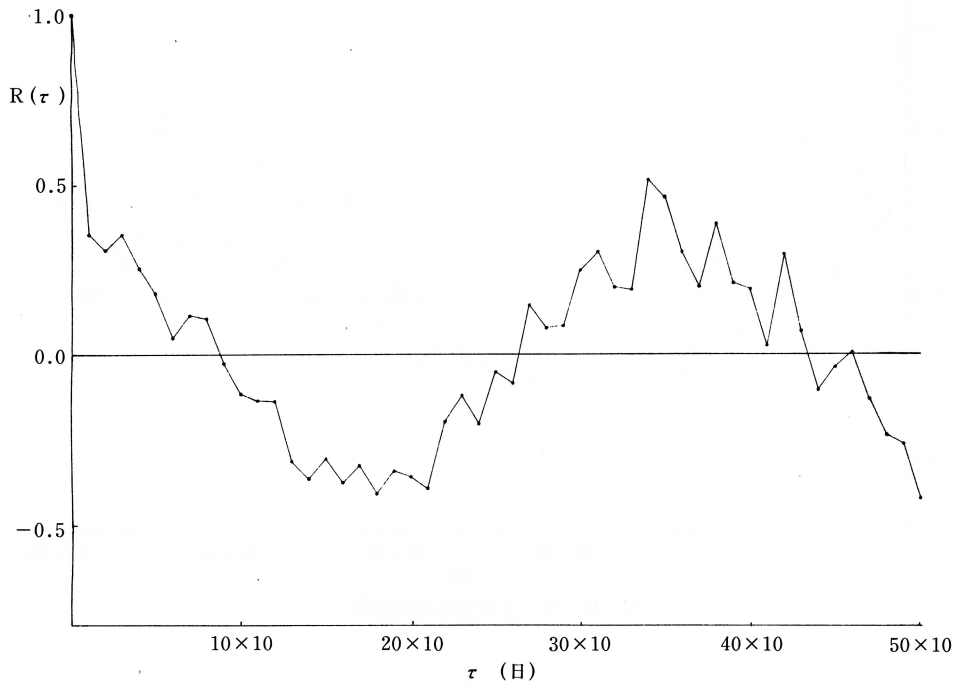


図-10 K-6の自己相関係数

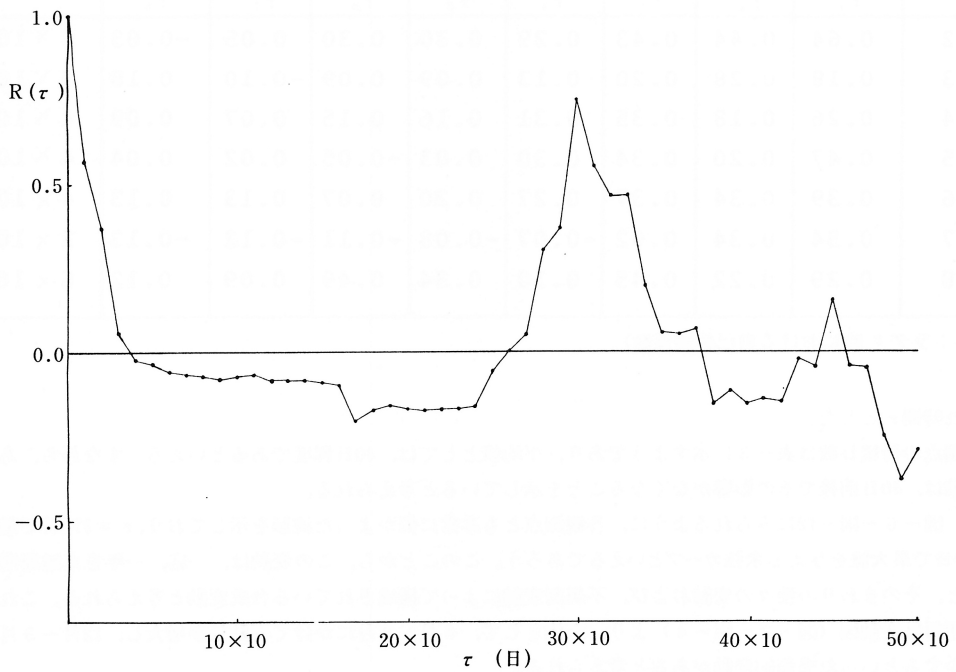


図-11 K-7の自己相関係数

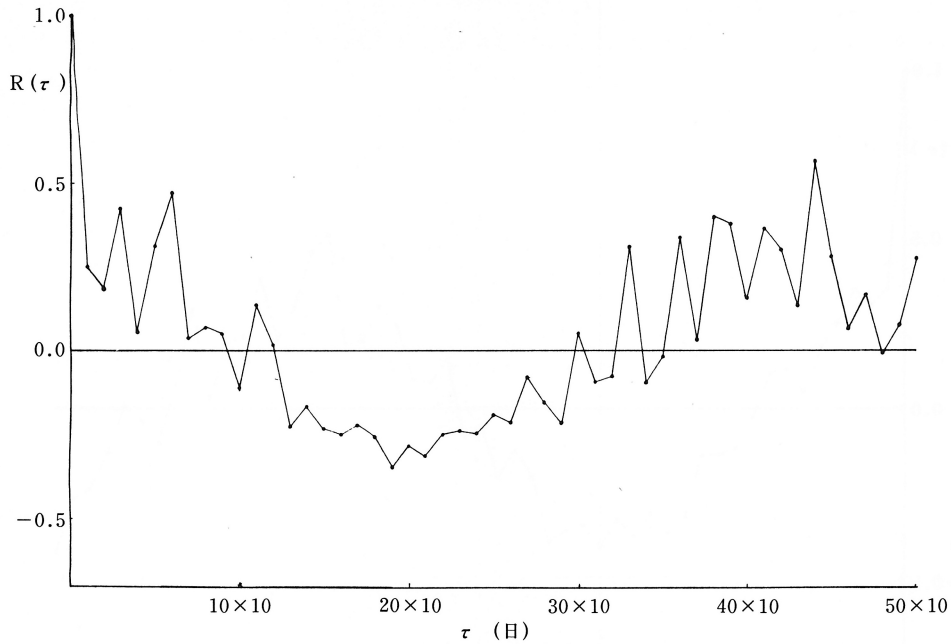


図-12 K-8の自己相関係数

表-3 地すべり変動の持続日数

観測点	自 己 相 関 係 数 r_{τ}								持続日数
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	
K-2	0.64	0.44	0.43	0.29	0.30	0.30	0.05	-0.03	6×10
K-3	0.18	0.28	0.20	0.13	0.09	0.09	-0.10	0.18	3×10
K-4	0.26	0.18	0.35	0.31	0.16	0.15	0.07	0.09	4×10
K-5	0.47	0.20	0.34	0.30	0.03	-0.05	0.02	0.04	4×10
K-6	0.39	0.34	0.37	0.27	0.20	0.07	0.13	0.13	4×10
K-7	0.54	0.34	0.02	-0.07	-0.08	-0.11	-0.12	-0.13	2×10
K-8	0.29	0.22	0.45	0.10	0.34	0.49	0.09	0.12	6×10

(r_{τ} : ラグ τ 時における自己相関係数)

点の遅れ時間 τ とした。

各観測点の持続日数は表-3に示すようであり、平均値としては、40日程度であるといえる。すなわち、ある日時の変動は、40日前後でその影響がなくなると考えられる。

また、図-6~図-12にみられるように、各観測点とも非常に似かよった波形を示しており、 $\tau = 170$ 日で最小値、 $\tau = 360$ 日で最大値を与える余弦カーブといえるであろう。このことから、この変動は、一応、一年を卓越周期とする変動と、そのまわりの種々の変動および、不規則変動によって構成されている合成変動と考えられる。これらの結果と傾斜計変動図(図-2~図-4)より、全体として、6月~9月にかけて変動量が増大し、12月~3月にかけて減少するといった季節的変動があると考えられる。

さらに、観測点間のコログラムの波形について、相関係数を求めると、表-4に示すようであり、K-2, K-5, K-6とK-3, K-4, K-8の相互間で、相関係数が高い。また、K-7については、どの観測点との相

関係数とも高くなく、独立性が強いようである。

そこで、変動のタイプとして、A型 (K-2, K-5, K-6), B型 (K-3, K-4, K-8), C型 (K-7) に分けて考察する。

- 1) A型：このコレログラムは、余弦カーブに非常によく近似しており、1年を周期とする強い周期性を示し、その持続性も強い。すなわち、1年を周期とした強い季節的変動であり、これに弱い不規則変動が合成されているものと考えられる。
- 2) B型：1年の周期性は認められるが、A型ほど顕著ではなく、その他の周期性も考えられる。すなわち、1年の比較的強い周期変動と、その他の弱い周期変動および不規則変動の合成変動といえるであろう。
- 3) C型：1年を周期とする強い周期変動と、単一パルスおよび不規則変動の合成変動といえ、この単一パルスは、昭和54年7月の異常な変動により生じたものと考えられる。

つぎに、降雨量のコレログラム (図-13) は、地すべりの変動量ほど明らかな周期性はなく、地すべり変動量との強い相関性も認められない。

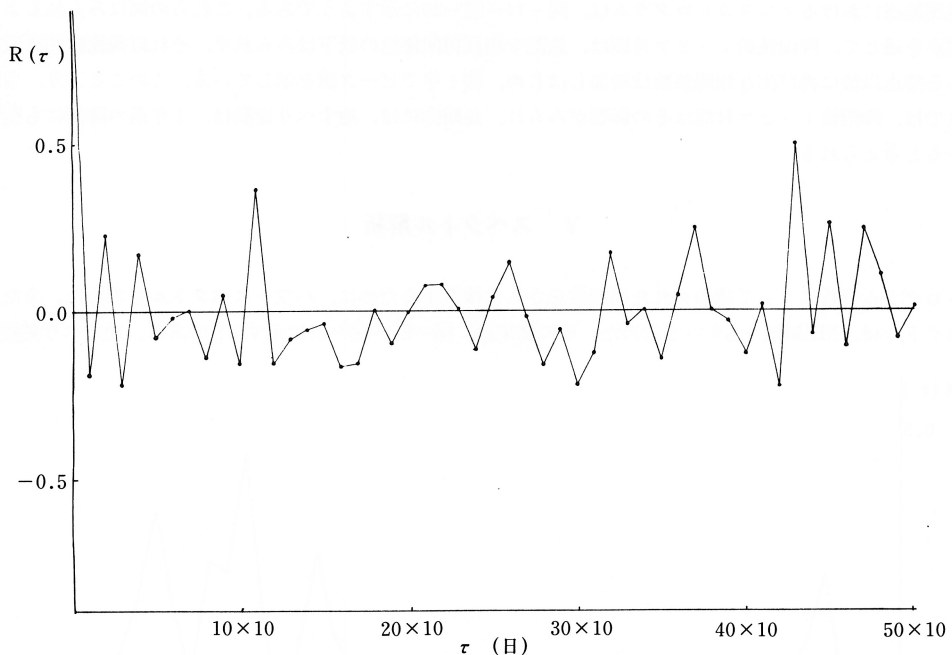


図-13 降雨の自己相関係数

表-4 コレログラム相互間の相関係数

	K-2						
K-2	1.00	K-3					
K-3	0.34	1.00	K-4				
K-4	0.25	0.56	1.00	K-5			
K-5	0.79	0.58	0.24	1.00	K-6		
K-6	0.90	0.32	0.11	0.82	1.00	K-7	
K-7	0.57	0.16	0.06	0.42	0.54	1.00	K-8
K-8	0.48	0.66	0.64	0.56	0.38	0.05	1.00

(2) 地すべり変動量と降雨量との対応関係

異った2つの変動の間の相互関係を定量的に明らかにする方法としては、相互相関分析がある。すなわち、時系列 $x(t)$ ($t = 1, 2, 3 \dots N$), $y(t)$ ($t = 1, 2, 3 \dots N$) に対して遅れ時間 τ の相互相関係数 (r_τ) は、

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x(t) - \bar{x})(y(t+\tau) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x(t) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=\tau+1}^N (y(t) - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

ここで

$$\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} x(t)}{N-\tau} \quad (12)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^N y(t)}{N-\tau} \quad (13)$$

で与えられる。

各観測地点におけるクロスコログラムは、図-14~図-20に示すようである。これらの図にみられるように、全観測点を通じて、降雨後約1~2ヶ月間は、急激な相互相関係数の低下はみられず、それ以後比較的急激に低下し、ある時点以後に再び相互相関係数は増加しはじめ、約1年でピーク値を示している。このことより、当地すべり地区では、降雨後1~2ヶ月間はその影響がみられ、長期的には、地すべり変動は、1年前の降雨にも影響を受けていると考えられる。

V スペクトル解析

コログラム分析によって認められた周期性をさらに検討するために、パワースペクトルを求めた。また、パワースペクトルは、MEM法をもちいて求めた。その結果は、図-21~図-27に示すようである。地すべり変動量に対

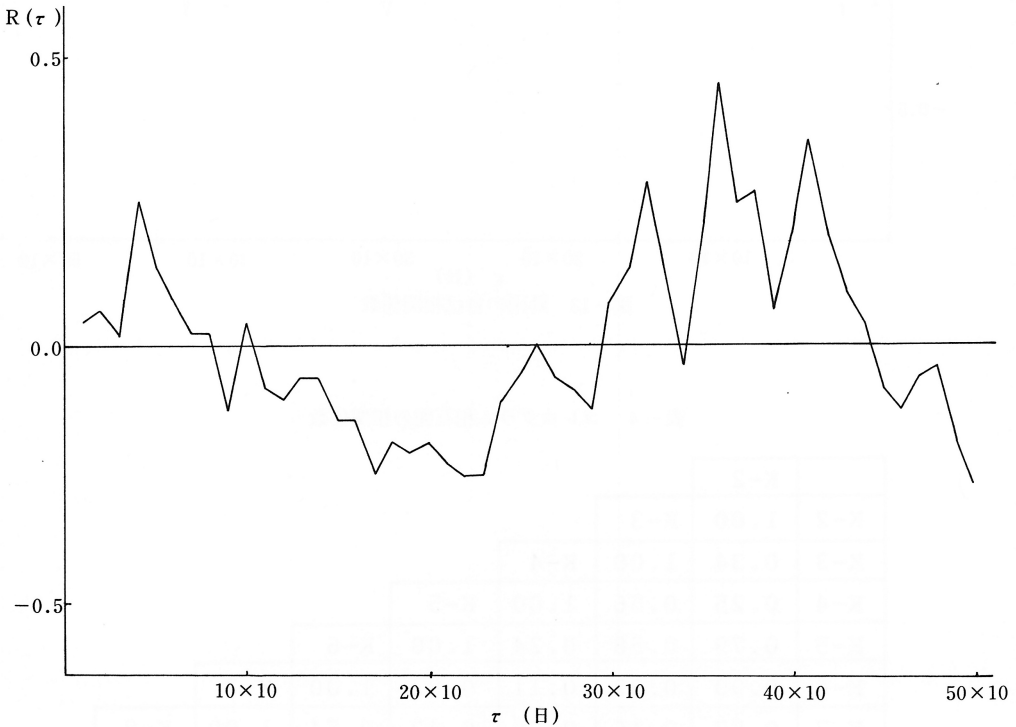


図-14 K-2の相互相関係数

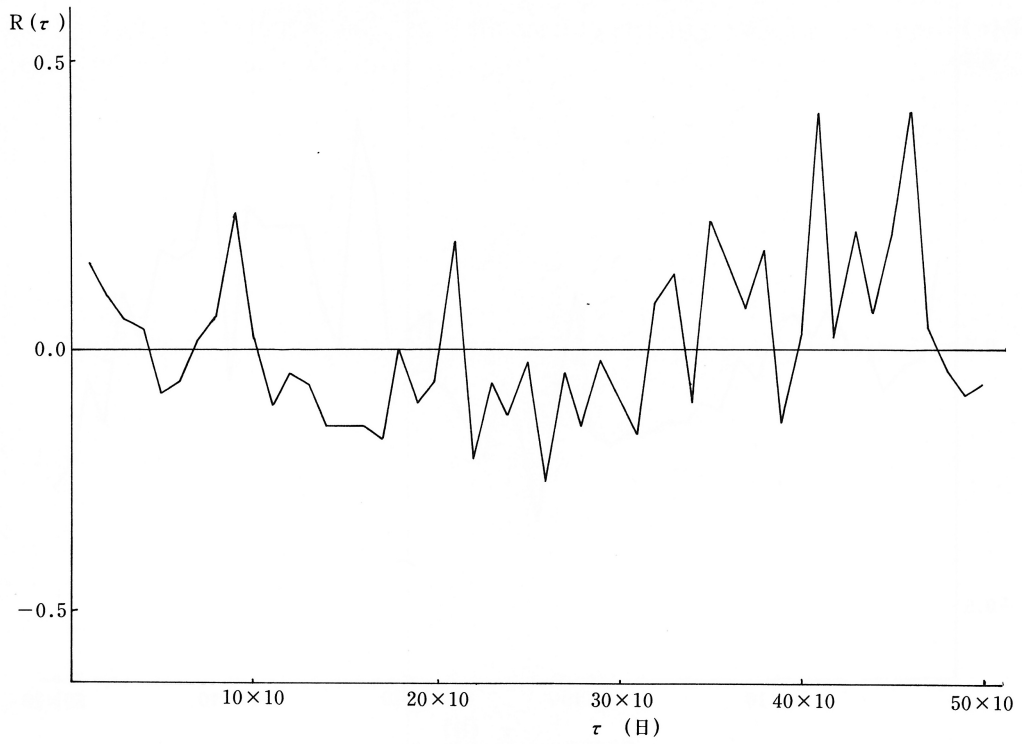


図-15 K-3の相互相関係数

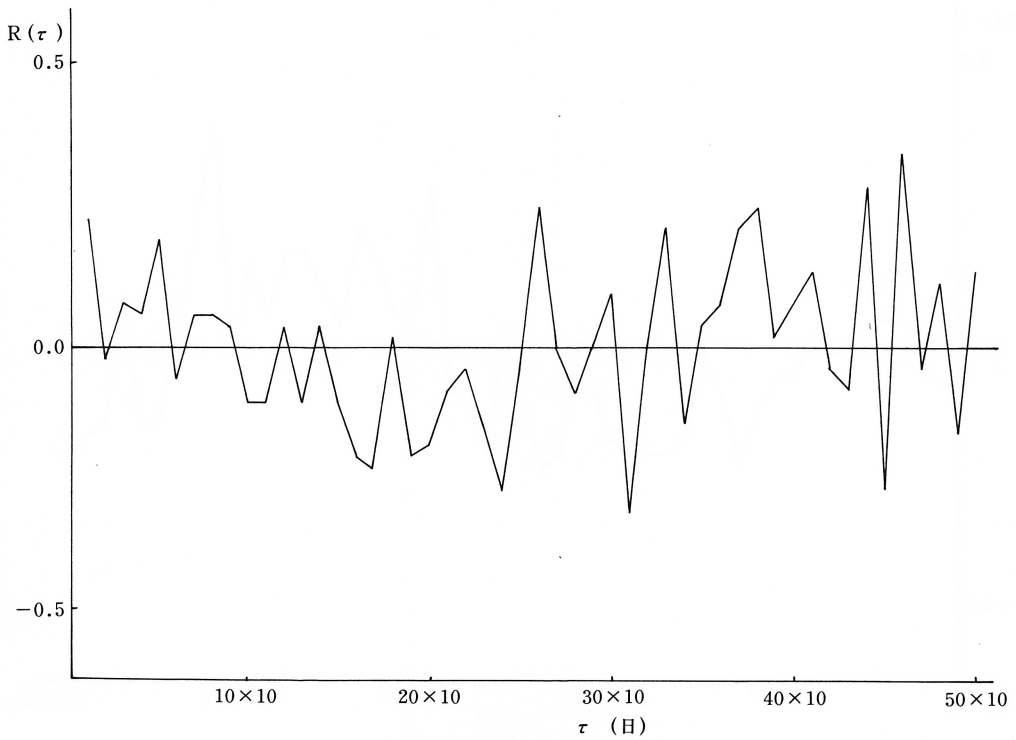


図-16 K-4の相互相関係数

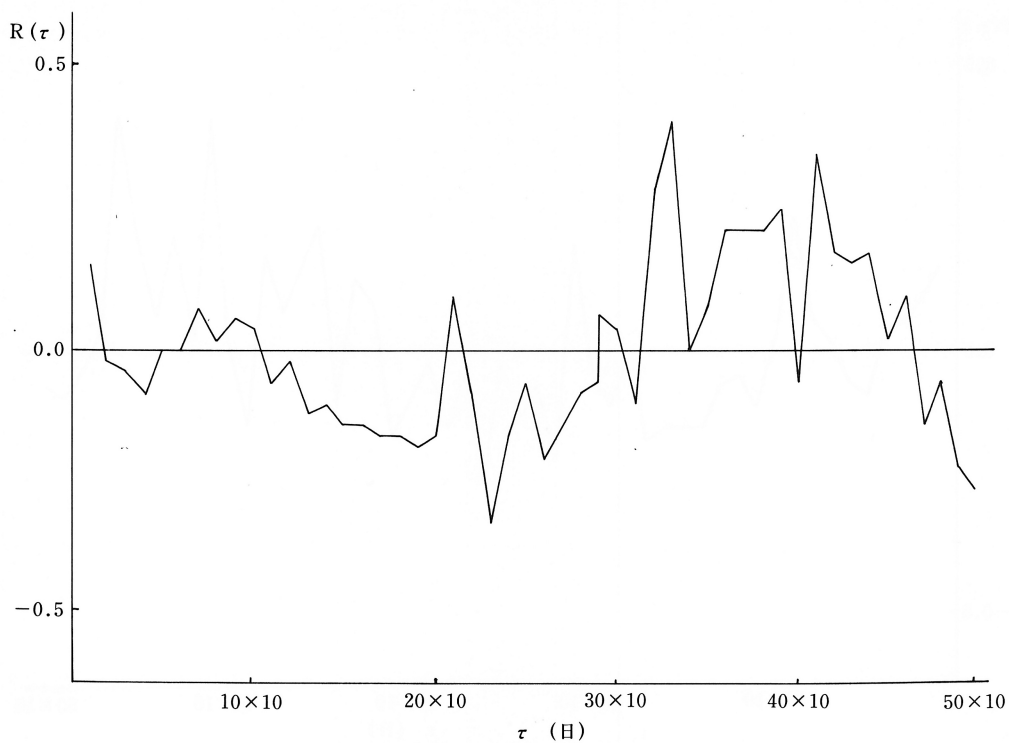


図-17 K-5の相互相関係数

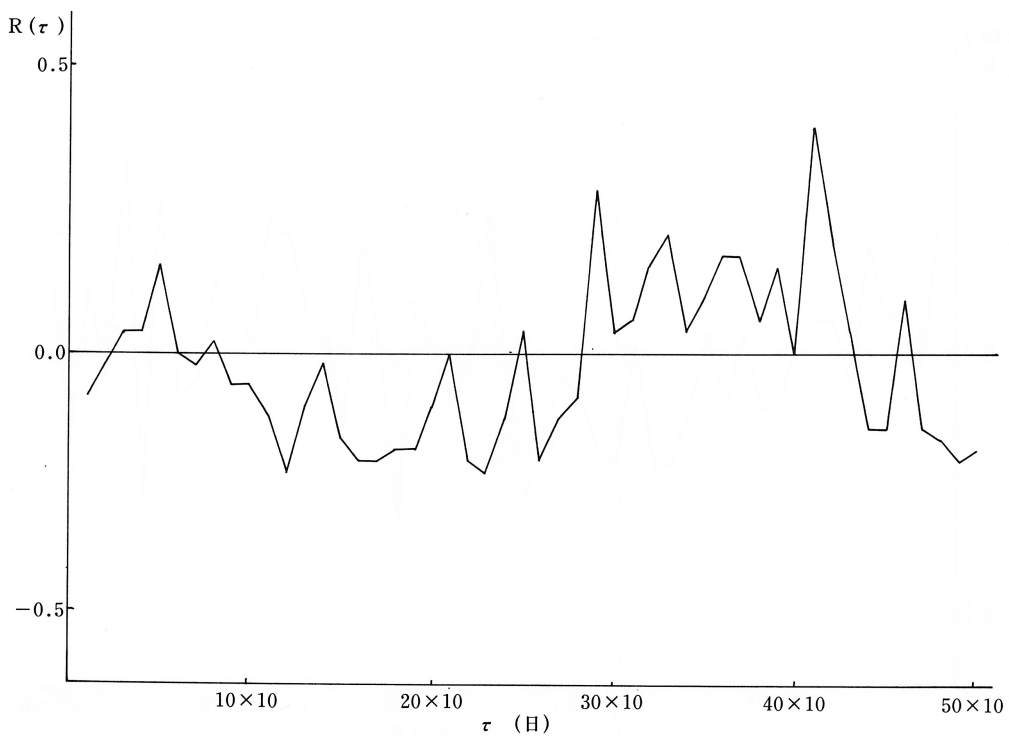


図-18 K-6の相互相関係数

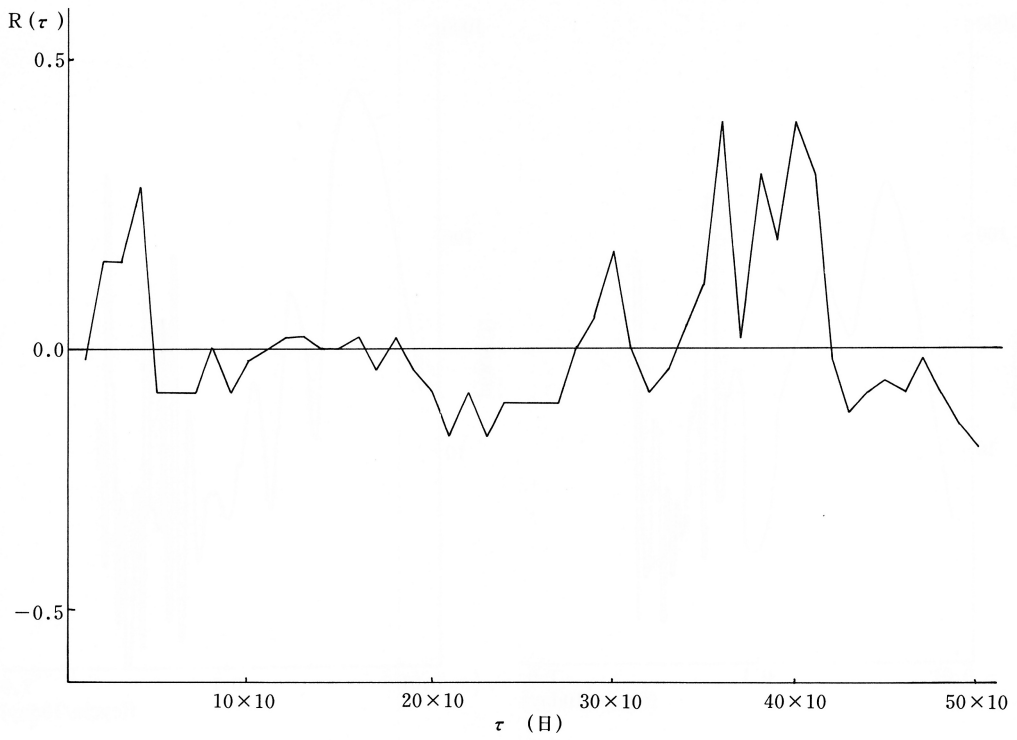


図-19 K-7の相互相関係数

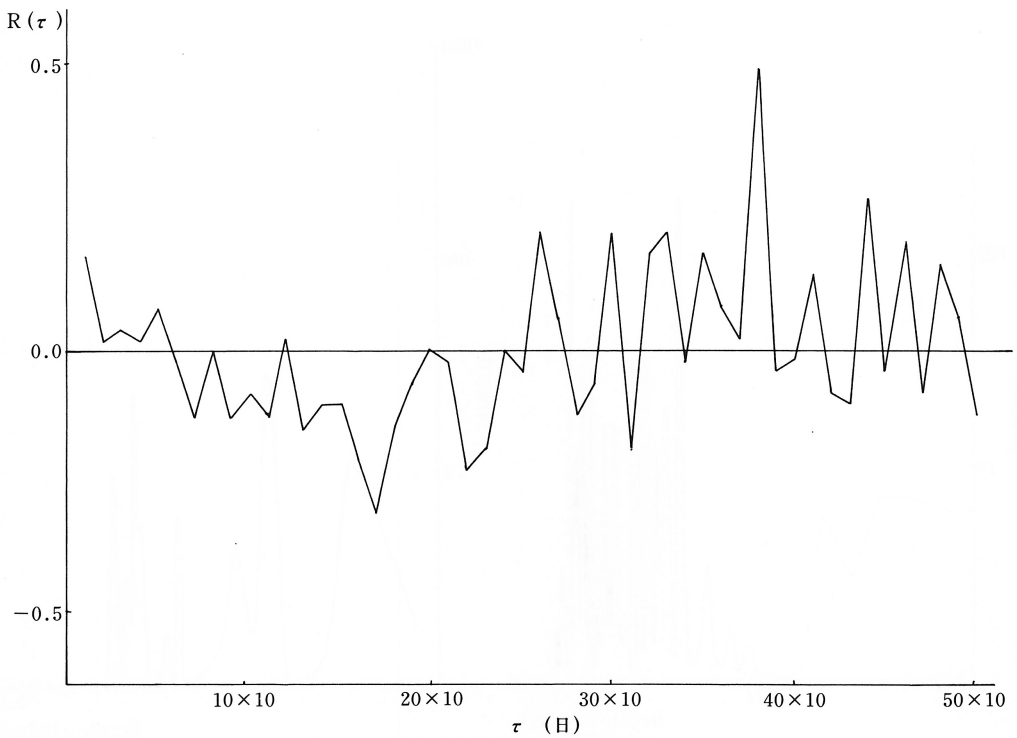


図-20 K-8の相互相関係数

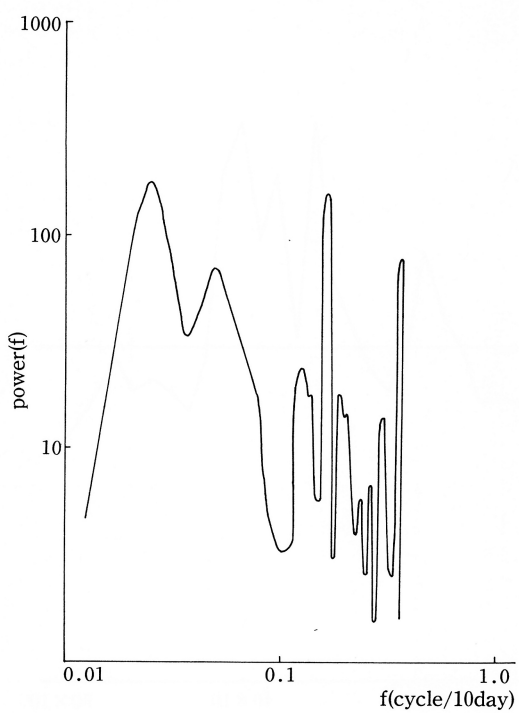


図-21 K-2のパワースペクトル

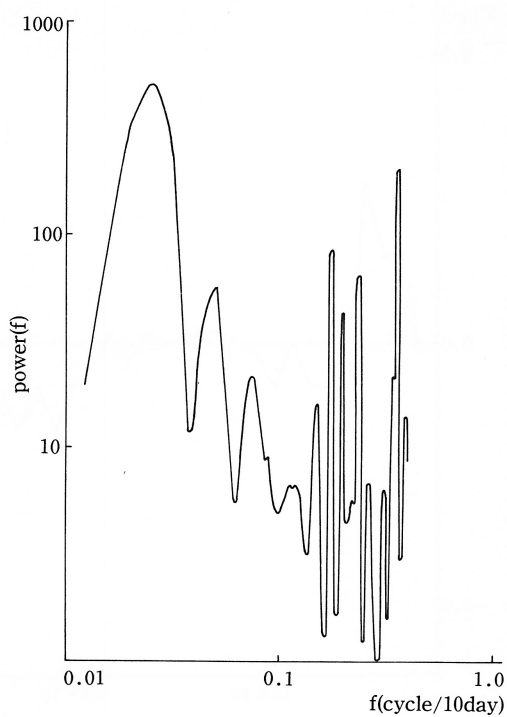


図-22 K-3のパワースペクトル

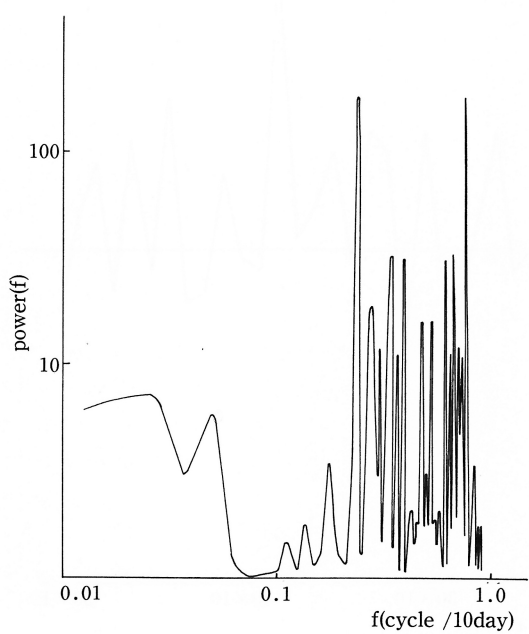


図-23 K-4のパワースペクトル

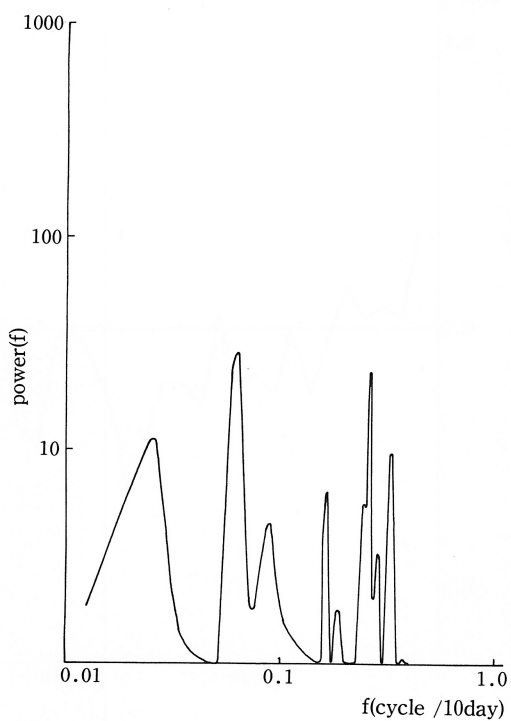


図-24 K-5のパワースペクトル

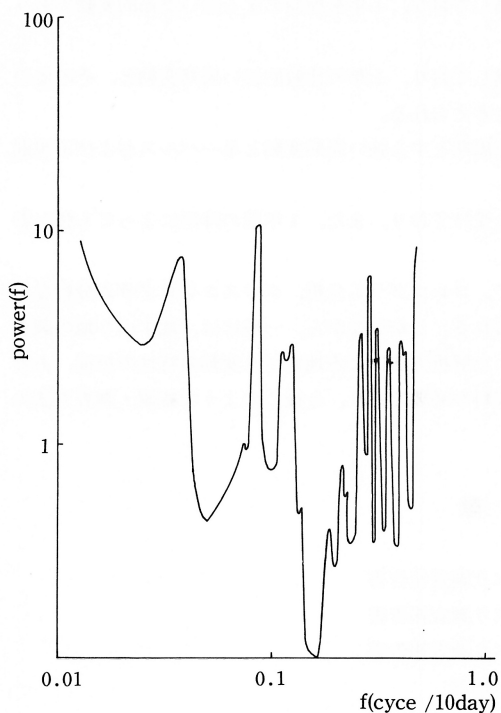


図-25 K-6のパワースペクトル

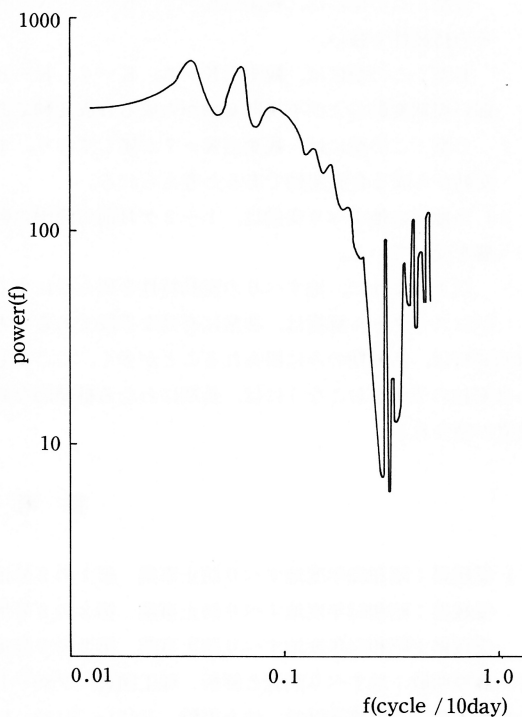


図-26 K-7のパワースペクトル

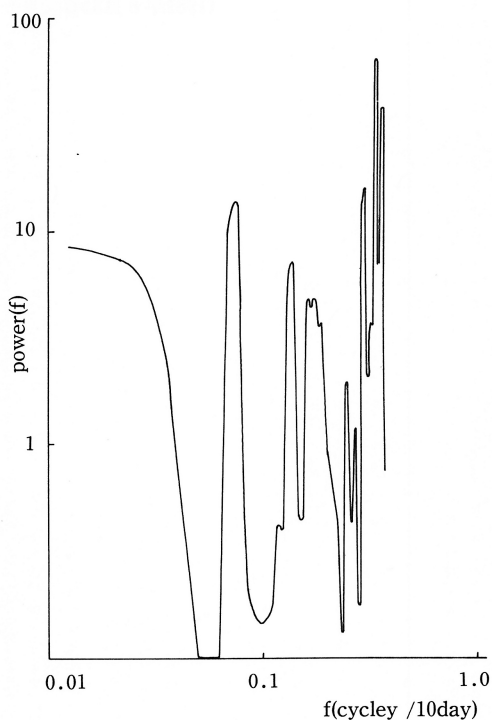


図-27 K-8のパワースペクトル

しては、ほぼ類似したスペクトル波形であり、ピーク値は低周波領域0.025~0.040 (cycle/10 day) で現われ、さらに高周波領域の0.3~0.5 (cycle/10 day) にも現われている。すなわち、コレログラムで認められた約1年の長周期変動成分と約1ヶ月を短周期とする短周期変動が顕著に現われているといえよう。

これらの結果をふまえて、前述のブロック分けについても、周波数特性と地すべり運動の機構とを関連させ、より妥当なブロック分けをおこなっていく必要がある。

VI む す び

愛媛県新居浜市立川山地すべり地区を対象地とし、過去3年間の資料をもちいてコレログラム分析・クロスコレログラム分析・スペクトル解析を試み、当地区の地すべり変動の特性を明らかにした。その結果をまとめると次のようになる。

- 1) 全体として、当地区の地すべり変動量は、減少傾向にある。
- 2) 地すべり変動の持続性は、約40日前後である。
- 3) 当地すべり地区は、コレログラム分析によると、その変動特性より次の3つのブロックに分かれて活

動していると考えられる。

A型：この型には、観測点K-2, K-5, K-6が属しており、1年を周期とする強い季節的変動であり、その持続性も強い。

B型：この型には、観測点K-3, K-4, K-8が属しており、1年の比較的強い周期変動と、その他の弱い周期変動および不規則変動から成る合成変動であると考えられる。

C型：この型には、観測点K-7が属しており、1年を周期とする強い周期変動と単一パルスおよび不規則変動から成る合成変動であると考えられる。

- 4) 当地区の地すべり変動は、1～2ヶ月前の降雨の影響を受けており、また、1年前の降雨によっても強い影響を受けている。

以上のように、地すべりの変動特性を明らかにする上で、コレログラム分析、クロスコレログラム分析ならびにスペクトル解析は、非常に有効な手段であると考えられる。しかしながら、一般には、地すべり地の調査観測資料は、活動期のみに限られることが多く、ここでもちいた解析方法による地すべり変動の特性の把握、あるいは変動の予測をおこなうには、長期にわたる継続的な観測資料が必要であり、今後このような観測・調査方法の確立が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 愛媛県：昭和52年度地すべり防止事業 第1の2号地すべり調査報告書
愛媛県：昭和53年度地すべり防止事業 第2の2号地すべり調査報告書
愛媛県：昭和54年度地すべり防止事業 第2の2号地すべり調査報告書
- 2) 藤原明敏：地すべり調査と解析 理工図書, P89～P94, 1970
- 3) 鈴木榮一：気象統計学 地人書館, P121～P133, 1968
- 4) 日野幹男：スペクトル解析 朝倉書店, P25～P66, 1977

(1981年8月31日受理)