地形と地震の関係 (II)

京都大学防災研究所 見 野 和 夫

(昭和 60 年 7 月 26 日受理)

Relation between Topography and Seismicity (II)

Kazuo MINO

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(Received July 26, 1985)

The epicenters of large earthquakes and active faults are located on the boundaries between mountainous area and plains or between uplift and subsidence areas. These boundaries are found on the inclined topography. The relation between the crustal movement such as active faults and large earthquakes and the gradients of the topography is investigated. The gradient of slope is estimated on a space of each $12\text{ km} \times 12\text{ km}$.

In the Chugoku district, Southwest Japan the gradient peculiar to the crustal movement such as seismic activity is about $3/100$, in the Chubu district about $7/100$. These gradients of topography indicate the wavelengths of topography related to the crustal movement. The wavelength in the Chugoku district is longer than that in the Chubu district.

For extracting these wavelengths of the topography, a bound-pass filter which was designed by SEYA (1963) for gravitational prospecting, is applied to the topography.

The filter with the central wavelength of 40 km and band width of 20-90 km, extracts the long wavelength topography. Large earthquakes and active faults exist along the boundaries between positive: upheaval and negative: subsidence areas in the Chugoku district. Another topography extracted by the filter with the central wavelength of 20 km and band width of 10-40 km explains the distribution of epicenters of large earthquakes and active faults. This topography is also agreement with the pattern of distribution of large earthquakes in the Chugoku district.

Microearthquakes are also correlated to the topography. The gradient of $3/100$ is a key value for the location of vigorous activity of microearthquakes. Epicenters of microearthquakes observed by the Hokuriku Microearthquake Observatory are related to the extracted topography by Seya's filter with the central wavelength of 16 km or less.

§1. はじめに

内陸部に発生する地震の多くは、特定の場所に起つている。また、多くの微小地震活動域は、付近の活断層に関係する地殻活動と考えられる [藤田・岸本 (1972)]。このことは、微小地震の観測が充実するのに伴つて明らかにされてきた。

大きな被害をもたらす地震は、主に内陸の、いわゆる、直下型地震である。直下型の大地震は、時には、断層を伴うことがある。一般には、内陸部の大地震は、既存の活断層の再活動が

原因と考えられる【丹那断層発掘調査グループ (1983)】. 再活動する断層, 即ち, 活断層の存在する場所は, 地表の特徴的な地形と関係している.

この論文では, 活断層や大地震及び, 微小地震の発生が, 地形とどの様に関わっているのかを調べることを目的とした【Mino (1984)】.

地震のデーターは, 大地震については, 理科年表にある 1850 年から 1975 年の間に起つたものを採用した. また, 微小地震については, 鳥取微小地震観測所【尾池 (1975)】, 阿武山地震観測所【黒磯・渡辺 (1977)】および, 北陸微小地震観測所【竹内・平野 (1985)】のデータを用いた. 活断層の分布については, 活断層研究会 (1980) の資料にもとづいた.

§ 2. 地形の傾斜と地震分布

1850 年から 1975 年までに起つた大地震の分布を, 地形図に書き入れて示す (Fig. 1). 図中の等高線は, それぞれ, 400, 600 m を表わしている. 地震の多くは, この等高線の周辺に密集している. しかし, 中国地域の地震に関係する高さは, 400 m であるのに対して, 中部地域では, 600 m または, それ以上である. また海岸線に沿つても, 発生している. 従つて, 地形を表わす一つの要素である地形高度は, 地震との関係を考慮する上での直接に重要なパラメータではない. 山の裾野や中腹部に発生する地震は, 地形高度より, むしろ, 地形の傾斜に関係している【見野・松村 (1982)】.

そこで, 地形の傾斜を次の様に決めて, 地震との対応を調べた.

大地震は, 震源としてある領域をもっていることを考慮して, ここでは, 地形の資料として, 東西 3', 南北 2' の長さで囲まれる短形内の平均高度を用いた. ある固定した点での傾斜は, その点と, まわりの 8 点の座標で決まる. 即ち, 8 点および, 固定点を含む平面を, 最小二乗法で決めて, その面の傾斜の最大値をとつた. それは, 結局, 9 点を含む平面の方定式の係数を求めることに帰着する. この傾斜値は, 約 $12\text{ km} \times 12\text{ km}$ の平面の平均的傾斜の絶対値と

Fig. 1. Distribution of large earthquakes which occurred between the period from 1850 to 1975 in the Southwest Japan. Solid circles indicate epicenters of large earthquakes. Contours indicate heights of 400 and 600 m.

考えられる。

この地域の傾斜分布は、高さ 50 m ごとに、最大頻度数の傾斜値を、その高さの傾斜とするとき、標高 1,000 m 前後までは、傾斜と標高は比例関係にあるが、それより標高が高くなると、傾斜は、徐々にゆるやかになる [見野・松村 (1982)]。

求まった傾斜分布図を、地震分布と重ねると、中国地方では、傾斜値 $3/100$ の境界に沿って地震が密集している (Fig. 2)。この図では、傾斜値が $3/100$ より大きい部分に、影をつけて表わした。しかし、中部地域での地震や活断層の傾斜値 $3/100$ との対応は良くない。この地域では、より大きい傾斜値が対応する。Fig. 3 に、傾斜値 $5/100$ と、地震分布、活断層を重ねて示した。必ずしも良く一致しているとはいえないが Fig. 2 よりも改善されている。即ち、中部地域の、大地震や活断層に対応する傾斜値は $5/100 \sim 8/100$ 程度となる。このような、中国地域で傾斜値が低く、中部地域で傾斜値が高いことは、次の様に考えられる。

山地を、近似的に、2 等辺 3 角形とすると、中国地域は、標高 1,000~2,000 m が、2 等辺 3 角形の高さと考えられる。この 3 角形が傾斜 $3/100$ をもつとすると、その底辺は、約 60~120 km となる。即ち、中国地域の、大地震や活断層と関係する地形の波長は、約 60~120 km ということになる。一方、中部地方では、傾斜値に $7/100$ を与えると、大地震や活断層に関わるこの地域の地形の波長は、30~85 km となる。中国地域の波長は、中部地域の波長より長い。このような波長をもつ地形の分布や、大地震、活断層との関係を明らかにするために、バンド・パス・フィルターを用いて、種々の波長をもつ地形を抽出することが必要である。

Fig. 2. Relation between the gradient of $3/100$ and large earthquakes and active faults in the Southwest Japan. Solid circles indicate epicenters of large earthquakes which occurred during the period from 1850 to 1975. Solid lines indicate active faults. Hatched areas indicate the gradient over $3/100$.

Fig. 3. Relation between the gradient of 5/100 and large earthquakes and active faults in the Chubu district. The symbols have the same meanings as in Fig. 2.

§ 3. バンド・パス・フィルター

ここでは、バンド・パス・フィルターとして、SEYA (1963) が、重力の解折用開発したものを用いた。その概要を次に示す。

SEYA のフィルターは、移動平均法を組み合わせたものである。計算が簡便な点、フィルターとしての利きが良いという特徴をもっている。

移動平均フィルターは、次の式で表わされる、

$$f(x, y) = \begin{cases} F_0/\pi r_0^2: & 0 \leq r \leq r_0 \\ 0 & : r \geq r_0 \end{cases}$$

ここに、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, F_0 は倍率である。この式をフーリエ変すると、

$$F(\omega_1, \omega_2) = 2F_0 \frac{J_1(\omega r_0)}{\omega r_0}$$

ここに、 $\omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}$, J_1 は 1 次の Bessel 関数である。

SEYA のフィルターは、次の様に与えられる。

$$f(x, y) = \begin{cases} F_0/\pi \cdot (1/r_0^2 - 1/r_1^2): & r_0 \leq r \leq r_1 \\ 0 & : r_1 < r < r_0 \end{cases}$$

従つて、この特性は、次の様になる、

$$F(\omega_1, \omega_2) = 2F_0 \left(\frac{J_1(\omega r_0)}{\omega r_0} - \frac{J_1(\omega r_1)}{\omega r_1} \right)$$

このフィルターの特性を Fig. 4 に示す。 $r_1/r_0 = 2.0, 2.5, 3.0$ の場合を、振幅を標準化して表わしている。横軸は $r_0\omega$ をとつている。また、フィルターとしての効果は、 F_0 の 60% 以

上の場合である。

フィルターの利きを考えると、中心波長 λ_0 が $\lambda_0=40$ km のとき、抽出される波長 λ は、 $\lambda=20\sim90$ km となる。また、 $\lambda_0=20$ km の場合には、 $\lambda=10\sim40$ km となる。

低い円筒形に対する計算例を、 $r_1/r_0=3.0$ の場合で示す (Fig. 5)。

右の図は、 $f(x, y)=F_0/\pi\cdot(1/r_0^2)$ による結果であり、中の図は $f(x, y)=F_0/\pi\cdot(1/r_1^2)$ によるものである。その差、左図が、SEYA のフィルターを施した結果である。この様なフィルター

Fig. 4. Normalized characteristic curves of Seya's filters. Ratio of radii are 2.0, 2.5 and 3.0. Abscissa indicates $r_0\omega$.

Fig. 5. Results of application of Seya's band-pass filter to a column with low height. Left: running average in a case of radius 1, Center: running average in a case of radius 3, Right: the result obtained by subtraction of the center from the left.

によつて地形を解折した。

§4. バンド・パス・フィルターにより抽出された地形

前章で例としてあげたバンド・パス・フィルター ($\lambda_0=40$ km, $\lambda_0=20$ km) により抽出される地形は、実は、大地震や活断層に密接に関係する地形である。バンド幅は傾斜値から推定された波長より短い、中国地方で長く中部地域で短いという傾向は保たれている。

4.1. 長波長地形

中心波長、 $\lambda_0=40$ km、バンド幅、 $\lambda=20\sim90$ km をもつバンド・パス・フィルターで抽出された地形を意味する (Fig. 6)。図の影部が抽出された地形で、一般に隆起部を、内陸の白抜き部は、反対に沈降部を表わす。地形の特徴を列挙すると次の様になる。

- (i) 琵琶湖を境に、その東側地域では、地形は、大体 NS 方向に長く、互いに並列している。
- (ii) しかし、その西側地域では、EW 走向の大型地形が見られる。仔細に観察すると、EW 走向の地形に、NS 走向の少々短い地形が存在している。
- (iii) NS 走向の短い地形は、外帯及び中国山地で卓越している。

Fig. 6. Pattern of topography extracted by a band-pass filter with the central wavelength of 40 km. Band width is between 20-90 km. Shadow zones indicate positive areas corresponding to upheaval regions. White areas indicate negative regions.

Fig. 7. Pattern of topography extracted by a band-pass filter with the central wavelength of 20 km. Band width is between 10-40 km. Shadow and white areas have the same meanings as in Fig. 6.

(iv) 琵琶湖より西側の中高地域の EW 走向をもつ地形は、北から、中国山地、山中の低地、瀬戸内海丘陵、瀬戸内海、四国山地と高地、低地と順序よく並んでいる。

(v) NS 走向をもつ地形と、EW 走向をもつ地形が、紀伊半島及び、近畿三角帯 [藤田 (1974)] で会合している。

(vi) 九州は、火山活動が理由であろうが、大変複雑な形をしている。

この様な、大形の地形の並びは、地殻もしくは、リソスフィアの褶曲もしくは、撓曲を想起させる。もしそうだとすると、西南日本弧は、2つの違う力を受けていることになる。

4.2. 短波長地形

中心波長, $\lambda_0=20$ km, バンド幅, $\lambda=10\sim40$ km のフィルターで抽出された地形 (Fig. 7).

地形の走向の大きな傾向は変わらないが, 全体的に複雑化している. その特徴を長波長地形でしたように列挙すると

- (i) 近畿三角帯より東部では, 細いながらも NS に走向をもつ地形が卓越する.
- (ii) 外帯にも同傾向の地形が存在している.
- (iii) 中国地方は, 長波長地形に見られた. NS 走向の短い地形が分離されて現われている.
- (iv) 九州の東部には, EW 走向の小波地形が現われ, 外帯にも, 中央構造線に沿って EW 走向の地形が現われている.
- (v) EW 走向の地形と NS 走向の地形は, 紀伊半島で出合っている. 近畿三角帯は, 両地形域の分離地域として特徴づけられる.

このような地形をも, 短波の褶曲変動の表われとするなら, 西南日本弧は, 中部地方では EW 圧縮による一様な圧縮を受け, 中国地方は, NS 圧縮による大褶曲地形の上に, EW 圧縮による小型褶曲地形が重なる, 二重褶曲地形といえよう.

§5. 地震, 活断層とバンド・パス・フィルターで抽出された地形

地震は現模に関係なく, 黒丸で, 活断層は線で表わした. 地形の表現は Fig. 6, 7 と同じである. ただ, 平野や低地に出現している微細な高まりは除去している.

Fig. 8-a. Main active faults and large earthquakes which occurred during the period from 1850 to 1975 are superimposed on the topography of the Chugoku district extracted by a band-pass filter with the central wavelength of 40 km.

Fig. 8-b. Main active faults and large earthquakes which occurred during the period from 1850 to 1975, are superimposed on the topography of the Chubu district extracted by a band-pass filter with the central wavelength of 40 km.

Fig. 9-a. The same as Fig. 8-a but the central wavelength of a band-pass filter is 20 km.

Fig. 9-b. The same as Fig. 8-b but the central wavelength of a band-pass filter is 20 km.

5.1. 長波長地形 ($\lambda_0=40$ km)

中国地域と中部地域を分離して考えてみよう。

- (i) 中国地方: Fig. 8-a にみられるように, 地形上に, 大地震および, 活断層を示した. 多くの地震が影部と白抜き部の境界にある. また, 活断層は, 地形の境界線を成している. しかし, 海岸線に沿って起っている地震は, 別の様式の様である.
- (ii) 中部地方: Fig. 8-b, 大体の様子は中国地方と同じである. しかし, 影部の中央に震央があり, また, 断層もある. もう少し短い波長の地形の方に合うことが予想される.

5.2. 短波長地形 ($\lambda_0=20$ km)

- (i) 中国地方: 一連の鳥取地震 (1943 年, M 7.4) を除くと, 長波長地形の場合より一層地形との関係が密接になっている (Fig. 9-a).
- (ii) 中部地方: 予想どおりに, より一層良い一致を示している. 木曾山地・飛弾山地の断層群が地形の境界地の上に分布している Fig. 9-b.

地形と大地震・活断層の関係を簡単に述べたが, 海岸線沿いに発生する地震は, 説明出来なかつたが, 海岸線自身を地塊の境界だと考えればよいのかも知れない. いづれにしても, 大地震・活断層が, 地形の隆起部と沈降部の境界に沿って, もしくは非常に近い所に

発生していることは, 大地震・活断層が地形の形成そのものに関つた地殻活動であるといえる. また, 地形の短波長に, 大地震や活断層が結びついていることは, 内陸の地震のマグニチュードー7.5程度であり, それに相当する断層の長さが 40 km 程度であることと, $\lambda_0=20$ km をもつ, バンド・パス・フィルターのバンド幅が 10~40 km であることは良い一致を示す. こ

の様な短波長地形が比較的浅い所の変形であることも、短波長地形と大地震が結びくには合理性がある。

以上の様な地形と地震・活断層の関係を、微小地震の場合にも調べたので次に述べる。

§ 6. 地形の傾斜と微小地震

地形のデーターとして、東西、1.5'、南北 1' の線で囲まれる地域の平均標高を用いた。従って、傾斜は、ほぼ、6 km×6 km の平面の平均傾斜で与えられる。ここに、北西近畿地域の

Fig. 10. Spatial distribution of epicenters of microearthquakes observed during the period from January, 1970 to June, 1978 by the Tottori Microearthquakes Observatory, the Abuyama Seismological Observatory and the Hokuriku Microearthquake Observatory, Kyoto University. Solid lines indicate main active faults.

Fig. 11. Distribution of the gradients of the northwestern Kinki district. Hatched areas indicate the gradient over 3/100.

Fig. 12. Main active faults and epicenters of microearthquakes, occurred during the period from January, 1970 to June, 1978 are superimposed on the topography which are expressed by the distribution of gradients. Solid lines indicate active faults.

微小地震及び活断層の分布を Fig. 10 に示す.

中国地域の大地震・活断層に関する傾斜は 3/100 であつた. Fig. 11 に傾斜分布を示した. 影部は, 傾斜値が 3/100 より大きい所である. いくつかの非常にはつきりした境界が見える. その内の一つは, 東経 134° と 135° の間で, 北緯 35° 線付近の, 東西に延びるものと, 西北西の走向をもつものである. これは, 山崎断層に対応するものと思われる. また, 135° と 136° の間で, 35° 線の南の白抜き地域の南端の東西の境界は, 有馬・高槻構造線に対応する. 他にも, 郷村断層, 一志断層, 中央構造線, 湯村断層等が識別出来る.

Fig. 12 は Fig. 11 に Fig. 10 を重ねて示したものである. 活断層は, 上で述べた境界に一致している. しかし, 微小地震は, 断層の位置より少々傾斜の大きい所で起つている. 山崎断層付近の活発な微小地震活動は, 断層の北側にあり, 河川と断層が直交する場所に, その河川に沿つて存在する. また, 有馬・高槻構造線の北側の面的な地震活動も, 構造線と直交する小河川に沿うものと解釈出来る. これらの微小地震活動域は, 主断層周辺に散在する微小断層もしくは弱線であり, 活動そのものは, 微小断層等の活動自身を表わすものである. この様に

考えると, 微小地震は, 大地震の場合とは違つて, 地形の微細構造に関係している. このことは, 微小地震のマグニチュード ($1 \leq M \leq 3$) を考えると, 十分あり得ることである.

§7. 微小地震とバンド・パス・フィルターにより抽出された地形

微小地震は, 被害こそ起こさないが, 一般の地震と同じ性質をもっている. 大地震は, 波長 20~90 km の地形に対応していた. 微小地震は, 小地形に対応していると考えられる.

7.1. 長波長地形

ここにいう長波長地形は, 中心波長, $\lambda_0 = 30$ km, バンド幅, $\lambda = 15 \sim 65$ km のバンド・パス・フィルターで抽出された地形のことである. 微小地震のデータは, 1984 年に北陸微小地震観測所で決められたものを用いた [竹内・平野 (1985)]. Fig. 13 に, 抽出された地形図に微小地震と活断層を重ねて示した. 北陸微小地震観測所の衛星点の分布域を考えると, この地域の微小地震活動に関する断層は次のも

Fig. 13. Main active faults and epicenters of microearthquakes observed in 1984 by the Hokuriku Microearthquake Observatory are superimposed on the topography extracted by a band-pass filter with the central wave length of 30 km. Solid lines indicate active faults. A: Fukui fault system, B: Yanagase fault system, C: Hanaore fault system, D: Isshi fault system.

のである。A: 福井断層系, B: 柳ヶ瀬断層系, C: 花折断層系, D: 一志断層系である。図によると, 福井断層系 (A) の地震群は, 東西, 2つの高まりの中央にあり, この地震群で表わされる断層系は, 地形の分割線を成している。また, 柳ヶ瀬断層系 (B) に沿う地震活動は, 沈降地域である琵琶湖と隆起帯である山地の境にあり, 地塊の境界を成している, 同様のことは, 琵琶湖西岸地域でもいえる。抽出された地形図では, 隆起域として表わされている影の中に多くの微小地震が発生していることになる。地形の規模が太すぎることを示唆している。

7.2. 短波長地形

中心波長, $\lambda_0=16$ km, バンド幅, $\lambda=8\sim35$ km のバンド・パス・フィルターにより抽出された地形を意味する Fig. 14.

福井断層に沿う微小地震活動は, 南に延長され, 山地の西に達している。柳ヶ瀬断層系に関係する微小地震活動も, 影の部分にはなくなる。むしろ, 影の部分に密着するように起っている。そして, この活動は, 一志断層 (D) の方へ連っている。琵琶湖西岸地域の地震活動も, 影部ではなく, その周辺に分布している。

微小地震は, 断層に沿う, いわゆる線状配列からはみ出しているものも多い。はみ出た微小地震の原因となる要素が, 散ばって存在していることを示している。地塊を分割する構造が, 度重なる変動を受けて, 微小な弱線もしくは, 弱面を散在させるためであろう。

§8. おわりに

地形の傾斜と標高が, ある高さまで比例しているということは, 地震・活断層の存在する地形には, 地域により, 一定の高度があるということを示している。高い所は, 一定の高さだけ, かさ上げをしていると思われる。しかし, 地震の発生する深さには変りはないのであるから, その様な, かさ上げた部分は, 重力の異常として検出されるかも知れない。傾斜から推定した, 地震・活断層に関係する地形の波長が, 実際の波長より長く出たのは, 近似に無理があつたためであろうと思われるが, 山地のエロージョン, または反対に隆起に関係するのかも知れない。また, 何故地震・活断層に関係する地形の規模が決まっているのか等問題は多く残っている。今後は, 上の議論を数値的に取り扱い, また地形の形成についての議論も次の問題として考えて行かなければならない。

Fig. 14. The same as Fig. 13 but the central wavelength of a band-pass filter is 16 km.

謝 辞

本研究を進めるにあたって、データーを提供して頂いた、鳥取微小地震観測所・阿武山地震観測所・北陸微小地震観測所の各位に厚く御礼申し上げます。岸本兆方教授をはじめ、京都大学防災研究所微小地震部門の皆様の有益な御助言、御討議をいただきました。深く感謝致します。

文 献

- 藤田和夫・岸本兆方, 1972, 近畿のネオテクトニクスと地震活動, 科学, **42**, 422-430.
- 藤田和夫, 1974, 近畿地方の地質の特徴——主としてネオテクトニクスの立場から——, 土と基礎, **22**(10), 59-66.
- 黒磯章夫・渡辺 晃, 1977, 阿武山地震観測所の微小地震テレメータシステムについて, 地震 **2**, **30**, 91-109.
- 活断層研究会, 1980, 日本の活断層, 東大出版会.
- 見野和夫・松村一男, 1982, 地形と地震の関係——傾斜と地震分布——, 京大防災研年報, **25**, B-1, 47-57.
- MINO, K., 1984, On a Formation Mechanism of Topography and Its Relation to Earthquake Occurrence in Southwest Japan, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.
- 尾池和夫, 1975, 鳥取微小地震観測所の震源表について, 地震 II, **28**, 331-346.
- SEYA, K., 1963, On the New Method of Analysis in Gravity Prospecting, Geol. Survey Rept. **201**.
- 丹那断層発掘調査グループ, 1983, 丹那断層(北伊豆・名賀地区)の発掘調査, 地震研彙報, **56**, 797-830.
- 竹内文朗・平野憲雄, 1985, 北陸微小地震観測所の震源マップの概要について約——1万個の地震データのとりまとめ——, 京大防災年報, **28**, B, 印刷中.