

最近の伊豆半島の隆起について (1980-1988)

地震研究所 石井 紘

(平成元年5月8日受理)

要 旨

伊豆半島における1980年から1988年までの異常隆起について時間的・空間的に詳細に調べた。解析方法は時間的には Akima の関数を適用し、空間的には Chebychev の関数を適用する方法を開発した。隆起域に於ける水準測量は毎年実施されており、この方法を適用することにより隆起の時間・空間変動が明らかになった。隆起のピークの積算値は8年間の解析期間で 17 cm に達した。隆起のピークの位置は解析期間の始めには内陸にあったが、終わりには東側の海岸の富戸付近に固定した。内陸から東側の海岸にピークの位置が移動した時期は1982年6月から1983年1月までの間と考えられる。隆起の時間変化は様ではなく時間的に変動しており、特に1987年からの変動は大きい。1978年から伊豆半島東方沖に18回の群発地震が起こっているが解析期間中では隆起のピークが東側の海岸の富戸付近にあるときに発生している。

1. はじめに

伊豆半島はフィリピン海プレート上にあり東の相模トラフと西の駿河トラフから大陸プレート下に沈み込み、関東の内陸部下において太平洋プレートと衝突している。そのために伊豆半島における地殻活動は複雑かつ、活発であり種々の現象が観測され研究の対象となっている (例えば月刊地球特集号, 1980)。

伊豆半島東方沖では群発地震及び有感地震が継続的に発生し1980年にはマグニチュード 6.7 の被害地震も発生している。又1967年から1978年までは内陸部の冷川峠付近に隆起が生じ16 cm にも達した。その後の報告でも伊豆半島東部に於て隆起が継続している (国土地理院, 1983, 1984, 1986, 1987, 1988, 1989)。また、隆起と群発地震発生との関連についても議論されている (例えば茂木, 1987) が隆起の発生原因については未だ決定的な結論は得られていない。そこで隆起の時間的・空間的変動を詳細に調べることはその原因を研究する上でも有効であると考えられる。

隆起域付近では水準測量が毎年実施されており、この論文においては伊豆半島の上下変動の時間的・空間的特徴を調べる為に、時間的には Akima の関数を用い、空間的には Chebychev 関数による関数近似を適用して1980年から1988年までの上下変動の時間的・空間的特徴を調べ、群発地震発生との関連についても検討した。

2. データ及び解析方法

伊豆半島の位置が Fig. 1 に示されている。解析のプログラムは国土地理院による一等水準点検測成果収録に印刷されてある結果を用いるように組まれているが、測量から印刷まで1年以上遅れる。故にここでは地震予知連絡会報に発表された結果を用いている (国

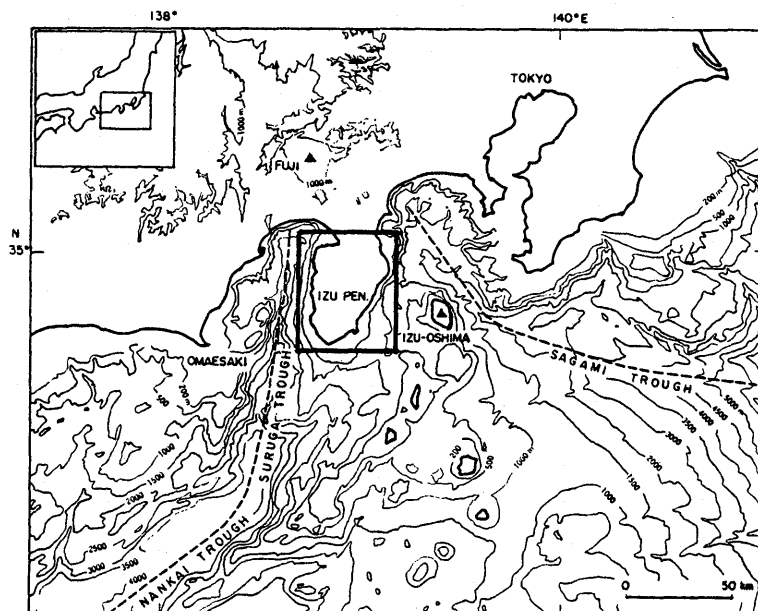


Fig. 1. Location of the Izu Peninsula.

土地理院, 1983, 1984, 1986, 1987, 1988, 1989).

伊豆半島の水準路線は Fig. 2 に示されている。伊豆半島の北東部においては 1980 年以来、国土地理院により水準測量が毎年繰り返されており南西部の海岸沿いの路線については 2 年毎に測量されている。

データ解析のフローチャートは Fig. 3 に示されている。最初は測量路線における測量時期の相違を同じ測量時期に合わせることが必要であり、これを **HOMOGENEIZATION** と書いてある。次に網平均を実施するがこのときには検潮その他既知の地殻変動の絶対値を計算に取り入れる。網平均により各測量年次における路線上の上下変動が求められるから、二次元のチェビシェフ関数により空間的な補間を実施する。チェビシェフ関数による近似においては近似関数の係数が得られる。この係数の数は入力したデータの数より非常に少ない数であり、しかも近似は非常によい(石井ほか, 1978)。従って以後の計算においてはこの係数のみを記憶しておくことにより元のデータを再現することが出来る。又異なるデータとの相関計算などの場合にも有効である。このような近似計算を測量の実施回数だけ繰り返す。次に全ての測量結果の近似値から **AKIMA** の関数により時間領域の補間を実施する。以上の過程により時間及び空間領域の垂直変動を得ることが出来る。

二次元のチェビシェフ関数による近似は次のようにする。

z_i を i 番目の点 (x_i, y_i) における上下変動とする。

ここで $i=1, 2, \dots, N$ で N は観測値の数である。チェビシェフ関数

$$T_n(x) = \cos \{n \cdot \arccos(x)\}, \quad n=1, 2, \dots,$$

を用いて二次元の近似関数 $z(x, y)$ は

LEVELING ROUTES OF IZU PENINSULA

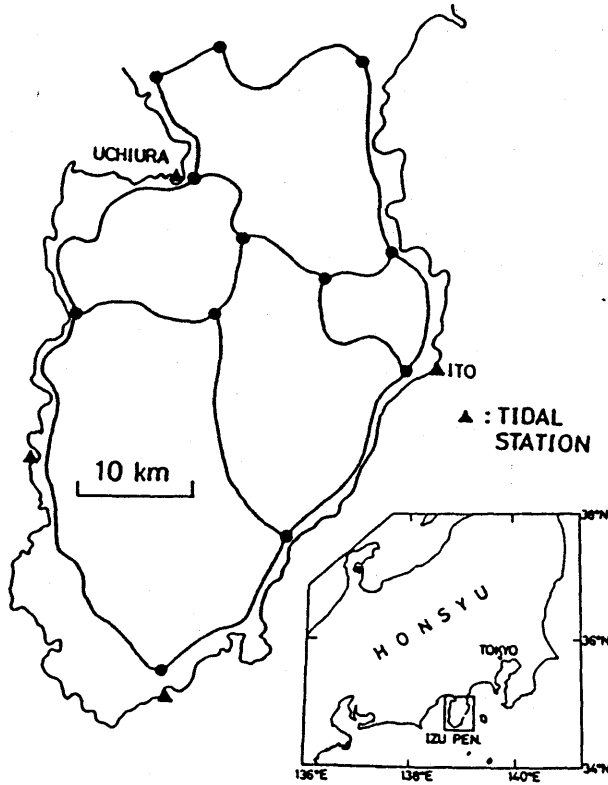


Fig. 2. Leveling route of the Izu Peninsula.

$$z(x, y) = \sum_{k=0}^{m_x} \sum_{l=0}^{m_y} a_{kl} T_k(x) T_l(y)$$

の様にかかれる。ここで $m_x \cdot m_y < N$ である。係数 a_{kl} は観測値との差

$$e_i = z_i - z(x_i, y_i)$$

の二乗の和が最小になるように決定される。結局、係数 a_{kl} は方程式

$$\sum_{k=0}^{m_x} \sum_{l=0}^{m_y} a_{kl} S_{klmn} = T_{mn}$$

を解くことにより求められる。ここで

$$m=0, 1, \dots, m_x, \quad n=0, 1, \dots, m_y$$

$$T_{mn} = \sum_{i=1}^N z_i T_m(x_i) T_n(y_i)$$

$$S_{klmn} = \sum_{i=1}^N T_k(x_i) T_l(y_i) T_m(x_i) T_n(y_i)$$

PROCESS OF LEVELING ANALYSIS

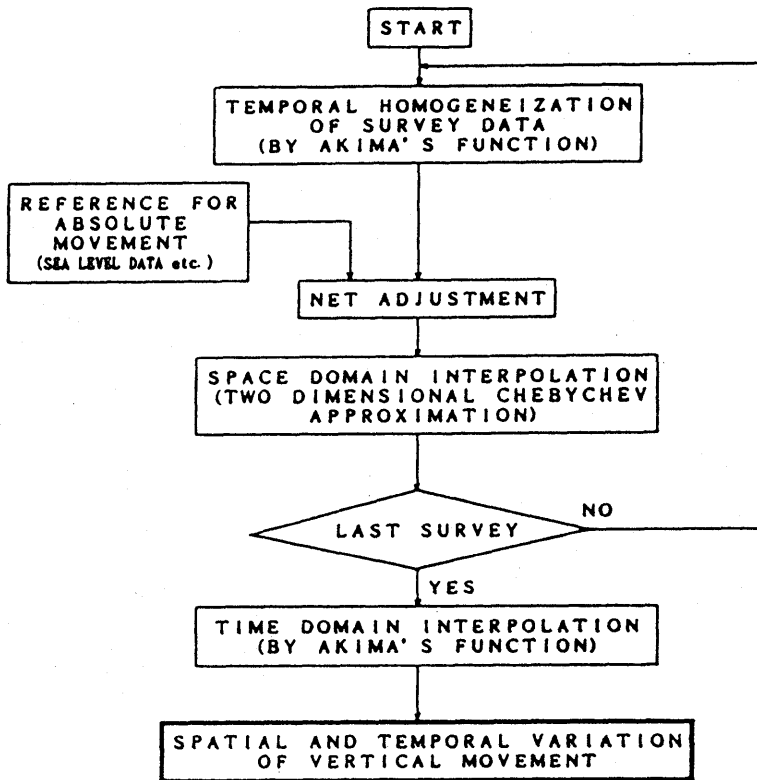


Fig. 3. Process of leveling analysis.

である。

3. 積算された上下変動

1980年8月を基準にした1年毎の上下変動の積算値のコンターが Fig. 4 に示されている。内浦の検潮所を不動点と仮定している。この理由は潮位の解析結果を参照すると内浦付近では上下変動が非常に小さいことが報告されている（加藤，1989）からである。Fig. 5 は伊東検潮場における検潮から求められた上下変動（加藤，1989）である。検潮から求められた上下変動によると伊東では1973年から35 cm 程度隆起が進行していることがわかる。Fig. 4 に示された水準解析による対応する点の変動が重ねてプロットしてある。プロットは1980年から半年毎の値である。図から明らかなように異なるデータから得られた上下変動の一致は非常によい。故に内浦を固定した仮定は妥当と考えられる。時間は矢印のように進行し1988年6月までの積算値が示されている。コンターは10 mm 単位で実

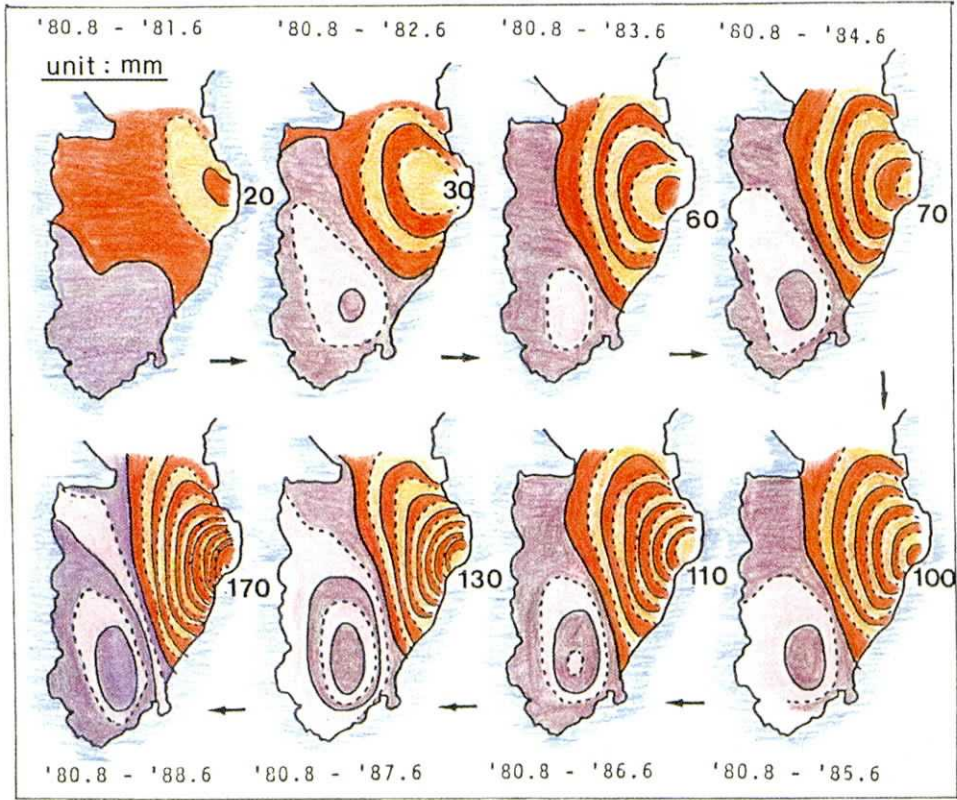


Fig. 4. Accumulated vertical displacements from 1980. Solid line between red color (uplift) and purple color (subsidence) indicates zero line. Both solid and dotted lines indicate 10 mm contour intervals.

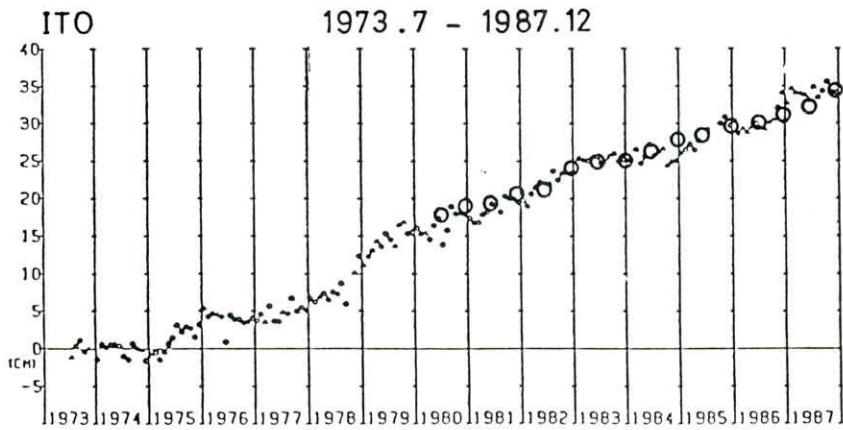


Fig. 5. Comparison between vertical displacements obtained by tide data at Ito station (After Kato, 1989) and those by leveling analyses (open circle).

線と点線で交互に引かれている。赤色と紫色を分けているコンターが上下変動0で次の点線・実線が10mm・20mmの隆起あるいは沈降である。1980年から隆起が進行しコンターの間隔が細くなり、1988年には隆起のピークが17cmにも達している。1982年までは隆起の目玉が内陸にあったが1983年頃からそれが富戸の海岸付近に移動している。ピーク値は年10mm~20mm程度の増加であるが1982年から1983年にかけて隆起のピーク値は30mm増加し1987年から1988年にかけては40mm増加しこれらの期間は隆起の進行が最も速い期間であることがわかる。

Fig. 2の水準路線と比較すると隆起域の付近は路線が密であり隆起のパターンを非常によく表していると考えられる。沈降域に関しては路線がそれほど密ではないので沈降の目玉が存在するかどうかは明らかでない。しかしながら海岸沿いには路線が通っており実際の沈降を示しているといえる。他の論文で議論するが伊豆半島の南西海岸付近の沈降に関しては御前崎の沈降と比較して他の論文で議論するが4mm/年程度の割合で沈降が進行している。

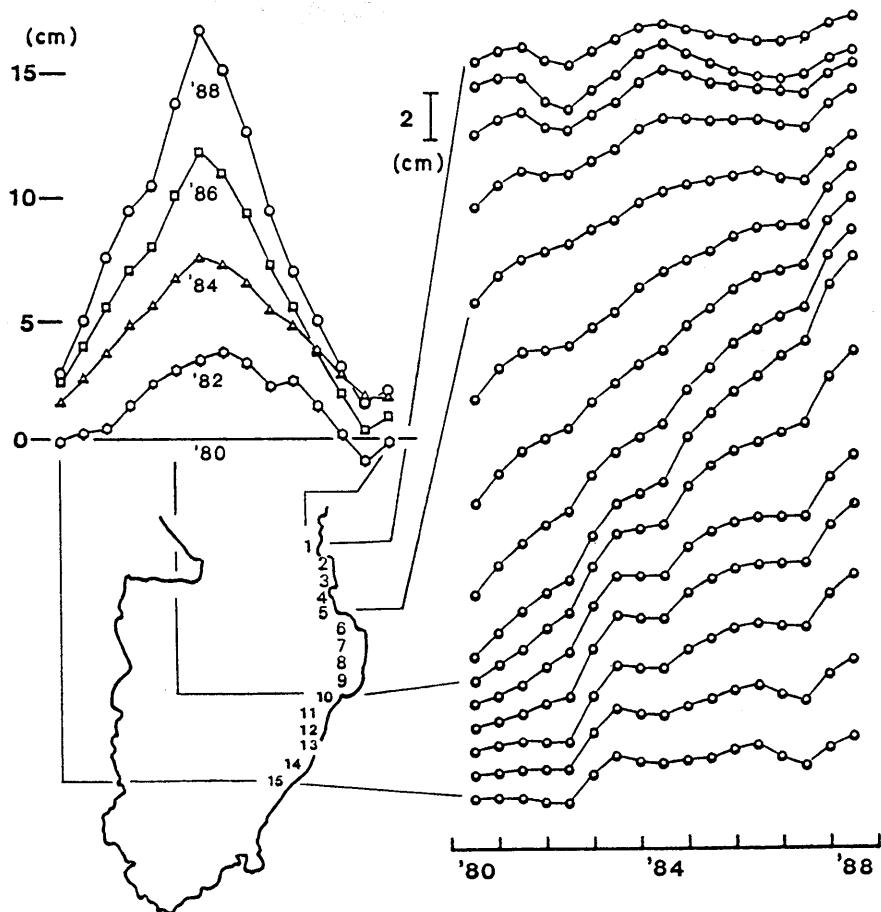


Fig. 6. Spatial and temporal variation of vertical displacements along the east coast of the Izu Peninsula.

また図から内陸部における隆起域の範囲が明らかであり、ピークから内陸の隆起境界までは約 20 km である。海域の測量がないので海域における隆起の範囲及び程度は明らかでない。

4. 隆起海岸沿いの時空間変化

隆起のピークが海岸付近にあることがわかったので、ここでは隆起海岸における上下変動の空間分布と時間変化について議論する。Fig. 6 は海岸に沿った地点の上下変動を示している。図中の上の図は1980年8月からの変動である。隆起のピークが No. 9 の地点にあることが明白である。隆起の成長の様子や空間的な減衰の様子も明らかである。図中の右の図は各地点における上下変動の時間変化を示している。No. 9 の地点の時間変化が最も大きく1988年6月までの隆起は17 cm に達している。隆起の割合は No. 9 の地点で2 cm/年程度で、No. 5 の地点で1 cm/年程度である。隆起の変化は必ずしも一様ではない。例えば No. 9 から No. 13 までの変化を見ると1982年6月、1984年6月と、1987年

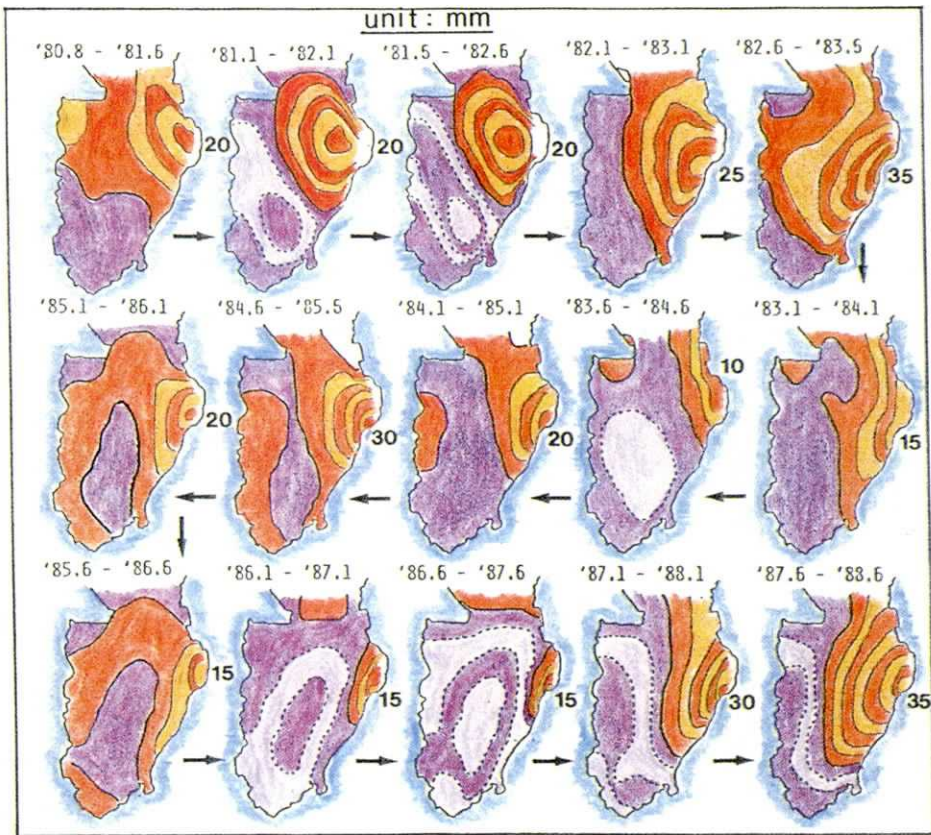


Fig. 7. Yearly vertical displacements shown for every half year. Solid line between red color (uplift) and purple color (subsidence) indicates zero line. Both solid and dotted lines indicate 5 mm contour intervals.

6月において隆起の変化が増加しているように見える。又1987年6月からはほとんど全ての点において急激な変化が起こっている。

5. 隆起域の時間変化

積算された上下変動について議論してきたがここでは隆起域の時間変化について調べる。Fig. 7は1年間の上下変動の時間変化を示している。1980年から半年毎ずらした1年間の上下変動であり、時間の経過は矢印で示している。隆起のピークの位置の移動も興味ある。国土地理院によると(国土地理院, 1978)1978年頃までは隆起のピークが内陸の冷川峠付近にあることが報告されている(Fig. 8)。Fig. 7から1982年6月まではピークは確かに内陸にあるが1983年1月になるとピークの位置は海岸の富戸付近に位置しており、ピークの位置はこの頃に移動したと考えられる。1983年1月から1984年6月の期間ではピークの位置は北東部の海域付近に出ている。

伊豆半島全体に沈降域が広がった時期は1983年6月から1984年6月と1986年1月から1987年6月の期間である。1984年1月から1986年6月は隆起域が存在すると共に沈降域が内陸部に張り出した時期である。1982年1月から1983年6月の時期は1987年1月から1988年6月のパターンと類似している。

1984年1月からは隆起のピークの位置が東側の海岸の富戸付近に落ち着いている。図にはピーク値の数値がmm単位で書き込まれてあるが時期により値が変化している。ピーク値をプロットしたのがFig. 9である。1983年1月から1984年6月までに関してはピークの位置が海域に出ていて明らかでないがピーク値にも時間変化のあることが見られる。最大は35mm/年であり最小は10mm/年である。

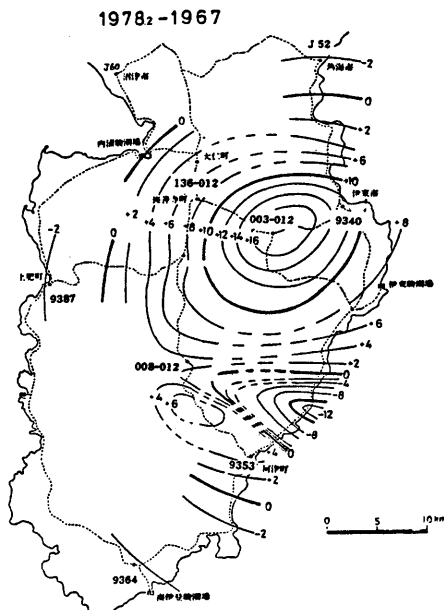


Fig. 8. Vertical movements on the Izu Peninsula for the period from 1967 to 1978 (After Geographical Survey Institute, 1978).

6. 伊豆半島東方沖地震との関連

1974年以来伊豆半島東方沖では群発地震が盛衰を繰り返しながら繰り返し発生している。Fig. 10は1981年1月から1988年10月までの伊豆半島周辺における微小地震活動の震央分布である(東京大学地震研究所, 1989)。図から伊豆半島東方沖でいかに微小地震活動が活発であるか明らかである。しかも活動域は隆起域の近傍である。1978年以来伊豆半島東方沖では18回の群発地震が発生した(気象庁地震予知情報課 1989)。その資料から群発地震活動をリストにしたのがTable 1である。

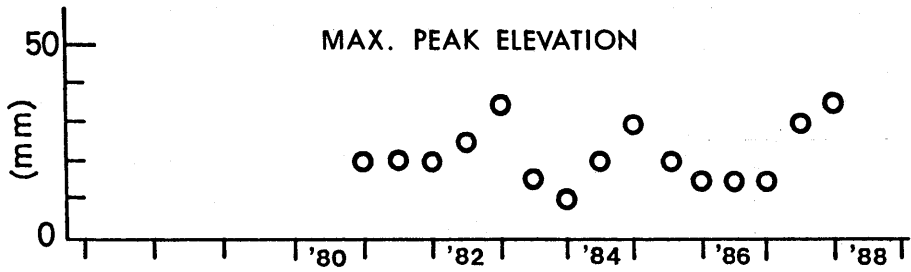


Fig. 9. Time variation of uplift peak value.

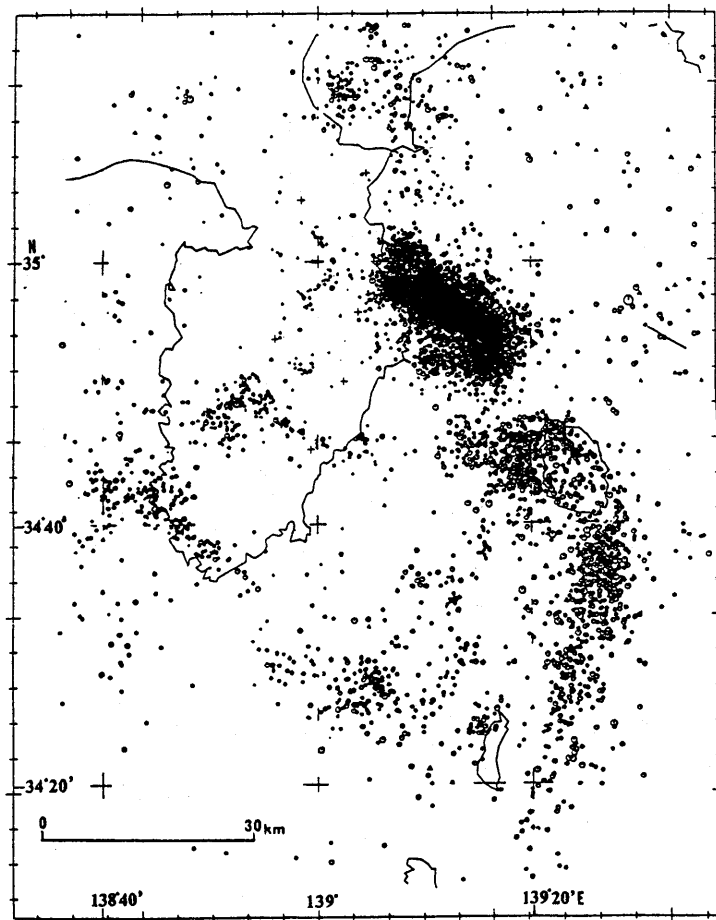


Fig. 10. Microearthquake activity with depth less than 20 km on the Izu Peninsula and its vicinity from January, 1981 to October, 1988 (after Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1989).

Table 1. List of 18 earthquake swarms occurring off the eastern Izu Peninsula from 1978 to 1988.

Swarm No.	Maximum Magnitude	Total Eq. Number	Period	Duration (day)	Eq. Number per a day
1	5.4	11419	'78 11/23-'79 1/31	70	163.1
2	3.1	2694	'79 3/13- 4/30	49	54.9
3	3.8	>2060	'79 5/18- 6/30	44	46.8
4	6.7	>14326	'80 6/23- 10/10	110	130.2
5	2.2	396	'82 3/10- 3/31	22	18.0
6	2.7	>1283	'82 5/ 7- 5/20	14	91.6
7	3.9	667	'82 9/ 7- 9/11	5	133.4
8	4.5	2166	'83 1/14- 1/31	18	120.3
9	4.5	6048	'84 8/30- 10/31	63	96.0
10	3.1	2748	'85 3/16- 5/10	56	49.0
11	3.8	4199	'85 10/13- 11/10	29	144.8
12	3.2	972	'85 12/17-'86 1/ 5	20	48.6
13	4.6	6176	'86 10/10- 10/29	20	308.8
14	5.0	2633	'87 5/ 6- 6/ 4	30	87.8
15	4.7	534	'88 2/14- 2/23	10	53.4
16	2.6	200	'88 4/25- 4/30	6	33.3
17	3.2	77	'88 5/31- 6/ 4	5	15.4
18	5.2	16988	'88 7/26- 8/25	31	548.0

最も地震数の多かったのは No. 18 の群発で1988年7月26日から8月24日までの31日間継続している。また、この群発地震は1日の地震発生回数が最も多く約550個である。群発地震継続期間の最も長いのは No. 4 で110日継続した。又、発生した地震の最大マグニチュードの最も大きいのもこの群発地震である。隆起現象と群発地震との関連についていろいろな比較を試みたがその中の1例を以下に示す。Fig. 7 において隆起のピークの位置に注目すると、1980年8月から1982年6月までは隆起のピークは内陸にある。又1983年1月から1984年6月まではピークは海域に出ているように見える。そのほかの期間は隆起のピークの位置は東海岸の富戸付近に位置しているように見える。そこでピークが富戸付近にある時期を Yes とし富戸付近にない時期を No としてプロットしたのが Fig. 11 の星印である。図には Table 1 の18個の群発地震の発生時期に発生個数の対数も丸印でプロットしてある。図から1988年までは群発地震の発生している時期には隆起のピークが東海岸の富戸付近にあることがわかる。このような関係については茂木 (1989) がすでに指摘している。

7. ま と め

水準測量のデータを用いて上下変動の時間・空間的变化を求めるための解析法を開発した。この方法を地殻活動の活発な伊豆半島に適用し、1980年から1988年までの異常隆起について詳細に調べた。得られた主な結果は以下のようにまとめられる。

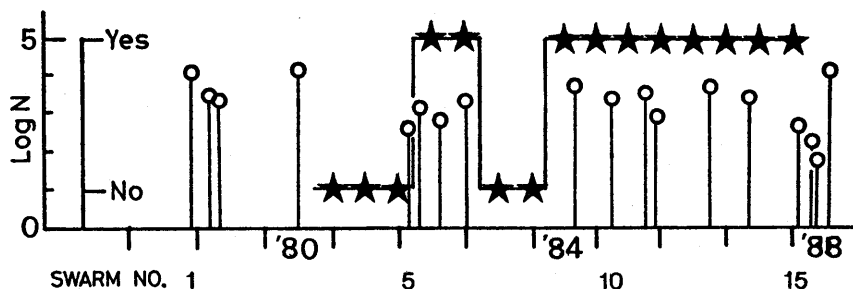


Fig. 11. Logarithm of total number of earthquakes for a swarm is plotted by open circles. Considering Fig. 7, in the case where a peak of uplift is located at the east coast (Futo area) a star mark is plotted at "Yes" and in the other cases, "No".

1. 異常隆起の時間的・空間的変動及び隆起域の範囲などが明らかになった。
2. 隆起のピークの積算値は解析期間で 17 cm に達した。
3. 隆起のピークの位置は解析期間の始めには内陸にあったが 1982 年 6 月から 1983 年 1 月までの間に東側の海岸の富戸付近に位置が移動している。
4. 隆起の時間変化は一様でなく時間的に変動しており、特に 1987 年からの変動は大きい。
5. 1978 年から伊豆半島東方沖に 18 回の群発地震が起こっているが上下変動を解析した期間の範囲内では隆起のピークが東海岸の富戸付近にある時期に発生している。

謝 辞

茂木清夫教授と加藤照之博士にはいろいろ議論して頂きました。また松本滋夫氏には図の作成に関していろいろ協力して頂きました。記して感謝致します。

文 献

- 月刊地球特集号, 1980, 伊豆半島のテクトニクス, 海洋出版, 14, pp. 168.
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司, 1978, 秋田地殻変動観測所における地殻変動観測(3) — 伸縮・傾斜変化に対するチェビシェフ近似関数の適用 —, 測地学会誌, 24, 122-131.
- 地震研究所, 1989, 伊豆半島およびその周辺の地震活動(1987年11月~1988年10月), 地震予知連絡会会報, 41, 243-256.
- 加藤照之, 1989, 月平均潮位記録から推定された地殻の上下変動(1951年~1987年), 地震予知連絡会会報, 41, 498-520.
- 気象庁地震予知情報課, 1989, 伊豆半島およびその周辺の地震活動(1988年5月~10月), 地震予知連絡会会報, 41, 227-242.
- 国土地理院, 1978, 伊豆半島における地殻変動, 地震予知連絡会会報, 20, 92-99.
- 国土地理院, 1983, 伊豆半島の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 29, 147-167.
- 国土地理院, 1984, 伊豆半島の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 31, 229-245.
- 国土地理院, 1986, 伊豆半島の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 35, 235-248.
- 国土地理院, 1987, 伊豆地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 37, 224-242.
- 国土地理院, 1988, 伊豆地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 39, 194-206.
- 国土地理院, 1989, 伊豆地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 41, 283-302.
- 茂木清夫, 1987, 伊豆半島東部の異常地殻隆起と群発地震, 地震予知連絡会会報, 38, 258-260.
- 茂木清夫, 1989, 伊豆半島の地殻異常隆起と群発地震の関係, 月刊地球, 11, 195-198.

Recent Abnormal Uplift on the Izu Peninsula (1980-1988)

Hiroshi ISHII

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Recent abnormal uplift on the Izu Peninsula from 1980 to 1988 is investigated by employing a newly developed method of leveling analysis.

Temporal and spatial variations of abnormal uplift are clarified. Maximum uplift during the analyzed period reaches 17 cm. It is found that the rate of uplift is not necessary uniform but varies with time and becomes higher from 1987. It is revealed that uplift peak moved from inland to the coast between July, 1982 and January, 1983. It is also found that earthquake swarms occur when the uplift peak is located at the east coast (Futo area).