長野市における地殻変動連続観測 (I)

—平柴観測点の傾斜変化, 1967~1971 年—

東京大学地震研究所 大竹政和・山田重平・小林 勝

(昭和 47 年 6 月 5 日受理)

Continuous Observations of Crustal Deformation at Nagano City, Central Japan (I)

—Ground Tilt at Hirashiba Observation Site, 1967~1971—

Masakazu OHTAKE, Juhei YAMADA and Masaru KOBAYASHI

Earthquake Research Institute, Tokyo University

(Received June 5, 1972)

At Nagano City, Central Japan, ground tilt was continuously observed with a set of water-tube tiltmeter and an Ishimoto type silica tiltmeter (horizontal pendulum) for four years from April 1967 to May 1971.

General trend of the tilt shows a secular ascending of the basement to N13°E direction. The movement not only qualitatively but quantitatively corresponds to an unusual upheaval of the crust at northeastern part of Nagano City, which was found by revision of precise levelling. This local upheaval was accompanied with a considerable activity of smaller earthquakes. Our study demonstrates that such a short-span observation of ground tilt can successfully supplement discrete data from levelling, if the observation is carefully planned. Horizontal pendulum tiltmeters are much more convenient to be installed compared with water-tube tiltmeters, but the tilt resulted from the former instruments, θ_S does not necessarily coincide with that from the latter, θ_W . In our case, θ_S is about five times as large as θ_W though the azimuth of the tilt variation is harmonious one another. A model is offered in order to interpret such amplification of the ground tilt.

Tilt variations just after larger Matsushiro earthquakes were investigated, but we could not detect any tilt steps attributed to the dislocation at the origins.

§ 1. 序

長野市周辺の地震活動と地殻変動との相互関係を調べるために、松代地震のさなか、1967年に長野市平柴に水管傾斜計及び石本式水平振子傾斜計を設置して常時連続観測を行なつてきた。1967 年 4 月から 1971 年 5 月まで 4 年間の観測結果について若干の考察を行なう。

この種の小スパンの坑内観測は気象条件・地下水・局所的な地下構造等の影響を受けやすいので、地域的な地殻変動を的確に検出しうるかどうか繰返し問題にされてきた〔小沢 (1967)〕。HAGIWARA *et al.* (1966), 油壺地殻変動観測所・他 (1969) の油壺に関する部分、飯田・他

昭和 46 年 10 月 12 日地震学会で発表。

Fig. 1. Location of the Hirashiba observation site and the levelling route cited in Fig. 6. Major Matsushiro earthquakes which occurred in the period from April 1967 to May 1971 are also plotted.

Fig. 2. Plan of the observation vault at Hirashiba and arrangement of the instruments. For the abbreviations refer to Table 1.

(1970)等によつて坑内傾斜観測と水準測量との一致が報告されている一方、檀原 (1965), 油壺地殻変動観測所・他 (1969) の鋸山に関する部分, 国土地理院測地部 (1971) 等否定的な報告も少ない。平柴における永年的な傾斜変化は水準測量の結果と定性的にも定量的にも十分良い一致を示しており, 好条件下での坑内連続観測が数年おきの測地測量を有効に補間し, 刻々のデータを提供しうることが明らかとなった。

§ 2. 観測方法及びデータ

平柴観測点は Fig. 1 に示すように長野市街の西部, 裾花川の西岸に位置し, 第二次世界大戦末期に掘削された既存の横坑内に観測計器を収めている。地表からの深さは最深部で 28 m である。地質は長野盆地の北西縁に分布する麻積累層 (裾花流紋岩質凝灰岩) と呼ばれる中新世の海成層 [長野県地学会 (1962)] で, この付近から急勾配で長野盆地の沖積層下に没している [森本・他 (1966)]。

坑内の計器配置を Fig. 2 に示す。水管傾斜計 (WTT) は長さ 14 m (AA' 成分, N 35° E) 及び 18 m (BB' 成分, N 55° W) の直交する 2 成分から成り, 1970 年 5 月末日までは日 1 回, それ以後は週 1 回の読取を原則としている。

Fig. 3. Daily variation of ground tilt observed with water-tube tiltmeters, and daily amount of precipitations. Arrows indicate the occurrence of major Matsushiro earthquakes whose magnitude is greater than 5.0.

Fig. 5. Variation of ground tilt along the general trend (secular variation) and the perpendicular direction (seasonal fluctuation).

Fig. 6. Results of the precise levelling along the route from Omachi to Kashiwazaki (tentatively fixed). Solid circles: Apr.~Jun. 1966~Sep.~Dec. 1966. Open circles: Sep.~Dec. 1966~Mar.~May 1967. (after Geophysical Survey Institute)

呼ぶことにしよう。ベクトル図を再びこの両成分に分解すると Fig. 5 を得る。

永年変動成分は $N 13^{\circ} E$ の隆起軸を持ち、その傾動速度は、1967 年には $12 \times 10^{-6} \text{ rad/yr}$ 程度であつたものが 1970 年にはおよそ $4 \times 10^{-6} \text{ rad/yr}$ と順次減少する傾向を示している。1971 年以後は傾動がほぼ停止したと言つてよい。平柴における地盤の永年の傾斜運動は水準測量の成果と良い一致を示している。松代群発地震に関連して国土地理院 (1967) は、1966 年 4～6 月、同年 9～12 月、1967 年 3～5 月の 3 次にわたつて長野県大町市―長野市―新潟県柏崎市間の水準測量を実施した。柏崎 (BM. 3742) を仮不動点として垂直変動量を図示したのが Fig. 6 である。長野市周辺に注目すると、最初の 5 カ月間 (黒丸) に長野市北東部の吉田 (BM. 3652) を中心とする 45 mm に及ぶ隆起が際立っている。隆起域のひろがり直径 9 km 余りと推定され、平柴 (BM. 3654 の西方 1 km) 付近で 5 カ月間に $8 \times 10^{-6} \text{ rad}$ 、従つて平均 $19 \times 10^{-6} \text{ rad/yr}$ の傾斜変化が期待される。後半 6 カ月間 (白丸) の平均傾斜速度は $8.5 \times 10^{-6} \text{ rad/yr}$ に半減している。水準測量はわれわれの傾斜観測の直前の期間を扱っているから、水管傾斜計の観測から得られた永年変動はやや大きすぎる (と言つてもせいぜい 2～3 倍程度) 印象を受ける。しかし、水準路線が必ずしも最大傾斜の方向に添っていないこと、水準路線が沖積層の上を走っているのに対して傾斜観測は基盤の上で行なわれていることを考慮に入れば、両者は良く一致していると言わねばならない。Fig. 5 から、長野市北東部の隆起運動は 1971 年初頭に終熄した、と結論しても大過ないであろう。

他方季節変動成分は、9～10 月に東上りの極が現われた後傾斜方向を西上りに変え、3～6 月の間横這状態で推移する。7 月にはいと急速に東上りに転じ、結局年間の変動振幅は $7 \times 10^{-6} \text{ rad p-p}$ に達する。季節変動のピークが現われる時期は、外気温、坑内気温それぞれのピーク時期の中間頃となつている。水管の読取容器を載せた花崗岩の台石や水の熱膨脹からは 2 桁以上小さい季節変化しか期待されない。

§ 4. 長野市北東部の隆起と地震活動

前節で述べた長野市北東部の局地的な隆起運動は一連の小乃至微小地震を伴つた。平柴観測点の北 2 km に位置する北信微小地震・地殻変動観測所 (以下「北信観測所」と略称する) の高感度地震計 3 成分の初動振幅と S-P とから付近の地震の震源を決めた。観測所の南半円側には多数の松代地震が分布するので、これらを取り除いて北半円側の地震のみ本報告の観測期間分について図示したのが Fig. 7 である。大森係数 k は、深さ 4 km まで $k=4.1 \text{ km/sec}$ 、それ以深は $k=8.2 \text{ km/sec}$ とした。マグニチュードは OHTAKE (1970) の振動継続時間による式を用いて決めた。Fig. 7 には、松代群発地震とは明らかに区別される小乃至微小地震の集

団が長野市北東部に見られる。活動の中心は長野市と上水内郡牟礼村の境の坂中峠付近にあり、深さは2~6 kmに集中している。この位置は水準測量にあらわれた最大隆起点からは北北西に数 km 隔たっているが、平柴から見た永年変化の隆起方向、 $N 13^{\circ} E$ とは完全に一致する。線的な測量から見出される最大隆起点が必ずしも隆起の真の中心を意味しないことは勿論であるが、あるいは隆起の中心から本当にはずれた場所で地震活動が活発化する理由があつたのかもしれない。しかし Fig. 7 の震源決定は十分精度良いものとは言えないので、北信観測所の地震データの今後の詳しい解析を待つて改めて論ずることしたい。

隆起域は約 9 km の直径を持ち、最大隆起速度も 45 mm/5 month に及ぶ。檀原 (1966) によればマグニチュード 5.7 程度の中地震の発生の可能性が高いことになるが、本観測期間はもとより、それ以前 11 年間の気象庁 (1966,

1968) 資料によつてもこのような地震活動は検知されていない。この隆起運動は、歪エネルギーの一部を微小地震として解放しつつも、全体としては大きな破壊を伴わぬ塑粘的な地殻変動として特徴づけられる。

§ 5. 地震前後の傾斜変化

観測期間中に発生したマグニチュード 5 以上の松代地震 6 個 (Fig. 1) のうち、地震と明瞭に対応する水管傾斜計変化が認められたものは、1968 年 4 月 4 日 19 時 54 分の強震 ($M=5.1$) ただ 1 個のみであつた (Fig. 3)。地震前後の傾斜変化の様子を拡大して Fig. 8 に示す。傾斜

Fig. 7. Epicentral distribution of the earthquakes which are located to the northern side of the Hokushin Seismological Observatory in the period from April 1967 to May 1971. Double circle indicates the epicenter of the strong shock on April 4, 1968.

Fig. 8. Ground tilt just before and after a strong shock on April 4, 1968.

計の読取は1日1回（この当時は特別に2回）のため、傾斜変化が地震の直前に生じたか直後に生じたか、またどのような時間的経過を経たかは明らかでないが、地震をはさむ前後17時間の間に $N 66^\circ E$ 方向に $1.6 \times 10^{-6} \text{ rad}$ の上り、さらに3日後に $N 35^\circ E$ 方向に $2.7 \times 10^{-6} \text{ rad}$ の上りを記録している。この傾斜変化が震源のメカニズムに対応するものであるかどうか検討してみよう。気象庁「地震月報」による震源位置は $\varphi=36^\circ 34' N$, $\lambda=138^\circ 11' E$, $h=0$ で、われわれが北信観測所のデータから独立に決めた震源位置（気象庁震源の東1.5 km, $h=0 \sim 5 \text{ km}$, 平柴の真南9 km）に極めて近い。Fig. 9は、気象庁および周辺の微小地震観測所のプレティン、北信観測所のデータによる初動方向分布であ

る。横浜と小名浜は異常に大きな初動振幅が報告されており、真の初動を験測していない可能性が高い。Fig. 10に示す主震後12時間の余震震央分布からA面が破壊面に擬せられるので、震源のメカニズムとして、走行 $N 56^\circ W$ のほぼ垂直の左横ずれ断層が推定される。この解は ICHIKAWA (1971) の $N 61^\circ W$, 傾斜 90° とほぼ一致している。断層の長さ $2L$ は同じく余震分布から4 km としておく。断層の幅を $0.1L \sim 1L$, 平均くいちがい量を $10^{-5}L \sim 10^{-4}L$ として PRESS (1965) によつて平柴で期待される地表傾斜を求めると、北東～北々東上り $3 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ rad}$ となる。この傾斜量は実測値よりもはるかに小さく、また傾斜方向も観測

Fig. 9. Push-pull distribution of the initial motions of the earthquake on April 4, 1968. Solid and open circles indicate compression and dilatation, respectively. Circles are replaced by triangles when the denoted polarity is questionable.

Fig. 10. Epicentral distribution of the aftershocks which occurred within half a day following the main shock.

と合わない。従つて、観測された傾斜変化は地震発生に伴う永久歪に由来するものではなく、地震動によつて二次的に生じたものであると考えねばならない。3日後に再びほかに例を見ない大きな傾斜の“とび”を示したこともこの結論を支持する。

§ 6. 降水の影響

Fig. 3 に長野市における日別降水量があわせて図示されている。大雨の直後 2～3 日は観測値がばらつく傾向があるが、ばらつきの大きさは 10^{-7} rad の桁にすぎず図からは判読できぬ程小さい。犬山地殻変動観測所で問題とされたような著しい降水の影響〔飯田・他 (1969)〕はわれわれの場合まぬがれているようである。観測坑内の自然湧水も見られない。しかしより緩慢な影響としては、降水量の季節的変動が前に述べた季節的傾斜変化の有力な原因となっている可能性もありうる。

§ 7. 水管傾斜計と水平振子傾斜計の比較観測

石本式水平振子傾斜計の良好な記録が得られている 13 カ月間について水管傾斜計の観測値と比較を行なつたのが Fig. 11 である。水管傾斜計の変動量は、水平振子傾斜計の設置方向、 $S 68^{\circ} W$ に換算したものが図示されている。両者の変動の様子は細部に至るまで良い相似関係

Fig. 11. Comparison of tilt variations observed with the water-tube tiltmeter (WTT) and the silica tiltmeter (ST).

Fig. 11. Schematic representation of a model which gives a rational interpretation to the qualitative agreement and the quantitative contradiction of the ground tilt observed with water-tube tiltmeter (θ_w) and silica tiltmeter (θ_s).

1 個の小ブロックの傾斜 θ_s を、水管傾斜計は数個の小ブロックにまたがる平均的傾斜 θ_w を測っている。この模型は、ブロックの運動方向に系統性を与えている点で HAGIWARA (1947) のモデルとは異なっている。 θ_w 自体も、同様の原理で水準測量から求められる傾斜量を増幅したものになっている可能性がある (第 3 節参照)。いろいろな長さを単位とする傾斜観測を併行して行なえば、ブロックの大きさ分布を知ることができるかもしれない。

§ 8. 結 び

本報告の主要な結論は次の通りである。

- 1) 長野市平柴における最近 4 年間の地盤傾斜は N 13° E 上りの永年変化を示し、水準測量から見出された長野市北東部の異常隆起そのものを捕えているものと考えられる。この隆起運動は徐々に衰え、1970 年末には終熄した。隆起域全体を震源域とするような大きい地震 ($M \sim 5.7$) は発生しなかつたが、近傍には小乃至微小地震の顕著な活動が見られた。
- 2) 永年変化と直交する方向に 7×10^{-6} rad p-p に及ぶ規則正しい季節変化が現われる。
- 3) 観測期間中に $M \geq 5$ の松代地震が 6 個発生したが、いずれについても地震に伴う tilt step を見出すことができなかった。
- 4) 水平振子傾斜計は、水管傾斜計と比較して約 5 倍に拡大された相似の傾斜変化を記録していることが確かめられた。この増幅作用を説明するために、不連続面の方向が系統性をもったブロック構造の模型を提出する。

謝 辞

平柴の地殻変動連続観測は萩原尊礼教授 (当時) の指導の下に始められ、その後北信観測所の業務としてひきつがれたものである。萩原東京大学名誉教授並びに観測を援助された北信観測所職員各位にあつく御礼申上げる。

を保っているが、水平振子傾斜計の変動量は水管傾斜計に比べて 5 倍程度に拡大されている。こうした拡大現象は犬山地殻変動観測所〔飯田・他 (1969)〕でも知られており、何らかの地学的意味があるものと考えられる。ひとつの試みとして、Fig. 12 のような、割れ目の傾きが系統性をもったブロック構造を考えてみたい。水平振子傾斜計は

文 献

- 油壺地殻変動観測所・鋸山地殻変動観測所, 1969, 油壺・鋸山における地殻変動の観測, 地震予知連絡会会報, **1**, 34-38.
- 檀原 毅, 1965, 油壺における傾斜計記録と水準測量結果との比較, 測地学会誌, **11**, 107-113.
- 檀原 毅, 1966, 松代地震に関連した地殻の上下変動, 測地学会誌, **12**, 18-45.
- HAGIWARA, T., 1947, Observation of Changes in the Inclination of the Earth's Surface at Mt. Tsukuba (Third Report), Bull. Earthq. Res. Inst., **25**, 27-31.
- HAGIWARA, T., J. YAMADA and M. HIRAI, 1966, Observation of Tilting of the Earth's Surface Due to Matsushiro Earthquakes. Part 1, Bull. Earthq. Res. Inst., **44**, 351-361.
- ICHIKAWA, M., 1971, Reanalyses of Mechanism of Earthquakes which Occurred in and near Japan and Statistical Studies on Nodal Plane Solutions Obtained, 1926-1968, Geophys. Mag., **35**, 207-273.
- 飯田汲事・志知竜一・松浦 宏, 1969, 犬山における地殻変動の連続観測, 測地学会誌, **14**, 144-155.
- 飯田汲事・志知竜一, 1970, 根尾谷断層南部地域犬山付近の水準測量による地殻変動, 地震予知連絡会会報, **3**, 53-55.
- 気象庁, 1966, 日本付近の主要地震の表 (1957 年~1962 年), 地震月報, 別冊 2.
- 気象庁, 1968, 日本付近の主要地震の表 (1963 年~1967 年), 地震月報, 別冊 3.
- 国土地理院, 1967, 松代地震に伴う測地測量報告書, 第 3 報.
- 国土地理院測地部, 1971, 三浦半島における水準測量による傾斜測定 (1), 地震予知連絡会会報, **6**, 53-55.
- 森本良平・村井 勇・松田時彦・中村一明・恒石幸正・吉田鎮男, 1966, 松代群発地震地域とその周辺地方の地質, 地震研究所彙報, **44**, 423-445.
- 長野県地学会, 1962, 長野県地質図.
- OHTAKE, M., 1970, Micro-structure of the Seismic Sequence Related to a Moderate Earthquake, Bull. Earthq. Res. Inst., **48**, 1053-1067.
- 小沢泉夫, 1967, 地殻変動の連続観測, 地震 **2**, 20 巻記念特集号, 228-230.
- PRESS, F., 1965, Displacements, Strains, and Tilts at Teleseismic Distances, J. Geophys. Res., **70**, 2395-2412.