

地震活動に関係した地殻変動 (6)

——中部地方北西部の地震活動と神岡で観測された地殻変動——

田中 豊・加藤正明・小泉 誠

CRUSTAL MOVEMENTS RELATED TO THE SEISMIC ACTIVITY IN A RESTRICTED AREA (6)

——Relation between the Seismic Activity
in the Northwestern Part of the Chubu District
and the Crustal Movements Observed
at the Kamioka Station——

By *Yutaka* TANAKA, *Masaaki* KATO and *Makoto* KOIZUMI

Synopsis

A sequence of shallow earthquakes alternated around 1959 in the Chubu district. Coincidentally, at the Ogoya observation station, the rate of ground tilts in the direction of the tectonic force changed and the mode of the anomalous variation of ground tilts accompanied by the individual earthquakes also changed.

A similar phenomenon was found in the mode of tilt variations at the Kamioka observation station. It was confirmed that the change in the rate of gradual ground tilts appeared in the direction of N45°W-S45°E from the fact that the acceleration of gradual tilting movements accumulate in this direction. It is a remarkable fact that this direction closely coincides with that of Ogoya (N25°W-S25°E).

On the contrary, it has been ascertained that the tilt variation as see-saw motion corresponding to three active stages in the Kitamino earthquake series appears in the direction parallel to the Atotsugawa fault (N60°E-S60°W). In other words, it may be imagined that a see-saw motion with the shorter period superposes on the gradual movements in the direction of N45°W-S45°E.

1. 緒 言

中部地方北西部の地震活動、とくに浅発地震の系列転換と尾小屋で観測された地殻変動の関係については、「地震活動に関係した地殻変動(4)」¹⁾で詳しく述べた。神岡観測室は、尾小屋の解析の際対象とした地震活動域と全く同じであり、地殻変動区としても同じ域内に入るものと考えられるから、本論文では、この地域の地震活動について、さらに検討を加えるとともに、地殻変動に関しても神岡の観測を中心とし、尾小屋の結果とも対比して述べることにする。

観測室は神岡鉦山の坑内にあり、理学部地球物理学教室の故西村英一教授と細山謙之輔助手(現水沢緯度観測所)により1952年に観測が開始された。その後1956年に現在の坑道に移設され、やがて1957年からはじまった第3回地球観測年に際しては、同年8月より一戸式重力計が併設され、この観測は1961年春まで続けられた。1958年防災研究所地かく変動部門の設置と共に観測はその管理下におかれた。以後観測はきわめて順調に継続されたが、1966年2月にいたり、観測室への途中坑道の拡巾作業など鉦山の事情により観測を中止することになった。一方神岡の南東(9 km)上宝村に防災研究所上宝地殻変動観測所が設置され、1966年秋から観測が開始されたので、神岡観測室は同所の衛星観測点としてますます重要性をおび

て、1968 年観測再開以後は上宝観測所の管轄下にある。本論文では、したがって 1966 年までの結果を取扱うことになる。なお神岡の永年傾斜変動については細山の報告があり²⁾、また北美濃地震前後および神岡周辺の地震に伴う異常変動についてはすでに 2, 3 の簡単な報告がある^{3), 4), 5)}。しかし神岡だけの問題を取上げたのは今回が最初である。

なお、毎週 1 回の記録の取替、計器の調整は、設置以来現在も三井金属鉱業株式会社神岡鉱業所の御厚意により実施されている。

2. 観測室・観測器械・観測精度

神岡観測室は、岐阜県吉城郡神岡町神岡鉱業所柄洞坑の坑道にあり、坑口から -370 m の level (海拔

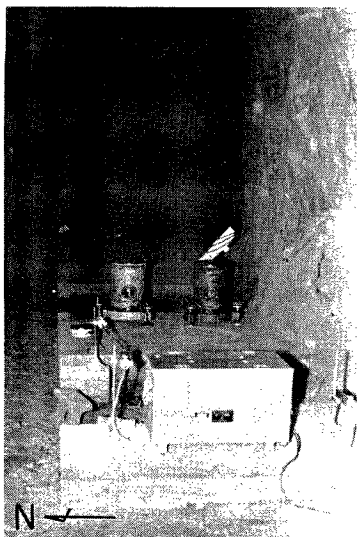


Photo. 1 Observational room in the adit of Tochibana Deposits, the Kamioka mine (Kamioka II).

約 480 m) に位置している。1952 年観測開始時の観測室を KAMIOKA I とし、1956 年移設後を KAMIOKA II として Fig. 1 と Table 1 に示してある。現在の観測室から 170 m 以内に水平坑道はないが、観測室の南西斜上方約 100 m に北西-南東向きに坑道が一本通っている。また約 150 m 離れて 16 号坑井が、さらに 30 m 先に 18 号坑井があって、1964 年 6 月 25 日ここから土砂が流出したことがあが、しかし観測には支障なく、影響もなかったものと考えられる。現在までその外にも採鉱、坑道の掘削などによる異常変化が認められた例はない。しかし坑道は地表面下 400 m にあるため岩圧による坑道の一方的変形がかなり大きい。この坑道の変形が徐々に減少しているのか一定であるかは、今のところ判断できないが(後出)、坑道の変形速度が異常に変ることは今のところ考えられないので地殻変動の観測には支障はない。坑内温度は 12°C で年間一定して変動なく、もちろん降雨の影響も全くない。感度は尾小屋に比べてかなり高く、坑道の一定変形量は尾小屋とあまり変わらないくらい大きいので、記録上の drift は大きい。観測精度は尾小屋と同じ程度であるが、感度が高く、記録紙の送り速度が早いので、短時間の変動に対する精度も良い。傾斜計両成分とも平均精度は、

0.03"/day, 0.05"/week, 0.3"/month, 1"/year

程度である。記録紙の送り速度は、1961 年 5 月までは 1.6mm/hour、以後は 4mm/hour (1968 年以後は 3mm/hour) である (Photo. 2 参照)。

観測器械の種類と感度は Table 2 に、その配置と坑道周辺の地質構造は Fig. 2 に示してある。

3. 神岡付近の地質構造

計器を設置してある神岡鉱山付近はいわゆる飛騨変成帯であって、古生代末から中生代初めの広域変成作用によってできた片麻岩からなる。その外側周辺部は、この変成作用に続いて起った深成作用によると考えられる花崗岩類の併入地帯があるが、北部から北西部にかけてはジュラ紀末から中部白亜紀にかけて堆積した手取層群があり、下部白亜紀の衝上運動により基盤の片麻岩、花崗岩がこの層群の上に乗ったとされている。この衝上運動に関連して多くの断層、裂かが発達し、白亜紀末の火成活動により岩脈の貫入と鉱床の生成が行なわれた⁶⁾。傾斜計が設置されている柄洞坑付近には NNE-SSW 系の鹿間谷断層とこれと約 70~80° の角をなす前平断層 (NW-SE) がある。これらのことから考えれば、当時の主応力方向は現在よりも南北方向に近かったと推定される。現観測室の北東約 6 km および 10 km には N60°E-S60°W の走向をもつ跡津川 (または跡津) 断層および茂住谷断層などがある。跡津川断層は松田による詳細な報告⁷⁾ があって、

Table 1 Position of observational rooms.

	Latitude	Longitude	Height	Depth	Geol.	Epoch of observation
Kamioka I	36°21'01''	137°18'59''	483m	550m	Gneiss	Dec. 1952~May 1956
Kamioka II	36°20'54''	137°19'08''	484m	400m	Gneiss	June 1956~Mar. 1966 1968 resumption

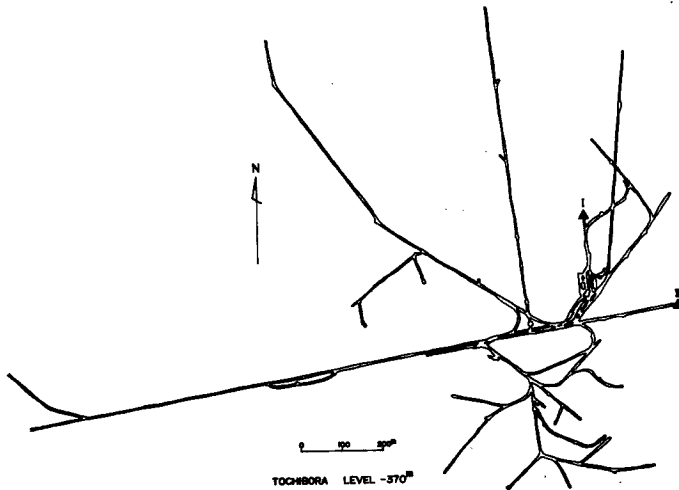


Fig. 1 Underground map of level -370 m in Tochibora Deposits (supplied by the Kamioka mine) and position of the observational rooms.

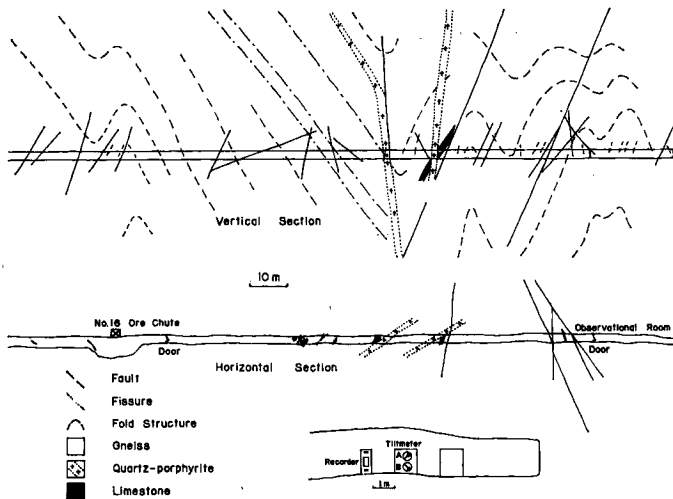


Fig. 2 Geological structure near the observational room (KAMIOKA II) shown on vertical and horizontal sections (supplied by the Kamioka mine) and arrangement of observational instruments.

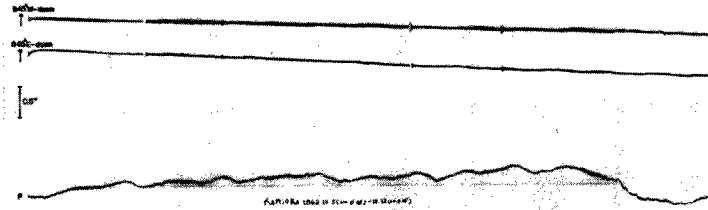


Photo. 2 Record of ground tilts observed at Kamioka II.

Table 2 Observational Instruments.

	Type of Instrument	Dirac. obs.	Sensitivity "/mm	Opt. dist. cm	Period sec	Epoch obs.
I	Super-invar tiltmeter of horizontal pendulum type	A : N45° E - S 45° W	0.030	180	20	Dec. 1952
		B : S 45° E - N45° W	0.030	180	20	~May 1956
II		A : S 45° E - N45° W	0.016	180	27	June 1956
		B : S 45° W - N45° E	0.016	185	27	~Mar. 1966 1968 reset

A級の右ずれ活断層であることが明らかにされている。最近 1000 年間の平均変位は年間 1 ~ 数 mm と計算されているが、地形変化などから数 m ないし数 10 m 以下を単位とする小刻みの変化を繰返して来たと推定されており、1858 年の飛騨地震ではこの断層線上に何らかの動きがあった可能性が濃いと考えられている。その他の地球物理学的な関連現象に関しては尾小屋に関する前の論文を参照して頂きたい。

4. 神岡で観測された永年傾斜変動

観測結果を Fig. 4 に示す。観測方位は S45°W と S45°E 方向であり、S60°W, S30°E, S, E 方向は合成された傾斜 Vector を分解して、各方位について変化の mode の違いを示したものである。1956 年以前と以後で drift の方向が異なるのは、1956 年 5 月に KAMIOKA I から II へ移設されたからである。いずれの場合も移設後器械および器械台が安定するまでに約 8 か月を要しているようである。また 1957 年 8 月には重力計設置のため少し位置を移動した。なお 1964 年 6 月から N30°W 方向に傾斜量が増していることがわかる。これははじめ、新潟地震の時期と一致していたため、その影響かと疑われたが、その直後先にのべた 150 m はなれた坑井からの土砂流出との報告を受けた。しかしその量はたいしたものではなく、結局、6 月からはじまったこの地域の地震活動によるものと判断された。このことは後に述べる。また S60°W 方向の成分には、いくつかの波があるがこの図は縮率が大きいので明瞭ではない。Fig. 5 (a), (b) は傾斜 Vector 図を示したものである。観測室によって観測された一方向の変形方向が非常に異なることがわかる。移設前の一方向の変形は S75°~80°W の方向であり、移設後は N20°W の方向であって量はいずれも月 5'' 程度である。Fig. 1 と比較すればわかるように、この変化は坑道の延長方向に対してほぼ直角である。これは坑道の変形の一つのあらわれであると考えられる。また Photo. 1 に見られるように器械台が南の側壁にとりつけられている。このことも器械台の変形に影響を与えているかも知れない。器械台の配置、構造は両観測室とも同じである。

Fig. 6 は各月の総傾斜量 (φ_t) と最大傾斜方向 (θ_t) の変化を示したもので、比較のため下に尾小屋の場合を再掲した。両観測室における最大傾斜方向の変化の様子が非常によく似ていることに注目したい。1956 年

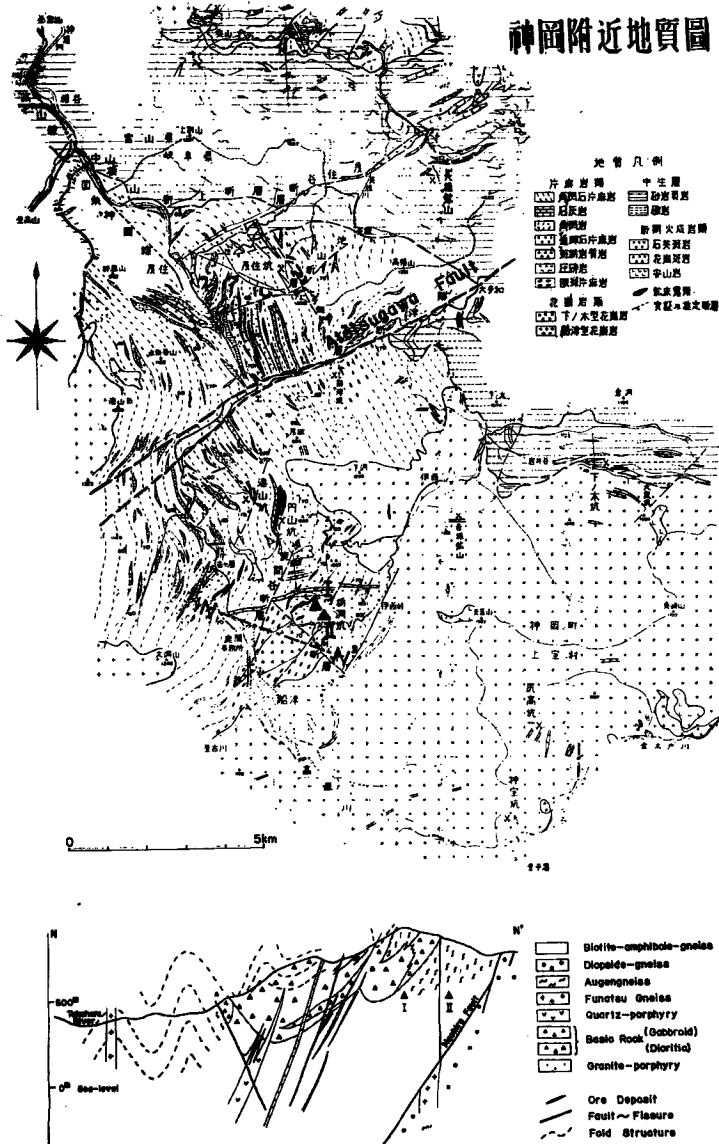


Fig. 3 Geological map and cross section of the Kamioka mine and the surrounding neighborhood, supplied by the Kamioka mine.

以前は観測室が異っているので、図の上では、方位も回転方向も逆のように見えるが、6節で述べるように、1957年の傾向に連続的につながるものである。このことは尾小屋の場合と全く同じである。神岡における1953年および56年中の大きな変化は、先にのべた設置直後の影響である。神岡における総傾斜量は1959年から1963年までほぼ一定の率で減少して以後再び増加している。一般に地下深部の岩圧の大きい坑道では掘削直後の大きな変形がおさまれば、以後はほぼ一定のCreep速度で変形が続くものと考えられ、数年で速度が半減するとは想像されない。やはり一定速度(4~5"/month)の変形の上に、その量を減少させるような逆方向の変形が加わり、1964年頃から再びこれが逆転したと考えた方がよさそうである。特に1959

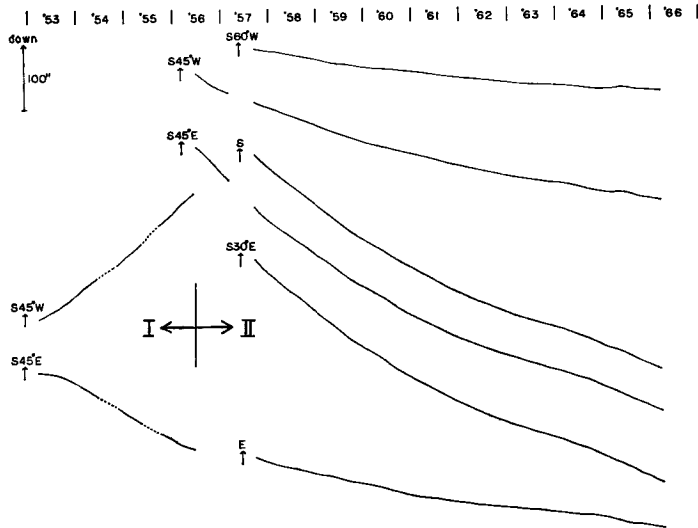


Fig. 4 Secular ground tilts observed at Kamioka I and II ($S45^{\circ}W$, $S45^{\circ}E$). $S60^{\circ}W$ and $S30^{\circ}E$ components are in the direction parallel and perpendicular to the Atotsugawa fault respectively.

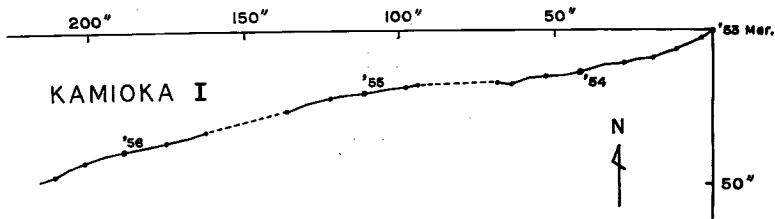


Fig. 5 (a) Vector diagram of ground tilt observed at Kamioka I.

年末から減少が目立ってきているのは、地震活動の転換期と一致し、また尾小屋の場合とも一致する。おなここで注意したいのは、最大傾斜方向変化は、傾斜 Vector を描いた時の見かけ上のものであって、坑道の変形などのように、ある一定方向に一定速度の変化が進行している場合、実際の地面の傾斜方向を示さないことである。それ故この図からどの方向に地面が傾いたかということは Creep 的変形による傾斜量の補正がなければならない¹⁾。

5. 神岡で観測された最大傾斜方向の変化と地震活動

中部地方北西部では 1959 年 9 月頃から地震活動域が移動し、根尾谷断層系に沿う福井・大聖寺地震系列から、活動域が飛騨地方にまで拡がった北美濃・越前岬地震系列に変わったと推定される。その推定の根拠は地震による energy の解放の時間的変化の状態と発震機構や震央分布の状態の違い、および 1900 年頃にも非常に似たようなことが起っているということであった。そしてこの系列の転換期に尾小屋では $N25^{\circ}W$ 方向の傾斜変化速度が大きく変わり、また個々の地震に伴う地殻変動の様式も変わったということ述べた¹⁾。

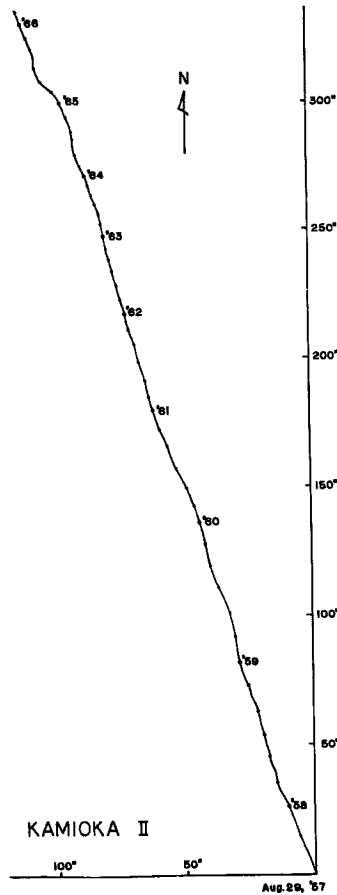


Fig. 5 (b) Vector diagram of ground tilt observed at Kamioka II.

その際すでに神岡でも同様の事実が認められることを示した。本論文では、その推論をさらに進めることにする。Fig. 6 において、1959年9月頃、最大傾斜方向が、神岡でも、尾小屋と同様に変っていることは明瞭である。その変わり方が尾小屋に比べて小さいのは、神岡が尾小屋にくらべて福井・大聖寺地震系の活動域より遠いためであると考えている。前の論文では、北美濃・越前岬系列に転換して以後、最大傾斜方向の変化はなく、観測と解析上のある誤差の範囲内で、ほぼ一定していると考えていたのであるが、神岡では、全体としてほぼ一定であるが、大約1年半位の周期で振動していることがはっきりとわかる。そこで尾小屋の場合を再検討したところ、ほとんど同じ傾向をもって同様な振動をしていることがわかった。しかも非常に興味あることは、北美濃地震、越前岬沖地震と、1964年6月からやや活発化した岐阜県北部の地震群が、この振動の谷あるいはそれより1, 2カ月遅れて発生していることである。このことは尾小屋の論文では単に福井地震系列では θ_i が平均より北西側に、北美濃地震系列では東側にとび出したと表現したのであるが、むしろ θ_i の振動の頂点で地震が発生するといった方が良いと思われる。このような現象は、日向灘地震の際の槇峰の観測結果にも現われている。なお61年12月と64年6月の地震は神岡からそれぞれ40 km, 20 kmの地点に発生したため平均から大きく乱れ、個々の地震に直接伴った地殻変動が観測されたものと解釈されるが、 θ_i の1年半位の周期の振動はこの地域の地震活動に伴った、むしろ弾性変形的なもの

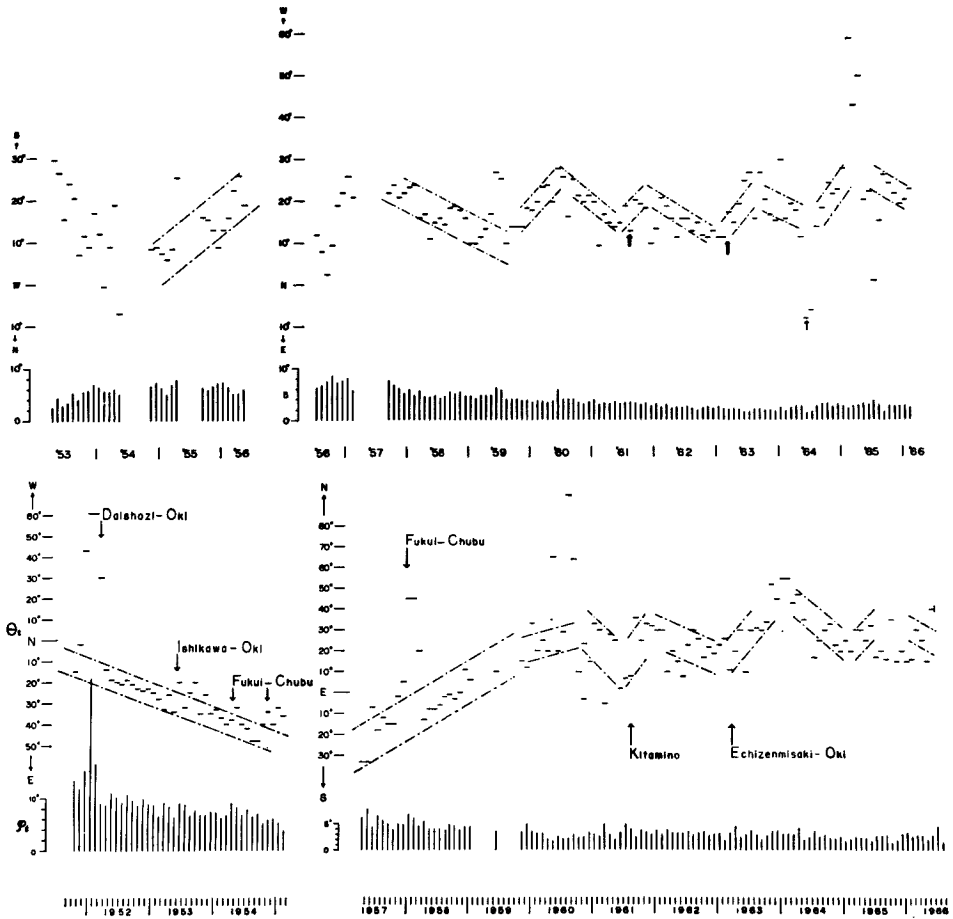
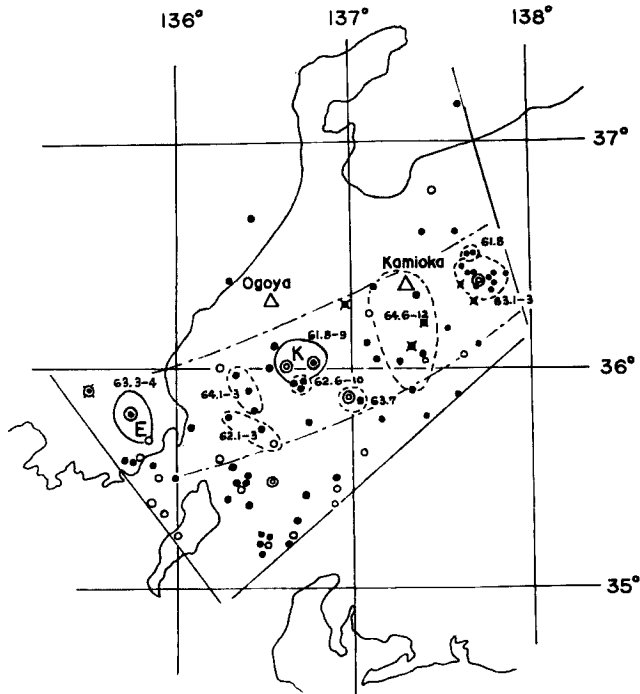


Fig. 6 Variation of direction (θ_t) and change of total amount (ϕ_t) of ground tilts per one month at Kamioka (Upper) and Ogoya (Lower).

と解釈している。北美濃地震系列に入ってから地震の震央分布を Fig. 7 に示す。実線の楕円は北美濃地震・越前岬沖地震の余震域であり、点線の楕円は添字に示す期間に活発化した地震活動域または地震の group を示している。第 1 の谷では北美濃地震、第 2 の谷の直前では神岡の東方、焼岳付近の地震活動があり、すぐそれに引続いて越前岬沖地震が発生している。神岡付近では 1964 年 6 月から 12 月にかけてやや頻発し、第 3 の group をなしているように思われる。このようにして、この系列の地震の頻発地帯は一つの帯を形成し、その帯は飛騨変成帯とその南の古生層の境界線とほぼ一致することは極めて興味深い。その他の議論については、尾小屋の場合にすべてに述べたことと重複するので割愛する。

6. 傾斜変化の加速度の方向

Fig. 8 は尾小屋および神岡で観測された傾斜変化の毎月の傾斜 Vector の始点を原点に重ね、終点を点で示したものである。連続する月の傾斜ベクトルの先端を結べばその直線がその間の加速度を示すわけであるが、ここではむしろ平均的な加速度の方向を求めるために、点のばらつきの伸びている方向を考える。点が



1959 (Sept.) ~ 1966 (Feb.)

Fig. 7 Distribution of epicenters of the earthquakes occurred in the northwestern part of the Chubu district (Sep. 1959~Feb. 1966).

Solid ellipse: Aftershock area

E: Echiznmisaki-Oki Earthquake (Mar. 27, 1963)

K: Kitamino Earthquake (Aug. 19, 1961)

Dotted ellipse: Seismically active region

The dates indicate the dulation of seismic activity.

一直線上に乗れば加速度の方向は一定として決まるのであるが実際はかなりの巾がある。これは観測・解析上の誤差もあると考えられるが、個々の地震に伴った変動のため、Fig. 7にもあらわれているような平均からのとび出しと同じく、地震時の異常も含まれている。そこでFig. 6であらわした平均の θ_i と φ_i から別に平均の加速度を求めたのがFig. 8中の直線である。Ogoya IとII, Kamioka IとIIはそれぞれ別の観測室であって坑道を異にすることはすでに述べた。それぞれの観測室は、その場所の固有の条件によって一定のdrift的変形(傾斜変化)があり、量も方向も異なる。つまり平均的な傾斜速度(月毎の傾斜Vector)が異なるから観測室によってベクトルの先端を示す点の分布場所が全く異なる。逆に言えば、密集した点の中心が平均的なdrift的傾動の量である。あるいは、点がほぼ直線的に並ぶならば、その直線に対して原点からの垂線が一定なdriftの方向と量を示すと考えても良い。もし坑道の変形速度がほとんど一定であると考えれば、外力が新しく加わらない限りは、Vectorの先端は常に一点に集中するはずである。Vectorの先端がある直線上に乗るとすれば、その方向に外力が加わったものと考えて良いであろう。観測室近辺に何ら人為的な擾乱がない限りは、この力はTectonic Forceの変化分(応力変化)に対応するものと考えられる。ここで尾小屋においても神岡においても、たとえ観測室の位置が変わっても加速度の加わる方向は変わらないということがFig. 8からよく判る。おそらくこの方向が地殻の主応力の方向を示しているであろう。この

方向は尾小屋においては、 $N20^{\circ}W-S20^{\circ}E$ 、神岡では $N45^{\circ}\sim 65^{\circ}W-S45^{\circ}\sim 65^{\circ}E$ であって、この地域の地震の発震機構から推定される主応力の方向や、三角測量の結果から計算された歪主軸の方向と非常によく一致する¹⁾。なお、北美濃系列に入ってからの変動的な変化は前節でも述べた通りであるが、Fig. 8 でもわかるように、神岡では 1959 年 9 月以来年間 $0.5''$ の割合で月総傾斜量が減少し、1963 年中頃まで続いている。これはこの地域の北美濃地震系列全般を通じての変動であると考えられるので(前出)、年間 $0.5''$ で $N20^{\circ}W$ 方向の緩慢な地殻運動であるとしてその分を補正すると、60 年 6 月以降 64 年 5 月までの振動的な動きの方向は $N60^{\circ}E$ 方向の振動 (see-saw 運動) であることがわかる。すなわち、Fig. 8 の 59 年 9 月以降の蛇行状の動きは $N45^{\circ}W$ 方向の単調な運動と $N60^{\circ}E$ 方向の振動的な運動の 2 つに分けることが出来る。この $N60^{\circ}E$ 方向の運動は 61 年 8 月の北美濃地震、63 年 3 月の越前岬沖地震、64 年 6 月の神岡付近の地震活動の 3 つの頂点で、 $N60^{\circ}E$ 方向の加速度が $S60^{\circ}W$ 方向の加速度に逆転したことを示している。この $N60^{\circ}E$ 方向というのは跡津川断層の走向と一致することから、地震系列に関係した緩慢な地殻運動 ($N45^{\circ}W-S45^{\circ}E$ 方向) の上に、その系列に含まれる個々の地震または地震群に対応した $N60^{\circ}E$ 方向の運動が重なっていて、後者は活断層の影響を受けている、あるいは活断層の運動をある程度反映していると考えて、良いかも知れない。

7. 結 語

本論文は前回の尾小屋の論文の議論をさらに前進させたもので、結果として先の論文の結論を全く支持するものである。今回は特に各観測室に及ぼす Tectonic Force の方向 (主応力軸の方向) を地殻変動の連続観

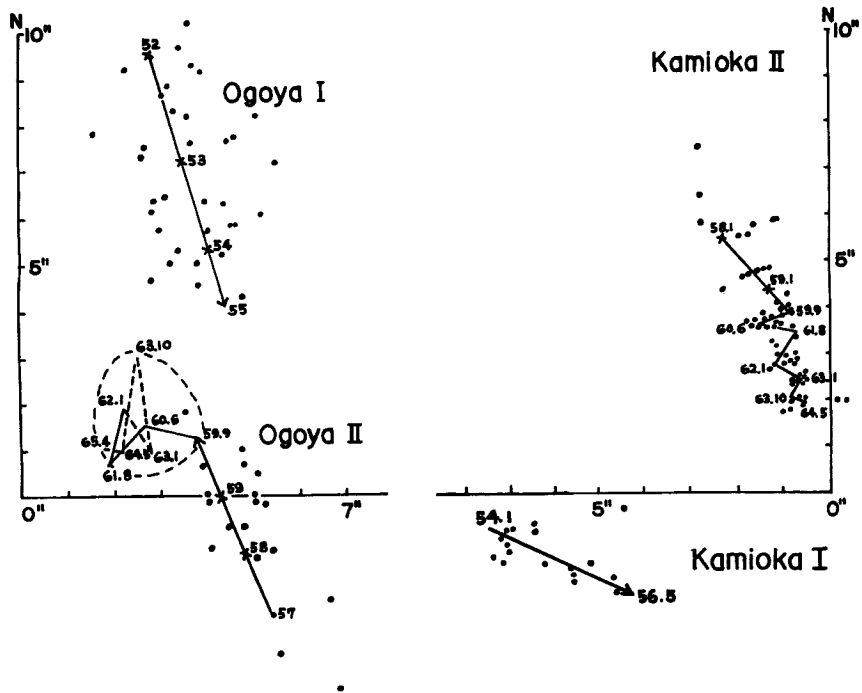


Fig. 8 Distribution of end point of velocity vector of the ground tilts per a month at Kamioka and Ogoya. Straight lines show the mean direction of acceleration in tilt variation of the ground.

測の結果から推定し、その結果が、観測室が異なり傾斜 Vector が一見全く矛盾するような結果をしていても、傾斜変化加速度という考え方をもちみれば、きわめてよく一致するし、中部地方北西部では尾小屋と神岡のように観測室が 100 km も離れていても、その方向はほとんど変わらず、三角測量や地震発震機構や地質学地形学上から得られている結果とよく一致することを示した。以後の観測は現在上宝地殻変動観測所の衛星観測点として継続されている。今回の解析結果が今後のこの地域の地殻変動研究上の基礎資料となれば幸いである。

終りに当って、1952 年以來、地殻変動の観測に変わぬ御援助を賜わっている三井金属鉱業株式会社神岡鉱業所所長御一同に感謝の意を表わしたい。とくに實際上の観測にたずさわって頂いた栃洞坑の代々の坑長殿並びに探査係技術係の御助力と御厚意に対し、この機会に厚く御礼を申し上げる。この論文作成に当っては、栃洞坑南光宣和氏、長田信夫氏、池田秋津氏にお世話になり、資料を整えて頂いた。合わせて謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 田中 豊・加藤正明・小泉 誠：地震活動に関係した地殻変動(4) —中部地方北西部の地震活動と尾小屋で観測された地殻変動—, 京都大学防災研究所年報, 第 12 号 A, 昭 44. 3, pp. 155-170.
- 2) Hosoyama, K.: On the observation of secular phenomena of the tilting motion of the ground, Memoirs College Sci., Univ. Kyoto, Ser. A, Vol. XXVIII, No. 3, 1957, pp. 253-282.
- 3) 西村英一・田中 豊・田中寅夫：最近の地震に伴う地殻の異常変動について（第一報）, 京都大学防災研究所年報第 5 号 A, 昭 17. 3, pp. 28-43.
- 4) 田中 豊：地震に伴う地殻異常変動の諸段階について, 京都大学防災研究所年報, 第 8 号, 昭 40. 3, pp. 91-108.
- 5) Nishimura, E. and Y. Tanaka: On peculiar mode of secular ground-tilting connected with a sequence of earthquakes in some restricted areas, Special Contrib., Geophys. Inst., Kyoto Univ., No. 2, 1963, pp. 173-186.
- 6) 東 尚士：神岡鉱山栃洞坑, 日本鉱業会誌 Vol. 83, No. 956, 昭 42. 12, pp. 1800-1808.
- 7) 松田時彦：跡津川断層の横ずれ変位, 東京大学地震研究所彙報, 第 44 号, 昭 41., pp. 1179-1212.
- 8) 田中 豊：多重反射方式による地殻変動の連続観測序報, 京都大学防災研究所年報, 第 11 号 A, 昭 43.3, pp. 35-52.