

地震活動に関係した地殻変動 (7)

—— 羽越地方の地震活動と赤谷で観測された地殻変動 ——

田中 豊・小泉 誠・細 善信・加藤正明

CRUSTAL MOVEMENTS RELATED TO THE SEISMIC ACTIVITY IN A RESTRICTED AREA (7)

—— Relation between the Seismic Activity in the Uetsu District and the Crustal Movements observed at the Akatani Station ——

By Yutaka TANAKA, Makoto KOIZUMI, Yoshinobu HOSO and Masaaki KATO

Synopsis

The observation in the Akatani Mine has started in the year after the Niigata Earthquake, and a peculiar phenomenon on tiltgrams has been found in these seven years up to 1973.

Only in a certain period in a year, namely between June and November, unusual tilting changes lasting for a few hours were often shown up in the past obtained data.

The phenomenon seems as a result of development of a fissure occurred in the rock by a repeating fatigue. It may be caused by periodic increase of thermal stress at around the 10 m depth layer on a year cycle under the horizontal compressive stress state of E-W trend.

1. 結 言

赤谷地殻変動観測室は新潟県新発田市上赤谷の赤谷鉦山（日鉄鉦業株式会社赤谷鉦業所）内の坑道にあり、1964年の新潟大地震の直後この地域の観測強化を目的とし、1965年4月より観測が開始され、現在防災研上宝地殻変動観測所の管理下にある。1973年3月末に事情により観測が休止されたが、開始以来8年間の記録をこの機会に整理したので報告する。この間、新潟地震の余震以外は付近の地震活動は比較的静穏な状態が続いた。それ故地震に関係した地殻の異常変動は特に観測されなかったが、季節によってごく短時間継続する異常な傾動がしばしば認められた。この現象は地震に関係した異常変動の観測には大きな擾乱となるのでその原因を追究した結果、地表下10 mあたりの岩盤あるいは採鉦跡の亀裂の発達によるものではないかとの推定ができた。本論文は観測に関する諸資料の記載とこの異常現象の報告を主として取扱う。

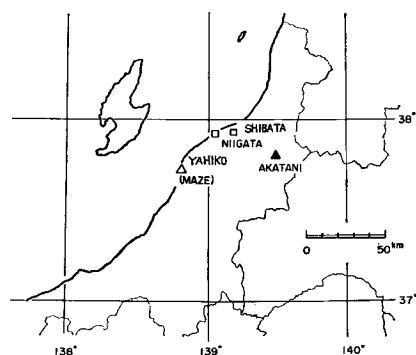


Fig. 1 Location of the Akatani observation station (▲) and the Yahiko (Maze) Crustal Movements Observatory of Earthquake Research Institute (Univ. of Tokyo) (△).

2. 観測室・観測器械・観測精度

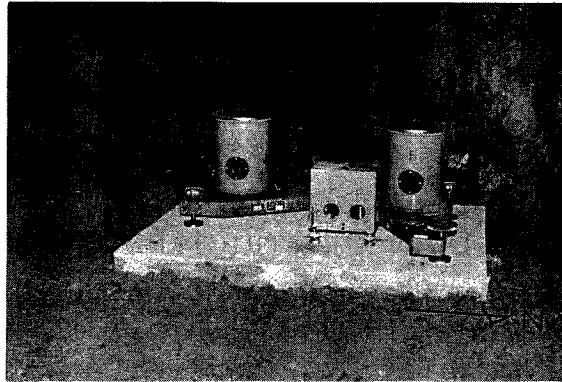


Photo. 1 Observational room in the adit of Bawarizawa Area, the Akatani Mine.

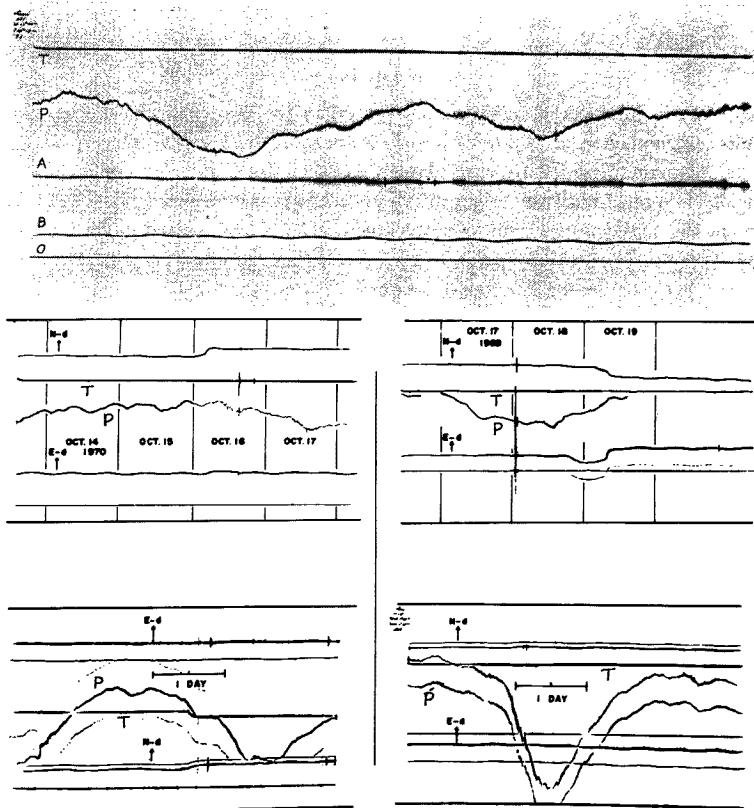


Photo. 2 Record of ground tilts observed at Akatani.

A: N-S component, B: E-W component, P: Air pressure, T: Air temperature
 Middle left: tilt step caused by the Akita earthquake of 1970 and an example of abnormal tilting change, Middle right: an example of abnormal change of ground tilt, Lower left: a case of abnormal change of air temperature in the observational room, Lower right: Air pressure and rainfall do not produce a powerful effect on tiltgram (case of the typhoon No. 34 of 1967)

赤谷観測室は、赤谷鉱山の主鉱床である場割沢地区の385Mレベルの坑道の一つを使用している。地表からの深さは約125 mであるが、場割沢の北面は地形的に急峻で加治川の峡谷となり、地表までの最短距離は約90 mである。計器設置場所は坑口から約180 mで、観測室の約60 m手前には採鉱跡があるが、観測室は探査坑道の一つで約20 m北側に同様の探査坑がある。しかし場割沢鉱床の北西端にあるため上部下部にも採鉱跡はない。現在稼行は約400 m南方のほぼ同じレベルで行なわれており、記録にみられるように非常に安定した観測室であって観測には好適である。滴水もなくかなり乾燥して好条件下にあるが、坑内気温は約10.5°Cで低い。観測点の位置は次のとおりである。

139°29'21''.8 E 37°48'27''.6 N
標高 394 m 深さ 110~120m

計器は水平振子型スーパー・インバー傾斜計2成分が設置してある。感度は光学距離195^{mm}、周期26~27秒で記録紙上1 mmが0.018秒角の傾斜に相当する。測定方位はN7°W-S7°E, N83°E-S83°Wである。なお温度計は1 mmが0.005°C、気圧計は約0.5 mbの変化に相当する。記録の送り速度は3.02 mm/hourである。

赤谷付近は裏日本の豪雪地帯で、12月から3月までは積雪がある。記録には降雨直後の影響はほとんどあらわれない（Photo. 2 参照）。ただN-S成分には3月4月の融雪期と多小の関係がありそうな傾向がみられる。とくに、N-S成分には原因不明で周期の不規則な、数カ月で約1''近くに達するような変化がみられる。これは回復性の変動であるのでより長期の変動の解析には支障はないが、数カ月程度の継続時間をもつ変動を見出す場合には不都合で、検知能力は落ちて、観測の精度¹⁾は次のようになる。

0.02''/day, 0.1''/week, 2''/month, 1''/year

なお、かなりな低気圧の通過に際しても気圧による影響はほとんどあらわれず、ただ坑内に気温変化があればN-S成分が大きく変化する（Photo. 2 参照）。日変化もほとんど認められないが、E-W成分の年変化の振巾は時には1''近くになり、深さのわりには大きく、ほぼ極大の値を示している。²⁾

地球潮汐について1969年11月~12月の1カ月間について解析し、 M_2 の振巾と位相を求めたところ観測値として

E-W 成分 $0.0049'' \cos(2t - 276.1^\circ)$

N-S 成分 $0.0030'' \cos(2t - 181.9^\circ)$

の値を得た。

3. 赤谷付近の地質

観測結果の解析上必要と思われる付近の地質構造および断裂系について、鉱山地質関係の報告^{3), 4)}を引用して参考にしたい。

赤谷鉱山付近は「時代未詳の古生層が広く分布し、これに底盤状に中生代末の花崗閃緑岩が併入しており、これを貫き古第三紀始新世末の花崗岩、さらにこれらを貫き、また被覆している新第三紀中新世の粗粒玄武岩、石英粗面岩などの火成岩類が発達している。古生層は下部より粘板岩、石灰岩、珪岩などからなる厚い累層で、鉱床を胚胎する石灰岩の厚さは場割沢では50~100 mである。この古生層は著しく擾乱をうけて、褶曲、断層が発達している」。観測室はこの基盤の花崗岩と最下部古生層の粘板岩の接触部分にあっており、坑道付近の地質はかなり複雑で、断層、裂かも多い。断層の規模は小さいが数多くみられ、場割沢地区北部の加治川沿いでは、多くの場合花崗閃緑岩体と古生層との接触部付近（観測室付近）に破碎帯が形成されている。また観測室の北約50 mを東西に約150 mにわたって落差30 mの断層が走り、これに沿って鉱体が生産されていて採鉱跡となっている。断層系は著しい順に、1. N80°W~EW, 50~80°N, 2. N30°W~N55°W, 40~90°NE または 45~70°SE, 3. N40°E~N55°E, 60~80°SE または 70°NW, 4. NS系の走向と傾斜をもつ^{3), 4)}。いずれにしても付近の地質はかなり複雑で断層や裂かが多いことに注意しなければならない。

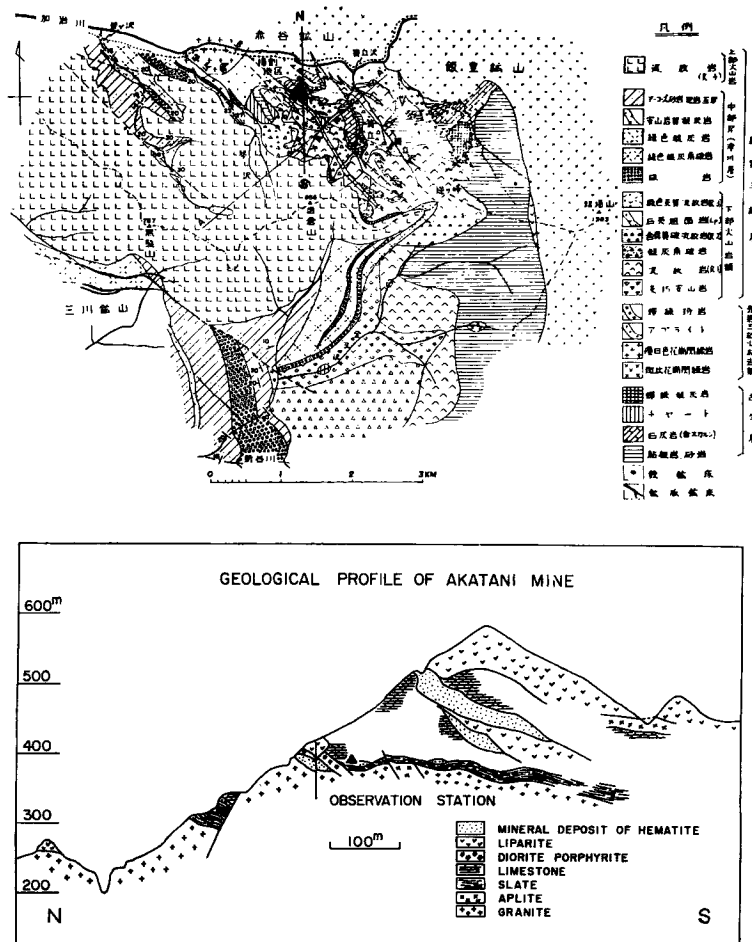


Fig. 2 Geological map and cross section (supplied by the Akatani mine). ▲: observational room.

4. 赤谷で観測された永年傾斜変動

計器設置台や観測室の扉は1964年11月末に完成したが、観測は1965年4月から開始された。観測開始から計器が安定するまでに約半年を要していることは、Fig. 4の永年変化の様子をみればほぼ見当がつくであろう。しかし地山応力によるクリープ変形が大きく、設置後の影響がそれと逆方向であるE-W成分ではこの終了時期が明瞭であるが、計器の配置位置(Fig. 3参照)や永年変化の様子からみても、よりドリフトの小さいN-S成分は、安定しているだけに反って終了期は不明瞭である。しかしもしN-S成分だけに設置直後の影響が長く続いているとすれば、この成分が安定化するまでに数年かかるような減衰度をもつ原因を計器やコンクリート台に求めなければならずむしろ不自然であってやはりFig. 4にそのままあらわれている通り多少変化速度の変わっている傾向のみえる同時期の1965年末頃には両成分ともに設置直後の影響は終わったものとみてよいであろう。坑道のクリープ的変形と思われる等速度の変化は、E-W成分では月に $0.5''$ 、1年に $5\sim 6''$ 程度であると判断される。これは120mの深度では大きすぎる変化量ではない⁵⁾。N-S成分にはほとんどこの種のドリフトはないとみてよい。以上のことはFig. 5のvector図を見ればかなり明

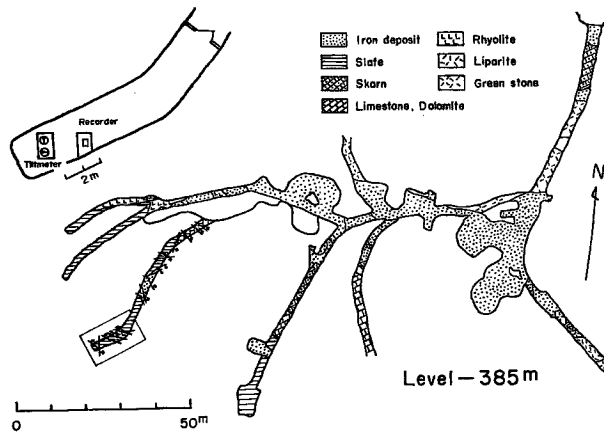


Fig. 3 Geological structure around the observational room and arrangement of instrument (upper Left).

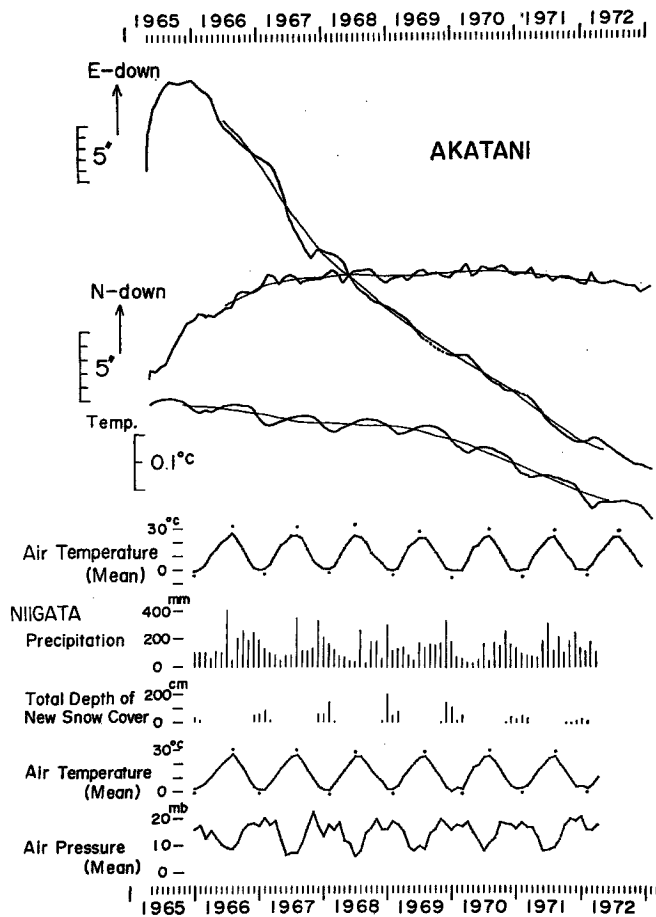


Fig. 4 Secular ground tilt observed at Akatani, air temperature at the mine office and meteorological data at the Niigata local meteorological observatory.

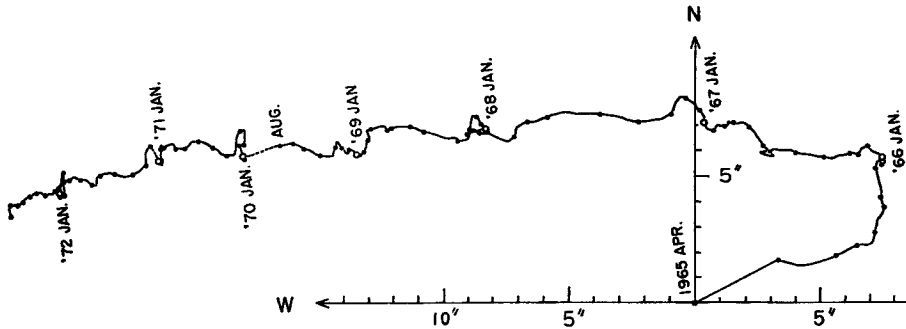


Fig. 5 Vector diagram of ground tilts observed at Akatani.

瞭で、設置後の影響は1965年11月から1966年1月頃までにはおさまっていると考えてよいであろう。

さて、地表面からかなり深部にあるにもかかわらず、観測室内温度に年変化がある。年較差は 0.02°C 位で非常に小さく最高が9、10月、最低が2、3月頃となり、採鉱跡の広い洞穴への坑外空気の流入と観測室外数10mあたりを流れる地下水の流れの影響ではないかと考えられ、この温度影響は坑道のごく床壁面表層部だけに多小の影響を与えている程度とみてよいであろう。しかしE-W方向の年変化は異常に大きく、その原因は次節に述べるようなものであろうが、一見温度が上がれば西へ傾斜して位相は室内温度とよく一致する。だが、 0.01°C の温度変化で $0.5''$ の傾斜変化を生ずることは、器械的にも、コンクリート台の膨張を原因としてみてもありえない量で、温度変化の大きい実験室での実験に際してもあらわれない位大きな量であ

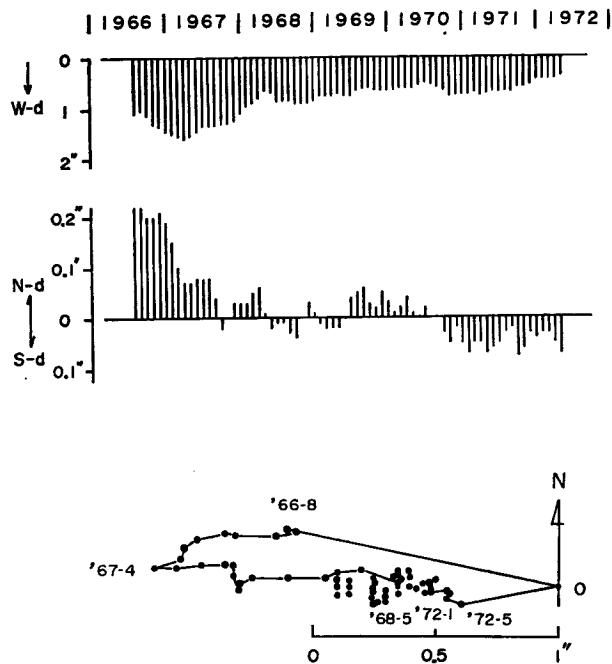


Fig. 6 Upper: change of tilt rate per a month
Lower: vectorial representation of tilt rate per a month

る。一方 N-S 成分には複雑な短周期の変化があらわれていて年変化とは考えられず、この数カ月程度の周期の不明瞭な変化の原因もわからない。また温度が直線的に低下しつつあること、また 1969 年から低下率が大きくなっている原因も坑内の特殊事情によるのか計器上の事であるのかわからない。傾斜変化、温度変化曲線上に重ねた細線は 13 カ月の移動平均値である。その下には鉾山事務所で測定した赤谷の気温と新潟地方気象台で観測された月平均気温・気圧・降水量と新積雪量を併示した（以上 Fig. 4 参照）。

さて、経年変化の様子をさらに詳しく調べるために 1 カ月あたりの傾斜変化量（変化速度）を求めた（Fig. 6）。この図では 1965 年末までは設置後の影響としてあらかじめ除いたものの移動平均をとり、さらに月あたりの傾斜量を計算したので観測期間の前後半年は値が求まっていない。

さて、1967 年のはじめの頃に傾斜速度が変わり、北下がりの成分はほとんどなくなり、南下がりの傾向を見せはじめ、また西下がりに増していた変化もおさまって東下がりの加速度が加わって来た。これは新潟地震の影響がようやくおさまって平常の状態に戻ったためとも推定されるが、それ以前の観測がないのでわからない。1967 年 8 月頃までは赤谷の北西あたりに地震活動が続いたが、以後 1972 年までは比較的静穏であ

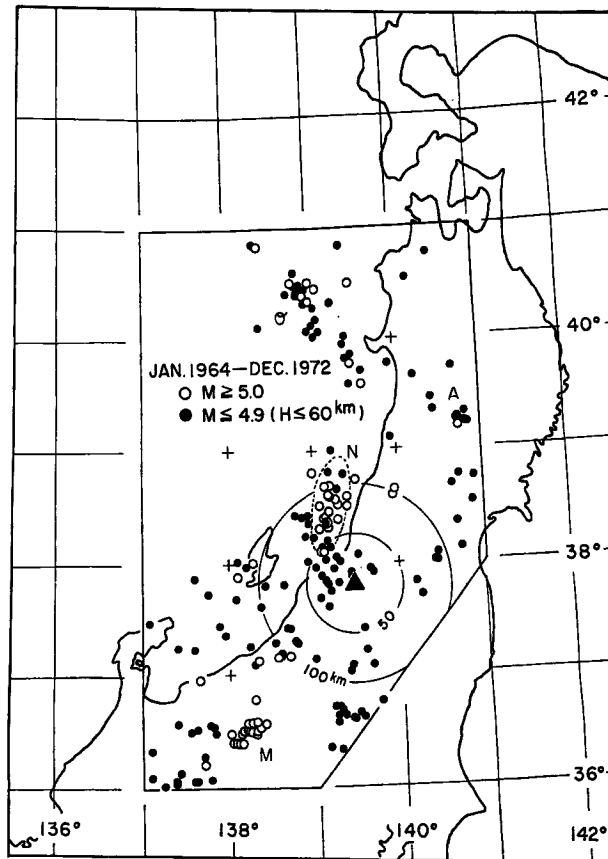


Fig. 7 Distribution of epicenters of the earthquakes occurred in the Uetsu district (Jan., 1964-Dec., 1972).

Dotted ellipse: aftershock area of the Niigata earthquake, O: the Oga earthquake of 1964, A: the Akita earthquake of 1970, M: the Matsuishi earthquake swarm of 1965-1967

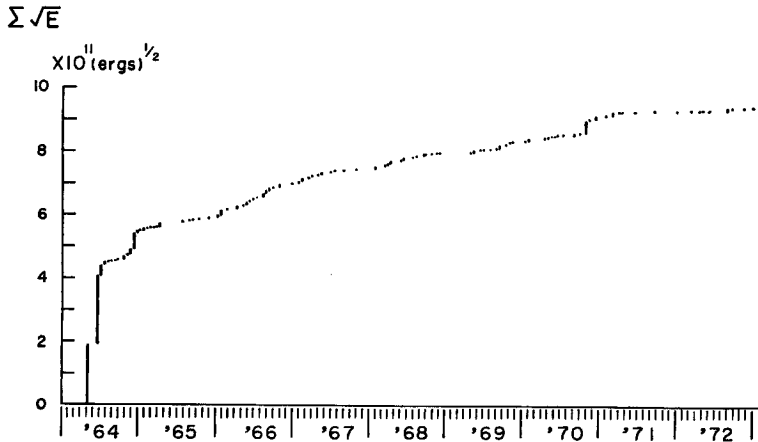


Fig.8 Mode of strain release by shallow earthquakes in the Uetsu district (1964–1972).

ることから、1967年5月頃の大きな加速度の変化はやはり新潟地震の余効の終了と考えてよからう。測地測量からみても新潟地震後の変動は約2年で、ほぼ安定化の傾向をみせているようである。それ以後は赤谷から半径20 km以内にはMagnitude 3以上の地震は発生せず、ただ赤谷のほぼ直下に1968年10月に深さ180 kmのやや深発地震が発生しただけである。西方への傾斜速度は1969年まで減少を続け、1970年から増加をはじめている。1971年から1972年にかけての減少の理由はわからないが、1969年頃に傾斜速度の最低の時期があったと考えられる。間瀬の観測結果では南北成分で1969年頃に北下りの傾動が極値に達しているようにみえる⁷⁾。南北方向の傾斜速度にも変化がみられるが東西方向の1/10程度にすぎない。すなわち、速度変化は主に東西方向に行われている。これはFig. 6下図をみても明らかであって、応力変化によって加速度が変わるとすれば、地殻の主応力方向はほぼ東西であると考えてよからう。1968年5月以後あまり加速度の変化はない。月平均0.6''程度の変化速度はクリープか、あるいは東西性圧縮による等速度の傾動であるかの分離は不可能である。1969–70年頃に傾斜変化速度が変わったことは、西南日本長期変動の一般的傾向と一致し⁸⁾、その方向が東西方向に近いことは、このあたりの三角測量結果から求めた水平ひずみの圧縮軸方向とも一致する⁹⁾。

5. 局部的異常傾動

先に述べたように数カ月程度の回復性的変動があるが、週単位の記録をみると、Photo. 2からもわかるようにかなり安定していて、数時間程度の異常傾動を見出しやすい。赤谷の観測結果には、他の観測所では見られない特徴的な異常傾動があらわれる。これが器械的なものでないことは、ほとんどの場合、N-S, E-Wの両成分に同時にあらわれることから判る。また坑内の温度変化があれば、かなり大きく傾動することはPhoto. 2の例でもみられる通りであるが、温度の変化は全くみられない。この現象は長い場合で約半日、短い場合でも約6時間ほど継続している。発生時期は6月から11月の間に限られ、1966年から1972年までの7年間に16回だけ起っている。その時の記録をFig. 9に示す。この16回の変動のうち8回にこの変動の開始から終了までの間に明瞭な振動がみられるが、残りの8回の場合には、記録紙の感光度や水平振子の固有周期からみて振動がなかったとは言いきれない。なお、1970年10月16日に秋田県南東部に $M=6.2$ の地震が発生し、震央距離は190 kmでE-W成分にtilt stepが認められ、その約半日前に振動を伴った異常変動がみられるが、この地震とは無関係な上記と同類の異常変動と考えられる。この種の異常変動の量はいずれも0.1''から0.3''程度である。傾斜方向は西南西方向が16回のうち11回、北北西方向が3回、あとの2回は東西方向成分だけが特に異常な回復性変動を伴っている。

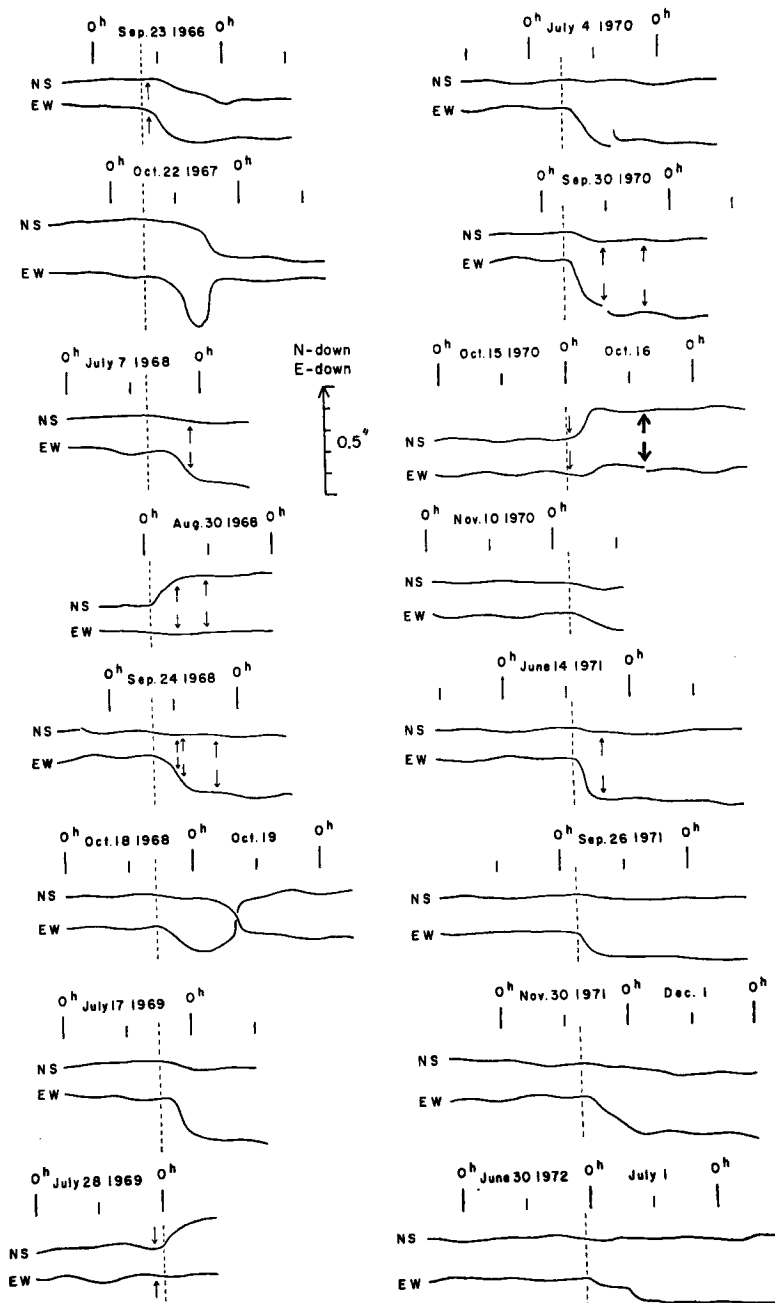


Fig. 9 Unusual tilting changes observed at Akatani.

特に注目すべき点は発生の季節性である。Fig. 10 は永年変化を取り除いたもので、E-W 成分と坑内温度は年変化を示すが、N-S 成分は、融雪期の地下水の影響と思われる変化が 3, 4 頃にあらわれている以外はあまり規則性はみられない。先に述べたように、温度変化の振幅 0.01°C ではとても $1''$ の傾斜変化の原因

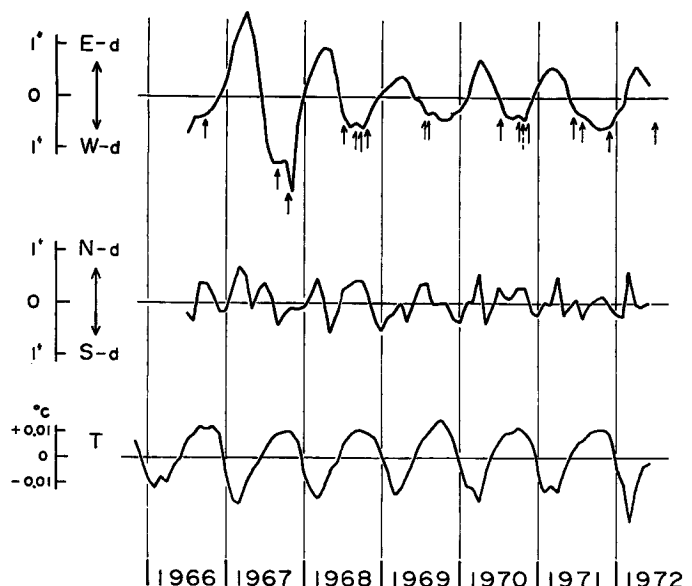


Fig. 10 Annual variations of ground tilt and room temperature. Arrows show the occurrence time of abnormal tilting changes.

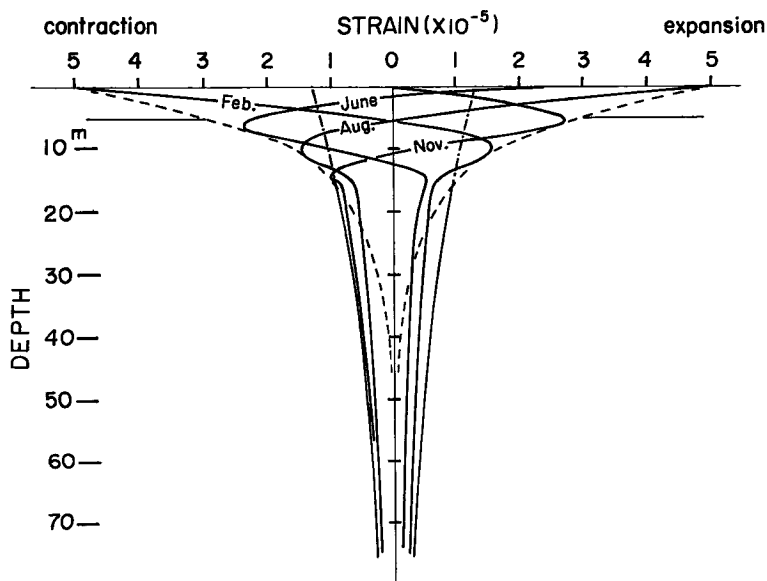


Fig. 11 The dependence of annual variation of ground strain on depth. Dotted and chain lines show the amplitude of ground strain by thermal conduction and thermoelastic stress respectively.

とはならない。位相も温度変化の方が1カ月程度先行しているようである。年傾斜変化の極値が3, 4月, 9, 10月であることも考え合わせてこの大きな傾斜の年変化は熱弾性ひずみによるものであると推定される。年変化の傾斜変化と伸縮変化の位相が一致しているとする、傾斜年変化の極値の3, 4月, 9, 10月には伸びか縮みの極値に相当すると考えてよい。年変化の振巾の深さによる減衰は、15 m 位までは熱伝導による項の $5 \times 10^{-5} e^{-0.27z}$ を、15 m 以深は熱弾性による項 $5 \times 10^{-5} e^{-0.11z}$ の最大値を採用し、また 15 m までは位相は、 $0.52z(\text{month})$ で遅れるが、15 m 以深からは位相の遅れはないものとする、地表面からの深さによるひずみの分布は季節によって Fig. 11 のようになると考えられる²⁾。地表面では2月頃が縮みの極値であるが、深さ5 m までは破碎されていて、ひずみは生じないとすれば、15 m までの深さにおいては6月から11月にかけて縮みの極値となる。また深さによるひずみ変化度は5月と11月がもっとも大きいことになる。

一方、この付近は前節でも述べたように、東西方向の圧縮力が卓越していると考えられる上、地形的にみると北側は急峻な斜面をなして、北北東-南南西方向には地山応力が非常に小さいと考えられる。すなわち、 σ_1 が東西方向に圧倒的に大きく σ_2, σ_3 はかなり小さいと想像される。しかも年変化の振巾は東西方向に大きく、6月~11月間は圧縮力が働いていると考えられ、 $\sigma_1 - \sigma_3$ が最大となり、北西ないし北北西から南東ないし南南東方向と、西南西-東北東方向にずれ応力が最大となる。ところがこの地域ではこの方向の断層や亀裂、節理が発達しているところから、おそらくこの異常変動はこれらの裂かが深さ15~20 m 付近か或いは探鉱跡の鉱柱などで進行するのではないかと考えられる。傾斜方向が最大ずれひずみ方向と一致し、その70%が西南西方向であるのも興味深い。しかし乍ら東西性主応力に加わる年変化の東西性応力が一度にずれの強度を上まわる量になるとは考えられない。恐らくこれは、何10年何1000年あるいはそれ以上の長年月繰返された年変化による岩石の繰返し疲労現象によるものではないかと推定される。以上は単なる推論であるが、異常傾動現象が6月~11月に限り起こること、傾斜方向がほぼ2方向に限られ、量もほぼ一定であり、しばしば振動らしいものを伴うこと、継続時間もほぼ同じであること、この付近は東西性の圧縮応力が働いていて、しかも南北方向に応力がぬけている可能性のあること、年変化が東西に大きいこと、6月11月頃には東西方向に年変化による圧縮力が加わっていると推定されること、地質構造が複雑で断裂系が発達していること、岩石の疲労破壊が考えられることなどを総合すれば、このような現象がありうるのではないかと推定される。

今後の問題として、秋田地震の場合のように、このような現象がたまたま地震による異常現象と取り違え

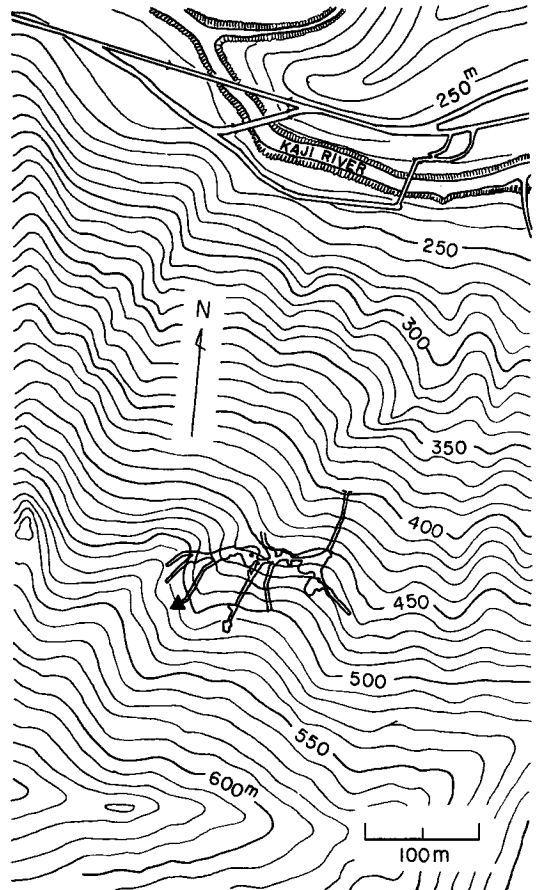


Fig. 12 Topography and the adits of level 385 m around the observational room.

られるおそれがあるため、このような特殊な異常変動については十分な吟味が必要である。

6. 謝 辞

赤谷における8年間の地殻変動観測において、毎週の記録の取替と計器の調整はすべて日鉄鉱業株式会社赤谷鉱業所鉱務課の御厚意によってなされた。鉱業所関係者御一同の御協力に対し深く感謝の意を表する次第である。1973年4月以降やむなく観測を休止したが、未解決の興味ある問題もあり、また観測室の条件も良好であって、今後の成果が期待されるので観測再開が望まれる。なお、異常傾動の問題について御討議下さった防災研究所見野和夫氏に対し合せて謝意を表したい。

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(1)，京都大学防災研究所年報，第10号A，昭42. 3，pp. 123-140.
- 2) 田中 豊：地殻変動の年変化と観測点の深さ，日本測地学会第38回講演会要旨，1972，pp. 18-19.
- 3) 森田 宏：赤谷鉱山の地質と鉱床，とくに場割沢“主”鉱床の構造規制について，鉱山地質，Vol. 10，1960，pp. 338-345.
- 4) 鈴木雄一：赤谷鉱山付近の地質と銅鉱化作用，鉱山地質，Vol. 20，1970，pp. 276-294.
- 5) 田中 豊：地殻変動の永年変化と観測点の深さ，日本測地学会第38回講演会要旨，1972，pp. 20-21.
- 6) 檀原 毅：新潟地震前・時・後の地殻変動，地震予知連絡会会報，IX，昭48. 3，pp. 93-96.
- 7) 弥彦地殻変動観測所：佐渡弥彦地方の地殻変動(概報)，(その2)，(その3)，地震予知連絡会会報，VIII，昭47. 9，pp. 67-74，IX，昭48. 3，pp. 79-85，同 pp. 86-88.
- 8) 田中 豊：地殻変動連続観測—長期変動と地震前駆現象—，地震予知研究シンポジウム，1973. pp. 35-44.
- 9) 原田健久・葛西篤男：最近60年間における日本の地殻の水平歪，測地学会誌，第17巻，1971，pp. 4-7.
- 10) 横山次郎：岩層の塑性力学とその岩盤への応用，材料，第20巻，1971，pp. 111-121.