

地震活動に関係した地殻変動 (1)

——東北日本外帯の地震活動と細倉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 RESTRICTED AREA (1)

——RELATION BETWEEN THE SEISMIC ACTIVITY
IN THE OUTER ZONE OF THE TŌHOKU DISTRICT
AND THE TILTING MOVEMENTS OBSERVED
AT THE HOSOKURA STATION——

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

Synopsis

The present paper is a general report on the long term observation of crustal movements at the Hosokura station in the Tōhoku district, and further, the first of a series of papers in which the relation between the seismic activities and crustal movements in some restricted areas will be presented.

Observational results in the case of the outer zone of the Tōhoku district are as follows: as far as the E-W direction is concerned, the mean velocity of tilting motion of the ground at Hosokura changes coincidentally with the alternations of sequence of shallow earthquakes occurred in the region of Sanrikuoki (Off the eastern coast of the district), and elastic deformations as shown by the see-saw motion superpose on these stepwise motion of secular ground tilt, decreasing its amplitude and shortening its period with time. Earthquake swarms occur near the peaks of the curve showing the see-saw motion. These modes of crustal movements at Hosokura are essentially similar to those of the Makimine station related to the seismic activities in the sea area of Hyūganada.

Besides, an attention is drawn to the plastic deformation caused by a series of very shallow earthquakes originated near Hosokura.

1. 緒 言

地震予知研究計画に基づいて、全国的に、地殻変動観測所は年ごとに増設整備されつつあり、地殻変動の観測も徐々に充実してきている。京都大学防災研究所および理学部地球物理学教室は、日本各地に傾斜計・伸縮計を機会に応じて設置し、すでに古いもので30年近い観測資料があり、多くの研究者により成果が発表されてきている。防災研究所地かく変動部門でも現在国内16カ所で観測を継続中であり、個々の地震に伴なう地殻の異常変動については大地震発生のたびに報告が行われてきた。しかし最近、個々の地震を対象とするのではなく、一連の地震活動とやや長期間の地殻変動の関係を調べて、個々の地震またはそれに関係し

た地殻変動が、一つの系列の地震活動や地殻変動のなかで、どのような位置と役割を果しているかを、系統的に解明しなければ、地震に関係した地殻変動の真の様相を知ることができないことが判り、古い記録を再検討する必要性が生じたため、新しい観点から見なおすことにした。また従来の結果は、その必要に応じて部分的に公表されたものが多く、多数の資料があるにもかかわらず未発表の部分が多い。これを機会に、全観測所の記録を整理し公表するつもりであるが、今回は第一報として細倉観測所の観測結果と、東北日本外帯の地震および地震活動との関係を解析した結果をまとめた。とくに東北地方は、東北大学の秋田地殻変動観測所、水沢緯度観測所の赤金地殻変動観測所が発足し、やがて三陸地殻変動観測所も設立されることになろうが、細倉の長期間の観測結果が、幾分でも参考となれば幸いである。そしてこれら4つの観測所が東北地方のなかでも、それぞれ地体構造の異なるところに配置され、今後の協力による総合的な成果が大いに期待されるわけである。

2. 細倉観測所の沿革

京都大学理学部地球物理学教室では、佐々憲三名誉教授、故西村英一教授などの手で、1937年上賀茂地学観測所に Silica 傾斜計を設置し、長期連続観測を開始して以来、1942年嶺峰鉦山、1943年生野鉦山などで Silica 傾斜計、佐々式伸縮計による観測を相次いで開始した。

細倉鉦山における観測は、恒久的観測として現在も継続している観測所のなかでは第4番目のもので、1943年12月、水平振子型 Silica 傾斜計と佐々式 Super-invar 線伸縮計が、感天区-65M 徳光坑道 (HOSOKURA I) に設置された。折から第2次大戦のさなかであって、観測には幾多の困難が伴ったものと想像される。不幸にして、1945年4月から約4年間、観測は中止されたが、1949年6月、Silica 傾斜計の台に Super-invar 製振子を設置し観測が再開された。1950年には、水銀傾斜計2台が併設されたが、これは1952年2月に撤去された。その後事情により2度の長期欠測があったが1957年2月まで同じ観測室で観測が続行された。この間1951年防災研究所設置にともない、地殻変動の観測事業は漸次防災研究所に移管され、1955年からは「地殻構造および変動観測特別事業」のなかにふくめられ、1958年防災研究所に地かく変動部門が増設されて、観測事業はすべてこの部門で行なわれることになった。1957年2月 -65M 徳光坑道の観

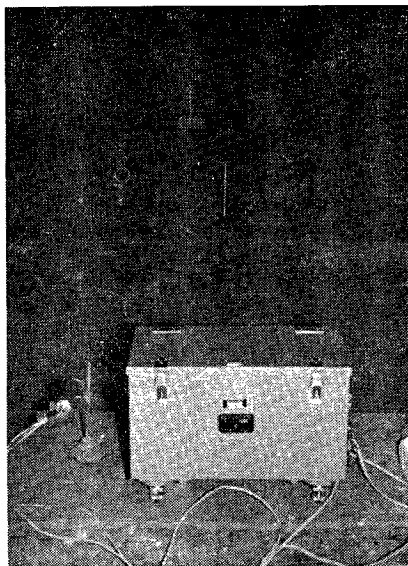


Photo. 1 Observational room in the adit of Shita 3 kō, the Hosokura mine.

測室付近で探鉱作業が開始されて器械は移設されることになり、同年9月には鉱山側の御厚意により下3坑明通立入に観測室の準備となり、翌1958年9月に傾斜計を移設して観測を再開した。1961年2月明通立入坑道の開窄工事と鍾押が行なわれたため、観測は1962年6月まで休止の止むなきに到ったが、傾斜計はそのままの状態で保持され、1962年9月から観測を再開、現在に到っている。なお、1966年5月、赤金鉱山で、水沢緯度観測所のベルギー製水平振子型傾斜計による観測が開始され、地かく変動部門でも、ペルー・チリ両国で国際共同観測に使用しているものと同型の Super-invar 製水平振子型傾斜計と記録装置を、比較観測のため、赤金観測所に併置することになり、その機会に、細倉の観測を赤金の結果と対比するために、記録装置を新型のものに取替え、感度を高め、再整備を行なった。なお、観測器械の調整、記録の取替えなどの常時観測一切は、細倉鉱業所の御厚意により、1943年以来現在も、地質課の手で行なわれている。

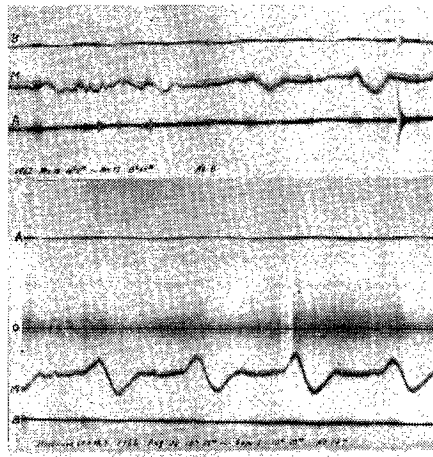


Photo. 2 Records of tiltmeters and variometer of geomagnetic declination.

3. 細倉観測所付近の地殻物理学的諸条件

細倉観測所は、仙台の北方 60 km にある細倉鉱山（宮城県栗原郡鶯沢町）の坑道内にあり、太平洋岸からの距離は、50～60 km である。同鉱山は、鉱脈型鉛・亜鉛鉱床で、その地質は第三紀中新世の緑色凝灰岩類、変朽安山岩類と、鮮新世の石英安山岩質凝灰岩、凝灰質頁岩等からなり、これらが先第三紀の基盤を不整合に被って広く分布している。これらの地質の上に第四紀の新期火山岩類、段丘堆積物が見られる。1957年までの観測室（HOSOKURA I）は、感天区 -65M 徳光坑道にあり、地質は細倉下部層といわれる第三紀緑色凝灰岩である。移設後、現在観測継続中の観測室（HOSOKURA II）は、下3坑明通立入にあり、付近は変朽安山岩よりなる。これは第1図の細倉鉱山周辺地質図（鉱山原図）に見られる通りで、「鉱床周辺の地質は細倉層とこれ貫ぬくと見られる後期変朽安山岩類によって構成されているが、これらの堆積活動および火成活動終了後に基盤のNS性構造の乱れを反映したと考えられるNS系構造運動が起こり、さらに、これを主因とするNS系断層運動によって、NS系構造線を中心として向い合せに、陥ち込み構造を形成している。そして、この運動と同時に鉱脈裂こ系も形成されたい。この裂こ系も、NS系を中心として、NW系（断層系）とNE系（鉱脈系）の割目が、向い合せの陥ち込み構造をしていて、細倉の割目の基本形をなしている。鉱山における断層のほとんどが属しているNW系の断層の大部分は正断層であり、昭光断層のみが、地質を対比すると、逆断層を呈する。これら断層の落差は、昭光断層 100～150 m、瑞兆断層は北部で約 50 m、南で約 50 m の落差を示すいわゆる Pivot fault である。鉱床はいずれも、この断層運動後上昇した鉱液により、形成されたもので、鉱化作用のある時期のものは断層により、0.1～

1.0 m 前後の転移が認められるが、引続き行われた鉱化作用により構成された部分は、転移が認められないことから、おそらく断層運動の末期から鉱化作用が行われ、断層運動終止後も、鉱化作用が継続していたこ

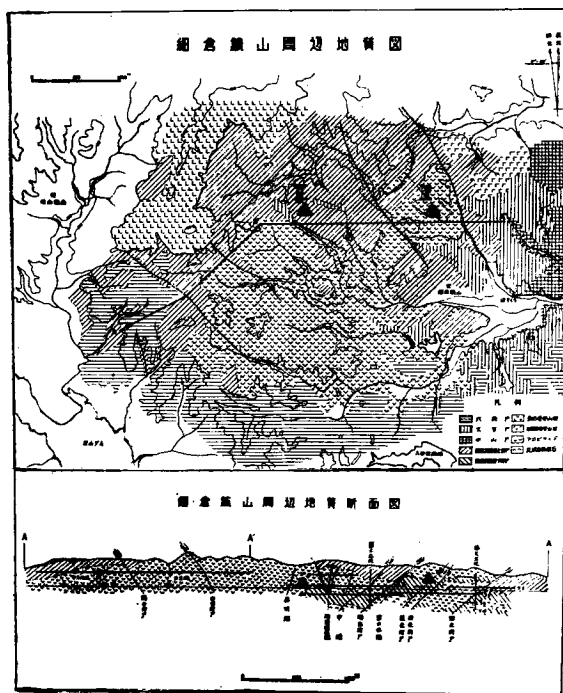


Fig. 1 Geologic map and cross section of the Hosokura mine and neighborhood, supplied by Mitsubishi Mining Co., Ltd.
▲ : observational room.

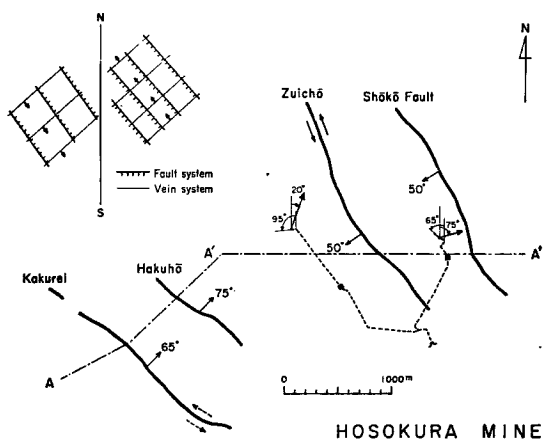


Fig. 2 Master faults of the Hosokura mine.
Arrows show the vector of mean secular tilting.
Upper left: schematic distribution of faults and veins in the Hosokura mine.

とを示すものと考えられる」(鈴木強：細倉鉱山の探査の現状について¹⁾、より引用)。なお、今井は「細倉鉱山の鉱床は水平圧縮力が働いたためと一応解釈することのできる横ずれの主断層の動きにつれて、分岐割目が生じ、これが後から鉱化作用をこうむって、鉱脈となったと考えられる」²⁾と述べており、第2次剪断面および、第2次の張力割目と主断層のなす角を検討している。この第2次の張力割目と主断層とのなす鋭角は、常にそれを含む地塊の移動する方向を指すこととなるから、細倉附近はこの断層の形成時には、おそらく SE—NW から ESE—WNW 方向の水平圧縮力が働いたのではないかと想像できそうである。

東北地方の大きな地質構造をみると、細倉の東方、いわゆる東北地方外帯の山地は、火山も褶曲も伴わない相対的隆起帯で、古い二疊系、石炭系などの古生層と、白亜期中期または、それ以前の貫入岩からなるやや安定した北上阿武隈山地である。細倉の西方は活発な火成活動を伴う奥羽脊梁山脈と沈降隆起の

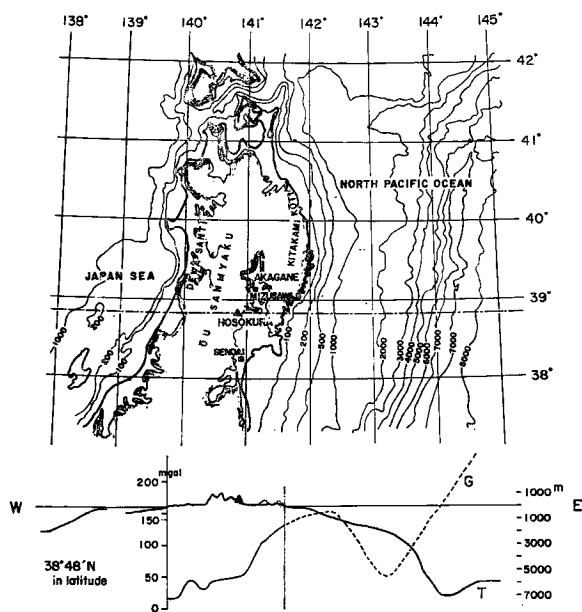


Fig. 3 Topography and bathymetry of north Japan and cross section in the latitude of 38°48'N. G: gravity anomaly.

交互する地塊運動または活褶曲の地帯であり、地震活動は小さい³⁾。地質断層系はN—S,あるいはNNW—SSE系が多い。北上山地と奥羽脊梁山脈の間には、第三・四紀の堆積平野があり、東に向かって重力異常が急激に増加し、東経 142°あたりで +150mgal 以上に達し、再び急速に減少して 143°付近で +50mgal になる。三陸沖の浅発地震はこの地域にもっとも多発する。さらにその東、日本海溝の東方では +400 mgal を越える。細倉の西方、すなわち内帯では、顕著な凹凸を伴いながら +50mgal から徐々に減少し、日本海沿岸あたりでほぼ 0 mgal となる。なお、市川の研究⁴⁾は、東北地方の浅発地震および極浅発地震の主圧力の水平成分の方向は、ほとんど島弧に直角であることを示しているが、東北地方の、島弧に平行な構造から考えても、この方向は、現在の Tectonic Force の方向を表わしていると推測される。細倉はこの沖積平野から脊梁山脈にかかる標高 150m 位の山間の平坦地にあり、東へ重力異常の急増する所に位置して、東北地方外帯と内帯のほとんど境界線上にあると考えることができる。

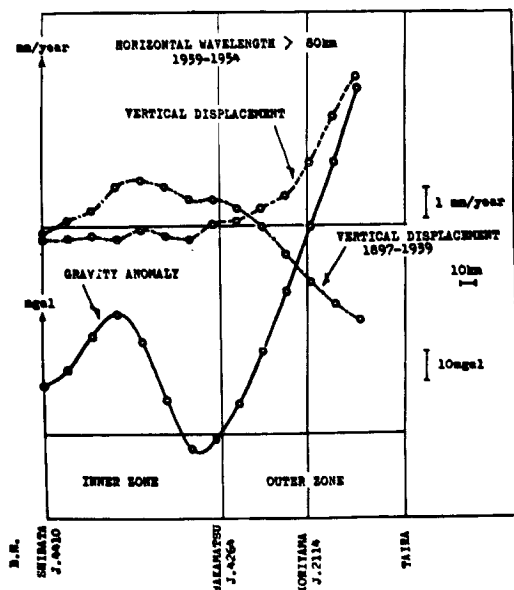


Fig. 4 Vertical crustal movements on the levelling route from Shibata to Taira in the Tōhoku district (after Mizoue).

さて、水準測量の解析結果から、波長 20km 以上 80km 以下の地殻の垂直方向の変動と地殻構造を比べてみると、一般に貫入岩体が地表面近くまで上昇している地域は、現在もお隆起を続けており、逆に貫入岩体の谷間に分布する堆積層の地域においては、沈降しつつあることが知られている⁵⁾。これを、細倉附近にあてはめて考えれば、細倉は隆起も沈降も行なわないかわりに、東の沈降地帯と西の隆起帯の中間の節にあたって、傾斜変化としては、もっとも大きく現われる場所にあたると予想される。また、同じく水準測量の解析結果のうち、波長 80km 以上の垂直変動についてみれば、東北日本の内帯と外帯が独立な運動をしていることが推察できる。すなわち、1897年から1939年の間では、外帯が内帯に対し沈降しているが、1937年から1954年の間では、逆に隆起している。この、ちようつがいの運動の蝶番にあたる所は、東北日本の内帯・外帯の境界線と一致し³⁾、細倉はまさに、その要のところに位置している。以上のように、細倉は構造運動的には非常に興味深い場所にあり、東北地方外帯の地震活動と地殻運動の関係を調べるには、至極好適の位置と考えられる。

4. 観測室・観測器械・観測精度

観測室の位置、観測器械の種類と感度は、Table 1, Table 2, に示すとおりである。

Table 1 Position of observational rooms

	Latitude	Longitude	Height	Depth	Geol.	Epoch of obs.
HOSOKURA I (Kanten Shaft -68 ^m Tokkō)	38°48'34"N	140°54'03"E	130m	160m	Green tuff	Dec., 1943~ Feb., 1957
HOSOKURA II (Shita 3kō Meitsū Cross-cut)	38°48'37"N	140°53'02"E	16m	230m	Propylite	Sep., 1958~ Present

Table 2 Sensitivity of instruments

	Instrument	Direc. obs.	Sensitivity	Opt. dist.	Period	Epoch obs.
HOSOKURA I	Silica tiltmeter of horizontal pendulum type	S 14°W—N 14°E	0.007"/mm	195cm	40sec.	Dec., 1943~ Apr., 1945
		N 76°W—S 76°E	0.007"/mm	195cm	40sec.	
	Extensometer of Sassa type (Super-invar wire)	N 55°W—S 55°E	1.2×10^{-8} /mm	200cm	length : 20m	1944~1945
	Super-inver tiltmeter of horizontal pendulum type	N 11°W—S 11°E	0.025"/mm	200cm	20sec.	June, 1949 } Feb., 1957
		N 79°W—S 79°E	0.025"/mm	200cm	20sec.	
	Variometer of magnetic declination		56.3"/mm	366cm		
HOSOKURA II	Mercury tiltmeter	S 79°W—N 79°E	0.45"/mm			1950~ Feb., 1952
		S 11°E—N 11°W	0.45"/mm			
	Super-invar tiltmeter of horizontal pendulum type	N 45°W—S 45°E	0.02~0.05"/mm	197cm	12~20 sec.	Sep., 1958 } Present
		N 45°E—S 45°W	0.02~0.05"/mm	195cm	12~20 sec.	
	Variometer of magnetic declination		0.4"/mm	388cm		

このうち、水平振子型傾斜計による観測結果を Fig. 4 に示す。図中点線は欠測期間である。観測結果は必ずしも良好であるとはいえない。これは細倉が京都からかなり遠隔の地にあり、器械の整備、調整に度々赴くことができなかったため、鉦山側の理解と協力にもかかわらず、故障のまま放置したり、低感度のまま記録を続けるという事態が生じたのは、まことに止むを得ぬことでありまた残念なことでもある。このように、観測結果は必ずしも良好ではないが、このような長期間の観測記録があることは、解析しきわめて有利であるのは当然であり、長期間の観測するものが、いかに必要であるかということは、以下に示されるとおりである。

なお、Table 1 にみられるように、観測室は地表面下 160 m と 230 m に位置している。多くの過去の観測結果が示すとおり、一般に地表面下 50m より浅い観測所では、気象的諸要素の変化にしたがって、必ず日変化・年変化を生じ、また、降雨影響・地下水の温度・水位の影響を大きくうけるため、微小変化の検出はきわめて困難である。また 200 m 以深になれば、深ければ深いほど、岩圧による坑道の変形が大きく、そのために器械の感度を必要以上に高めることができない。細倉はこの点では、気象的諸要素の影響を全く受けず、坑内の温度変化は年間を通じほとんど一定で、日変化・年変化・降雨影響は全くなく、しかも、坑道は安定していて、理想的な観測室といえる。また、100m 以内では、ほとんど採鉦作業は行われていないので、それによる坑道の変形や、坑内作業による人為的擾乱が傾斜変化に現われたことは現在まで認められていない。ただ、坑道あるいは器械台の永年の変形らしいものが現われているが、この変化率は、ほとんど変わらないか、あるいはきわめて規則的なものらしい。

一般に器械の感度は、観測の精度そのものを示すと考えやすいが、気象変化の大きなところ、人為的擾乱の大きな観測室では、いかに感度を高めても、目的とする地殻変動を検出する上で、精度が良いと言うことはできない。反対に感度が低くても、坑内の諸条件がよく、坑道がきわめて安定しておれば、微小量の検出

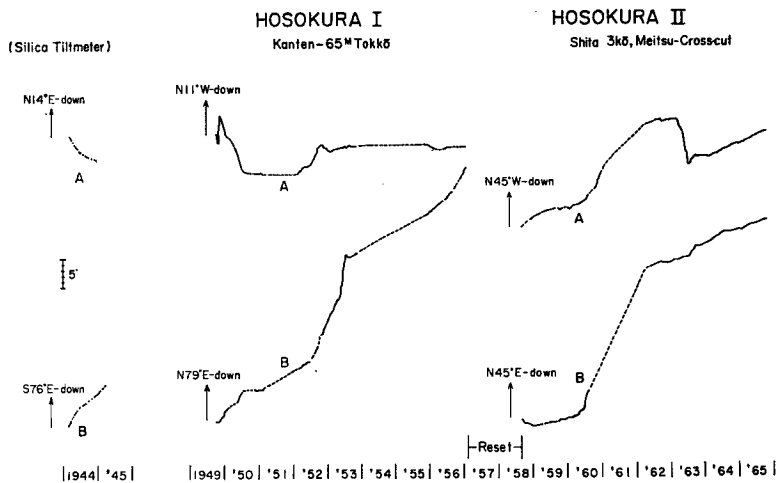


Fig. 5 Secular ground tilt observed at Hosokura.

にもそれほど無理は生じない。結局、精度の表示は、器械感度であらわすよりも、傾斜変化速度の異常がどれ位の期間続けばこれを異常変化と判定できるかということを示すべきであって、当然のことながら短時間の変化ほど傾斜変化速度の変動は大きくなければ検出できないことになる。最近の細倉の観測は、平均傾斜変化から、最低限

0.02"/day, 0.06"/week (0.01"/day), 0.2"/month (0.007"/day), 0.5"/year (0.002"/day) の変化速度の異常がそれぞれ1日, 1週, 1月, 1年の間継続すれば異常変動として検出することができるし、これ以下の微小量は、精度の上から観測の対象として議論できない。括弧内はそれぞれを日単位に直したもので、短時間の変化ほど異常変化速度が大きくなければ検出できないことを示す。細倉は観測室の条件が良いので、器械の感度を高めれば、精度はさらに上昇するはずであるが、観測室によってはいくら感度を上げてても記録解析上の精度がよくなることはしばしばありうるわけで、日変化・年変化を除去する必要がある場合は、0.02"/day, 0.5"/year の変化は検出するのに困難であるし、降雨影響のある場合は、その精度はさらに下るものとみななければならない。これから考えて、細倉の現在の観測は感度は低いが、安定していて、対象とする長期変動の解析に対して、精度は決して低くはないといってよい。

5. 地震系列の転換と平均傾斜変化速度

地震活動の消長に関係した長期間の地殻変動を調べるためには、観測器械の移設と記録の中断は解析上きわめて具合が悪い。Fig. 6 は HOSOKURA I と HOSOKURA II の観測結果を Vector diagram で示したものである。これをみると、両観測室におけるそれぞれの傾斜変化量はほぼ等しいが、平均傾斜方向の差は約 60° ある。これは観測休止期間中に両観測室を含む広範囲の地殻運動の永年傾斜の方向が変わったためとは考えられない。Fig. 2 に主断層の位置、坑道の方位、観測された傾斜 Vector が記入してある。HOSOKURA I の Vector と昭光断層、瑞兆断層のなす角度は、それぞれ 80° と 70°、HOSOKURA II と瑞兆断層との角度は 130° であって、平均傾斜方向と断層とのなす角度の差は 60° あり、多少、断層により、傾斜変化に方位的な制約を受けている可能性は考えられるが、鉱床のできかたなどからみても二つの観測の Vector の方向差が、断層の動きによるものとは考えにくい。一方、HOSOKURA I の坑道の方位と傾斜 Vector の方位の差が 140°、HOSOKURA II の場合は 115° であって、その角度が同じ程度であることから、坑道の変形と坑道内の器械設置位置や、2つの傾斜計のそれぞれの観測方位が関係してい

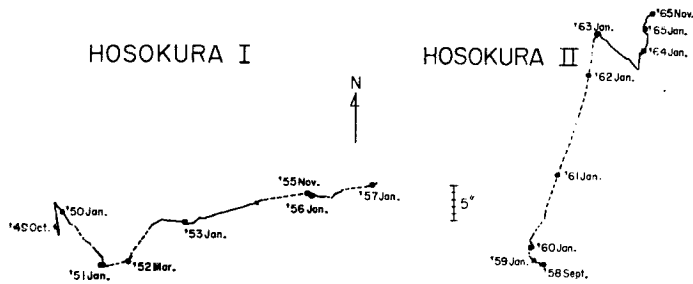


Fig. 6 Vector diagrams of ground tilt observed at Hosokura I and II.

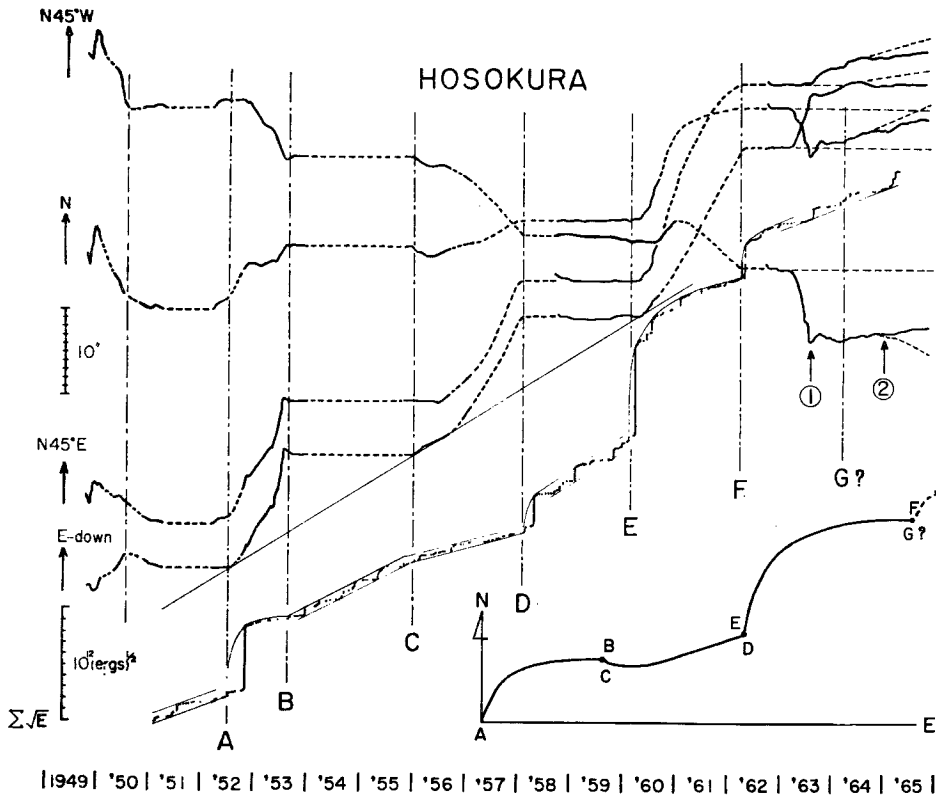


Fig. 7 Tilting movements of the ground at Hosokura, resolved into four directions, and the mode of energy release by shallow earthquakes in the outer zone of the Tōhoku district. Lower right: schematic vector diagram of ground tilt.

る可能性があると思われるのである。

いずれにしても、この期間に地殻運動の最大傾斜方向が 60° も変わったと考えるよりも、坑道があるいは少なくとも、観測室近くのごく狭い範囲の地盤の、定常的であるが固有な一方的傾斜変化の差によるものと考えられる。それ故、長期間の変動を調べるためには、この両期間の平均 Vector 差を坑道の変形等局部的なものとして一方から差引けば、一応、つなぎ合わせることができる。しかし、平均的なものをとるには

まだ観測期間が短かくて信頼度が低いので、別の方法を用いることにした。

まず、Vector 図をN—S, N45°E—S45°W, E—W, N45°W—S45°E の四方向の成分に分解し、各傾斜成分の時間的変化を画いた。Fig. 7 には、つなぎ合わせた結果だけを示してある。同図の下部に、東北地方外帯の地震活動状況を併記してある。取り上げたのは 60km より浅い地震で、Fig. 8 に示すように、細倉から 300km までの範囲に発生したものである。300km 以内としたのは、対象とする地殻変動の

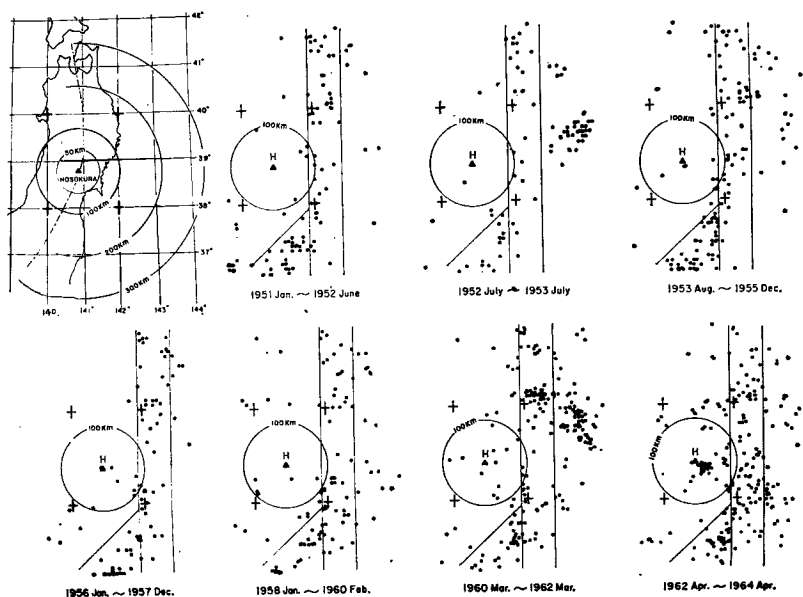


Fig. 8 Distributions of epicenters for the periods of each crustal earthquake sequence.

波長が 200~300km におよぶと考えて、それと関係ある地域の地震をとったからである。外帯に限ったのは、先の Fig. 4 から想像されるように、内帯と外帯では、地震系列も地殻変動の性質も異なるものと考えたためである。このようにして、細倉から 300km の範囲の外帯をとれば、三陸沖の地震活動地帯のすべてが含まれることになり、きわめて好都合である。

さてつぎに、Magnitude から計算した地震波動の energy の平方根が、解放された歪に比例すると仮定し、その累積が歪 energy の解放状況を示すものとして、さらに、その包絡曲線または直線の、折れ曲り点で活動状況が変わるものと考えて系列を分けた。この系列の分け方には、必然性がないかも知れないが、Fig. 8 の、この系列別の震央分布を系列継続期間の長短を考慮して検討すれば、1951年1月~1952年6月の系列から一つおきの系列 (Fig. 7 の BC, DE, FG) は energy 放出率がほぼ同じであると同様、震央も三陸沿岸地域に比較的密集していることがわかる。図中の南北の2本の直線は、発生地域の移動を比較する目安にひいたものであるが、この一つおきの図において、この南北の帯の中の震央の数は、帯の外の数に対して圧倒的に多いのに反し、1952年7月~1953年7月と1960年3月~1962年3月の両期間では、三陸のはるか沖がむしろ活発地域であることが知られる。また、1956年1月~1957年12月の2年間は地震活動が異常に低調であった期間である。なお、1960年以後は地震月報の記載方法が変わったために、実際に小地震の数が増したか、記載される数が多くなったのかわからないが、1962年4月~1964年4月の期間を見ても、1951年1月~1952年6月の期間とくらべて、energy の放出率は決して増加していないと云うことを考慮する

必要がある。

さて、Fig. 8 の各成分の変化曲線を見ると、地震系列の転換期、図中の A, B, C, D, E の各点で、平均傾斜変化速度が変わっていることが認められる。これは、槇峰観測所で観測された傾斜変動の、とくに槇峰附近の三角点の水平移動の方向と、同じ方向の平均傾斜変化速度が、日向灘浅発地震の系列転換時に、顕著に変わっていることと全く同じである⁶⁾ (Fig. 9 右図参照)。細倉では欠測期間が多いので断定はできないが、このことから次のような充分可能性のある推論をすることができる。すなわち、地震系列の転換期には常に、平均傾斜変化速度が変わり、同一地震系列の活動期間中は、ほぼ、一定な速度を保つ、と考えることができそうである。この仮定にしたがって、BC間の欠測期間は、両端の直線部分をそのままの平均傾斜変化率でのばし、つなぎ合わせてもまず間違いはないものと考ええられる。また、F点でのつなぎ合わせは、同様に、E以後の変化速度とG以前の変化速度をそのままFの時点までのばすことによってできる。

ただし、この間の傾斜量は4成分のうち、どの2つをとっても、同じ Vector 図を画くように調整しなければならないのは当然である。1957年以前と1958年以後は、それぞれ、欠測があっても、器械は移設されていないので、そのままの傾斜変化速度で延長すればよい。しかし、Dの前後では、器械が移設されていて、先にのべたように、抗道の変形などによると考えられる一方的変化に差があるため、そのままつなぐことはできない。ここに、傾斜変化の絶対量は、傾斜計の場合、ほとんど無意味であることは、かねて指摘されているところであり、HOSOKURA I と II の Vector を見るまでもなく明らかであるから、傾斜変化速度の変化だけに注目することにして、かりに、A以前の傾斜変化速度が0であるとして、一定の傾斜変化量を1957年以前の全期間にわたって差引くことにする。この場合、BC間はやはり、ほとんど傾斜変化速度が0となる。つまり Fig. 7 では、すでに、その操作を施したものを示してあるが、もともと両期間の傾斜変化速度はほとんど等しかったわけである。さて、どうやら一つおきの系列ごとに平均傾斜変化速度が同じらしいので、HOSOKURA II の1958年からE時点までの期間も、変化速度が0であったとして、別の一定量を以後の全期間に亘って差引くと、FG間の変化速度も0となり、この推論はきわめて適切であるように思われる。そこで、Dを決定するにはC以後とE以前の変化率を延ばして、D時点で結び合わせることにする。このようにして、一つの仮定と二つの操作で、2つの異った場所での観測結果の欠測期間を、補うと同時につなぎ合わせることができる。

6. 東北日本外帯の地震系列と長波長の地殻運動

このようにして、欠測期間を補なってつなぎ合わせた変化曲線をみれば、槇峰の観測結果と全く同じように、すべての地震系列の転換期に平均傾斜変化速度が変わっていること、とくにそれは、東西方向と北東-南西方向にきわめて顕著であることが、若干の操作に基づいているとしても、容認できると思われる。しかも、曲線の下端が一つの直線上に乗って、きわめて規則正しい階段状の変化をしていることは単なる操作や偶然の結果ではないように考えられる。もちろん、仮定の上になった一つの可能性でしかありえないが、この仮定は、槇峰の観測結果に拠ったものであり、細倉の場合でも、地震系列の6回の転換期のうち、欠測期間内の2つを除いた4回のすべてで確かめられているので、あとの2つの転換期も、そうなっていると推定することは、決して不都合な推論ではなく、充分根拠のあるものと考えられる。

さて、この曲線から模式的な Vector 図を作ると、Fig. 7 右下のようになるが、これは、実際の地面の傾斜変化から、ある一定の傾斜変化速度を差引いたものであるから、ただ傾斜変化速度の変化のみを示すもので、必ずしも北東の方向に実際の地面が傾いたものかどうかはわからないし、BC間で傾斜変化がなかったわけでもない。平均の変化状態に比べて、ACの期間では、北東方向の変化成分が加わったということにすぎない。しかし、三陸の地震活動の活発な期間ABとEF間は、先ず北下りの変化成分が大きくなり、つぎに、徐々に東方向の変化が大きくなり、ほぼ東北または東北東の方向に傾いたことになる。そしてBC間・ED間では、ほとんど変化がなく、また、CDの特に地震活動の少なかった期間は、また少し様子が違って、東方向の変化だけが大きいという様式のちがいが矛盾なく説明できそうである。この東北あるいは東

北東方向の顕著な階段状の変化は、水準測量の解析結果から、東北地方の外帯が内帯に対して相対的に上昇したり、沈降したりする螺旋運動の一部をあらわすものではないかと想像される。また、この階段状の変化が、特に東西に近い方向に顕著であることは、東北地方の地質、地形、その他の地球物理的現象から予想できる東西方向の圧縮力と関係があると考えられるし、東北地方の浅発地震の主圧力の水平成分の方向が、ほとんど東西方向であることも関連があると考えられる。つまり、この階段状の変化の軸は、東北地方の造構造力の働く方向と一致していると考えられるのである。

7. 同一地震系列内で Group として発生する地震と地殻運動の様式

1952年3月から1953年10月までの観測はきわめて良好で、欠観期間はわずか1カ月半である。さきにのべたように、1952年6月から地震系列の転換が起こり、三陸沖で地震活動が活発化した。とくに10月末から11月はじめにかけて、magnitude 6.6の地震をはじめとして、magnitude 6以上の地震10個が発生している。そして、1953年7月には、この活発期間は終了して、再び、系列の転換が起っている。この二つの転換期に傾斜変化速度は明らかに変っている。

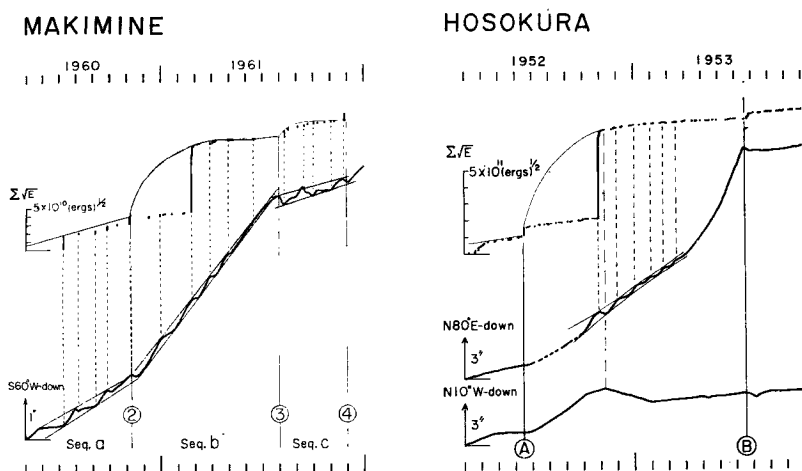


Fig. 9 Left : tilting motion in the direction of horizontal displacement of triangulation points near Makimine and the mode of strain release by the crustal earthquakes in Hyūganada. Right : tilting motion in the E—W direction at Hosokura and the mode of strain release by the shallow earthquakes in the outer zone of the Tōhoku district.

さて、ここに特に顕著な事実は、この系列の地震発生期間に N80°E 方向の傾斜変化に、振動的变化が起っていることである。これは、槇峰の観測結果 (Fig. 9 左図) と全く同じ様式である。すなわち、槇峰の S60°W方向の傾斜変化は、地震系列変換と共に傾斜変化速度が変わる。また、同じ系列内の個々の地震または Group の地震に伴う変動の様式が変わる。すなわち、Group a では、中規模の地震が波状運動の山と谷に単発的に発生しているのに対し、Group b では、山から谷にかけて密集して発生している。そして、この振動は、周期と振幅を減じつつ、次の系列に転換している。Group c は、Group a と Group b の中間型で、山と谷に密集して発生している。そして、Group a, b, c ではその発生地域が移動している⁷⁾。これに対し、三陸沖の地震の場合では、振動の山に密集して発生し、振動は周期と振幅を減じつつ、しだいに小さくなってきていて、槇峰の場合の Group b に酷似している。発生地域の移動の点では、全般的にさきにのべたように、三陸はるか沖に活動域が移っているが、さらに細かくみればこの系列の最盛期の地

震群は、三陸はるか沖に群発していて、振動的变化の最初の山に集中し、それ以前の地震は三陸沿岸に、それ以後の第2、第3の山に集中発生した地震は、下北半島と金華山沖を通る弓状の帯の上に、Group ごと移動しながら、発生している傾向がみえる。

なお、楨峰の場合と異なるのは、日向灘地震系列の転換期には必ず、やや深い地震が発生していて、九州琉球弧の稍深発地震と系列の転換との間に密接な関係が予想されたに対し⁷⁾、三陸沖の地震の場合は、発生する稍深発地震の数が多く、その間の関係は全く明らかなでないことである。

なお、観測所と地震活動域までの距離は、日向灘の場合は、楨峰から平均70~100km、三陸沖の場合は、細倉から平均150~200kmで、ほぼ2倍に近く、 $\Sigma\sqrt{E}$ の総量にして、日向灘浅発地震の約5倍である。地殻変動の大きさが距離の自乗に反比例し、 $\Sigma\sqrt{E}$ に比例するとすれば、傾斜変化量の order は全く一致する。

一方、Tectonic Force が働くと思像される東西方向に対し、直角な南北方向の成分をみると、系列の転換と同時に北方向に急激な傾斜変化が起こり、三陸沖地震の最盛期の地震活動の終了まで継続し、その後ある程度回復し、平常の状態に戻っている。この曲線の型は、一定時間荷重を加えた後、荷重をとり去ったときの、粘弾性変形の型と非常によく似ていて興味深い。

以上述べた広範囲の地震活動と Tectonic force の方向と考えられる東西方向の傾斜変化速度との関係は、個々の地震によって起こされた地殻変動が、200km もはなれた細倉まで及んだと考えるのではなく、このような広範囲の地震活動の消長は、地球のかなり深い部分、おそらくは Mantle 上層部において何らかの状態変化、力のかかり方の変化、energy の供給の仕方の変化によるもので、これが、地震系列の転換をひきおこすと同時に、一方では広範囲の地殻の非常に緩慢な階段状の運動の原因ともなっているのではないかと想像されるのである。もし、ある原因によって歪 energy が蓄積し、これに伴って傾斜変動が起こり、歪 energy がある程度に達すると、Crust の弱い部分に地震が集中発生する、このため、歪 energy は幾分解放されるが、下からの energy の供給はなお続いているため、再び同じ方向に傾斜をはじめ、地震の再発生によって、その分の energy を放出すれば、また傾斜変動量を回復する。この間その地域の破壊強度が多少減少するかあるいは、歪 energy の蓄積される領域が狭くなって、階段状の運動に重なる see-saw 運動は、振巾も周期も小さくなる。やがて energy の供給は次第に減少し、一つの地震系列を完了する、と考えれば、単なる想像にすぎないが、この特徴的な様子を説明できそうである。

8. 極浅発地震系列と地殻変動

以上のべた、広範囲の規則的な地殻運動は、もし、観測所周辺が塑性変形の範囲に含まれるような近距離にかなりの規模の地震が発生した場合、この型が乱される可能性がある。地表面で観測される傾斜変動は、深いところに原因のあるものと、比較的浅いところに原因のあるものなど、いろいろの深さと広がりのが重なり合って観測されると考えられるが、単に重なり合ったものは何らかの方法で分離できであろうし、互いに影響し合うものは分離することはできないであろう。Fig. 7 において、1963年頃から階段状の変動が急激に乱されているのは、明らかに近地震群のためであろうと考えられる。もし、この近地震群による急激な塑性的変動がなかったとすれば、傾斜変化曲線は、図中の点線をたどったと推測される。

ところで、1964年のはじめ頃、図中のG時点で傾斜変化速度が変わっている可能性がある。地震資料がまだ揃わないので、この時期に系列が転換しているかどうかわからないが、それ以前の地震系列の継続期間から推定すれば、そろそろ系列の転換があってもよい時期に当たっている。確かに最近の地震発生状況から見れば、その可能性は十分認められる。もし、系列が転換しているとすれば、図中にもその傾向がみられるように、傾斜変化速度は増大しているであろう。Fig. 8 にみられるように、細倉から50km以内の地域では、magnitude 4程度の地震は、通常1年に1つか2つ発生しているにすぎなかった。しかし、1962年4月以降の分布図では、細倉から20~30kmの地域に群発している。震源の深さは、地震月報によれば0kmと発表されている極浅発地震であって、明らかに極浅発地震の系列が宮城県北部に発生したことがわかる。地

殻変動の観測は残念ながら、1962年9月まで中断されていて、最初に発生し余震を伴った1962年4月30日の magnitude 6.5 の地震前後の様子はわからないが、再開後1年目の1963年8月11日に細倉から 25 km 南東で、先の地震の余震域内に magnitude 5.3 の地震が発生した。この地震発生約5カ月前から急激な異常変動が起こり、変化速度を増して行った。地震発生10日前には、細倉から震央方向の成分はある程度回復しただけであるが、T成分は、2カ月後には変動の大部分を回復している。この様子は Fig. 9 に明らかである。図の下方には、細倉から 50km 以内に発生した地震による歪 energy の解放状況を併記してある。

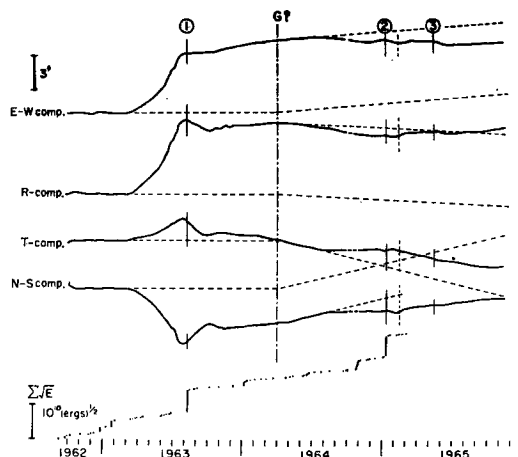


Fig. 10 Tilting movements of the ground at Hosokura, resolved into four directions (R: radial, T: transversal to the epicenter), and the mode of energy release by the shallow earthquake sequence occurred within 50km of Hosokura.

その後、ほぼ一年間、平常状態の変化を続けたが、先にのべたように、この間に平均傾斜変化速度が変わった可能性がある。ところが、1964年8月頃から再び異常変化の傾向があらわれ、4カ月後の1965年1月13日に到り、1963年8月に発生した地震とほとんど同じところに magnitude も 5.2 のほとんど同規模の地震が発生したのである。N-S成分では、その異常変化の形は、かなり似ていて、Fig. 9 の三陸沖の地震群のときと同じような傾向を示しているが、その他の成分の変化の様子は先の地震の場合と全く異なり、傾斜量にも、方向にも大きな差がある。傾斜方向の違いは、Fig. 11 で一層明瞭である。この図は、異常変化の部分だけをとりだして、Vector 的に異常傾斜の方向を示したもので、上には、この期間に発生した主な地震の震央を示してある。1963年の地震 (No. 1) の前は、異常傾斜はほとんど真直ぐに震央方向に向い、10日前に方向転換したことがよくわかる。その後Gの位置まで Vector はのびたが、後1年間、このままで停滞し、1965年の No. 2 の地震前に、今度は震央に対し、直角な方向に異常傾斜を行なった。点線はGの時点で、平均傾斜変化速度が変わらなかったとした場合の Vector 図であるが、いずれにしても、異常傾斜は No. 1 の地震のときとほとんど直角方向にのみ行なわれている。もしGで平均傾斜変化速度が変わっていたとすれば、No. 3 の地震で、直角方向の異常変化分だけは、完全に回復し、2つの地震を通じて、最終的には細倉からまっすぐ震央の方向に傾斜したという結果になる。つまり、この2つの地震は、細倉からの距離も、magnitude も同じで、ほとんど同程度の異常変動が期待されるにもかかわらず、その様子は全く異っており、2つの地震で一連の地殻変動を完結したように見え、地殻変動の上からみて、特殊な関係があると想像

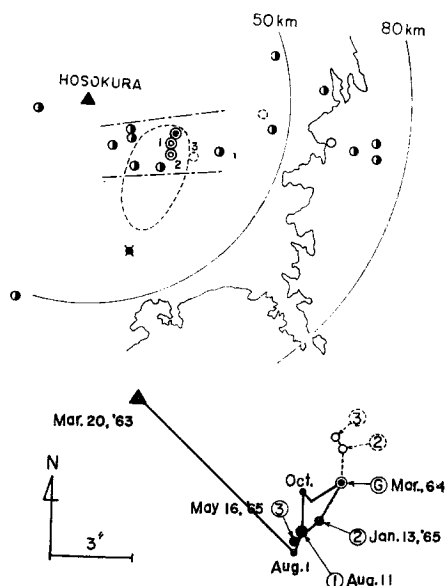


Fig. 11 Upper : distribution of epicenters of earthquakes originated in the northern part of Miyagi prefecture. Lower : Vector diagram of anomalous ground tilt before and after the occurrences of the three near earthquakes.

されるのである。さらに、残念ながら、欠測期間中でその様子はわからないが、1962年4月の magnitude 6.5 の地震も地殻変動の上から密接な関係があると推定できそうである。この震央の位置は、Fig. 11 に●で示してあり、点線で画いた楕円はその余震域である。本震直後の5日間に magnitude 4 以上の余震が9つとその他有感地震50個が発生している。No.2 の地震前後の異常傾斜の方向が、この余震域の長軸の方向と一致することから、この地震系列による破壊の方向性に一連の関係があるのではないかと推察できる。しかし、直接の余震終了後発生した地震は、この余震域とは関係なく、Fig. 11 に破線で示した方向に伸びている傾向がある。

さて、1962年の主震と思われる地震の発生後の歪 energy 放出状況を示したのが、Fig. 12 である。 t は主震発生からの日数である。この図をみると、主震発生後10日目に多少勾配が変わった傾向があるが、歪 energy の放出は、 $\log t$ に比例していて、elastic creep の特性をもつ岩石の圧縮歪の回復の仕方と同じであり、その係数は平均して 3.69×10^{10} である。つまり、これらの地震群は長期間にわたって規則正しい歪 energy の放出を行なっているのであって、この面から見ても、確かに一連の同系列の地震であると考えることができる。つぎに、主なる3つの地震の発震機構を比べてみると、地震波初動の分布は、一見きわめて複雑であるが、地殻内の浅い地震であるから、転向円を考えれば、非常にうまく説明することができる。これを Fig. 13 に示す。1962年4月の地震では、四象限型の主軸が $N65^{\circ}E$ に、地表面と約 7° の角度で大きく傾いている。第2の地震では、主軸は、 $N60^{\circ}E$ の方向に、地表面と約 13° の傾きを、第3の地震では、 $N20^{\circ}E$ の方向で、地表面と約 6° の傾きをなしている。いずれも主軸が地表面とはほとんど平行になる位に大きく傾いている。特に顕著なことは、主震と1963年の地震はその主軸がほとんど同じ方位に同じ傾きをしているのに、押し引きが全く逆であるということである。したがって、主圧力の水平成分の方向は、 90° 違っている。これは、全く憶測の域を出ないが、主震が $N60^{\circ}E$ 方向の圧縮力によって発生したのに対し、1963年の地震は、反作用的に同方向の引張力によって発生したとも想像できるのである。先にのべた

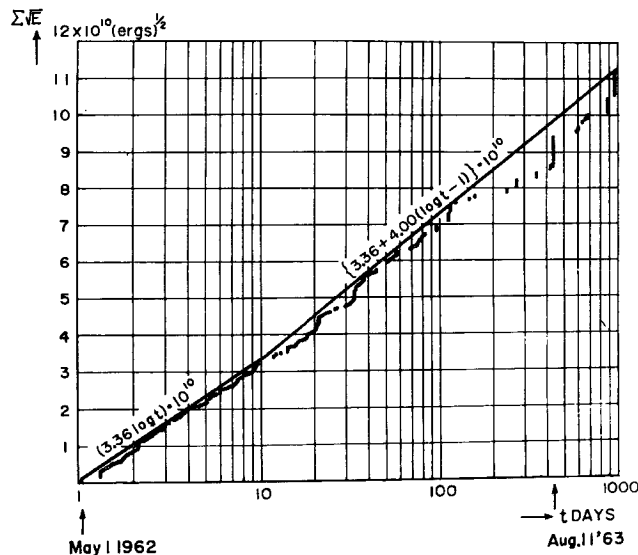


Fig. 12 Strain release by shallow earthquake sequence in the northern part of Miyagi prefecture.

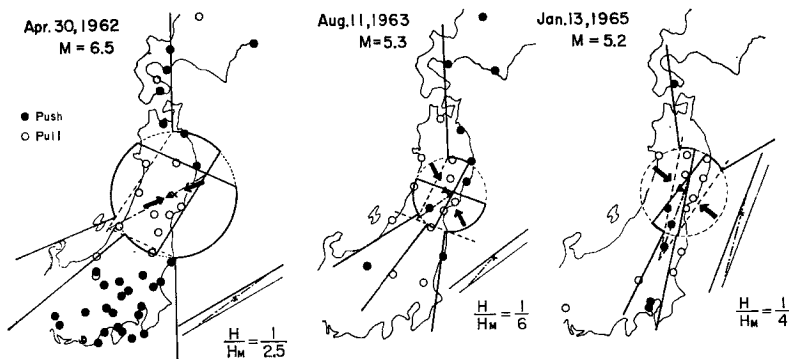


Fig. 13 Push-pull distribution of initial motions of shallow earthquakes occurred in the northern part of Miyagi prefecture.

ように、主震発生当時は観測を休止していたから、実際の様子はわからないが、もし、圧縮力と引張力ということ起震力として考えれば、主震に伴う地殻の異常傾斜は、震央と逆方向に傾斜し、1963年の地震でそれをある程度回復したのかも知れない。しかし後の地震では、そのときまでに蓄積された歪 energy のすべてを放出することができずに、さらに、1965年の地震が発生したと考えられる。このことは、Fig. 12においても、1963年の地震発生にもかかわらず、 $\Sigma\sqrt{E}$ の値が $\log t$ の線まで達していない、energy を完全に放出していない、ということと一致するのかも知れない。つまり、1965年の地震は、その前の地震発生当時の地殻内の歪状態と全く異った状況の下で発生したために、地殻変動の上で全く異なった様相を示したと解釈できる。最後の地震の主軸の傾きの違いも同じ理由によるものであろうか。この一連の地震と個々の地

震に伴う地殻変動の観測の結果重大なることは、観測所からほとんど同じ距離、同じ magnitude の地震で異常変動の量と方向にこれだけ差があるということである。主圧力の方向に対する観測所の相対的な位置の違いが異常変動の方向と量にこれだけの違いを生じたのか、あるいは本質的に残留歪のために、異った歪の状態のもとに残余の歪を解消するためによる差であるのか、そのところは全くわからない。しかし、おそらく、この一連の地震によって、一つの地殻変動を完了したと想像されるので、個々の地震に伴う地殻の異常変動を系統的に、詳細に調べるためには、その地震が一連の地震の中で如何なる位置と役割を占めているか、ということを経後の問題として充分追究しなければならない。

今までの個々の浅発大地震の例にしたがえば異常変化の第1段階は Tectonic Force の働く方向に異常傾斜が生ずるに対し⁹⁾、この場合は、第1段階を欠くと考えられる。これは広範囲にわたる、Tectonic Force によっておこる一連の地震活動に対し、それによって引きおこされた二次的歪による中規模地震と考えればよいのであろうか。このことは、この系列の地震が宮城県沖の地震活動活発化の直後から発生しはじめたことから想像されるのであるが、このような力とは別の原因による浅い局所的なものかも知れない。

9. 結 語

資料をいろいろな方法で解析した結果、(1)東北日本外帯の地震活動の消長に関係のある長期間の、波長の長い規則正しい変動と、(2)それに重なって、同じ系列に含まれる地震群に関係したやや期間の短い弾性的な変化と、(3)さらに観測所が弾塑性域に含まれるような近距離のしかも非常に浅い地震については、非弾性的でおそらくは波長の短い変動と、以上三種の変化をとらえることができた。第一のものは欠測期間の多いにもかかわらず槇峰ですで行なわれた結果を対比して充分可能性のあるものと考えられるが、その特徴は地震系列の転換と共に傾斜変化速度が規則正しく変っていることである。第二のものはその期間中欠測がほとんどなくきわめて信頼性の高いもので、同一系列内の地震がいくつかの Group となって、振巾と周期を減少する波状の弾性的な変動の、山の部分に集中的に発生している。この二つの変化様式は槇峰の場合ときわめて似ており槇峰の観測結果を改めて実証することとなったが、これらの非常に規則正しい階段状の変化あるいはその中に含まれる減衰振動的な変化はおそらくかなり広汎な範囲のものと考えられ、最初に述べた水準測量の解析結果から得られた波長 80km 以上の変動において、外帯が内帯に対して蝶番運動を行なっている事柄と一致するのではないかと思われる。測量から得られたものは 20 年～30 年の長期の変化であるが、この蝶番運動はここで得られた階段状の変化の積み重ねではないかとも考えられる。この原因について何らの確証もないが、おそらく Mantle 上部における広範囲のひずみの蓄積により大規模の運動を起こし、それが局部的に異なる刺激を与えて一連の地震を惹起する。それ故地震系列の転換は広範囲のひずみの蓄積状況を反映したものであり、同時にこれは外帯全域にわたる緩慢な地殻運動に反映するものと考えられる。第三の局所的な地震の発生は三陸沖地震の系列転換の直後であり、二次的な局所的な歪が解放されたもので、震源の深さからも推定されるように、地殻変動の波長も短いものであろうと考えられる。問題は先にのべたように、地震の規模、距離が同じであっても、地殻変動の様相が全く異なることで、個々の地震をそれぞれ、独立のものとして考えることは、危険であり、一連の地震の中で、どのような役割りを果しているかを系統的に調べなければ、様相の差異を説明することは、むづかしいと思われる。

ここに用いた17年間の資料の半ば以上は、故西村英一教授、細山謙之輔現国土地理院鹿野山観測所長など恩師先輩等の努力によって得られたもので、長期間の記録の強みを感じると共に、深い感謝と尊敬の念を抱くものである。また、同時に、実際にこれらの観測の維持に当たられた代々の細倉鉱山の担当者の方々、のみならず、歴代の鉱業所長、地質課長以下関係者御一同の御理解と御援助の賜であると感謝する次第である。

なお、御指導と御鞭撻を賜った一戸時雄、岸本兆方両教授に厚く御礼申し上げますと共に、御助言を頂いた三雲健、尾池和夫の両氏、また、一時観測を担当していた山田勝氏と資料の解析整理にあたった長谷川久丹子嬢、細善信君ならびに土居光君に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 鈴木 強: 細倉鉱山の探査の現況について, 鉱山地質, 16巻76—77号, 1966, 83—89頁.
- 2) 今井秀喜: 鉱床と構造地質学, 岩石力学と構造地質学 (日本地質学会), 1966, 131—141頁.
IMAI, H.: The vein system of the Hosokura and Ōdomori mines, northern Japan. Jap. Jour. Geol. Geogr., Vol. 27, pp.21—36.
- 3) 松田時彦: 弧状列島の構造区分と日本列島, 地学雑誌, Vol.73, Nos.3~5, 1964, 253—278頁.
- 4) 市川政治: Mechanism of Earthquakes Occurring in and near Japan, 第11回太平洋学会議にて講演.
- 5) 溝上 恵: 日本における地殻構造と地殻変動との関係について, 地学雑誌, Vol. 73, Nos. 3~5, 1964, 224—242頁.
MIYAMURA, S., MIZOUE, M.: Secular Vertical Movements of the Earth's Crust in Japan—Modes of Movements in Space and Time with Special Reference to Geotectonics— Jour. Geod. Soc. Japan, Vol.10, Nos.3—4, 1964, pp.123—138.
- 6) 田中 豊: 地震に伴う地殻異常変動の諸段階について, 京大防災研年報, 8号, 1965, 91—108頁.
- 7) TANAKA, Y.: Relation between Crustal and Subcrustal Earthquakes inferred from the Mode of Crustal Movements, Special Contrib. Geoph. Inst., Kyoto Univ., No.4, 1964, pp.19—28.