

新潟地震における地殻変動の測地学的調査の特質

檀 原 毅

国土地理院

The Characteristics of the Geodetic Investigation on the Movement of the Earth's Crust Accompanying the Niigata Earthquake

By T. Dambara

Geographical Survey Institute, Tokyo

Abstract

After the Niigata Earthquake (June 16, 1964), the Geographical Survey Institute made many investigations of geodetic surveys, such as leveling, trilateration, gravity, and geomagnetic survey. Surveys of leveling and triangulation were hitherto made by the said institute after the great earthquakes which occurred in the past. They are, however, not complete enough for obtaining the net changes accompanying earthquakes because the results of the former survey were usually too old to be compared with those of the survey carried out after the occurrence of the earthquake. The surveys before the Niigata Earthquake also were not complete, except the leveling, which had fortunately been made frequently for investigating the subsidence of the ground from artificial causes. After the Niigata Earthquake, we planned the survey mainly in order to obtain the transient phenomenon by repeating the survey as often as possible, especially in leveling and geomagnetic surveys.

One of the most remarkable discussions is the pre-seismic vertical movement of the earth's crust, which was made by Prof. I. Tsubokawa. It is shown in Fig. 1. Post-seismic movement along the leveling route on the shore opposite to the epicenter is shown in Fig. 2, and the general view of the vertical movement in the concerned district is shown in Fig. 3.

The addition of gravimetric and geomagnetic surveys is a new feature of the present investigation. The change of gravity which amounted to 0.15 mgal in amplitude and 30—50 km in wave length was found (Fig. 4). The magnetic change was also found (Fig. 5). It is very noteworthy that the post-seismic change is rather slow.

1. 調査の趣旨

1—1 序

国際地球内部開発計画 (UMP) および地震予知計画の二つの重要な研究計画に対して、国土地理院は、測地測量における立場から、地表面の上下方向における変動、水平方向における変動、驗潮、四辺形基線による回転と変形、重力および地磁気の分布と変動、などを検出することを内容とした一連の半永久的定期修正測量態勢を確立しようと試みている。これは過去の大地震、たと

えば、関東大地震 (1923)、南海道地震 (1946)、福井地震 (1948)、十勝沖地震 (1952) などのさいに、水準測量や三角測量が行なわれて、いわゆる地震にともなった地殻変動が求められていたが、その内容をし細に検討すると、決して地震による変動そのものでなかった点を反省することによって組み立てられた計画である。すなわち、地震直後の測量はよいとしても、地震前の測量時期が非常に古いことは、それと地震直前との期間に起った地殻変動を全く無視せざるを得ない。その量はわずか

であるばあいもあるが、それは明らかに二つの測量によって得られた変動量のなかに、地震による直接変動とともに合成されているはずである。もしも、地震の前兆としての地殻変動をつかまえたければ、このような測量方法は全く無力である。その量は小さく、また変化はゆるやかであろうけれども、連続的な変動を常時監視しておいて、地震が起ればそれにともなった不連続な変動を検出する。このようにすれば、地震前の動きは必ず地震予知の貴重な資料となるはずであり、地震がくりかえされれば、段階的な不連続の変動が長い時間尺度でならされて、大陸縁辺における造構造運動の一環としての地殻変動の特徴が解明されるであろう。

新潟地震においては、流砂現象や泥砂の吹き出しがけん伝されたけれども、これは新潟あるいは山形、秋田地方での過去の大地震で明らかのように、東北地方の日本海岸における地震の特徴であった。山岳地帯における扇状地形と異なって、河川によって運搬された泥砂が長年月をかけて堆積した沖積層では、つくられた層自体が安定ではない。地震が起らなくても、また人為的な地下水汲上げを過剰に行なわなくても、沖積平野はじょじょに沈下しつつある。その量は富山平野を例にとれば、年間数mmでいどである。しかし、このような緩慢な沈下では説明できない現象もある。富山湾に面した魚津海岸で発見された埋没林は、過去に巨木が繁茂していた安定な地盤が、急激に海底に没したことを物語っている。文部省震災予防調査会の報告によると²⁾、文化元年の象潟地震では、海底が隆起して、八十八潟九十九島の景観を失したとある。もっとも、このときは隆起のみではなくて、山崩れと泥砂吹き出しが加わっていたようである。さらには今回の地震後の調査で明らかになったことであるが、信濃川河口よりはるかに遠い粟島北方沖合で、大木の枯木が海底から発見されたことは³⁾、かりにこれらの大木が善光寺大地震のような大洪水をともなった過去の大地震、または台風にともなった大洪水で流されてきたものにしても、なぜこのような位置の海底にあるかは大きな疑問である。

これら一連の現象が、やはり過去の大地震と関連があったとすれば、日本海側の大地震では、厚い沖積層という特殊な地盤構造にもついた変動現象とともに、急激な地殻の隆起や沈降、さらには断層などの現象が発生したであろうことは容易に想像できる。ただし、それらが海底で起ったとすれば、なかなかわかりにくい。今日、海底地形調査では、測深技術や電波航法などは非常に進歩しているのであるが、依然として地上の測地測量の精

度には比肩すべくもない。しかしながら、今回の新潟地震による地殻変動の主要な舞台は、粟島をふくんで、その東方海底にあったから、一般的な地殻変動を論ずるためには、精度や測定年代の開きをあるていど犠牲にしても、各種の測量手段を総合して、変動の全ほりを概観できるようにする立場も重要であろう。

さらに今回の調査の特徴として、重力および磁気測量という二つの手段が加えられたことを指摘することができる。地殻の上下、水平、重力、地磁気などの変化も、要するに特定地震の単一原因が地殻にあたえる運動を、異った情報として求めることであるから、最終的にはこれらの全情報をも満足するような形で、発震機構が検討されなければならないと考えられるのである。

1-2 水準測量

水準測量による地殻の上下変動の調査においては、新潟市を中心とする天然ガス田地帯の地盤沈下対策として、一等あるいは二等水準測量がしばしばくりかえされていたという偶然的幸運があったために、従来地震変動調査から一歩進んだ解析を行なうことができた。地震後の調査では、とくに水準測量と野外磁気測量については、地震後の変動を連続的な過程においてつかまえるという明確な目的をもって、計画が企画された。

結果的には陸地における上下変動は小さかったから、海上保安庁水路部による海底地形調査が非常に貴重な資料をもたらした。新潟地震にともなった地殻変動の全ほりが明らかにされた。

平均海面の観測は、験潮場自体が固定地であって連続観測を行なっているから、地殻変動の連続監視には好適であるが、気象や海況の影響がいちじるしいために、これらの影響を取り除くくふうをしないかぎり、地殻の変動としては信用できない。ふつう近接した二つの験潮場の平均海面の差をとることによって、地殻自身の変動を海水の変化から分離するのであるが、このことは、二つの験潮場の海況が同様と見なされるほどに近接していて、しかも一方の地盤が他にくらべて静止していたと考えられるていどに、はなれていなければならない、という二つの条件を満足していることを必要とする。新潟地震のばあいは、震源地の近くの鼠ヶ関、岩船、粟島の釜谷および内浦に設けられた東京大学地殻研究所の験潮儀、ややはなれた柏崎などの験潮場の記録が利用された。

1-3 三辺測量

水平変動を検出するために必要な三角測量は、新潟から山形県にかけての地域について、1894—1899の第一

回、1960—1961の第二回の一等三角測量が行なわれていた。これから地震前の変動が求められる。

地震後の調査では、テルロメーターによる三辺測量を計画した。テルロメーターは公称精度 $5\text{cm} \pm s/300,000$ (s は測定距離)で、一等三角測量の精度にはおよばない。辺長測定と角測定とを混合した三角網平均計算において、角測定の精度を $1''$ 以下として、これに重量1をあたえれば、テルロメーターによる測定辺長の重量は $1/10$ が適当であるが、このような精度であるから、テルロメーターは四等三角測量や二等多角測量にはじゅうぶんに実用化されているのであるが、一等三角測量の代用には無理であった。しかし、作業力と北陸における初冬の天候を考えると、テルロメーターの簡便さを捨てるわけにはいかなかった。そのために、一等三角網を構成する三角形の内部に1点の二等三角補点をえらんで、これを一等点の各頂点と結びつける。三角形の辺と、内部にできた3辺を測定することによって、辺条件式をあたえ、三角形の強さを強化することを考えたのである。これは当時の坪川家恒測地部長の発案であった。測定方法は四等三角測量のためにつくられた実行法では不可であり、きりかえ周波数のステップや測定回数について、テルロメーターに期待しうる最高精度が要求されなければならない。

このような準備をしたのであるが、テルロメーターによる三辺測量は、海上を越えた長距離の辺長、山頂の積雪、北陸特有の初冬の天候障害などの悪条件が重なって、初期の目的を達成することができなかった⁶⁾。

1-4 重力測量

重力については、重力測量が戦後開始されたという年代の短かさもあって、大地震にともなった重力変化が検出された例は皆無である。南海道地震のさい、三角測量と天文測量とを組み合わせ、鉛直線偏差が見られたという例がある⁶⁾。もしこのときの新宮における鉛直線偏差の変化量が事実であれば、重力の値として -14mgal の変化に相当する。これは変力測量をくりかえすことによって、容易に検出できる量である。

地震時以外の平穏な時期に、重力がたとえわずかでも変化するかということになると(造構造運動は地下内部の密度分布を変え、それにとまなり重力変化があるはずであろう)、さらに資料は不足である。ソ連で重力の永年変化を検出したという報告があるが⁷⁾、日本においては長岡半太郎氏等の行なった過去の重力測定値を、戦後の国土地理院による測定値と比較した結果では、有意の変化は認められていない⁸⁾。

したがって、新潟地震の調査においては、まず重力変

化があったかどうかを見きわめることが第一の目的であった。測定によって得られる重力の値は、測定点の高さに関係するから、地表面の上下変動があれば当然重力は変化する。しかし、これは一つの現象を二つの手段で追跡しただけのことであり、しかも測定点の高さで 33cm の変化が重力で 0.1mgal の変化に対応するから、重力測量から上下変動を求めるのは非常に低精度の測量となる。意味があるのは、水準測量によって決められた上下変動の補正を行なった水準点で、重力変化が検出されたばあいである。これは地下内部の密度分布の変化にもとづくものと考えられるからである。

一等重力測量は偶然に地震直前の1963年2月および6月に、新潟、相川、山形、松代などにおいて実施済みであった。ラオスト重力計による一等重力測量の測定精度は $\pm 0.05\text{mgal}$ でありである。マグニチュード7以上の地震では、このていどの重力変化を生ずるような何らかの地下質量の可能性はあってもよいであろうと思われる。一等重力点の分布密度は非常にあらいのであるが、我々はこれらの測定が地震直前に行なわれたことに着眼して、まず一等重力測量をくりかえすことにした。地域はかなり広くとり、仙台、秋田、新庄、福島をもふくめることによって、地震が重力の変化を生じなかったであろう点との相互比較ができるように計画した。

新潟、山形兩県下における過去の二等重力測量は、東京大学地震研究所によって1952年(ウォルドン重力計)、国土地理院によって1954年(ノースアメリカン重力計)、新潟市地域のみは上下変動と同じく地盤沈下を調査する目的で、地震研究所によって1958年(ウォルドン重力計)、国土地理院によって1959年(ウォルドン重力計)に行なわれていた。二等重力測量は主として一等水準点において行なわれ、標石が亡失改理されないかぎりには、同一地点での測定のくりかえしは、きわめて簡単である。

現在国土地理院によって、あたえられている二等重力測量の成果のうち、本州のものには二種類ある。一つは、各地方ごとに平均したもので、東北、関東中部、近畿中国の三つに分れており、他は本州全体をいちどに平均計算したものである。新潟地方の比較につかった旧測定値としては、後者を採用した。この平均計算では、重力計の定数としては東京柿岡間で検定したものをを用い、各年の定数の違いを考慮してある。当時使用した重力計はノースアメリカン重力計であった。また基準点は東京(あるいは東京と精密に結合された千葉)を用いてある。このような測定と平均計算とによる任意の重力点の値の誤差は、

- (1) 基準点の絶対値の誤差
- (2) 重力計定数の誤差
- (3) 網のねじれというか、重力計特有の観測誤差の累積にもとづく誤差

などが考えられる。これらのうち、(1)は全体の重力点が、げたをはくだけで問題はなく、(2)については定数検定によって可能なかぎりは除いてある。結局(3)の影響が残ることになる。新潟地方の今回の測定は、ラコスト重力計により、東京から直接出発して、それを基準としているが、同様な誤差がありうる。そこで、重力値の変化を考えるばあい、重力の絶対値の変化については、0.2 mgal 程度の变化を確認することは困難であるが、測量したある地域内で、一つの区間が他の区間に対して見いだされた相対的变化ならば、ある程度まで信用することができると思われる。このようなことから考慮して、我々は、二等重力測量において0.2mgal 以上の変化が検出されれば、それは有意であろうと判断するつもりであった。あるいは、それが0.1mgal であっても、地域的な一連のつながりをもって、たとえば、その地域において0.1から出発して0.2に達し、ふたたび0.1mgal にもどるような変化が見いだされれば、この0.1mgal の変化も有意であろうと考えるつもりであった。

また新潟平野の軟弱地盤においては、あるいは地震の振動によって、沖積層の圧密が局地的に現われるかもしれないという期待があった。このため1965年3月に、主として新潟市地区において、二等重力測量を実施した。

1-5 磁気測量

国土地理院による組織的な野外磁気測量は、戦後に始められたので、重力と同様に歴史は浅い。しかし、たとえば一等磁気点新発田においては、1951、1954、1960の各年に測定がくりかえされていたし、二等磁気点(約400 km²に1点の割合)においては、1954、1961年の2回の測定があった。磁気測量の反復においては、測定位置を再現できることが重要である。過去の地震で地磁気に変化したという記録は、たとえば松沢武雄教授の教科書に2、3の例があげられているが、その中の代表的な例と見られる伊豆七島新島の地震にもなった地磁気変化にしても、測定点の再現ということでは信頼性がうすい。埋石してない測定点は、たとえ同一測定者であっても、長い期間において訪れれば、記憶はあいまいになっている。地磁気値はわずかの距離だけはなれても、非常に大きな違いを示すことがある。それに加えて、日変化や磁気嵐の外部磁場の絶えまない変化があるから、短時間に測定される値を、長期間にわたって連続的に正確

な値を維持する固定地磁気観測所における観測と比較して、外部磁場の影響を除去した値を求めることには細心の注意が必要である。

もしも永田武教授の唱道したように、地震前に観測される地磁気変化が岩石の磁わい現象によるものであり、それが条件によっては400γに達するものであるならば、第一に、その量が著大であるから、日変化の補正などを問題としない地磁気の変化が見られるはずであった。第二に、岩石にたくわえられたひずみエネルギーは、地震発生とともに急激に解放されて消滅するであろうから、地磁気の変化もまた急激に起るはずであった。永田教授の理論を肯定するにせよ否定するにせよ、とにかく今回の新潟地震は、震源の深さが40kmで、キュリー点をはるかに越えていたうらみはあったのであるが、実証がたえられるチャンスであった。

しかし筆者は温度変化による地磁気の変化も考慮しなければならぬであろうと考えていた。もしも造構造運動の本源がマントル内の対流であるならば、対流によって運ばれた熱エネルギーは、たとえ松沢過程における地殻下部岩石の相変化に使われても、最終的には地熱流の変化分となって、地殻内の温度分布を変えるはずである。もちろんこれは、地熱流を測定することによって直接実証されるのであるが、日本における地熱流の値は最近ようやく組織的に測定が始められたところで、まだ測定点の密度もあらく、くりかえし測定による地熱流変化の決定もこれからの話である。地熱流変化の測定は、測地的な地殻変動とならんで、造構造運動や地震予知のもっとも重要な資料を提供するであろう。地殻にたくわえられたひずみエネルギーが地震によって急激に解消されても、岩石内の熱の伝導はきわめておそいから、温度の急激な変化はあり得ない。このようなことを実証するには、地震直後に磁気測量を行なって、以前の地磁気値が急変したかどうかをまず確かめること、そして地震後しばらくの期間測量をくりかえして、地磁気値がどのように変化していくかを確かめること、二段がまえの測量態勢が必要であろうと考えられたのである。

以上の諸点を考慮して、各種測地的調査の計画がたてられた。実作業は弱体な作業力と天候障害にわざわざされた面はあるが、一応の成果をあげることができた。とくに、変動の連続性を考慮しての今回の調査は、従来の大地震後の復旧測量から一歩前進した大きな収穫であったと筆者は考える。2 mに達する積雪下の標石を掘りあてるなど困難な作業に従事された国土地理院測地部の職員に深く感謝する次第である。また経費の一部を科学

技術庁特別研究促進調整費にあおいだが、調整費による成果がどこまで、建設予算による成果がどこまで、などと簡単に割切ることはいできない。感謝の意を表わすとともに、測地測量による地殻変動は本来そのような性質のものであることもあわせて強調しておきたい。

2. 上下変動について

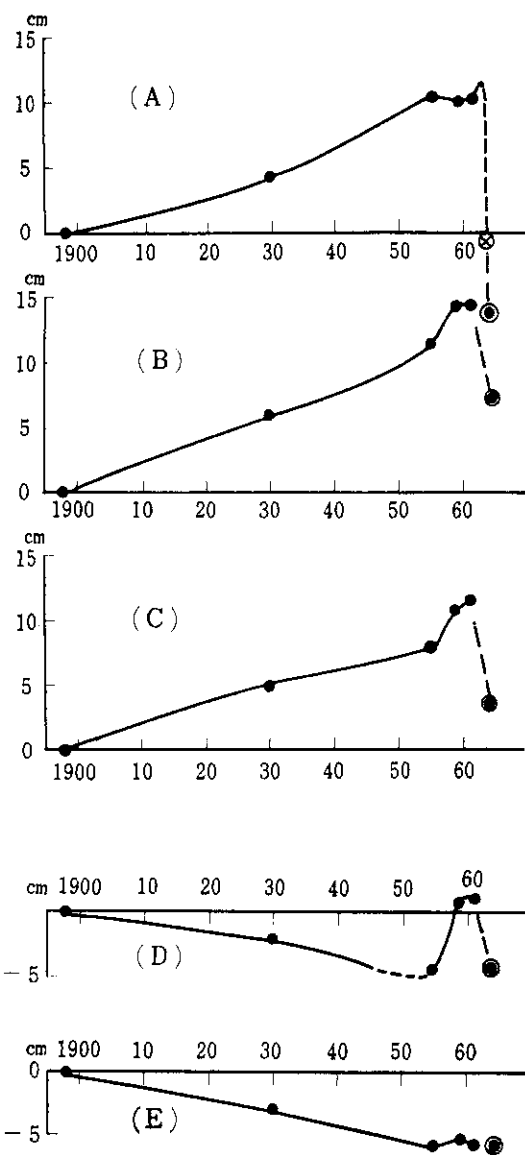
柏崎市から日本海岸に沿って新潟市、新発田市、温海町、鶴岡市、酒田市を経て象潟町にいたる一等水準路線、すなわち水準点No.3742からNo.6587にいたる路線に沿った地殻の上下変動は、新潟地震地盤調査報告⁽⁹⁾にすでに発表されている。この路線のうち、新潟市を中心として巻町から新発田市にいたる区間の変動は、人為的原因にもとづく非常に大きい地盤沈下の影響で、地震前の動き、あるいは地震による動きを、信頼できるほどに分離することができない。

水準測量においては、長い路線または路線環が短時日をもって測量されないために、それらを構成する各区分の測量年代を統一しなければならないのであるが、新潟地震調査とは別個の目的で筆者等が行なっている調整計算は⁽¹⁰⁾、今回の調査区域にまでおよんでいない。しかし柏崎市の水準点No.3742は計算済みで、それによるとこの水準点の上下変動は次表のようにになっている。すなわち1893.8年から1927.9年の34年間に -1.1mm （1911年に標石が改埋されているので、この値は多少疑問がある）1927.9年から1956.5年の29年間に -49.2mm で、過去62年間に合計 50.3mm の沈下となっている。したがって、厳密には不動にはならないが、このていどより小さい量についての議論は避けることにして、一応文献⁽¹⁰⁾の附図2-1に示してあるように、No.3742を仮不動点として話を進める。

水準点No.3742の変動

測量年代	標高	改埋調整	調整標高	変動量
	m	m	m	mm
1893.8	5.5862			-1.1
1911.7		+8.0690	13.6552	
1927.9	13.6541		13.6541	
1955.7		+1.0532	14.7073	-49.2
1956.5	14.6581		14.6581	

この路線のうち、村上市から朝日村を経て鼠ヶ関にいたる約40kmの区間の水準点の上下変動については、東京大学地震研究所坪川家恒教授および国土地理院林哲郎両氏による注目すべき報告がある⁽¹²⁾。すなわち、水準点標高を測定年代順にならべてその変化を調べると、新潟地震の前1898年から1955年ごろまでは、 2.2mm/yr とい



図一 新潟—山形海岸路線における代表的な水準点の高さの変動、A（鼠ヶ関）、B（朝日村）、C（朝日村）、D（加治川村）、E（岩室村）、坪川・小川・林⁽¹²⁾より転載

Changes in height of representative bench marks along the route from Niigata Pref. to Yamagata Pref.

Marks are indicating A(Nezugaseki), D(Kajigawa) and E(Iwamuro). Reprinted from the reference⁽¹²⁾.

ゆるやかな速さで隆起を続けていたこの地域が、地震前の5年ほど前から、隆起の速さがにぶり(鼠ヶ関附近)、あるいは速さが急増し(朝日村)、このような状態のうちに新潟地震が発生した。坪川教授は、地震前の連続的な隆起から地震直前の急変にひき続いていく地殻変動の形が、地震の前兆として予知に結びつくであろうと論じた(図-1参照)。この議論には、1898年から1955年にいたる期間の測量が1930年をふくめてわずかに3回であるために、始めの32年間、後の25年間の途中の変動が不明であること、さらにマグニチュード7.5から想像される地震体積の表面積に比して、やや小に過ぎる区域の変化であることなどの疑問が残る。新潟地震のばあいは、粟島の隆起や海底地形調査による断層の存在などの諸現象から明らかなように、地殻変動の主舞台は海域にあったから、関東大地震で検討された100km四方の広地域についての特徴的なパターンの変化¹³⁾のような研究は不可能である。しかし坪川教授の唱える前兆変動は、水準点の上下変動を論理的に説明しうるために、従来の地震にともなう地殻変動論に一つの転機をもたらしたと考えてよい。

地震後の変動については、地震直後の1964年6月~7月に東大地震研究所によって村上市一勝木間的水準測量が行なわれたほか¹³⁾、国土地理院によって1964年8月~10月、同年12月、1965年9月の合計3回の一等水準測量が柏崎市一象潟町間で実施された¹⁰⁾¹⁴⁾ これらのうち新潟市一鼠ヶ関の上下変動を図-2に総括した。不動点は柏崎市水準点No.3742で、1961年測量値を基準にとっている。

まず地震研究所の測量を見ると、これは区間は短かいが、地震直後に行なわれた点で価値がある。村上市水準点No.6490を不動とすると、水準点No.6498およびNo.6500が約65mmの隆起、勝木の水準点No.6512で約85mmの沈下が見られる(文献(13) Fig.2)。このような短かい区間での大きな相対的変動は、その後に行なわれた国土地理院の測量結果からは見いだすことができないから、あるいは地震直後の地盤の激動期の運動をとらえたのかも知れない。これと関連して地震研究所笠原慶一氏等が、粟島隆起の余効的変動調査の目的で、粟島の内浦および釜谷におかれた検潮儀の記録を、鼠ヶ関、岩船、柏崎における記録と比較して、1964年6月20日から9月までの結果を発表している¹⁵⁾。笠原氏は、内浦および釜谷の地盤は、地震後2、3週間の期間に10数cmから20cmの沈下が進行したと述べている。このようなことを考え合わせると、地震直後の水準測量は、その後の変動速度

一等水準点昇降変動図

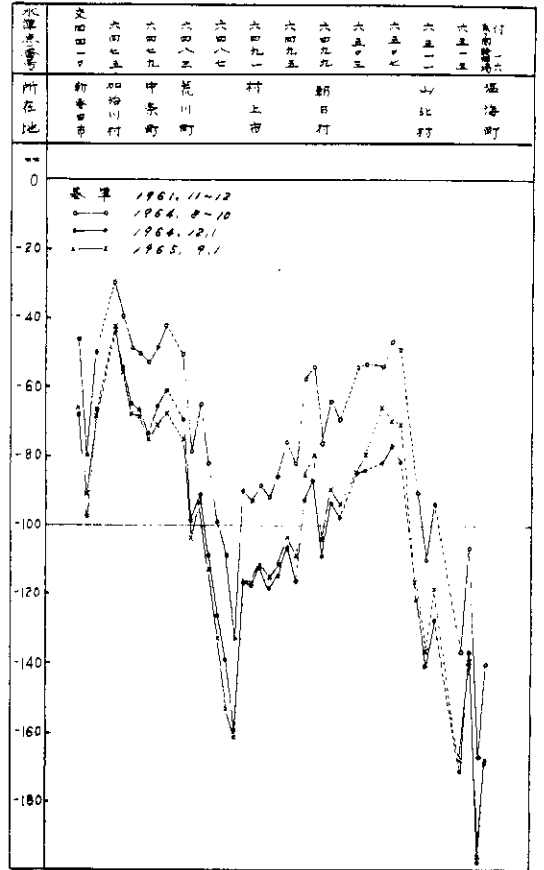
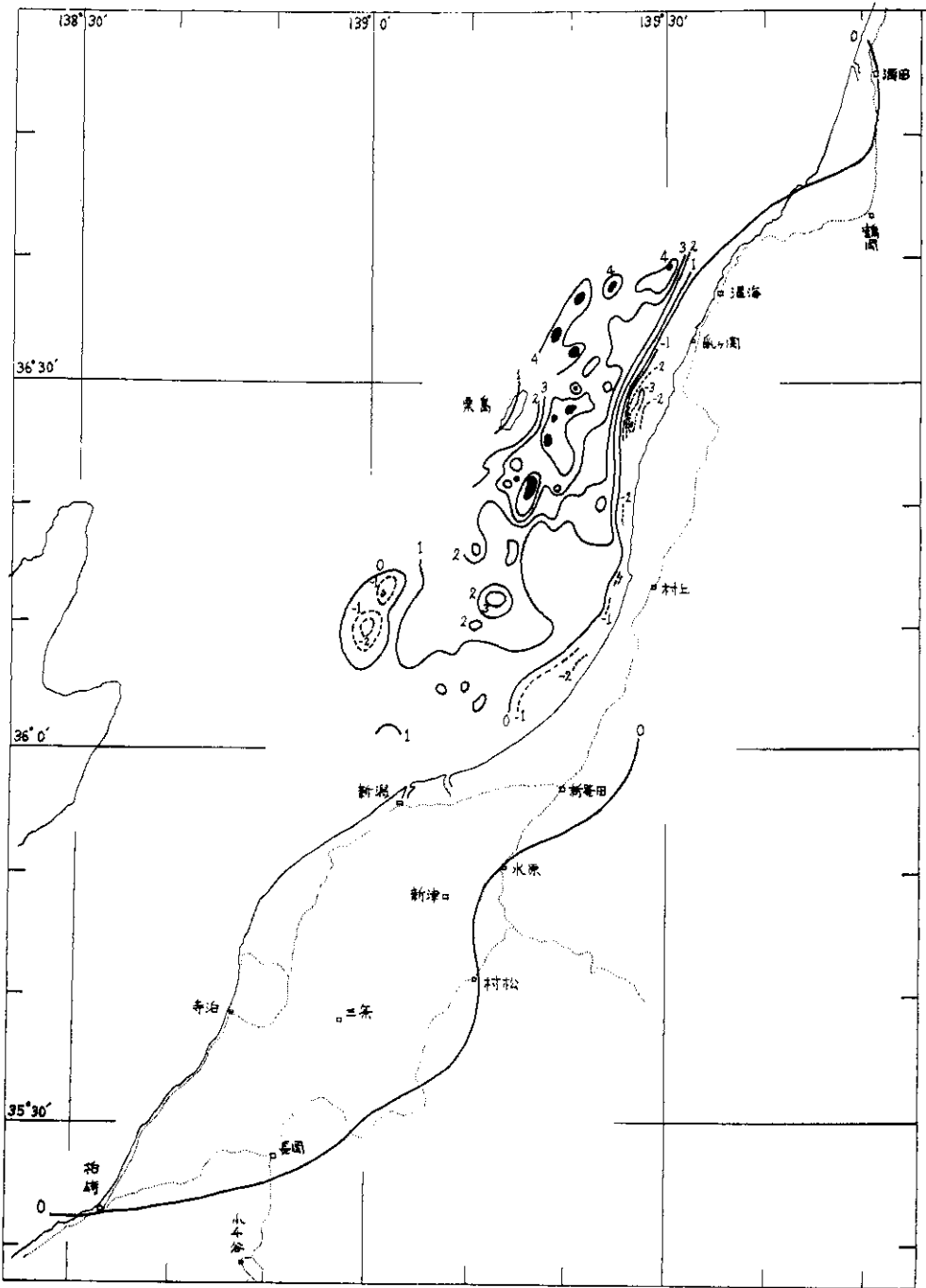


図-2 地震およびその後の水準点上下変動。柏崎水準点No.3742を不動点と仮定。

The accumulative vertical movements of the bench marks nearly at the time of and after the Niigata Earthquake.

The height of the bench mark No.3742 near the Kashiwazaki Mareographic Station is assumed to be constant throughout the duration and the measurement is conducted for a route from Shibata (No.4410) to Nezugaseki.

がにぶって、やや安定した運動に変わったことと比較すると、きわめて特異な運動のように見えるが、実は過度的な地殻変動であったと解釈してよいかも知れない。なお地震研究所の測量で不動点としている水準点No.6490の変動は、その後の国土地理院による3回の測量から求めた変動を見ると、直線的な変動と考えられないために、1964年6月~7月の標高を推定し得ないので図-2から除外されている。



図—3 新潟地震にともなった地殻変動，文献(10),(16),(17),(19)より総括。実線は隆起，点線は沈降（単位m）
 The vertical movement of the earth's crust accompanied by the earthquake;
 compiled from the references(10),(16),(17) and(19). Full line and dotted line show-wrespectively
 mean upheaval and subsidence. Numerical values are shown in m.

図一2に示された新発田市一鼠ヶ関間の水準点は、地震直後の急激な沈下の後も、1964年12月にいたるまでひき続き沈下を示している。これは地震後における地殻の上下変動の一つのタイプであるが、これだけ忠実に追跡されたのは初めてであろう。村上市から朝日村間の水準点は1898年から1961年までは隆起を続け、その総隆起量は平均して12cmから15cmであり、地震直後は7cmから9cm沈下、その後1965年9月までに3.5cmほど沈下し、ほぼ1899年当時の標高にもどったことになる。そして、1964年12月から1965年9月までで、ほぼ沈下がとまり安定の様相を示している。1898年以前の測量はないが、歴史に記録がないことから、とくにいちじるしい海岸線の昇降はなかったのであろう。新潟地震をけいぎとして、過去60年間の運動が逆転するか、それとも再び隆起に転ずるかは、今後の測量の結果を待たなければならないのであるが、出羽丘陵の生成と関連して第三紀褶曲運動が現在も継続されている、すなわち活褶曲が多く見られるといわれる新潟平野周辺の山地の運動は非常に興味深い。同時に、男鹿半島、飛鳥、粟島など一連の地塊が本州に対して、いかなる運動を示すかも、定期的に監視されるべき性質のものであろうと考える。

新潟地震調査において地殻の上下変動を対象としたものには、水準測量以外には、柏崎、輪島の驗潮記録を鼠ヶ関のそれと比較して、鼠ヶ関の地盤変動を推定した驗潮場における平均海面変化の調査¹⁰⁾、新潟県から山形県にかけての海岸の観察¹¹⁾、粟島における地震研究所による海岸隆起の調査¹²⁾および海上保安庁水路部による水準測量¹³⁾、同じく水路部による粟島東方海底地形調査¹⁴⁾がある。これらは最初の驗潮を除いて、測地測量的な調査にくらべて精度は一般に低い。しかし、新潟地震によってこわった地殻変動を概観するには、これらを総合して考える必要がある。ところが、粟島対岸にあたる本州側の水準路線は新発田、村上、温海、鶴岡、酒田を連ねる海岸に近い線で、しかもその上下変動量は村上市、朝日村で10cm前後、温海町、鼠ヶ関附近で10~20cmていどの沈下である。また海岸観察においても、早川、桑川附近で30~40cm 驗潮場のある岩船、加茂港で0cm、由良で8cmと、これまた小さな沈下量を示している。これに対して海底地形調査では、海岸線にきわめて近いところに、それにはほぼ平行して等変動線の0m線が走り、粟島の東方海底に1m間隔の等変動線が描かれ、最大5mを越える隆起地帯が北北東から南南西方向に広がっている。さらに、きわめて狭小な0m線と本州海岸の間に、やはり1mないし2mの沈降地帯がはさまれている

(図一3参照)。

海底地形調査による0m変動線を一応信用すると、この線の北は加茂港、酒田市に延長されるが、南限は新潟平野にかかるために不明である。一方別の0線は柏崎、長岡南部、栃尾、村松、水原を通過して新発田南部を通過する。これは、ほぼ新潟平野とそれをかこむ川地との境界線に沿っている。粟島東方では、0線を境として西側が隆起、東側が沈下となっている。地震にともなう地殻変動では、隆起と沈降の地域が隣接して現われ、しかもしばしばそれらの変動量と面積についてのアンバランスが見られるのであるが、今回もそれを実証したわけである。今回の変動についての地質学的な解釈は、茂木昭夫氏等が詳細に行なっている¹⁵⁾、その論拠となっている弥彦山塊、角田山、粟島を連ねる一線、および信濃川河口に沿った断層線と今回の狭小な沈降帯を連ねる一線などが、走向上よく一致しているという地形上の特徴、さらには、それらの構造岩石が地質学的にもよく類似しているなどの諸事実は、長岡から北信濃川流域の地震と、能登、佐渡、両羽地域の地震とが、発生位置、規模、振動の伝わり方などについて、判然と区別されるという事実(たとえば今村明恒教授²⁰⁾)と背反するように思われるのであるが、この点については、なお資料をそろえて、じゅうぶんな検討をする必要があろう。

3. 重力変化について

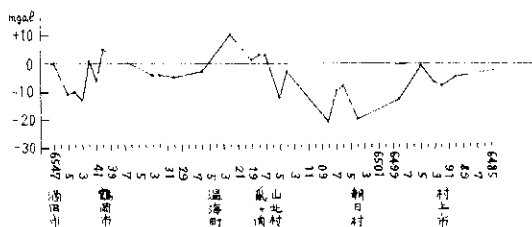
新潟地震地盤変動調査報告(既出)に、重力測量の結果について注目すべき事実として、

(1) 0.1mgal以上の重力変化の出ている地域が2箇所あり、一つは粟島対岸の水準点6508~6498の区間であり、他は4415~4453などの新潟地盤沈下地帯の部分である。

(2) 粟島対岸の重力変化は0.15mgal 程度の振幅の波が現われているが、これは高さの変動では説明できないことから、注目すべき事実である。

の二点が強調されている。ここでは第二の問題点にしぼって、もう少し詳細に検討してみよう。

前記調査報告では、重力の不動点として水準点No.6547を採用している。この水準点は酒田市にあり、水準測量の結果で明らかのように、地震によって沈下を受けているが、その量は重力値を左右するほどの大きさでないから、重力値の不動点として適当である。その他の水準点においても、重力の測定値を左右するほどの大きな上下変動はないが、水準測量の結果もわかったので、一応水準点の上下変動による重力の変化分を補正し、その結果を図一4に示す。重力測量と水準測量との測量年代の対



図—4 1954年7月—1964年11月間における重力変化
(同期間の水準点の高さの変動は補正済み、また酒田市の重力値を基準とする)

Changes in gravity of the bench marks along the leveling route from Murakami (No. 6485) to Sakata (No. 6547) during the period July 1954—November 1964.

The gravity at the bench mark No. 6547 is assumed to be constant throughout the duration and the change in gravity due to the change in height at the respective bench marks has been corrected.

図は、次表にあらえられるように、このような測定の常識からすれば、ほとんど一致していると言えるので、この表であらえられる年代よりもくわしい測量時期の統一は考えていない。

重 力 測 量	水 準 測 量
1954年7月	1955年
1964年11~12月	1964年8~10月

図—4 において不動点とした酒田市No. 6547から見ると、準周期的な重力変化の波があり、その最小は東田川郡No. 6544、鶴岡市郊外No. 6531、朝日村No. 6504 附近にあり、最大は鶴岡市No. 4540、酒海町郊外No. 6522 にあり、周期は最初の波で28~36km、次の波では54kmでいどとなっている。このことは、30ないし50km 程度の波長で、地下構造の変化があったことを意味するものである。重力変化のみでは、地下構造の変化があった深さを推定することは不可能であるが、新潟地震の震源の深さが40km であったことを考え合わせると、40km 以深の深さで波長40km に相当する質量の移動が、たくわえられたひずみエネルギー—解消にもなつて生じたと考えられることは、それほど無理はないと思われる。地下rcmの深さのところ半径R cm の球形塊を考え、その球形塊の周囲物質に対する密度差を $\Delta\rho$ とすると、球形塊の真上の地表点における重力異常は、

$$\Delta g = \frac{4}{3} \pi k^2 R^2 \Delta \rho \frac{1}{r^2}$$

であらえられる。 $k^2 = 6.673 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{g sec}^2$ は万有引力定数である。今、 $r = 60 \text{km} = 6 \times 10^6 \text{cm}$ 、 $R = 20 \text{km} = 2 \times 10^6 \text{cm}$ として、 Δg を mgal 単位で表わせば、

$$\Delta g = 62.0 \times \Delta \rho \text{ mgal}$$

となる。ここで、球形塊の半径20km は重力変化の地表面における波長30~50km に対応するものである。またその深さを60km としたのは、特別な意味があるわけではなく、このていどの深さに、このくらいの球形塊を考えたら密度変化はどのくらいでよいかを見るためである。上式で $\Delta g = 0.15 \text{mgal}$ とすれば、 $\Delta \rho$ はわずかに $0.002 \text{g}/\text{cm}^3$ である。

もし地表面下60kmの深さに考えた半径20km という非常に大きな球形塊全体の密度変化が不合理であるというなら、地表面下40km の深さにおける薄層の密度変化を考えてもよい、坪井忠二教授のよく知られた公式を使って、波長をやはり40km にとると、地表面における重力変化0.15mgal に相当する密度変化は、薄層の厚さを18 km とすれば $0.1 \text{g}/\text{cm}^3$ となる。この公式は、密度が変化する層を面にぎょう縮しているから、薄層の厚さにはおのずから制限がある。ここに求めた数値も、密度変化のオーダー推測の域をでない。

いずれにしても、上の考え方は、ひずみエネルギーがたくわえられ、破壊をひき起すのは地殻であるが、地震にもなった地殻とマントル間の圧力のバランスが急激な変化を受け、局所的な地殻またはマントル物質の相転換、もしくはマントル物質の流出入が生じ、その結果として局所的な密度分布の変化を期待しているわけである。このような地震の場のモデルは、震源の深さが40km 程度の地震を対象としている（やや深地震および深発地震に対しては、ふつうのマントル状態ではひずみエネルギーの蓄積を期待することができない）。発震機構として松沢過程²¹⁾を採用することは、熱エネルギーのバランスシートが解決されていないために、まだ早すぎる。今日においては、松沢過程はもちろんとし、いろいろな可能性のある発震機構を念頭におきながらも、一つ一つの、そして、できるだけ異なった情報を確実に積みあげていくことが重要である。

村上市から新発田市までは、新潟平野の地盤沈下の影響は大きくないのであるが、水準点標石のほとんどが移転改埋されているので、重力の測定値は正確であっても、その変動量は信用できない。新潟平野を通りこして弥彦村、長岡市、柏崎市をふくむ水準路線における重力

の変化量は $+0.1\sim 0.2\text{mgal}$ となっている。これは、村上市から酒田市にかけての地域が波動はしているものの、全体としてマイナスの変化を示していたことと比較して、いちじるしい対照となっている。

地質学的に見ると、村上市から温海町にかけては出羽丘陵の南端である朝日山地に属し、深成岩(旧火成岩)が露出する第三紀層であり、弥彦村から柏崎市にかけては、やはり第三紀層の地塊である。新潟平野をかこむこれらの山地では多くの褶曲構造が見られ、しかも活褶曲であることが地質学者によって支持されている²²⁾。そして、褶曲の原因は圧縮作用であるとも、また基盤が地塊ごとに差別的に隆起運動をするためであるとも解釈されている。地震にともなう急激な地殻内の力のバランスの破壊は、個々の地塊に異なった運動をあたえるであろうことは、じゅうぶんに想像されるのであるが、今回の重力測量の結果を上下変動で説明することはできないことは、すでに述べたとおりである。また、地表面に近い地殻内で、しかも第三紀層に属する古い岩石から成る地塊の内部で、密度分布の変化が行なわれることも考えがたい。地塊の変位があったとすれば、それは上下変動として現われるはずであった。したがって、今回の重力測量の結果からは、地表面下40km以上の深さのマントル上部において、マントル物質が本州海岸に沿った海底最大沈降帯を境界として、東側から西側へ流入したか(粟島の重力変化が測定で実証されないで、これは単なる推定にすぎない。隆起と沈下の傾向と論理的に一致するというだけの根拠である)、あるいは新潟平野を境界として、その地下のマントル物質が北東側から南西側に流入したものであり、いずれにしても、その移動範囲の表面積は北東から南西に長軸をもつ幅約40km長さ約100kmの長方形にかぎられた地域であるとして、概略の説明はできそうに思われる。しかし、いずれが有利であるかといえ、(1)村上市—酒田市間で、すでに重力変化の波動がくりかえされていること、(2)粟島およびその東方海底でいちじるしい隆起があり、海岸に近い海底と海岸内陸にかけての沈降が見いだされたこと、の二つの事実から、本州海岸に沿って測定された0m上下変動線を境界として、マントル物質が東側の本州から西側の粟島方向へ流出した形式の方が可能性が大きい。このような議論は推測の域を脱することができないが、ともかく新潟地震調査によって、重力変化の実在性が確かめられたことは、貴重な資料となったことは事実である。

4. 地磁気変化について

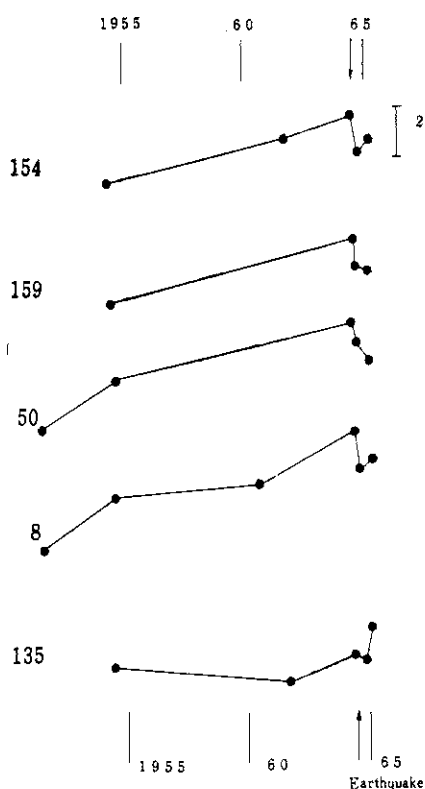
新潟地震にともなった地磁気変化の調査は、塩谷附近

における地磁気研究所の1964年6月20日から7月8日に行なわれた連続観測²³⁾、水路部による海上磁気測量²⁴⁾、国土地理院による前後3回にわたる磁気測量などが行なわれた。これらの中で国土地理院の調査は、地磁気の性質と野外磁気測量で期待できる精度をじゅうぶんに考慮した上での計画であった。その結果は田島稔氏²⁵⁾、藤田尚美氏²⁶⁾によって発表されている。とくに後者による報告は、資料を詳細に検討しており、その結論はほとんど確実であると思われるので、それをここに再録することにす。すなわち彼の結論は、

- I 新潟附近の地磁気の変動のうち、地震の影響と思われるものは $20\gamma\sim 30\gamma$ (または $2'\sim 3'$)とみられる。
- II 地震前に発生した磁気モーメントは単一ではなく、そのうち、新潟田の東南に上向きに発生した磁気モーメントは、地震後下向きに転じたとみられる。
- III 偏角については、地震前10年間、正常永年変化に比して、永年変化が大き過ぎたものは、地震により偏角値が減少し、小さ過ぎたものは増加した。地震前、地震後の異常永年変化量の間には逆相関が成立つ。これが一般に成り立つものかどうかかわからないが、この性質は地磁気変化と地震発生とを関連づける重要なものと思われる。

ということであった。

これは、地震にともなって地磁気の変化が起りうるかという疑問に初めて肯定の答が出されたものとして非常に貴重なものである。地磁気変化の機構としては温度によるばあいと圧力によるばあいを考え、いずれでも説明できるとし、「地震後の地磁気変化が割合緩やかなこと、新潟附近の異常な熱流量等から一見温度に原因を求めたいが、これだけの資料からは、新潟地震の原因をいづれかに断定することは出来ない」と述べている。この点について筆者は、地震後の地磁気変化がゆるやかに進行している(ことこのことは今後の磁気測量によって、さらに確かめねばならないのであるが)に重点をおき、温度原因論を考えている(図—5参照)。さらに、これはあくまで地震にともなった地磁気変化の原因であって、「新潟地震の原因」ではない、すなわち、地磁気変化は地震の二次効果であったらうと考えている。もし圧力説をとると、地殻を構成する岩石が強磁性体としての性質を失なう深さは約20kmとされているから、地表面から約20kmの深さまでの地殻において、ひずみエネルギーがたくわえられていたことを認めなければならないが、新潟地震の震源の深さは40kmであり、この深さでは岩石磁場の変化は考えられない。



図一 地震ともなる代表的な地磁気偏角の変動例。154 (塩谷), 159 (小国), 50 (両津), 8 (新発田) 135 (中野小屋), 藤田(26)より転載

Typical variations of geomagnetic declination accompanying the earthquake. 154 at Shioya, 159 at Oguni, 50 at Ryozu, and 135 at Nakano-koya.

Reprinted from the reference (26). Figures denote the angles in minutes at corresponding stations.

新潟、山形両県下で今回の地震の舞台となった地域には、幅5~10km、長さ約30kmの地塊と背斜構造が配列していることが、地質学的に確かめられている。地表面近く、このような構造パターンが、乱流論における細胞としての厚さにも適用できるなら、一辺30kmていどの立方体の集合組織を仮定できよう。マントル上部からの圧力は個々の細胞に異った作用をおよぼし、これにもとづいて、比較的浅い地殻にひずみがたくわえられる可能性はある。しかしこのばあいには、発生する地震の震源は浅く、地殻変動の範囲も局地的となる。海底地形変化をふくめた上下変動において、すでに確かめられたように、今回の地震では幅約40km、長さ約100kmにおよぶ長方形区域の地下が、運動に参加しているのである

から、ひずみエネルギーの主要部分がたくわえられていたのは、やはり震源の深さ40kmをはさんで、30ないし50kmの間の地殻とマントルとの境界付近であったと思われる。この附近での異常熱エネルギーは、しだいに地殻上層にじみでて、長い期間には、その岩石磁場を変化させるであろう。そして、藤田、田島両氏が計算したように²⁷⁾、地表面下20kmていどの深さに仮定したキュリー点等温層における温度変化が1°C/yrぐらゐに達することによって、測定された2,3 γ/yrの地磁気の変化を説明することもできよう(ただし、1°C/yrという大きな温度変化の存在を証明することは、きわめて困難であると思われる)。しかし、これは地震そのものとは別である。発震の機構は、さらに深いところにあったはずである。地震が発生した後は、地殻とマントル層との境界付近における熱エネルギー源が、消失または弱化し、それともなつて地殻中の異常熱の伝導も減少するから、地表面における地磁気はゆっくりと減少または増加していくであろう。しかしながら、このような議論はあくまで仮説であり、地熱流の変化を測定することによって、実証されるべき性質のものである。

それにしても、今回の新潟地震における地殻変動の測地学的調査は、上下、重力、地磁気という三種類の変化の情報にあたえ、マントル上部と地殻との関連性について、かなり明確なイメージをあたえることができたことは、この報告にふくまれる多くの推論や仮定を除外して、きわめて高く評価されるものと考えられるのである。終りにあたり、この報告の草稿を検討していただいた国土地理院鈴木弘道、田島稔両氏に感謝したい。鈴木氏には、重力の平均計算と、その誤差について御教示願ったことを、そのまま採用してある。資料の整理にも労をわずらわした。また、田島氏の批判については、そのまま附記として、次にあげることにした。筆者の報告は門外かんの推論であり、田島氏の批判は地磁気専門家の推論であると思われるからである。もちろん、氏の今後における研究によって、そのすじ書きは変えられるかもしれないが、現時点においては価値がある。

附記

(田島稔氏の批判—昭和41年1月25日)

私が現在考えている地震と地磁気との関係は、

- (1) はじめにある深さに異常熱流があたえられる。
- (2) それは当然おのおのの深さでの等温面を変動させる。
- (3) (2)は当然ながら thermal stress を各層に生ずる。すなわち、局所的な geothermal fluctuation 必は

然的に新しい stress を生むし、また相当広い範囲で地熱の上昇があったばあい、地殻内の異なった岩石は異なった linear thermal expansion coefficient をもっているから(温度の変化による係数の変化もまた大きい)*そのようなばあいでも thermal stress は発生する。* M. Shima: Thermal Elasticity

(4) したがって地磁気の変化は、温度による量と、それにとまって必然的に発生する thermal stress による inverse effect of magnetostriction を考えるべきである。

(5) 新潟のばあい、深さが40kmであったとしても、20kmより浅いところで何らの thermal stress の発生、または消滅がなかったという考えには同意できません〔この点については筆者の考えを多少誤解しているようである〕。

(6) 坪川、林両氏らの地表での水準測量の結果も、地下の温度変化のみによる単なる線膨脹係数の計算だけではなく、thermal elasticity を考慮した地表の変動を考えるべきではないかと思えます。

(7) 地震後、温度がゆっくり冷えるならば、それともなう thermal stress もまたあるわけで、地震の前も後も、やはり両者をこみに考えたい。

参考文献

(1) 檀原毅: 水準及三角測量, 国際地球内部開発計画資料, 第1巻, UMP シンポジウム講演集, 61—74, 昭和37年
 (2) 大日本地震資料, 第三巻, 文部省震災予防評議会
 (3) 新潟県水産試験場: 粟島附近の海象の変化に関する調査研究報告: 1965
 (4) F. F. Ceely: Simultaneous Adjustment of Angular and Distance Measurements; Report of the Annual Meeting of the A. G. U., 1960
 (5) 新潟地震にともなう水平変動(序報), 新潟地震地盤変動調査報告, 建設省国土地理院, 25—27, 1965
 (6) T. Okuda: On the Change of Local Geoid in the Southwestern Part of Japan; Bull. G. S. I., Vol. II, Part 4, 1951.
 (7) J. D. Boulanger: On secular gravity changes; I. Internationales Symposium über Rezente Erdkrustenbewegungen vom 21. bis 26. Mai 1962 in Leipzig, DDR, 203—208, 1962
 (8) 鈴木弘道: 日本国内の重力旧測定値について, 測地学会第24回講演会, 昭和40年

(9) T. Matuzawa: Study of Earthquakes; 47—50, 1964.
 (10) 水準測量および驗潮: 新潟地震地盤変動調査報告: (前出), 2—24, 1965
 (11) 檀原毅, 広部正信: 日本における過去60年間の上下変動 I 測地学会誌, 第10巻, 6—13, 1964; II 同誌, 第10巻, 61—70, 1964; III 同誌, 第10巻, 71—82, 1964.
 (12) I. Tsubokawa, Y. Ogawa & T. Hayashi: Crustal Movements before and after the Niigata Earthquake; 測地学会誌, 第10巻, 165—171, 1964
 (13) 岡田惇, 井筒屋貞勝: 新潟県北部の地殻変動; 東京大学地震研究所, 新潟地震調査概報, 63—66 昭和39年
 (14) 昭和40年9月 新潟地方地盤変動調査測量に関する速報, 建設省国土地理院, 昭和40年
 (15) 笠原慶一, 佐々木幸一, 松本滋夫: 粟島隆起の余効的変動——潮位の連続観測による——; 東京大学地震研究所, 新潟地震調査概報, 101—105 昭和39年: その後の調査をふくめての発表は, 同地震研究所談話会
 (16) 茂木清夫: 新潟地震調査報告——村上一加茂沿岸の地変; 東京大学地震研究所, 新潟地震調査概報, 46—51, 昭和39年
 (17) 中村一明, 笠原慶一, 松田時彦: 新潟地震による粟島の地変; 東京大学地震研究所, 新潟地震調査概報, 73—90, 昭和39年
 (18) 粟島の水準測量成果について: 海上保安庁水路部報告(科学技術庁国立防災科学技術センター連絡協議会), 昭和40年
 (19) 茂木昭夫, 川村文三郎, 岩淵義郎, 金田一夫: 新潟地震による粟島付近海底の変動について; 海上保安庁水路部, 新潟地震調査報告, 昭和40年
 (20) 今村明恒: 地震学, 明治38年
 (21) T. Matuzawa: (前出), 181—202
 (22) 森本良平, 木村敏雄: 新潟地震の地質学的背景 東京大学地震研究所, 新潟地震調査概報, 67—69, 1964
 (23) 行武毅, 萩原幸男, 笹井洋一, 渡部暉彦: 新潟地震の際の地磁気変化調査; 同上概報, 52—57, 1964
 (24) 歌代慎吉, 荻野卓司, 近藤忠: 新潟地震に伴う地磁気の変化について; 海上保安庁水路部, 新潟地震調査報告, 昭和40年
 (25) 田島稔: 日本(特に新潟地方)における地磁気永

- 年変化の異常分布；建設省国土地理院，新潟地震地
殻変動調査報告 38—52, 1965
- 26 藤田尚美：新潟地震に伴なう地磁気の変動；測地
学会誌，第11巻，8—25, 1965
- 27 田島稔，藤田尚美：日本における地磁気永年変化
局所異常について；測地学会第24回講演会，昭和40
年