

## 1964年新潟地震による地塊の傾動と 信濃川地震帯のテクトニクス

新潟大学大学院自然科学研究科\* 河内 一 男  
新潟大学積雪地域災害研究センター\*\* 大木 靖 衛

### Tilting of Land Blocks due to the 1964 Niigata Earthquake and its Seismo-Tectonic Bearings Connected with the Shinano River Seismic Zone

Kazuo KAWAUCHI

Graduate School of Science and Technology, Niigata University  
Ikarashi-ninocho, Niigata 950-21, Japan

Yasue ŌKI

Research Institute for Hazards in Snowy Area, Niigata University,  
Ikarashi-ninocho, Niigata 950-21, Japan

(Received May 5, 1997; Accepted October 8, 1997)

The vertical movement of the land blocks by the 1964 Niigata earthquake of  $M 7.5$  is analyzed by the Miyabe's method. In the 1964 Niigata earthquake, for the period of 1961-1964, the tilting of the Honshu land block along the levelling route between Murakami and Atsumi was by  $3.2''$  to  $N80^\circ W$ . Considering the tilting upheaval at Awashima Island, this result indicates that the land block of the Honshu side slipped under the Awashima Island by the high-angle fault dipping westward by the earthquake. Tilting toward the west by the Niigata earthquake is the same with the topographical feature along the Shinano River Seismic Zone where the crust is shortened by the thrust faults and foldings. Estimated rate of shortening is  $1.2 \text{ cm/yr}$ - $1.4 \text{ cm/yr}$ . It is presumed that the Shinano River Seismic Zone is the inland portion of the collision plate boundary between the Okhotsk Plate and the Eurasian Plate.

Key words: Tilting of land block, Miyabe's method, Niigata earthquake, Topographical feature, Shinano River Seismic Zone.

#### §1. はじめに

1964年新潟地震 ( $M 7.5$ ) 前・後における本州側の水準変動解析については, Tsubokawa *et al.* (1965), 檀原 (1973), 笠原 (1973) らによる報告がある。これらは深部断層面でのスリップが新潟地震の前兆として発生していた可能性を示唆している。しかし、このとき示された本州側地塊の沈降と西方の粟島を載せた日本海側地塊の隆起という変動像は、新潟-山形県境の地塊が第四紀後期において、もっぱら隆起を続けてきたとする地形・地質的状况 [例えば、貝塚 (1977), 島津 (1989)] と一致して

いない。また、日本海東縁部陸域側の変動は、太平洋側のプレート境界の陸域で認められている地震間沈降・地震時隆起という変動パターンと一致しない。一方、新潟地震の震源断層についてはいくつかのモデルがあり [例えば、Abe (1975), Satake and Abe (1984)], それと関連して北米・ユーラシアのプレート境界 [中村 (1983), 小林 (1983)] の位置や性質もいまだ不鮮明な部分が少なくない。

筆者らは、上述の問題に関心をもって、国土地理院の測量データをあらためて吟味し、1964年新潟地震の前後の垂直変動を再検証した。その結果、粟島をのせた日本海側の地塊の西方への傾動と同様に、本州側地塊も西

\* \*\* 〒950-21 新潟市五十嵐二の町

方へ傾動していたことが分かった。本論では、この本州側の傾動運動解析の結果を報告するとともに、信濃川地震帯のテクトニクスと日本海東縁のプレート境界について議論する。

§ 2. 国土地理院一等水準点資料

2.1 柏崎～酒田間の水準点路線

Fig. 1 は柏崎～酒田間における、1898年の測量開始から新潟地震後の1966年までの改測状況の早見図である。資料は国土地理院発行の一等水準点成果表および新潟地震地盤変動調査報告による。図は各測量について、縦軸に測量の時期を、横軸に柏崎～酒田の路線をとり、測量の状況を概念的に示している。この路線のうち、B.M. 4438 (新潟県岩室村) (B.M. は標石番号, bench mark の略)～B.M. 6475 (同新潟田市) の区間の改測回数が多いのは、当時新潟市付近で問題になっていた地盤沈下を調査することを目的に、改測が1957年からおおむね年に2回のペースで行われたことによる。新潟地震の震央に近い区間のうち、新潟県側のB.M. 4410 (新潟県新潟田市)～B.M. 6518 (山形県温海町鼠ヶ関) 間では、地震前の1955年、1959年および1961年と地震直後の1964年に改測が行われている。なお、本論で示す変動量は全て柏崎験潮所を仮不動点として換算した値で

ある。

2.2 累積変動

Fig. 2 は柏崎～酒田全区間の1898年(一部1899年)～1985年間の累積変動図である。ただし、1955年～1966年の新潟地震を挟む時期の変動は、新潟市付近の地盤沈下と新潟地震による変動が大きく、永年変化とは同列に扱えない。このため、図では1955～1966年間の変動量が0であったようにして示してある。なお、1955～1966年間の変動については別に次節以降で述べる。この累積変動図によれば、柏崎験潮所に対して、越後平野は大局的には6 mm/yr ほどの速さで沈降し、新潟～山形県境の葡萄山塊は3 mm/yr ほどの速さで隆起している。葡萄山塊の継続的な隆起は、この地域の東方に位置する出羽山地の、最大で5 mm/yr と見積もられている曲隆運動 [檀原(1971), 佐藤(1995)] と一致している。

§ 3. 新潟市～鼠ヶ関間の新潟地震前・時の垂直変動

3.1 データの吟味

新潟県新潟田市～山形県温海町(鼠ヶ関)間では地震前の1955年、1959年および1961年と1964年の地震直後に改測が行われた。このうち1964年新潟地震の直後の7～9月に行われた改測データには、標石の脱落等に

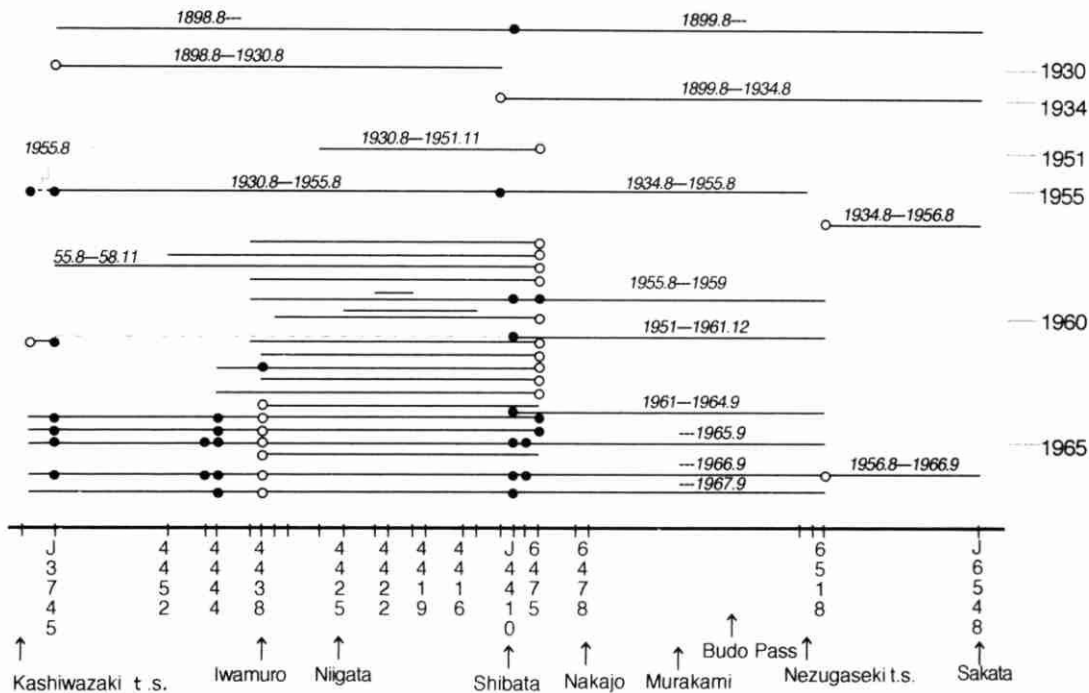


Fig. 1. Diagram showing periods and sections of re-levellings. Open circles are local reference bench marks of each levelling and solid circles are connecting points of different routes.

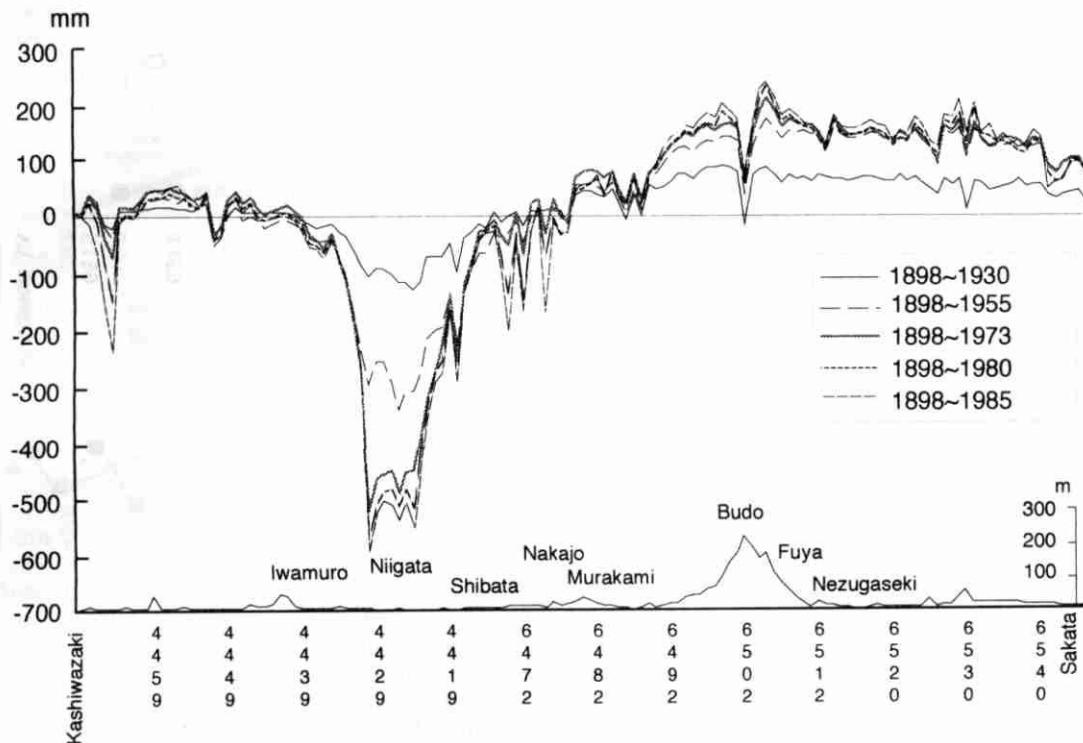


Fig. 2. Accumulation curves of secular vertical movements for the periods of 1898-1930, 1898-1955, 1898-1973, 1898-1980 and 1898-1985. Topographical cross section along the level route from Kashiwazaki to Sakata is given. The data for the period of 1955-1966 are excluded, because they were disturbed seriously by sudden change due to the 1964 Niigata earthquake or by the man-made subsidence in Niigata and its vicinities. Careful examinations for the disturbance of 1961-1964 of the level route from Shibata to Nezugaseki is given in Fig. 3.

よる欠測点が6点ある。成果表に載っているデータにはこのほかに、異常に大きい変動値を示す点が少なからず含まれている。本研究でデータを解析する際には、隣の標石と50 mm以上の差を示す12点を地震時の山地崩壊〔尾張・駒村(1965)〕や地盤の液状化などによる局所的な地変の影響を受けたものと判断して除外した(Fig. 3)。したがって、この間の49水準点のうち、1961年-1964年の事故点は合計18点になる。

### 3.2 地震前・地震時の垂直変動

Fig. 4は上述のデータの吟味を行った上で、1955年から1964年新潟地震直後の間の新発田～鼠ヶ関間の変動を示したものである。またB.M. 6488から鼠ヶ関験潮所までの区間のうち、前節で事故点としたもの以外の各水準点の、1899年から1985年までの経年変化を三つの地域に分けてFig. 5に示す。なお、説明の便宜上、1955年から1964年の間に4回行われた改測で得られる三つの期間のうち、1955年-1959年をI期、1959年-1961年をII期、1961年-1964年(地震による変動を含んでいる)をIII期と呼ぶことにする。

Fig. 4およびFig. 5をもとに、各期の変動の特徴をまとめると次のようになる。

- 1) I期では、1899年の測量開始以来1955年の改測まで続いていた継続的隆起の速度(蒲萄峠付近で約3 mm/yr)を、大幅に上回る異常な速度(蒲萄峠付近で約20 mm/yr)で隆起した。
- 2) II期では、反転して平均25 mm/yrの異常に大きい速度(最大は蒲萄峠付近で約35 mm/yr)で沈降した。
- 3) I期、II期ともにルート中央の蒲萄峠周辺地域が最も大きな変動を示した。
- 4) III期の変動では、村上市周辺と鼠ヶ関周辺地域の沈降量がとくに大きく、その間の蒲萄峠周辺地域は沈降量が相対的に少ない。
- 5) 村上市周辺と鼠ヶ関周辺地域は、I期(隆起)とII期(沈降)の各時期においての変動量は小さかったが、III期では大きく変動(沈降)した。反対に、蒲萄峠周辺地域はI・II期の前兆的変動は大きかったが、III期の変動は小さかった。

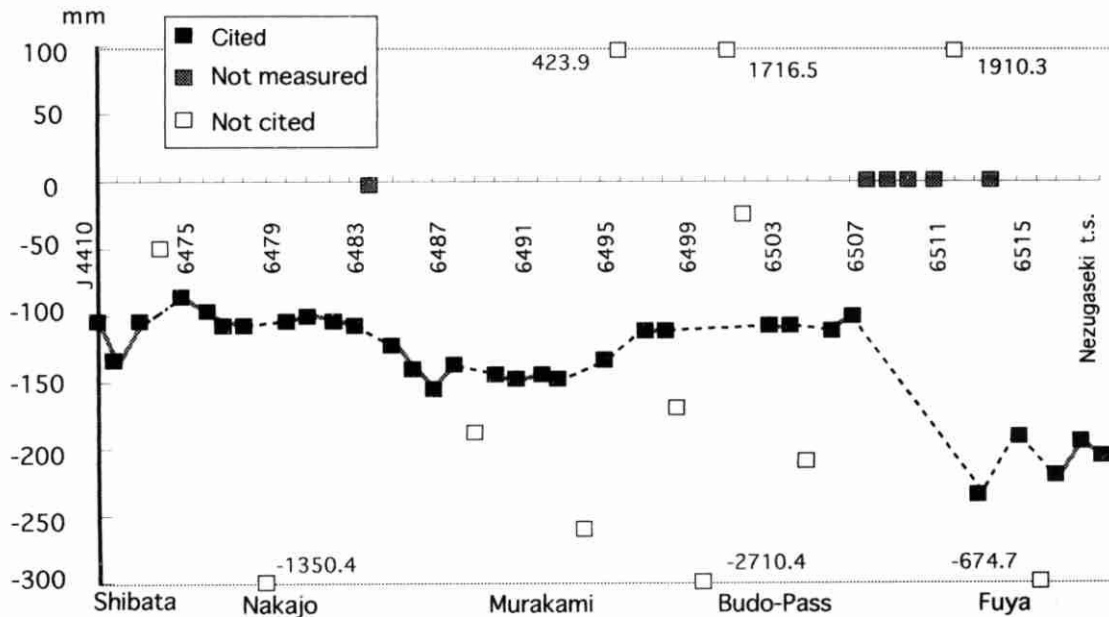


Fig. 3. Close examination of the levelling data between Shibata and Nezugaseki for the periods of 1961-1964. Re-levellings of 6 bench marks shown by gray squares were not listed due to accident and the data of 12 bench marks are excluded for the reason that change of heights of the bench marks were disturbed by land failers or liquefaction caused by the Niigata earthquake. Remaining 31 data of the level route from Shibata to Nezugaseki provide a significant figure of vertical crustal movements caused by the 1964 Niigata earthquake.

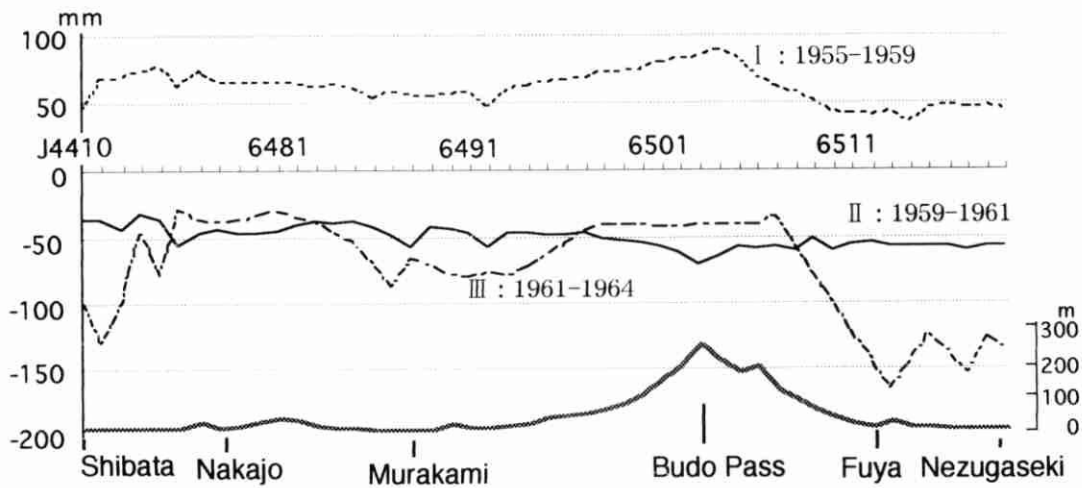


Fig. 4. Vertical movements for the periods of 1955-1959, 1959-1961 and 1961-1964 in compared with topographical cross section of the level route from Shibata to Nezugaseki.

なお、I・II期の変動についてはデータそのものに対する懐疑的な意見もある〔例えば、茂木(1982)、佐藤(1979)〕。しかし、青木(1982)は越後平野周辺の地盤変動に「地盤のバルス」と呼ばれている3~4年周期の広域の上昇・沈降運動の脈動があることを指摘しており、このI・II期の変動が有意の前兆的構造運動である可能

性は否定できないと考える。

#### §4. 垂直変動データを利用した傾動解析

垂直方向のみの変動量を示す水準測量データを、水準点の位置をx,y座標軸に、垂直変動量をz座標軸にとることによって、3次元のデータとしてとらえて地塊の傾

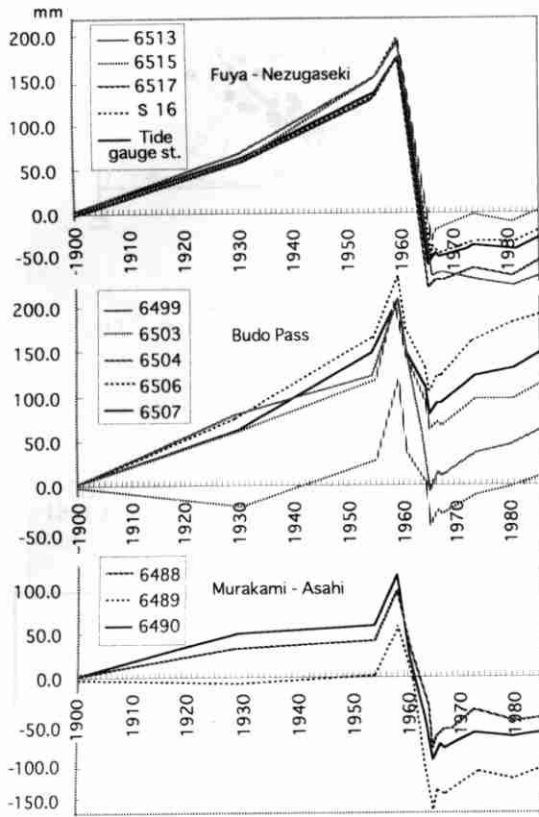


Fig. 5. Change of heights of bench marks from Murakami to Nezugaseki for the periods of 1899-1985.

動運動を読みとることができる [宮部(1936)]. これには、同一の地塊上にあると考えられる領域内から、任意に選んだ2点の方位と垂直変動量の関係をプロットし、統計的にsinカーブを描いて求める方法と、領域内から任意に選んだ3点で構成される平面(三角形)の傾斜方位と角度を直接求める方法の二つがある。以下にそれぞれの方法及び解析結果を示す。

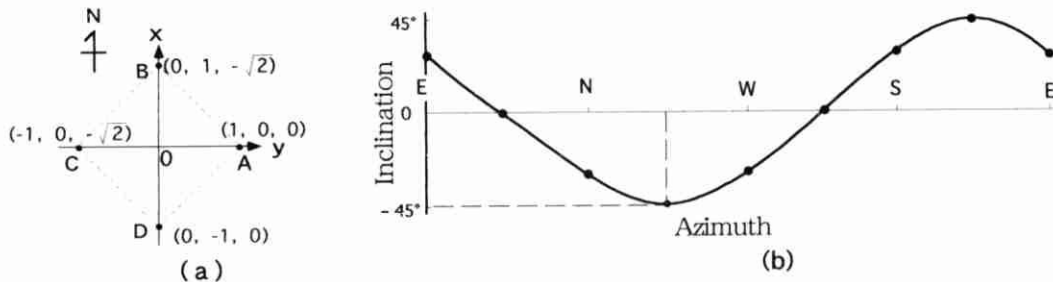


Fig. 7. A sin-curve (b) indicating the inclination of a plane (a), in this case, tilting 45° to the NW.

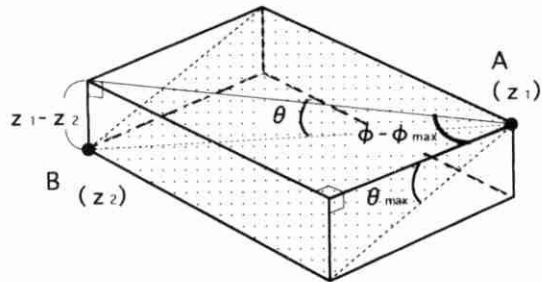


Fig. 6. Geometrical illustration for the expression of (1).

4.1 解析方法

1) sinカーブ法

水平面に対して $\theta_{max}$ の角度で傾斜した平面の最大傾斜の方位角を $\phi_{max}$ とし、その平面上での任意の方位 $\phi$ についての水平面に対する傾斜角を $\theta$ とすれば

$$\tan \theta = \tan \theta_{max} \cdot \cos(\phi - \phi_{max}) \quad (1)$$

の関係が成り立つ (Fig. 6). 任意の方位 $\phi$ にある2点の座標を A ( $x_1, y_1, z_1$ ), B ( $x_2, y_2, z_2$ ) とすれば,

$$\tan \theta = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \quad (2)$$

である。この座標のうちの  $x, y$  は2点が直交座標上にあるものと近似した平面図上の位置を、 $z$  は水準点の変動量を表している。方位角 $\phi$ はA・B2点の  $x, y$  座標から求められる。

いま、A (1, 0, 0), B (0, 1, 0), C (-1, 0, 0), D (0, -1, 0) 4点をのせた平面が傾斜して、A (1, 0, 0), B (0, 1,  $\sqrt{2}$ ), C (-1, 0,  $\sqrt{2}$ ), D (0, -1, 0) に変化したとする (Fig. 7a). このときA~Dから任意に選んだ2点について、(2)式より求めた傾斜角 $\theta$ を縦軸に、2点の互いの方位角 $\phi$ を横軸にそれぞれとったプロットは Fig. 7b のようなsin型の曲線上に配列する。ここで極小値をあたえる方位角 $\phi$ は地塊の最大傾斜の方位角 $\phi_{max}$ であり、極小値すなわちsin曲線の半振幅は傾斜角 $\theta_{max}$ である。図の場合は、 $\phi_{max}$ がN45°W,  $\theta_{max}$ が45°となる。

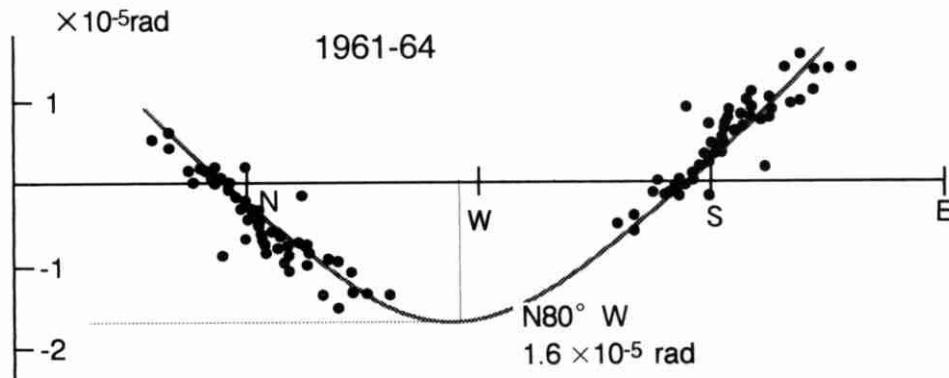


Fig. 8. The change of crustal inclination for the periods of 1961-1964 calculated by the sin-curve method.

## 2) 3点法

これは解析幾何を用いて、3点で作られる平面の最大傾斜の方位角  $\phi_{\max}$  と傾斜角  $\theta_{\max}$  を求めるものである。いま、 $A(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C(x_3, y_3, z_3)$  の3点を頂点とする三角形ABCにおいて、BからのA, Cへの方位角を  $\phi_1, \phi_3$  とすると、(1)式および(2)式から

$$\tan \theta_{\max} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_{\max}) = \frac{z_1 - z_2}{AB} \quad (3)$$

$$\tan \theta_{\max} \cdot \cos(\phi_3 - \phi_{\max}) = \frac{z_3 - z_2}{BC} \quad (4)$$

の関係を導くことができる。この  $\phi_{\max}, \theta_{\max}$  についての連立方程式の解を求めて、傾動の方位と角度を得る。

この解析は、水準路線が大きく屈曲しており、かつ変動量がデータの誤差によるばらつきを上回るほど大きくないと傾動の傾向はつかめない。ところで、1964年新潟地震の場合には、地震前・地震時ともに大きな変動が認められた。しかも、震源域に近い村上～鼠ヶ関付近の路線は大きく東方に回り込む形で屈曲しており、震源域に近い調査対象路線にはこの解析法に都合のよい条件がそろっていた。

## 4.2 解析結果

Fig. 8 はB.M. 6495～B.M. 6518のⅢ期（1961年-1964年）の傾動のsinカーブ法による解析結果である。これによると、Ⅲ期はN80°W方向に  $1.6 \times 10^{-5}$  rad（約3.2°角）で傾斜したことを読みとることができる。次に、この変動を3点法で解析することによって、この区間が同一の地塊にあることを確認する。Fig. 9, Table 1はB.M. 6495～B.M. 6518（村上～鼠ヶ関）のⅢ期（1961年-1964年）について、3点法による解析結果を示したものである。ところで、3点で作られる三角形が小さな鋭角を持っていると、最大傾斜の方位角、傾斜角ともに信頼度が小さくなる。そこで、この解析では三

Table 1. List of tilting for the period of 1961-1964 by the 3 points method in the Budō mountains, Niigata-Yamagata border.

BM	z (mm)	Direction (deg)	Dip angle (rad)
6493	-96.7		
6498	-58.6	287	$1.6 \times 10^{-5}$
6513	-183.1		
6493	-96.7		
6507	-51.2	285	$1.9 \times 10^{-5}$
6513	-183.1		
6498	-58.6		
6507	-51.2	283	$2.1 \times 10^{-5}$
6513	-183.1		
6507	-51.2		
6513	-183.1	279	$2.1 \times 10^{-5}$
6517	-223.0		

角形の最小の角度が概ね15°以上になるように、南から6493, 6498, 6507, 6513および6517の5水準点で作られる4つの三角形に限定している。各水準点の脇に示した数値は垂直変動量であり、データの無い点は事故点である。

解析結果は最大傾斜の方位角が北から時計回りに測った角度で279°～287°（N73°～81°W）、傾斜角が  $2.1 \times 10^{-5}$ ～ $1.6 \times 10^{-5}$  radの範囲におさまり、ばらつきは非常に小さいので、この時期にこの区間が同一の地塊にあって、一枚の鋼板のように変動したとみなすことができる。この値はsinカーブ法による解析結果の最大傾斜の方位角約280°（N80°W）、傾斜角  $1.6 \times 10^{-5}$  rad（Fig. 8）とはほぼ一致している。

Fig. 10にⅢ期の変動の等変動量線を示した。地塊の傾斜は太矢印方向におおむね一様とみなせる。図から

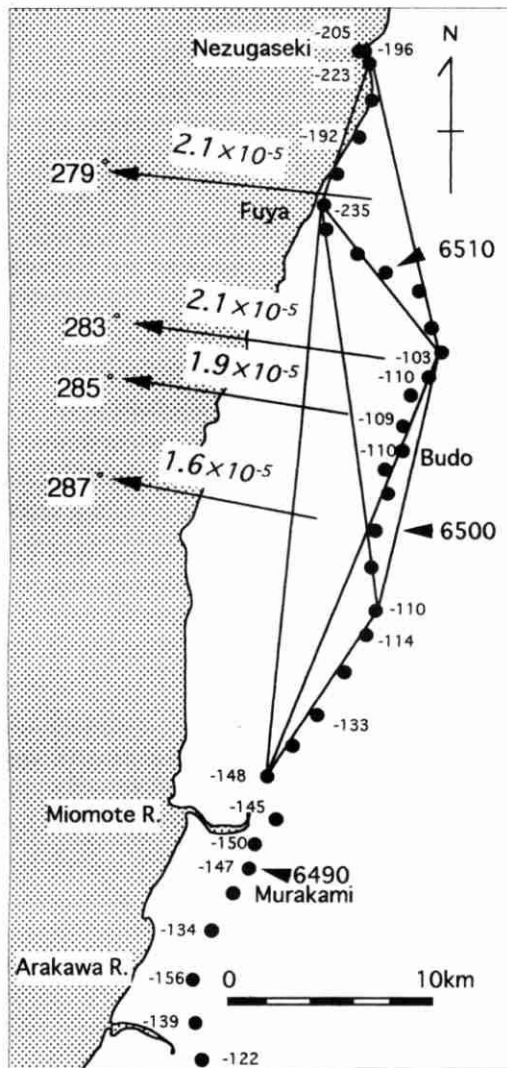


Fig. 9. Tilting of the land block between Murakami and Nezugaseki for the period of 1961-1964 calculated by the 3 points method. Numerals of each allow are the dip direction measured counterclockwise and dip angle. For combinations of selected 3 points see Table 1.

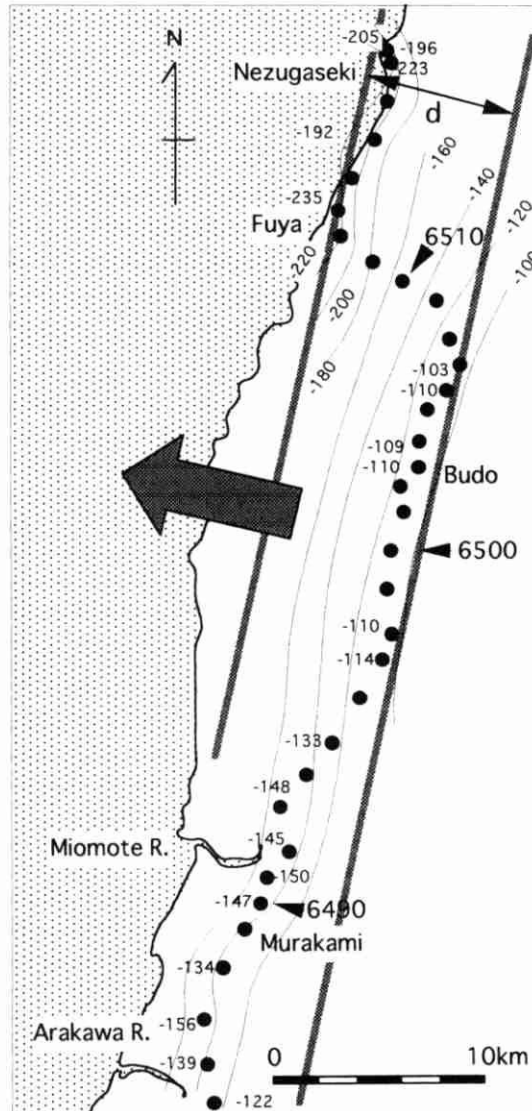


Fig. 10. Contour map of crustal movement for the period of 1961-1964. The bold arrow indicates a general direction of westerly tilting.

鼠ヶ関～蒲萄峠間の水平距離;  $d$  を 8 km, 垂直変動量の差;  $h$  を 120 mm と読みとると, 傾動量は  $1.5 \times 10^{-5}$  rad となり, sin カーブ法とほぼ一致する。

以上, sin カーブ法, 3 点法および等変動量線のそれぞれの方法で別個に求めた蒲萄山地周辺の地塊の傾動量は, おおむね一致している。その値は sin カーブ法によれば, 傾動方位が  $N80^\circ W$ , 傾斜角度は  $1.6 \times 10^{-5}$  rad (約  $3.2^\circ$  角) である。

## §5 議 論

### 5.1 新潟地震の断層モデル

ABE (1975) は粟島の東方に高角西傾斜の, SATAKE and ABE (1983) は粟島の西方に低角東傾斜の震源断層モデルを想定した。ここでは, 両者のうちいずれが本論による傾動解析と適合するかを検討する。

前節での水準点データを用いた傾動解析によれば, 本州側の村上市から鼠ヶ関にかけての地塊は, 全体に沈降しながら西方へ約  $1.6 \times 10^{-5}$  rad の角度で傾斜した。このときの柏崎験潮所を基準にした沈降量は, 路線が沿岸

部に寄っている村上市周辺と鼠ヶ関周辺において大きく、沿岸部から東方へ最も離れた蒲萄峠周辺では小さかった (Figs. 4, 5). これは、Ⅲ期の本州側の変動が、東方の出羽山地 (朝日連峰) 付近をヒンジラインにした西方への傾動であったことを意味している。また、中村・他 (1964) によれば、日本海の粟島を載せた地塊は地震時に  $N65^{\circ}W$  の方向 (傾動面の走向は  $N25^{\circ}E$ ) へ約  $55^{\circ}$  (約  $2.7 \times 10^{-4}$  rad) の傾斜角で傾動隆起している。

以上のことを総合して、新潟地震による震源域周辺の地殻変動を次のような段階に分けて考える。i) まず、西

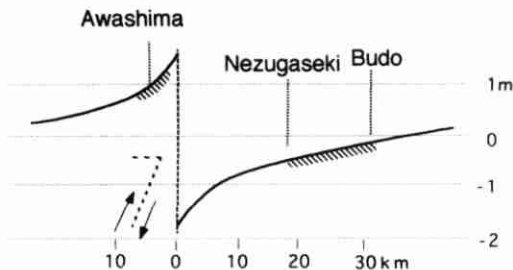


Fig. 11. Schematic illustration of a crustal movement by the 1964 Niigata earthquake.

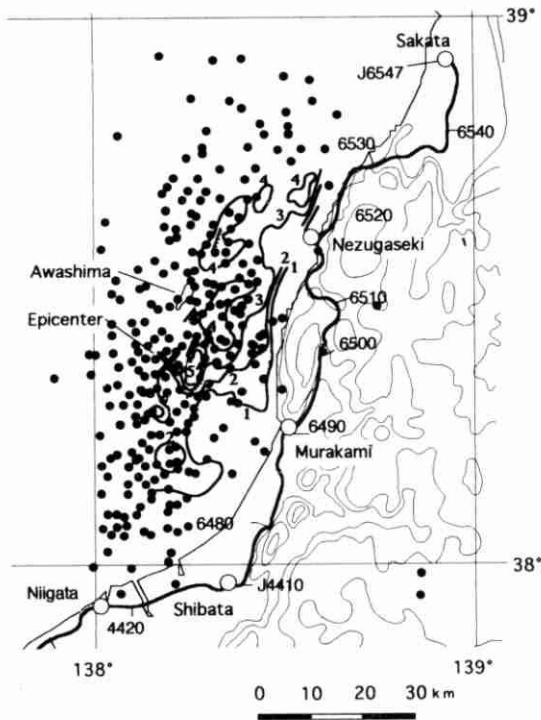


Fig. 12. A contour map showing submarine crustal movement in meters accompanied by the Niigata earthquake [Mogi *et al.* (1964)]. Solid circles are distribution of after shocks [KUSANO and HAMADA (1991)].

に傾斜しながら隆起した粟島の東方 (隆起側) にある本州が、同じく西に傾斜しながらも上下方向では反対に沈降した。ii) したがって、粟島～本州間に曲降運動を考えない限り、粟島と本州は断層により二つの地塊に分かれて変動しなければならない。iii) そして、この断層は三角測量 [例えば、松橋・他 (1987)] や発震機構 [AKI (1966a, b), ABE (1975)] の解析結果が東西圧縮を示していることから逆断層となり、西側隆起であることから西傾斜となる。

Fig. 11 は粟島をのせた地塊と本州側地塊の間に西傾斜の高角逆断層を想定し、地表地震断層からの距離を横軸に、垂直変動量を縦軸にとって示した東西断面の変動概念図である。粟島の垂直変動量は中村・他 (1964)、断層の変位量は ABE (1975) による。この図で示したように、粟島が本州側より傾動量が大きいのは地表地震断層に近いめとして説明できる。これは結果的に ABE (1975) の断層モデルと一致する。一方、SATAKE and

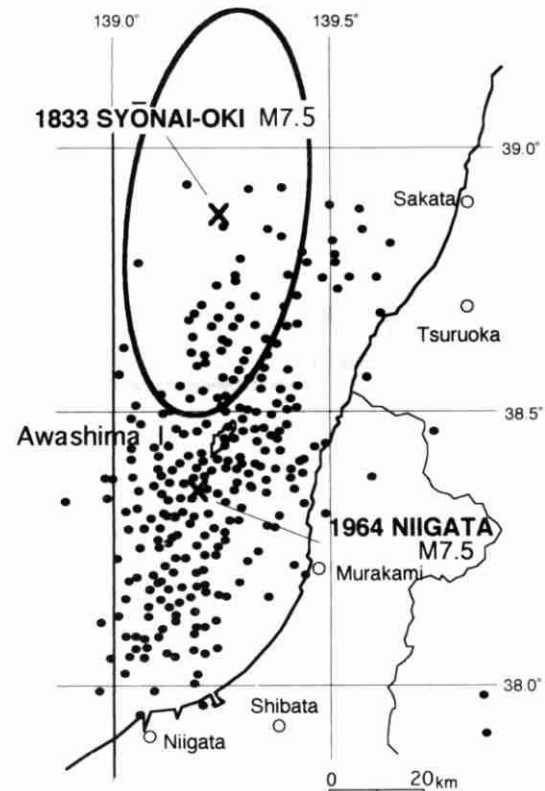


Fig. 13. Estimated source region of the 1964 Niigata earthquake and of the 1833 Shonai-oki earthquake. Each area is based on the expression of URSU and SEKI (1955). The dots are after shocks of the 1964 Niigata earthquake [KUSANO and HAMADA (1991)].



ABE (1983) は粟島を挟む2本の低角東傾斜の逆断層により粟島の西への傾動を説明している。しかし、これでは粟島を挟んだ断層運動のほかに粟島-本州間の曲降運動を考えなければ本州側の傾動を説明できないし、それを示すデータもないので適当なモデルとは考えられない。

粟島が西方へ傾動しながら隆起し、本州側が同じく西方へ傾動しながら沈降した新潟地震時の変動は、粟島-本州間の西傾斜の高角逆断層モデルで説明するのが最も単純かつ合理的と考える。Mogi *et al.* (1965) による地震前-地震後の海底変動のデータは粟島と本州の間のうち粟島寄りの海底の隆起を示しており (Fig. 12), このモデルと矛盾しない。以上によって、本論で得られた傾動解析の結果は ABE (1975) のモデルと適合する。

## 5.2 地震サイクル

新潟地震の震源域近くでは1833年庄内沖地震 [宇佐美 (1996) によれば震央  $139.25^{\circ}\text{E}, 38.9^{\circ}\text{N}; M=7\frac{1}{2}\pm\frac{3}{4}$ ] が知られている。この震央は新潟地震の震央より少し北方にずれているが、ABE (1975) による新潟地震の震源断層の広がり  $80\text{ km}\times 30\text{ km}$  とされているので、震源域が重複している可能性がある。Fig. 13 に1964年新潟地震と1833年庄内沖地震の推定震源域を示した。新潟地震は草野・浜田 (1991) による余震分布域を、庄内沖地震は宇津・関 (1955) による余震面積  $A$  ( $\text{km}^2$ ) とマグニチュード  $M$  の間の経験式

$$\log A = 1.02M - 4.0 \quad (5)$$

に  $M=7.5$  を与えて求めた。形状は新潟地震の余震分布から類推し、長軸/短軸の比を2.5とした。これを見る

と、二つの地震の推定震源域が半分ほど重複することが分かる。なお、1833年庄内沖地震では、例えば新潟県村上市の三面川河口や新潟県中条町の荒川・旧胎内川河口 [村上市 (1994), 中条町 (1985)] での津波被害や震害が考慮されていないなど、越後側での被害が過小評価されている傾向があり、実際の震源域はもう少し南方にも広がっていた可能性が考えられる。以上のことと、反復する地震の震源域が一致しない場合もありうることを考え併せて、本論では1833年庄内沖地震と1964年新潟地震を、同一領域を震源域として反復した地震として議論する。なお、日本海東縁の歴史被害地震に見られる百数十年の活動周期 [石川 (1994b)] の存在はこの地震サイクルの設定を支持している。

Fig. 14 は震央に近い本州側内陸部の蒲萄峠周辺地域、本州側沿岸部の鼠ヶ関周辺地域の地震サイクルの模式図である。これは、3節の Fig. 5 で示した経年変化図 (1899年-1985年) をもとに、鼠ヶ関周辺、蒲萄峠周辺両地域の地震前と地震時の変動の平均像を求めたものである。1833年庄内沖地震を地震サイクルの一つ前の地震と仮定して、測量開始前の永年変動と1833年の地震時の変動を外挿した。これによれば、それぞれの地域での地震間の隆起は40 cmと50 cmになるのに対し、地震時の沈降は25 cmと10 cmになり、それぞれ63%、20%が地震時に後戻り的に沈降していることになる。また、地震間・地震時両方を合わせて永年変動の隆起速度を求めると、蒲萄峠周辺地域で3.1 mm/yr、鼠ヶ関周辺地域では1.1 mm/yrとなる。蒲萄峠周辺地域の隆起は東方の出羽山地の隆起5 mm/yr [佐藤 (1995)]

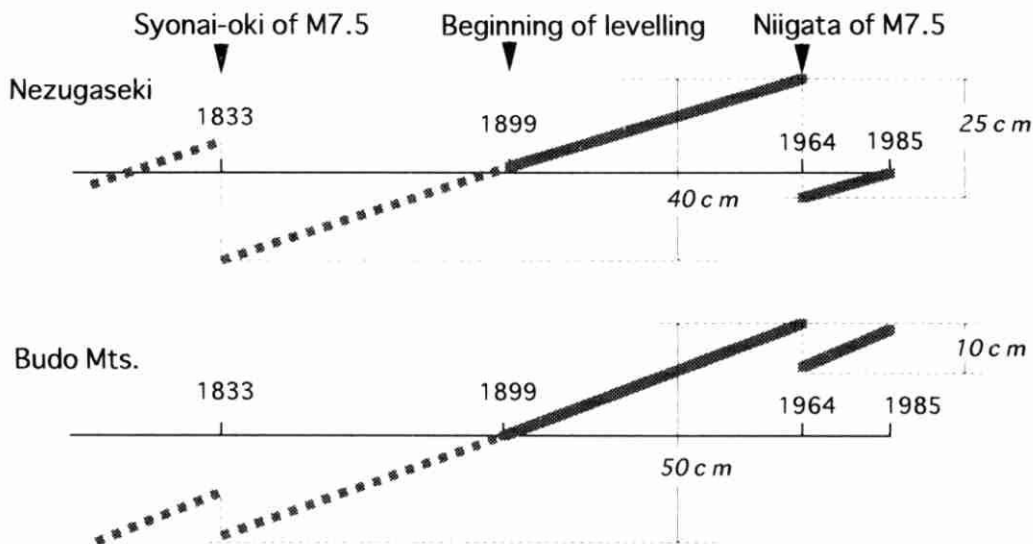


Fig. 14. Schematic illustration of secular vertical movement of the area of Budo Pass and of the area of Nezugaseki. The movements before 1899 was estimated by a concept of earthquake cycle.

と一連のものと考えられる。鼠ヶ関周辺地域の隆起速度が比較的小さいのは、この付近の沿岸部に海岸段丘の発達をみないことと符合している。蒲萄峠周辺地域、鼠ヶ関周辺地域の変動が第四紀中期以降の50万年間に同じ速度で継続してきたとすると、両区域の累積変動量の差は

$$(3.1 \text{ mm/yr} - 1.1 \text{ mm/yr}) \times 5 \times 10^5 \text{ yr} = 1000 \text{ m}$$

となり、鼠ヶ関周辺地域と蒲萄峠周辺地域の最高峰（蒲萄山、850 m）の標高差とおおむね一致する。

### 5.3 信濃川地震帯とプレート境界

大森(1921)は南から、1918年大町地震( $M$  6.1), 1847年善光寺地震( $M$  7.4), 1828年三条地震( $M$  6.9), 1833年庄内沖地震( $M$  7.5)とその間の飯山、十日町に発生した中小被害地震の配列から、信濃川に沿う地震活動帯を提唱した。また、IMAMURA(1946)はこの地震帯中で震源の転移や活動の集中する時期が認められることを

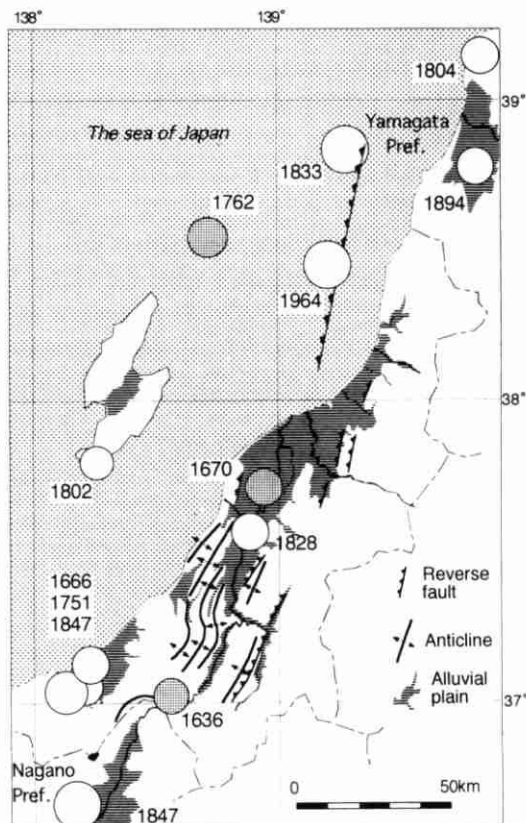


Fig. 15. Distribution of the historical destructive earthquakes ( $M > 6.5$ ) along the eastern margin of the Sea of Japan [USAMI (1996)]. The shaded areas are alluvial plains. The shaded circles are the epicenter redefined by ŌKI *et al.* (1994), KAWAUCHI and ŌKI (1996), KAWAUCHI and ŌKI (1997).

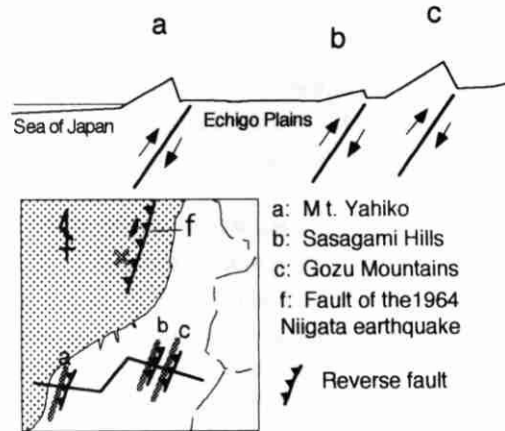


Fig. 16. A schematic illustration showing the tilting of the land blocks.

指摘している。Mogi(1988)はこの地震帯中で1964年男鹿半島沖地震( $M$  6.9), 1964年新潟地震, 1965-67年の松代群発地震, 1965年静岡地震( $M$  6.1)が転移しながら発生したとしている。その後、石川(1994a)は信濃川地震帯がプレート境界である可能性を指摘し、さらにOHTAKE(1995)は中村(1983)が提唱した日本海東縁のプレート境界は衝突境界であるとし、佐渡東方の新潟地震の震源域から信濃川地震帯を通してフォッサマグナ北部に至る位置に修正すべきだとしている。

河内・大木(1996)は1670年西蒲原地震( $M$  6 $\frac{3}{4}$ )の震央を1828年三条地震( $M$  6.9)の震央の北側に隣接する地域に修正されることを明らかにし、信濃川地震帯北部の地震発生の時空間分布を追求する手がかりを与えた(Fig. 15)。新潟地震の震源断層[ABE(1975)]は、その南方延長の越後平野周辺の逆断層群の配列と調和的である。逆断層群は、ほとんどが西に傾斜した傾動地形を伴っており(Fig. 16)、水準変動から求めた新潟地震による傾動の方向と一致している。これらの事実は1833年庄内沖地震, 1964年新潟地震の震源域から信濃川地震帯に続くラインが、日本海東縁のプレート衝突境界であるとする最近の見解[石川(1994a), OHTAKE(1995)]を支持している。

### 5.4 プレート衝突境界の収束速度

5.2節で示した地震サイクルを用いて、日本海東縁の衝突境界の収束速度を見積もることができる。ABE(1975)による走向;  $N9^\circ E$ , 傾斜;  $56^\circ W$ の震源断層面のすべり量は3.3 mだから、すべり量の水平成分は、 $3.3 \text{ m} \times \cos 56^\circ = 1.8 \text{ m}$ となる。これに5.2節で述べた地震サイクルを採用して、131年間に1.8 mの短縮と見積もると、震源断層付近の短縮の速度は1.4 cm/yrとなる。瀬野(1993)はユーラシア-オホーツク(北米)プレート

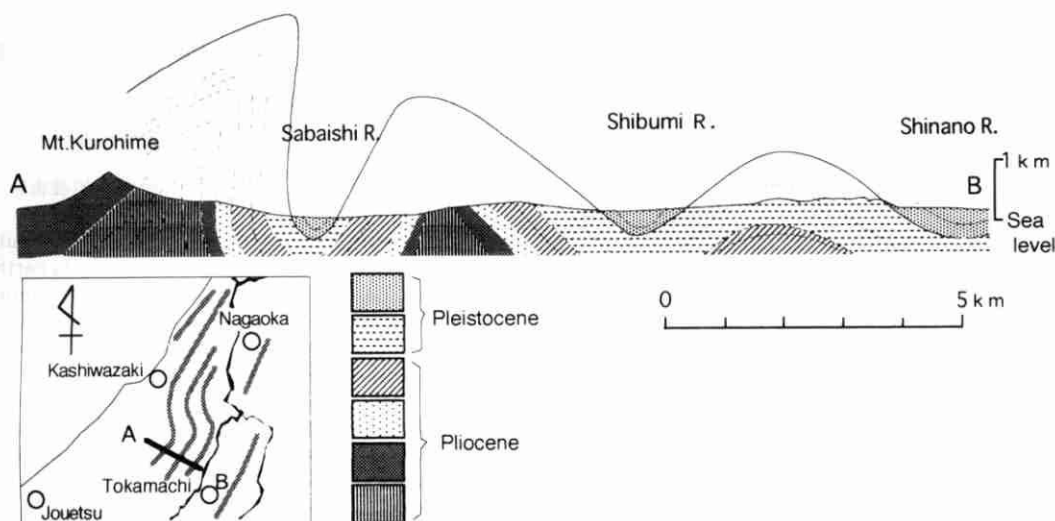


Fig. 17. Folding deformation of the Uonuma Group in the Eastern-Kubiki district [Based on TSUDA *et al.* (1988)]. Broken line is the middle-upper boundary of the Uonuma group.

境界の日本海東縁南部における収束速度を0.7 cm~1.1 cm/yr程度に求めている。本論の地震サイクルから求めた短縮速度は、オーダーにおいてこれと一致している。このことは、 $M$  7.5級の地震を百数十年に1回程度の割合で繰り返すことによって、この付近のプレート収束境界の短縮量が説明可能であることを示している。

信濃川地震帯南方延長の長岡から十日町にかけての魚沼丘陵および東頸城丘陵周辺の活褶曲地帯の地震活動は、規模が $M$  5~6程度の中規模地震に限られていて、日本海東縁南部の活動とは少し様相を異にする。ここでは1927年関原地震( $M$  5.3)による水準変動と新第三系・第四系の褶曲構造が一致したことが知られている[岡田(1961), 児玉・他(1974)]. Fig. 17に5万分の1表層地質図「岡野町」[国土分類基本調査図, 津田・他(1988)による]をもとにした北西-南東地質断面図を示す。ここでは、地層の褶曲変形をすべて水平圧縮による短縮の結果とみなして、その量と速度を見積もることにする。断面を切った約15 km(柏崎市黒姫山~川西町信濃川左岸)の間で、太実線で示した地層境界線(魚沼層群上部層に相当)の褶曲変形前の長さは約21 kmだから、水平短縮量は6 kmである。当地域の褶曲運動の時期については、鍵層テフラ、地質構造、水準点変動、段丘変形などの面からいくつかの報告がある[例えば、小玉・他(1974), 岸・宮脇(1996), 大木・他(1994)]. これらによれば、褶曲運動の開始はいずれも後期更新世~現在の範囲で一致している。そこで、褶曲運動開始を魚沼層群最上部層堆積後の50万年前とすれば、短縮の速度は1.2 cm/yrとなり、粟島周辺の逆断層による短縮の

場合と同様、褶曲変形から見積もった短縮の速度も瀬野(1993)の値(0.7~1.1 cm/yr)とおおむね一致する。

## §6. まとめ

新潟県北部地域の国土地理院一等水準点資料を再検討し、1964年新潟地震の震源域近くの本州側地塊の地殻変動について解析した。その結果、以下に示すようなことが明らかになった。

- 1) 本州側地塊は、新潟地震時の粟島と本州の間の西傾斜の高角逆断層によって、 $N80^{\circ}W$ の方向に $1.6 \times 10^{-5}$  radの角度で傾動した。
- 2) 1833年庄内沖地震を1964年新潟地震の1サイクル前の地震と仮定して、海岸部と内陸部の垂直変動の累積量の差を見積ると、その値は50万年間に1000 mとなり、地形から読みとれる第四紀後期の累積変動量とおおむね一致する。
- 3) 新潟地震による傾動運動は、南方の越後平野周辺に見られる西側上がり・西傾斜の逆断層による傾動地形群の配列と調和的であり、日本海東縁のプレート境界が信濃川地震帯へ連続することを示唆している。
- 4) 信濃川地震帯をプレート衝突境界とすると、粟島~越後平野は $M$  7.5級の地震による逆断層によって、信越県境付近はおもに褶曲変形によって短縮しているものと見なされる。
- 5) 地震サイクルと褶曲構造から見積もったプレート境界短縮の速度は、前者で1.4 cm/yr、後者は1.2 cm/yrであり、ユーラシアプレートの東進速度とほぼ一致する。

## 謝 辞

本研究をすすめるに当たって、国土地理院地理調査部の小荒井 衛氏(現科学技術庁)、同部海野芳聖氏、北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所の堀越和夫氏、同所阿部義宣氏および新潟県衛生公害研究所の関谷一義氏には、新潟県周辺の水準測量の実施状況について助言をいただくとともに、データの入手に際しているいろいろと便宜をはかって頂いた。気象研究所の石川有三氏、東京大学地震研究所の佃 為成氏には、当地域周辺の地震活動や地震テクトニクスに関する有益な助言をいただいた。里村幹夫氏および匿名の査読者による貴重な査読意見は本稿を改善する上で大変有益であった。これらの方々に深く感謝申し上げます。

## 文 献

- ABE, K., 1975, Re-examination of the fault model for the Niigata earthquake of 1964, *J. Phys. Earth*, **23**, 349-366.
- AKI, K., 1966a, Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part 1. A statistical analysis, *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, **44**, 23-72.
- AKI, K., 1966b, Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum, *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, **44**, 73-88.
- 青木 滋, 1982, 新潟平野の“地盤のバルス”について(予報), 新潟大災害研年報, **4**, 87-98.
- 檀原 毅, 1971, 日本における最近70年間の総括的上下変動, 測地学会誌, **17**, 100-108.
- 檀原 毅, 1973, 新潟地震前・時・後の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **9**, 93-96.
- 石川有三, 1994a, 東アジアのテクトニクスと北海道南西沖地震, 月刊海洋, 号外7, 62-69.
- 石川有三, 1994b, 残された空白域, 月刊海洋, 号外7, 102-107.
- IMAMURA, A., 1946, Seismic activity on both sides of Fossa Magna, *Proc. Imp. Acad.*, **22**, 314-317.
- 貝塚爽平, 1977, 日本の地形, 岩波書店, 234 pp.
- 笠原慶一, 1973, 水準測量と傾斜観測の相補性, 測地学会誌, **19**, 93-99.
- 河内一男・大木靖衛, 1996, 1670年西蒲原地震(M6 $\frac{3}{4}$ )の震央の再検討, 地震2, **49**, 337-346.
- 河内一男・大木靖衛, 1997, 信濃川地震帯の歴史地震にみられる震源の転移と最近の地震活動, 地震学会講演予稿集, no. 2, P87.
- 岸 清・宮脇理一郎, 1996, 新潟県柏崎平野周辺における鮮新世～更新世の褶曲形成史, 地学雑誌, **105**, 88-112.
- 小林洋二, 1983, プレート“沈み込み”の始まり, 月刊地球, **5**, 510-514.
- 小玉喜三郎・鈴木尉元・宮下美智夫・相馬庸三, 1974, 上・中越地域の水準点変動と地質構造の相関, 地質調査所報告, **250**, 37-51.
- 草野富士雄・浜田信生, 1991, 1964年新潟地震の余震分布再調査結果について, 地震2, **44**, 305-313.
- 松橋ゆかり・油川 健・佐藤 裕, 1987, 1964年新潟地震に伴う地殻水平変動と断層モデル, 地震2, **40**, 619-622.
- 宮部直巳, 1936, 地殻変動の最近の研究, 岩波書店, 108 pp.
- MOGI, A., B. KAWAMURA and Y. IWABUCHI, 1965, Submarine crustal movement due to the Niigata earthquake in 1964, in the environs of the Awashima Island, Japan sea, *J. Geod. Soc. Japan*, **10**, 180-186.
- 茂木清夫, 1982, 新潟地震前の水準測量結果についての一解釈, 地震2, **35**, 478-482.
- MOGI, K., 1988, The mechanism of the occurrence of the Mutsu earthquake swarm in central Japan and relation to the the 1964 Niigata earthquake, *Tectonophysics*, **159**, 109-119.
- 村上市, 1994, 村上市史, 資料編3, 1137 pp.
- 中条町, 1985, 中条町史, 資料編第3巻, 1026 pp.
- 中村一明・笠原慶一・松田時彦, 1964, 新潟地震による粟島の地変, 地震研研究速報, **8**, 73-90.
- 中村一明, 1983, 日本海東縁新生海溝の可能性, 地震研彙報, **58**, 711-722.
- OHTAKE, M., 1995, A seismic gap in the eastern margin of the sea of Japan as inferred from the time-space distribution of past seismicity, *The Island Arc*, **4**, 156-165.
- 岡田 惇, 1961, 長岡地震による地盤変動, 地震研彙報, **39**, 537-547.
- 大木靖衛・佐藤 修・青木 滋・鈴木幸治・山崎 崇・渡部直喜, 1994, 1992年津南地震M4.5調査報告, 新潟大災害研年報, **16**, 1-36.
- 大森房吉, 1921, 大正7年信州大町地方激震調査報告, 震災予防調査会報告第94号, 震災予防調査会, 16-69.
- 尾張安治・駒村富士弥, 1965, 新潟地震による岩船地方の山地崩壊について, 新砂防58, **18**, 28-34.
- SATAKE, K. and K. ABE, 1983, A fault model for the Niigata, Japan, earthquake of June 16, 1964, *J. Phys. Earth*, **31**, 217-223.
- 佐藤 裕, 1979, 地震の長期予知—地殻変動を中心として—, 月刊地球, **1**, 494-501.
- 佐藤 裕, 1995, 測地データによる東北地方の地盤上下変動の特徴, 地震2, **48**, 109-112.
- 瀬野徹三, 1993, 日本付近のプレート運動と地震, 科学, **63**, 711-719.
- 島津光夫編, 1989, 新潟県地質図説明書, 新潟県商工労働部, 128 pp.
- TSUBOKAWA, I., Y. OGAWA and T. HAYASHI, 1965, Crustal movements before and after the Niigata earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **10**, 165-171.
- 津田禾粒・白井健裕・長谷川美行・新川 公, 1988, 表層地質図岡野町, 国土分類基本調査図, 新潟県.
- 宇佐美龍夫, 1996, 新編日本被害地震総覧, 東大出版会, 493 pp.
- 宇津徳次・関 彰, 1954, 余震区域の面積と本震のエネルギーとの関係, 地震2, **7**, 233-240.