

新潟県小千谷地域の活褶曲

—約 30 年間の水準測量結果—

佃 為成¹⁾*・武田智吉²⁾・柳沢 賢²⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

²⁾ 東京電力

Present-day Active Folding in the Ojiya Region, Niigata Prefecture, Central Japan, Revealed by Data from Levelling Measurements Collected Over 30 Years

Tameshige Tsukuda¹⁾*, Tomokichi Takeda²⁾ and Ken Yanagisawa²⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

²⁾ Tokyo Electric Company

Abstract

Ojiya city and its surrounding regions in Niigata Prefecture, central Japan, are located in an active tectonic zone along the eastern margin of the Japan Sea, and where Quaternary folding activity is at the highest level in Japan. To elucidate the present-time mode of folding and its activity, levelling surveys were conducted at intervals of two years across the active fold zone, from 1968 until 1998. The data on vertical movements obtained by this levelling study revealed very active folding even at the present day. The uplifting rate was 6 mm/yr at maximum during the period from 1978 to 1986. The rate decreased to 1~3 mm/yr during the other period. The vertical movement profile shows steep folding. With this in mind, a pure reverse creep faulting model is applied instead of folding. An optimal fault model is obtained by a grid search technique for various values of fault parameters. The final solution is as follows: depth of the top of the fault is 1 km, dip angle 65 degrees, width of the fault 2.5 km, fault length 4 km, and dislocation displacement 1.89 m over 28 years. The east-west horizontal shortening rate is 2.6 cm/yr on average during 28 year period, which is roughly comparable with the horizontal ground movements obtained by GPS measurements.

Key words: levelling, active fold, active fault, eastern margin of Japan Sea, reverse fault model

§ 1. 序論

東北日本日本海側の秋田県や新潟県には活褶曲の存在が知られている(例えば, 中村・太田, 1968). その中で新潟県中部の小千谷地域は後期更新世における活褶曲の活動度がもっとも高い地域である. 小千谷地域における活褶曲の実態を明らかにし, 現在の活動の様子をさぐるため, 宮村ほか(1968)によって1957年に水準測量が始められた. その後, 本格的な繰り返し測量を行うため, 地震研究所は1967年に水準点網を設置した(溝上ほか,

1980). ここに, 地震研究所の測量事業が始まった.

1968年に最初の測量を行い, 10年後の1978年に改測した. その後は東京電力(株)の協力を得て1998年までほぼ2年間隔の水準測量を実施し, 1968から1998年までの30年に及ぶ地盤の長期的な上下変動データが得られた.

1991年には水平変動の研究に着手するため, 水平距離基準点が設置され, 1993年と1996年を含め, 3回の精密距離測量が行われ, 基線歪を測定した. しかし, GPS観

* e-mail: tsukuda@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

測技術の発展に伴い、GPS 観測に移行することにし、この水平距離測量は試験的な研究で終わった。そして、1998 年に水準測量の事業は休止し、水準測量や距離測量による地殻変動監視の方法は、GPS 繰り返し測量の方法へと転換した。以前の水準路線の領域よりやや広い地域に多数の GPS 観測点が新設され、2004 年に 2 回目の測量が実施された。その結果、2004 年新潟県中越地震の発生時期を挟んだベクトルデータや歪データが得られた(佃ほか, 2005)。さらに、2007 年新潟県中越沖地震前後の変動データも得られた。しかしながら、小千谷付近の隆起や沈降の変動については、まだ十分な精度が得られていない。結果が出るまでには今後 10 年ぐらいはかかるであろう。これらはいずれ公表される。

最近、活褶曲の活動の実態に関する研究として、合成開口レーダー (SAR) のデータを用いた解析が行われるようになった。2007 年新潟県中越沖地震に際して、海岸に近い西山丘陵西側斜面に褶曲運動に合致する隆起変動が確認された (Nishimura *et al.*, 2008)。これは、地震に伴ってこの地域の圧縮が強化された結果と解釈される。このように最新の技術による活褶曲の研究が行われるようになったが、約 30 年の長期にわたる活褶曲の変動データは地震研究所の水準測量データ以外には存在しない。1997 年ごろから国土地理院の GPS 観測網 (GEO-NET) が整備され、10 年にわたるデータが蓄積されてい

るが、約 20 km 間隔の電子基準点のみでは数 km のスパンの変動を検知しえないし、上下変動の測定精度の点においても水準測量に及ばない。

本論文では、約 30 年に及ぶ水準測量の結果にもとづき、数十年間の時間変動の実態を明らかにし、さらに活断層のクリープ活動に伴う褶曲の可能性についても考察する。褶曲運動の速度が数 10 年の間に変化することが確かめられたことが大きな成果である。但し、1996 年から 1998 年の間の水準データは、多くの点で数 mm 以上の沈降を示した。これは小千谷から柏崎へ向かう国道 291 号線の桜町トンネル掘削にともなう変動の可能性が高いので、今回はこの期間のデータについては取り扱わない。また、別の外的擾乱源として小千谷活褶曲の隆起地帯にはガス田群が存在するが、§ 5. に記したように、局所的な沈降がほとんど見られないことからその褶曲変動データに対する擾乱は小さいと思われる。

§ 2. 小千谷地区の活褶曲

Fig. 1 は柏崎から小千谷、長岡にかけての地形図である。寺泊・西山丘陵、中央丘陵、八石丘陵、小国・川西丘陵といった北北東から南南西に伸びる丘陵地帯が西から東へ並走している。これらの丘陵は褶曲の背斜にあたる。中央丘陵、八石丘陵、小国・川西丘陵地域の褶曲活動については、多くのテフラ年代試料に基づき、新第三

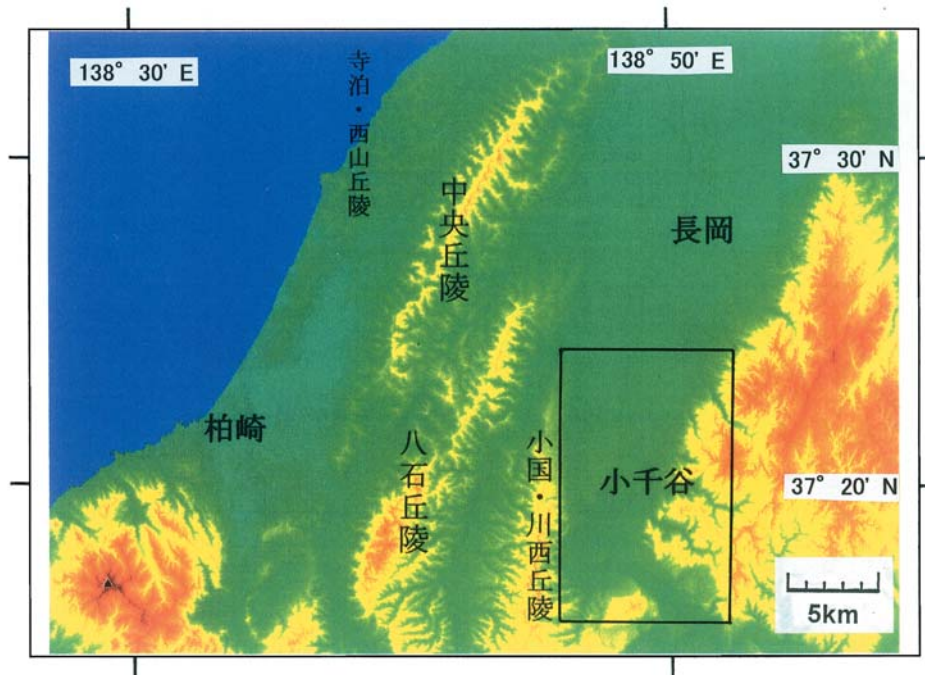


Fig. 1. Geomery of the region around Kashiwazaki and Nagaoka, Niigata Prefecture. The rectangular box indicates the study area.

紀末以降の形成史が明らかにされている（岸・宮脇，1996）。それは地質構造・堆積層から古環境を推定し、変動の考察を行うものであった。それによるとそれぞれの褶曲の構造は概ね40～50万年以内という比較的短期間に形成され、その活動期の前後はどれも比較的静穏であった。また、この褶曲の最盛期は場所ごとに異なっており、おおよそ西から東へ移動しながら進行しているように見える。

それぞれの褶曲の最盛期は、中央丘陵南部及びその南方地域では2.8 Ma～2.4 Ma、寺泊・西山丘陵及びその前面の大陸棚では2.0 Ma～1.5 Ma、中央丘陵南部では1 Ma頃再び活動的になり、中央丘陵北部、八石丘陵では0.7 Ma～0.3 Maである。小千谷地域を含む信濃川西岸の小国・川西丘陵地域では後期更新世から現在にかけて褶曲（活褶曲）が進行している。

小国・川西丘陵褶曲帯の背斜に位置する越路原とその東側の向斜面に位置する小栗田原については、テフラから求めた推定年代によると、その形成年代はそれぞれ13～15万年前、5～6万年前であり、また段丘面の傾動速度は、それぞれ0.15～0.17 mm/km.yr、0.13～0.16 mm/km.yrである（早津・新井，1982）。

本論文は、小国・川西丘陵北部の河成段丘面（越路原）を中心とした活褶曲について行った水準測量の結果のまとめである。なお、活褶曲とは、「極めて新しい地質時代以後にも構造が成長した褶曲」のことで、その地質時代としては下末吉期（ 10^5 年 B.P.）以降をとる（中村・太田，1968）。

§ 3. 小千谷地区の水準路線網

小千谷市西部と長岡市南部の境付近の旧越路町の台地（越路原）は河成段丘であるが、この面が凸に撓んでいる。また、小栗田原の段丘面は凹に撓んでいる。これらは活褶曲運動によるものである。1957年以来、この辺りを通り活褶曲を横切る路線に沿っての水準測量が企画され実施されてきた（宮村ほか，1968；溝上，1968）。初期の試験的な測量調査から、本格的な調査に入ったのは、1967年に22点、1968年に27点の水準点が設置された頃からである。この時点で1957年以来試験的に設置された7点を合わせ56点になった。国家水準点7点を加えると63点の水準網が出来上がった（溝上ほか，1980）。

1978年に改測が行われたが、そのとき使用できた水準点は国家水準点を含めて37点であった（溝上ほか，1980）。以後、水準点の数の推移を見ると、国家水準点とその補助点を加えて、1982年に67点、1984年に68点、1986年に70点である。

Fig. 2はその水準点路線図である。A～Eルート of 路線のうち、B, C, Dの路線は片貝・真人背斜と小千谷向斜を横断する。

測量データの精度の概略は以下の通りである。測量は1等水準測量の規準に従い、国土地理院で定める観測誤差の制限と測量実施の規定を守っている。標尺の読みとりの分解能と精度は0.1 mmである。観測誤差の許容範囲は往復差の制限と環の閉合差の制限を $2\text{ mm}\sqrt{S}$ とする。ここで、 S は往復または環の長さをkmで計った値（無次元）である。そのようにする根拠は、測定を n 回おこなうと、測定の統計的独立を仮定すれば、その場合の誤差が1回の測定の誤差の \sqrt{n} 倍になることである。水準測量の場合は、近似的に n が S に比例する。さて、往復差や閉合差は、各水準点の測定誤差の累積である。その制限は誤差の最大値（絶対値）と見なすことができる。各点の誤差が独立で、同程度と仮定すれば、誤算の絶対値は、観測点の数を N として $1/\sqrt{N}$ となる。水準点は500 m～2 km 間隔で設置されている。平均的な間隔を1 km とすると、 $S=N$ なので、1点あたりの誤差の最大値は2 mm となる。各点の水準データの誤差は ± 1 mm に収まっていると考えられる。したがって、2つの水準データの差である変動データの誤差は ± 2 mm に収まる。

§ 4. 活褶曲を横断する路線の上下変動分布

Figs. 3, 4, 5はそれぞれB, C, Dルート of 水準変動を東西垂直断面に投影したものである。越路原を横切るBルートでは、Fig. 3の上方の地質構造図に現れた片貝・真人背斜の褶曲を成長させるように上下に変動している。水準点44Cの辺りが隆起のピークに当たる。一方、小栗田原の小千谷向斜付近では沈降が進んでいる。

その南の国道291号線沿いのCルートでは、ここでも概ね片貝・真人背斜の褶曲を成長させている（Fig. 4）。しかし、背斜の西の斜面にピークをもつ隆起（水準点17A, 18A）が1980年以降顕著に現れている。これが褶曲の波の分裂を表すのか、水準点16F付近のローカルな変動なのかは今のところ何とも言えない。

そのさらに南のDルートでも概ね片貝・真人背斜の褶曲を成長させている（Fig. 5）。向斜側水準点103の沈降はローカルな変動による可能性がある。例えば、沖積層の圧密の影響が考えられる。

§ 5. 活褶曲の時間的変動

片貝・真人（時水）背斜軸部の小千谷向斜軸部に対する隆起速度を、Fig. 3～6から読みとってみる。1968-

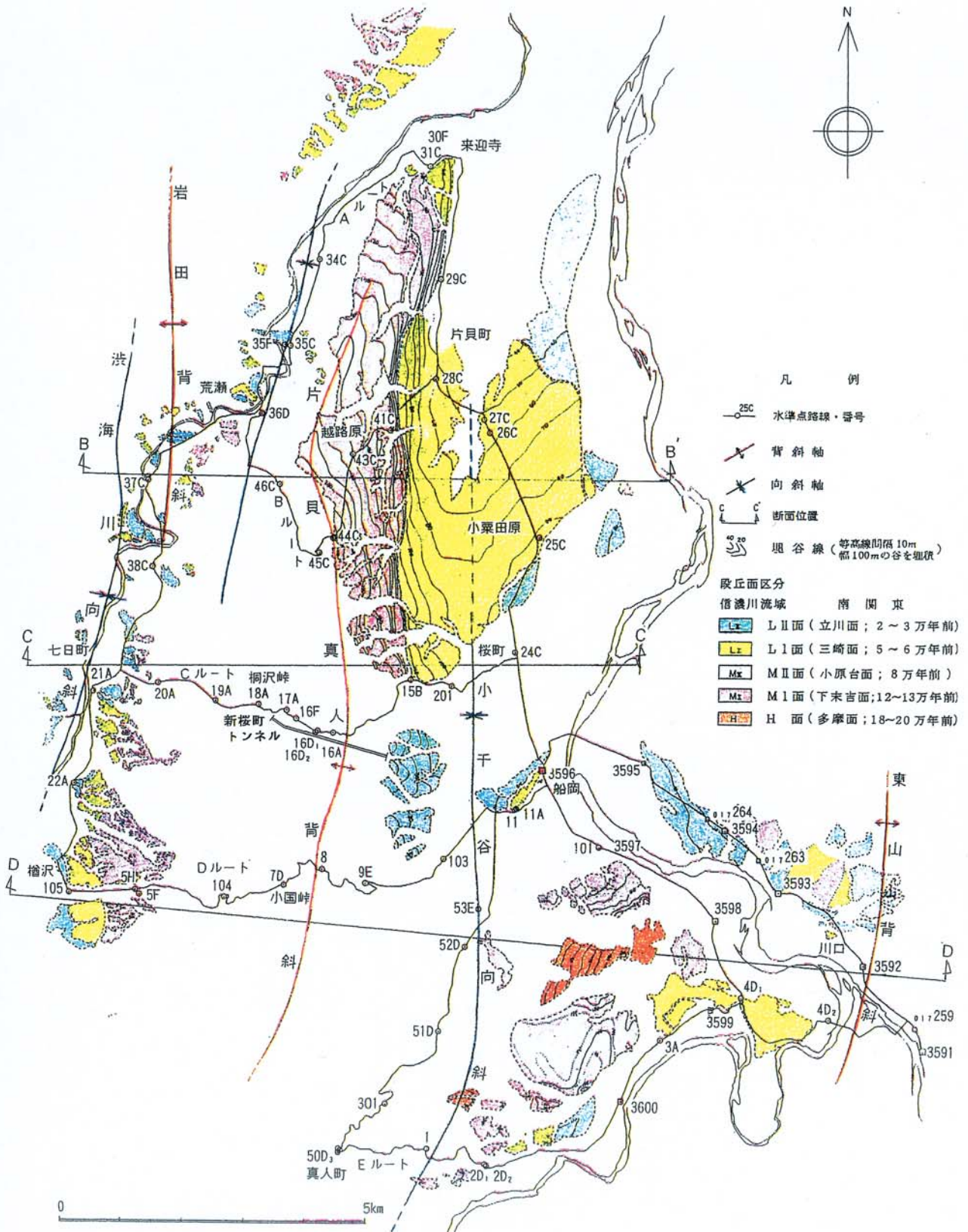


Fig. 2. Levelling route network in the Ojiya region of active folding.

新潟県小千谷地域の活褶曲

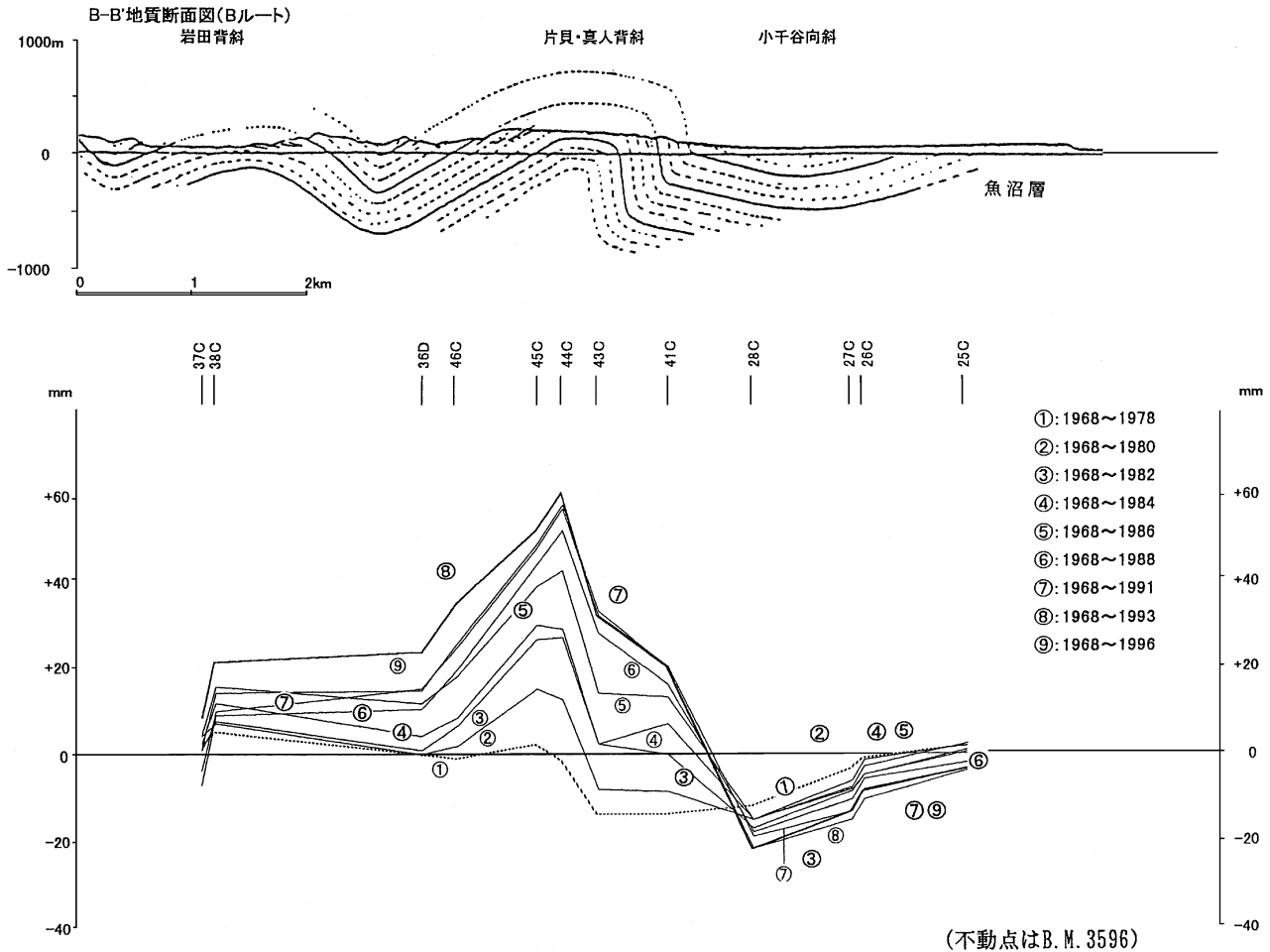


Fig. 3. Vertical movement along levelling route B.

1978年の10年間の隆起速度は1~2 mm/yr程度であり、それ以降に比べ有意に小さい。ただ、改測が1回のため、その間のゆらぎについてはまったく分からない。変動の山と谷の間の距離が約2 kmなので、傾斜変動に変換すると、0.5~1 mm/km.yrとなる。この値は段丘面の变形から推測される過去5~15万年間の傾動速度0.13~0.17 mm/km.yr(早津・新井, 1982)を上回っている。

Bルートの水準点44Cにおいて最大の変動が現れている。ここでは、不動点3596に対して1978~1986年では約6 mm/yrであったが、1986~1996年では約1 mm/yrに低下した。1993~1996年になると、Bルート of 41C, 43C, 44C, 45Cの変動は停滞しているが、他のA, C, D, Eルートの水準点では、1978~1986年頃の変位速度に近い動きを示すものが多い。Bルートにおいて、各水準点の変動の平均的な値は1978~1986年では約5 mm/yrであったが、1986~1996年には約3 mm/yrに低下した。

水準網南部の小千谷向斜と東山背斜を東西に横断する路線(Eルート)では向斜、背斜を問わず1978年から

1988年頃までは1~1.3 mm/yr程度の隆起を示していたが、その後は横這いの傾向に変わった。

Fig. 6はそれぞれほぼ2年毎に改測が行われた1978年以降のA, B, C, D, Eルート of 各水準点における上下運動を時間的に追ったものである。

ここで、ガス田の影響について触れる。Bルート of ベンチマーク44C, 43C, 41Cの近く(各点の数100 m以内)に帝国石油(株)、石油資源開発(株)のガス田の井戸群が存在する。44Cからもっとも近い井戸まで約90 mである。ガス田の開発は1960年ごろ始まった。1980年代から天然ガスの生産が行われている。深さ約1 kmの井戸から天然ガスを採取している。図6からわかるように、43Cにおいて1982~1984年の一時期、若干の沈降(あるいは隆起の停滞)が見られるが、長期的には隆起は進行しており、ガス田の影響は皆無ではないにしても多大ではないと考えられる。もし、上下変動データにガス田の効果が含まれるとすれば、活褶曲の変動を少し過小評価することになる。

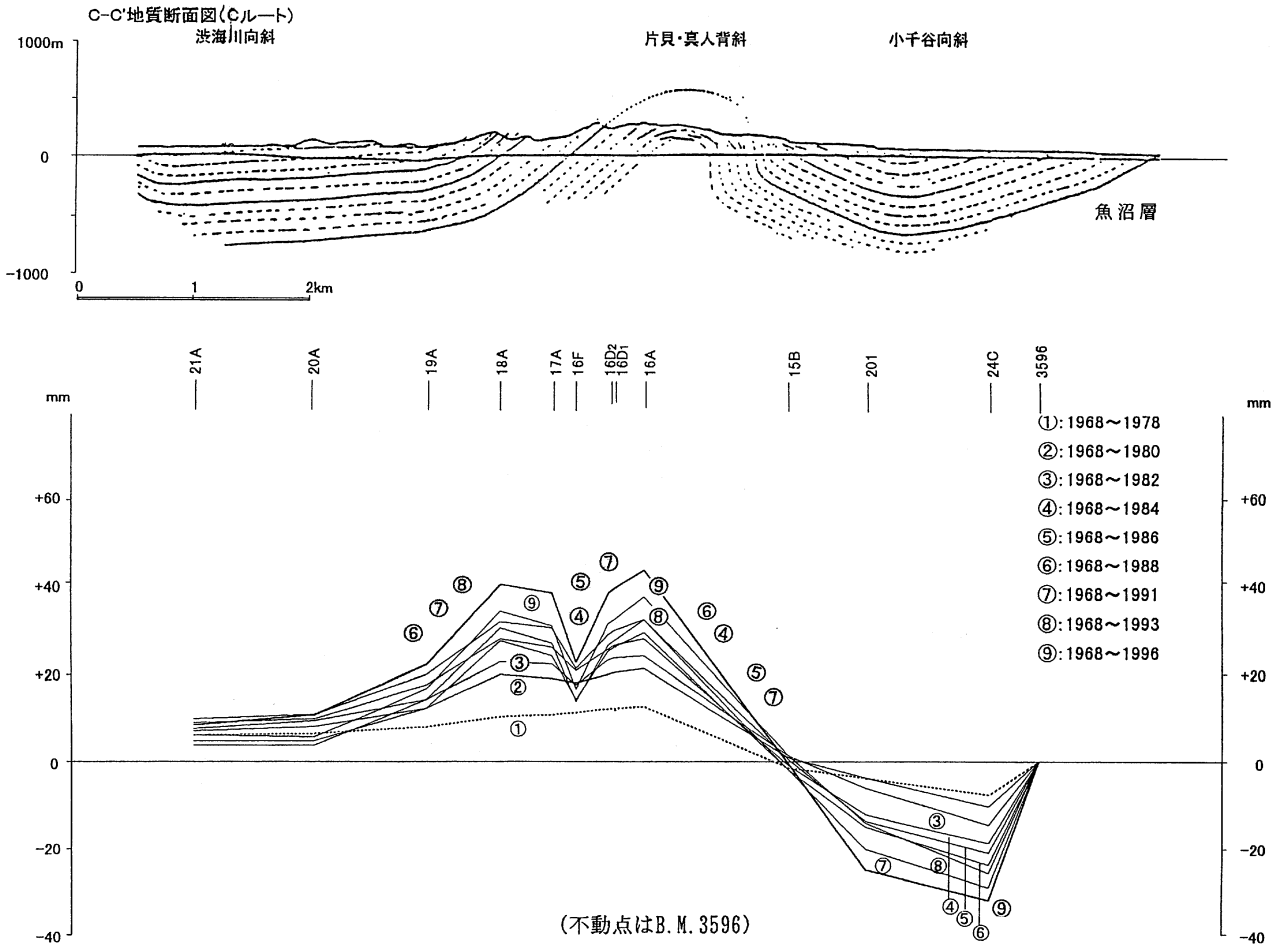


Fig. 4. Vertical movement along levelling route C.

§ 6. 上下変動の空間分布

Figs. 7, 8, 9 は期間別の上下変位の等変動量線を示す。Fig. 7 と Fig. 8 は 1968-1978 年と 1978-1988 年の同じ 10 年間の変動の比較に供するものである。地図の南東部の山本山付近の変動が両期間同じ程度であるのに対し、越路原付近では後者の期間の隆起が顕著である。1988-1991 年ごろは変動が全般的に小さいことが分かっているが (Fig. 6), 最近の 5 年間 (1991-1996) の変動は再び、1968-1978 年の頃のレベルに戻った (Fig. 9)。

§ 7. 活断層との関連

B ルートの水準路線は、片貝断層と呼ばれる活断層を横断している。この路線の上下変動の空間的パターンはこの断層のクリープ運動による変位を連想させる。それを確かめてみる。Fig. 3 の上下変動データに合致するような断層モデルを作る。簡単のため単純な矩形の逆断層とし、食い違いの変位は断層面で一様とする。

山から谷への形から断層の最上部の深さが押さえら

れ、褶曲の波長ないし山や谷の空間的減衰の程度から断層の最下部の深さが限定されるはずである。

ここで、これから行うモデリングの考え方を前もって簡単に説明しておく。断層モデルから得られる理論的な上下変動分布はスムーズな局面を描く。その断面はスムーズな曲線となる。一方、ある線上に近いいくつかの地点の上下動変動データが得られている。理論と測定の比較を行う場合、この線上のデータと理論値を比較する。比較するとき、合致しているかどうかをどのように判断するかが問題になる。上下動データが存在する地点において理論値と比較するのも 1 つの方法であるが、ここでは、次のような考え方を採用した。データ点は限られており、正確なデータ分布はわからない。しかし、分布が十分なめらかだと仮定すれば、内挿や外挿によってデータ分布を推定できる。ところが、データはかなり急激に空間的に変動するため、なめらかな関数を用いた近似が困難である。そこで、直線近似を施してデータの曲線を得た。この曲線と理論曲線の合致を調べる問題に帰

新潟県小千谷地域の活褶曲

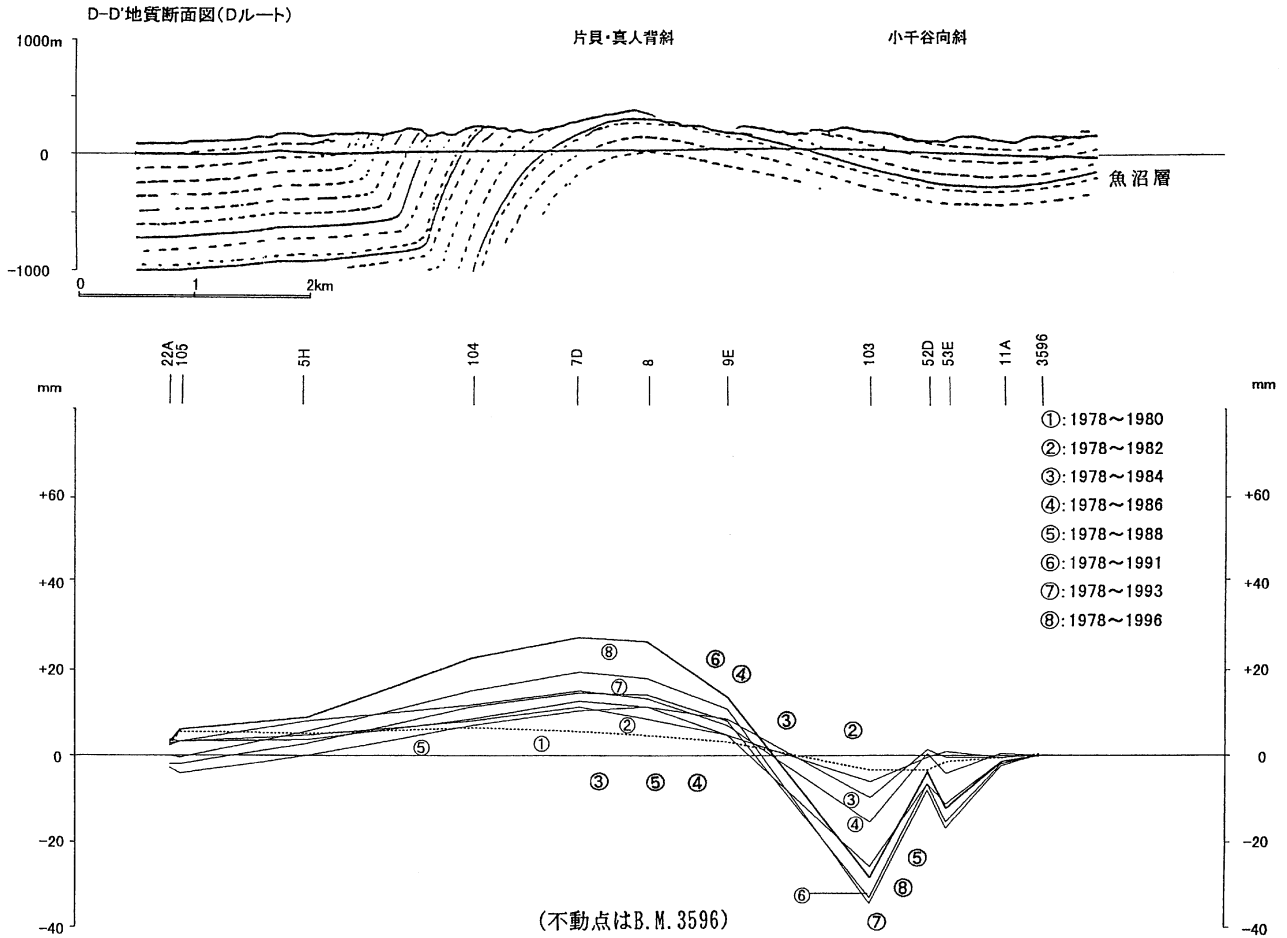


Fig. 5. Vertical movement along levelling route D.

着したのである。また、問題は、ほぼ2次元的な特徴が優勢なので、2次元断面での理論とデータの比較がおこなった。

まず、断層について基本的な仮定を置く。

- 1) 断層の走向は南北とする。
- 2) Fig. 3のBルートに近い垂直断面(東西方向)を断層の中央(原点)にとる。そして、B路線のデータはその垂直面の上下変動とみなす。用いるデータの期間は、1968年から1996年までの28年間である。
- 3) 一様半無限媒質内の純粋の逆断層とし、そのパラメータは、断層の最浅端の深さH、傾斜角 α 、断層の長さL、幅W、それに、一様な食い違い量Dである(Fig. 10)。また、座標系はFig. 10に示したように、断層の最も浅い地点の真上の地表を原点とし、x軸は断層の走向、これに直交する方向にy軸、鉛直方向がz軸とする。

実際のデータ解析は以下のおこなった。

- 1) y軸において上下変動の実測値を0.2kmの等間隔で補間する。急峻なピークをもつ分布なので、補間には

3次スプライン関数では無理がある。そこで、直線的な補間を行う。実測値が与えられている2点間を直線で内挿する。

- 2) Fig. 7. 8. 9の上下変動の空間分布を参考にして、まずLを4kmと推定する。
- 3) モデルの断層変位に対する断層中央を切る線、 $x=0$ kmの地表の上下変動を、Okada (1993) に従い、y軸に沿い0.2km間隔で計算する。
- 4) この数値データと断層モデルによる地表の上下変動(理論値)を比較する。その際、理論値、データのそれぞれの最大値を用いて規格化する。さらに、それぞれの最大値の位置が一致するようにデータのy軸をずらす。そして、各点の上下変動の理論とデータの値の差を求め、標準偏差を求める。
- 5) 断層のパラメータ(H, α , W)を変えたとき、最も小さい標準偏差を与えたものを最終的な理論解として採用する。最小自乗法の一種で、グリッドサーチの方法である。パラメータの値の範囲と計算間隔は以下の通りであ

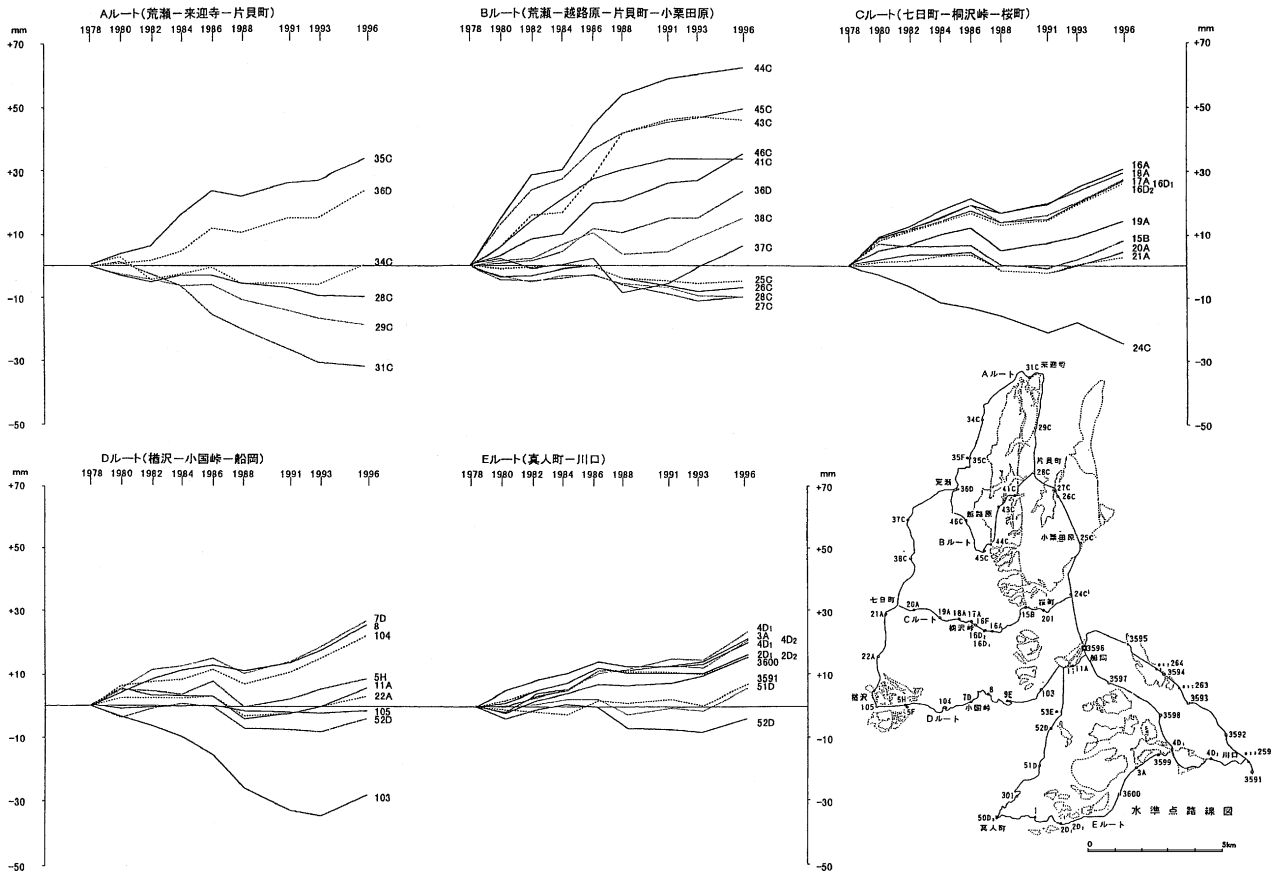


Fig. 6. Accumulated vertical movement at each levelling point (fixed point: 3596).

る。

H: 0.5 km-5.0 km: 0.5 km 毎

α : 40°-85°: 5° 毎

W: 0.5 km-5 km: 0.5 km 毎

断層の長さ $L=4$ km のときの最適解は, $H=1.0$ km, $\alpha=65^\circ$, $w=2.5$ km, $D=1.89$ m となった (Fig. 11). この断層は, 非常に浅く, 片貝断層などの活断層主要部とはなり得ない. そのような活断層の枝分かれの断層の可能性はあるが, 現時点では何とも云えない.

この解の安定性を見るために, パラメータ空間の中で, 理論とデータの残差の2乗平均 (標準偏差) がどう変化しているかを見る (Fig. 12). 上の最適解を中心として, 1つのパラメータだけを変化させたときのグラフである. 断層は非常に浅く, 最も浅い位置は1 kmより確実に浅いことがわかる. 傾斜角は $60^\circ \sim 65^\circ$, 断層の幅は $2 \sim 3$ km であることも抑えられていることがわかる.

次に, この断層の運動の地震モーメントを推定してみる. 次の式を用いる. ここで, μ は媒質の剛性率, ρ は密度, S は断層の面積である.

$$M_0 = \mu DS = \mu DLW$$

$$\mu = \rho v_s^2 = \rho \left(v_p \frac{v_s}{v_p} \right)^2$$

新潟県と長野県の県境付近の堆積層が厚い地域の深さ3 km 付近の $v_p=4.7$ km/s (Ikami *et al.*, 1986), その地域の $v_p/v_s=2.0$ (Tsukuda and Oki, 1994) を採用する. また, 密度 ρ については, 石油公団 (1994) などの測定データを参考にして, $\rho=2.5 \times 10^3$ kg/m³ とする.

最適解に対する地震モーメント $M_0=2.6 \times 10^{17}$ N・m, それに対応するモーメント・マグニチュード $M_W=5.5$ を得る.

この逆断層運動は約30年間に東西の水平方向に2.6 cm/yrの短縮速度をもたらしていることになる. この地域は新潟-神戸歪集中帯 (多田ほか, 1999) に含まれる. GPSの観測によると, 新潟地域の海岸線と新潟平野東縁付近の間の短縮速度は, $1 \sim 2$ cm/yr 程度である (例えば Sagiya, 2004 のベクトル図). 小千谷付近の短縮速度は歪集中帯の短縮速度のオーダーであり, 平均的な値よりやや高い.

1968-1978(10年間)

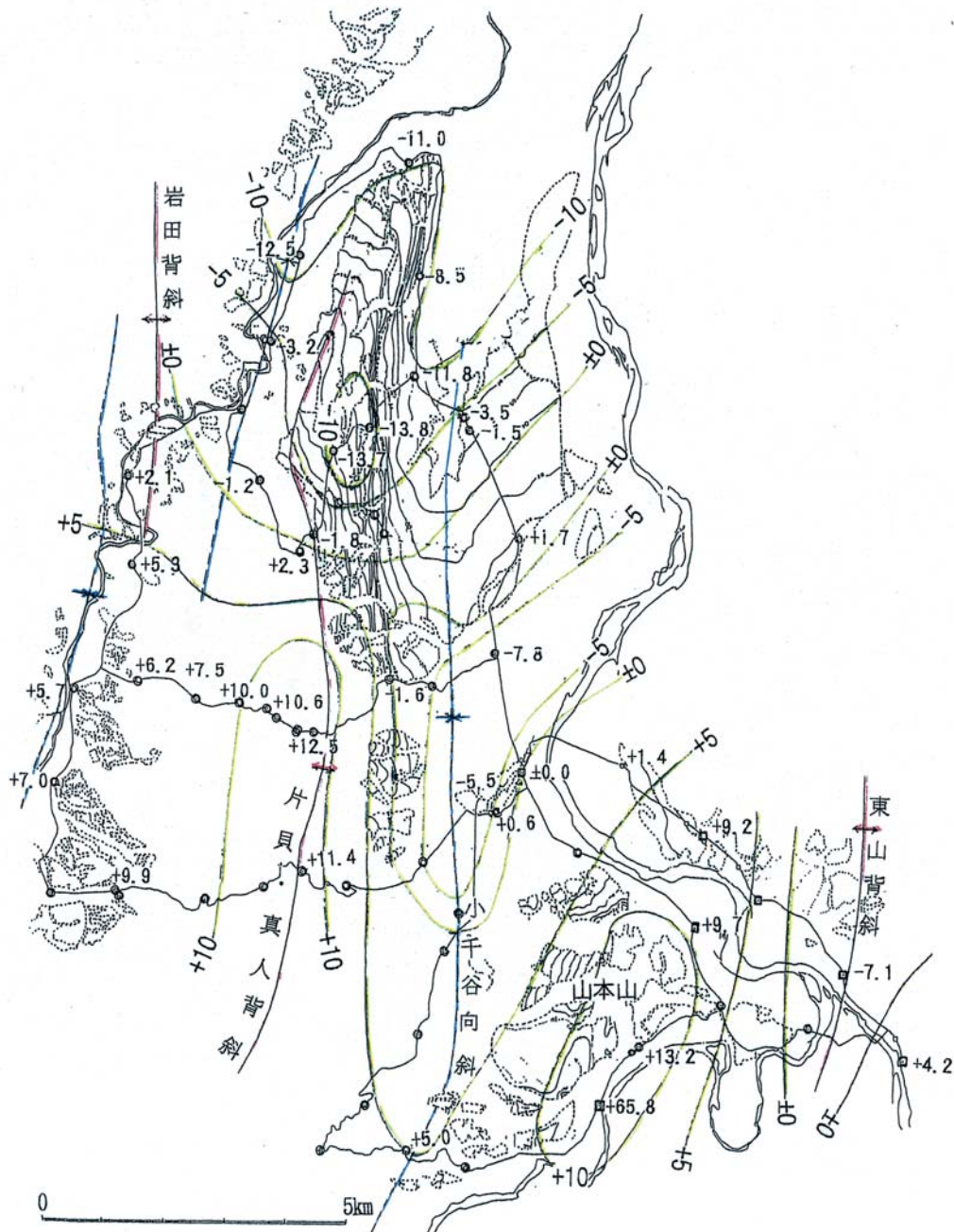


Fig. 7. Spatial distribution of vertical movements in the Ojiya region of active folding (1968-1978; fixed point: 3596).

§8. 結論

小千谷地域における1968から1998年までの30年間に及ぶ長期的な水準点変動のデータから明らかになった活褶曲変動の特徴の概略を列挙する。

- 1) 水準測量による上下変動の空間パターンは、後期更新世以降の変動パターンをほぼ表している。
- 2) 片貝・真人(時水)背斜, 小千谷向斜の褶曲帯を東

西に横断する路線(Bルート)のデータが示すように、背斜における隆起, 向斜における沈降の変位差の変動速度が、30年間のうち中期の1978年-1986年頃は高いレベル(最大6mm/yr)であった。

- 3) 30年間の前期や後期の比較的低レベルの水準変動は、数10万年間の変動の平均のレベルを少し超える程度であった。

1978-1988(10年間)

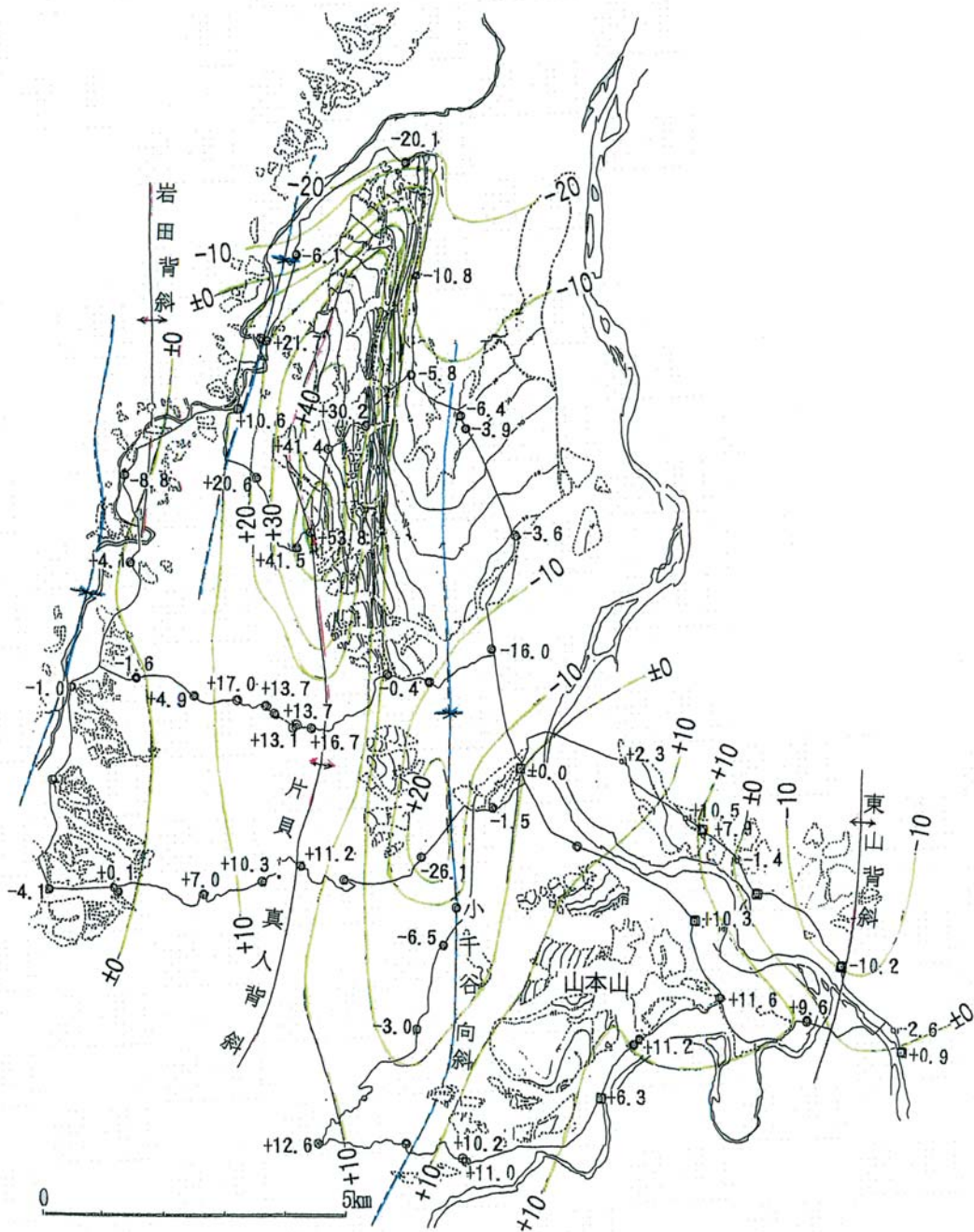


Fig. 8. Spatial distribution of vertical movements in the Ojiya region of active folding (1978-1988; fixed point: 3596).

4) 越路原を横断する水準測量ルート (Bルート) の急峻な上下変動を説明するため、逆断層によるずれ (クリープ) による説明を試みた。最適な断層モデルのパラメータは以下の通りである。断層の最浅端の深さ: 1 km, 断層の傾斜角: 65° , 断層の幅: 2.5 km, 断層の食い違い変位: 1.89 m. なお, 断層の水平方向の長さは不定。上下変動の空間分布から走向の長さ 4 km とした。この断層は

活断層の可能性はあるが, 片貝断層と一致するかどうかはまだ断定できない。この断層による東西方向の水平短縮速度は平均 2.6 cm/yr であった。

謝 辞

多くの水準測量の実施, 解析, 図面の作成は社団法人日本測量協会に委託した。水準点は土地所有者 (住民や

1991-1996(5年間)

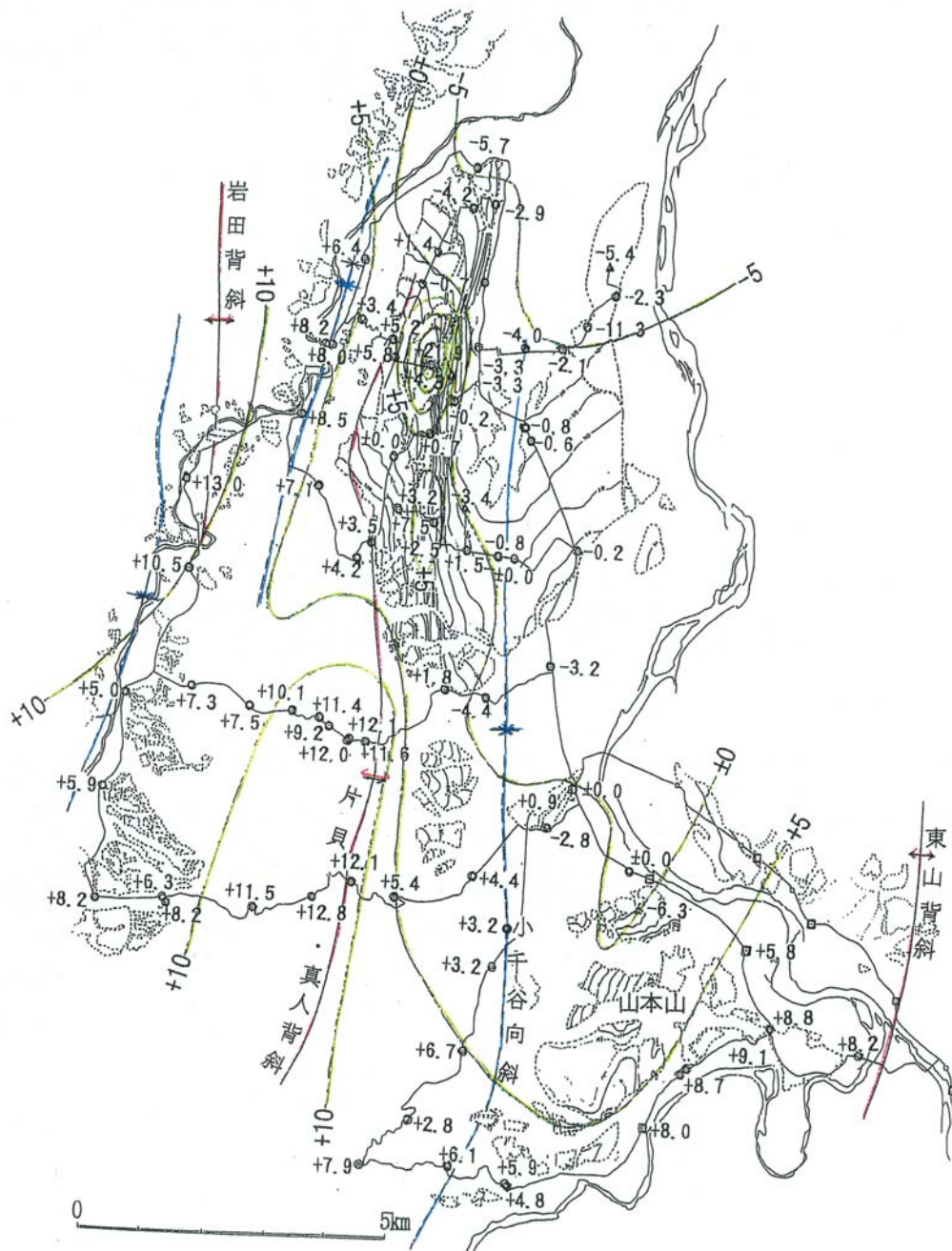


Fig. 9. Spatial distribution of vertical movements in the Ojiya region of active folding (1991-1996; fixed point: 3596).

地方自治体)のご厚意によって維持されている。断層モデル計算のプログラムは防災科学技術研究所の岡田義光氏作成のものを使用させていただいた。また、匿名査読者には原稿の不備な点をいくつか指摘していただいた。これらの方々にお礼を申し上げます。

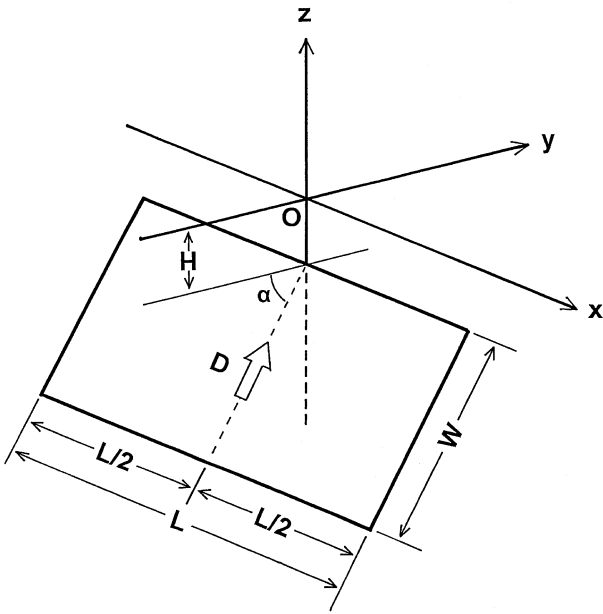


Fig. 10. Configuration of reverse fault model and fault parameters for interpreting steep active folding. The fault parameters H , α , L , W , and D are the depth of the top of the fault, dip angle, fault length, fault width, and dislocation displacement, respectively.

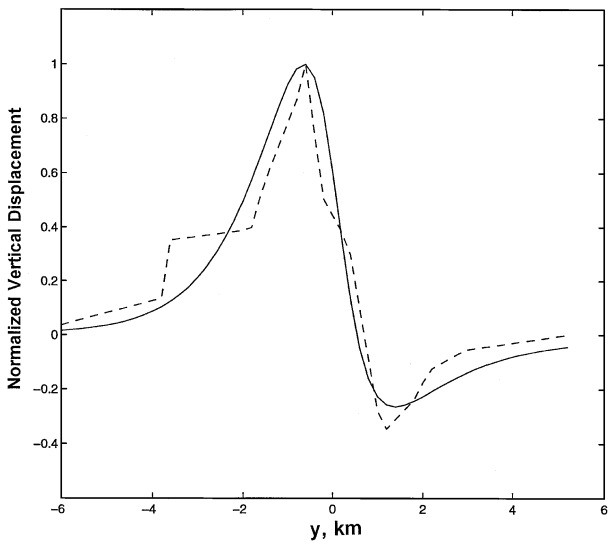


Fig. 11. Vertical ground displacement profile for the B-line cross-section of the optimal fault model interpreting levelling data. The solid and broken lines show theoretical and observed displacements, respectively.

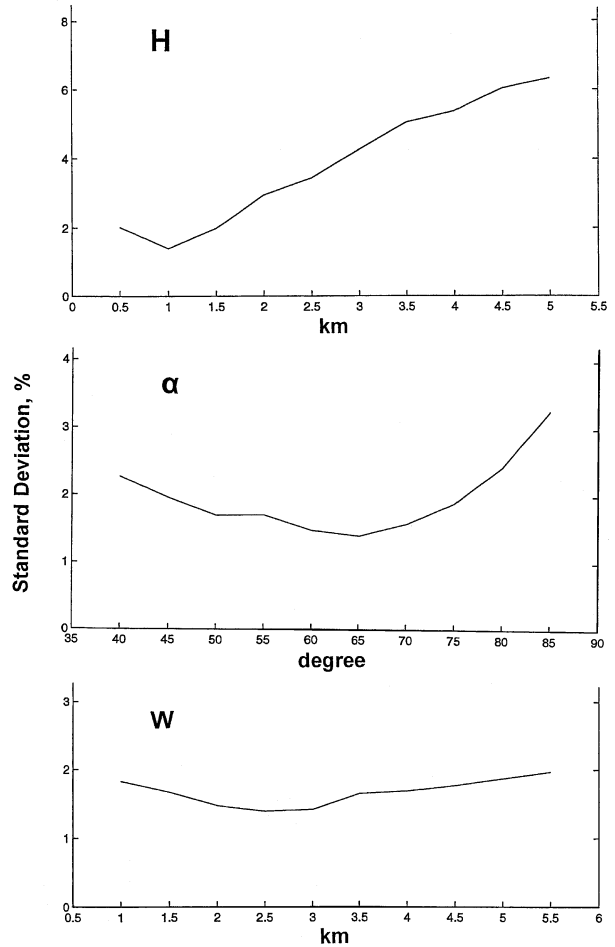


Fig. 12. The distribution of standard deviations of differences of vertical displacements on the ground between observations and calculations. The displacements are normalized by each maximum amplitude and compared. The standard deviation is in unit of percentage of the maximum value. H : depth of the top of the fault; α : dipping angle; W : width of the fault.

参考文献

- 早津賢二・新井房夫, 1982, 信濃川下流域(新潟県小千谷付近)における河成段丘群の形成年代と段丘面の変位速度, 地理学評論, **55-2**, 130-138.
- Ikami, A., T. Yoshii, S. Kubota, Y. Sasaki, A. Hasemi, T. Moriya, H. Miyamachi, R.S.Matsu'ura and K. Wada, 1986, A seismic-refraction profile in and around Nagano Prefecture, central Japan, *J. Phys. Earth*, **34**, 457-474.
- 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.
- 溝上 恵, 1968, 水準測量により検出された地殻変動, 地質学論集, **2**, 14-19.
- 溝上 恵・中村一明・井筒屋貞勝, 1980, 精密水準改測による小千谷地域の活褶曲の検出, 地震研究所彙報, **55**, 199-224.
- 宮村撰三・溝上 恵・岡田 惇・井筒屋貞勝・杉村 新, 1968, 水準点新設による活褶曲の研究, 第5回災害科学シンポジウム論文集, 169-171.
- 中村一明・太田陽子, 1968, 活褶曲 —研究史と問題点—, 第四紀研究, **7**, 200-211.
- Nishimura, T., M. Tobita, H. Yarai, T. Amagi, M. Fujiwara, H. Une, and M. Koarai, 2008, Episodic growth of fault-related fold in northern Japan observed by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L13301, doi: 10.1029/2008GL034337.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Sagiya, T., 2004, A decade of GEONET: 1994-2003 — The continuous GPS observation in Japan and its impact on earthquake studies —, *Eart Planets Space*, **56**, xxix-xli.
- 石油公団, 1994, 昭和58年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錘「最上川沖」調査報告.
- 多田 堯・鷺谷 威・小田切聡子, 1999, 新潟-神戸地震帯(応力集中帯)の提唱, 日本地震学会講演予稿集 1999年度秋季大会, P053.
- Tsukuda, T. and Y. Oki, 1994, A destructive shallow small earthquake — The 1992 Tsunan earthquake of M4.5 in southern Niigata Prefecture, central Japan —, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **69**, 19-38.
- 佃 為成・武田智吉・柳沢 賢, 2005, 新潟県中越地震(2004年10月, M6.8)震源域周辺の地殻変動, 平成16年度地震研究所特定共同研究(A)報告 —内陸直下地震の予知—, 61-90.

(Received January 31, 2008)

(Accepted November 21, 2008)