

10. 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 { 溝上 恵
 中村 一明
 井筒屋 貞勝

(昭和 55 年 2 月 29 日受理)

1. はじめに

東北日本内帯における活褶曲の存在をはじめて提唱したのは OTUKA (1941), 大塚 (1942) と池部 (1942) である。褶曲軸をよぎる河成段丘面および水準点が、新第三系・第四系の褶曲構造の成長を示す向きへ変位しているという事実を根拠としたこの提唱は、その後さまざまな研究段階をへて、定性的議論からより信頼性の高い観測データに基礎をおいた定量的議論の段階へと移行してきた (中村, 太田 (1968), 中村 (1979))。

ここで取上げる新潟県小千谷地域の活褶曲については、小千谷市北方の段丘面が魚沼層群の構造と調和する異常傾斜を示すこと、長岡—柏崎間の水準改測結果が褶曲構造の成長する方向に変位していることなどが池部 (1942) により指摘された。池部が述べた異常傾斜の河成段丘と、大塚の指摘した水準点変動地域での地形および地質調査が NAKAMURA (1957) により行なわれ、その結果、魚沼層群の構造と調和的に年代の古い方がより大きく変位した河成段丘の存在が確認された。その結果から、それまでに得られた水準改測成果も考慮して、小千谷向斜の東翼の少なくとも幅数 km, 南北 10 km 以上の地域が、魚沼層群上半部堆積以来、 10^{-7} /年のオーダーの割合で西に傾き続け、現在の褶曲構造をつくっているという結論が導かれた。段丘面の変形については、その後も資料が蓄積されつつある。

ここで述べた研究課題、すなわち水準点の変動と河成段丘面の変形および新第三系・第四系の褶曲構造とを対比し、既存の褶曲構造の変形の現在における進行様式を明らかにすることは、活褶曲に関する研究のなかでも、最も基本的な課題である。しかし、実際には水準点の分布密度が低く、またその設置場所が必ずしも適当でないために、水準改測結果と地形、地質構造との対比がつけにくい場合が多い。地質時代を通じて蓄積された変位と、現時点での変動量との関連性について、客観性のある結論をえるためには、水準点の分布密度をより高くし、褶曲軸直上に水準点を置く必要があり、また場合によっては、水準路線そのものを地形、地質構造を考慮に入れて設置する必要が生じてきた。

このような背景から、活褶曲研究のための水準点が宮村撰三、杉村 新、岡田 惇、中村一明によって 1957 年に小千谷地域に埋設された。この水準路線は褶曲軸とほぼ直交するように設置されたが、1 路線のみで褶曲軸を横切っているため、変動を面的に検出するには不都合であった。そのため 1967・1968 年に同一褶曲軸を 4 回にわたり別の地点で横切る高密度水準点網が設置された。この時点で、1957 年の測量に対する改測が実施されたが、故障点、亡失点が多く、期待したほどの成果はえられなかった。しかし、時水背

斜 (Fig. 1) の成長が検出され、最大 10^{-9} /年のオーダーに達する大きな傾動速度を示すことが確かめられた (宮村ら, 1968; 溝上, 1968; MIZOUE, 1969). 1978 年にこの水準点網の整備が再び行なわれ、過去 10 年間での故障点の改埋、亡失点の補充が行なわれた。同時にこの水準点網の改測が行なわれた。その結果、小千谷活褶曲地域の地殻の上下変動がはじめて面的に検出され、現時点における褶曲運動の進行過程をきわめて高い精度で検出することに成功した。

本論文では、これまでの精密水準改測の成果にもとづく活褶曲の研究過程を念頭におきつつ最近の改測成果に基く小千谷活褶曲地域における地殻の上下変動と造構運動の様式との対比を行う。

2. 活褶曲研究のための水準点設置

精密水準測量のくりかえしによる活褶曲に関する研究史は、小千谷地域の場合およそ次の 4 期に区分される。

2-1. 第 1 期; 1 等水準点の改測成果 (1894 年~1927 年) と活褶曲の提唱

水準点の変動が活褶曲運動を反映しているという大塚 (1942) の指摘は、小千谷付近、信濃川沿岸の 1 等水準点の変動によっている。小千谷から十日町にいたる 1 等水準路線は、この地域に発達する褶曲軸にはほぼ平行しているが、小千谷市の南で一部屈曲している (B.M. 3601, 3600, 3599, 3598, 3597, 3596, J. 3595)。これらの水準点のうち B.M. 3598 と B.M. 3599 が向斜軸からはなれた位置にある。1894 年~1927 年の変動をみると、そのうちの 1 点、B.M. 3598 が他の水準点に対して隆起している。(B.M. 3599 は崖ぶちにあり、この期間では故障点となっていて、異常な沈降を示している。1956 年には目視で傾斜していることが判るほどであった。)。この場合には、1 等水準路線がたまたま屈曲し、褶曲軸からの距離が変化するために、活褶曲に伴う変動の議論が行えたが、褶曲軸を横切っていないので、褶曲運動の進行を検出するために最適の水準点の配列とはいえない。なお、B.M. 3600, 3599, 3598, 3597 は 1927 年の改測以降に故障点となったことが 1950 年代後半の調査でわかり、1894 年~1927 年にひきつづく期間のうち、1957 年の改測にいたる期間 (1927 年~1957 年) に対する活褶曲に伴う変動は求められていない。

2-2. 第 2 期; 褶曲軸を横切る水準路線の設置とその改測 (1958 年~1967 年)

1940 年代に入り、活褶曲運動の検出の目的で宮村 (1943) は、米代川地域に水準点を埋設した。一連の研究計画のもとに、1958 年地震研究所により小千谷地域に 13 点の水準点が埋設された。これらの水準点は、周辺地域の地形や地質構造・埋設基盤を考慮し、褶曲軸を横切る路線に沿って設置されたが、1967 年の改測以前に崖くずれなどにより 6 点が故障または亡失した。その結果、当初に期待していたほどの成果はえられなかったが、長期にわたり維持するための水準点設置位置などその後の研究計画を立てる上で貴重な経験となった。

1967 年の改測により、1958 年以來の 9 年間について、打越—小国峠—橋沢の路線に沿う変動量がえられた。水準点はわずか 6 点であったが、褶曲軸を横切っているので、時水背斜の成長が検出され、変動量が傾動速度にして 10^{-9} /年のオーダーに達することが確かめられた。その後の水準点の設置には地学的位置、埋設方式、構造など大幅な改良の余地が認められたが、同時に研究目的に合致した水準点設置の有効性が再認識された。

2-3 第3期; 高密度水準点網の設置, 改測 (1967・1968年~1978年) と面的変動様式の解析

前述のように, 第2期における苦い経験から長期にわたる水準点の保存がきわめて困難であることがわかり, 1967・1968年の改埋, 増設計画では, 水準路線を閉塞路線とすること, 同一褶曲軸を数回別の地点で横切ること, 褶曲軸と路線が交わるような要所では,

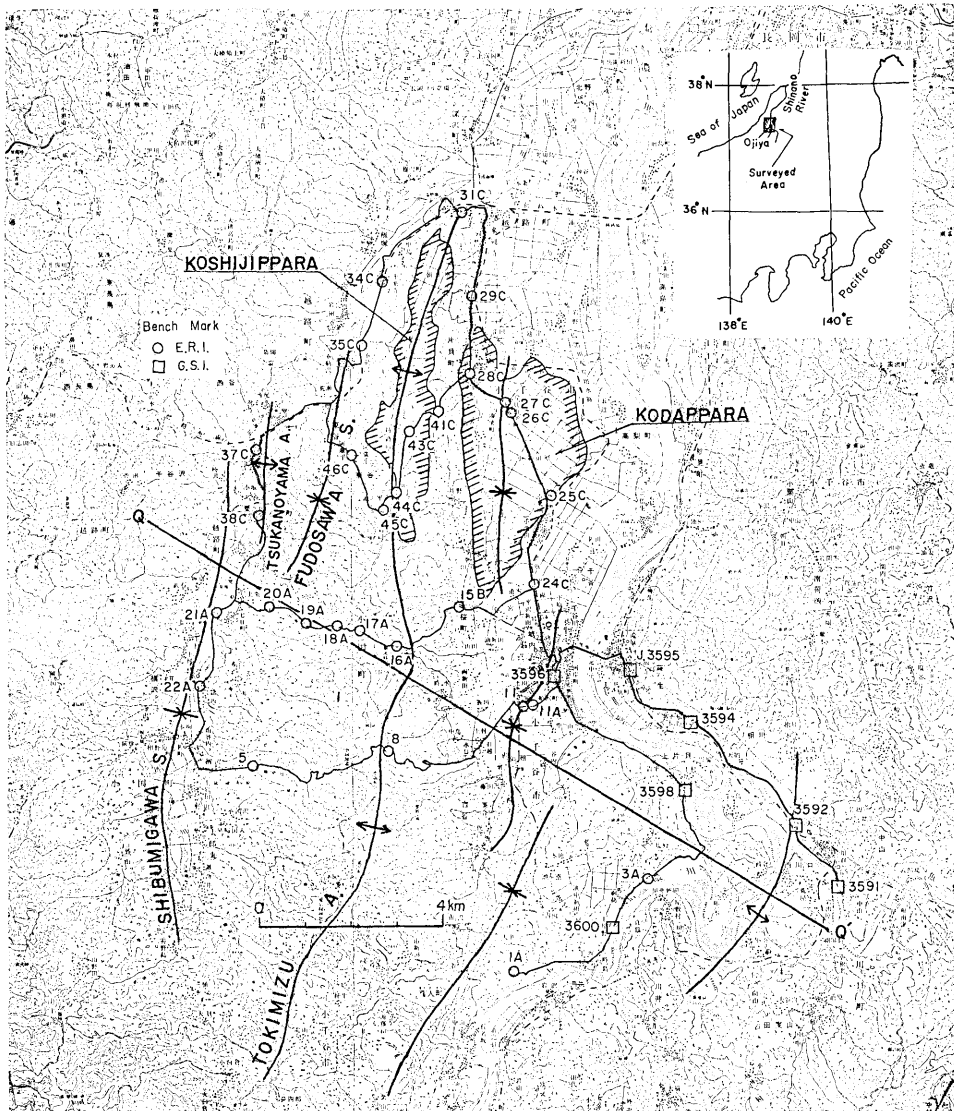


Fig. 1. Index map showing location of bench marks (circle and square), leveling route (thin solid line), axes of anticline (A) and syncline (S) (thick sinuous lines with a pair of arrows), two river terrace surfaces (Koshijippara and Kodappara as mentioned in the text) and cross sectional line QQ' (cross section in Fig. 8). Inset indicates the location of the Ojiya area.

複数の水準点を設け故障にそなえること、などの改良が加えられた。このような方針で 1967 年に 22 点、1968 年に 27 点が増設され、1958 年以來の 7 点を加え合計 56 点の地震研究所水準点網が整備された。これらの点に国家水準点 7 点を加え 1968 年現在で総数 63 点からなる高密度水準点網が小千谷地域に完成した。

1978 年の改測に先行して行なった水準点の埋設状態の調査により、1968 年現在で 56 点であった地震研究所水準点のうちほぼ半数の 26 点が、埋設以後の約 10 年間に道路拡

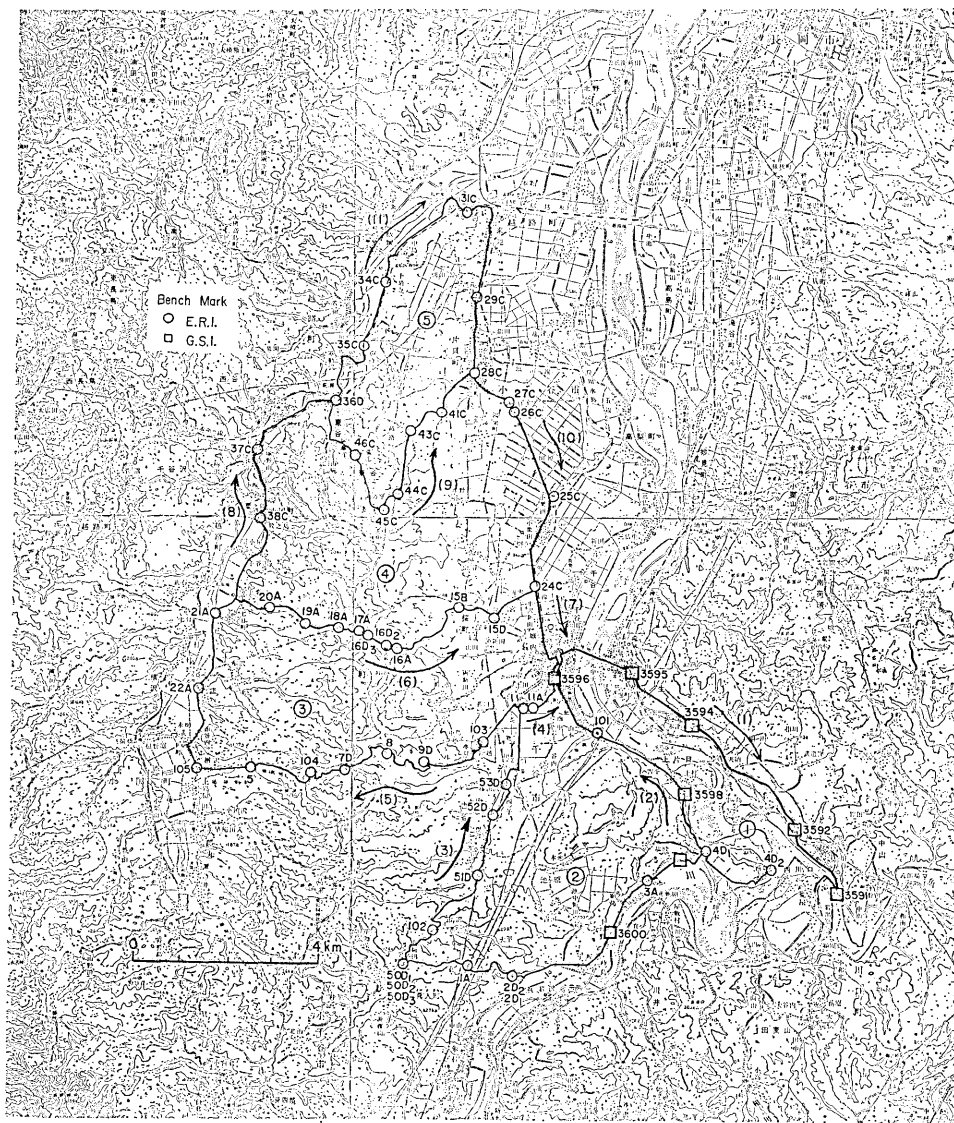


Fig. 2. The precise level net subjected to levelings in Oct. 1978. Numbers in parentheses and circles indicate the leveling route number (from 1 to 11) and the loop number (from 1 to 5) respectively. Arrows indicate the direction of the traverse.

幅・除雪作業および地送りなどのために亡失していることが判明した。従って、1978年の改測成果は、残存の地震研究所水準点 30 点と国家水準点 7 点の計 37 点について求められた (Fig. 1)。その結果は後節で詳しく述べるように、活褶曲の進行を明瞭に示し、当初の目的を 1958 年以来はじめて達成した。

2-4. 第 4 期; 将来の改測のための整備

小千谷活褶曲地域の地殻変動データを今後も継続して蓄積していくためには、亡失点や故障点を補充し、高密度水準点網を維持する必要がある。そのため、既設点 30 点 (地震研究所水準点) に加え新設点 17 点、国家水準点 10 点 (1 等水準点および道路水準点) を加え、総数 57 点からなる水準点網の整備を行なった。その結果、今後改測が実施されると、面的に第 3 期の改測成果をしのぐデータがえられることとなる。また時間的な変形の進行様式が知られることにもなる。なお 1978 年の整備完了時点での水準点網を Fig. 2 に示す。

3. 測量精度と観測比高差

Fig. 2 の水準点網は既設点、新設点を合わせて 57 点、路線長は約 93 km である。測量は 1 等水準測量の規準以上の精度が確保されるよう実施要規が定められた (日本測量協会, 1979)。既設 37 点についての観測比高差は主に、1967・1968 年の地震研究所による測量成果に準拠して求められた。

3-1. 測量精度

測量は 1 等水準測量の規準以上の精度を確保するため、次のような実施要規に従って行なわれた。

i) 観測誤差の許容範囲は往復差の制限 (固定点間を含む) と環の閉合差の制限を $2\text{mm}\sqrt{S}$ とする。ただし、 S は往復または環の軒数である。

ii) 使用する主要器械は、1 級水準儀 (レベル感度 $10''/2\text{mm}$ 以上、最小目盛 0.1mm 、円形気泡感度 $5'/2\text{mm}$ 以上)、および日本測量協会技術センターの検定をうけた 1 級水準標尺 (目盛盤インパルテープ、20 kg 張力、目盛誤差 $100\ \mu\text{m}$ 以下、付属気泡感度 $10'/2\text{mm}$ 以上) とする。

iii) 1 点における観測 (後視左、前視左、前視右、後視右) は、2 視準 2 読定 (0.1mm 位) とし、各視準ごとに気泡を点検する。

iv) 観測距離 (レベルと標尺間) は最大 40 m とする。

v) 水準点間が 2 km 以上ある路線については、約 2 km おきに通常の観測固定点に比べてより強固で永続性のある固定点を設け、観測においては通常の観測固定点と同じ扱いとし、計算整理においては水準点と同じ扱いとする。

vi) 1 日の観測は水準点に取付けて終るものとする。ただし比高の大きい路線等で、観測点が非常に多くなる場合は、固定点で終ることがあるが、往復の観測は同一固定点で終ることはしない。

vii) 観測値の調整は、観測値に標尺補正および楕円補正を行なった結果にもとづいて、観測方程式による水準網計算により行う。

以上の要領により精密水準測量が実施され、以下に述べるように総合的に見て次節以後の議論を行うに十分な精度が確保されたものと判断される。すなわち、

i) 往復差制限 ($2.0 \text{ mm}\sqrt{S}$) 超過による再測率 7.8% (7.3 km/93 km)

ii) 往復差 (μ) の分布, (μ の数, 66)

μ の大きさの分布

$\mu/2\text{mm}\sqrt{S}$	0	0.1%以上 20%未満	20%以上 40%未満	40%以上 60%未満	60%以上 80%未満	80%以上 100%未満
度 数	13.7%	22.7%	22.7%	18.2%	12.1%	10.6%

μ の符号の分布

μ の 符 号	+	-	0
度 数	60.0%	33.3%	6.1%

iii) 環の閉合差 (Fig. 2 参照), ただし, ひとつおりの観測で制限値が超過した環がなく, 従って再測を行っていない.

環 の 番 号	1	2	3	4	5
環 の 杆 数 (S)	18.951 km	23.744 km	26.342 km	28.652 km	18.455 km
制限値 ($2\text{mm}\sqrt{S}$)	8.7 mm	9.7 mm	10.3 mm	10.7 mm	8.6 mm
閉 合 差	+3.6 mm	-0.3 mm	-2.0 mm	-4.1 mm	+4.8 mm

iv) 点検測量の結果

区 間	杆 数	測 定 値	点 検 値	差
3596~3595	1.146 km	+9.2846 m	+9.2864 m	-1.8 mm
017-259~4 D ₂	0.812	+6.4087	+6.4080	+0.7
4 D ₂ ~4 D ₁	0.967	+41.1895	+41.2904	-0.9
11~103	0.714	-3.3002	-3.3009	+0.7

v) 往復差から求めた 1 km 当りの平均二乗誤差 (M_1)

路線番号 (i)	区 間	杆 数 (S_i)	1 km 当り平均二 乗誤差 M_{1i}	鎖部数 (n)
1	3596~4 D ₁	13.383 km	$\pm 0.44 \text{ mm}$	1
2	4 D ₁ ~3596	5.568	± 0.25	3
3	4 D ₁ ~ 11	17.105	± 0.46	13
4	11~3596	1.071	± 0.10	2
5	11~ 21A	13.864	± 0.57	9
6	21A ~ 24C	8.887	± 0.58	11
7	24C ~3596	2.520	± 0.03	1
8	21A ~ 36D	6.720	± 0.65	3
9	36D ~ 28C	7.614	± 0.61	6
10	28C ~ 24C	5.431	± 0.53	4
11	36D ~ 28C	10.841	± 0.48	5
計		93.004		66

全路線の 1 km 当りの平均二乗誤差 (M_1)

$$M_1 = \pm 0.51 \text{ mm} (= 1/4 \cdot [\mu_i^2/S_i]/n)$$

ただし μ_i : 各鎖部の往復差 (mm 単位)

S_i : 各鎖部の距離 (km 単位)

n : 鎖部数

vi)

a) 水準網平均計算から求めた平均二乗誤差

1 km 当りの平均二乗誤差 (M_2)

路線番号 (i)	区 間	距離 (S_i)	観測比高	平均比高	補正数 (V_i)
1	3596~4 D ₁	13.383 km	+48.1330 m	+48.1302 m	-2.8 mm
2	4 D ₁ ~3596	5.568	-48.1291	-48.1302	-1.1
3	4 D ₁ ~ 11	17.105	-33.4051	-33.4054	-0.3
4	11~3596	1.071	-14.7247	-14.7248	-0.1
5	11~ 21A	13.864	-11.0084	-11.0067	+1.7
6	21A ~ 24C	8.887	- 9.6874	- 9.6873	+0.1
7	24C ~3596	2.520	+ 5.9688	+ 5.9692	+0.4
8	21A ~ 36D	6.720	-18.3637	-18.3629	+0.8
9	36D ~ 28C	7.614	+ 7.0379	+ 7.0404	+2.5
10	28C ~ 24C	5.431	+ 1.6346	+ 1.6352	+0.6
11	36D ~ 28C	10.841	+ 7.0426	+ 7.0404	-2.2
計		93.004			

$$M_2 = \pm 0.71 \text{ mm } (= \sqrt{[P_i V_i V_i]/(m-n)})$$

ただし, $P_i=1/S_i$, m : 観測方程式の数 n : 未知点の数 V_i : 補正数 (表中の値)

b) 交点の平均二乗誤差

交点の番号	平均標高	平均標高の平均二乗誤差	摘 要
4 D ₁	110.7081 m	±1.3 mm	固定点 3596
11	77.3027	±0.7	標高: 62.5779 m
21A	66.2961	±1.6	
24C	56.6087	±1.1	
36D	47.9331	±1.9	
28C	54.9735	±1.7	

3-2. 観測比高および観測比高差

1978年10月に実施された水準測量により, 観測比高 ΔH_{II} が求められ, 前回の測量 (路線 (1) では 1965年6~8月, 路線 (2)~(5) では 1967年10月, 路線 (6)~(11) では 1968年10~11月, Fig. 2 参照) による観測比高 ΔH_I との差 ($\Delta H_{II}-\Delta H_I$) がえられた. その値が Table 1 の右端の欄に示す観測比高差 $\Delta H_{II}-\Delta H_I$ であり, この値から次節で述べる水準点の変動量 Δh_A または Δh_B が観測比高差の路線にそっての累積加算 $\Sigma (\Delta H_{II}-\Delta H_I)$ として求められる. 1978年の測量 (II) と前回の測量 (I) との期間での亡失点および新設点については, 観測比高差はえられない. Table 1 では観測比高を路線ごとに区分して示した. 観測比高の欄は左右の2欄に区切られる. 左欄にはそれぞれの水準点の観測比高を示した. 左欄に示した観測比高が測量時期 (I) と (II) で対応がつけられない場合がある. そのような場合には測量時期 (I) と (II) で対応のつけられる水準点の組合せについて観測比高を求めその値を右欄に示した.

4. 水準点の変動量

Fig. 1 に示す路線は新設点に対する測量を含み, 1978年10月に改測された. 前回の測

Table 1. Change of the relative height of the bench marks obtained by the precise relevings carried out in Oct. 1978. The relative height of the bench marks is designated as ΔH_{II} for the period of Oct. 1978 and ΔH_I for the preceding period of Jun.-Aug. 1965, Oct. 1967 or Oct.-Nov. 1968.

Leveling Route (1)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Jun.-Aug. 1965)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$
B.M. 3596	m + 9.2841	B.M. 3596	m + 9.2822	mm + 1.9
3595	+29.1403	3595	+29.1300	+10.3
3594	-21.7127	3594	-21.6910	-21.7
3592	- 0.8421	3592	- 0.8572	+15.1
3591		3591		

Leveling Route (2)-(3)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct. 1967)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$
B.M. 3A	B.M. 3A	B.M. 3A	B.M. 3A	
	m +29.9734		m - 2.7587	
4D ₁	m - 2.0192	3599	+31.1577	m - 2.0153
	-31.9926	4A	- 2.2380	mm - 3.9
		4	-27.1763	
3598	3598	3598	3598	
3598	3598	3598	3598	
	- 7.3113		-12.0967	
101	-16.1376	3597	-16.1270	-10.6
	- 8.8263		- 4.0303	
3596	3596	3596	3596	

Leveling Route (3)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct. 1967)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$
B.M. 3A	B.M. 3A	B.M. 3A	B.M. 3A	
	m +11.7994		m +11.7416	mm +57.8
3600		3600		
3600	3600	3600	3600	
	- 5.2740		+ 7.4706	
2D ₂		2		
	- 0.1560	+16.1365	+ 4.0924	+16.2034
2D ₁		1		-66.9
	+21.5665		+ 4.6404	
1A	1A	1A	1A	

Table 1 (Continued)

Leveling Route (4)

ΔH_I (Oct. 1978)		ΔH_{II} (Oct. 1967)		$\Delta H_I - \Delta H_{II}$
B.M. 11	m	B.M. 11	m	mm
	- 0.0181		- 0.0248	+ 6.7
11A		11A		
	-14.7067		-14.7061	- 0.6
3596		3596		

Leveling Route (5)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct. 1967)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$	
B.M. 11	m	B.M. 11	m	B.M. 11	
	- 3.3000		+ 7.2723		
103		10A			
			- 5.4839		
		10		m	mm
	+35.2694	+97.5264		+97.5078	+18.6
			+32.1278		
9D		9			
			+ 2.2151		
	+65.5570	9A			
			+61.3765		
8		8		8	
8		8		8	
	+44.3831		+ 5.5949		
7D		8A			
			+18.5393		
	-48.5058	-70.2125		-70.2108	- 1.7
104		7A			
			-58.8108		
		6A			
	-66.0898		-35.5342		
5		5		5	
5		5		5	
	-14.8905		-16.4789		
105		-32.5298	23A		-32.5266
	-17.6393				- 3.2
22A		22A		22A	
22A		22A		22A	
	- 5.7907		- 5.7893		- 1.4
21A		21A			

Table 1 (Continued)

Leveling Route (6)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		$\Delta H_{II}'$ (Oct. 1967)	ΔH_{II} (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$
B.M. 21A	m +22.1824	B.M. 20A	B.M. 21A	m +22.1818	mm + 0.6
20A	+23.6065	20A	20A	+23.6053	+ 1.2
19A	+31.8455	19A	19A	+31.8423	+ 3.2
18A	+38.2738	18A	18A	+38.2728	+ 1.0
17A		17A	17A		
17A	+12.9335	17A	17A		
16D ₃	+ 8.4874				
16D ₂	- 0.1935	+16.1208	+16.1193	+16.1187	+ 1.5
16D ₁	- 5.1066				
16A		16A	16A		

Leveling Route (6)·(7)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$	
B.M. 16A		B.M. 16A	B.M. 16A		
		m -32.8877			
		12A			
		-10.9255			
	m -97.4275	12C			
		-22.3078	m -97.4132	mm -14.3	
		13C			
		-15.9211			
		14A			
		- 3.1015			
		15C			
		-12.2696			
15B		15B	15B		
15B	-28.8952	15B	15B		
		-15.2716			
15D	-15.3937	-38.3197	15A	-38.3261	+ 6.4
24C	+ 5.9692				
3596		3596	3596		

Leveling Route (7)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II} - \Delta H_I$
B.M. 24C	m + 5.9692	B.M. 24C	m +5.9568	mm +12.4
3596		3596		

Table 1 (Continued)

Leveling Route (6)·(8)							
ΔH_{II} (Oct. 1978)				ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$	
B.M.		B.M.		B.M.		B.M.	
20A	m	20A		20A	m	20A	
	-22.1824		m		-13.8732		m
21A			-18.1056	39C			-18.1053
	+ 4.0768				- 4.2321		- 0.3
38C		38C		38C		38C	

Leveling Route (8)							
ΔH_{II} (Oct. 1978)				ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$	
B.M.		B.M.		B.M.		B.M.	
38C	m	38C		38C	m		mm
	-11.5811				-11.5779		- 3.2
37C		37C		37C			

Leveling Route (8)·(9)							
ΔH_{II} (Oct. 1978)				ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$	
B.M.		B.M.		B.M.		B.M.	
37C		37C		37C	m	37C	
	m				- 0.9309		
	-10.8587			47C			m
36D					- 4.0818		+26.4710
				36C			mm
	+37.3264				+31.4837		- 3.3
46C		46C		46C		46C	

Leveling Route (9)							
ΔH_{II} (Oct. 1978)				ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$	
B.M.		B.M.		B.M.		B.M.	
46C	m	46C		46C	m		mm
	+97.6101				+97.6066		+ 3.5
45C		45C		45C	+39.9069		+ 4.1
	+39.9028			44C			
44C		44C		44C	-51.2018		-11.9
	-51.2137			43C			
43C		43C		43C		43C	
					-23.7822		
	-46.0329			42C			-46.0328
					-22.2506		- 0.1
41C		41C		41C		41C	
					-25.8557		
41C		41C		41C		41C	
	-70.5523			40C			-70.5543
					-44.6986		+ 2.0
28C		28C		28C		28C	

Table 1 (Continued)

Leveling Route (10)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$
B.M. 28 C	m - 6.3798	B.M. 28 C	m - 6.3881	mm + 8.3
27 C	+ 7.5869	27 C	+ 7.5849	+ 2.0
26 C	+32.6006	26 C	+32.5974	+ 3.2
25 C	-32.1725	25 C	-32.1630	- 9.5
24 C		24 C		

Leveling Route (8)-(11)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$
B.M. 37 C	m -10.8587	B.M. 37 C	m - 0.9309	
36 D	+ 5.2374	47 C	m - 4.0818	mm - 5.3
		36 C	- 5.6160	
35 C		35 C	- 0.6033	
		35 C		

Leveling Route (11)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$
B.M. 35 C	m - 9.6333	B.M. 35 C	m - 9.6240	mm - 9.3
34 C		34 C		
34 C	- 9.7317	34 C	- 6.6537	
		33 C	- 3.7089	m - 9.7332
		32 C	+ 0.6294	+ 1.5
31 C		31 C		
31 C	- 3.6761	31 C	- 2.7365	
		30 C	- 0.9421	- 3.6786
29 C		29 C		+ 2.5
29 C	+24.8441	29 C	+24.8474	
28 C		28 C		- 3.3

Leveling Route (9)-(11)

ΔH_{II} (Oct. 1978)		ΔH_I (Oct.-Nov. 1968)		$\Delta H_{II}-\Delta H_I$
B.M. 46 C	m -37.3264	B.M. 46 C	m -31.4837	mm - 2.0
36 C	+ 5.2374	36 C	- 32.0870	
		35 C	- 0.6033	
35 C		35 C		

量との期間は、路線 (1) については約 13.3 年、路線 (2)~(5) については約 11 年、路線 (6) については約 10 年および 11 年 (1967 年、1968 年の 2 回測量が行なわれた)。路線 (7)~(11) については約 10 年である。前回の測量との期間が 10~13.3 年とばらつきが小さいこと、水準点の分布密度が従来の例に比較してきわめて高いことなどを念頭において変動量を求めることとする。すなわち観測比高差 (Table 1) を変動量に変換するとき、測量精度をなるべくそこなうことのないよう補正量を最少限度にとどめながら変動量の面的分布を求めた。その結果を Table 2 および Fig. 3 に示す。

4-1. 期間補正

路線 (6) (Fig. 3) と時水背斜軸 (Fig. 1) が交わる地点に近接する B. M. 16 A は 1967 年の埋設以降 1978 年 10 月の改測にいたるまで、隣接する水準点に対して安定した隆起を示している。これは主に B. M. 16 A の埋設地点周辺の地形、地質条件が長期にわたる水準点の保存に適していることによる。この B. M. 16 A を不動点と仮定し、他のすべての水準点の変動量を求めた。変動量は次の 2 つの方法により求めた。1 つは改測までの期間のばらつきの補正を行わず、観測比高差の単純な累積加算から変動量 Δh_A を求める方法であり、他は前回の測量以降 1978 年 10 月の改測にいたるまでの期間それぞれ

Table 2. Change of height of bench marks obtained by the precise releavings in Oct. 1978. The difference in the time intervals from the preceding period of levellings is uncorrected for Δh_A and is corrected for Δh_B so as to correspond to the interval of 10 years (1969-1978).

No.	B. M.	Uncorrected (A)	Corrected (B)	No.	B. M.	Uncorrected (A)	Corrected (B)
		Δh_A	Δh_B			Δh_A	Δh_B
		mm	mm			mm	mm
1	1A	- 8.3	- 7.5	20	20A	- 6.9	- 6.3
2	3600	58.6	53.3	21	15B	-15.5	-14.1
3	3A	0.8	0.7	22	24C	-20.3	-20.3
4	3591	- 8.1	- 8.3	23	38C	- 7.2	- 7.2
5	5	- 2.9	- 2.6	24	45C	-10.2	-10.2
6	8	- 1.2	- 1.1	25	44C	-14.3	-14.3
7	3592	-23.2	-19.6	26	37C	-10.4	-10.4
8	3598	- 3.1	- 2.8	27	25C	-10.8	-10.8
9	22A	- 6.1	- 5.5	28	46C	-13.7	-13.7
10	11	-19.8	-18.0	29	43C	-26.2	-26.2
11	11A	-13.1	-11.9	30	41C	-26.3	-26.3
12	3594	- 1.5	- 3.3	31	26C	-14.0	-14.0
13	16A	0.0	0.0	32	27C	-16.0	-16.0
14	21A	- 7.5	- 6.8	33	28C	-24.3	-24.3
15	3596	-13.7	-12.5	34	35C	-15.7	-15.7
16	17A	- 2.1	- 1.9	35	34C	-25.0	-25.0
17	18A	- 2.8	- 2.5	36	29C	-21.0	-21.0
18	19A	- 5.5	- 5.0	37	31C	-23.5	-23.5
19	3595	-11.8	-11.1				

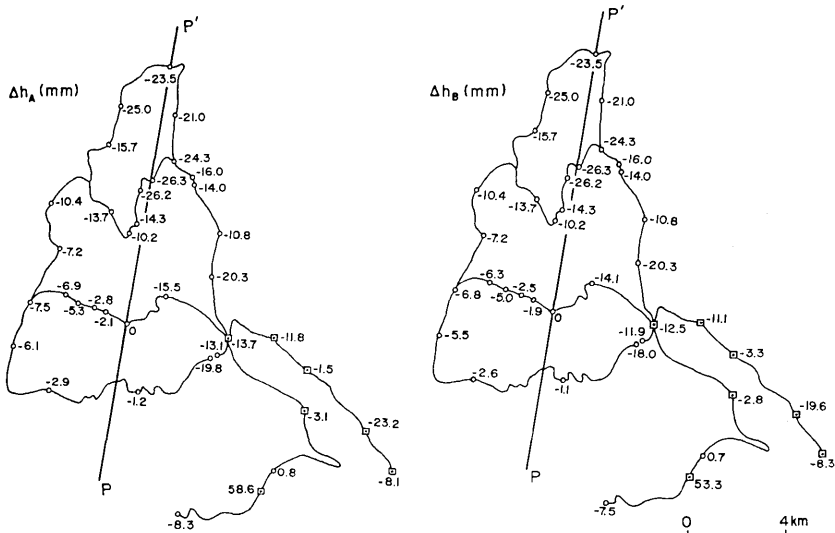


Fig. 3. Distribution of the change of height of the bench marks given in Table 2 for the leveling route in Fig. 1 ((a) Δh_A (uncorrected), (b) Δh_B (corrected)).

れの水準点の変動速度が一定であると仮定して改測までの期間のばらつきの補正を行ない最近 10 年間に対応する変動量 Δh_B を求める方法である。

後者の方法による場合の補正量は以下で述べるようにそれぞれの路線についての変動量に対してほとんどの水準点について 10% 以下におさえることができる。改測までの期間がちょうど 10 年である路線 (7)～(11) 上の水準点については補正を加える必要がない。この条件を満たす水準点は 16 点あり、総数 37 点の約 43% にあたる。また改測までの期間が 11 年の路線 (2)～(6) 上の水準点については、補正量と変動量の比が 1/11 であり、変動量の分布パターンに実質的な影響を与えるほどに大きな補正量とはならない。このような水準点の数は 17 点である。補正を全く加える必要のない 16 点をこれに加えると合計 33 点となる。従って総数の約 90% の水準点がそれぞれの路線ごとの変動量の 10% 以下の補正量により変動量を求めることが可能である。なお路線 (6) については、改測までの期間が 10 年および 11 年に対応する観測比高差が与えられているが、より長い期間に対応する値ほど信頼性の高い変動量を与えるものと考え、11 年間に対応する観測比高差を用いて変動量を求めた。

路線 (1) については、1978 年 10 月の改測にいたる期間が 13.3 年であり、この路線についてのみ補正量と変動量の比が 3.3/13.3 という比較的大きな値となる。しかし路線 (1) の水準点は、国家水準点 B. M. 3591, 3592, 3594 および 3595 の 4 点であり、その数が少なくしかも当地域の東南端部に位置しているので、全体としての結果に与える補正量の影響は無視できる。この 4 点の変動量は B. M. 16 A に対する B. M. 3596 の変動量とそれぞれの点の B. M. 3596 に対する変動量の和として与えられる。

4-2. 故障点の検出

水準点の埋設状態に何らかの原因により故障が生じ、その水準点の測定値が地殻変動を示す量としての意味を失った場合には、この点の変動量を地殻変動モードの解析データか

ら取除く必要がある。

故障点の検出は次の2つの方法による。その1つは水準点の埋設状態および周辺の詳細な調査による故障の検出である。地沁りなどにより水準点が傾斜したり、人為的な障害を受けたことが埋設状態の変化から明らかに判定できる場合などがこの例に含まれる。この方法により故障が検出されたならば、たとえ隣接の水準点の観測比高差から故障と判断できない場合でも、この点の変動量は解析データから取除く必要がある。

もう1つの方法は、ある水準点の隣接点との変動量の差および埋設地点周辺の環境の変化の調査による故障の検出である。ごく隣近して埋設された2つの水準点の一方がきわめて大きな沈降を示し、標石とその埋設状態のものには明らかな異常は認められないが、埋設地点周辺の環境の変化からその水準点は故障していると判断されるような場合がこの例に含まれる。

総数 37 点の水準点のうち B.M. 1A, 11, 3592, 3600 の 4 点を上記の基準により故障点と判断し解析データから取除いた。B.M. 1A は主として前者の方法により、地沁りによる標石の著しい傾動が認められたことによる。B.M. 11, 3592, 3600 については、主として後者の方法による。即ち、B.M. 11 は B.M. 11A にくらべて段丘崖により近く埋設され、崖からよりはなれた別の崖下に埋設された近接点 B.M. 11A の変動量と比較して、 -6.7 mm と著しく沈降している。これはおそらく B.M. 11 がクリーブなどの影響により沈下したものと考えられるので B.M. 11 は故障点と判断した。B.M. 3592, 3600 については、前述の2つの方法により、標石の埋設状態の異常、隣接点との著しい地形変動量の差 (B.M. 3592 は隣接点 B.M. 3591 と -15.1 mm , B.M. 3600 は隣接点 B.M. 3A と 57.8 mm の変動量の差がある) および埋設地点周辺の著しい人工的地形変化からみて明らかに故障点であると判断される。その結果、次節の地殻変動モードの解析に用いられる変動量のデータの総数は4個減少して33個となる。

5. 地殻変動モードの解析

水準点の変動量分布は一般にはいくつかの異った要因による変動モードの重なり合いからなる。また変動モードの解析にあたっては、改測にいたる期間の長さ、水準点網の規模、水準点の分布密度、測量精度などにより規定される時間的、空間的分解能を考慮に入れる必要がある。対象とする地域の造構運動を検出した変動量の要因と考えることとする。最近の地質時代を通じてほぼ一様な変動がづついてきたと仮定して時間的分解能の問題にはふれないこととする。空間的分解能は、水準点分布密度で定まるが、Fig. 1 に示す水準点の分布からみて、波長が 1 km よりも小さい変動についての議論は不可能である。

当地域に卓越していると考えられる造構運動は、次節でも述べるように、次の2つが考えられる。その1つは地域全体としての北方への活傾動運動であり、他の1つはいま主たる課題としている活褶曲運動である。ここではこれら2つの造構運動が検出された変動量についての主たる要因であるという前提に立って解析を行う。またこれら以外の予測されない要因に依存する部分の変動量に含まれているか否かについては、これら2つの要因についての解析結果をみた上で検討を加える。

解析対象とする変動量は、前述のように、故障点を取除いた総数 33 点の水準点につい

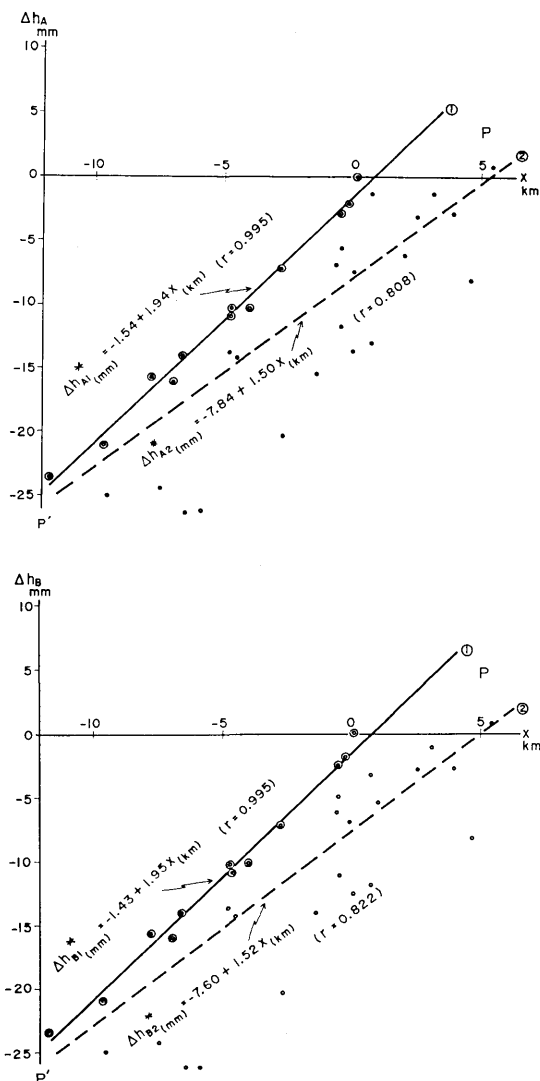


Fig. 4. Evaluation of the rate of the northward tilt for (a) Δh_A and (b) Δh_B in Table 2 by a straight line fit along the cross sectional line PP' in Fig. 3.

て与えられている。改測にいたる期間補正が変動モードに与える影響を吟味するために、補正前と補正後の値を同一方法で処理し比較することとする。Fig. 3 (a) および (b) は、それぞれ補正前・後の変動量 (mm 単位) の分布図である。

5-1. 地域全体としての活傾動速度

次節で述べるように、当地域の第四系は、全体として北～北々東に傾いており、北方では新潟沖積平野下へ没する。これは当地域全体としての活傾動運動の存在を示唆するものであり、それに伴う傾動速度を水準点の変動量から推定する。いま、活傾動運動の方向として褶曲軸の方向に線分 PP' (Fig. 3) をとる。それぞれの水準点の位置を PP' に投影

し、この線分上の座標でみたときの変動量の分布を調べる。Fig. 4(a) および (b) に示すように、変動量分布はきわめて顕著な傾動を示している。この傾動に伴う速度の推定には次の2つの方法が考えられる。その1つは変動量分布の上限を定める値を用いる方法であり、他の1つは変動量の値全部を用いる方法である。地殻表層部での局地的な要因による変動は重力場にあることを考えれば隆起としてよりも沈降として現われやすいと考えられるので、地域全体としての傾動のような広域変動を調べるためには、前者の方法がより意味があるといえる。しかしここでは両方の方法で傾動速度 G を推定し、それらを比較する。補正前、後の変動量 $\Delta h_A, \Delta h_B$ (Fig. 3 (a), (b)) についての結果を区別して取扱うこととし、線分 PP' にその座標 x の関数としての $\Delta h_A, \Delta h_B$ から最小2乗法により、 $\Delta h_A, \Delta h_B$ のそれぞれに対する傾動量 $\Delta h_A^*, \Delta h_B^*$ 、傾動速度 G_A, G_B および直線あてはめの相関係数 r を求めると、Fig. 4(a), (b) に示すような結果となる。すなわち

i) 変動量分布の上限を定める12点のデータ (Table 3 中 *印を付した水準点についての値) から、

$$G_A = 1.94 \text{ mm/km} \cdot 10 \text{ 年}, (r = 0.995)$$

$$G_B = 1.95 \text{ mm/km} \cdot 10 \text{ 年}, (r = 0.995)$$

ii) 全点、33点の変動量から、

$$G_A = 1.50 \text{ mm/km} \cdot 10 \text{ 年}, (r = 0.808)$$

$$G_B = 1.52 \text{ mm/km} \cdot 10 \text{ 年}, (r = 0.822)$$

となる。従って北方への地域全体としての傾動速度は、補正前、後の変動量 $\Delta h_A, \Delta h_B$ の差にはほとんど依存せず、変動量分布の上限の値によるか、全点の変動量によるかに大きく依存するといえる。表層部分での局地的な要因による変動量への影響を除去し、かつ傾動速度 G 、相関係数 r の大きい方の値をえらぶこととすると、上記 i) (変動量の上限の値による場合) の結果である $G = 1.94 \sim 1.95 \text{ mm/km} \cdot 10 \text{ 年}$ なる値を以下の解析および議論に適用することとなる。

5-2. 活褶曲に伴う変動速度

造構運動に伴う変動として考慮する成分は、地域全体としての傾動運動と活褶曲に伴う変動に限られるという仮定に立つと、前節で求めた地域全体としての傾動量 $\Delta h_A^*, \Delta h_B^*$ を Table 2 に示す変動量 $\Delta h_A, \Delta h_B$ から差引いた残りの変動量成分は、活褶曲に伴うものとみなせる。補正前、後の変動量 $\Delta h_A, \Delta h_B$ について、変動量分布の上限を定める12点のデータから求めた傾動量 $\Delta h_A^*, \Delta h_B^*$ を差引いた残りの変動量 (残差変動量と呼ぶ) を Table 3 に示す。この残差変動量 $\delta \Delta h_A, \delta \Delta h_B$ はそれぞれ補正前、後の変動量 $\Delta h_A, \Delta h_B$ に対応するものであり、その値は全水準点33点についての残差変動量の和が0となるような定数を加えてある。ここで求められた残差変動量 $\delta \Delta h_A$ および $\delta \Delta h_B$ の分布を Fig. 5(a), (b) に 2 mm 間隔の等変動量線で示した。これら2例の残差変動量の分布を比較すると、前述の地域全体としての傾動量の場合と同様に、改測期間についての補正の影響は無視できるといえる。従って以下の議論では補正後の変動量 Δh_B に対応する残差変動量 $\delta \Delta h_B$ についてのみ検討する (Fig. 6)。

$\delta \Delta h_B$ は最大値が 6.3 mm、最小値が -10.8 mm で、17.1 mm の変動幅をもつ。変動モードの特徴として、隆起と沈降のゾーンが明瞭に区分されること、最も顕著な変動モー

Table 3. Residual factors $\delta\Delta h_{A_1}$ and $\delta\Delta h_{B_1}$ defined as the deviation from the straight line fitting for the tilt to the direction along the cross sectional line PP' in Fig. 3. The residual factors are given by the equations

$$\begin{aligned}\delta\Delta h_{A_1} &= \Delta h_{A_1} - (\Delta h_{A_1}^* - 5.29), & \Delta h_{A_1}^* &= -1.54 + 1.94x \\ \delta\Delta h_{B_1} &= \Delta h_{B_1} - (\Delta h_{B_1}^* - 5.11), & \Delta h_{B_1}^* &= -1.43 + 1.95x\end{aligned}$$

where $\Delta h_{A_1}^*$ and $\Delta h_{B_1}^*$ represent the change of height relating to the tilt to the direction PP' as derived from the least square method. The distance x (km) is measured along the cross sectional line PP' from the location of B.M. 16A.

No.	B. M.	Uncorrected		Corrected		Distance x (Km)
		Δh_A	$\delta\Delta h_{A_1}$	Δh_B	$\delta\Delta h_{B_1}$	
		mm	mm	mm	mm	
1	3A	0.8	-2.8	0.7	-3.3	5.4
2	3591	-8.1	-10.2	-8.3	-10.8	4.6
3	5	-2.9	-3.6	-2.6	-3.7	3.9
4	8	-1.2	-0.4	-1.1	-0.6	3.1
5	3598	-3.1	-1.1	-2.8	-1.2	2.5
6	22A	-6.1	-3.1	-5.5	-2.9	2.0
7	11A	-13.1	-7.6	-11.9	-6.7	0.7
8	3594	-1.5	4.0	-3.3	1.9	0.7
9	*16A	0.0	6.6	0.0	6.3	0.1
10	21A	-7.5	-0.7	-6.8	-0.3	0.0
11	3596	-13.7	-6.9	-12.5	-6.0	0.0
12	*17A	-2.1	5.1	-1.9	5.0	-0.2
13	*18A	-2.8	4.8	-2.5	4.8	-0.4
14	19A	-5.5	2.3	-5.0	2.5	-0.5
15	3595	-11.8	-4.0	-11.1	-3.6	-0.5
16	20A	-6.9	1.3	-6.3	1.6	-0.7
17	15B	-15.5	-6.0	-14.1	-4.8	-1.4
18	24C	-20.3	-8.2	-20.3	-8.5	-2.7
19	*38C	-7.2	5.1	-7.2	4.8	-2.8
20	*45C	-10.2	4.4	-10.2	4.2	-4.0
21	44C	-14.3	1.3	-14.3	1.0	-4.5
22	*97C	-10.4	5.6	-10.4	5.3	-4.7
23	*25C	-10.8	5.2	-10.8	4.9	-4.7
24	46C	-13.7	2.4	-13.7	2.2	-4.8
25	43C	-26.2	-7.9	-26.2	-8.1	-5.9
26	41C	-26.3	-6.9	-26.3	-7.1	-6.5
27	*26C	-14.0	5.6	-14.0	5.4	-6.6
28	*27C	-16.0	4.4	-16.0	4.2	-7.0
29	28C	-24.3	-2.9	-24.3	-3.1	-7.5
30	*35C	-15.7	6.3	-15.7	6.1	-7.8
31	34C	-25.0	0.3	-25.0	0.1	-9.5
32	*29C	-21.0	4.5	-21.0	4.3	-9.6
33	*31C	-23.5	6.0	-23.5	5.9	-11.7

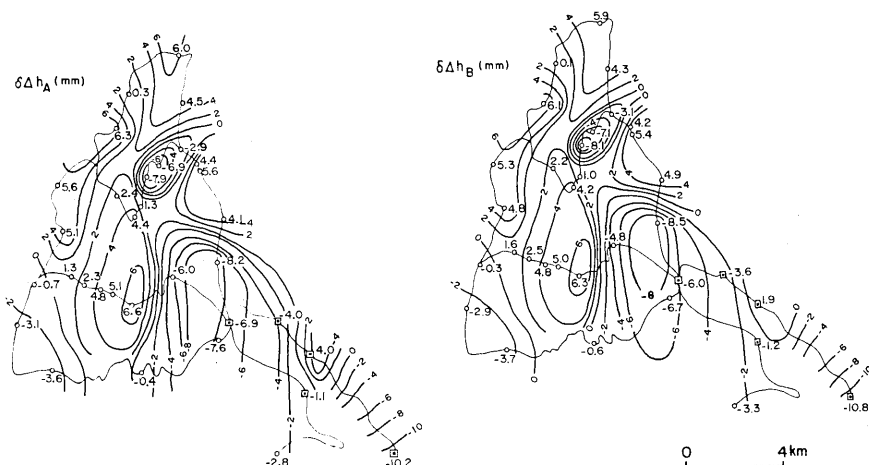


Fig. 5. Distribution of the residual factors (a) $\delta\Delta h_A$ and (b) $\delta\Delta h_B$ in Table 3 as indicated by contour lines of a 2 mm interval for the leveling route in Fig. 1.

ドは東西の波長 5~10 km の波状変動であることなどが指摘される。次節で述べるように、この変動モードは褶曲構造の成長をよく反映している。また時水背斜東翼での B.M. 16A, 15B 近傍の傾動速度は、きわめて大きな値 (3×10^{-9} /年) を示す。背斜軸に対する東翼と西翼との非対称的変動は褶曲構造とよく対応している。

褶曲構造と対応のつく変動モードとは異なる局地的な異常沈下が B.M. 43C を中心に検出された (Fig. 6)。次節で述べるように、この異常沈下は B.M. 43C 近傍での天然ガス採取によるものと推察される。従ってこの異常沈下地区にある B.M. 43C, 41C, 28C, 44C の変動量に異常沈下の補正を加えたときの地域全体の変動モードの推定が必要である。そのために、この異常沈下地区を含む時水背斜東翼全体の平均的傾動量と上記 4 水準点の変動量との差による補正を行った。この補正を加えることにより、隆起と沈降のゾーンの配列がより一層明瞭となった (Fig. 7)。

6. 造構運動との比較

第四系の構造および段丘面が、古いものほどより大きく変形しているという現象から、当地域には現在も構造運動が起っていると期待される。この運動は、前述のように 2 つに分けて考えることができる。1 つは、地域全体としてのほぼ北方への活傾動運動であり、他は、活褶曲運動である。

6-1. 地域全体としての活傾動運動

第四系は、全体として北~北々東に傾いており、北方では新潟沖積平野下へ没する。その傾きは、当地で最も古い段丘面 (越路原 こしじつばら) の傾きより大きい。しかしその値はきめにくい。最古の越路原 (Fig. 1) は、片貝西方丘陵の背面をつくっている。12~13 万年前の下末吉面にほぼ対比されることから、越路原の形成年代は、ほぼ 10 万年と推定される。その北方への傾斜は 4 km で 100 m (=25 m/km) の程度である。関東地方の立川段丘に対

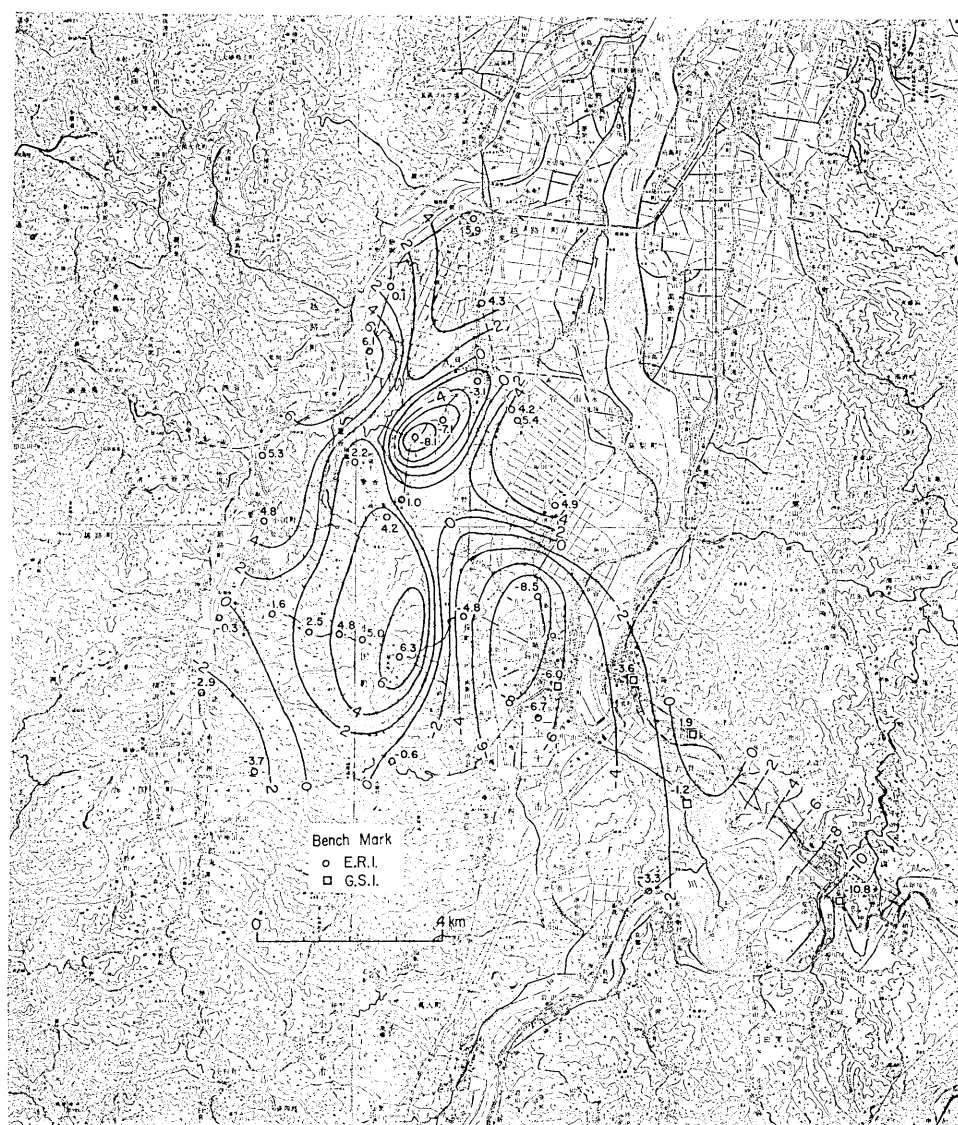


Fig. 6. Distribution of the residual factor δdh_B in Table 3 as indicated by contour lines of a 2 mm interval for the leveling route in Fig. 1.

比されるところから、約 2 万年前と推定される小栗田原^{こ栗だつばら} (Fig. 1) の北への傾きは、2 km で 20 km (=10 m/km) の程度である。

これらの段丘は、広さ、分布などから、いずれも旧信濃川が作ったものと見られる。段丘を構成する礫層の平均的な粒径は、小千谷市付近の現信濃川河床のものと大差はない。従って形成時の北への(下流への)傾きもほぼ等しいとみなしうる。現信濃川河床の縦勾配は、小千谷付近でおよそ 5 km で 10 m (=2 m/km) の程度である。この傾きを段丘面

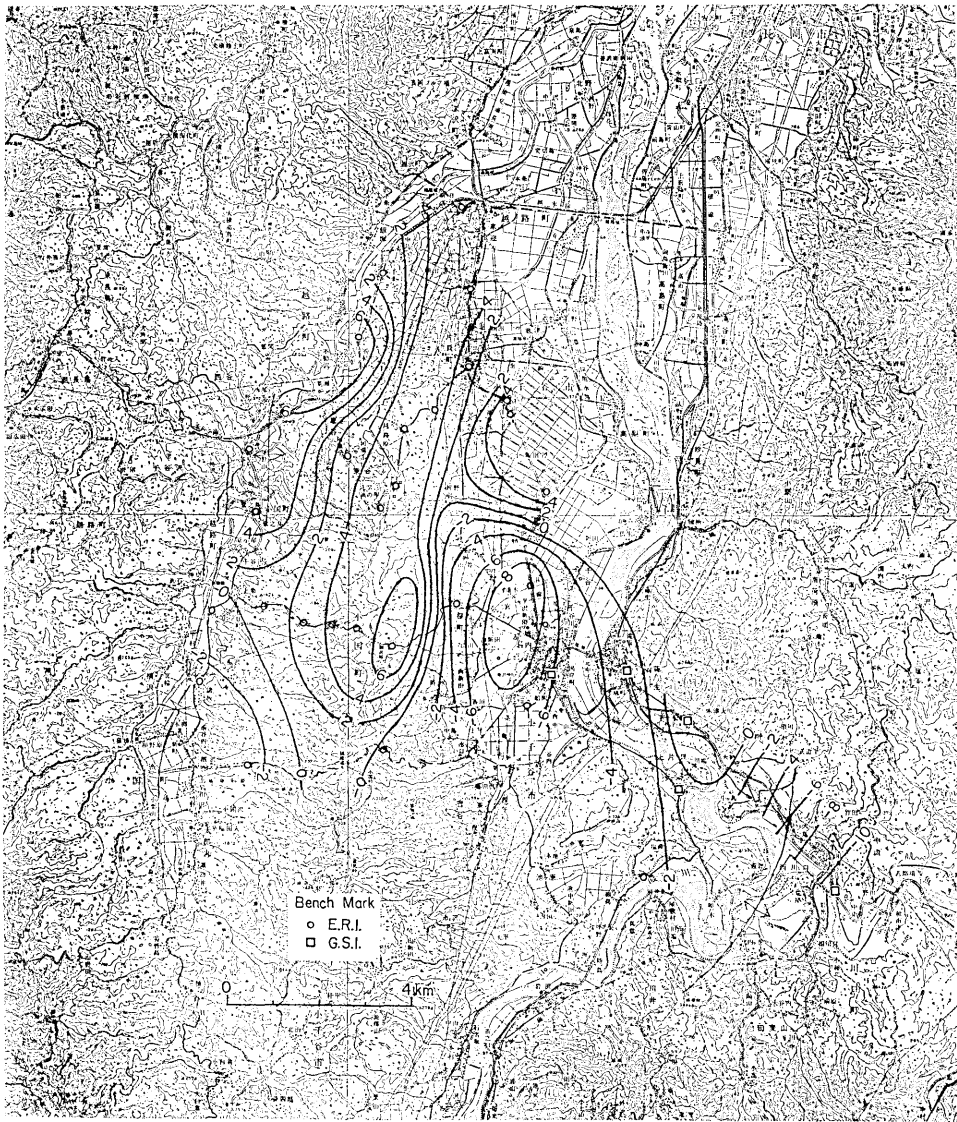


Fig. 7. Distribution of the corrected values of δdh_B by eliminating the local mode of subsidence as indicated by contour lines of a 2 mm interval for the leveling route in Fig. 1.

の傾きから差引いて年代で割れば、段丘面形成後の北方傾動速度が求められる。その値は、
 越路原; $(25-2) \text{ m/km} \cdot 10 \text{ 万年} = 0.23 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$
 小栗原; $(10-2) \text{ m/km} \cdot 2 \text{ 万年} = 0.40 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$
 である。

最近 2 万年間の平均値が、10 万年間のその 2 倍であるが、これをもって一概に最近における活傾動の加速を結論することはできない。それは、小栗田原の方が南北測線が短

かいので、平均的な傾動速度の推定により大きな誤差の混入がありうると考えられること、2つの値に対する地理的な位置が正確には同じでなく、小栗原の方がやや上流にあること、および年代、原傾斜の推定もある程度の誤差を含むこと、などのためである。もし原傾斜を2倍の4 m/km (十日町盆地北部での値)とみつもれば、2つの段丘面から求められる傾動速度は、

$$\text{越路原; } (25-4) \text{ m/km} \cdot 10 \text{ 万年} = 0.21 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$$

$$\text{小栗原; } (10-4) \text{ m/km} \cdot 2 \text{ 万年} = 0.30 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$$

となり、両者の差はずっと小さくなる。以上のような考察から、当地域は最近10万年程度の期間、平均的には $0.1 \times n \text{ mm/km} \cdot \text{年}$ ($n \doteq 2$)の桁の速さで北方に傾きつづけており、 n はfactor 2程度であると考えるのが妥当であろう。

一方、前節で既に示したように水準点の改測により求められた変動量もまた当地域の北方への傾動を明瞭に示している。従って地形による変動量の推定値と水準改測による変動量とは、以下に述べる通り大差のない値をとると判断してよい。

前節で述べたように (Fig. 4)、当地域全体としての北方への傾動速度は、期間補正を行なうか行なわないかにかかわらず、ほぼ $0.19 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$ 、あるいは $0.15 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$ である。前者は変動量の分布の上限から、後者は全点から求められた直線近似の勾配である。これら2つの値のうち、前者すなわち変動量の分布の上限に対応する値の方が、前述の理由で広域変動にとってより意味があると考えられる。この値は、精度を考えると實際上地形による推定値と一致する。従って、過去10万年以上にわたって平均 $0.2 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$ の速さで当地域に起ってきた北方への活傾動運動は、1967・1968年～1978年の約10年間にも、ほぼ平均速度と等しい速度で進行したといえる。

6-2. 活褶曲運動および異常沈下

当地域の第四系が示す褶曲構造は、5万分の1地質図 (魚沼、地質調査所、1970) などによれば大略以下のようである。

i) 褶曲軸

Fig. 1に示すように、当地域の中央部を縦走する時水 (または片貝一真人) 背斜が最長のものである。この背斜北部は越路原で被われている。時水背斜の両側に向斜軸がある。西側に向斜 (渋海川向斜) 軸はほぼ渋海川沿いに走るが、鶯之島西方で北東流する渋海川と離れる。時水背斜と渋海川向斜の間に2次的な向斜と背斜がある。これらを塚野山背斜、不動沢向斜と仮称する。時水背斜の東には小栗田原中央部—小千谷市街地西端を走る雁行した向斜軸がある。これを小千谷向斜と仮称する。更に東方にも背斜軸がある。

ii) 褶曲構造

一般に翼部最大の傾斜は $30^\circ \sim 60^\circ$ である。向斜軸部は、ゆるい傾きを示す。当地域では概して背斜の東翼の方が急傾斜で、時水背斜北半の時水以北では東翼でほとんど直立～逆転している。この部分に対応する地質断面図を Fig. 8に示す (宮下ら、1970)。断面線QQ'の位置は Fig. 1に記してある。この断面線のわずか北方では時水背斜東翼は直立している。北方への傾動を差引いた残りの変動量、すなわち前節で求めた残差変動量の分布図 (Fig. 6および Fig. 8) と上記の構造とを比較すると以下のものである。

水準路線4, 5, 6, 7のつくるループ (Fig. 2) では、隆起、沈降軸は褶曲軸と同じく

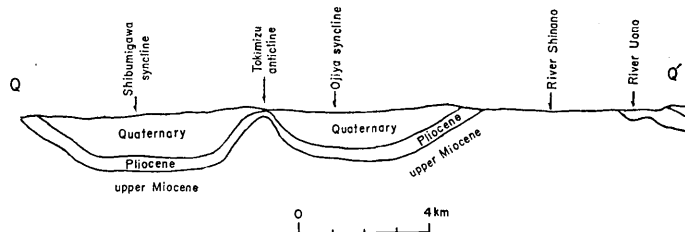


Fig. 8. A Simplified geological cross section of the Ojiya area with no vertical exaggeration (after MIYASHITA *et al.*, 1970). Location of the cross sectional line QQ' is shown in Fig. 1.

ほぼ南北に走るだけでなく、背斜軸、向斜軸との地理的一致もきわめて明瞭である。さらに時水背斜にみあう隆起に注目すると、その東部の傾斜がはるかに急であって、上記地質構造の特徴とも一致する。これらの点から、この地域では最近 10 年間に過去に起きてきたと同様な褶曲運動が進行したものとみなされる。

時水背斜の北部では、ほぼ軸上に位置する B. M. 43 C を中心とする著しい沈降部がみられる。しかし当地域最北部の B. M. 31 C では、ふたたび隆起が認められる。あたかも、時水背斜の成長をさまたげる異常な沈降が B. M. 43 C を中心として起っているように見える。この沈降は、B. M. 43 C の他に少なくとも周辺の B. M. 41 C, 28 C, 44 C の 3 点を含む系統的なものであり、1 点の水準点に関する現象ではないので、水準点の故障などのごく表層の原因によるものとは考えられない。

一方、この地域には古くから天然ガスの露頭が知られていた。1907 年頃をピークとする油田の開発採油は 1950 年代はじめまでつづいていた。1950 年代末から深い試掘が行なわれ、1960 年、石油資源開発 K. K. の片貝 1 号井は、1,000 m の深さから日産 104,230 m³ のガス量を経て成功した。1968 年頃からガス田として本格的生産段階に入った。時水背斜上の他の部分では採取が行なわれていない点を考えると、B. M. 43 C を中心とするこの沈降はガス採取による圧力減がひきおこした地盤沈下のためである可能性が非常に高い。なお、沈下量は 1 万 m³ の程度と概算される。北部地域ではこの異常沈下の影響がある程度及んでいる可能性があるにもかかわらず、塚野山背斜、不動沢向斜に対応するとみられる部分的な隆起、沈降のパターンが見られる点は注目される。また B. M. 43 C を中心とする異常沈下部分に近づくほど、不動沢向斜軸と沈降軸とは離れていく点などからも、これらの隆起、沈降が褶曲構造の成長によるものである可能性が高い。なおガス採取によると思われる異常沈下が B. M. 43 C を中心に表われていると考え、周辺部の B. M. 41 C, 44 C, 28 C も含め、これら 4 点の変動量に前節で述べた補正を加えると、Fig. 7 でみられるような、時水背斜軸と南北につらなる隆起のゾーンとが全く一致するという結果がえられる。このように、ガス採取によると考えられる変動を取除くと、現在の褶曲運動の進行がより明確に示され、その傾動速度は最大 10⁻⁶/年のオーダーに達し、数十万年前の地層を数十度傾斜させる値に匹敵し、地質学的事実ともよく調和する。

7. 結 論

小千谷地域での活褶曲の研究のために、高密度、多点の水準点網を設置した。この水準

点網の 1978 年 10 月の改測成果から、最近 10 年間の変動量がえられた。この水準点網の設置と改測は、活褶曲に伴う地殻変動を面的に検出するための最初の実験といえる。この実験では、10 年間での多数の水準点の故障、亡失にもかかわらず、約 $10 \times 20 \text{ km}^2$ の地域に分布する 33 個所の水準点において、信頼性の高い変動量をうることに成功した。この変動量を造構運動と対比し、当地域での活構造の変動モードを明らかにした。その結果を要約すると次のようである。

i) 小千谷地域において期待される活構造運動は 2 つある。それらは、地域全体としての北方への活傾動運動および活褶曲運動である。従って水準改測により検出された変動量は、少なくともこれら 2 つの要因によるモードを含むと期待される。

ii) 水準改測の結果からえられる地域全体としての北方への傾動速度は $0.194 \sim 0.195 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$ である。一方、地形による過去 10 万年程度の期間の平均的な傾動速度は、 $0.2 \text{ mm/km} \cdot \text{年}$ である。これらの値の推定に伴う誤差を考えると両者の値はよい一致を示しているといえる。このことから過去 10 万年以上にわたり、当地域に起ってきた北方への活傾動運動は、現在もほぼ等速度で進行しつつあるといえる。

iii) 水準改測の結果としてえられた変動量から前述の地域全体としての傾動量を取除くと、ほぼ南北方向に軸をもつ隆起と沈降のゾーンからなる変動モードがえられる。そのうち最も顕著なモードは東西方向に対する波長 $5 \sim 10 \text{ km}$ の波状変動である。この波状変動は隆起の中心に対して非対称的であり、隆起から沈降のゾーンへの傾動速度は最大 $10^{-6}/\text{年}$ のオーダーに達する。また隆起、沈降軸は褶曲軸と同じく、ほぼ南北に走るだけでなく、背斜軸、向斜軸との地理的一致もきわめて良好である。時水背斜にみあう隆起に注目すると、その東部の傾斜速度がはるかに大きく、これは地質構造の特徴とも一致する。天然ガスの採取によると思われる局地的な異常沈下が検出されたが、適当な補正を加えると、当地域の変動モードは中央部を縦走する最長の時水背斜の隆起がさらに成長するという結果がえられた。これらの点から、当地域では、最近地質時代を通じて起ってきた褶曲運動は現在もほぼ同じ速度で進行しつつあるといえる。

最近 10 年間に当地域で著しい地震活動は知られていない。一般的にいて、活構造運動に伴う変動量は、期間が短くなるほど平均値からのずれの大きい値を示す。しかるに当地域では 10 年という短期間でも、このような短周期のゆらぎ現象は、少なくとも今回の改測結果からは検出されなかったといえる。これは単なる偶然であるか否かについての結論は、今後の改測成果の蓄積をまたねばならない。しかし当地域の地震活動レベルが少なくとも局地的に見る限りきわめて低いという事実と考え合わせると、脆性破壊（地震）を伴うことなく、このように急激な変動が進行しているのは、全体として地殻最上部層が、広域応力場の下で塑性的に、しかも地質学的な時間スケールで変形を続けているためであると解釈しても不合理ではない。

謝 辞

小千谷地域における水準点の埋設、測量等につき日本測量協会、小千谷、川口、柏崎の各市役所、越路町、小国町の両役場、小千谷、柏崎、川口、長岡の各土木事務所、小千谷市教育委員会、若栃小学校などの担当の方々の御協力を得たことを記し、厚く御礼申し上げます。

げる。また水準点設置に際しての山崎組(株)前小出出張所長 佐藤 浩氏のひとかたならぬ御助力のおかげで本研究が行えたことを記し、同氏に深く感謝し御冥福を祈ります。

文 献

- 池辺展生, 1942, 越後油田褶曲構造の現世まで行なはれていることに就いて(演旨). 石油技協誌, 10, 108-109.
- 宮村撰三, 1943, 米代川にそふ一部水準路線の測量, 震研彙報, 21, 197-205.
- 宮村撰三・溝上 恵・中村一明・岡田 惇・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, 169-170.
- 宮下美智夫・鈴木尉元・島田忠夫・三梨 功・影山邦夫・樋口茂夫, 1970, 5万分の1地質図「魚沼」, 地質調査所.
- 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, 9-14.
- MIZOUE, M., 1969, Types of crustal movements accompanied with earthquakes in the Inner NE Japan. Problems of recent crustal movements, Third International Symposium, Leningrad, U.S.S.R., 1968. Moscow, 357-370.
- NAKAMURA, K., 1957, On the deformation of river terraces developing near the city of Ojiya, Niigata prefecture. *Master thesis. Univ. Tokyo.*
- 中村一明, 1979, 日本の活褶曲, 岩波講座地球科学, 10, 137-143.
- 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.
- 日本測量協会, 1979, 敷地周辺地殻変動調査のうち小千谷地区水準調査.
- 太田陽子・鈴木郁夫, 1979, 信濃川下流域における活褶曲の資料. 地理評, 52, 580-591.
- OTUKA, Y., 1941, Active rock folding in Japan. *Proc. Imp. Acad. Japan*, 17, 518-522.
- 大塚弥之助, 1942, 活動している皺曲構造, 地震, 14, 46-63.

10. *Mode of Vertical Crustal Movements as Deduced from the Precise Relevelings in the Ojiya Active Folding Area, Niigata Prefecture, Northeast Japan.*

By Megumi MIZOUE, Kazuaki NAKAMURA, and Sadakatu IZUTUYA,
Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

Regarding tectonic development of folding structure in the present and the latest geologic time, pioneer work was done by OTUKA (1941, 1942) and IKEBE (1942). Comparisons were made of vertical crustal movements as revealed by precise relevelings with the deformation of river terraces and the underlying Neogene and Quaternary fold structures. They found that both deformed terraces and vertical displacement of bench marks were concordant to underlying fold structures. This is interpreted as showing that some of the folding structures indicated by Neogene and Quaternary strata are still active.

The mode of vertical crustal movements in the active folding area near Ojiya, Niigata Prefecture, Northeast Japan is analyzed on the basis of the data from precise relevelings specifically installed for this purpose decades ago in comparison with geological and geomorphological informations. The Ojiya area occupies a southern part of a Miocene to Quaternary sedimentary basin with its center of subsidence at about 50 km north-northeastward. During the late Quaternary, a subareal drainage system developed due to general uplift of the entire basin. The Ojiya area is now located along the lower stream of northward flowing Shinano River, one of the largest rivers in Japan. The Quaternary strata have been affected by remarkable deformation since the last $10^5 \sim 2 \times 10^6$ years resulting in

the foldings of wavelength of several kilometers with north-northeastward trending axes. A flight of river terraces of a comparatively large area is distributed along the Shinano River. Some of the terraces show distinct deformation after their formation, as indicated by a wavy profile and/or lowering upstream. The degree of deformation of these terrace surfaces is proportional to their ages and the direction of the tilt is the same as that of the Quaternary strata beneath the terraces. The inclination of the river terraces can be attributed mainly to the accumulation of tectonic deformation since the time when the terraces were initially formed.

Precise levelings were carried out seven times for the period of 1894-1967 along the Shinano River by E. R. I. (Earthquake Research Institute, University of Tokyo) and G. S. I. (Geographical Survey Institute, Ministry of Construction). Except for the results for the period of 1927-1957, which were mostly insufficient owing to too many accidentally disturbed bench marks, the general tendency of the crustal movements was confirmed to be in good harmony with the geological structure as indicated by the subsidence of the axial zone of a syncline.

In order to confirm that the fold structure is actually growing, a leveling route perpendicular to the strike of the fold axis was set up by E.R.I. in 1958. The result of the releveling along the route for the period of 1958-1967 support the active nature of the folding structure along a single cross section of an anticline.

For the detection of the areal mode of movements, a precise level net covering the folded area of about $10 \times 20 \text{ km}^2$ with the installation of 63 bench marks was set up in 1968. The bench marks kept in proper condition all through the period of 10 years since 1968 totaled 37, which were subjected to relevelings in Oct. 1978. Characteristic mode of movements in the area were successfully detected for the interval of 10 years from 1968 to 1978, the results of which can be summarized as follows.

- 1) The northward tilt of the entire area is identified as one of the predominant modes of movement. The rate of the tilting as deduced from the precise relevelings is about 0.19-0.20 mm/km·year as compared with the equivalent value of 0.2 mm/km·year as an average rate during the past 10^5 years from geomorphological evidence. It is clarified from the comparative study that the northward tilt is progressive and of tectonic origin.

- 2) Remarkable undulatory modes of movement with the wavelength 5~10 km is superimposed on the tilting movement. The undulatory mode is in good harmony with the detailed pattern of both geological and geomorphological features of the Quaternary fold. An asymmetrical mode of deformation with respect to the synclinal and anticlinal axis coincides with the Quaternary fold structures in the area. It is concluded from the evidence that the fold structure has been formed with the maximum rate of tilt of the order of 10^{-6} per year during the past $10^4 \sim 10^5$ years up to 1978.

- 3) A notable local mode of subsidence is detected in a part of an axial zone of an anticline. The subsidence seems to be caused by the pumping station operation for natural gas deposits as judged by the geographical correlation of the subsidence and the gas field.