

## 56. 光波測量による地殻変動の観測

### 第1報 中部日本における基線網設定

地震研究所 { 笠原慶一  
岡田惇

(昭和41年5月25日発表—昭和41年6月30日受理)

#### 1. はしがき

地殻変動の進行状況を空間的および時間的なひろがりにおいて捉らえることは、大地震発生をはじめ、地殻に関連する各種地学現象の本性を理解する上に極めて重要である。このうち垂直変動についてはともかく、水平変動に関する調査は必ずしも充分に行われてきたとは言いがたい。それは三角測量を繰り返して水平変動を検出することが、垂直変動に対する水準測量に比べてさらに実施困難であるという事情によるところが多いと思われる。しかし、ジオデメーターやテルロメーターで代表される光波（電波）測量技術の開発によって数 km から数十 km の基線長を極めて短時間のうちに、しかも  $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$  の高精度で測定出来る様になった現在、この障害は大巾に軽減されたものと考えられる。

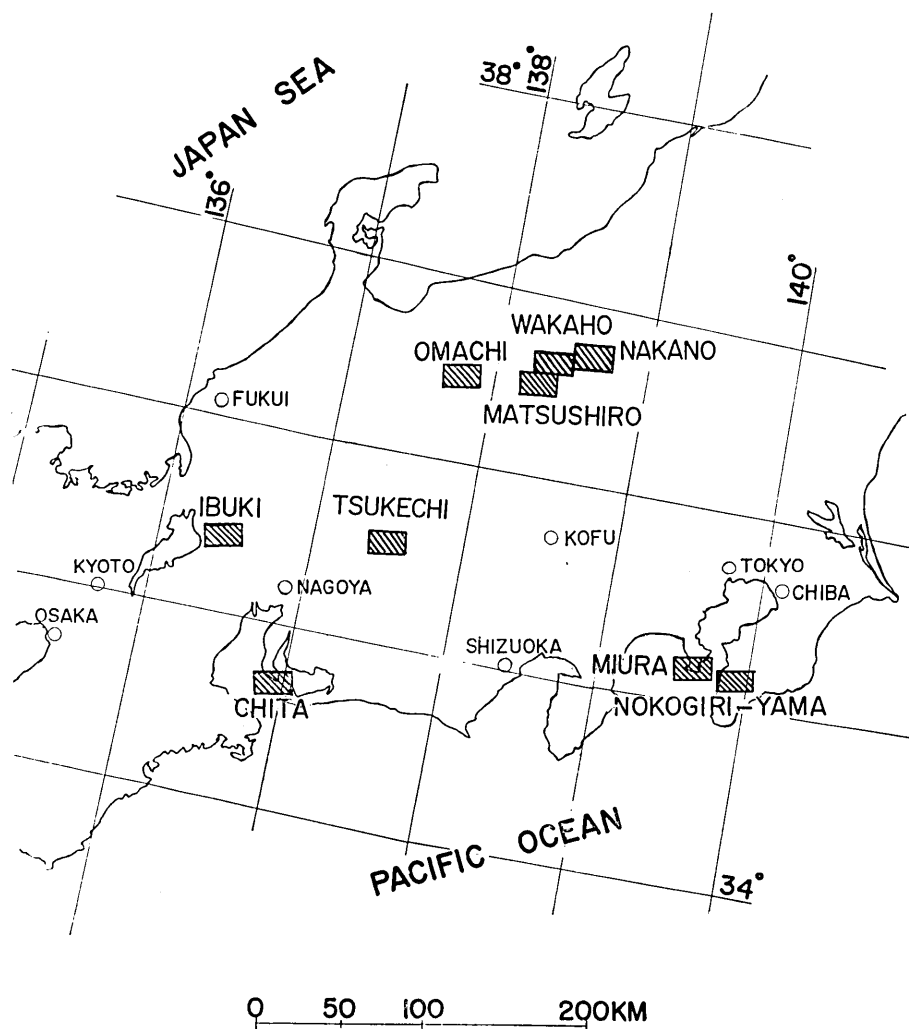
1963年以来地震研究所において実施されつつあるネオテクトニクス研究計画の一部として、著者らは光波測量技術を地殻変動研究分野に導入する試みを続けてきた。その内容を大別すれば、

1. 計器開発
2. 観測方式開発
3. 実用観測

になる。このうち1に関する報告は別の機会にゆずることとして、とりあえず既存計器（ジオデメーター）によって始められた第2, 3事項の実施状況について以下に報告することとする（第1図参照）。

#### 2. 観測方式

**使用計器** 計器について第一に望まれる条件は高い測定精度である。筆者らの目的は距離測量そのものではないから、絶対精度の高いことは必ずしも必要でない。大切なことは高い分解能と長期にわたる安定性である。移動性、すなわち小型軽量な構造も必要条件のひとつに挙げなければならない。これは元来測量可能距離の長さや相容れない関係にあるが、筆者らの場合、測定距離の長さは若干犠牲にしても、移動観測に便利な型式が望まれた。それは、10~50 km の測線を対象とする測地作業と10~100 m の短基線長に対する地殻変動連続観測との空隙を埋めるべく、3~5 km 程度の基線長を主な対象にするのが当初からの筆者らのねらいであった。つまり、三等三角網程度の細かさで地殻変動を頻繁に



第1図 中部日本における基線網（地震研究所）の配置

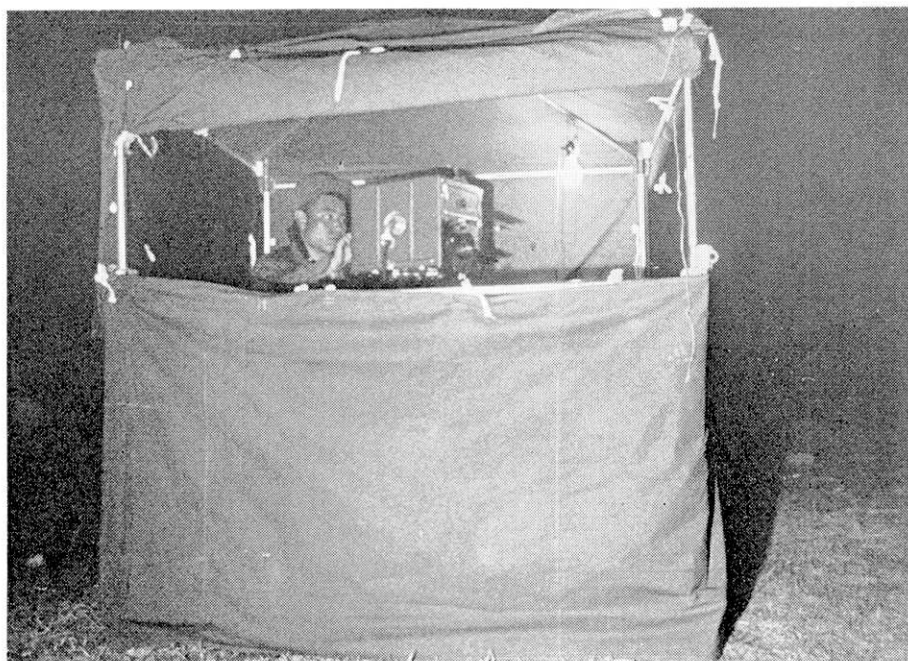
監視しようという構想である。このように比較的短い基線長を対象にする方針は、大学附置研究所の性格や野外作業能力等の条件から考えてほぼ妥当なものと思われる。さらに又、こみ入った日本の地形や透明度の低下しがちな大気状態等を考慮すると、いたずらに基線長を増大することはかえって測定地点の逆定に制約が加わるとともに、年間を通じての作業可能日数が減少する結果を招きかねない。

これらの諸条件を考慮した結果、既存計器のうち、AGA（スウェーデン）製のジオデメーター IV 型が最も著者らの目的に適當であると判断された。この計器の原理や具体的

な構造については、既に多くの報告<sup>1)~6)</sup>が出されているからここでは繰り返さない。測量作業および反射鏡設置の状況を第2,3図にそれぞれ示す。

**基線網の構造** 観測結果が平面歪みの問題として取扱えるよう、各基線網は相異なる方向に延びる三本以上の基線で構成されている。この場合、観測作業の能率化を図るために、これら測線は共通の観測基点 (Geodimeter Station) から放射状に延びるよう配置されている。観測基点及び各測線の他端に設けられる反射点の位置を保存するために、三角点に準ずる標石又は金属標識が各々の地点に埋設されている (第4図)。各基線の標準長は3~5 km であるが、これは前述の考慮に基づいた結果である。

これら標石位置の選定は観測の成否に直接かゝる重要問題である。光路に沿う見通し



第2図 ジオデメーター IV 型による作業状況

- 1) E. BERGSTRAND, "Measurement of Distances with the Geodimeter," *Rikets Allmänna Kartverk* **16** (1951), 1-28.
- 2) E. BERGSTRAND, "The Geodimeter System, A Short Discussion of Its Principal Function and Future Development," *J. Geophys. Res.*, **65** (1960), 404-409.
- 3) 大島太市「光の速度による測量」測量 **6** (1956), No. 9, 18-21.
- 4) 石川甲子男「新しい測量器械ジオデメーター」測量 **6** (1956), No. 12, 19-24.
- 5) 石川甲子男「Geodimeter について」地理調査所時報 **20** (1956), 26-28.
- 6) 石川甲子男「Geodimeter」日本測地学会誌 **3** (1957), 102-103.



第3図 反射点の1例 (伊吹山)

が確保されるべきことはいうまでもないが、その場合各標石地点の高度差の少いことが望ましいし、光路の途中が地表に近接しないよう心がける必要がある。各標石地点とも岩盤露出か、又はこれに近い状態が望ましいが、さらに基点については資材運搬や電力供給の便も必要となる。

これらの立地条件を満足し、かつ対象地域の構造特性に適合した位置・方向に基線を配置することはかなり難しい問題である。配置の実例については第7図(a~i)を参照されたい。

**作業方式** ジオデメーターの操作は製造会社指定の方式を採用した。それによれば、反射点に対する本測定 [R] と短絡光路による校正測定 [C] とに対して信号位相を四通り変化させ、かつ三種類の変調周波数 ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) に切り替えてその都度読みとりを行う。従って計  $2 \times 4 \times 3 = 24$  回の読みとりで一セットの測量ができることになる。筆者等は基線毎に五~十セット繰り返えしその平均値を採用することにした。実際には測定基線を二~三セット毎に切り替え、各方向の測量が平行的に進められるようにしている。

ジオデメーター IV 型に対する測定精度は

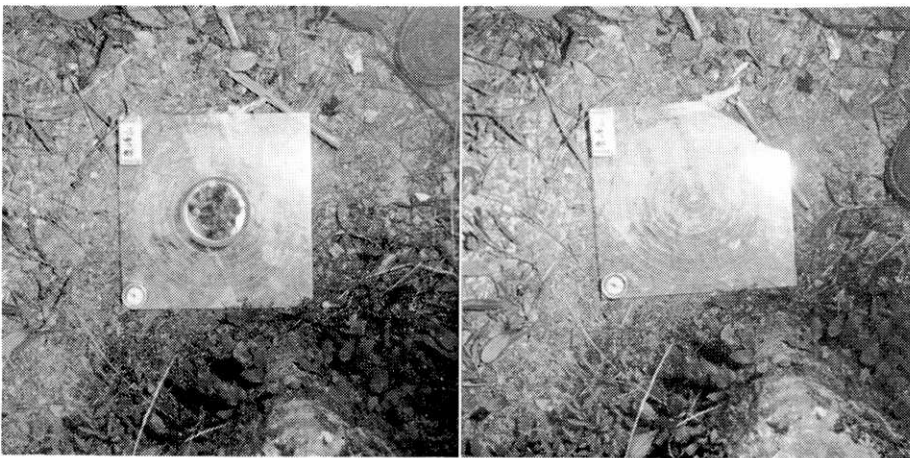
$$\pm [10 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-6} \times (\text{基線長})] \quad (1)$$

と公称されているが、器械以外の因子による誤差が上式を超えることのないよう細心の注

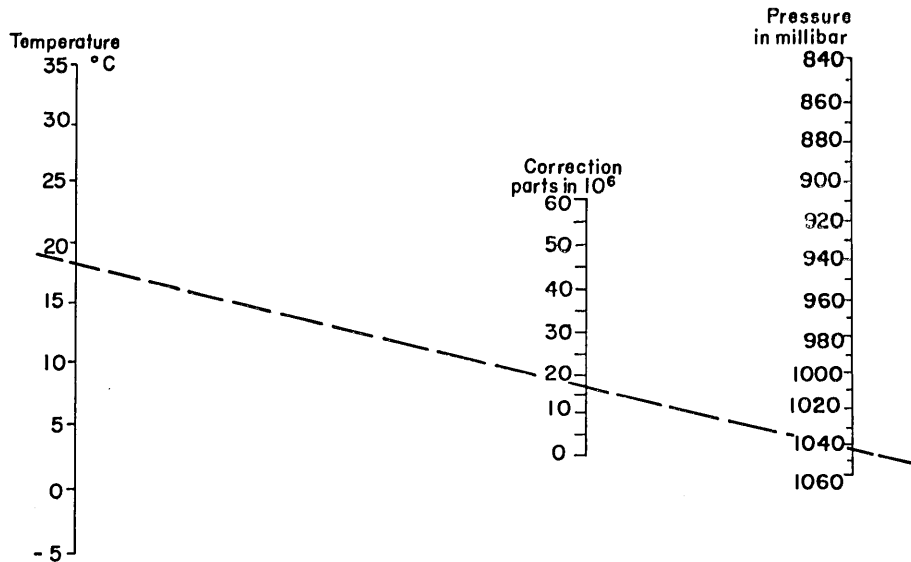


第4図 標石埋設状況

意が必要である。そのひとつとして三脚設置の精度が挙げられよう。“下げ振り”でも  $\pm 5\text{mm}$  の精度は確保できると考えられるが、筆者等は念のため三脚中心軸と標石十字線とのずれを写真記録によって測定することになっている。第5図はその実例である。



第5図 偏心量測定記録(水銀皿に三脚中心軸を映したところ(左)とそれを取り除いたところ(右))



第6図 気象補正用ノモグラム

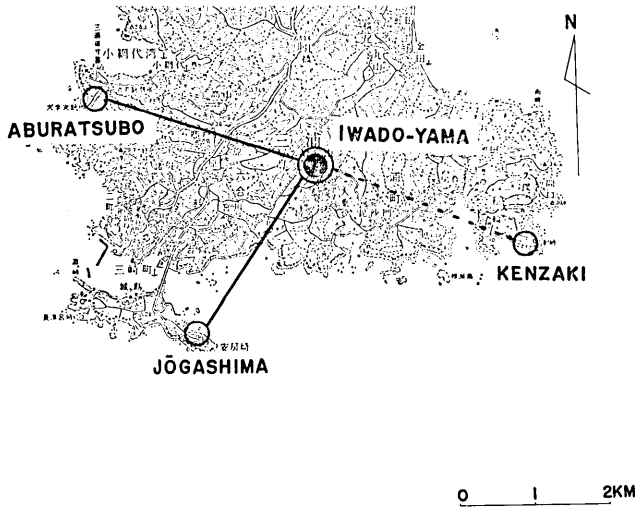
気象状況の変動は空気の屈折率を通じて光速度に影響を与え得る。従って、これを補正するため、基点においては測量作業と並行して気圧・気温・湿度の測定を行う必要がある。その資料に基づいて基線長測定結果を $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $760\text{ mmHg}$ の標準状態に補正・換算することとしている。第6図はこの目的に使われるノモグラムを示す。

最近では反射点側でも気象観測を実施して補正精度を高めるよう努めている。その効果如何については別の機会に報告する予定であるから、本報文では基点側だけの気象資料に基づいて補正した結果のみを取り扱うことにする。

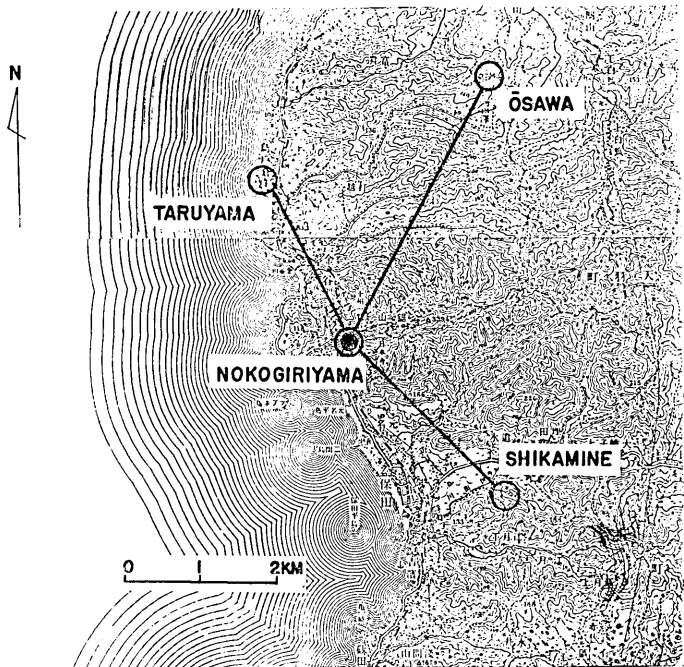
### 3. 基線網の設置と測量結果

現在までに計九ヶ所の地域を中部日本に選び、上記の構想に基づいて基線網を設置した(第1図)。はしがきにも述べたように、観測方式を確立し、併せて実用観測を行うのが当面の目的であったから、いきおい異なった特徴をもつ、いろいろな地域を選定する必要があった。例えば三浦・鋸山基線網は既設の地殻変動観測所と比較観測を行うと共に、観測計器・方式の開発試験地としての利用が考えられている。また、伊吹・知多・大町・付知の各基線網は構造地質的又は地震学的に興味深い特徴をもつものとして選定されている。松代・中野・若穂の各基線網は昨今の北信地域地震活動調査の一環として急ぎ新設されたものである。

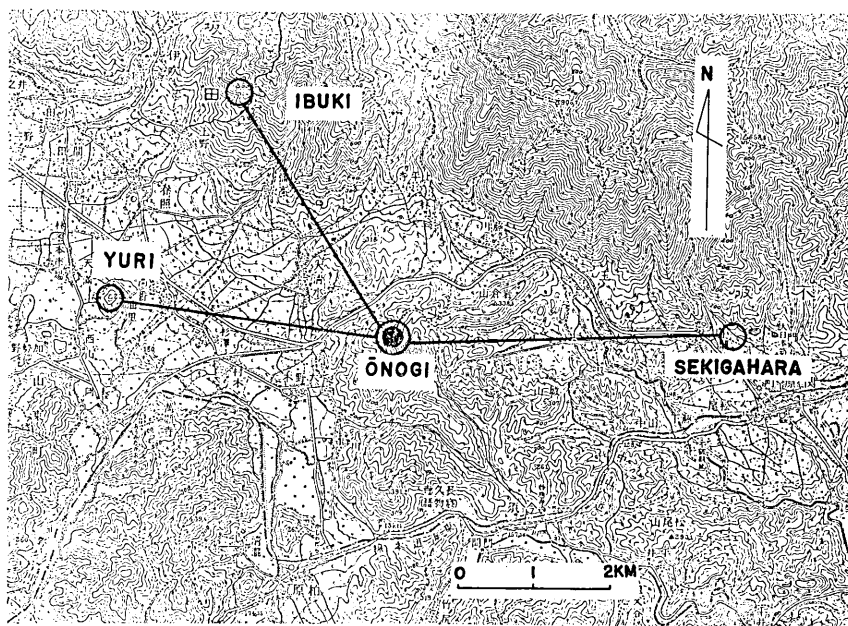
これら基線網の具体的な構造は第7a~i図に示されている。第1表は現在までに行われた測量結果をまとめたものである。このうち松代地域に関する資料は別の報文に詳しく



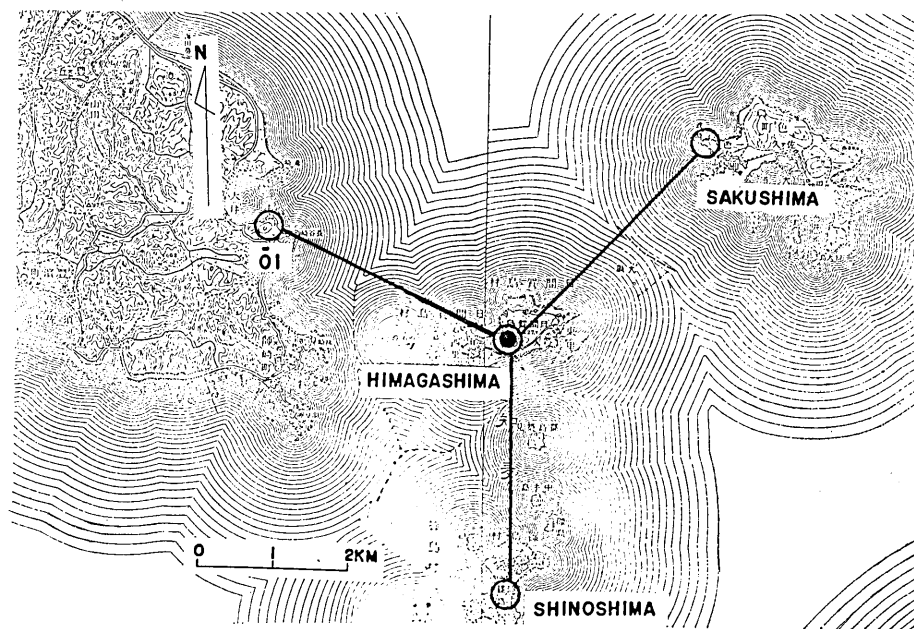
第 7 a 図 三浦基線網 (神奈川県) 一重丸は反射点, 二重丸は観測基点を示す (以下同じ)



第 7 b 図 鋸山基線網 (千葉県)

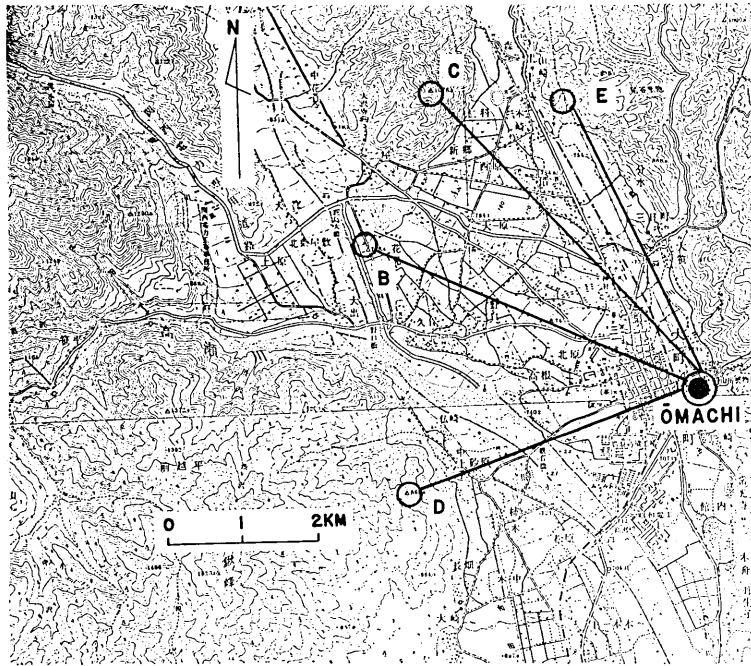


第 7c 図 伊吹基線網 (岐阜県, 滋賀県)

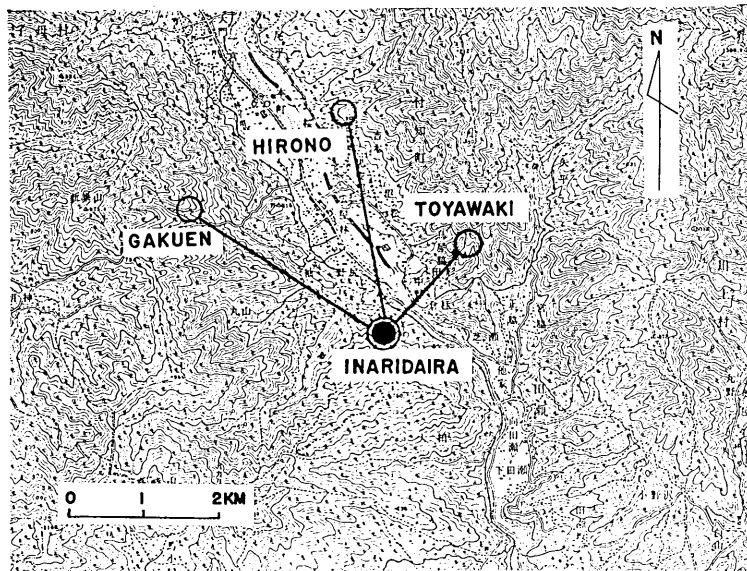


第 7d 図 知多基線網 (愛知県)

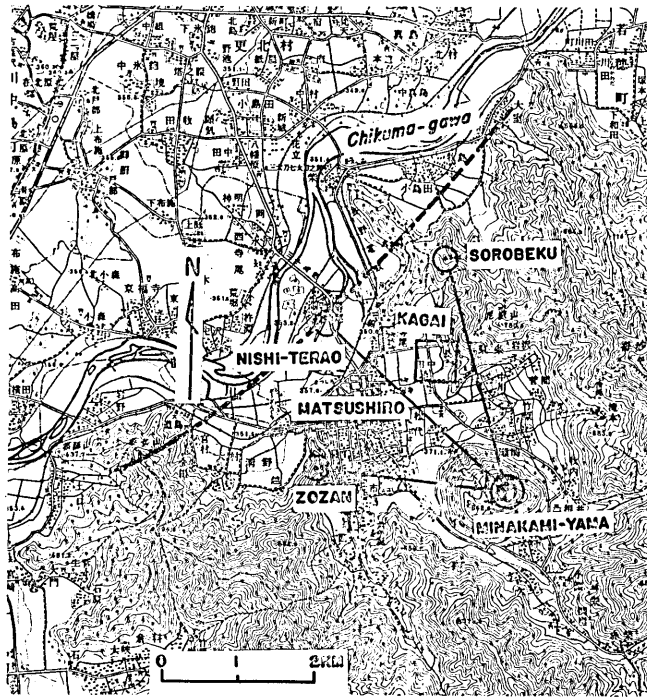




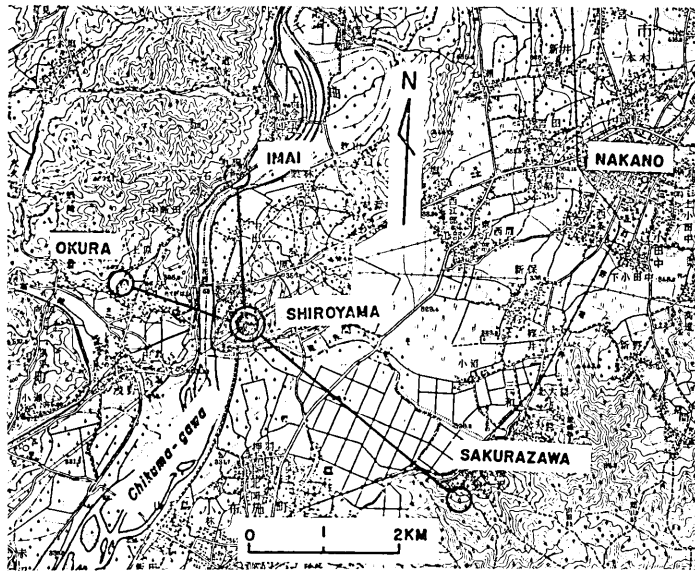
第 7 e 図 大町基線網 (長野県)



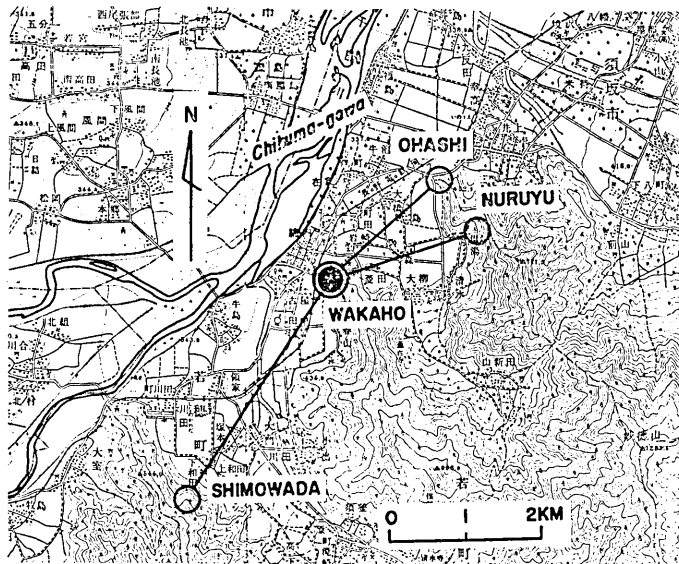
第 7 f 図 付知基線網 (岐阜県)



第 7 g 図 松代基線網 (長野県)



第 7 h 図 中野基線網 (長野県)



第 7 i 図 若穂基線網 (長野県)

第 1 表 測量結果

a) 三浦基線網

年 月 日	反射点		油 壺	城ヶ島	剣 崎
	基点				
1964 X 21-24	岩 堂 山		$3010.700 \pm 7$ m mm	$2866.775 \pm 9$ m mm	—

b) 鋸山基線網

年 月 日	反射点		鹿 峰	大 沢	樽 山
	基点				
1964 VIII 4-5	鋸 山		$2932.780 \pm 4$ m mm	$3868.126 \pm 10$ m mm	$2228.159 \pm 5$ m mm

c) 伊吹基線網

年 月 日	反射点		伊 吹	由 里	関ヶ原
	基点				
1963 XI 11-13	大野木		$3781.385 \pm 3$ m mm	$3697.363 \pm 3$ m mm	$4433.314 \pm 3$ m mm
1965 III 17-18	"		$3781.385 \pm 5$	$3697.359 \pm 3$	$4433.316 \pm 0$

d) 知多基線網

年 月 日	反射点		佐久島	篠 島	大 井
	基点				
1965 III 21-33	日間賀島		$3754.113 \pm 3$ m mm	$2960.794 \pm 4$ m mm	$3647.012 \pm 3$ m mm
1966 III 26-27	"		$3754.118 \pm 2$	$2960.789 \pm 3$	$3647.038 \pm 4$

## e) 大町基線網

年 月 日	反射点		D	C	E	B
	基点					
1964 XI 6-8	大町 (博物館)		$4353.406 \pm 2$	$5350.802 \pm 2$	$4226.711 \pm 3$	$5109.366 \pm 4$

## f) 付知基線網

年 月 日	反射点		鳥屋脇	広 野	学 園
	基点				
1965 III 24-25	稻荷平		$1725.534 \pm 4$	$3015.857 \pm 2$	$3227.603 \pm 2$

## g) 松代基線網 (ΔD: 1965年10月起算の変動量)

基 線 年 月 日	象 山		西 寺 尾		可 候	
	D	ΔD	D	ΔD	D	ΔD
1965 X 6-7	$2381.612 (\pm 3)$	0	$3154.286 (\pm 5)$	0	$3062.912 (\pm 4)$	0
XI 15	.602 (±6)	-10	.293 (±8)	+7	.938 (±10)	+26
XII 9	.624 (±2)	+12	.318 (±4)	+32	.994 (±2)	+82
1966 III 2	.609 (±3)	-3	.310 (±4)	+24	3063.025 (±3)	+113
IV 12-13	.574	-38	.388	+102	.128	+216
IV 18	.570	-42	.383	+97	.159	+247
V 5-6	.557	-55	.455	+169	.238	+326

## h) 中野基線網

年 月 日	反射点		大 倉	今 井	桜 沢
	基点				
1966 III 4	城 山		$1716.675 \pm 3$	$2155.396 \pm 4$	$3685.689 \pm 6$
1966 IV 13	"		.677 ± 1	.408 ± 3	.671 ± 1

## i) 若穂基線網

年 月 日	反射点		下和田	大 橋	温 湯
	基点				
1966 IV 15	若 穂		$3293.668 \pm 2$	—	—
1966 V 8	"		.666 ± 2	$1890.526 \pm 0$	$2027.005 \pm 3$

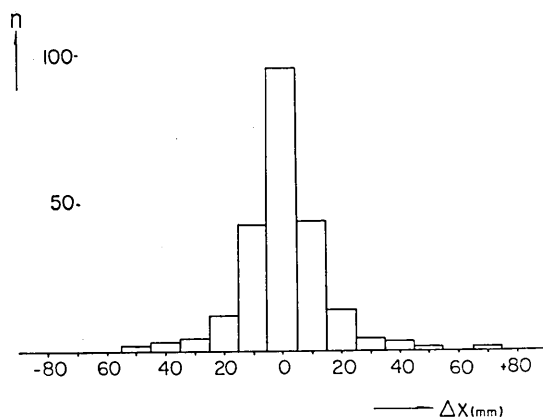
載せられているから改めてこゝでは触れない<sup>7)</sup>。

光波測量を地殻変動観測に利用しようとするとき、いつも心配されるのが精度の問題で

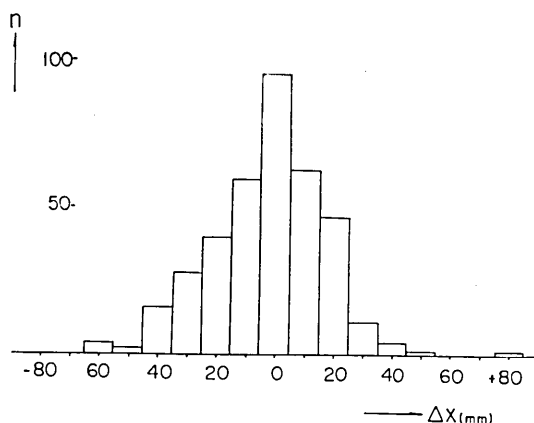
ある。計器そのものの測定誤差は(1)式で与えられているけれども、他の因子——特に気象条件——による誤差は地域により、また時期によって変動し一般的な見通しをたてることが容易でない。

抜本的な対策として二つの相異なる色調の光線を往復させることにより、大気の影響を除去する原理が提案され、また試験されつゝあるけれども、まだ実用段階にあるとはいへない。気象補正をできるだけ入念に行うのが現在のところ唯一の対策と思われる。

前述の通り、第1表の数値はそれぞれ五～十セットの結果を平均したものである。ところで各セットは反射点距離測定 [R] と較正用短絡距離測定 [C] とをそれぞれ三種の周波数 ( $F_1, F_2, F_3$ ) に対して行っている。こ



第 8 a 図 [R-C] 分散の状況 (標準偏差  $\sigma=14.3$  mm)



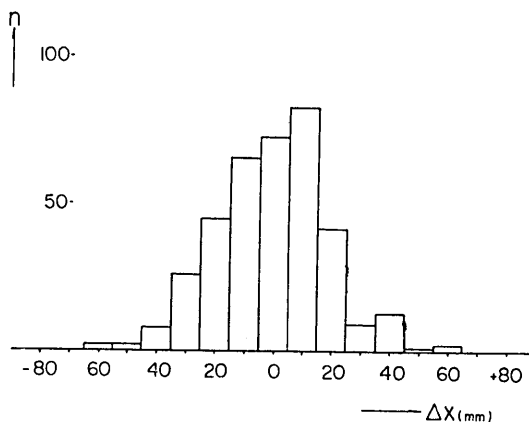
第 8 b 図 [C<sub>1</sub>] の分散状況 ( $\sigma=19.6$  mm)

7) K. KASAHARA and A. OKADA, "Electro-Optical Measurement of Horizontal Strain Accumulating in the Swarm Earthquake Area (1)," *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44 (1966), 335-350.

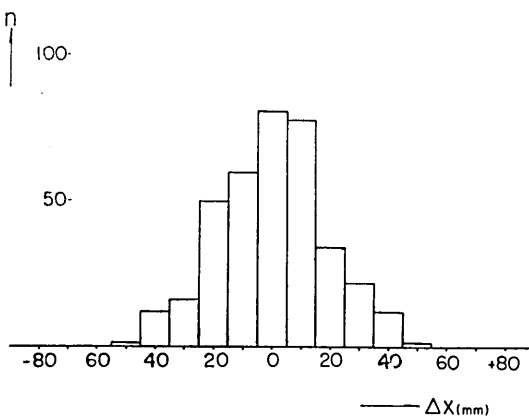
これらの基礎資料について、各回の平均値からの偏差の分布を求めて見ると第 8a~f 図のようになる。

第 8a 図はこのうち  $[R-C]$ 、すなわち反射点距離測定値から短絡光路分を差し引いた結果に対するものであるから、計器状態漂動の影響は第 1 近似としては補正ずみと考えられる。いゝかえれば主として大気状態から来る影響が一〜二晩（1 回の測量期間）の時間内でどのような漂動をするか示すものといえよう。これがただちに長期変動に対する資料の信頼限界を意味するものではないが、ひとつのめやすとして見ることはできよう。

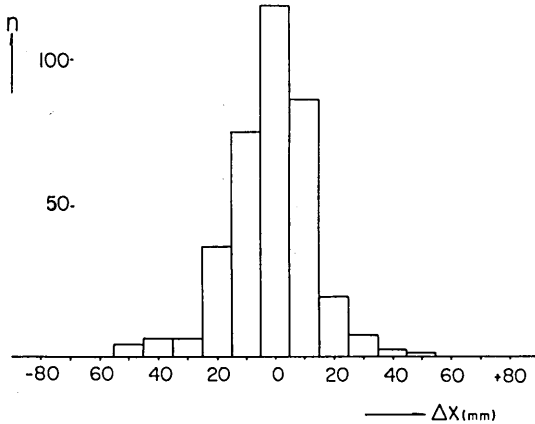
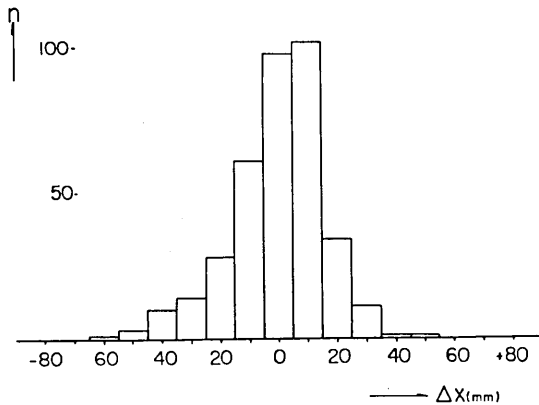
第 8b~f 図は  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  に対する  $[C]$  の偏差曲線であって、いわば大気状態の影響を受けない計器そのものの漂動量を示すものといえる。それらの標準偏差値 (20~30mm) に比べて第 8a 図の値 (15mm) が明らかに小さいのは  $[R-C]$  の



第 8c 図  $[C_2]$  の分散状況 ( $\sigma=19.2$  mm)



第 8d 図  $[C_3]$  の分散状況 ( $\sigma=20.0$  mm)

第 8 e 図  $[C_2-C_1]$  の分散状況 ( $\sigma=14.5$  mm)第 8 f 図  $[C_3-C_1]$  の分散状況 ( $\sigma=16.2$  mm)

操作によって計器誤差がかなり有効に補正されたことに対応するものである。

このような事情に基づいて最終的な誤差を  $\pm 15$  mm 程度と考へても大きな誤りは犯さないように思われる<sup>8)~11)</sup>。従って第1表の資料に関する限りでは、有意義な変動を示すものは見当たらないことになる。唯一の例外は松代地域であって、過去8ヶ月間に検出された基線変動は上記の限界をはるかに超える顕著なものであった。それについては別の報告を参照されたい<sup>12)</sup>。

8) J. SAASTAMOINEN, "Some Experimental Results on the NASM-4B Geodimeter," *The Canadian Surveyor*, **17** (1963), 47-52.

9) H. E. JONES, "A Geodimeter Evaluation," *The Canadian Surveyor*, **18** (1964), 389-398.

10) K. BRETIERBAUER; "The Refractive Index in the Reduction of Tellurometer Data," *The Canadian Surveyor*, **19** (1965), 367-371.

11) 菅野和平・村岡一男「新しい距離測量器 Geodimeter による測定試験の結果について」測量 **9** (1959), 19-21.

12) *loc. cit.*, 7).

## 4. 謝 辞

本研究を実施することができたのは、光波測量技術の導入・開発に対する萩原尊礼教授の御高配によるところが極めて多い。同教授は文部省科学研究費機関研究「電子基線測量による地殻変動の研究」およびそれを契機に発足したネオテクトニクス研究会の代表として本研究の進行に終始変らない御激励と御指導を賜わった。同教授および上記機関研究の実現に御尽力下さった所内外の関係者各位にまず深謝の意を表したい。

松代およびその周辺地域に対する作業は北信地域の地震活動に関する総合調査の一環として行われた。その他の地域に対する調査は文部省科学研究費特定研究「活断層・活褶曲に関するテクトノフィクス」（代表者森本良平教授）によって引きつがれつゝある。これらの関係者および本研究の発足当時から引きつゞき御世話になったネオテクトニクス研究会会員各位にも厚く御礼を申し上げる。

調査実施に当っては地震研究所測地部の御協力をいただいたほか、佐々木幸一・松本滋夫両氏には当初から、また柴野睦郎・井筒屋貞勝・大工原保・鈴木喜吉・原智美各氏にもしばしば御支援をいただいた。これらの方々および輸送面から毎回協力された本所車輛関係者にお礼を申し述べる。

現地での作業については更に各方面から公私両面での御支援をいただいた。特に（敬称略）：

- 【三 浦】 神奈川県土木部  
三浦市役所土木課  
東京大学理学部臨海実験所
- 【鋸 山】 鋸山観光開発株式会社  
鋸山地殻変動観測所
- 【伊 吹】 電々公社京都無線統制所  
山東町役場  
伊吹山観光開発会社
- 【知 多】 南知多町日間賀島支所  
同 篠 島 支 所  
一色町役場土木部
- 【大 町】 大町市役所  
大町山岳博物館
- 【付 知】 付知町役場
- 【松 代】 松代町役場総務課  
皆神山神社
- 【中 野】 中野市役所保健衛生課  
豊野町役場総務課
- 【若 穂】 若穂町役場総務課

には一方ならぬ御世話になった。こゝに記して謝意を表する次第である。



*56. Observation of Horizontal Strain Accumulation  
by Electro-Optical Means.*

*1. Construction of base-line networks in central Honshu, Japan.*

By Keichi KASAHARA and Atusi OKADA,  
Earthquake Research Institute.

The authors and their collaborators have been conducting a research project since 1963 in order to apply electro-optical distance measuring techniques for detecting tectonic movements. In central Honshu, they chose several localities of geotectonic interest, where they constructed base-line network for repeatable surveys with a Geodimeter IV.

The present paper deals with structures of the base-line network, basic scheme of the field work, and observational accuracy together with preliminary results of the surveys.