

光波測量による地殻水平ひずみの観測（第1報）

高田理夫・田中寅夫・尾上謙介
山田 勝・藤田安良・大谷文夫

OBSERVATIONS OF CRUSTAL STRAINS BY ELECTRO-OPTICAL MEASUREMENT (PART 1)

By *Michio TAKADA, Torao TANAKA, Kensuke ONOUE,*
Masaru YAMADA, Yasuyoshi FUJITA and Fumio OHYA

Synopsis

Results from repetitional measurements of six base-line networks founded in the western Japan by a geodimeter are presented. Base-lines in the Tottori district intersect two seismic faults, the Yoshioka and Shikano faults. As to the base-lines at Shimoda and in a tunnel at Amagase Crustal Deformation Observatory, comparison of the results from the electro-optical measurements with those from continuous observations by extensometers is possible. At the network in Wakayama we aim to observe the strain accumulation relating to local earthquake occurrences in this district. For the purpose of detection of the crustal strain accompanied by the characteristic movement of the southern coast in Shikoku, a network has been established in Kochi City. Significant changes of measured lengths of these base-lines are hardly observable in the results from three observations from 1968 to 1971.

1. ま え が き

地殻変動観測の目的は、地球表面において現在進行しつつある変形という物理的過程を明らかにすることにより、他の地球物理学あるいは地質学的な知識などとの総合のもとに、我々の住む地球そのものについての認識を深めようとするところにあるのは、ここで改めて述べるまでもないことであるが、特に地震発生に関連して、地殻内部における起震エネルギーの蓄積は当然地殻変動を伴うものであると考えられることから、その観測が大地震発生予知のための有力な手段の一つに数えられていることは周知の如くである。電子技術の発達によって、光波の伝播速度を既知として2点間の伝播時間を測定することによりその距離を決定する、いわゆる光波測量が可能になる以前においては、地殻変動の観測は主として三角測量あるいは水準測量の反復による測地測量の方法と、伸縮計などによる連続観測によっていた。

光波測量は、数 km から数十 km の距離を 10^{-5} から 10^{-6} の精度で直接測定することを可能にし、しかも、三角測量に比べて、その実施のための労力などが格段に少なく済むなどの利点を有しており、このような光波測量の利点を生かして、適当に設定された基線長の測量を頻りに繰り返すことによって、測地測量と伸縮計などによる連続観測との中間的規模での地殻ひずみを検出しようとする試みがなされるようになったのは当然の成りゆきであったといえよう。

すでに我国においては、国土地理院が光波測量を測地測量の一環としてとりいれるべくその精度を検討すると共に¹⁾、一等三角点あるいは地震予知研究計画に基づいて各地に設定された光波測量用菱形基線の辺長測量を実施してきている²⁾が、他方においては東京大学地震研究所により、地殻変動による地震発生の本性究明あるいは活断層附近の地殻ひずみの測定などを目的とする光波測量用基線網が各地に設けられて反復測量がなされてきている。その結果については、これまでに多くの成果が公表されてきている³⁾が、そのうち

でもとりわけ松代における観測結果は群発地震の発生機構の解明に大きく貢献するところとなり、このことはまた、光波測量による地殻変動の観測の有望性を示すことともなったことは未だ我々の記憶に新しい⁴⁾。数年来、地震予知研究計画に基づいて、日本各地に地殻変動観測所が新設され、地殻変動の観測体制が充実されてきているが、ここにおいても光波測量の反復による中規模程度の地殻変動観測が採り入れられてきている⁵⁾。

なお、外国においても光波測量による地殻変動の観測は各地で実施されている⁶⁾が、特に、H. Benioff の提案に基づいて始められた米国の San Andreas 断層附近の調査は大規模な基線網を設けて強力に推進されており、その変動量の大きいこととも相俟って、同断層の運動と地震活動との関係について多くの研究成果が発表されてきている⁷⁾。

地震予知計測部門においては、地震予知の実現を目指して、以前より伸縮計などによる地殻変動の連続観測を続けてきているが、これと並行して、上述のごとく中間的規模の地殻ひずみを検出する目的で、1968年に AGA 社製 Geodimeter Model 6 を購入し、各地に光波測量用基線を設定して測量を繰り返してきた。測量開始以来の経過時間も短かく、また当初の経験不足という点も加わり、現在までのところでは特別の結論といっは得られていない段階にあるが、本稿においてはまず既設基線網についての概略と、今日までの測量の結果だけを報告する。

2. 測量の実施方法と資料の処理について

Geodimeter Model 6 は光源にタングステンランプを使用しているが、adapter を付けることにより水銀ランプを光源として使用することができる。我々の測定においては、天ヶ瀬地殻変動観測室の地下観測室内での作業にはタングステンランプを用いているが、他はすべて水銀ランプによっている。この光源から出た光を Kerr cell を用いて、水晶発振器からの出力振動数に応じて変調させるのであるが、その振動数は3段階に切り替えることが可能であり、したがってそれぞれの波長について求められた距離を平均して、これを1回の測定値としている。実際の測定の手続きとしては、1波長につき、変調の位相を反転し、かつ Kerr cell への発振器からの附加電圧を反転した場合のそれぞれの読取値と、geodimeter 内部の短絡光路をとった場合の同様の読取値とを比較するため、1回の測定値を得るためには計 24 個の読取値を使用している。野外での測量においては、原則として 10 回の測定を実施しているが、通常の場合においては、上述の1回の測定時間は約 5 分であり、したがって1基線長の測定には1時間足らずの時間を要することになる。最終的な結果としては、この 10 回の測定の平均値を水平距離に引き直した値と、平均値の標準偏差で表示することにして、その際に必要となる基線両端の高度は、国土地理院発行の 5 万分の 1 地形図などにより決定し、これを標石の高度として固定しておき、各々の測定については、標石から geodimeter あるいは反射鏡までの高さを加えてこれをその測定における基線両端の高度とみなして、その差から水平距離への換算をおこなっている。なお反射鏡の傾斜は測定誤差の原因となるため小型水準器により垂直に設置するようにしている。

光波測量においては光速を既知として距離を決定するわけであるが、大気中における光の伝播速度は気温、気圧および湿度によって変化するため、その補正を行なわねばならない。通常の場合、気温による影響が最も大きく、湿度による影響は非常に小さい。したがって湿度による速度の変化は一応無視するものとしている。測量結果の補正のためには、理想的には光路に沿うすべての点における気温と気圧の値を知ることが望ましいが、実際問題としてこれは不可能であり、現在では、基線の両端の geodimeter 本体設置点と反射鏡設置点において、測定時間中の気温と気圧の観測を実施することにして、当初においては気温測定に普通の水銀温度計を使用していたが、1969 年の測量からはアスマン型通風温度計 (0.5°C 目盛) を使用している。気圧測定にはアネロイド型気圧計を用いているが、これは測定出発前と帰着後に、水銀気圧計により比較検定することにして、単に基線両端の地表面附近における気温・気圧値を用いて、光路に沿った平均的な値を求めることは、特に気温については困難であり、必ずしも適当な方法とは言えないが、例

えば光路の中間点で気球などによる直接の気温気圧測定が結果の精度を著しく向上させることになることは既に指摘されているところである⁹⁾にもかかわらず、費用労力などの点で大学附置研究所の一研究室における研究としてはまず不可能に近い現状であり、止むを得ず両端での測定値のみを用いることとしている。ただ地殻ひずみの検出には、毎回の測定において、同一量の定まった偏倚量が含まれているような場合には、その差を取ることで、その影響からのがれることができるため、距離の絶対値としての精度は必ずしも厳密さを要求するものではない。したがって或る場所において、同じ季節の、同じような天候状態における同時刻の大気中の気温分布に、毎年ほぼ似たような状態が再現される可能性が期待できるならば、基線両端における気温・気圧値による補正もあながち無意味とはいき切れないことになる。これらの点を考慮して、勿論毎年の測定を同一の天候状況下で実施するということが望むべくもないが、可能な限り、反復測量に当っては同一季節の同時刻頃を選んで改測するよう心掛けている。

実際の気象補正においては、各回の測定の開始時と終了時に基線両端で観測した気温・気圧値をそれぞれ平均し、かつ両端の値を平均することによって得られる値を使用することとしている。

Geodimeter Model 6 においては、反射鏡により反射されて帰ってきた変調波の位相と、Kerr cell に加えた電圧の位相を、電気的な delay line で shift させたのち比較して、両者の位相の一致を得たところで delay line による shift 量を読み取るという方式を採用している。したがって、その読取値から実際の距離を求める際には既知の距離を測定して作成した換算表を使用している。この換算表の値は、delay line の特性の変化につれて、当然変化するものであり、適当な時期に検定を実施して、表を作成し直す必要がある。1970年に検定を行なった結果、多少の問題点があることが明らかになった⁹⁾が、今回の報告においては、すべてメーカーが1967年11月に作成した換算表を使用した結果を採用することとした。

3. 基線網およびその測量結果

現在地震予知計測部門において光波測量基線網を設定して反復測量を実施している場所は次の6箇所である(Fig. 1)。なお、この他に九州の桜島および吉松地域において、桜島火山観測所との協力のもとで測量を実施しているが、これについてはまた稿を改めて報告がなされる予定である。

- 鹿野基線網、b) 吉岡基線網：1943年9月10日に発生した鳥取地震の際に出現した鹿野・吉岡両断層の活動を調査する。
- 天ヶ瀬地殻変動観測所地下観測室内基線網：伸縮計による連続観測の結果との比較を特に目的とする。なお最短の基線長は約400mであり、この長さにおいては、たとえ 10^{-5} の地殻変動が起ったとしても4mmであるから、通常状況下では検定線としての役割をも兼ねさせることができる。
- 下田基線網：屯鶴峯地殻変動観測所における連続観測との比較を第一の目的とする。
- 和歌山市基線網：同地方における局発性地震の活動と地殻変動との関係を調べるとともに、同市大浦における連続観測との対比を目的とする。
- 高知市基線網：四国南岸あるいは紀伊半島南部は南海道沖に発生する大地震に関係して特徴的な昇降運動を示しているが、本基線網は、この垂直運動に対応する水平変動を調べることが目的とする。

それぞれの基線網における基線の配置は Fig. 2 から 6 に示す通りである。現在までの測量結果はまとめて Table 1 に示した。これらの測定結果を見るに、現在までのところでは、測量の精度を越えて有意な変動を示していると断定できる基線は見当たらないようである¹⁰⁾。勿論これらの結果より、均一ひずみ場を仮定して、主ひずみの方向、量などを計算することはできるが、上に述べたように、各基線長の変化が地殻変動



Fig. 1 Location of base-line networks.

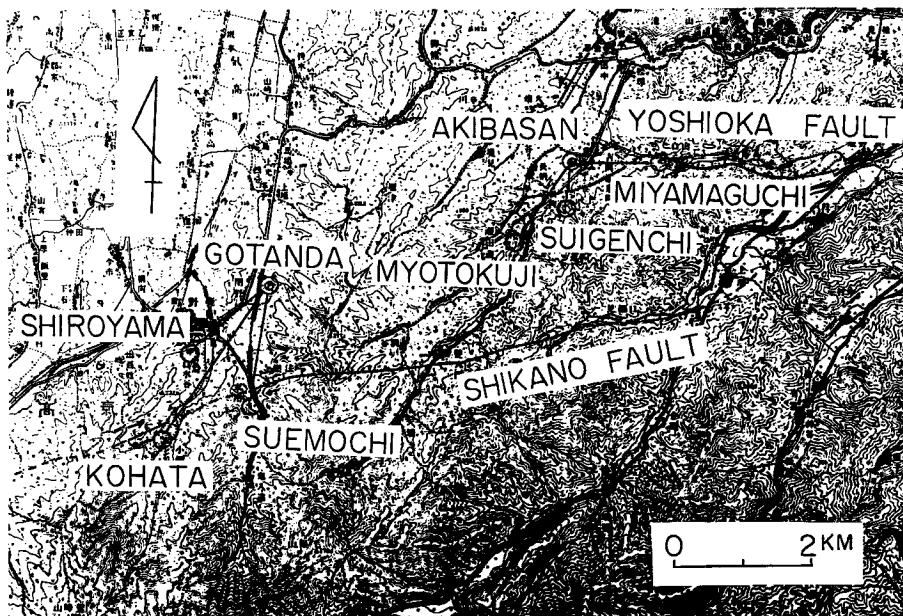


Fig. 2 Shikano and Yoshioka networks.

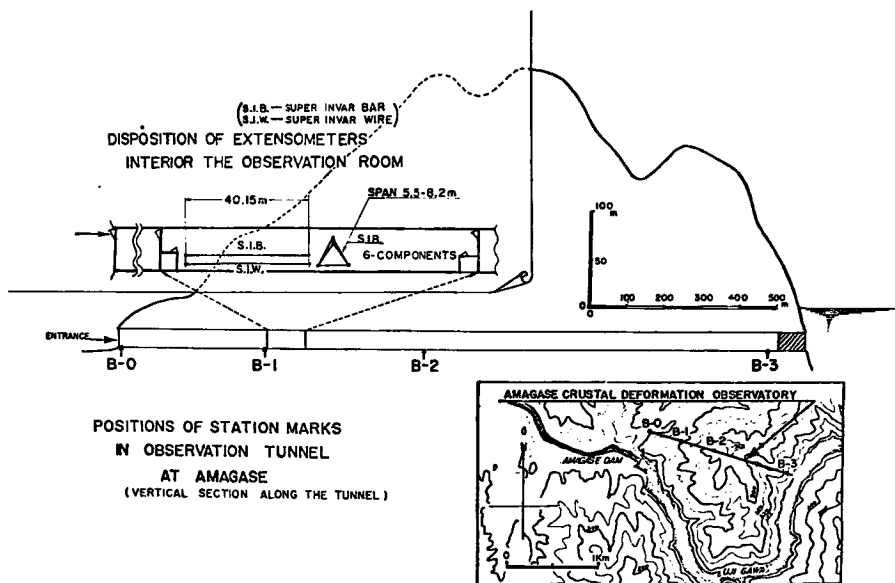


Fig. 3 Amagase network.

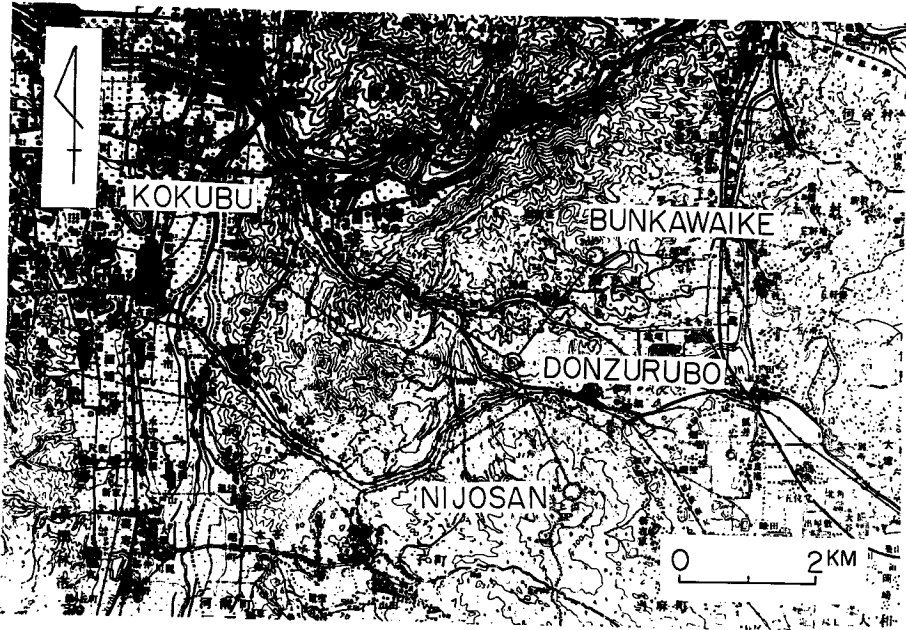


Fig. 4 Shimoda network.

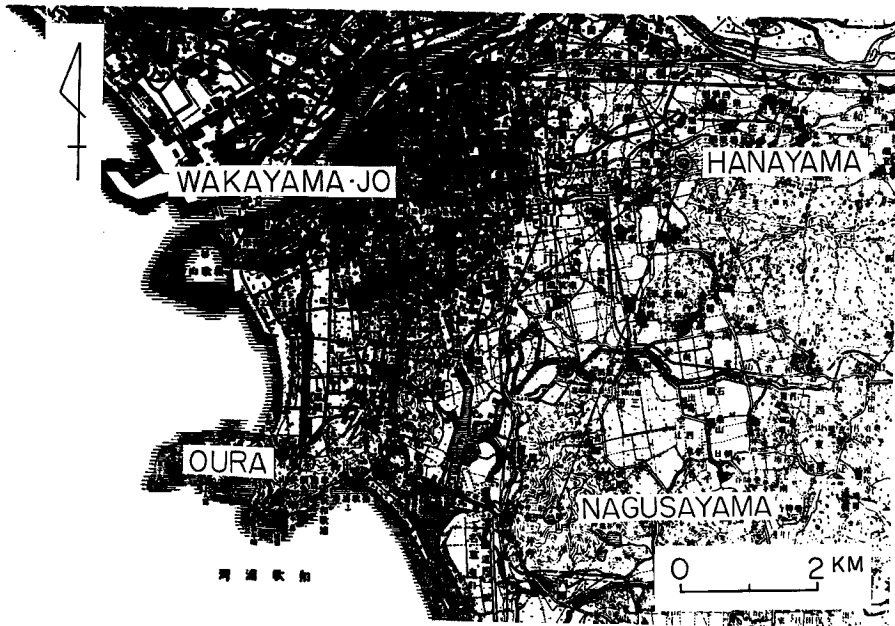


Fig. 5 Wakayama network.



Fig. 6 Kochi network.

Table 1 Results of electro-optical measurements.

(a) Shikano Network

Base Line		Shiroyama		Kohata		Suemochi	
No.	Date	D	ΔD	D	ΔD	D	ΔD
		m	mm	m	mm	m	mm
I	Nov. 29, 1968	1505.435 \pm 1	0	2740.001 \pm 1	0	1711.312 \pm 2	0
II	Dec. 1, '69	.420 \pm 1	-15	2739.994 \pm 2	-7	.312 \pm 1	0
III	Nov. 5, '70	.432 \pm 1	+12	.997 \pm 3	+3	.316 \pm 2	+4

(b) Yoshioka Network

Base Line		Myotokuji		Miyamaguchi		Suigenchi	
I	Nov. 30, 1968	1396.370 \pm 1	0	1298.047 \pm 1	0	743.171 \pm 1	0
II	Dec. 2, '69	.354 \pm 1	-16	.025 \pm 2	-22	.165 \pm 1	-6
III	Nov. 6, '70	.377 \pm 2	+23	.055 \pm 2	+30	.174 \pm 2	+9

(c) Amagase Network (Results from ordinary measurement method)

Base Line		B-1		B-2		B-3	
I	Aug. 4, 1969	389.717 \pm 3	0	827.195 \pm 2	0	1714.756 \pm 1	0
II	Feb. 6, '70	.690 \pm 4	-27	.184 \pm 4	-11	.748 \pm 2	-8
III	Jul. 13,	.715 \pm 1	+25	.196 \pm 1	+12	.756 \pm 1	+8
Base Line		B-1 (New)		B-2 (New)		B-3 (New)	
III'	Jul. 29, '70	389.846 \pm 2	0	827.354 \pm 2	0	1714.883 \pm 1	0
IV	Nov. 12,	.854 \pm 2	+8	.365 \pm 2	+11	.889 \pm 2	+6
V	Jan. 19, '71	.853 \pm 1	-1	367 \pm 2	+2	.888 \pm 4	-1

(d) Shimoda Network

Base Line		Kokubu (I)		Nijosan		Bunkawaike	
I	Feb. 25-26, 1969	4037.107±4	0	2138.319±1	0	2007.443±1	0
II	Jan. 29-31, '70	.074±2	-33	.323±2	+4	.440±1	-3
III	Dec. 3-4,	.101±3	+27	.325±2	+2	.447±2	+7
Base Line		Kokubu (II)					
III'	Dec. 21, 1970	4052.696±3	0				

(e) Wakayama Network

Base Line		Nagusayama		Wakayama-jo		Oura	
I	Mar. 9-10, 1969	5542.782±3	0	3869.645±1	0	7014.066±2	0
II	Mar. 12-13, '70	.792±8	+10	.652±2	+7	.066±3	0
III	Mar. 18-19, '71	.778±4	-14	.661±3	+9	.073±5	+7

(f) Kochi Network

Base Line		Shorenji		Hissan		Mimase	
I	Feb. 8-9, 1969	6214.058±4	0	3559.735±3	0	4912.732±2	0
II	Feb. 25, '70	.055±6	-3	.718±1	-17	.709±2	-23
III	Mar. 12-13, '71	.082±5	+27	.751±2	+33	.734±2	+25

によるものと断定できるまでに至っていないこと、吉岡、鹿野などの場合は当然均一ひずみ場と仮定することには問題があることなどの理由により、今回は一応触れないこととする。

4. あとがき

以上、現在までに行なってきた6地点における光波測量の結果について述べてきたが、今後においても更に測量を重ねることにより地殻変動の観測を目指すと同時に、簡単かつ有効な気象補正の方法の研究、基線網の充実などを進めていく予定である。また京都市、宇治市周辺においても基線網を新設すべく目下検討中である。

この測量の実施に当っては、地震予知計測部門の古沢保、竹本修三両氏には一方ならぬ御協力と御助言を戴いた。また現地における測量実施に際しては、標石の埋設を許可して頂いた土地所有者の方々をはじめ、多くの方々の御援助を賜わった。特に鳥取大学教育学部・教養部、奈良県北葛城郡香芝町、高知県庁土木部、和歌山市水道局の関係各位には一方ならぬお世話になった。ここに記して感謝の意を表する次第である。この研究の一部は文部省科学研究費によるものである。測量結果の解析は京都大学大型計算機センターFACOM 230-60（課題番号5030JC046）によった。

参 考 文 献

- 1) 田島 稔・佐藤 裕・須田教明：光波距離測定気象補正(I)―繫留ゾンデによる低層気温観測一、測地学会誌、第15巻、第4号、1970、pp. 121-129.
- 2) 自1963年1月至1966年12月間の日本測地事業報告、測地学会誌、第13巻、第1号、1967.
- 3) 例えば、
岡田 惇・柴野睦郎・笠原慶一：光波測量による地殻変動の観測、測地学会誌、第14巻、第2-3号、1969、pp. 72-85.

- 笠原慶一・岡田 惇・柴野陸郎・佐々木幸一・松本滋夫・平井正代：光波測量による地殻変動の観測 第 3 報 既設基線網の再測ならびに中型基線網の設定(昭和 43 年度), 地震研究所彙報, 第 47 巻, 1969, pp. 803-813.
- 4) Kasahara, K., A. Okada, M. Shibano, K. Sasaki, S. Matsumoto, and M. Hirai: Electro-Optical Measurement of Horizontal Strain Accumulating in the Swarm Earthquake Area (4), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 46, 1968, pp. 651-661.
- 5) 志知竜一・飯田汲事：犬山における地殻変動の観測(光波測量基線網の設定), 測地学会誌, 第 14 巻, 第 4 号, 1969, pp. 135-143.
- 6) 笠原慶一：電子距離測定および大気屈折に関する国際シンポジウム, 測地学会誌, 第 15 巻, 第 2-3 号, 1969, pp. 89-91.
- 7) 例えば
Hofmann, P. B.: Geodimeter Fault Movement Investigations in California, *Calif. Dep. Water Resour. Bull.*, No. 116-6, 1968.
Scholz, C. H. and T.J. Fitch: Strain Accumulation along the San Andreas Fault, *Jour. Geoph. Res.* Vol. 74, No. 27, 1969, pp. 6649-6666.
- 8) Hofmann, P.B.: 7) に同じ。
田島 稔・池田 稔：低層気象の測量におよぼす影響, 測地学会第 34 回講演会, 1970.
- 9) 大谷文夫・田中寅夫：光波による地殻変動観測の精度について, 京都大学防災研究所年報 第 14 号 A, 1971, pp. 15-31.
- 10) 大谷文夫・田中寅夫：9) に同じ。