東海地域における辺長測量 (1977-1981)

名古屋大学理学部犬山地殻変動観測所 木 股 文 昭

名古屋大学理学部地震予知観測地域センター 山 内 常 生

(昭和 57 年 12 月 30 日受理)

Electro-Optical Distance Measurements in the Tokai Region, Central Japan (1977-1981)

Fumiaki KIMATA

Inuyama Crustal Movement Observatory, School of Science, Nagoya University

and

Tsuneo YAMAUCHI

Regional Center for Earthquake Prediction Observation, School of Science,
Nagoya University

(Received December 30, 1982)

EDM (electro-optical distance measurements) in the Tokai region, central Japan has been repeated with the use of a Geodimeter 6BL at intervals of 1.5-3 months since January 1977, in order to detect secular strain accumulation in the direction of northwest-southeast. Horizontal displacement of the triangulation point in this region during the late 100 years indicates significant contraction in the direction of northwest-southeast. The strain accumulation observed from January 1977 to December 1981 is consistent with the result of triangulation. It is found that an accuracy of about $\pm 0.3 \times 10^{-6}$ in the EDM is attained if it is repeated frequently within a few hours around sunset. In this paper, we suggest a possibility of the change in length associated with earthquakes.

§1. はじめに

国土地理院 (1974) による高精度トラバース測量の結果, 静岡県浜名湖付近において主圧縮軸の方位は北西-南東であることが明らかにされた. また檀原 (1980) によれば, 天竜川から駿河湾西部にかけても北西-南東方向に圧縮をうけているという.

木股・山内 (1979) は東海地域における北西-南東方向の歪みの時間的変化を調べる目的で, 1976 年 12 月から愛知県豊橋市二川において辺長測量を始めた. 1979 年 8 月には, 歪解析する目的で, 北東-南西方向の基線を増設した. また 1978 年からは, 静岡県掛川市付近と愛知県の三河湾に, 北西-南東方向の新しい基線を追加して同様な辺長測量を始めた. この報告では, これらの辺長測量の結果と測量の精度について述べる. また基線付近で発生した地震と辺長変化の関係について報告する.

昭和 57 年 4 月 9 日発表

§ 2. 基線の位置および測量の方法

向山基線網と三ヶ根基線（三ヶ根-蔵王）・粟ヶ岳基線（粟ヶ岳-女神）の位置を Fig. 1 に示す。向山基線網は各方向とも、反射点を数 m 離して 2 点設け、反射鏡の設置に伴う偶発的な誤差を小さくするようにしている。三ヶ根基線は 1978 年 7 月より、粟ヶ岳基線は 1978 年 10 月より測量を始めた。両基線とも方位は北西-南東である。Table 1 に各基線の方位と長さを示す。

この測量は辺長の詳しい時間的変化を調べるのが目的であり、向山基線で 1~2 ヶ月ごとに、三ヶ根基線と粟ヶ岳基線で 3 ヶ月ごとに測量をくりかえしている。測量の精度を向上させるために、測量は日の入り前後の 3 時間に限って行っている [木股・山内 (1981)]。以下の解析に使用する測量成果は三ヶ根基線と粟ヶ岳基線では 1 日あたり平均 60 回の測量を 2 ないし 3 日間行つて得た約 120~180 回の平均値である。向山基線網においては、その測量成果は 1 日の測量であるが、10 回ずつ測量した隣接する 2 基線の平均値である。

測距儀はジオジメーター 6BL (AGA, No. 63204) を使っている。気象補正は気温と気圧・水蒸気圧について行い、測距儀の周波数変化に伴う補正も行っている。気温観測は当初アスマン通風乾湿計で行い、1980 年より温度センサー (μ pc 616 c) を利用した温度計を用いて上空 5~10 m にて観測している。反射点において気温観測ができなかった時もあり、今回の報告では特別にことわらない限り、基点の気温のみで補正した値を採用する。

Fig. 1. Location of the Sangane-Zaoh base-line, the Awagatake-Megami base-line and the Mukaiyama base-line network. Each base-line of the Mukaiyama network consists of two lines.

Table 1. List of base-lines.

Base-line	Length	Direction	Starting date of EDM
Mukaiyama-Sanyaguchi	5,730 m	N 56°W	Feb. 1977
Mukaiyama-Hosoya	5,516 m	N 12°W	Feb. 1977
Mukaiyama-Nanane	7,351 m	N 19°E	Aug. 1979
Sangane-Zaoh	16,788 m	N 32°W	Jun. 1978
Awagatake-Megami	18,006 m	N 35°W	Oct. 1978

§ 3. 測量の結果とその精度

Fig. 2 に向山基線網と三ヶ根基線・栗ヶ岳基線の辺長変化を歪み変化にして示した。図に示した直線は各基線が全期間にわたり一様の速度で歪んでいるものと仮定し、最小自乗法により求めたものである。三ヶ根基線と栗ヶ岳基線において、白丸で示したデータは測量日数が1日の場合である。このデータは2~3日間の測量とくらべ、信頼度が低いものとみなし、歪み速度の計算には加えなかつた。

各基線について変動を直線で近似すると Fig. 2 にあるように、筆者らが辺長測量を始めてから、北西-南東方向に $(1\sim3)\times 10^{-7}$ /年の速度で縮んでいることがわかる。この歪み速度は最近 90 年間の歪み速度 [国土地理院 (1974, 1976), 檀原 (1980)] とよく一致する。今までに

Fig. 2. Accumulation of horizontal strains at the Sangane-Zaoh base-line, the Awagatake-Megami base-line and the Mukaiyama base-line network. The data obtained under the poor meteorological conditions are indicated by open circles, which are excluded from the least squares fits.

報告されている光波測量の結果によれば、短期間の歪み速度は測地測量から得られている歪み速度とくらべると1桁近く大きな値を示す例が多い [たとえば国土地理院 (1982)]. しかし、今回得られた結果は定性的だけでなく、定量的にもよく一致した値を示す。

三ヶ根基線と栗ヶ岳基線にくらべ、辺長が短い向山基線網において、歪み変化に2~3年周期の大きなゆらぎがみられる。1977年から1979年にかけて 5×10^{-8} の縮み、1979年から1981年にかけて逆に 3×10^{-8} の伸びを示した。この歪み変化は測量の誤差とは考えにくい。THATCHER (1982) と SLATTER *et al.* (1982) は多色光の光波測距儀による測量から同様なゆらぎを観測している。地殻変動の連続観測においても、測定範囲が狭くなるにつれて、変動の割合は大きくなる傾向が指摘されている [たとえば大竹・他 (1972)]. 辺長が長くなるにしたがい、局所的な歪み変化が平均化され、広域に作用している応力を反映しやすくなるのではなかろうか。

SAVAGE and PRESCOTT (1973) は地殻が一様に歪んでいるものと仮定し、最小自乗法で得られた歪み量と観測値との残差より (1) 式のような標準偏差を求めている (Fig. 3)。

$$\sigma_1 = \{3^2 + (0.2 \times D)^2\}^{1/2} \text{ mm} \quad (1)$$

(D ; 基線長, km)

彼等は1年毎に歪み速度を求めているが、筆者らは3年余りの全期間の資料から歪み速度と標準偏差を求め、Fig. 3 に黒丸で示した。向山基線網においては、日の入り前後に各5回ずつ測距するよう測量方法を改善した期間、すなわち1978年6月以降の測量結果についての値である。今回筆者らが得た標準偏差は SAVAGE and PRESCOTT (1973) が軽飛行機を用いて気温観測して得た値とさほどちがわない。向山基線網における標準偏差 (基線長が短い3点) が彼等の結果より大きな値を示すものは3年余りの期間を一様の歪み速度で近似したためではないかと考えられる。彼等のように1年ごとに歪み速度を推定して残差を求めれば、標準偏差は図に示した値より小さくなる。

ジオジメーター 6BL 自体の平均自乗誤差は $\pm 4 \text{ mm}$ であることが実際の測量からわかつて

Fig. 3. Standard deviation of measurements plotted against distance. Open and closed circles are due to SAVAGE and PRESCOTT (1973) and this work, respectively.

いる [木股・他 (1980)]. Fig. 3 からわかるように, 今回の測量における誤差はジオジメーター 6BL 自体の誤差にほぼ等しい. したがってジオジメーター 6BL を使用するかぎりでは, 今回得られた観測精度がほぼ限界の精度と考えられる.

1980 年 6 月以降, 反射点においても基点と同様に上空 5~10 m の気温の観測を開始した. 基点における気温のみで気象補正する場合と反射点における気温も加えた平均気温で補正する場合とで結果にどの程度の差が生じるのか検討してみた. Fig. 4 で A は基点の気温で補正した場合, B は基点と反射点の平均気温で補正した場合である. 図には気温 1°C の変化に対応

Fig. 4. Comparison of corrections for the temperature. Line segment for 1°C indicates the variation in length for the change of 1°C . The data obtained under the poor meteorological conditions are indicated by open circles. A; the temperature at the observation point is used. B; the mean temperature at the observation and reflection points is used.

Fig. 5. Deviations of the data from the fitted lines in Fig. 2 are plotted against months of every year. Circles; Awagatake-Megami base-line. Squares; Sangane-Zaoh base-line. The data indicated by open circle and squares are discussed in the text.

する辺長のみかけの変化を示した。白丸示したデータは測量日数が1日の場合である。現在までの資料を比較する限りでは、反射点の気温を気象補正に加えても結果はあまりかわらない。

Fig. 5 は Fig. 2 で示した三ヶ根基線と粟ヶ岳基線において、直線からのずれを月別に示したものである。Fig. 2 中の白丸は省いてある。Fig. 5 の (○) と (□) については4節で詳しく述べる。図からわかるように年間を通して $\pm 5 \text{ mm}$ ほどのばらつきはあるが、目立つた年周変化はみられない。このことは、木股・山内 (1981) が指摘したように日の入り前後の3時間に限って測量を行えば、年間を通して良い精度で測量できることを意味している。

§ 4. 基線の近くで発生した地震との関連

Fig. 6 に気象庁で観測された 1977 年から 1981 年までの東海地域の地震の震央を示す。地震は 30 km より浅いものに限った。Fig. 7 は各基線ごとに、横軸に時間、縦軸に基線からの震源距離をマグニチュードと共に図示したものである。地震はマグニチュード 3 以上のものに限った。図の下部には各基線の歪み変化を示した。3 節で得た標準偏差を歪み速度と共にハッチで示した。標準偏差をややうわまる辺長変化に対応して起きたと考えられる地震を A~E で示した。Table 2 にこれらの地震の震源の位置、マグニチュードと基線からの距離を示す。なお向山基線における 1978 年 6 月以前の辺長変化は測量方法が改善されておらず、誤差が大きいと考えられ解析から省いた。

今回報告した A~E の地震に対応した辺長変化は、測量の誤差を少しではあるがうわまわつた量である。これらの歪み変化には地震の前兆現象が含まれている可能性がある。光波測量による地震の前兆現象の報告 [HOFMAN (1968)] はその後の報告 [SAVAGE and KINOSHITA (1971); PRESCOTT and SAVAGE (1974); SAVAGE and PRESCOTT (1978); SAVAGE *et al.*

Fig. 6. Epicenter distribution of earthquakes (January 1977–December 1981, Depth 0–30 km; JMA). Closed circles, A~E, are epicenters of the earthquakes which might be related with the change in base-line length.

Fig. 7. Accumulation of horizontal strain in the direction of NW-SE. Respective lines are given by the least squares fits of straightlines to data. The width of the shaded belt represents the twice of the standard deviation of data. The earthquakes ($M \geq 3.0$) in Fig. 6 are plotted.

Table 2. List of earthquakes in Fig. 6 and Fig. 7.

Date	Longitude (E)	Latitude (N)	Depth (km)	<i>M</i>	Hypocentral distance (km)	Base-line
A Jan. 30, 1979	137°04'	34°36'	10	3.9	24	Sangane-Zaoh
B Oct. 6, 1979	137°38'	34°45'	0	3.3	19	Mukaiyama
C Mar. 18, 1980	138°57'	34°13'	30	4.1	35	Awagatake-Megami
D Jan. 5, 1981	136°47'	35°04'	10	4.1	48	Sangane-Zaoh
E Aug. 11, 1981	136°47'	35°04'	10	4.0	48	Sangane-Zaoh

(1976, 1981)] で否定的になつてきた。これらの報告の対象となつた地震のマグニチュードは 4.3~6.3, 震源距離は 5~20 km で筆者らが解析した地震とマグニチュードと震源距離は同程度であるが、彼等の基線の多くは年 1 回の割合でしか測量されていない。測量の間隔が長いために筆者らが検出したような短期間の基線長の変化が地震の前にあつたとしても、その変化を検出できる可能性は少ないと考えられる。光波測量によつて地震の前兆現象を検出するためには、測量精度の向上だけでなく、短期間に測量をくりかえすことが必要であろう。

§ 5. 結 論

筆者らは東海地域において、北西-南東方向の歪み変化を求める目的で、1976 年 12 月に向山基線を、1978 年 6 月に三ヶ根基線を、1978 年 10 月に粟ヶ岳基線を設けた。それぞれの基線で 1~3 ヶ月ごとに光波測量をくりかえし実施している。これらの基線における辺長測量の結果から以下のことが明らかになった。

(1) 筆者らが測量を開始した 1977 年以降、数年間に粟ヶ岳基線で -2.8×10^{-7} /年、三ヶ根基線で -1.0×10^{-7} /年、向山基線網で $-(1.1 \sim 3.0) \times 10^{-7}$ /年の北西-南東方向の歪み速度が観測された。これは東海地域における最近 90 年間の国土地理院の測地測量の結果 [国土地理院 (1976); 檀原 (1980)] と定性的のみならず定量的にもよく一致する。

(2) 向山基線網においては、その歪み変化が著しい。1978 年から 1979 年にかけて、 5×10^{-8} に達する縮みが、1979 年から 1981 年にかけては逆に 3×10^{-8} に達する伸びが観測された。この辺長変化は測量の誤差をこえるものである。

(3) 気象補正に伴う誤差を小さくし、精度のよい測量を行うために、測距は日の入りの前後 3 時間に限つて行つている。そして気象補正に用いる気温は上空 5~10 m で観測している。このようにして得た測量の精度は年間を通して良好である。

(4) 基線の近くで地震が発生する場合測量精度をややうまわる辺長変化が地震の発生前に観測されることがある。しかしながら、現在までの測量では変化量が小さく、これが地震の前兆であるかどうか、確定的なことはいえない。

謝 辞

今回の測量にあたり、協力をいただいた水資源公団豊川用水管理事務所、掛川市、アイシン精機株式会社三ヶ根山荘の関係の方々に感謝いたします。名古屋大学理学部地震予知観測地域センター長、青木治三教授には全般にわたり指導いただいた。また同センターの奥田隆技官には、自記温度計を製作していただいた。記して感謝の意と致します。

文 献

- 檀原 毅, 1980, 東海地震予知の問題点について, 地震予知研究シンポジウム, 85-95.
- HOFMANN, R. B., 1968, Geodimeter Fault Movement Investigations in California, Bull. Depl. Water Resour., State of Calif., No. 116-6, 183 pp.
- 木股文昭・山内常生, 1979, 豊橋市二川における精密光波辺長測量, 測地学会誌, **25**, 79-90.
- 木股文昭・山内常生・田中寅夫・細 善信, 1980, 2 台の光波測距儀による同時比較測距, 測地学会誌, **26**, 128-129.
- 木股文昭・山内常生, 1981, 光波測距における温度補正, 測地学会誌, **27**, 173-182.
- 国土地理院, 1974, 中部・東海地方 GDP 高精度トラバース測量結果, 地震予知連絡会会報, **11**, 107-108.
- 国土地理院, 1976, 東海地方の地殻水平歪, 地震予知連絡会会報, **15**, 103-105.
- 国土地理院, 1982, 東海地方の水平歪, 地震予知連絡会会報, **28**, 205-210.
- 大竹政和・山田重平・小林 勝, 1972, 長野市における地殻変動連続観測 (I) —平柴観測点の傾斜変化, 1967~1971 年—, 地震, **25**, 243-253.
- PRESCOTT, W. H. and J. C. SAVAGE, 1974, Effects of the Bear Valley and San Juan Bautista Earthquakes of 1972 on Geodimeter Line Lengths, Bull. Seism. Soc. Amer., **64**, 65-72.
- SAVAGE, J. C. and W. T. KINOSHITA, 1971, Absence of Observable Geodetic Strain Accompanying Danville, California, Earthquake Sequence, Bull. Seism. Soc. Amer., **61**, 1795-1799.
- SAVAGE, J. C. and W. H. PRESCOTT, 1973, Precision of Geodolite Distance Measurements for Determining Fault Movements, J. Geophys. Res., **78**, 6001-6008.
- SAVAGE, J. C., S. PIETH and W. H. PRESCOTT, 1976, Preseismic and Coseismic Deformation Associated with the Hollister, California Earthquake of November 28, 1974, J. Geophys. Res., **81**, 3567-3574.
- SAVAGE, J. C. and W. H. PRESCOTT, 1978, Geodolite Measurements near the Briones Hills, California, Earthquake Swarm of January 8, 1977, Bull. Seism. Soc. Amer., **68**, 175-180.
- SAVAGE, J. C., M. LISOWSKI, W. H. PRESCOTT and N. E. KING, 1981, Strain Accumulation near the Epicenters of the 1978 Bishop and 1980 Mammoth Lakes, California, Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Amer., **71**, 465-476.
- SLATTER, L. E., A. MGGARR, J. O. LANGBEIN and F. LINKER, 1982, Multiwavelength EDM Measurements in Southern California, Program and Abstracts, General Meeting of the IAG, 39.
- THATCHER, W., 1982, Geodetic Applications for Crustal Movements in California, Program and Abstracts, General Meeting of the IAG, 3.