

光波測定の精度について：
ジオジメーター700型の特徴

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 半田, 孝司 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000197

光波測量の精度について

—ジオジメーター700型の特性—

半 田 孝 司*

On the Reliability of Electro-optical Measurements,
with Special Reference to the Observation with "Geodimeter 700"

Takashi HANDA*

An electro-optical measurement is utilized for a precise measurement of the strain and strain rate of the regional deformation of crust. It is affected not only by individual characteristics of an instrument, but also by various conditions, such as temperature and other meteorological conditions of a light pass, topographic conditions between the metric points and other factors affecting daily and seasonal changes of a distance. This paper describes influences of the each element or condition, and discusses the method, how to obtain an accurate and reliable value of a long distance.

1. はじめに

実用的な光波測距儀が現われてから、すでに25年以上になる。この光波測距儀は高い精度で能率よく距離測定ができるので、測量界に革命をもたらし、従来から行なわれてきた角観測を主体とした三角測量はこの方法の距離の直接正確な測定による三辺測量に変わりつつある。

基線測量をくり返すことによって広域的な地殻変動を検出できることは松代地震以来よく知られており、(笠原他, 1966 他) 地殻活動観測の最も有効な手段の一つである。しかし、非常に遅い地殻運動を比較的短時間内に測定するには特に高い精度の測定が要求されるので、実際の観測は必ずしも容易ではない。

距離の測定精度は機械自身に起因する諸要素や光路の大気の状態などの影響を受けて変わるので誤差

を最小限にするためには取扱いには十分な注意が必要であり、機械に合った測定方法を開発しなければならない。

現在の光波測距儀はエレクトロニクスの技術的な進歩に伴ない、その機械操作は手動的なものから自動化が進み、誰でも容易に扱え、一定度の精度をもつ測定ができるようになってきた。一方自動化が進むにつれて機械内部はより複雑になり、故障したり測定結果に異状が認められたときなど、それらの原因が分からない場合が多くなっていくことも否定できない。また、多数のパーツで構成されているこの種の測定機器は同一機種であっても一台一台異なった特性を示すことが考えられる。

地殻変動の測定を目的にする場合は特に高い精度と機械の長期に亘る安定性が要求されるので、使用する個々の機器の特性を把握することが不可欠であ

ろう。

静岡大学では1973年以来、ジオジメーター700型を使用して観測を続けているが、本機の特徴についての知見を得たので、実験結果の一部を示し、測定上の問題点を考え合せて報告する。

測定にあたり国土地理院の吉田光雄技官、東大地震研究所の柴野陸郎の両氏には常に有益な御助言を賜わった。特に吉田技官には基線測量にあたり、未公表データをも参照させていただいた。機械の細部についてはガデリウス社の田中俊光氏の御教示を得た。実測に当っては土隆一教授、木宮一邦助教授、大塚謙一助手はじめ静岡大学地学教室各位の御協力もいただいた。特に徳山明教授には、これまで行なったすべての観測はもとより、種々のデータの検討にいたるまで終始丁寧な御指導をいただいた。ここに

深甚な謝意を表する。

2. ジオジメーター700型の機構と特徴

ジオジメーター700型はスウェーデン、アガ社の光波測距儀シリーズ(現在この他に8型、6BL型、76型、12型がある)のうち近距離測定用に開発されたものである。この測距儀は自動式デジタル表示の直読式測距儀であり、5 km までの距離が1 mm まで表示される。距離測定と同時に水平・鉛直の測角もでき3"の精度を有し、水平距離換算機能も備えている。その他コンピューターへ入力可能なデータのテープパンチもできる周辺機器がある。このような自動化の方向は最近急速に発展しつつある光波測距儀の主流をなすものと思われる。

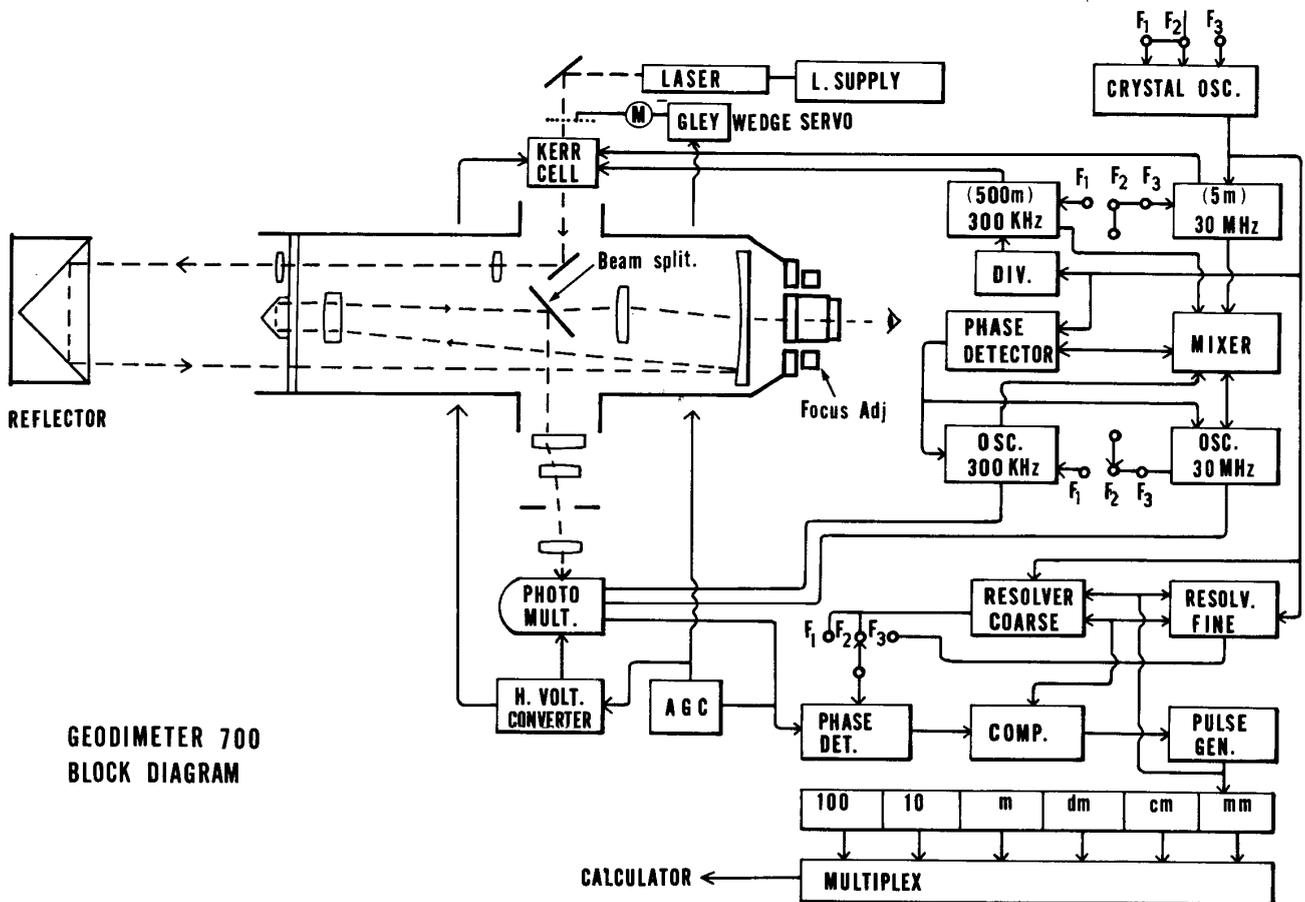


図1 ジオジメーター700型機構概略図

* 現在は本機の改良型(710型)が市販されているが、ここでは700型(No. 2045)について述べる。

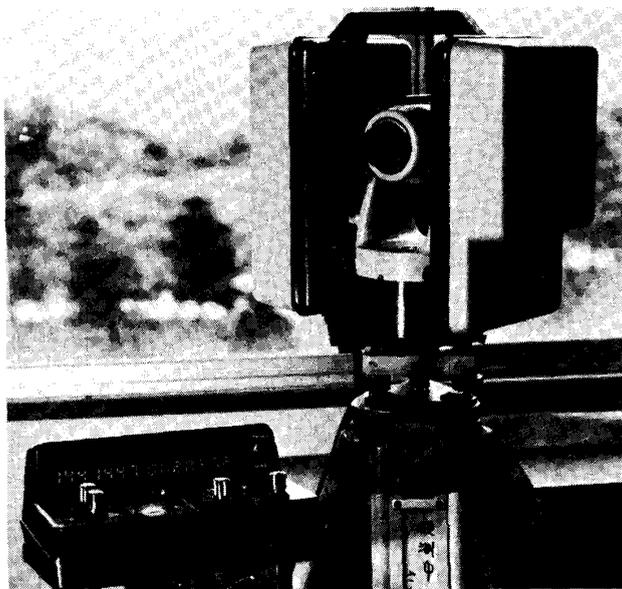


写真1 ジオジメータ 700

700型による距離測定の実理について

光波測距儀についてはすでに数多くの解説（須田教明 1971）があるが、ここには700型の機構および特徴の概略を記述する。

本機の信号用の光源にはレーザー光を使用している。これはガスレーザーに属するもので632.8 nmの波長をもつ赤色可視光である。

レーザー光はケルセルを通して強度変調を受ける。この周波数としては、粗測定用の300 kHz（単位波長500 m）、精密測定用の29.97 MHz（単位波長5 m）、および500 m以上の概略距離確認用の30.00 MHz（5.005 m）の3種が選択できる。この規定の値に変調されたレーザー光は、図1のように、プリズムおよびレンズ系を経て望遠鏡先端部から測定点に向けて送光される。測定点には通常コーナーキューブプリズム反射器が置かれるが、これによって反射した信号光は再び望遠鏡のレンズ系に入り、その殆んどが光電子増倍管に導かれる。残りの一部はビームスプリッターによってアイピースに進み視準用となる。光電子増倍管によって、電気信号に換えられた受光信号は電子回路を経て内部で規準化された送光信号とその位相を比較する。この際レゾルバーと呼ぶ位相差検出装置が使われている。このレゾルバーは二つの信号の位相差を単位波長の1/5,000の分解能で距離に換算し、これをディスプレイパネル上に数字で表わす。測定は最初F₁によって

単位波長500 mについての粗距離を測り、0.1 mまでを表示する。同時にこれを内部へメモリーし、次にF₂により精密測定を行ない最小桁1 mmまでの距離が表示される。しかし、この表示は500 m以下の距離しか表示しないので、第3の操作としてF₃の測定との比較により500 m以上の概略距離を5 kmまで算定できる機構となっている。この機械では距離の表示はこのように5 kmまでであるが経験的には6~7 kmまで測定可能である。

光源のレーザーは小型ながら輝度の高い可視レーザーであって、反射点をとらえるのが確実、容易である。また機械の操作は簡単であり一回の測定時間は短かくてすむ。これにより短時間に多数回の測定ができるので、表示される値および反射点の視準誤差の減少をはかり、かつ気象条件など外因的要因による測定値の偏差を求めることができるので、測定結果への精度および信頼度が増すと考えられる。デジタル表示部分は大型表示管が用いられているため見易いが、反面消費電流が大きく（表示管のみで約2.5 A）電源バッテリーの負担という欠点につながっている。

以下はメーカー公称の仕様概略である。

測定範囲, 0.1~5 km

分解能, 1 mm

精度, $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ mm/km}$ (平均自乗誤差)

光源, 1 mW, HeNe ガスレーザー

有効光波長, 632.8 nm

消費電流, 7 アンペア

電源電圧, 12 VDC

変調周波数, F₁: 299.700 kHz, F₂: 299970.000 kHz
F₃: 30000.000 kHz

周波数精度, $\pm 0.5 \times 10^{-6} \text{ Hz}$

使用プリズム, 1 素子 1700 m

3 素子 3500 m

6 素子 5000 m

プラスチック反射鏡, 500 m

重量, 23 kg (ケース共)

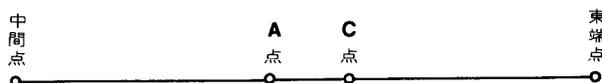
3. 機械定数の測定

ジオジメータの機械定数は電気的および光学的基準と機械的基準との差であって、機械個有のものである。この定数は、後述の変調周波数と共に測定

器としての基準になるものであるが、内外諸条件の変化および経年変化などによってくることもあり得る。従って、常に精密な検定測定を行なって確かしておくことが必要である。なお定数は測定距離の大小には関係しない。

定数の測定にはいくつかの方法がある。その一つはインバル尺で直接精密に測定された検定基線場において、基線両端点に機械と反射鏡を設置して測定し、インバル値との差を定数とする。また基線に中間点を設けて、その中間点および両端点の相互の距離を測定し、差引法で得た結果を比較する方法(須田, 1971)などがある。後者の方法によればインバル値がなくても定数は算出できる。現在、大学構内に小型基線を設置して定数測定を行っているが、これまでの経験によるとインバル基線による測定と上記大学内基線での測定結果はよく一致している。検定基線場は秋多^{*}、村山など数少ないので、通常は手近かな基線を使って、これに中間点を2点程度設けて差引法で点検し、時々インバル基線と比較検定するのが良いと考えている。表1は測定結果の1例であるが、インバル点検基線の場合近距離で

表1 秋多点検基線^{*}における測定結果の比較



測線	GDM700 ^{**} (静岡大)	MR100 (地理院)	偏差 (静大-地理院)
C点 ~ 東端点	264.181 ^m	264.182 ^m	-0.001 ^m
C点 ~ 中間点	285.742		-0.002
中間点 ~ C点	285.742	285.744	-0.002
A点 ~ 東端点	287.162	287.164	-0.002
A点 ~ 中間点	262.759		-0.001
中間点 ~ A点	262.758	262.760	-0.002
中間点 ~ 東端点	549.922	549.924	-0.002

* 現在 使用はできない

** No.2045, 定数=-0.010

あっても光路が地表近くを通るため、かげろうの影響が大きく、風が強く、空気が擾乱している時などの他日中は良い条件になることは少ない。

4. 機械の特性

a. 変調周波数の安定度：変調周波数の安定は電磁波測距儀で最も重要なものである。ジオジメーター700型においては、光源であるレーザー光はケルセルを用いて強度変調し、測定用信号としている。この変調周波数のくるいは距離に比例した影響をおよぼすために高い安定度が要求される。周波数のくるいの原因には水晶発信器を始め抵抗キャパシタンス等回路の内外周条件による変化、電圧変化および経年変化などが考えられる。700型においては $F_1 \sim F_3$ の三つの周波数が選択できるようになっているが、このうち精密測定用としての F_2 が特に重要である。粗測定用 F_1 (F_2 と同一発信器による) と 500 m 以上の距離の概算用の F_3 (別の発信器による) の精度についてはあまり大きな問題はない。これらには公称値として 1 ppm の安定度および経年変化 0.5×10^{-6} が与えられている。

これまでの実験によると、一回の観測中(数時間程度)の変動は、後述の電源電圧の降下による変化を含めても 0.2×10^{-6} 以内であって、よく安定していると云える。しかし、経年変化については過去3年間に 30 Hz (1×10^{-6}) 程ずれたのでや、大きいようである。

周波数はくるいが認められる場合でもその量がわかっていたら測定距離に対する補正^{**}ができる。しかし規定値との差があまり大きいのは好ましくないため微調整が可能になっている。調整後は合せた規定値からずれる場合があるので頻繁にチェックした方がよい。

機械全体の測定中の消費電流は約 7.2 アンペアであり、通常使用する小容量のバッテリーにはかなりの負担である。測定中に電源電圧が下ると変調周波数は変化(増大)する。この両者は図2に示すようにリニアな関係にあることがわかった。通常使用

* 現在光波測距儀用として一般に使用できる検定基線場は村山(国土地理院の許可が必要)のみであり、両端点間の距離は 1013.813 m (地上の水平距離) である。

** 補正式 $dD = - (du/29.97) \times D \cdot 10^{-6}$ (du: 標準周波数との差) Hz

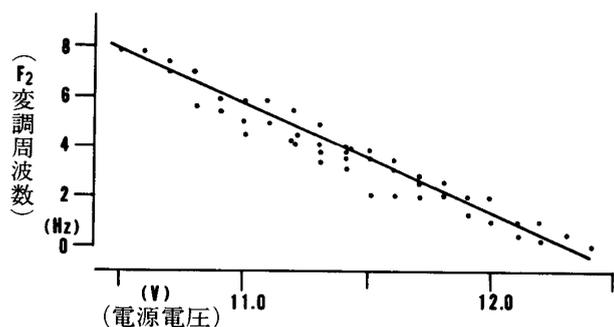


図2 周波数の電圧特性，縦軸は基準周波数（0）からの変位を示す。

するバッテリーが完全充電の状態から測定不能になるまでの電圧変動（降下）に対し周波数の変化（増大）は5 Hz であり，この程度のくわいは測定距離5 km に対して1 mm 以下の誤差でほとんど問題はない。従って，赤ランプにより測定不能の表示があるまではバッテリーは交換する必要がない。

電源バッテリーの容量低下を防ぐために観測途中においても表示管は必要以外は切っておいた方がよい。このスイッチ操作に伴っても電圧は変化して周波数が変動するが，2 Hz 程度であり，スイッチを戻すとすぐに元の状態に復して安定する。

電源スイッチを入れてから変調周波数が規定値に達して安定するまでのウォーミングアップの状態は実験によると図3に示すように最初の10分間は急

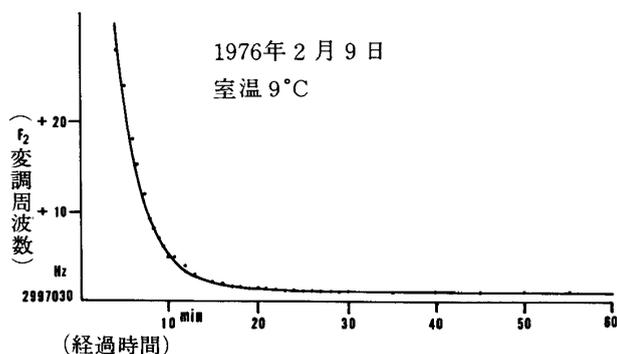


図3 変調周波数（ F_2 ）の時間特性。

横軸は SW, ON からの時間を示し，変調周波数が安定するまでには少なくとも10分程度は必要である。

変するがその後の安定は非常によい。冬季と夏季のように外周条件によっても左右されるが，周波数に限らず，光電子増倍管その他の電気回路全般の動作が安定するまでには，ある程度のウォーミングアップが必要になるので，極く近距離の測定を除いては特に配慮すべき点である。

本実験には周波数カウンタとしてタケダ理研 TR-5501 を使した^{*}。測定機の測定であることを配慮して，十分な予熱時間を与えるなど取扱いには慎重を期した。なおジオジメーター8型については，吉田（1974）の実験結果が報告されている。

b. レゾルバー（位相差検出装置）の点検：送光信号と受光信号の単位波長についての位相差は700型においてはレゾルバー（オートマチック）によって検出される。もし，このレゾルバーが距離の違いによる特異な現象を持つとすれば直接に測定距離の精度に影響するので念のため点検を試みた。

測定方法は図4に示すように約70 m離れた位置

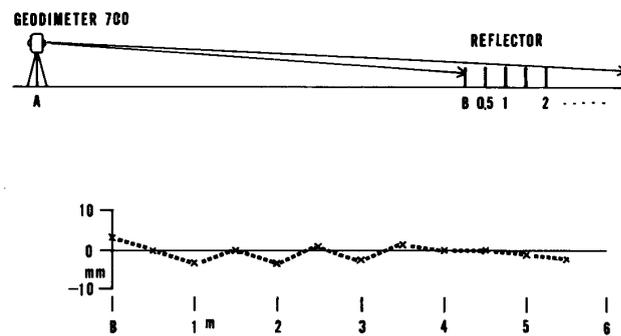


図4 レゾルバー点検方法およびその結果（1975. 12.16）

横軸はB点から反射鏡を移動して測定した距離（A-B間約65 m）

縦軸は12セットの平均値からの変位を示す。

にジオジメーターと反射鏡を置き，反射鏡は単位波長と同じ5 mについて，この間を0.5 m間隔でスチールテープ上を移動させて測定を行った。測定の結果は図に示すように反射鏡移動12回の測定値の

平均値からの偏差は微量（標準偏差 1.8 mm）であって特異な変化は全くなく、良好な結果が得られた。

c. チューニングについて：機械は電気回路の同調がとれていない場合は正確な動作はしない。同調がずれると周波数、距離の表示共に変化する。特に後者はその変化が大きいので注意を要する。

チューニングの状態は 700 型ではコントロールメーターの最大指針位置（通常グリーンベルト範囲の中央線やや左側）で示される。このチューニング状態のずれは変調周波数に対してはあまり影響がなくグリーンベルトの範囲に入っていればその変化は数 Hz 程度であるから 5 km 程度の測線では測定距離への影響はほとんど無視できる筈である。しかしずれが小さくても表示距離に対しては意外に大きな変化を与える。測定開始直後はチューニングがずれ易いので十分なウォーミングアップと微調整が必要である。大中にずれた場合は、当然周波数、表示距離共に大きく変わり不安定な状態となる。図 5 はメーターの指針位置で示したチューニングのずれと、これによる表示距離の変化を示す。通常使用する 2 の Max 位置から約 2 mm 離れた 3 の位置までずれると表示距離は 10 mm 程長く表われ、さらにずれた場合はこの誤差は急に増大する。このことから各セット毎のチューニング状態はメーター指針

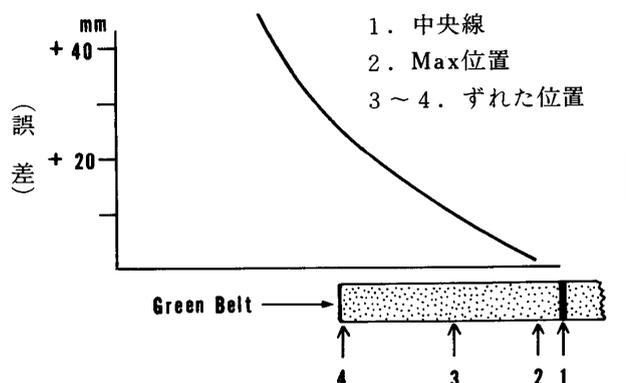


図 5 チューニングのずれによる表示距離の変化

に注意してよく合わせた後に読定に入る必要がある。

d. プリズム（反射鏡）および受光量：700 型において信号源のレーザー光の出力は 1 mW と小さく、光を最も集束させた状態でも 20 cm/1 km の拡がりをもっている。反射鏡には後述の受光量との関連もあって比較的多くのプリズム素子を使用する。1 km 以下 1 素子、2 km 程度まで 3 素子、それ以上は距離に応じて 7 素子以上として用いている。測定時の視通状況によっても異なるが、公称値とは開きがあり、5 km に対し公称の 6 素子では光量不足であり、7~9 素子を使用した方がよい。受光量はコントロールメーターに表示され、グリーンベルトの中央線左側であれば測定可能とされているが、日出、日没の頃を境に S/N（信号/雑音光）が急変するので、日中の測定では十分な信号が得られるようにし、雑音光によるバックグラウンドの増大を考慮して多めのプリズムを使用した方が良い結果が得られる。

測点間の比高が大きく、光路が高角度になるにつれて、本体とプリズムの機械設置高による測定距離の誤差は増大する。このような条件で測定される場合は機械・プリズム共その設置に当っては整準をよくとって高さも厳密を期すなど慎重に行なう必要がある。また、視準を正確にして誤差の減少に努めることも大切である。

プリズムの設置角度（垂直軸の廻り）はそれ程厳密でなくてもよいのは光波測量の特徴であるが、距離の増大に伴って受光量の損失が大きくなるので正確にする方がよい。

なお極く近距離の観測（400 m、プリズム 1 素子）によれば 30°以上ずれた場合でも所要信号が得られた。

測線における各基準点の標高については、三角点の場合成果表を利用するが、私設点の場合は近くの三角点を基準にして水準測量或はセオドライト^{*}による三角水準測量を行なって決定する。この場合、鉛直角は既知点と未知点の両方から観測しているが、ある程度の誤差は免れない。しかしこの誤差による測定距離への影響はほとんどないものと考えられる。

* ツァイス Theo 010A No. 277984

5. 長期観測による精度, 安定性

一つの測定基線において同一機械を使って長期に亘る観測を実施すれば, その機械の精度や安定性などが調べられると考え, 同時に気象状態および温度計等の試験検討をも行うため長期観測を試みた。

観測に使用した基線は約 700 m の距離で, 両測点の間には深さ 40 m の谷地形を含む丘陵の中腹にあり (標高 80 m 付近), 光路はほぼ水平となっている。測点間は茶畑, 雑木林などがほとんどを占め顕著な構造物等はない。(図 8, 9) ジオジメーター本体と反射鏡 (プリズム 1 素子を使用した) は共にコンクリートの建物に据え設置誤差が入らないようにし, 本体の条件をなるべく一定にするために定電圧電源^{*}を使用して実施した。観測は 2 月後半から 3 ヶ月半に亘り, 合計 463 セットの測定を行った。その結果は図 6 のように, 全測定値の標準偏差は 3.5 mm が得られ, 85% の測定値はこの範囲に入り測定値の約 90% が ± 5 mm であり機械安定度は公称値を上まわっている。

測定時の天候状態 (快晴～小雨), 時刻は様々であるが測定距離が短かいため, 予想どおりこれらの条件の違いによる差は認められない。かげろうも日中測定の場合はほとんど確認されているが測定値への影響はない。距離が短かいので当然気象補正による誤差はあまり入らないが, 参考のために測線付近で 3ヶ所の気温を測定してみた。観測に最も適していると云われる日没前後の時間帯においても, 本点とわずか 400 m 離れた地点の気温差が 2°C と観測された例があることは光路の気温が地形その他によって局部的差異が大きいことを示し, また実用的な方法での大気状態の正確な把握に限界があることを示している。

なお, 窓ガラス (厚さ 3 mm で本体と 50 cm 隔たっている) 越しでもガラスの屈折による視準位置のずれが多少あるものの測定は充分可能であった。

機械の分解能を点検するため次のような測定を試みた。5 km の基線において本体は固定し, プリズムを水平板上で前後に数 cm 移動して距離測定を行

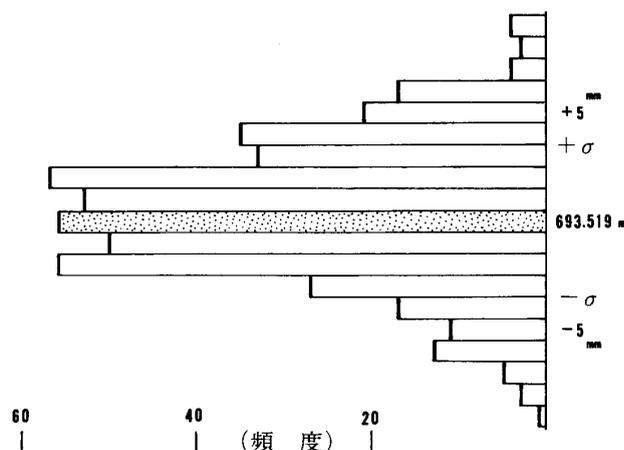


図 6 聖光学院基線測定結果, 1976 年 2 月～6 月
合計 463 セット (測定回数 6019 回) の平均値
および測定値の分布を示す。

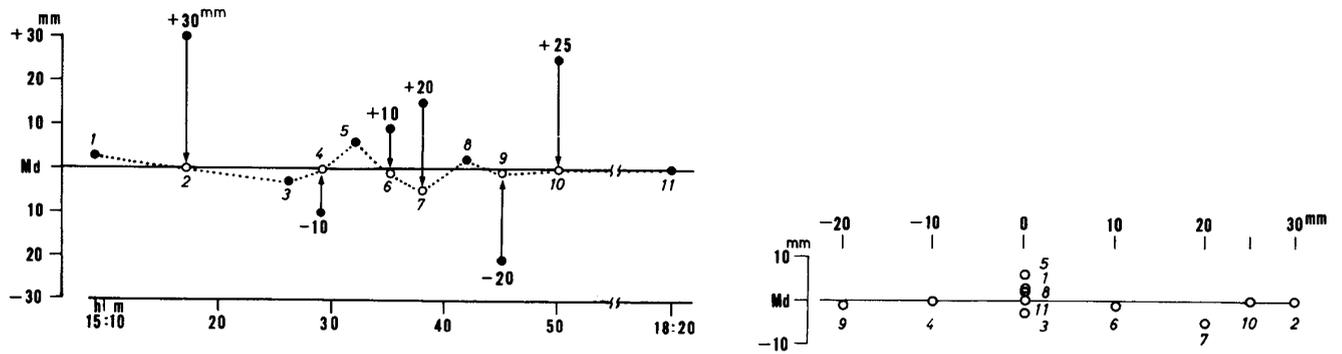
なった。この実験ではプリズムを 6 回 (+30, -10, +20, -20, +25 mm) 移動し, この間に 0 位置に戻す測定を合わせて行なった。結果は図 7 に示すようにプリズムを移動した分の値を 0 位置に換算するとよく直線にのり, 測定距離 5 km においても 5 mm ~ 1 cm の距離変化を明瞭に分解していることを示している。

6. 気象観測

光波測量において測定機器そのものによる誤差とは別に信号光が通過する光路の気象測定の不確かさから生ずる誤差がある。これは距離に比例する誤差であるから極く近い距離を除いては測定精度に重要な影響を及ぼすものである。一般に光路の気象状態は地形, 季節, 天候, 時刻等によって複雑に変わり, 中でも気温の変化は著しい。たとえ近距離であっても光路全体の平均温度を正確につかむことはむづかしく, 現在正確で実用的な測定方法はないと云ってよい。このため長距離の光波測量の精度は気象測定によって決まるとも云われている。ジオジメーターによる距離測定において 1×10^{-6} の精度を得るには, 波長に変化をもたらす屈折率の標準状態

* 高砂 GPS-1210 安定度 0.005% 以内

** 都田一堀谷 (三方原)



矢印の付いた黒丸（例：+30mm）はプリズムを移動したときの実測値で、白丸はこの実測値から移動分を差引いたプリズム0位置に換算した値を示す。

横軸は5km離れた反射点からのプリズム移動距離を示す。縦軸は実測値11セットの平均値よりの変位。（斜数字はセット番号、測定順）

図7 5 km 基線(都田一堀谷)における分解能測定結果 1974年3月5日

からの偏差を補正するために、全光路の平均気温 1°C 、平均気圧 2.5 mmHg の精度で測定しなければならない。

われわれの現在観測距離は5 km 以下が多いので、気象観測は一般に測線の両端で観測し、その算術平均値を気象補正式に用いている。ここで問題となるのは温度計の取扱いであろう。測点付近では地形や植生など様々な局所的違いがあるから光路の全体の状態を代表し得るような観測ができるような工夫が必要である。

地表の影響のない気温の測定に当っては温度計は隔測することが必要であるので、サーミスタ式の温度計を開発使用しているが、この温度計は後述のように充分満足できる精度をもっている。標準型アスマン通風乾湿計(電動)のガラス温度計の代りにサーミスタセンサを組み込んだもので指示計部は小型(15 cm × 15 cm × 6 cm、重さ1 kg)ながらメーターが大きく、さらに3段($-5 \sim 15^{\circ}\text{C} / 10 \sim 30^{\circ}\text{C} / 25 \sim 45^{\circ}\text{C}$)に切換えて最小目盛 0.2°C としてある。これにより 0.1°C を読むことはさして困難ではない。リード線を伸すことにより感温部を離すことができ、互換性もよいので切換ボックスによって1

台の指示計で複数個所の測定も可能である。感温部および指示計の精度については種々のテストの結果良好であることが判明している。

水銀温度計とサーミスタを比較検定するために通風装置の規定の位置に両者を並べてセットし、前者を数m離れた所からトランシットで目盛を読み同時にサーミスタ指示メーターを読む方法で多数回測定した結果、両者の差は 0.2°C 以内であった。また使用中指示計の電源電圧(UM-2×2)が下ってメーターのフルスケール位置が変化するが、24時間連続でも誤差は 0.2°C 程度である。しかも電圧と温度指示値の差の関係は直線的であることが分かったので、たとえずれてもその補正は容易である。通風用の小型モーターは乾電池(UM-2×4)で作動させているが、この電池の容量低下による通風量の変化もほとんど問題なく、発熱なども全くない。但し指示計は水平位置用であるため、実測時の取扱は注意を要する。

感温部はなるべく高い位置にして地表面付近の影響をさけるようにする。適当な樹木などがいない場合は組立式のグラスファイバーポールを自作して、これに保持させている。

* 芝浦電子製 サーミスタ隔測温度計(MGA 3-3A 206)

** 吉野計器, No. 730698 (気象庁検定付)

表2 1セットの測定回数による平均値 (\bar{x}) および標準偏差 (σ) の変遷*

測線, 測定日時	時間 回数	30Sec	1 min	1.5min	2 min	2.5min	3 min	3.5min
		7	13	19	25	31	37	43
静大 → 観音山 51, 2, 2-14:02	\bar{x}	76.4	76.4	75.7	76.2	76.8	77.1	77.5
	σ	2.9	2.3	2.5	2.4	2.8	2.7	2.8
静大 → 観音山 51, 2, 2-16:56	\bar{x}	80.9	80.4	79.8	79.5	79.4	79.6	
	σ	1.6	1.3	1.6	1.6	1.5	1.6	
静大 → 聖光学院	\bar{x}	22.4	21.5	22.0	21.7	21.8	21.7	
	σ	2.0	1.9	2.1	2.0	2.0	1.9	

静大構内 48, 6, 21-14:30		5 min	10 min	15 min	18 min
		10	20	30	35
	\bar{x}	71.5	71.7	72.3	72.2
	σ	2.2	1.8	1.8	1.8

* このほかに 100 回以上の測定例がある。

温度測定は距離測定時のみでなく、連続して測る。特にサーミスタは水銀温度計に比し感度精度共良いため瞬間の気温測定が可能であり、多数回読みとってその平均的な値を決めその地点の気温としている。現在われわれはこのサーミスタ温度計の精度を落さないような連続自記方法を考え、小型記録装置の接続を行なっているが好結果を得ている。

気圧の変化、分布は気温程複雑ではないから測定は容易である。しかし、低気圧が近づいて急変する場合もあり読み違いなどを防止する意味でも測定間隔はできる限り密にして正確を期している。測器は携帯型のポーリン気圧計を水銀気圧計と比較チェックして使用しているが、ドリフトも少なく、よく安定して精度も充分である。また気圧は小区域内では比較的簡単な分布をしていると考えられるので、片側観測（例えば本点のみ）で得た値を、標高差および温度関数として補正し、気象常用表から算出しても所要精度は得られると考えられる。

この他湿度は 5 km 程度の近距離ではほとんど影響しないので、参考値として測定はしても補正式には算入しない。

7. 静岡大学における標準的測定法

これまでの各節で述べた機械の特性を考え可能なかぎりの精度を保ち、かつ測定者の個人差が入らず客観的なデータを得るため静岡大学では次のような

測定を行っている。

周波数、光電管など機器全体の安定を考慮したウォーミングアップの後、指定の手順に従って測定に入る。700型はデジタル直読式であるが表示される距離の最終桁はよく安定した場合でも多少のバラツキがあるものである。この読み方については、これまでの実験から表示が安定した状態から1分間以内に無作為に読定を行なえばまず平均的な値が得られると考えた。表2は測定回数による値の変化を示すものである。これによると標準偏差値は1.5分、2分、3分でも1分の時と殆ど変わらないので、1分で充分なことがわかる。精密測定スイッチ(F₂)を入れると通常10~30秒で表示は安定する。この状態から時刻を正確にはかって5秒毎に読み1分後までの13回の測定を1セットとする。この場合コントロールメーターの受光量、指針位置、振れ具合(受光安定度)に注意し、信号を送らないときのバックグラウンド(雑音光)についても確認する。電圧を測る。視準位置を1セット毎やり直して正確を期す。また随時キャリブレーション(レゾルバーのリセット)をやり直し、チューニングの合せも行なう。このようにして最低5セットをとる(光路の状態によっては更に多くのセットをとる)。なお、手簿記入と同時にポケット計算器によって平均値、標準偏差を求めて測定の良否のチェックも行なう。表3は現在使用している手簿である。

表3 観測手簿

GEODIMETER 700 [観測手簿]	
昭和51年2月2日(月) 天候:晴 観測者: Hansa	
測点G(静大) 標高 77.5 m	→ 反射点R(観音山) 標高
器高 1.30	プリズム 7 素子マ
970-4.22	
測定回 1	2
TUN/CAL T/C	視通状況など
時刻 14:50	キャリブレーションをやり直した場合
F2 0 Sec 423.981	F ₂ に切替えて充分安定した時読定を開始する
5 83	
10 82	
15 81	
20 80	
25 81	
30 81	
35 83	18回読定の平均値およびその標準偏差
40 84	
45 83	
50 83	
55 83	コントロールメータを示す (指針の位置、振れぐあいなど)
60 81	
F2 平均 423.982	電源電圧
σ 1.2	殆ど必要ないが参考に記入
受光感度 6.85mm	
電圧 12.0 V	
F3 平均 422.395	気象状況は別紙に詳細に記入し、 その結果から補正値を算出する
平均気圧 748.6 mmHg	
平均気温 15.5 °C	
気象補正 + 0.099	
定数	
斜距離	必要に応じ基準面投影値も記入する
水平距離	
視準角V 90.45.57	視準位置を確認する(鉛直角及び 複数測線があるときは水平角も)
H	

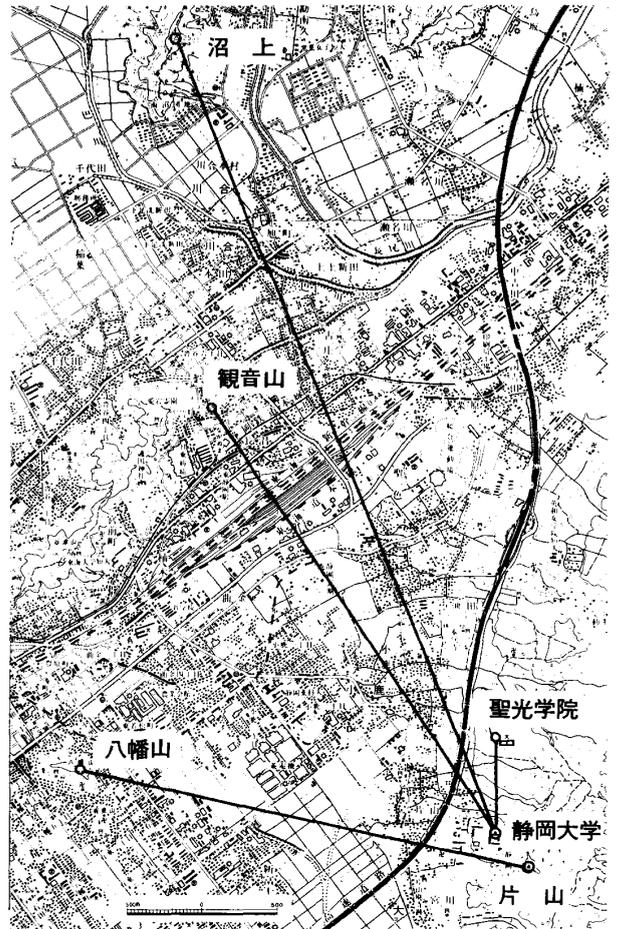


図8 静岡市内の測定基線図

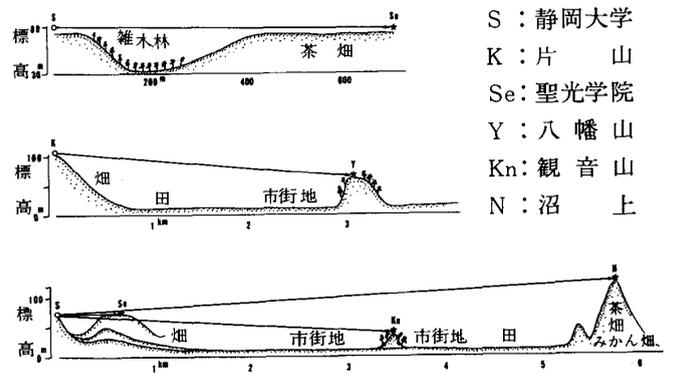


図9 静岡市内の各基線地形断面図

8. 実測上の問題点

一般に光路の気象観測は測線の両端点のみで行い、この2点のデータによって補正するので全光路の屈折を正確に補正したことになる。従来からこの補正の誤差によって測定距離は日中は長く、夜間は短く表われる、いわゆる日変化を示すと云われている。これまでの観測データの中にもそのような傾向を見出すことができる。

静岡市の有渡山西斜面にある静岡大学(標高約80 m)と市街地をはさんだ北方の丘陵地(観音山33 m, 沼上125 m等)に測線(図8, 9)を設け, この測線の連続観測(図12, 13)によればほぼ同方向で距離が異なるにもかかわらずその変化量とパターンが同じ様子を示していることは, この変化量が距離に関係していないとも考えられ, また1 km程度の近距離測定でも午前と午後の差が大きい観測例があり(図14), その他の例(図15, 16)もある。これらのことは機械自身に日変化が起らないとすれば, 前記の気温の場所による差等を補正したとしても5 kmで数mmであり, これ程の差にはならない。一方身延基線(図10, 11, 14)のように放射状の測線の場合極く短い時間に3つの測線が測定可能であり, 殆ど同時刻の測定と云える場合であっても測線によってバラツキの大きいものと小さいものもあり, これは測線中の気象条件の違いを反映しているのかも知れない。

また, かげろうは日中はほとんどと云ってよいくらい現われる。これによって反射点の像が偏位したり反射光の強さが常に変化するので光が屈折しているのは明らかである。また静岡市の測定線の特異な現象例として, 夜間から早朝にかけて東方向の清水市(工場等が多い)方面からスモッグが流れて光路を横切るが午後になると逆流して良好な視通に戻ることが多い。このような場合時によると反射光が弱まり測定不能になるが, このスモッグの濃度や高さは, もちろん一定したものではなく, その測定も困難である。

気象補正式は気温, 気圧, 湿度の項以外はその影響が微量であるため, すべて標準状態のものとしている。前記かげろうやスモッグ(CO₂, SO₂, 細じん)は定量的な測定が不可能なので補正の対象にはなり得ないが, これらが空間の密度を変え, 光波に何んらかの影響を与えることは考えられよう。しかもこれらは気温と同様光路に対し極めて局所的な変化を示すので, 一層複雑である。

レーザーを使った光波測量でも特に日中の測定は基線によってはある程度以上の精度は出せないと云える。

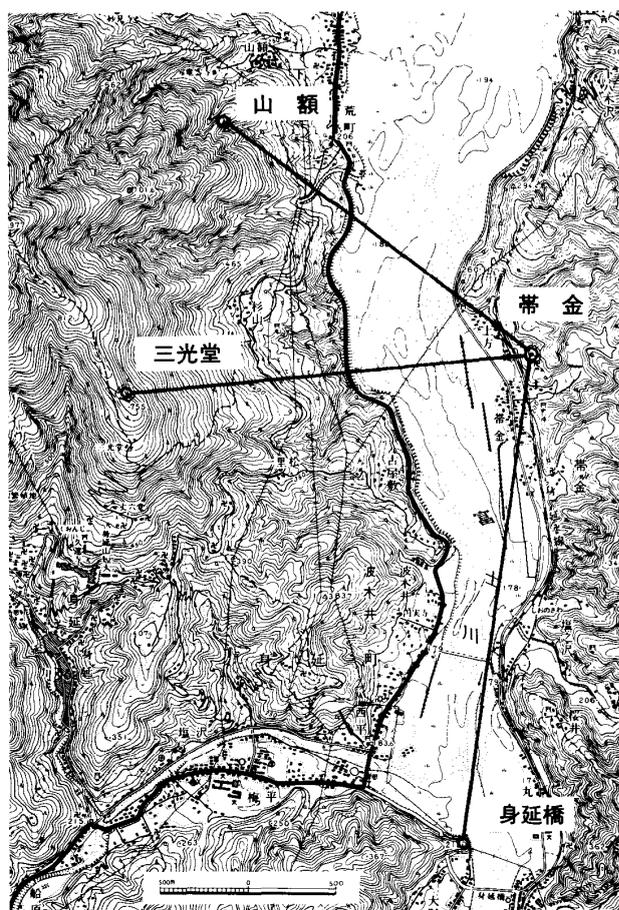


図10 身延基線図(この基線網は東大地震研究所の設置による)

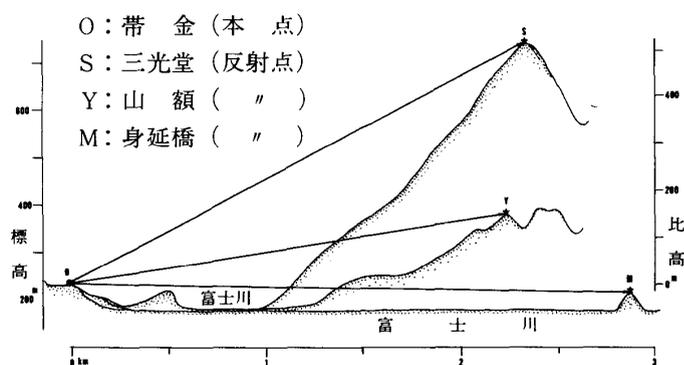


図11 身延基線地形断面図

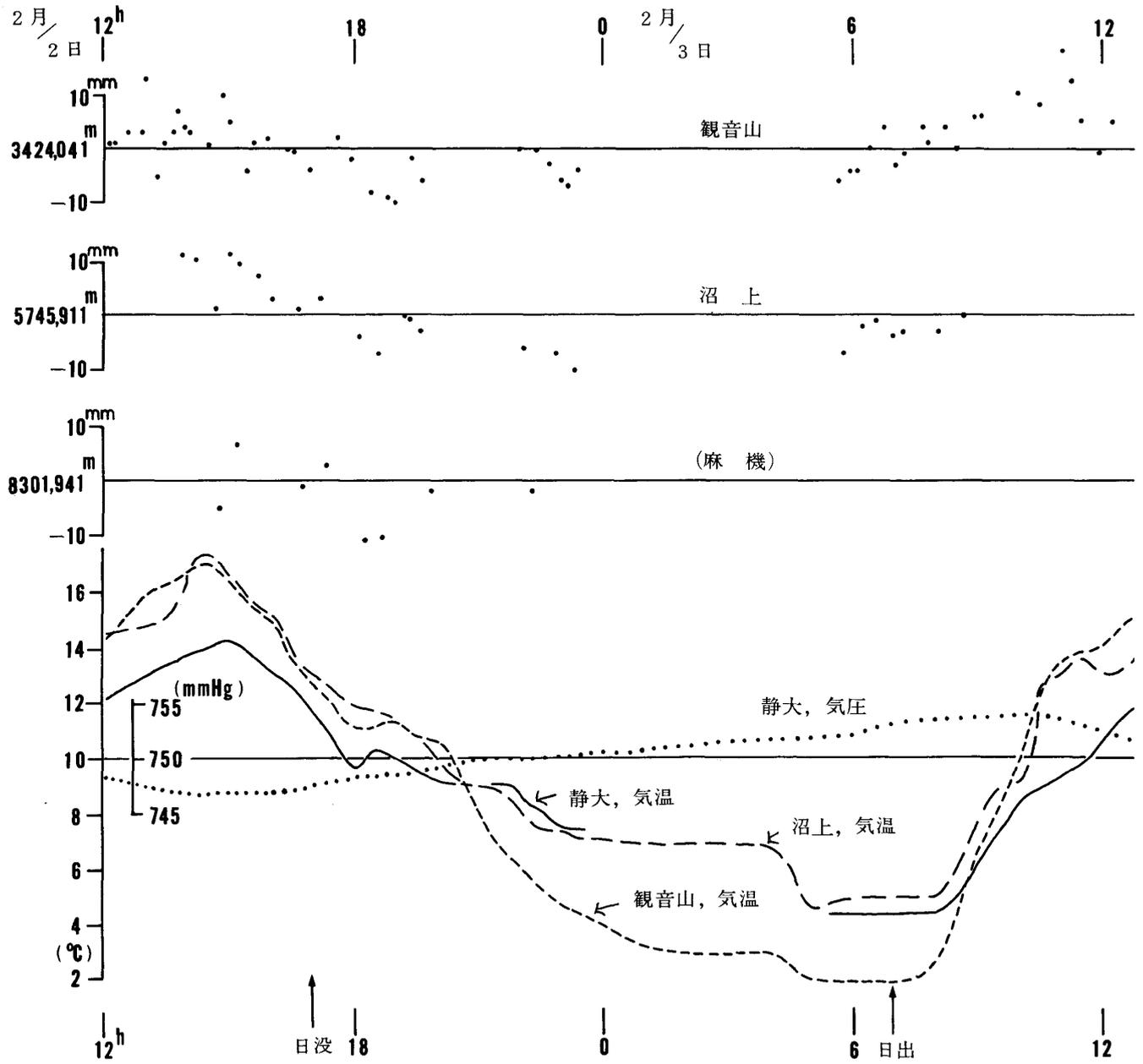
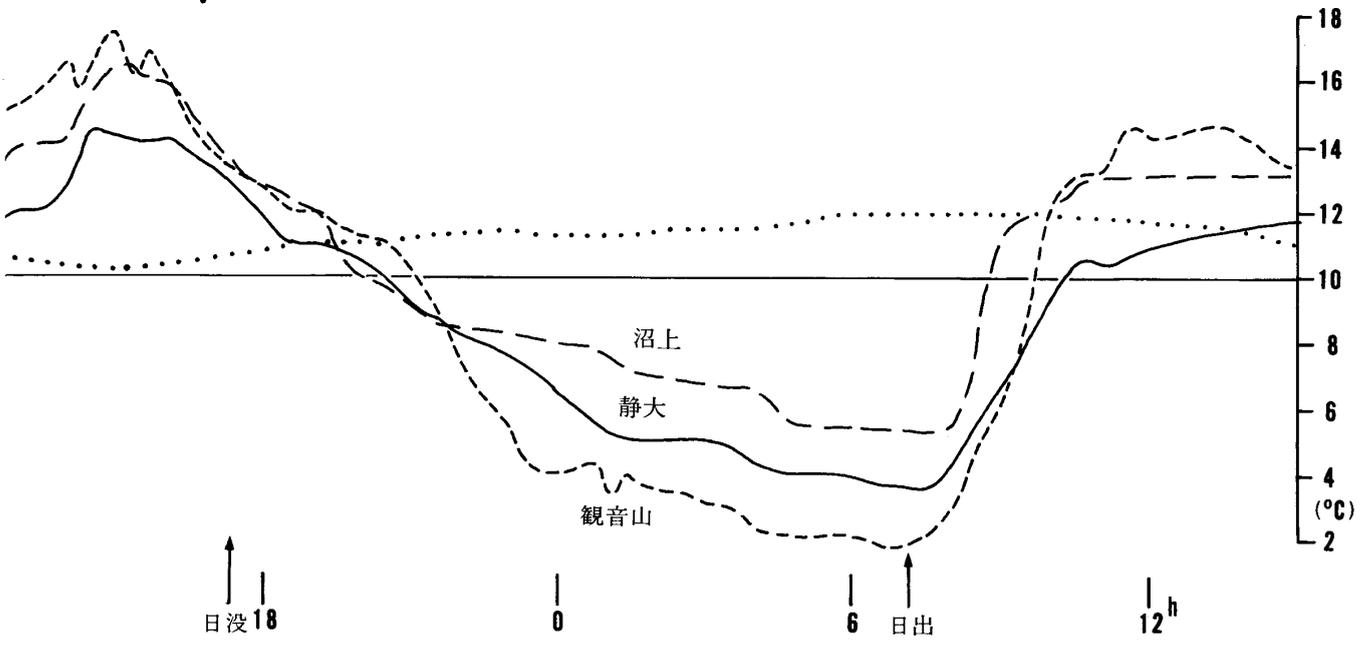
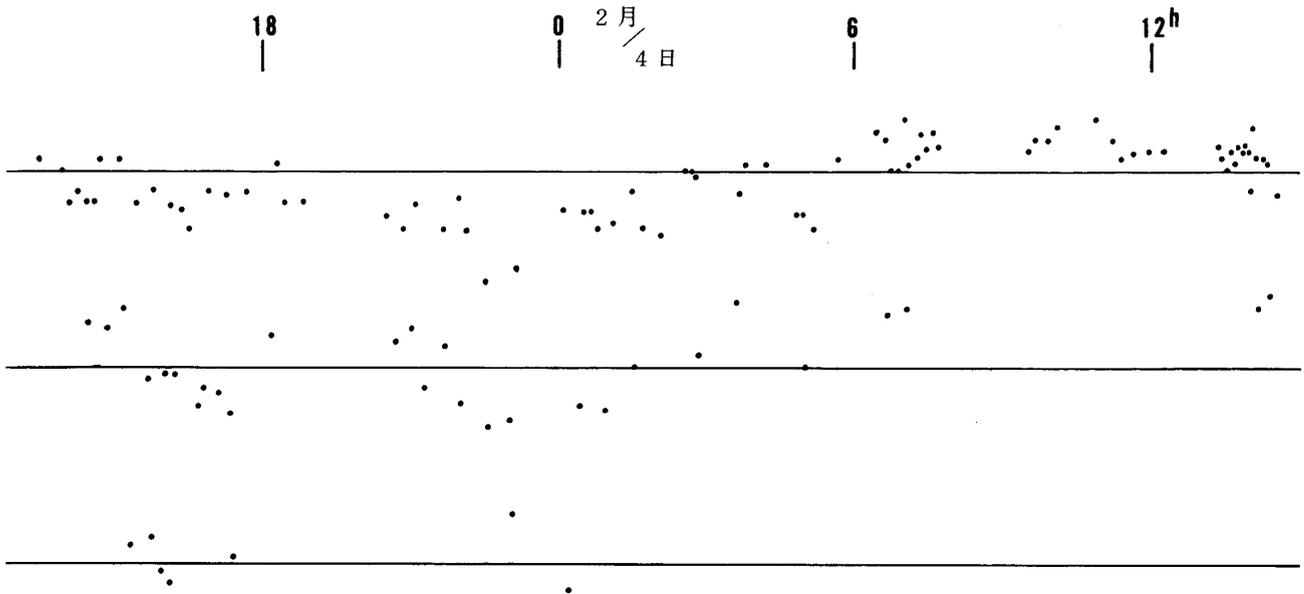


図12 静大—観音山, 沼上, 麻機測線の連続観測結果 (1976)



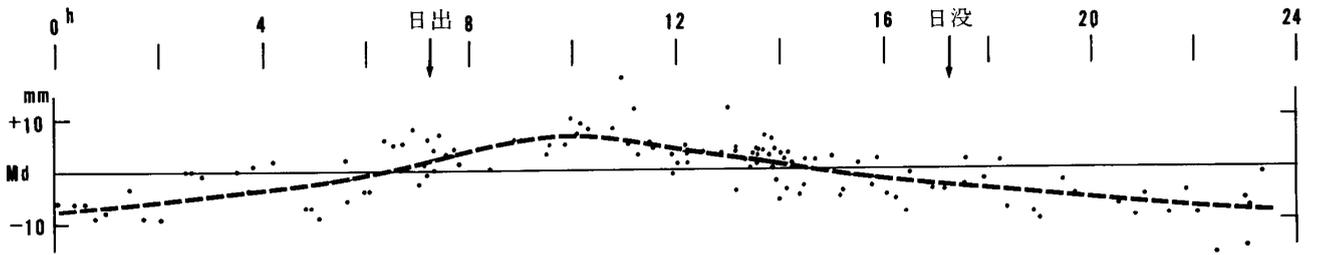


図13 静大一観音山 (斜距離 3424.041 m) 連続測定結果 1976年2月2日~4日

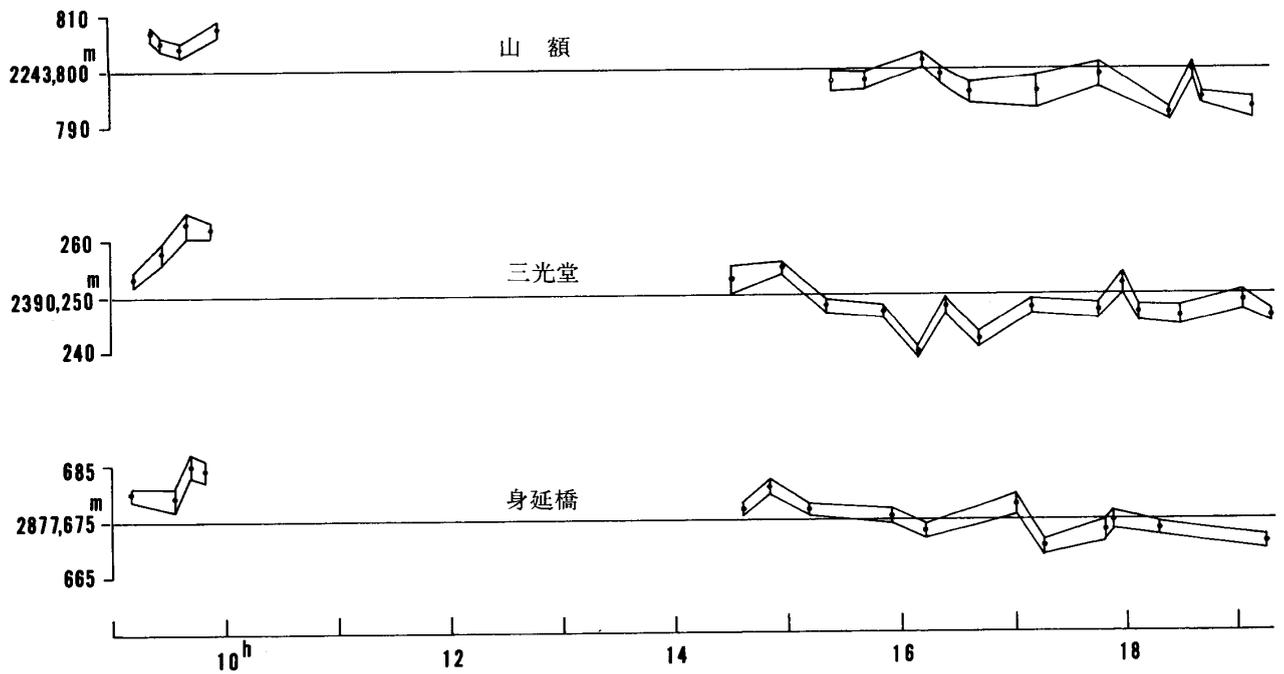


図14 身延基線測定結果 1974, 4月22 / 23日 (縦線は標準偏差を表わす)

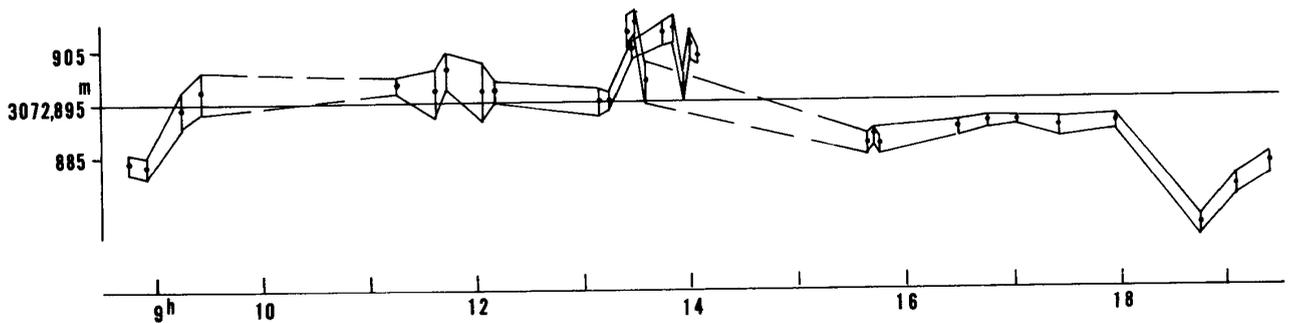


図15 片山一八幡山 (静岡市) 測定結果, 1974, 3月12 / 13日 (縦線は標準偏差を表わす)

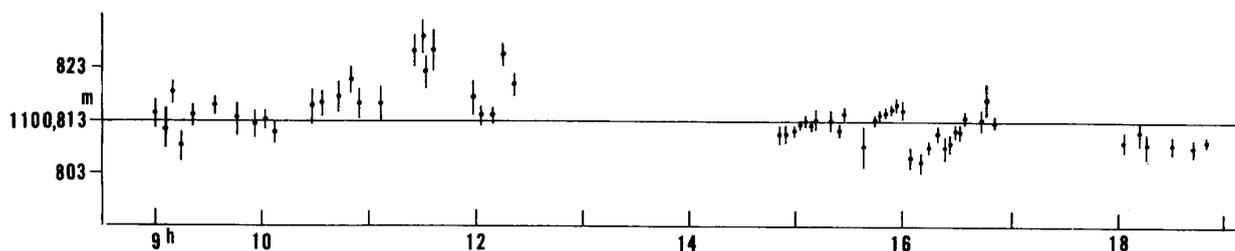


図16 村山点検基線測定結果，1974，3月28／29日（縦線は標準偏差を表わす）

機械の方にも光電子増倍管のように供給電圧や暗電流の増減によって感度に変化するなど繊細な特性をもつものもあって問題も残されている。

このようにして現在までにはっきりと説明のつかない測定値のふれがあるので、これらの誤差をできるだけ少なくするためには、測定の条件をそろえることが必要であり、例えば測定の季節を同じにすべく同じような天候の時を選び、測定時刻も大気の状態が安定している日没時を選ぶ等の配慮が必要である。

9. おわりに

光波測量においては同一機種での測定値でも機器の特性や測定の方法によってその精度が異なるので簡単な比較はできない。また同一機器であっても長い期間には特性の変化が考えられるので、これらを常に監視し、確めながら使用する必要がある。

気象補正についても、特に気温測定には問題が多い。光路の中間点に気球を上げてゾンデによる測定が実験的に行われた例があるが実用的なものではなく、また光路に沿って模型飛行機を使う方法や音波の伝播を利用するアイデア等もあるが実用化には未解決の部分が多い（田島・佐藤・須田 1970, 田中・大谷 1971）。現状ではデータの蓄積によって測定線毎の特質のようなものを考え、測器および測定法の改良を加えていく以外に方法がない。

機器の特質と光路の気象観測は同程度の重要性をもっていると考え、また実際の距離測定と機器の検定のための測定に同程度の比重を持たせると考えればジオジメーターは地殻運動の測量にも充分使えるものと思われる。

今後光波測距儀が各方面で使用されると思われ、この方法は特に地殻運動の測定に当っては最も有効な手段の一つと考えられるので、広く利用されることを期待するが、機械精度ぎりぎりの 1×10^{-6} の測量は大変むずかしい。特に地殻運動量の測定は直接地震予知等と関連しているため、充分信頼できる測定値を得る必要があり、また既存のデータとの比較に当っては機械間の補正を正確に行なわなければならない。その意味で、静岡大学では国土地理院の標準となる光波測量用検定基線での検定をできるだけ多く行なうように心掛けている。実測上の便宜からすれば数キロの基線があることが望ましく、そのために三方原基線のそばの都田一堀谷間の約 5 km の測線を国土地理院のジオジメーター 8 型（村山基線での検定済機械）で測定していただき、この基線も検定用に用いている。

長距離の直接測量が比較的簡単に行なわれるようになり、方々の機関で観測を行なうようになると、当然のことながら測定値にもバラツキが生じ、どれが最も正確な値かがわからなくなって来て、混乱することがあるかも知れない。国土地理院では既にメコメーターのようにさらに精密な測距儀の使用を試みているようであるが、そのために数キロ程度の実用的検定基線を方々に設け、各機関共それらを標準として機械を補正するにすることが必要であろう。その意味で、光波測距儀の普及に先立って各地に実用的な検定基線を設置することが望まれる。

本稿では、このような混乱を防ぐために、どのようにしたらより高い精度の測定が得られるかを考え、静岡大学におけるジオジメーター 700 型の測定基準を明らかにし、各方面の参考に供したいと思う。

文 献

- AGA Geotronics (1973); Operating Manual for Geodimeter 700 Surveying System.
- KASAHARA, K., OKADA, A., SHIBANO, M., SASAKI, K., MATSUMOTO S. and HIRAI M. (1966): Electro-Optical Measurement of Horizontal Strains Accumulating in the Swarm Earthquake Area (1) 44, 335-350, (2) 44, 1715-1733, (3) 45, 1967, 225-239, (4) 46, 1968, 651-661.
- 建設大学校 測量部 (1972, 1973) 各種光波測距儀の比較測定結果, 第1報, 測量 **22**-4, 4-9, 第2報, 測量 **23**-4, 24-32.
- 日本気象協会編 (1971) 気象観測のための常用表
- 大谷文夫・田中寅夫 (1971) 光波による地殻変動観測の精度について. 京都大・防災研究所年報 **14**-A, 15-31.
- 須田教明 (1970) 光波測距儀による距離測定における気象補正法に対する考察, 測地学会誌 **16**-3, 137-147.
- 須田教明 (1971) 電磁波測距儀, 森北出版K K.
- 田島 稔・佐藤 裕・須田教明 (1970) 光波距離測定の気象補正 (1) 係留ゾンデによる低層気象観測, 測地学会誌 **15**-4, 121-129.
- 吉田光雄 (1974) ジオジメーター 8型による距離測定結果, (上) 測量 **24**-8, 22-26, (下) 測量 **24**-9, 28-32.