

# 光波測距による大気境界層の気温連続測定と地殻変動

新妻 信明<sup>1</sup>

## Laser ranging for air temperature measurement and detection of crustal movement

Nobuaki NIITSUMA<sup>1</sup>

**Abstract** Changes in the tilt of the Udo Hill is related with large scale gravity collapse along the active Kusanagi Fault and subduction of the Philippine Sea Plate. Automatic laser ranging is carried out to monitor the activity of the Kusanagi Fault at 10 minutes intervals. Automatic adjustment of the refracted laser path is accomplished by using a step motor to make fine adjustments on the vertical axis. The refraction of laser path has been measured continuously since March 18, 1998. The atmospheric behavior during heating and cooling is analyzed from data on the refraction of the laser path and differences between the laser path temperature and surface air temperature. The diurnal cycle of the atmospheric behavior can be divided into 9 stages. The activity of the Kusanagi Fault is discussed, based on the selected data of laser ranging since 1995, concerning the atmospheric structure of temperature.

**Key words:** laser ranging, vertical gradient of air temperature, atmospheric behavior, Udo Hill, Kusanagi Fault, Philippine Sea Plate

### 緒言

山脈の隆起や平野の沈降は、測地学の対象として測量・検討・解析が行われているが、これは、地殻上部を構成する岩石や地層が褶曲や断層などの地質過程に伴って変動している様子を地表から見たものと言えよう。これらの変動、すなわち地殻の活動は人間の寿命に比べてその進行は極めて緩慢であるので、変動量が微小であり、その変動が観測されたとしてもその変動が地質過程の本質を表しているかどうかについては議論の多い所である。地震予知などにとって、地殻活動の本質的理解は不可欠であるが、地殻活動の観測は未開の分野であり、着実な進展が望まれる。過去数万年以上にわたる平均変動量が

地質学的手法によって求められている活断層や活褶曲について測地観測を行えば、観測された変動を地質過程の中に位置づけることが可能になり、地殻活動を理解するための重要な貢献が期待される。

極めて微小な地殻活動を観測するためには高精度の測量機器を使用する必要があるが、このような高精度測定においては、その測定原理に溯って詳細に検討する必要がある。1970年代の地震予知計画においてレーザーを用いた光波測距儀が日本各地の研究機関に導入された。光波測距技術はその後、改良が加えられ定常測量業務に使用されているが、現在、地殻活動観測には殆ど使用されていない。その理由としては、1) 測距儀の測量機器としての安定性が悪い(新妻・小田川, 1993)、2) レーザ

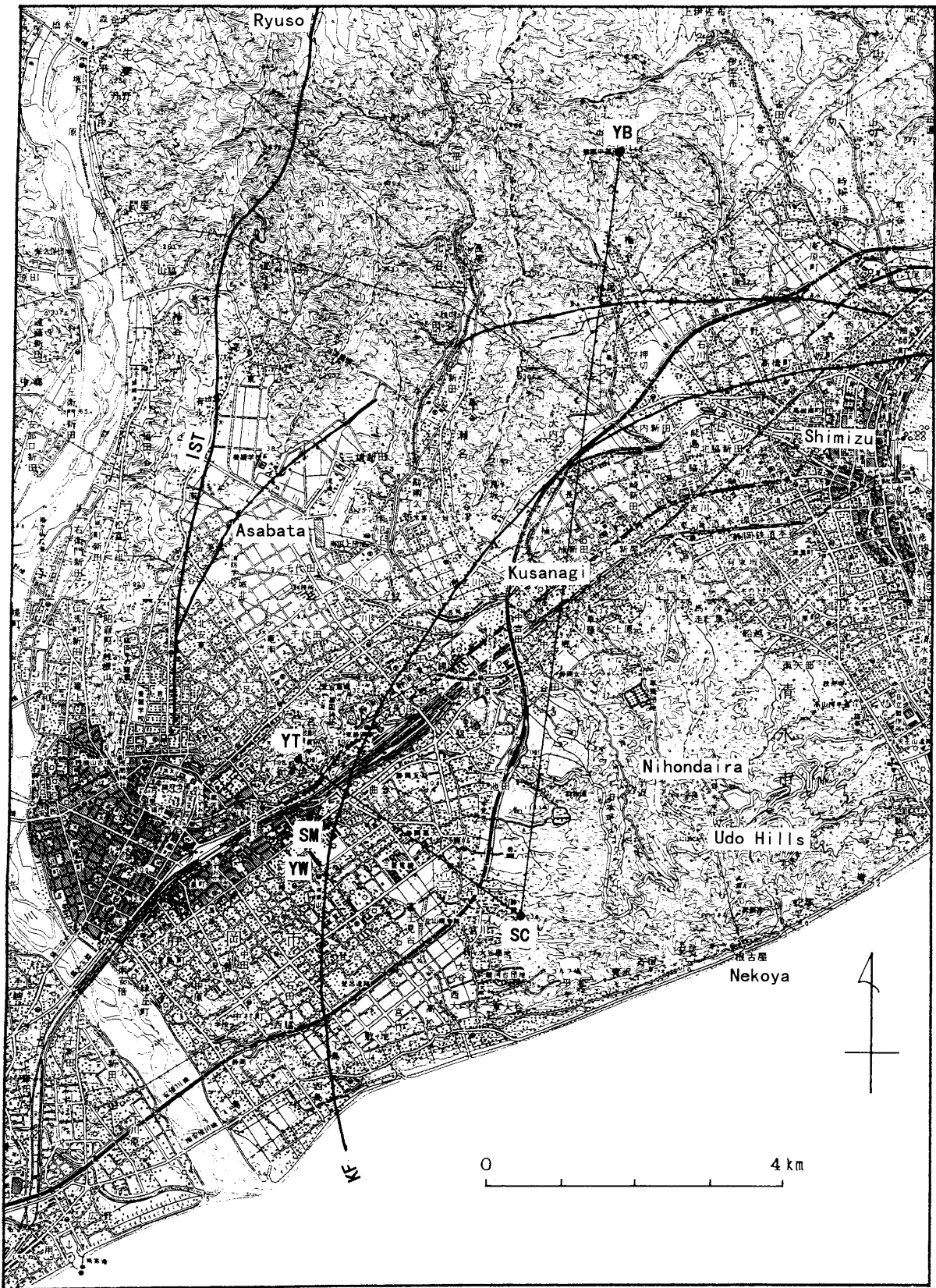


図1 光波測距光路と静岡地方気象台および草薙断層。

Laser path for ranging, Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency, and Kusanagi Fault.

YW: 八幡山 Yawatayama Hill, YT: 谷津山 Yatsuyama Hill, KF: 草薙断層 Kusanagi Fault, YB: 山原 Yambara, SM: 静岡地方気象台 Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency, SC: 静岡大学地殻活動観測所 Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, IST: 糸魚川-静岡構造線 Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line.

一光が往復する光路の光速度が気象条件、特に気温、に大きく依存するために測定される距離に大きなばらつきが生じること、などを上げることができる。

静岡大学地殻活動観測所では、改良された光波測距儀による光波測距の基礎測定を行ってきたが、光波測距儀は地殻活動観測に有効な測量機器であるとともに極めて精度の良い気象観測機器になることが明らかになった(新妻ほか, 1996)。光波測距儀を用いれば、上空大気温度構造を0.1℃の精度で連続測定可能であり、詳細な大気の状態の研究に新しい局面を開くことが期待される。特に、地表日射や放射冷却による大気の加熱や冷却過程を精密に捉えることができる。大気温度構造や変化が詳細に明らかになれば、その温度構造を用いてこれまで困難であった光波測距儀を用いた距離変動の観測も可能になる。このように、光波測距儀を用いた大気状態の観測と地殻活動の観測は車両の両輪のように相互に依存し合っており、今後の発展が期待される。

本報告では、測定の自動化、大気の状態をより詳細に明らかにするために行われた測距儀の改良、改良された測距儀によって得られた測定結果に基づいて行われた大気状態の解析、そして静岡大学の北西方に存在する活断層である草薙断層を挟んで4年にわたって継続している光波測距の結果に基づいて、草薙断層の活動について述べる。

### 現行地質過程計測の場としての静岡地域

静岡地域は、フォッサマグナの西縁を区切り、日本列島を切断する糸魚川-静岡構造線の東側に発達する平野部で、その南東部には標高307mの有度丘陵があり、静岡大学はその西端に位置している(図1)。また、平野部中央には標高100m以下の谷津山と八幡山が残丘状に存在し、その北側には麻機の低湿地、東側には草薙の低地がある。この低地部には奈良時代の条里が、その痕跡を残しており、これらの発掘調査によって、隆起および沈降の量が明らかになっている。また、条里構造の沈降が最も激しい地域は、谷津山の北側であることが知られている(矢田, 1995)。

有度丘陵、谷津山そして八幡山の地形は、いずれも南東側は急崖になっているにもかかわらず、北西側は平面が傾動したような緩い傾斜面をなし、平野に埋没する共通の特徴を有している。有度丘陵の北西向きの平坦面は日本平と呼ばれ、その上に最終間氷期の海成堆積物である草薙泥岩を載せ、その下位は後期更新世の河口域堆積物で構成されている(近藤, 1985)。有度丘陵のこの平坦面は、約10万年前の最終間氷期に海岸平野として形成されて以後、現在まで約10°傾動し、その北西部は沖積平野に埋没し、その南東端は標高300mを越していることになる。傾動後の浸食を考慮すると、400m程度の傾動による隆起があり、平均隆起速度は、赤石山地やヒマラヤ山地などと並ぶ年間4mmにも及ぶことになる。谷津山と八幡山は、有度丘陵のように最終間氷期の堆積物を載せておらず、基盤に当たる中新世の静岡層群の砂岩・泥岩互層が露出している(杉山ほか, 1982)。

有度丘陵の傾動した海岸平野と北側の山地との境界部には大規模な円弧状の滑落崖が想定される。これは、草薙断層と名付けられ、静岡大学における地震観測結果もその存在を支持している(新妻・中野, 1991; 新妻・小田川, 1993)。谷津山と八幡山の地形は有度丘陵と共通した特徴を有していることと麻機の低湿地の存在から、草薙

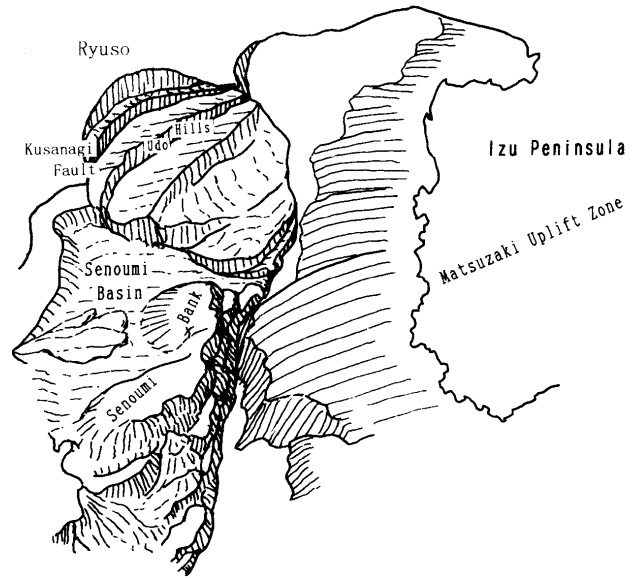


図2 草薙断層を含む崩壊と駿河トラフの海底地形。

Kusanagi Fault relating gravitational collapse and submarine topography in the Suruga Trough.

草薙断層周辺における沖積層の埋積は崩壊地形を明らかにするために除いてある。

Alluvium filling around Kusanagi fault is removed to clarify the topography of collapse.

断層と同様な性質を有する活断層が谷津山の北西部の平野部とその北西側山岳地域の境界に存在することが予測される(図1)。

草薙断層は、1993年8月7日にM=4.2の地震の震源となり、その際に有度丘陵傾動の進行が観測されている(新妻, 1995)。過去には、1841年にM=6.1/4、1935年にM=6.4、1965年にM=6.1の被害地震を起こし、活発に活動している。また、静岡西方で起こったとされる1857年、1917年の地震や1854年の安政東海地震、1944年の東南海地震の際にも活動したことが予想される。

草薙断層に沿う円弧状による有度丘陵の傾動は、赤石山地の隆起による有度丘陵地塊の重力崩壊現象の一部と考えることができる。有度丘陵地塊の滑落は、陸域に留まらず清水港や根古屋海岸もその一部を成しているが、その地形的特徴は駿河湾の北西部に及び、フィリピン海プレートの沈み込む駿河トラフに至っている(新妻, 1995)。すなわち、有度丘陵の傾動にともなう地形は海底における南東への突出部として認められ、その北側は折戸湾東方で富士川海底扇状地に、南側は安倍川・大井川が注ぐ石花海(せのうみ)海盆に続く海底谷によって境されている(図2)。この海底谷に沿った駿河トラフ軸からの「しんかい2000」第474潜航によると、この円弧滑り面と考えられる水平に近い多数の滑り面が観察されている(大塚・新妻, 1991)。海底谷の南には石花海堆が存在し、その東の駿河トラフ軸部(石花海ゴージ)では伊豆半島の松崎隆起帯が衝突を開始している(新妻ほか, 1990)。駿河トラフ東側の松崎隆起帯上には浅海成砂が下位の火山岩を不整合に被っており、駿河トラフへの沈み込みに伴って西北西に約10°傾斜している(新妻ほか, 1990; 小山ほか, 1992)。この傾斜は、有度丘陵の傾動角とほぼ等しいので、有度丘陵地塊の底面は、フィリピン海プレートの上面に乗り上げていると考えることができ

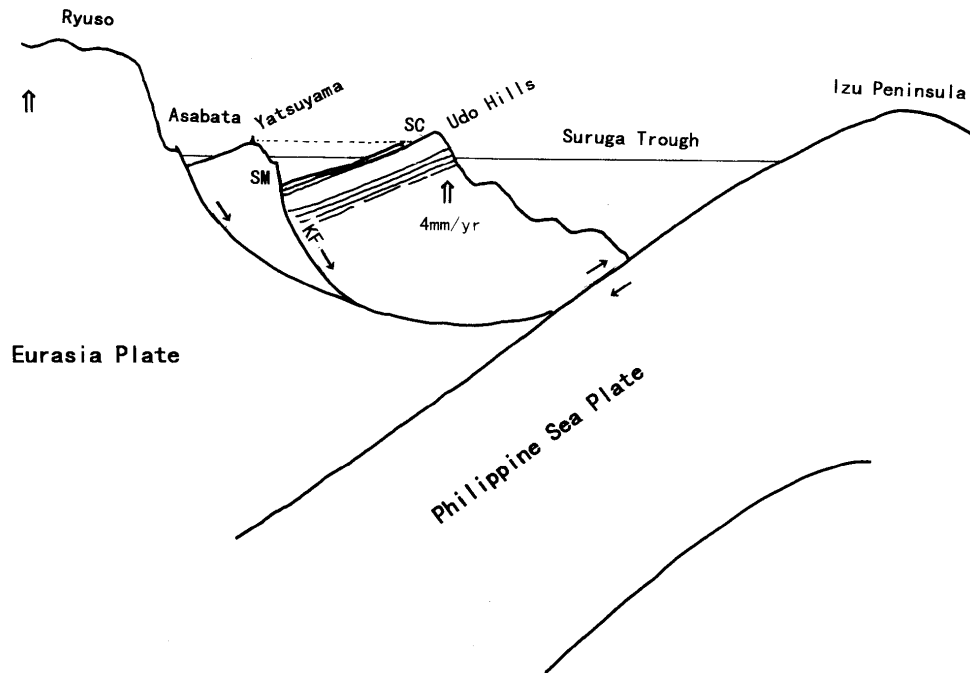


図3 草薙断層と有度丘陵の傾動とフィリピン海プレート沈み込みの関係。

Schematic cross section for tectonic setting of the Kusanagi Fault, relating to gravitational collapse of the Udo Hill Block, and subduction of the Philippine Sea Plate.

KF：草薙断層 Kusanagi Fault, SM：静岡地方気象台 Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency, SC：静岡大学地殻活動観測所 Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, 破線 broken line：静岡大学地殻活動観測所と谷津山の反射プリズムを結ぶ測線 Laser path for ranging from Crustal Activity Observatory of Shizuoka University to reflective prism on the Yatsuyama Hill.

る(図3)。この地域のフィリピン海プレート上面とは想定されている「東海地震」の震源域そのものである。

草薙断層に沿う円弧状の主要因である赤石山地の急激な隆起は、伊豆・丹沢の衝突とともに房総沖の海溝・海溝・海溝型三重会合点の進化に起因する中部日本の東西圧縮によって起こっている(Niitsuma, 1996)。伊豆の衝突そのものは、有度丘陵地塊の南側の駿河トラフ軸部で起こっており(新妻ほか, 1990)、この衝突は、円弧状の下盤の変形をもたらし、草薙断層の活動に直接関与しているはずである。

草薙断層に関係するこれらのテクトニクスを考慮すると、草薙断層に沿う円弧状は、過去10万年間にわたり進行しており、草薙断層を監視することによってフィリピン海プレートの沈み込み・衝突状態、赤石山地の隆起を支配している中部日本の東西圧縮状態を監視することができる。

### レーザー測距観測

有度丘陵の南西部に位置する静岡大学地殻活動観測所では、草薙断層の監視を目的として谷津山との距離変動の実測を光波測距儀を用いて試みている(付表1)。

地殻活動観測所に光波測距儀、滑落崖側に反射プリズムを固定して10分毎の自動観測を実施している。現在、反射プリズムは、谷津山の東海大学宣伝塔と山原のNTTマイクロウェブ中継塔に設置してあるが(新妻ほか, 1996; 図1)、連続観測は谷津山との間で行っている。

1995年および1996年の4-6月には24時間連続手動測定を実施し、測距儀の測定精度や安定性が検討された(新妻

ほか, 1996)。1996年1月から計算機による自動測定を開始したが、1996年4月に光波測距儀内の鏡駆動部に故障が発生し、修理のために測定は中断された。修理の際にレーザー受光強度調整を計算機でも制御可能にするために、光波測距儀に端子を取り付け、1996年8月には自動測定・制御のプログラムを完成させ自動化に成功した。しかし、1996年8月17日に光波測距儀内の鏡駆動部に再び故障が発生し、鏡駆動部の改造・修理を行い、1996年9月12日から10分毎の定常連続測定が可能になった。

この自動測定では、10分毎に10回の測距を行い、平均距離とその68%信頼限界、1気圧・湿度70%とした場合の光路気温と68%信頼限界、地球潮汐、清水港の潮位を算出し、フロッピーディスクに保存している。10分毎の測定には、数分を要している。原則として1日1回、測距儀の点検と保存された測定値を他の計算機のハードディスクに複写している。観測所と谷津山間の光路の下に在る静岡地方気象台(図1)で測定された1時間毎の気圧・水蒸気圧値から直線補間によって測定時の気圧・水蒸気圧を求め、測定された距離から光路気温を算出するとともに、気象台気温との気温差を算出した。これらの計算は全て表計算によって行った。算出に用いた式は、 $T_c$ を算出気温(°C)、 $P$ を気圧(mmHg)、 $E$ を水蒸気圧(mmHg)、 $D$ を真の距離、 $D_s$ を測定距離とし、

$$T_c = \frac{106.339 \times P - 15.026 \times E}{310.0 + \frac{D_s - D}{D_s} \times 10^6} - 273.15$$

である(新妻ほか, 1996)。谷津山と静岡大学地殻変動観測所間の距離は、3708mであり、光路気温1°C当たりの見

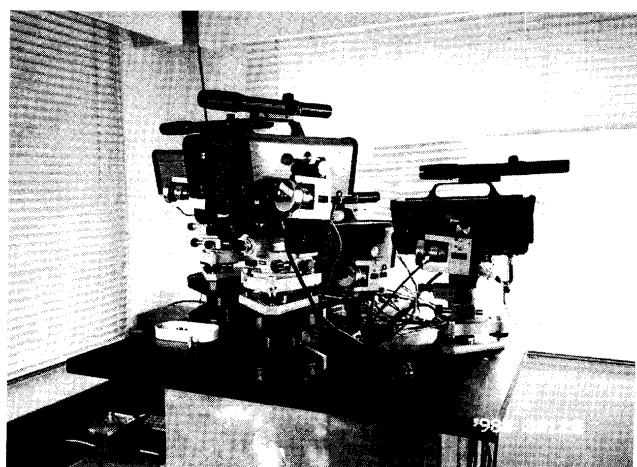


図4 ステップモーターを付した4台の光波測距儀。測距儀の垂直位置微動部にステップモーターがつけられている。

Four laser ranging machines (Auto-Ranger JX) with step motor to control the vertical positioning at the Crustal Activity Observatory of Shizuoka University.

かけの距離変動量は、4mmである。測定される距離の読み取り最終桁はmmであり、光路気温変化0.2℃に相当する。光路気温をこの精度で測定することは不可能であるので、距離を一定と仮定して光路気温を算出し、光路下の静岡地方気象台で測定されている気温と比較する方法を採用している（新妻ほか、1996）。

地表気温基準として用いている静岡地方気象台の気温は、標高14mの地表で測定されており、レーザー測距光路よりも約90m低い。この標高差が日射による影響の差をもたらすと考えられるが、測距儀を設置した地殻変動観測所で測定された気温は、気象台気温と±2℃の範囲で一致しており、陽炎の激しい時でも±1℃の範囲で一致している。標高が90mも異なる地点において地表気温がこのように一致することは、標高にかかわらず日射によって地表気温が同じように上昇し、夜間は冷却することを示している（新妻ほか、1996）。

この自動連続測定において、レーザー強度調整部や計算機制御スイッチがうまく作動せず、測定に時間がかかり測定間隔が広がるのが時々起こっている。また、測距儀を最大受光方位に固定後、季節の移り変わりによって気温が大幅に変化すると、受光量最大方位が変化し、受光量が測距可能範囲以下となり、欠測の時間帯が増加するので、季節の変わり目には手動で固定位置を調整する必要があった。

1998年3月18日からは測距儀の改良を行い、受光量の自動調整および垂直方向の自動設定を実施している。また、1998年からは合計4台の光波測距儀によって草薙断層の監視を計画している（図4）。

#### レーザー測距儀の改良

光波測距儀オートレンジャーJXを用いて光波測距を行う手順としては、1) 受光量調節モードにして、受光量が最大になるように測距儀の方向を合わせ、受光量調節実行スイッチを押し、レベル計に表示される受光量を測距可能範囲に収める、2) 距離測定モードにして距離測定開始スイッチを押し測距を行う。測距値は測距儀の7桁の表示部にデジタルで表示されるとともに、RS232Cに

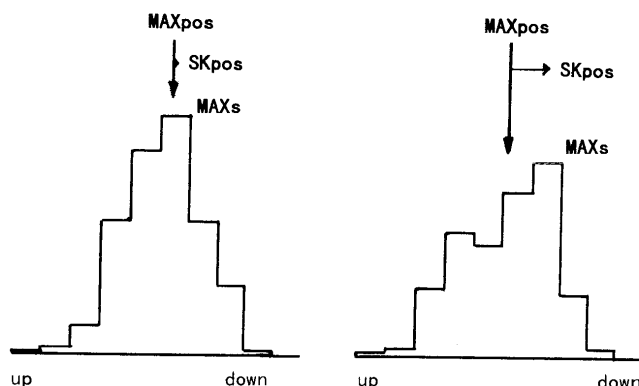


図5 垂直位置変化に伴うレーザー受光量の変化。

Changes in laser intensity with the steps of vertical directional adjustment.

MAXpos: 中央受光位置 median direction.  
SKpos: 歪度 skewness of laser intensity distribution  
MAXs: 最大受光量 maximum intensity

よって計算機に取込むことも可能である。

この測距儀には、距離測定モードと受光量調節モードを切り換えるスイッチと距離測定開始および受光量調節実行のためのスイッチが在り、手動操作するように設計されている。計算機を用いて自動測定を行うためには測距儀内部の回路から電線を引き出す必要がある。距離測定/受光量調節のモード切り換え用の回路と測定開始・受光量調節実行のための回路を外部から操作できるように1996年4月に改造した。

結線された2つの回路を操作するために、GPIBリレーボードを用い、計算機制御するためのプログラムを作成し、1996年8月から自動測定を開始した。この自動測定において、モード切り換えのスイッチがノイズのために切り換わり、計算機によって距離測定操作を行っているにもかかわらず、測距儀は受光量調節モードとなり、測定が行われない事態が発生することがあった。また、受光量調節は受光量調節実行スイッチを入れると測距儀が自動的に行うことになっているが、1回のスイッチ操作だけでは測距可能範囲に収まらないことが多いので、計算機制御においては3回繰り返すことにした。しかし、大気が澄んでいて受光量が大きい場合には自動調整しきれず、測距可能範囲内に調整できない場合が生じた。

これらの不都合を改善するために、1997年11月にモード切り換え状態を監視するための結線と受光量レベル計の出力を取り出す結線を行った。これらの出力はデジタル・マルチメータで測定し、GPIBによって計算機に取込めるようにした。これらの改造によって、モード切り換えを常に監視し、受光量を測定可能範囲に入るまで調整することが可能になった。

手動測定においては、測距儀の方位を受光量最大の位置に合わせた後に受光量調整して、測距を行うが、計算機による自動測定においては、測距儀を最大受光方位に固定して長期間の自動測定を行っていた。方位固定後、季節の移り変わりによって気温が大幅に変化すると、受光量最大方位が変化し、受光量が測距可能範囲以下となり、欠測の時間帯が増加するので、季節の変わり目には手動で固定位置を調整しなければならなかった。気温変化にともなう最大受光方位は、水平方向については殆ど

