

光波側距による大気境界層の気温連続測定と地殻変動

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: 新妻, 信明 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000356

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¹

Laser ranging for air temperature measurement and detection of crustal movement

Nobuaki NIITSUMA¹

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

¹静岡大学理学部地球科学教室。422-8529 静岡市大谷836。
¹Inst. Geosci., Shizuoka Univ. 836 Oya, Shizuoka 422-8529, Japan
E-mail: senniit@sci.shizuoka.ac.jp

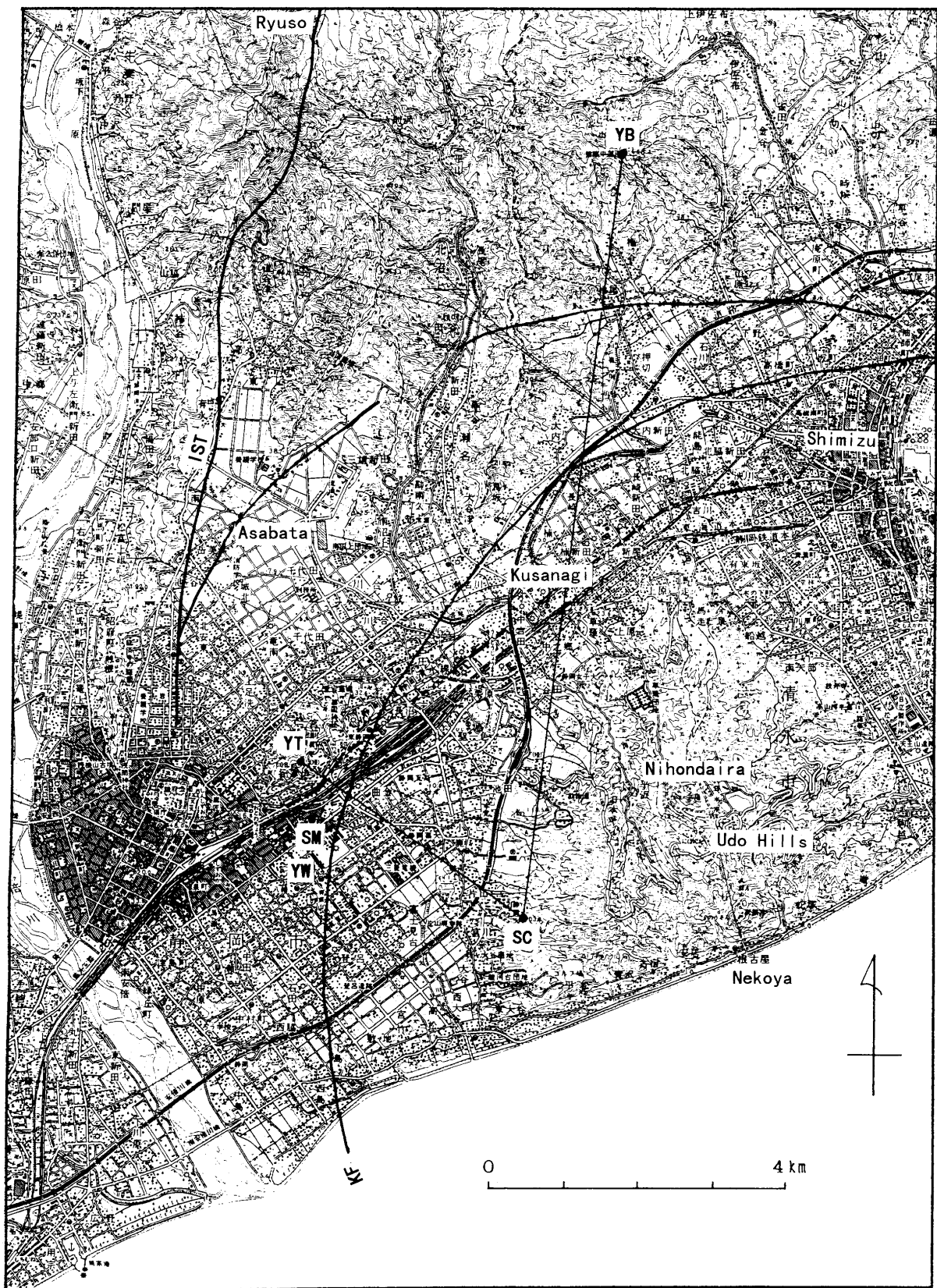


図1 光波測距光路と静岡地方気象台および草薙断層。

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、上空大気の温度構造を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。大気の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

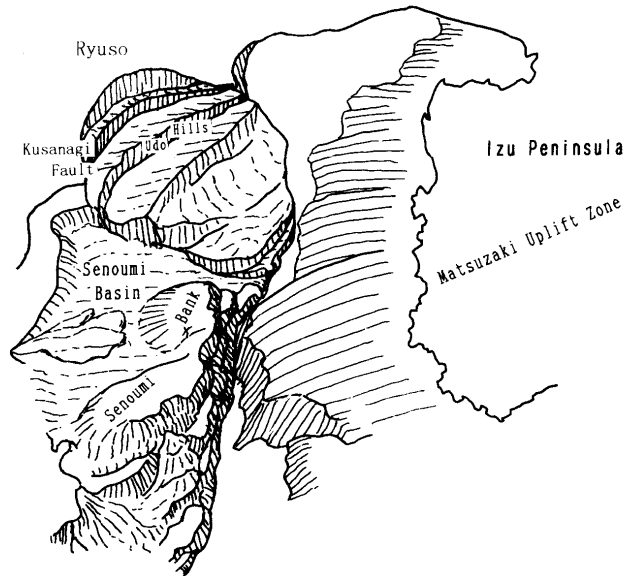


図2 草薙断層を含む崩壊と駿河トラフの海底地形。

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の下底扇状地に、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

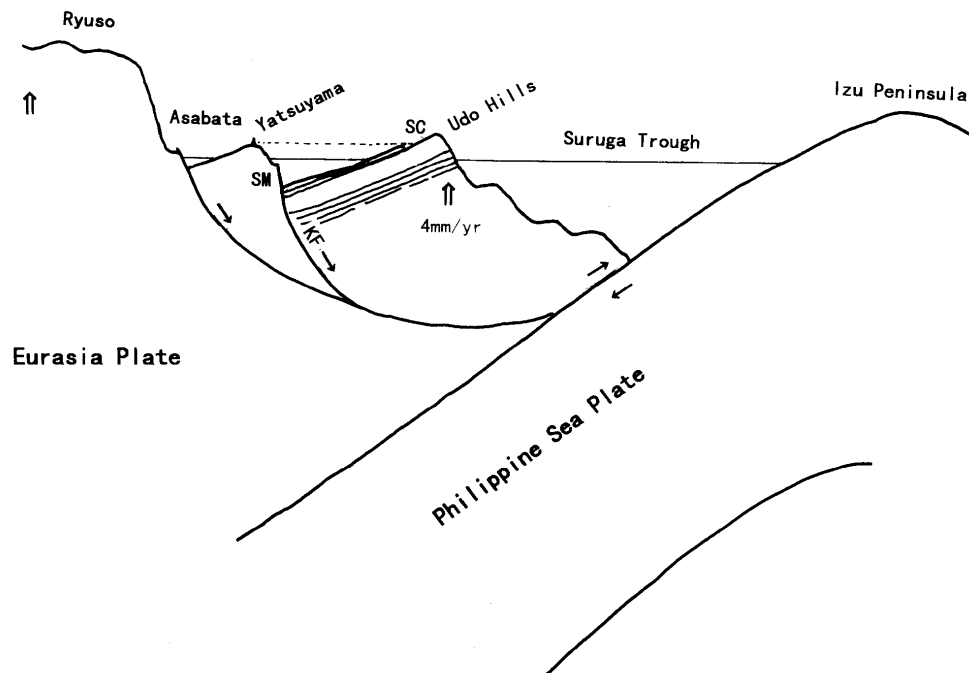


図3 草薙断層と有度丘陵の傾動とフィリピン海プレート沈み込みの関係。

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マイクロウェー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、

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

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

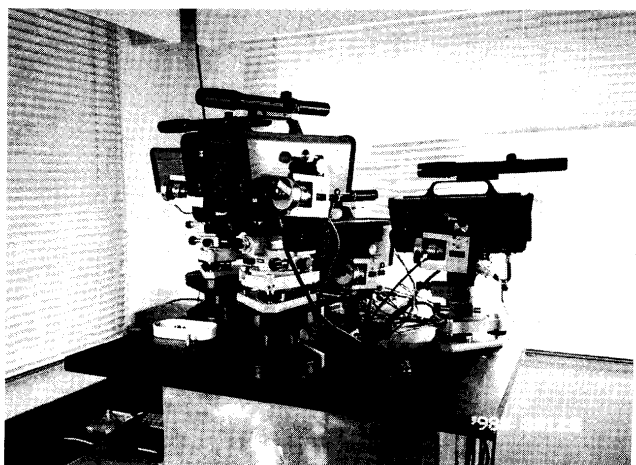


図4 ステップモーターを付した4台の光波測距儀。測距儀の垂直位置微動部にステップモーターがつけられている。

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な一致することは、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くなること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

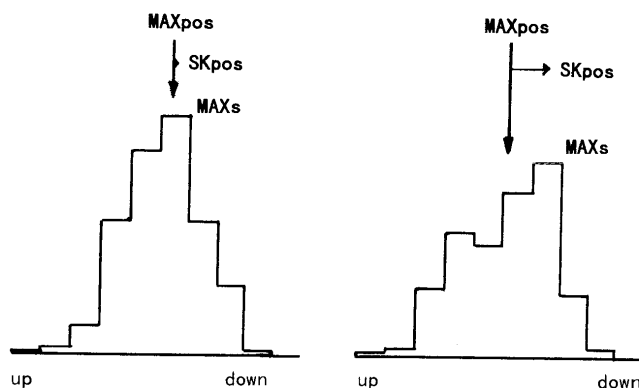


図5 垂直位置変化に伴うレーザー受光量の変化。

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

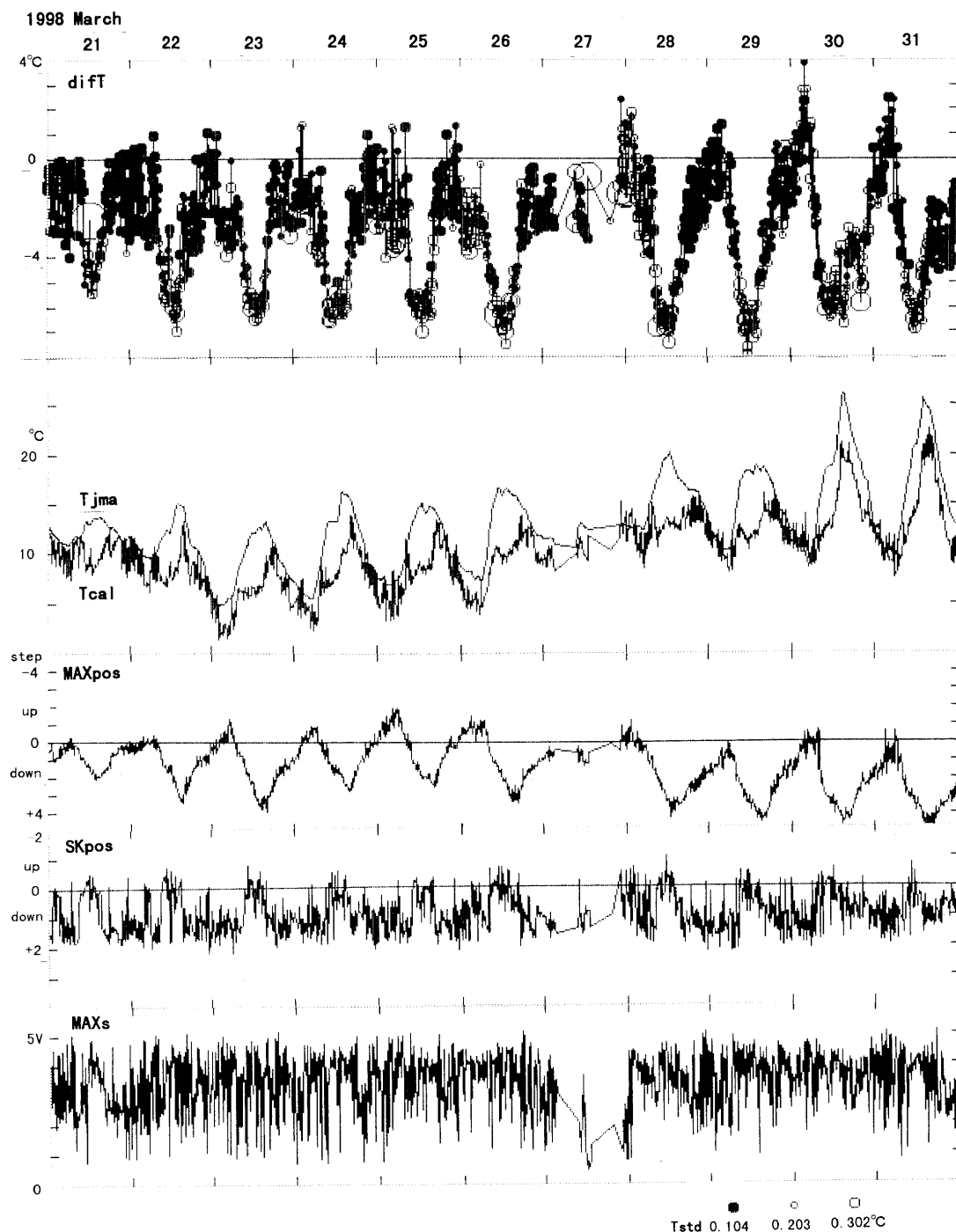


図6 1998年3月21日から31日の11日間の測定結果。

Observations in 21-31 March, 1998.

diffT : 気温差 air temperature difference (Tcal - Tjma)

Tjma : 静岡地方気象台における気温 air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency

Tcal : 光波測距値から算出された光路気温 calculated air temperature of laser path from laser ranging

MAXpos : 中央受光位置 median direction of ranger

SKpos : 歪度 skewness of laser intensity distribution

MAXs : 最大受光量 maximum intensity

diffTのグラフ中の測定値に対応する丸は、表示されている測定点に対応する光路気温の68%信頼限界Tstdの平均値 (= 0.203°C: 中央の白丸), 平均値に1 σ (= 0.099°C)を加算した値 (= 0.302°C: 右白丸), 平均値から1 σ 減じた値 (= 0.104°C: 左黒丸)に対応しており, 平均値から差が大きくなるに従って丸の大きさは大きくなる。

Points on the graph of diffT represent 68% confidence limit of calculated air temperature of laser path (central open circle: mean value of Tstd (= 0.203°C), right open circle: deviations 1 σ (= 0.099°C) of Tstd for plotted points larger than the mean of Tstd (= 0.302°C), left closed circle: deviations 1 σ of Tstd smaller than the mean of Tstd (= 0.104°C). The size of circle increases with the deviation).

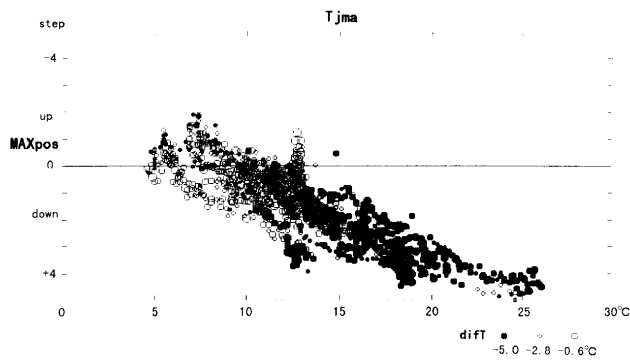


図7 1998年3月21日から31日の11日間の気象台気温Tjmaと中央受光位置MAXposの関係。

Relation between the temperature measured at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency (Tjma) and median vertical direction of ranger (MAXpos) for 11 days of 21-31 March, 1998.

測定値に対応する丸は、表示されている測定点に対応する光路気温と気象台気温の気温差diffTの平均値 (= -2.8°C: 中央の白丸)、平均値に1σ (= 2.2°C)を加算した値 (= -0.6°C: 右白丸)、平均値から1σ減じた値 (= -5.0°C: 左黒丸)に対応しており、平均値から差が大きくなるに従って丸の大きさは大きくなる。

Circles represent air temperature difference between laser path and Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency (central open circle: mean value of diffT (= -2.8°C), right open circle: deviations 1σ (= 2.2°C) of diffT for plotted points larger than the mean of diffT (= -0.6°C), left closed circle: deviations 1σ of diffT smaller than the mean of diffT (= -5.0°C). The size of circle increases with the deviation).

変化せず、垂直方向のみが変化する。そこで垂直位置調整部にステップモーターを付けて GPIB リレーボードによって計算機自動制御できるように改造を加えた (図4)。

1998年3月に計算機プログラムを完成させて自動測定を開始した。この新プログラムにおいては、垂直位置をステップモーターによって変化させながら受光量の変化を測定することができるので、この受光量から中央受光位置 MAXpos を算出するとともに、最大受光位置との差 SKpos も算出している (図5)。ステップモーターは1周200ステップであり、1ステップの垂直位置変化角は、8"に当たる。また、測定の際には、測距儀の垂直位置を最大受光位置に合わせている。これらの改造・改良によって、

- 1) 通常測定に要する実質時間が従来の数分が1分半程度に短縮された。途中で光量調節が外れたり、測定モードが調節モードになってしまったりして、測定に長時間を要する異常測定が無くなった。
 - 2) 光路屈折による照準外れが無くなり、欠測は降雨や霧などの遮光時のみとなった。
 - 3) 垂直追尾経路が記録されるので、大気構造のより詳細な検討が可能になった。
- などの改善がなされた。

垂直位置は気温の日変化によって約1'変動しているが、この垂直位置変動に伴って光路長も変化する。ただし、3.7kmの光路が1'屈曲することによって伸びる距離は0.15mmであり、気温に換算しても0.03°Cと非常に小さく無視することができる。

光路の屈曲と気温変化

改造を加えた光波測距儀によって1998年3月21日から31日の11日間に静岡大学地殻活動観測所と谷津山間での観測結果 (図6) をもとに大気構造と気温の変化を解析する。この期間における気象台の気温は4°Cから26°Cと極めて広い温度範囲を持つ。中央受光位置 MAXpos は、最初に設定した位置を0としているので、相対的な値である。また、算出光路気温 Tcal も距離が3708.568mで一定していると仮定して求めたものである。

中央受光位置 MAXpos と気象台気温 Tjma は逆相関しており、測距儀は高温ほど下向きで、低温ほど上向きである (図7)。日中は日射のために地表が加熱され上空よりも地表付近が高温になるために光速度が大きくなり、光路がより光速度の大きな地表側を通過し、夜間には地表が冷却され低温になり光速度が小さくなるためにより光速度の大きな上空側を通過することが予測される。光波測距値から算出した光路の気温と地表気温との差 diffT は、光路から地表までの気温勾配を積分した値であるが、中央受光位置 MAXpos と気温差 diffT の関係 (図8) においては、地表気温と比較して光路が高温な正の気温差 diffT の場合には中央受光位置 MAXpos は上向き、光路気温が低い負の気温差では下向きであり、光は光速度の大きい高温側に屈曲していることが確認できる。

使用しているレーザー波長における光速度の気温依存は1.3ppm/°Cであり、気圧依存は-0.37ppm/hPaである。気象台から光路までの高度差は93mであり、気圧差は-11hPaとなり、気温差が-3.1°Cであれば、気温と気圧の効果は相殺されて光速度の勾配は無くなることになる。地表よりも100m上空の気温が3°C程度低いことは、大気の状態として一般的であるので、1日の気温変動において光速度勾配が消失し、レーザー光が直進する状態が起こっているはずである。

気温勾配が一定である場合には光路は円弧を描くが、円弧の曲率半径 r と光速度勾配 dv/dh の間には、

$$\frac{dv}{dh} \doteq \frac{1}{r}$$

の関係が存在し (須田, 1976)、光速度勾配が15.7ppm/100mの場合には曲率半径が地球半径と等しくなる。谷津山-観測所間の距離は3.7kmであり、地球中心からみた角度は丁度2'になる。従って、光路の曲率半径が地球の半径と等しい場合には1'の角を有することになる。また、今回観測された中央受光位置の変動範囲は7-8ステップであり、角度にして1'であることから、光速度勾配が15ppm程度変動していることになる。昼夜の気温変動で地表と光路の気温が等しくなる時間帯も生じるが、この場合には気圧差のみが支配し、4ppm/100mの光速度勾配が予想される。この光速度勾配の場合には、光路は上に凸の円弧を描き、上向きの角度は14.2'になる。

光路における気温勾配と光路と地表間の気温勾配が等しい場合には、気圧勾配と気温勾配が相殺する気温差-3.1°Cで直進光路、気温差が無く気圧勾配によって光路が14.2'上方を向く点、気温差が+5°Cで光路が25.6'上方を向く点、および気温差が-8°Cで光路が41.0'下方を向く点を通る線上に測定点は、位置するはずである。3月21日から31日までの測定値はこの中央受光位置と気温差の関係の線を中心に分布していることは (図8)、大気は大局的に等気温勾配を有していることを示している。この等気温勾配線に近い領域を等気温勾配領域と呼ぶことにする。

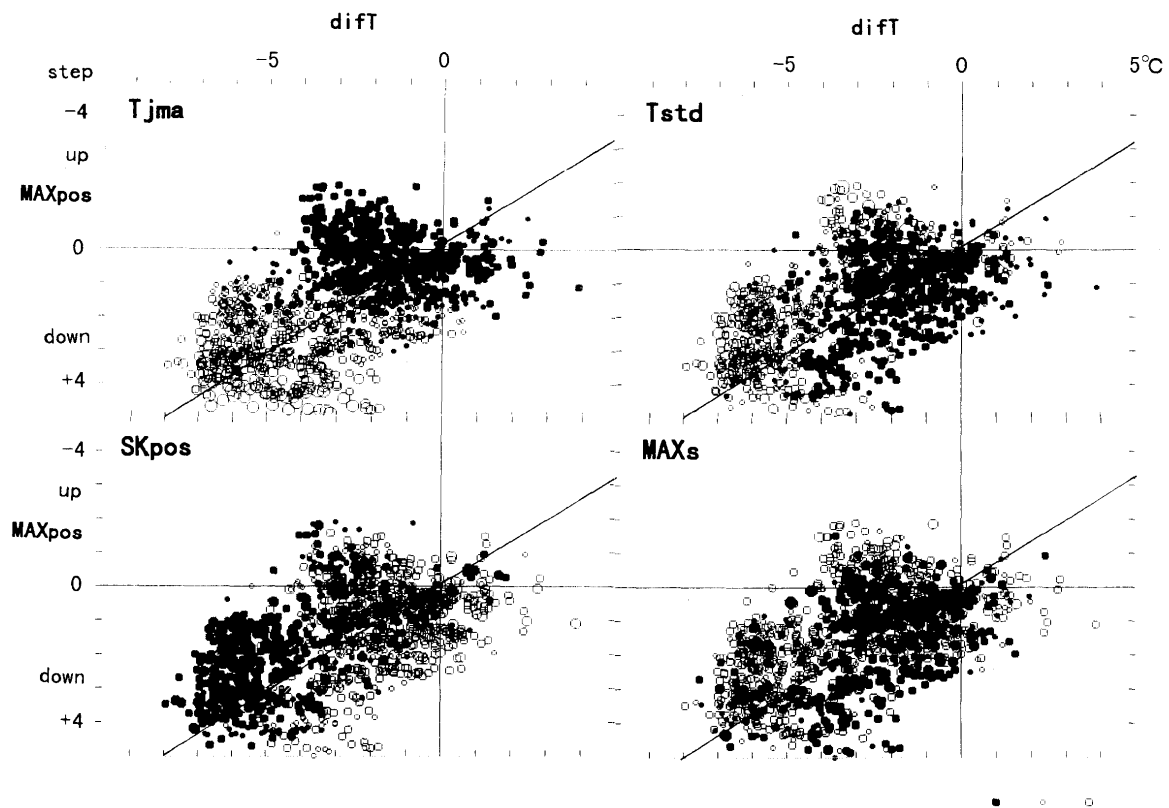


図8 1998年3月21日から31日の気温差difT-中央受光位置MAXpos関係。

Relation between air temperature difference (difT) and median direction of ranger (MAXpos).

グラフ中の直線は光路の気温勾配が地表と光路の間の気温勾配と等しい等気温勾配関係を表す。測定値に対応する丸は、表示されている測定点に対応するTjma, Tstd, SKpos, MAXsの値の平均値（中央の白丸）、平均値から1 σ を加算した値（右白丸）、平均値から1 σ 減じた値（左黒丸）に対応しており、平均値から差が大きくなるに従って丸の大きさは大きくなる。

Line represents a relation in which air temperature gradient in the laser path is equal to the air temperature difference difT. Circles represent deviation from mean value (central open circle: mean value, right open circle: deviations 1 σ for plotted points larger than the mean, left closed circle: deviations 1 σ smaller than the mean. The size of circle increases with the deviation).

Tjma: 気象台気温 (mean = 13.0°C, 1 σ = 4.18°C) air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency

Tstd: 算出気温の68%信頼限界 (mean = 0.203°C, 1 σ = 0.099°C) 68% confidence limit of calculated air temperature of laser path

SKpos: 歪度 (mean = -0.891 step, 1 σ = 0.647 step) skewness of laser intensity distribution

MAXs: 最大受光量 (mean = 3.39V, 1 σ = 0.952V) maximum intensity

中央受光位置MAXposと気温差difTのグラフにおいて、等気温勾配領域よりも測定点が左上に位置し、気温差が負の場合には光路における気温勾配よりも平均気温勾配が大きく、地表付近の気温勾配が光路の気温勾配よりも大きいことを意味している。等気温勾配線よりも測定点が右下で、気温差が負の場合には、光路における気温勾配よりも平均気温勾配が小さく、地表付近の気温勾配が小さいことを意味している。

中央受光位置変動にともなうレーザー受光量変化から求められた中央受光位置と最大受光位置との差 SKpos (図8) は、平均で+0.89ステップと有意に異なっており、気温の層状構造によってレーザー像が歪められていることを示唆している。また、SKposは光路気温の68%信頼限界Tstdと逆相関し、昼間に気温差が-4°Cよりも拡大して68%信頼限界が拡大する領域ではSKposは減少し、光量分布が正規分布に近づいている。この逆相関は、大気不安定のために気温の層状構造が乱されて、レーザー像が等方的散乱を受けた結果と考えられる。

一般にSKposとTstd (図8) が逆相関しているが、等気温勾配領域で気温差が-4°Cで中央受光位置が下に1ステップを結ぶ線上の測定値ならびに、中央受光位置が0ステップで気温差が-2°Cおよび-4ステップと-4°Cを結ぶ線上の測定値は、光路気温の標準偏差 Tstd が小さいにもかかわらずSKposが小さく、受光量が正規分布に近づいている。これは、この領域において光速度勾配が消失するためと予測される。

光波測距によって明らかになった大気の日周変動

3月21日から31日の11日間の中央受光位置 MAXpos と気温差 difT には正相関があり、大気の日周変動に関係していることが予測されたが、大気日周変化の詳細を検討するために3月28日の例をとって検討することにする。測定時間に沿って中央受光位置MAXposと気温差difTの変動を見ると、ある領域から次の領域に移動し、その領域内で規則的にその位置を変化させたり、殆ど変化せず留ま

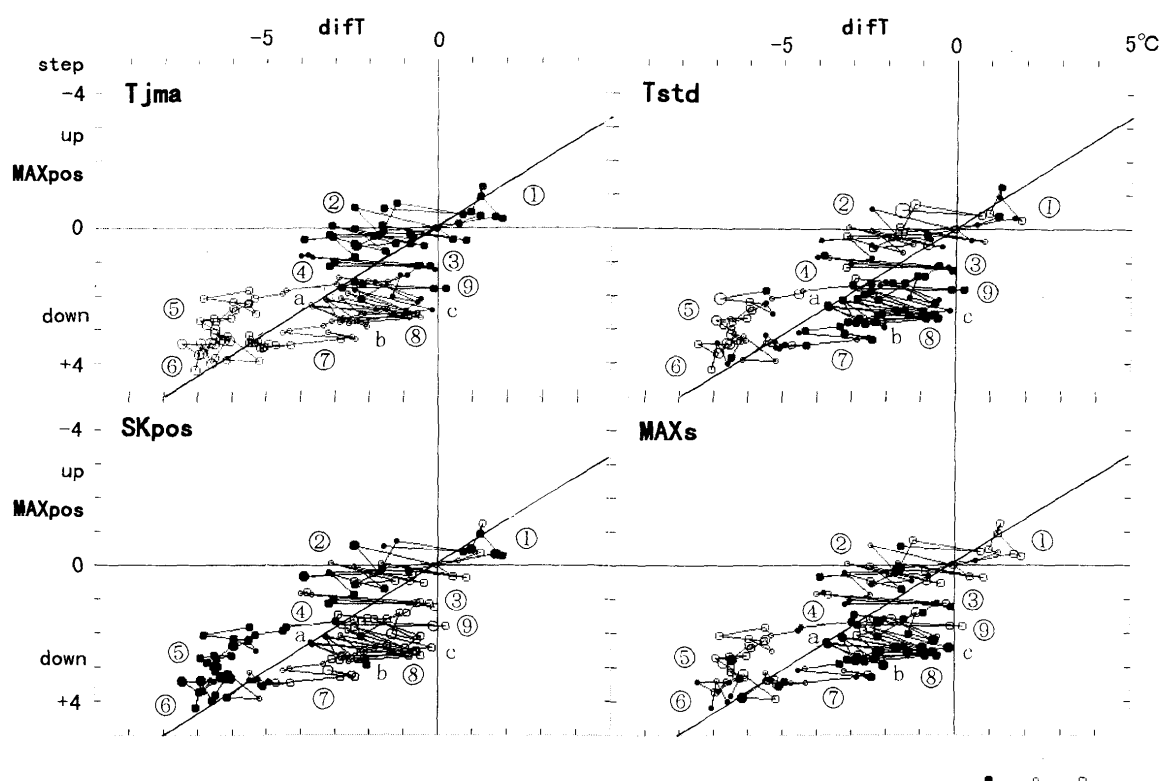


図9 1998年3月28日の気温差diffT-中央受光位置MAXposの日周変動。

Diurnal cycle in air temperature difference (diffT) and median direction of ranger (MAXpos).

グラフ中の直線は光路の気温勾配が地表と光路の間の気温勾配と等しい等気温勾配関係を表す。グラフ中の測定値に対応する丸は、表示されている測定点に対応するTjma, Tstd, SKpos, MAXsの値の平均値(中央の白丸), 平均値から1 σ を加算した値(右白丸), 平均値から1 σ 減じた値(左黒丸)に対応しており, 平均値から差が大きくなるに従って丸の大きさは大きくなる。

Line represents a relation in which air temperature gradient in the laser path is equal to the air temperature difference diffT. Circles represent deviation from the mean value (central open circle: mean value, right open circle: deviations 1 σ for plotted points larger than the mean, left closed circle: deviations 1 σ smaller than the mean. The size of circle increases with the deviation).

Tjma: 気象台気温 (mean = 15.9°C, 1 σ = 2.38°C) air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency

Tstd: 算出気温の68%信頼限界 (mean = 0.226°C, 1 σ = 0.122°C) 68% confidence limit of calculated air temperature of laser path

SKpos: 歪度 (mean = -0.811 step, 1 σ = 0.726 step) skewness of laser intensity distribution

MAXs: 最大受光量 (mean = 3.42V, 1 σ = 0.827V) maximum intensity

大気状態の時間帯区分 Stages of atmospheric behavior: ①夜間平衡 night equilibrium (0:43-1:55), ②夜間振動 night oscillation (2:19-5:55), ③夜明振動 dawn oscillation (6:05-7:24), ④日射昇温 insolate heat up (7:33-9:13), ⑤日射加熱 insolate heating (9:23-11:14), ⑥昼間平衡 day equilibrium (11:27-13:44), ⑦昼間振動 day oscillation (13:55-17:33), ⑧日没振動 sunset oscillation (17:43-23:05), ⑨深夜振動 mid-night oscillation (23:13-23:53).

っていたりしている(図9)。この変化の様相から時間帯を以下の9つに区分することができる;

- ①夜間平衡 (0:43-1:55) 等気温勾配領域にあり, 変動が少ない。
- ②夜間振動 (2:19-5:55) 等気温勾配領域と気温差が-3ないし-4°Cの領域の間を振動する。
- ③夜明振動 (6:05-7:24) 中央受光位置を変えずに気温差が-3ないし-4°Cの間を振動する。
- ④日射昇温 (7:33-9:13) 気温差が拡大するとともに中央受光位置も低下する。
- ⑤日射加熱 (9:23-11:14) 気温差はあまり変わらず, 中央受光位置が低下する。
- ⑥昼間平衡 (11:27-13:44) 等気温勾配領域にあり, 変動が少ない。
- ⑦昼間振動 (13:55-17:33) 中央受光位置はあまり変わらず, 等気温勾配領域と気温差が等気温勾配領域よりも約3°C少ない領域との間を振動する。
- ⑧日没振動 (17:43-23:05) 等気温勾配領域(a)から中央

受光位置が少し下向きで気温差が等気温勾配領域よりも2°C少ない領域(b), そして3°C少ない領域(c)に進み, 中央受光位置が少し上向きの等気温勾配領域(a)に戻る振動を続ける。

- ⑨深夜振動 (23:13-23:53) 中央受光位置は変化せず, 等気温勾配域と気温差0の領域を振動する。

これらの日周変化の中で午前中の④日射昇温から⑥昼間平衡までは, 日射による地表の加熱による気温差diffTの拡大, そして地表からの大気の加熱, そして等気温勾配域への平衡と理解することが可能である。午後から夜間は中央受光位置MAXposも変化するが, 気温差diffTが短時間内に著しく変化する振動によって特徴付けることができる。

算出気温の68%信頼限界Tstdをみると(図9 Tstd), 等気温勾配線よりも左上の光路気温勾配が平均気温勾配よりも小さい領域では, 68%信頼限界が大きく(白丸), 右側の光路気温勾配が平均気温勾配よりも大きい点では, 68%信頼限界が小さい(黒丸)。気温差diffTが-4°Cより左

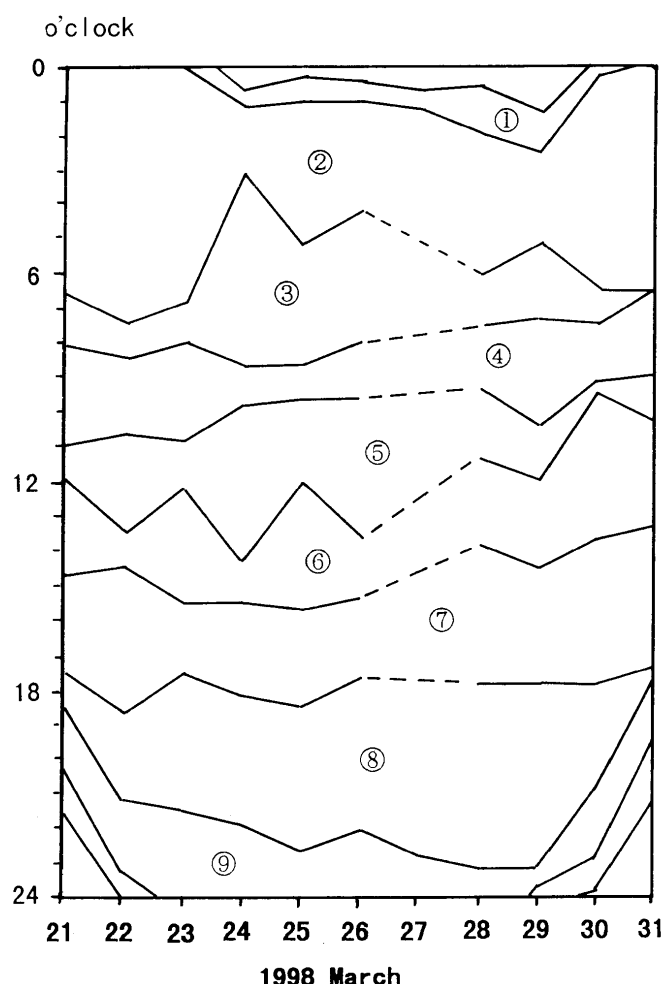


図10 1998年3月21日から31日の日周変動型区分の時間帯対比。

Correlation of time zone for the diurnal stages ① - ⑨ among the days in 21-31 March, 1998.

大気状態の時間帯区分 Stages of atmospheric behavior: ①夜間平衡 night equilibrium, ②夜間振動 night oscillation, ③夜明け振動 dawn oscillation, ④日射昇温 insolate heat up, ⑤日射加熱 insolate heating, ⑥昼間平衡 day equilibrium, ⑦昼間振動 day oscillation, ⑧日没振動 sunset oscillation, ⑨深夜振動 midnight oscillation.

側の点は大部分が等気温勾配線の左上に位置しており、算出気温の68%信頼限界が大きく、光路大気の状態が不安定であることを示している。また、これらの点は昼間の日射による地表加熱によって平均気温勾配が増大した時期に当たっており、地表付近の気温勾配が増大するが、光路付近では平均気温勾配よりも小さくなっていることが分かる。光路大気的不安定は、地表付近で加熱された気塊が光路まで上昇して来る陽炎現象と対応している。

等気温勾配線よりも左上に位置する点で気温差が -3°C よりも左側の点で、算出気温の信頼限界Tstdが大きい点(図9 Tstd)は夜間における地表の冷却に対応しているが気温差は負の値であり、地表よりも光路の気温が低いことになる。この関係は、冷氣塊が光路に降下することによってもたらされるものと考えられる。算出気温の信頼限界Tstdは、非常に大きく最大の測定点も含んでいる。これは光路付近が極めて不安定な状態にあることを示している。

SKposには系統的な差があり、昼間の加熱時と夜間の冷却時にはSKposが小さくなり、レーザー受光量が正規

分布に近くなる(図9 SKpos)。最大レーザー受光量MAXsは、昼間や夜間で測定点分布の周辺域で有意に大きく、大気が攪乱されていると空気が澄んでいて霞や霧がかからないことと良く対応している(図9 MAXs)。

日射加熱気塊による気温差の振動

日射による気温上昇時以外の時間帯では、中央受光位置は変動しないが気温差が振動していることが明らかになった。この振動は、測定距離が1cm以上変動することに対応し、測距を目的とする場合には大きな障害となる。この振動が大気のどのような状態に対応するかを検討するために3月28日の測定結果を詳しく検討することにする。

振動の中で中央受光位置の変動もともなう規則的な日没振動⑧について解析を行う。この振動は、(a)等気温勾配領域から(b)中央受光位置が少し下向きで気温差が等気温勾配領域よりも 2°C 少ない領域、そして(c) 3°C 少ない領域に進み、中央受光位置が少し上向きの等気温勾配領域に戻る振動を続ける。

- 1) 振動する気温：気温差は、光波測距によって得られた距離から算出した光路気温から気象台による地上気温を減じた値であるので、気温差が大きく変動する場合にはどちらかの気温が変動していることになる。気象台の地上気温は、17時から21時まではほぼ一定で 16.6°C から 16.2°C に低下するのみであるが、22時に 15.2°C 、23時に 14.8°C と低下する。観測値が1時間値であるのでこれより短時間の変動を知ることはできないが、気温差振動の幅が 3°C と大きいことから光路気温が周期的に変動しているといえる。
- 2) 気温差振動と大気状態：この気温差振動は、等気温勾配領域と気温差が小さい領域との間で行われることから、地表で加熱された大気上昇して光路を横切ることによって説明することが可能である。地表から剥離した気塊が上昇し、気塊頂部が光路に到達すると、光路における気温勾配は大きくなって気温も上昇する(b)。気塊が光路に達すると、光路気温は地表気温とほぼ等しくなる(c)。気塊が光路を通過すると、再び等気温勾配の状態に戻る(a)ことになる。
- 3) 気温差振動の周期：振動の周期は、振動が始まる17時半頃は約1時間であるが、19時半頃からは約30分となり、10分毎の測定でも(a)(b)(c)の周期が測定可能である。22時には30分以下となると考えられ、3つの状態を観測できないが、変動領域は変わらない。
- 4) 昼間振動⑦との関係：日没振動⑧の前には昼間振動⑦があるが、等気温勾配領域にあったものが中央受光位置を次第に上に向けて気温差の少ない領域に大きく変化し、再び等気温勾配領域に戻り、日没振動の(b)に接続する。等気温勾配領域から出て、戻るまでに約1時間半を要しており、日没振動の周期変動が長くなったものと考えられる。中央受光位置の変動は、日射量の減衰に応じた気温低下と対応しており、気温変化を考慮すると⑦と⑧は本質的に同様な振動をしていると見なして良い。ただし、気温差は -2.5°C 程度であり、地表よりやや上空から剥離した気塊が光路を通過したものと考えられる。

地表の放射冷却に伴う夜間振動

昼間に加熱された地表からの剥離気塊の上昇も終了し、

地表が冷却して気温勾配も光路の方が高温で等気温勾配の夜間平衡①に達する。その後、明け方まで地表は放射冷却する。この冷却過程で夜間振動②が起こる。

- 1) 夜間振動②における気温差：夜間振動において、等気温勾配領域と気温差 -3°C の領域の間を不規則に振動する。気温差が負であることは、地表の気象台の気温よりも冷却した気塊が光路に降下してくることが予想される。気象台の位置は反射プリズムを設置してある谷津山の麓の山陰にあって(図3)、降下する冷却気塊が到達しないために、負の気温差が生じるものと考えられる。
- 2) 冷却気塊の起源：地表における放射冷却によって冷却気塊が形成されるとすると、観測所の後背地である有度丘陵や谷津山の後背地である竜爪山地において冷却気塊が形成され、剥離して光路に到達するものと考えられる。
- 3) 夜明振動との関係：夜明振動③は等気温勾配領域よりも気温差がやや負の領域と気温差0の領域を大きく振動する。中央受光位置は殆ど変動しない。気温差0の領域に最初に入るのは日射が始まる6:27であるので、日射によって暖められた気塊が光路に上昇し、気温勾配を無くすことがこの振動の要因と予測できる。
- 4) 深夜振動との関係：深夜振動⑨は日没振動⑧の後、夜間平衡①に達する前に起こる大きな気温差のみの変動を伴う。気温差は等気温勾配領域と気温差0の領域を変動するが、垂直位置は殆ど変化しない。日没振動⑧において次第に小規模化した気塊が地表から光路に達していたが、深夜において地表から剥離する気塊が大規模化したことが推察される。放射冷却によって寒冷化した地表とその直ぐ上の冷却されず暖かく低密度の気塊が上空の低温で高密度の大気に対して重力不安定を起こし大規模な剥離を起こし、光路を通過することによって考えられる。この大規模な気塊剥離によって大気は安定な密度成層を達成し、地表より上空が温暖な等気温勾配の夜間平衡①に達する。

日周変動と天候の関係

日周変化の変動幅が最も大きな典型例として3月28日の日周変動を検討したが、3月21日から31日の日周変動にも①から⑨の区分をそのままあてはめることができる(図10)。3月27日の欠測は、雨によってレーザーが遮られたものであり、完全な日周変動を観測することができなかったが、基本的な型は保たれている。ここで取り上げた期間は、春分を含み、気温変動の激しい季節であるにもかかわらず、日周変動の型をあてはめることができたことは、この型が日中の日射による加熱や夜間の放射冷却にともなう地表付近の大気の運動や温度構造の本質を捉えているからであろう。

静岡気象台測定気温と光波測距から算出された気温との差

光波測距によって求められた距離から算出された光路気温は、地表の加熱や冷却にともなって激しい日変化を示すことを示した(図6)。気象台気温と光路気温の気温差 difT の変動の幅は、 10°C にも及んでいるが、距離に換算すると4 cmにも達する。もし、光路の気温が気象台気温と一致していれば、気温差 difT は0で一定なはずである。ただし、観測所-谷津山間の距離は一定として光路気温を算出しているので、距離が変動していれば、基準と

なる気温差 difT が系統的にずれることになる。この系統的なずれが激しい日変化よりも有意であれば、距離の変動を議論することが可能になる。

観測所-谷津山間においては1996年9月から1年7ヶ月にわたる連続観測が行われており、9月から翌年3月については2年分の観測結果を比較することが可能である。そこで、気象台気温および算出平均気温 T_{cal} と気象台気温 T_{jma} の気温差 difT の関係を10日毎に検討する(図11)。各点の大きさおよび白・黒は算出平均気温の68%信頼限界 T_{std} である。気温の範囲が 30°C にもおよぶにもかかわらず気温差はほぼ 0°C 付近に分布している。分布の周辺部では信頼限界が著しく大きくなっているが、これは10回の測距中に測定距離の変動が著しいことを示しており、大気が不安定であることを意味している。

グラフによって点の数が少ないものがあるが、雨や霧によってレーザーが遮られた場合の欠測の他に、電気的ノイズのために測距儀のモード切り換えが逆相になったり、受光量調整ができなかった場合もある。また、光路が大気の状態変化のために屈曲し、測定できなかった場合もある。測定結果の回収は1日1回行っているが、不在の場合にはモードが逆相のまま放置されてしまい測定数が極端に少なくなっている。1998年3月18日からは、測定を中断する要因を全て回避できる改良が加えられたので、測定数は飛躍的に増大している(図11d)。1998年3月21日から31日には4日間不在であったが、雨や霧による欠測以外について、ほぼ完全な測定が実現されている。

10日毎にまとめたグラフは、季節変化に従って横軸の気象台気温 T_{jma} は変動し、測定点の分布や68%信頼限界の配置は季節ごとに共通している。ただし、気温差 difT を表す縦軸の位置が明瞭に変動している。例えば、1996年と1997年の12月11日から20日の測定値を比較すると、1997年の測定点の大部分は気温差 0°C の線よりも下にあるにもかかわらず、1996年の測定点の半数以上は気温差 0°C の線よりも上にあり、この気温差が約 3°C にもおよんでいる。もし、両年のこの期間の大気温度構造に有意な差が無ければ、この差は谷津山-有度丘陵間の距離に起因することになり、1997年には1996年よりも約15mm拡大したことになる。

谷津山-有度丘陵間の距離変動

日の出・日の入前後は、大気が安定する時間帯で光波測距に適するとされてきた(例えば、木股, 1984)。朝夕のこの時間帯の算出光路気温 T_{cal} の信頼限界 T_{std} は小さく、大気が安定していることを示しているが、10分毎の平均値は大きく振動していることが明らかになった。この振動は気温差が 3°C 程度で距離に換算すると1.2 cmにも及ぶ。10分毎に測定される振動する大気状態における信頼限界には有意な差は認められないが、その中間の気温差を持つ測定値の信頼限界は大きく、遷移状態はある程度不安定であることが分かる。気温差が小さい方は、当然地表大気状態を表しており、距離を算出するために地表の気温・気圧・湿度を直接用いることができる。

草薙断層を挟む静岡大学地殻活動観測所-谷津山間の距離変化を検討するために、以上の検討結果を踏まえて、これまで測定された測距の結果の中で、算出平均気温の68%信頼限界が 0.1°C 以下で21-24時の時間帯に測定されたものを使用することにする(図12)。この時間帯は⑧日没振動と⑨深夜振動の期間であり、等気温勾配領域と気温差0の領域を振動しているが、算出気温の信頼限界は1

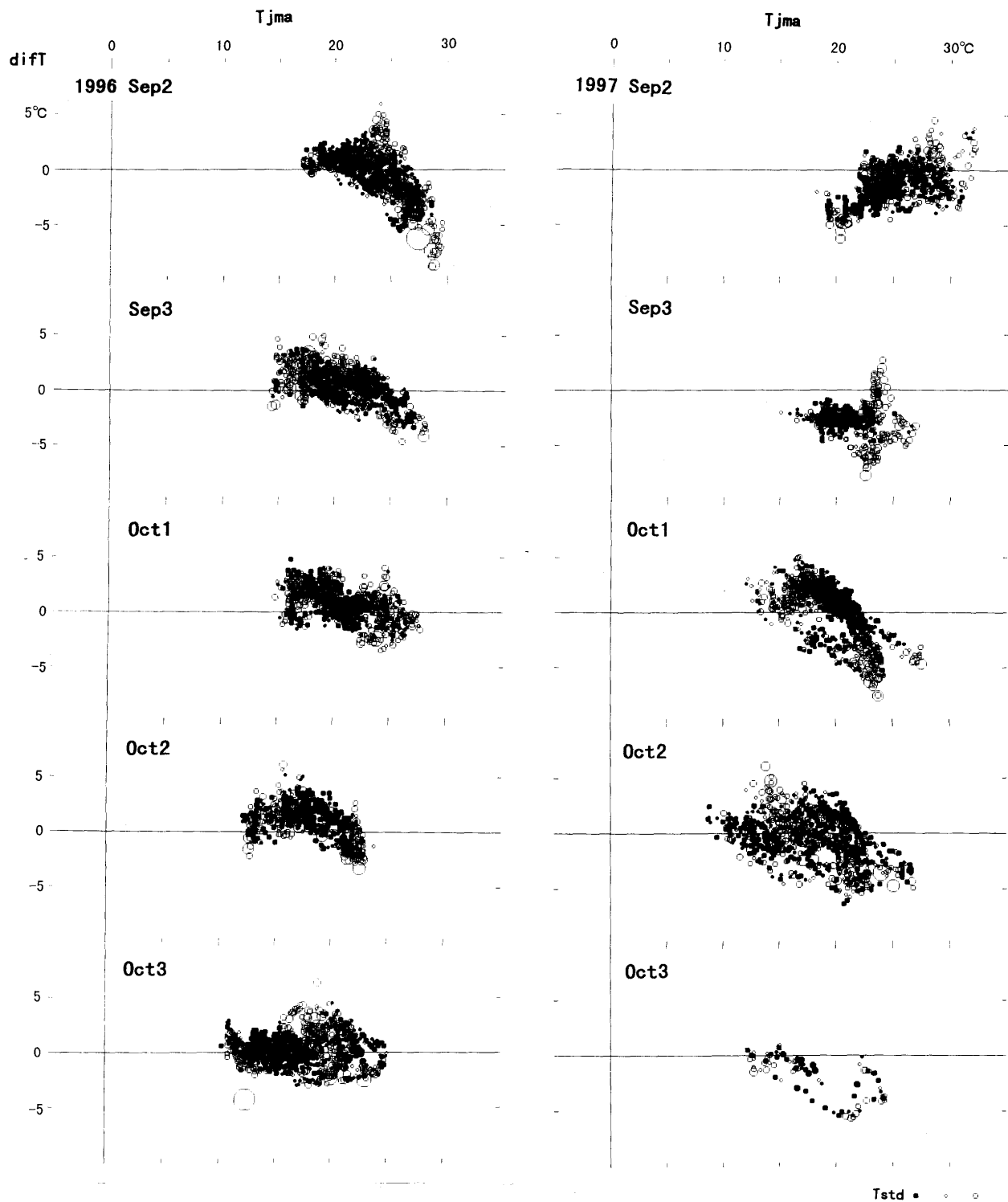


図11a 1996年9月から1998年3月までの10日毎の気温差difTと気象台気温Tjma関係。

Relation between air temperature difference (difT) and air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency (Tjma).

グラフは各月の上旬（1-10日：1）中旬（11-20日：2）下旬（21-月末：3）に分けて表示してある。各点の円の半径と白黒は、グラフ中の測定点に対応する光路気温Tcalの68%信頼限界Tstdの平均値（中央の白丸）、平均値から 1σ を加算した値（右白丸）、平均値から 1σ 減じた値（左黒丸）に対応しており、平均値から差が大きくなるに従って丸の大きさは大きくなる。

Each graph contains result of measurements for 10 days (1: 1st-10th, 2: 11th-20th, 3: 21st-end of month) in the month. Measured points represent 68% confidence limit of calculated air temperature of laser path (central open circle: mean value of Tstd, right open circle: deviations 1σ of Tstd for plotted points larger than the mean of Tstd, left closed circle: deviations 1σ of Tstd smaller than the mean of Tstd. The size of circle increases with the deviation).

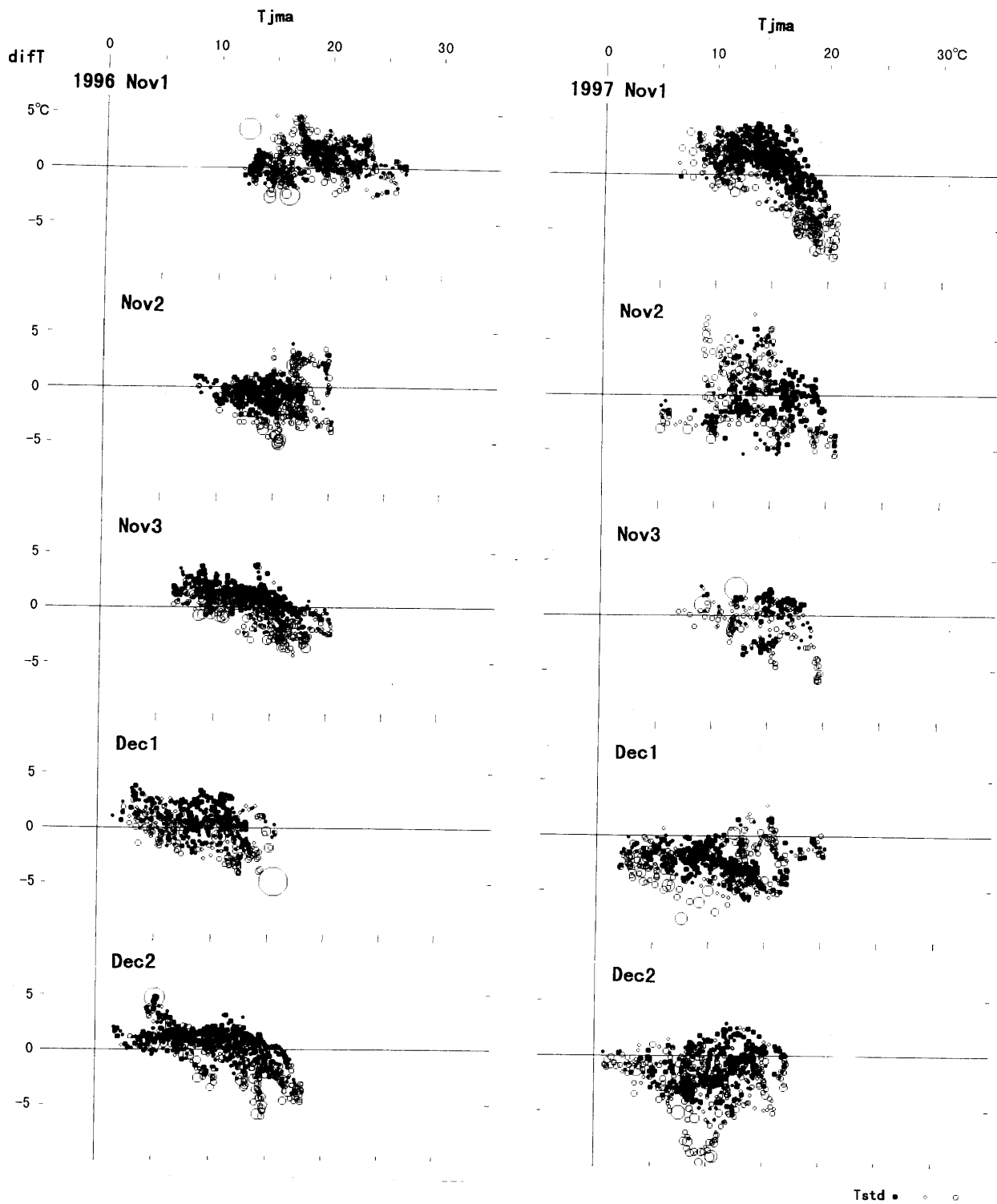


図11b (つづき Continus) 1996年9月から1998年3月までの10日毎の気温差 difT と気象台気温 T_{jma} 関係.
Relation between air temperature difference (difT) and air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency (T_{jma}).

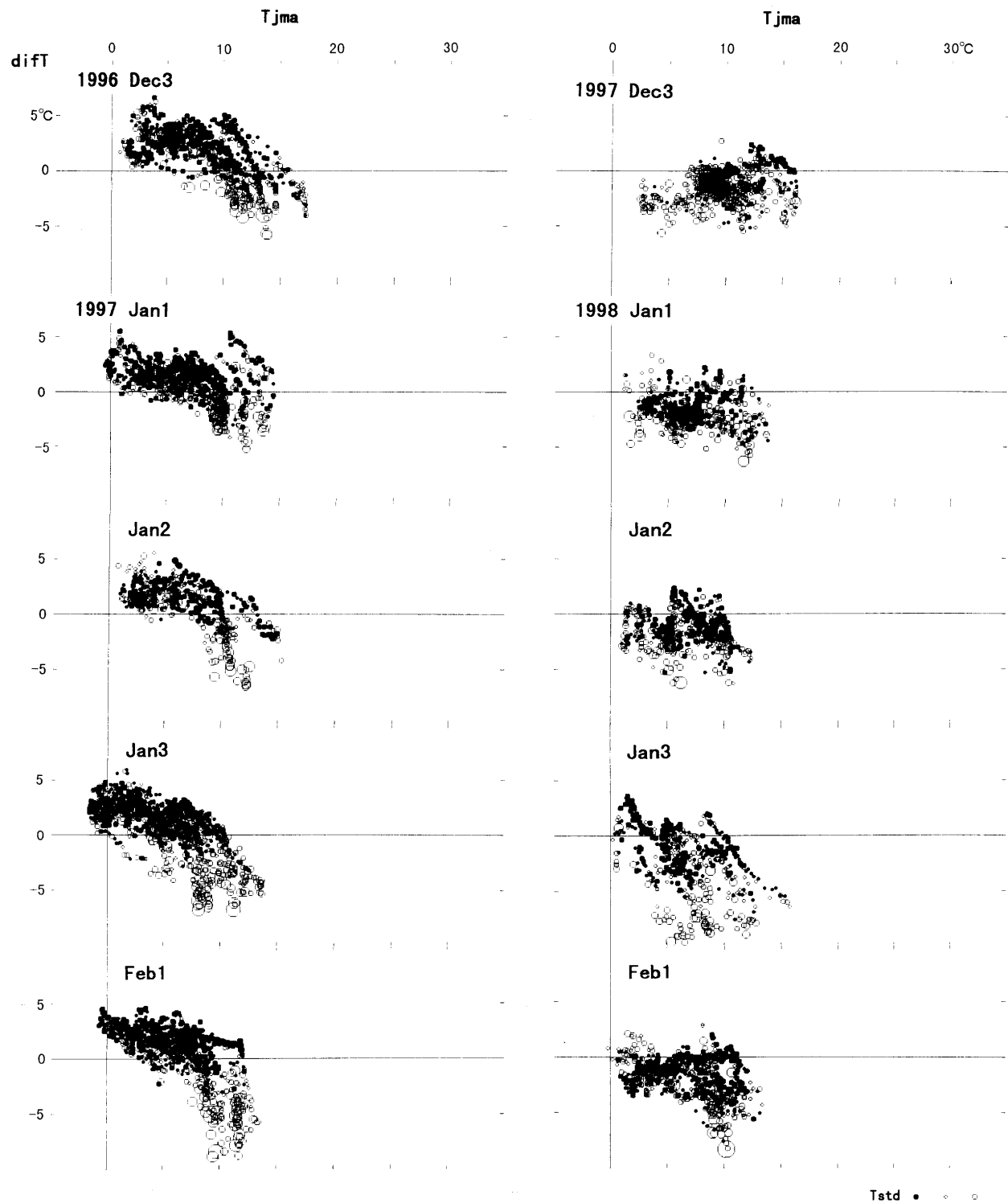


図11c (つづき Continus) 1996年9月から1998年3月までの10日毎の気温差difTと気象台気温Tjma関係.
 Relation between air temperature difference (difT) and air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency (Tjma).

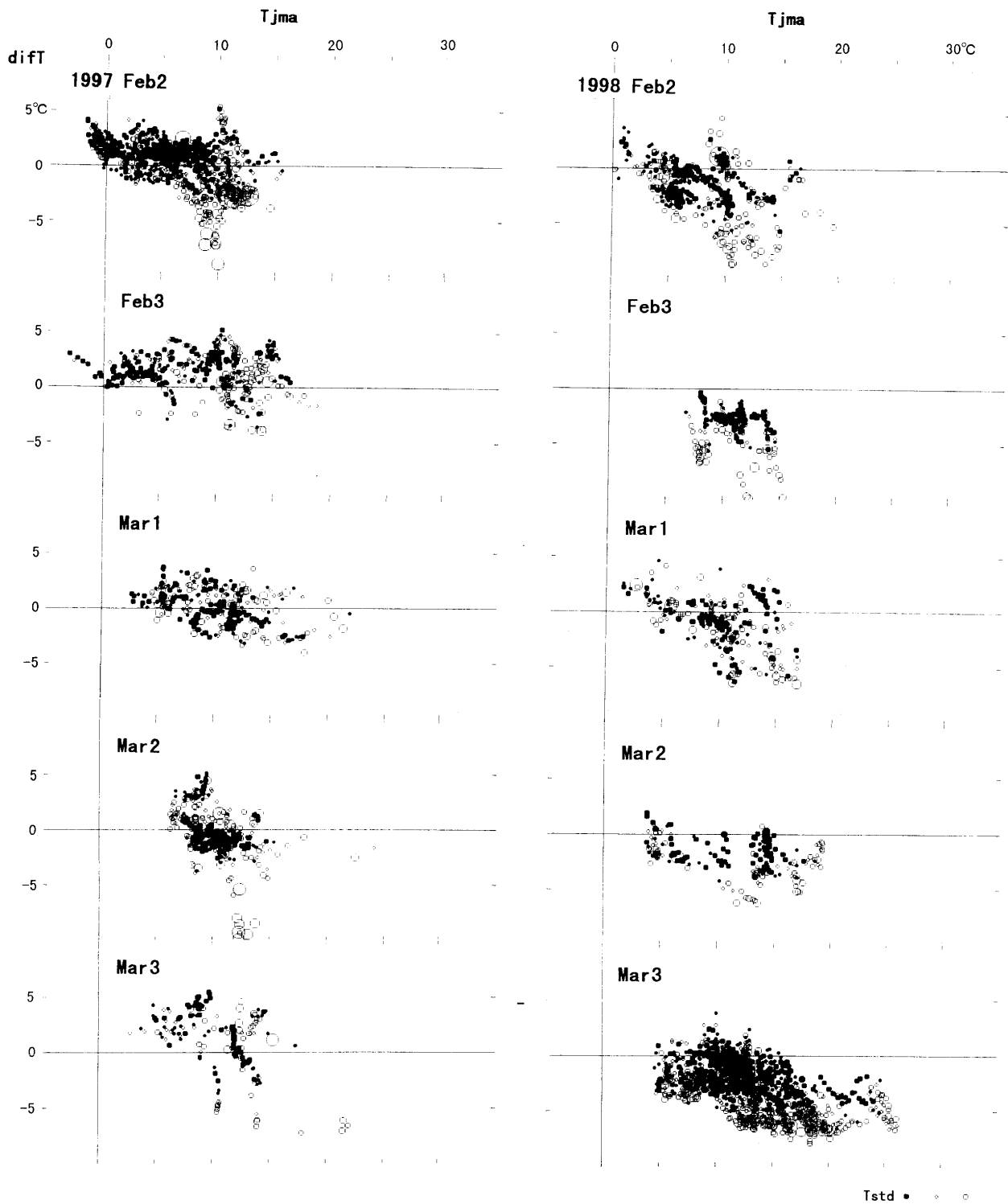


図11d (つづき Continus) 1996年9月から1998年3月までの10日毎の気温差difTと気象台気温Tjma関係.
Relation between air temperature difference (difT) and air temperature at Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency (Tjma).

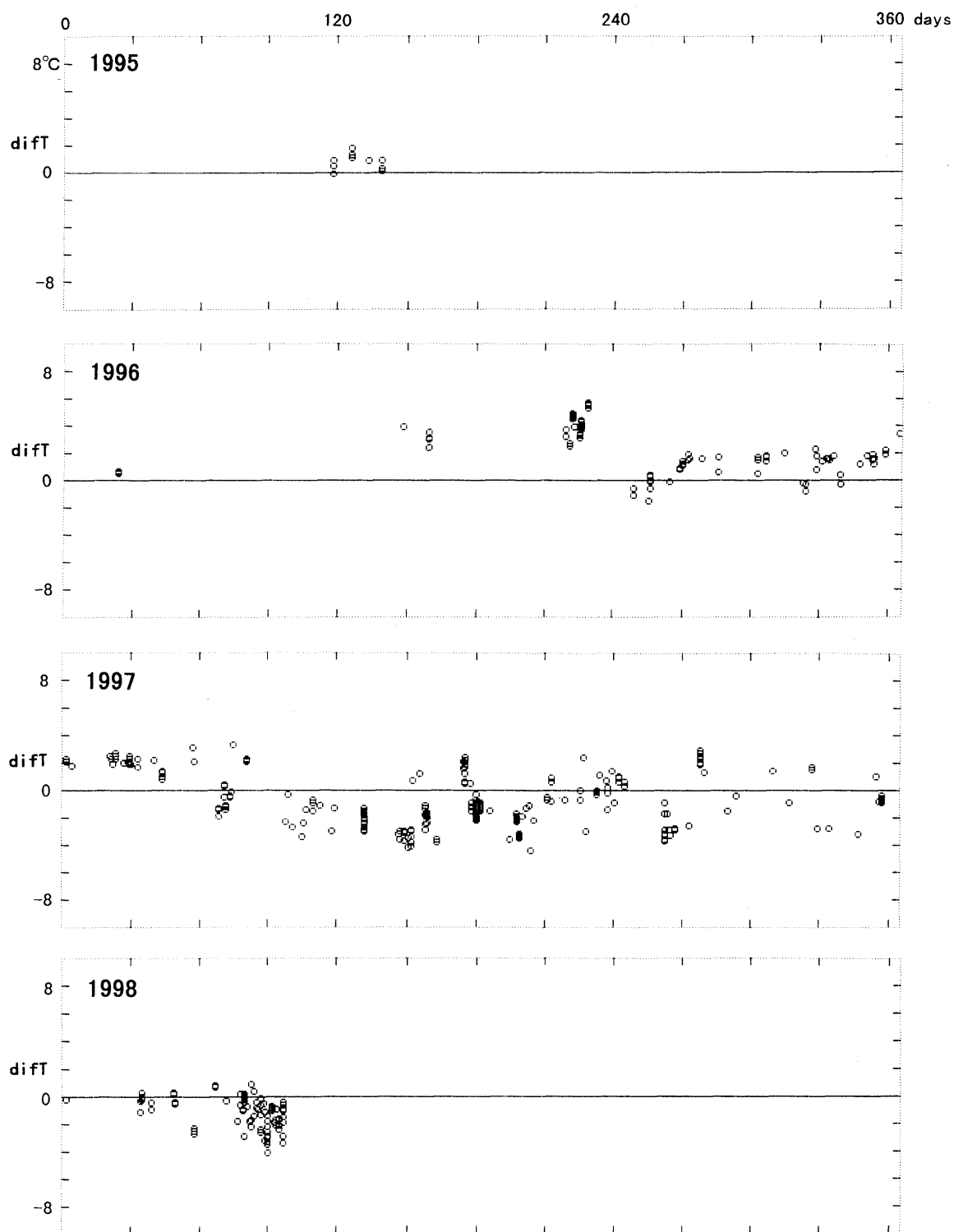


図12 1995年4月から1998年4月までの気温差difT変動。

Changes in the air temperature difference from April 1995 to April 1998.

静岡大学地殻活動観測所-谷津山間の光波測距によって得られた算出気温Tcalと静岡地方気象台の気温Tjmaとの差difTの経年変化を年毎に示してある。表示した点は換算気温の68%信頼限界が0.1℃未満のもので、日没振動⑧の後半部から深夜振動⑨において気温差が等気温勾配領域と気温差の小さい領域間を振動する時間帯である21時から24時に測定されたものである。気温差2℃は観測所-谷津山間の距離が8mm変動したことに相当し、気温差の上昇は距離の減少を、下降は増加を意味する。

Plotted data are selected with the criteria 1) smaller 68% confidence limit of calculated air temperature from the laser ranging than 0.1℃, and 2) measured time from 21:00 to 24:00 when the atmospheric behavior is the later part of sunset oscillation ⑧ and midnight oscillation ⑨. Difference of 2℃ corresponds to 8mm of the distance between Crustal Activity Observatory of Shizuoka University and Yatsuyama Hill.

日の中で最も小さい。気温差0の領域においては、地表の気温を光路距離算出に直接用いることができる。振動する気温差から距離の変動を知るためには、地表気温と光路気温との差が無くなる気温差0領域の値を検討の対象にすれば良い。

連続自動観測を開始した1996年9月から1998年4月までの結果を見ると長期的変動傾向を見ることができる。1996年9月から1997年1月にかけて気温差は上昇しており、有度丘陵-谷津山間の距離が短縮していたことが予測できる。1997年2月から1997年5月までの気温差は下降傾向で、1997年6月から1997年11月まで上昇、1997年12月以降は下降傾向である。変動幅は5℃程度であり、距離に換算すると2cm程度である。

これらの長期的傾向に加えて、短期的な変動もある。測定点が充分あるにもかかわらず10日以内に気温差が2℃以上も急変することが、1997年3月から1997年12月にかけて見出せる。この短期間に起こる激しい変動が有度丘陵-谷津山間の距離変動であるのかどうかは、今後検討を行う必要がある。

長期的変動および短期的変動については草薙断層の活動による有度丘陵-谷津山間の距離の変動の他に、1) 大気構造の日周変動が季節によって異なり、今回用いた選別条件があてはまらない、2) 測距儀を固定した自動観測結果には気温変化に伴う中央受光位置の変動の影響が存在する、3) 測距儀の性能が変化している、などの測距の基本に関わる要因も考えられる。

今後の観測

測定点の分布を見ても明らかなように、測距儀に改良を加えた1998年3月以降は測定がほぼ完全に行われていることから、今後、定常観測を継続することによって急激な変動の有無および原因を究明することが可能となろう。東海地震の再来が緊迫しているが、東海地震は数十年あるいは数百年に1度しか起こらない大きな地殻活動であり、地殻活動の本質を理解するためにはその様相をできるだけ正確に観測する必要がある。ここに観測されている変動はその前兆とも考えられるので、変動の原因を特定することが急務である。定常測定継続において、測距儀の故障による欠測をなくすることが重要であり、同一精度を有する代替機を常に準備しておく必要がある。また、測距儀の性能変化を独立に検定する方法を確立し、常時検定しておくことも必要である。これらの要請を満たすためには複数の測距儀を用いた相互検定も不可欠である。

現在、定常的に観測しているのは、草薙断層を挟む地殻活動観測所-谷津山間であるが、断層の動きを3次元的に捉えるためには、もう1本の定常観測の測線が必要である。また、草薙断層の北側に草薙断層と同じ性格の断層の存在が予測され奈良時代以降の有度丘陵の傾動活動の主体を担っている可能性も考えられる。これらの断層を挟む測線の確保も急務である。

謝 辞

本論文は現在進行している測距観測について報告したが、観測機器の改良・観測・結果の解析は日夜進行して

いる。新たな改良がなされ新たな観測結果が出始めた時に本研究報告原稿メ切があったが、編集委員会はその後の観測結果についても記述することを許可して下さった。本研究を進めるに当たって、静岡大学理学部の里村幹夫博士には種々討論をいただき、本論文の査読もお願いした。鈴木款博士には討論いただいた。気象庁気象研究所の藤部文昭博士には気象学的内容についてご教示いただくともに査読いただいた。Paleontological Research InstitutionのRobert M. Ross博士には英文の校閲をお願いした。

以上の方々に御礼申し上げる。

引用文献

- 木股文昭(1984), 大気境界層における気温減率の日周変化について. 測地学会誌, 30, 59-60.
- 近藤康生(1985), 静岡県有度丘陵の上部更新統の層序. 地質学雑誌, 91, 121-140.
- 小山真人・新妻信明・狩野謙一・高木圭介・内村竜一・吉田智治・唐沢 譲・田邊裕高 (1992), 駿河トラフ伊豆側斜面の地質とテクトニクスー「しんかい2000」第579潜航の成果ー. 海洋科学技術センター試験報告「しんかい2000」研究シンポジウム特集, 8, 145-161.
- 大塚謙一・新妻信明(1991), 駿河トラフにおける収束境界陸側斜面の変形構造断面の観察「しんかい2000」第474潜航調査の結果. 海洋科学技術センター試験報告「しんかい2000」研究シンポジウム特集, 7, 33-43.
- 新妻信明(1995), 本州中部のテクトニクスと1993年の静岡の地震. 静岡大学地球科学研究報告, 22, 11-22.
- NIITSUMA N.(1996), The trench-trench-trench type triple junction and tectonic evolution of Japan. *Geoscience Reports of Shizuoka University*, 23, 1-8.
- 新妻信明・大塚謙一・狩野謙一・和田秀樹・佐藤隆一・渋谷朝紀・竹内真司・吉田智治・大浦坂勝利 (1990), 駿河トラフにおけるプレート沈み込みの直視観察. 海洋科学技術センター試験報告「しんかい2000」研究シンポジウム特集, 6, 261-276.
- 新妻信明・中野 進(1991), 有度丘陵における地震動振幅と地質構造. 静岡大学地球科学研究報告, 17, 131-147.
- 新妻信明・小田川信哉(1993), 谷津山ー静岡大学間のレーザー光波測距. 静岡大学地球科学研究報告, 19, 35-44.
- 新妻信明・西田光二・水藤 尚・武田 浩(1996), レーザー測距儀による気温の測定. 静岡大学地球科学研究報告, 23, 9-18.
- 須田教明(1976), 電磁波測距儀 (改定版). 森北出版, 東京, 242p.
- 杉山雄一・下川浩一・坂本 亨・秦 光男(1982) 静岡地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 82p.
- 矢田 勝(1995), 静岡-清水平野の遺跡発掘によって発見された縄文ー歴史時代の地滑り跡・活構造. 地震学会講演予稿集, no. 2, P65.

付表 1 静岡大学地殻活動観測所における光波測距観測

Laser ranging at Crustal Activity Observatory of Shizuoka University

観測機器 ranging machine : 六桜精密社製 オートレンジャー JX型
Auto-Ranger JX of Rokuoh Precision K. K.

Ga-As 赤外レーザーダイオード Ga-As ultra-red laser diode
波 長 wave length = 780nm
最 大 出 力 maximum output = 3mW
測定時出力 output during measurement < 0.5mW
測距用発振周波数 frequency of oscillator = 14.984980MHz
設置場所 place : 静岡大学地殻変動観測所整準台に固定
on a pillar at the Crustal Activity Observatory

反射プリズム reflective prism for laser ranging

直径 6cm丸型 3個を窓付き配電箱に固定
three prisms with diameter of 6cm, set in electric wiring box

設置場所 place :

谷津山の東海大学宣伝塔

Advertising Tower of Tokai University on Yatsuyama Hill
(which had been used for NHK broadcasting)

山原の NTT中継塔

Microwave Relay Antenna of NTT on Yambara Hill

垂直位置制御用ステップモーター step motor to control the vertical positioning:

1周200ステップ 200 steps/round

デジタル・マルチメータ Digital Multimeter :

アドバンテスト Advantest R6452E

測距儀の測定/受光量調整モードの監視, 受光強度の測定
measurement of laser level and monitor of mode for ranger

計算機 computer :

note type personal computer NEC PC9821Nr12

計算 calculation:

垂直位置 vertical position :

中央受光位置 median direction,

最大受光位置 maximum direction of laser input,

歪度 skewness of laser intensity,

標準偏差 standard deviation of laser input

測定距離の処理 processing ranging values :

1測定につき10回測距 ten ranging values for one measurement

平均と68%信頼限界 mean and 68% confidence limit

光路気温暫定値 temporally air temperature of laser pass

(仮定 under the assumptions: 距離 distance = 3708.568m,

1気圧 air pressure 1 atm., 湿度 humidity = 70%)

地球潮汐 earth tide

清水港潮位 ocean tidal level at Shimizu Port

RS-232C: 測距儀の測距値の取り込み get measured value from ranger

GPIB: レーザー受光強度の自動調整 control laser input of ranger

ステップモーター制御 control step motor

デジタル・マルチメーター測定値の取り込み
get measured value from Digital Multimeter

観測 observation :

手動24時間連続観測 manual 24 hours measurement :

1995年 4月28/29日	28/29 April	1995
5月13/14日	13/14 May	1995
19/20日	19/20 May	1995
28/29日	28/29 May	1995
1996年 6月 7/8日	7/8 June	1996

自動10分毎連続観測 automatic measurement at 10 minutes intervals :

1996年 8月 3-17日	3-17 August	1996
----------------	-------------	------

9月5日から定常測定 from 5 September 1996 routine measurement

垂直方位自動調整 control vertical positioning :

1998年 3月15日から	from 15 March	1998
---------------	---------------	------

垂直方位も連続測定 calculate vertical position :

3月18日から	from 18 March	1998
---------	---------------	------