

## 光波側距による大気境界層変動と草薙断層・麻機断層の活動監視

|       |                                                                                                    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2008-01-25<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 新妻, 信明<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://doi.org/10.14945/00000383">https://doi.org/10.14945/00000383</a>                  |

## 光波測距による大気境界層変動と 草薙断層・麻機断層の活動監視

新 妻 信 明<sup>1</sup>

### Monitoring on the atmospheric boundary layer and activity of the Kusanagi and Asabata faults with laser ranging

Nobuaki NIITSUMA<sup>1</sup>

**Abstract** Automatic laser ranging is continuing to monitor the atmospheric boundary layer and the activity of the active Kusanagi and Asabata faults along the laser paths from the Crustal Activity Observatory of Shizuoka University to Yatsuyama, Yambara, Torisaka and Shizuhata.

The temperature of the laser path calculated based on the assumption of constant distance of the laser path is used for the analysis on the diurnal and seasonal changes in the air temperature of the laser path.

The median position of laser intensity curve with the stepwise vertical directional adjustment relates to the air temperature difference of the laser path and surface, consistent with the relation of temperature gradient and curvature of the laser path.

The laser intensity curves have usually multiple peaks and their relative height and positions change diurnally and seasonally. The multiple peaks represent existence of multiple courses of the laser path relating to total reflections, caused by the non-uniform temperature gradient around the laser path.

The surface temperature rises rapidly in insolate heat up stage after sunrise, and then the speed decreases in insolate heating stage. The laser path temperature decreases significantly in insolate heating stage. The abnormal low-temperature of laser path before noon represents crossing of cool air mass in a part of convection system induced by the insulation.

The upper limit of the standard error on the laser path temperature for ten repeated measurements, the time zone, and the peak position of ranging on the laser intensity curve without influence of diurnal and seasonal changes are selected for monitoring the distance of the laser path.

The distance varied in the order of several cm, and the relation with the change of tilt at Crustal Activity Observatory of Shizuoka University indicates that the distance change is related with the gravitational collapse along the Kusanagi and Asabata faults. The distance change is related with the balance in the accumulation of dislocation along the eastern and western margin of the Philippine Sea Plate. The distance extended after Taiwan Earthquake of Magnitude 7.7 at 1999 September and the behavior of the changes deformed into saw-teeth shape.

The eruption of Miyakejima and earthquakes around Niijima-Kozushima in July 2000 happened at the maximum extended stage in the saw-teeth shaped change.

---

<sup>1</sup>静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷 836

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: senniit@ipc.shizuoka.ac.jp

Earthquakes around Niijima-Kozushima and south Kanto Area relate with the shortening of the distance. Earthquakes in the central and southwestern part of Honshu Island happened at the shortening stages.

**Key Words:** laser ranging, atmospheric boundary layer, laser intensity curve, total reflection, Kusanagi Fault, Asabata Fault, gravitational collapse, Udo Hills, Taiwan Earthquake, Miyakejima Eruption, Philippine Sea Plate.

## 緒言

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、1980年以来、光波測距儀・地震計・傾斜計を用いて地殻活動を観測している(檀原, 1981). 1992年には光波測距を定常的に行うために反射プリズムを谷津山, 1993年には山原に設置し, 1995年から定常観測が開始された(新妻ほか, 1996). 2000年6月に鳥坂, 2000年12月に賤機にも反射プリズムを設置し(Fig.1), 定常観測がなされている(新妻, 2001).

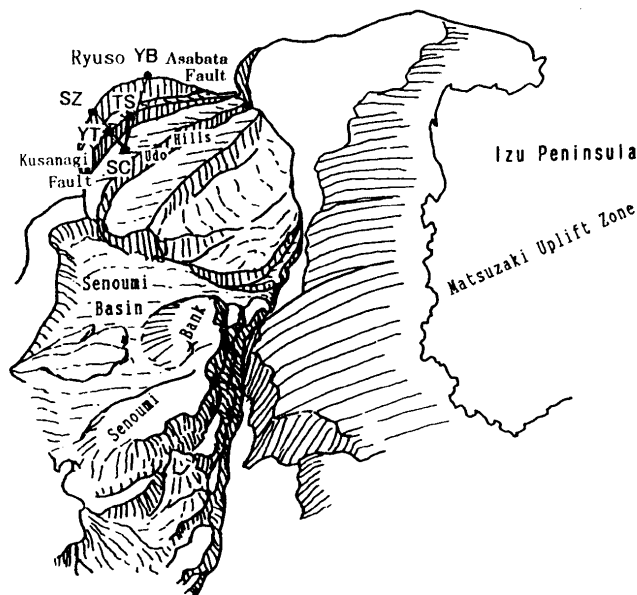


Fig. 1 静岡大学地殻活動観測所から常時測距観測を行っている谷津山・山原・鳥坂・賤機光路, 草薙断層と麻機断層による円弧すべり, 駿河トラフとの関係.

Laser paths for ranging and submarine topography in the Suruga Trough with the Kusanagi and Asabata faults showing gravitational collapse.

SC: 静岡大学地殻活動観測所Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, YT: 谷津山 Yatsuyama, YB: 山原 Yambara, TS: 鳥坂 Torisaka, SH: 賤機 Shizuhata.

草薙・麻機断層周辺における沖積層の埋積は崩壊地形を明示するために除いてある.

Alluvium filling around Kusanagi and Asabata Faults is removed to clarify the topography of collapse.

これらの光波測距測線は, 約10万年前の海岸平野を大規模な円弧すべりによって傾動させ, 有度丘陵の400mもの隆起および麻機沼の100mもの沈降を起こしている草薙断層と麻機断層を横切っている(Fig.2). この断層

の下底は駿河トラフに沈み込むフィリピン海プレートに乗り上げている(新妻, 1998; 2001). 草薙断層では, 1841年・1935年・1993年に地震が発生している(新妻, 1995).

光波測距儀による定常観測の結果, 光波による測距には光路の気温が大きな影響を与えることが明らかにされた(新妻, 1998). この原理を逆用することによって, 光波測距儀を光路気温の精密測定機として使用する方法が開発され, 往復するレーザー光の光路の移動を連続的に測定することによって, 光路を横切る気塊の動きを検出することに成功した(新妻, 2000). 光路の気象状況を考慮しながら, 測定された光路気温と静岡地方気象台における地表気温とを比較することによって, 光路長の変動を監視することに成功し, 1999年の台湾地震の影響を捉えることができた(新妻, 2000).

今回, 光波測距儀測定用に開発されたプログラムLR1を改良し, ホームページからテキスト形式で入手した毎時の気象台観測値を解析用に自動的に変換するとともに, 本論文に掲載した解析用図を表示・印刷できるようにした. このプログラムを利用して, 光路の気象状況の詳細な解析および, 地殻変動解析を行ったので報告する.

## 自動測距のための計算機プログラム改良

光波測距は, 静岡大学地殻活動観測所の整準台(檀原, 1981)に設置した六桙精密社製のAuto-Ranger JXを用い, 1996年1月からMS-DOSプログラムによって自動測定が開始された. 1998年3月には, 測距儀に垂直微動装置を取り付け, 最大受光位置を計算機制御によって走査する自動測距を実現した(新妻, 1998). 1998年11月からは, 2台の測距儀を1台の計算機で交互に自動測定できるように改良し, 谷津山と山原の交互観測が開始された(新妻, 2000). 2000年3月には, Borland社C++ TCW5のOWL言語によるWindows95/98用に開発されたプログラムLR1によって自動測定が行われている.

自動測定は, 計算機に接続された2台の光波測距儀を交互に制御し, 8秒角毎に垂直微動させてレーザー受光量を測定し, 最大受光位置において連続して10回測距を行っている. 測距の平均値と標準誤差を算出し, 垂直微動に対する受光量とともにコマ区切りのテキスト形式(CSV形式)で計算機のハードディスクとフロッピーディスクに保存している. 10日間の定常測定結果を保存することが可能であり, 毎週, 測定結果を回収している(新妻, 2001). 計算機の時計は, 1週間に30-60秒進むことから, 測定結果回収時に電波時計を用いて時刻を合わせている. 夏季には, 閉め切った観測所内の気温上昇のため, 計算機が熱暴走し, 観測が中断することがあるので, 送風機によって強制冷却している.

CSVファイルとして保存された測定結果を気象資料

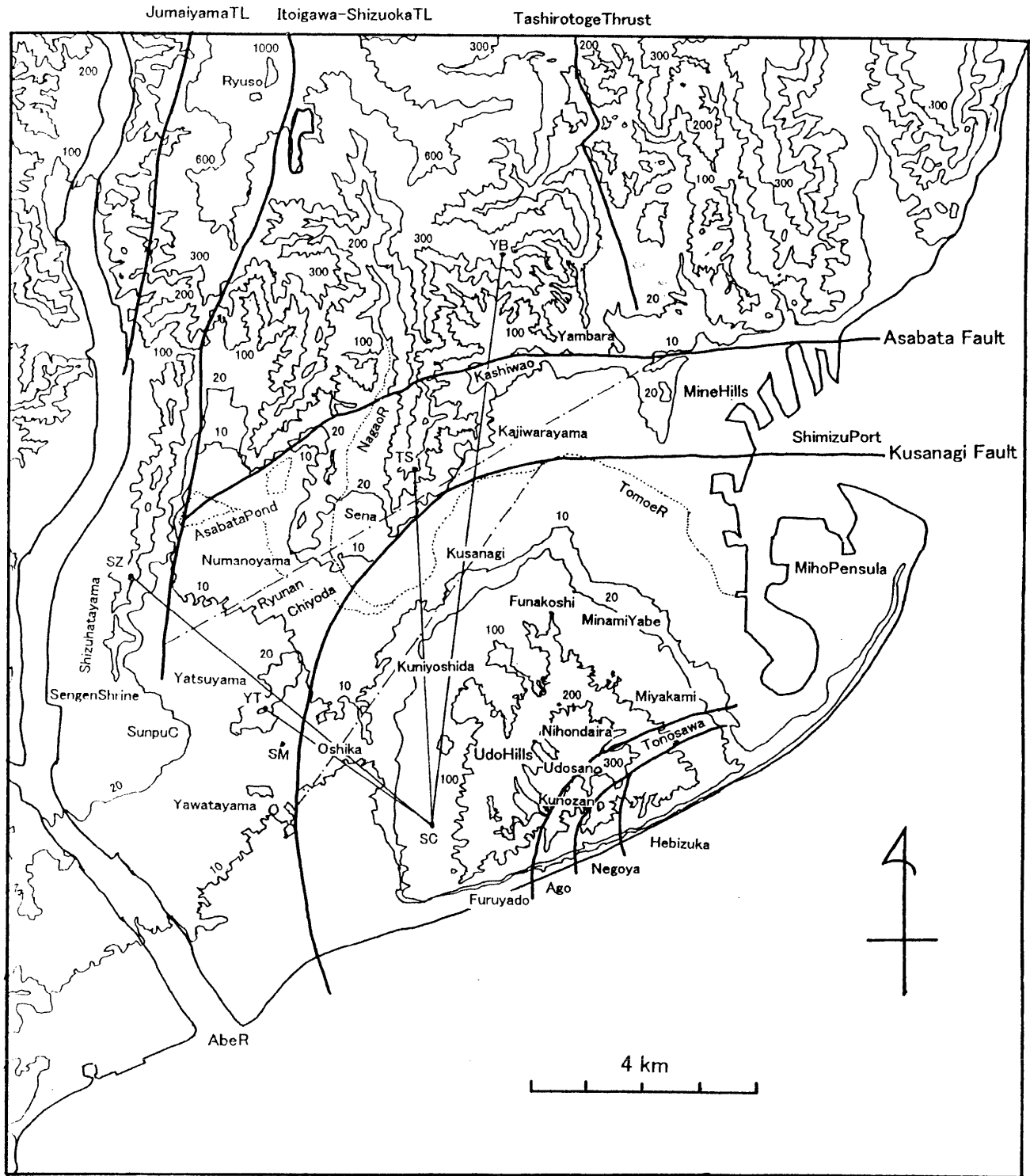


Fig. 2 静岡地域の地形、草薙断層・麻機断層、測距光路の位置。

Laser paths for monitoring the activities of the Kusanagi and Asabata faults.

曲線curves : 断層fault ; 糸魚川-静岡構造線Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, 十枚山構造線 Jumaiyama Tectonic Line, 田代峠衝上断層 Tashiroto Thrust, 草薙断層Kusanagi Fault, 麻機断層Asabata Fault. 直線straight lines : 光波測距光路laser path ; SC : 静岡大学地殻活動観測所 Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, YT : 谷津山 Yatsuyama, YB : 山原 Yambara, TS : 鳥坂Torisaka, SZ : 賤機Shizuoka. SM : 静岡地方気象台Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency.

10m・20m・100m・200m・300m・600m・1000m等高線(国土地理院2万5千分の1および5万分の1地形図にもとづく). 1点鎖線は傾動軸. One dot broken lines represent plunge axes for the tilt along the Asabata and Kusanagi faults.

と比較するために、静岡地方気象台で有料複写した気象資料を表計算ソフトウェアExcelに手動入力し、解析結果をCSVファイルに保存していたが、2001年10月から静岡地方気象台を含む東京管区内で観測された気象資料はホームページ<http://www.tokyo-jma.go.jp>から入手できるようになった。ホームページをテキスト形式で複写し、光波測距解析用にCSV形式に変換できるようにLR1を改良した。このホームページは、開設してから2002年1月まで改良が加えられ、表示形式が変更されたが、その都度、LR1に改良を加えて対応した。現在は、前前月から2日前までの東京管区内の地方気象台の毎時観測値を「観測・統計データ」管内地方気象台・測候所の気象観測データから入手でき、前日と当日の1-2時間前までの観測値は、「管内地方気象台・測候所の毎正時観測データ」から得ることが可能である。入手した静岡地方気象台の観測資料は1ヶ月毎にまとめたCSV形式のファイルとして保存している。

解析は、表計算ソフトウェアExcelによる表計算で、測定距離と測定時刻に内挿した静岡地方気象台の気圧・水蒸気圧から光路気温を算出し、気象台気温と比較していた。この計算表をCSV形式に変換し、Windows95/98用に開発された汎用作図プログラムGraph1によって作図・印刷を行っていたが、今回、測距結果と気象台毎時観測資料のCSVファイルを直接使用する自動解析と、各種グラフの作図・印刷のためにLR1を改良した。解析・作図については、各種条件を対話窓Dialogから設定できるようにした。

### 光波測距によって得られる距離と光路気温

光波測距機によってmm単位で測定される距離は、光路を往復する時間から算出されるので、距離の算出には光路大気的光速度を知る必要がある。大気的光速度は、気温・気圧・水蒸気圧によって変化する。通常は、これらの気象条件を仮定して距離を求めているが、これらの補正をしていない距離を用い、気象条件の中で最も影響の大きい気温を算出する解析法を採用している(新妻, 1998)。光路気温を算出する式は、

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

であり、 $T_c$ が算出光路気温(℃)、 $P$ が気圧(mmHg)、 $E$ が蒸気圧(mmHg)、 $D_s$ が測定光路距離(m)、 $D$ が基準光路距離(m)である。地殻変動によって基準光路距離が伸長すれば、算出光路気温が系統的に低くなり、短縮すれば高くなる。

約10分毎に得られる光路気温は、光路が横切る接境界層の気象状況に伴って変動している。変動の中で最も顕著なものは、日周変動であり、日射による地表加熱と夜間の放射冷却にともなう気温変化と気塊移動である(新妻, 2000)。これらの変動をプログラムLR1によって定常的に作図・印刷しているが、2001年12月11日から20日までのそれぞれの光路の気温と静岡地方気象台で測定された気温・気圧・蒸気圧・雨量・北北西方向の風速成分についての印刷例を示す(Fig. 3)。

### 最大受光位置と受光量曲線の日周変化

光波測距は、測距機を反射プリズム方向に正確に合わせ、往復するレーザー光の受光量が最大となる位置に固定して測定が行われる。1台の測距機を1光路専用とし、最大受光位置に固定し、計算機制御によって自動繰返し測定を実施していたが(新妻, 1996)、測距機の方角を再設定しなければ測距できなくなるほど最大受光位置が季節変化することが明らかになり、1998年3月から計算機制御による垂直微動によって受光量の最大位置を走査し、最大受光位置で自動測距できるようにした(新妻, 1998)。2001年1月には微動駆動用モータを強力なものに交換し、より安定した計算機による垂直微動制御を可能にした(新妻, 2001)。最大受光位置を求める際に得られる垂直微動に伴う受光量の変化も観測結果ファイルに取められており、測距直前の垂直方向の受光量変化曲線を作図することが可能である。この受光量曲線は、その位置・幅・形態に激しい日周および季節変動を伴っていることが明らかになった(新妻, 1998)。

日周および季節変動を示すために、2001年各月2日間の受光量曲線・光路気温・光路位置と気温差を示す(Fig. 4)。

3.7kmの谷津山光路における受光曲線幅は、10kmの山原光路の受光曲線幅と比較すると、光路長に反比例して広い。受光曲線形態は正規分布型を取ることは稀であり、受光曲線から算出される中央受光位置と最大受光位置が異なることが多い。中央受光位置と最大受光位置との差を垂直微動step(8秒角)単位で算出し、歪度Skewness (Skw)と呼んで、測定時に算出している(新妻, 1998)。最大受光位置が激しく振動する場合があるが、最大受光位置の変動に伴って歪度と光路気温が変動する。このような場合には受光量曲線の幅が広く、複峰性の形態を持ち、どの峰が最大受光量になるかによって最大受光位置が変化し、歪度が急変する。

観測された受光量曲線は、谷津山光路については2峰性よりも3峰性のものが一般的である。谷津山光路は、光路長が最短のために、透明度が良い場合には受光量が飽和する場合があり(Fig. 4acdghjk)、分峰が判定できない場合があるが、前後する受光量が減少する時間帯の峰の状態から推定が可能である。夜間に3峰が発達し、最大受光位置は中央の峰にあるが、上方の峰にある場合もある。日照とともに上方の峰が減衰し、下方の峰が増大し、最大受光位置は下方の峰に移動する。受光量曲線の幅は、冬季に広く、夏季に狭い。深夜から明け方までは、中央あるいは上方の峰に最大受光位置があり、光路気温は上方の峰が高い。昼過ぎから夜半にかけては、上方と中央の峰に最大受光位置があり、上方の光路気温が下方よりも高く、その差は5℃に達することもある(Fig. 4acgjk)。光路気温の日周変動において、昼前に気象台気温と比較して5℃以上も低下する。この光路気温の低下を「昼前異常低温」と呼ぶことにする。光路気温の昼前異常低温は、年間を通じて明瞭に認めることができ、昼過ぎに光路気温が急上昇して気象台気温とほぼ等しくなり、高温の上方峰が発達する。異常低温期には上方の峰が減衰あるいは消失する。夏季には、気象台気温は昼間に夜間よりも上昇するが、上空の谷津山光路気温の昼前異常低温期間が長くなり、昼間の光路気温は夜間よりも低下する夜昼逆転現象が起こる(Fig. 4fghi)。

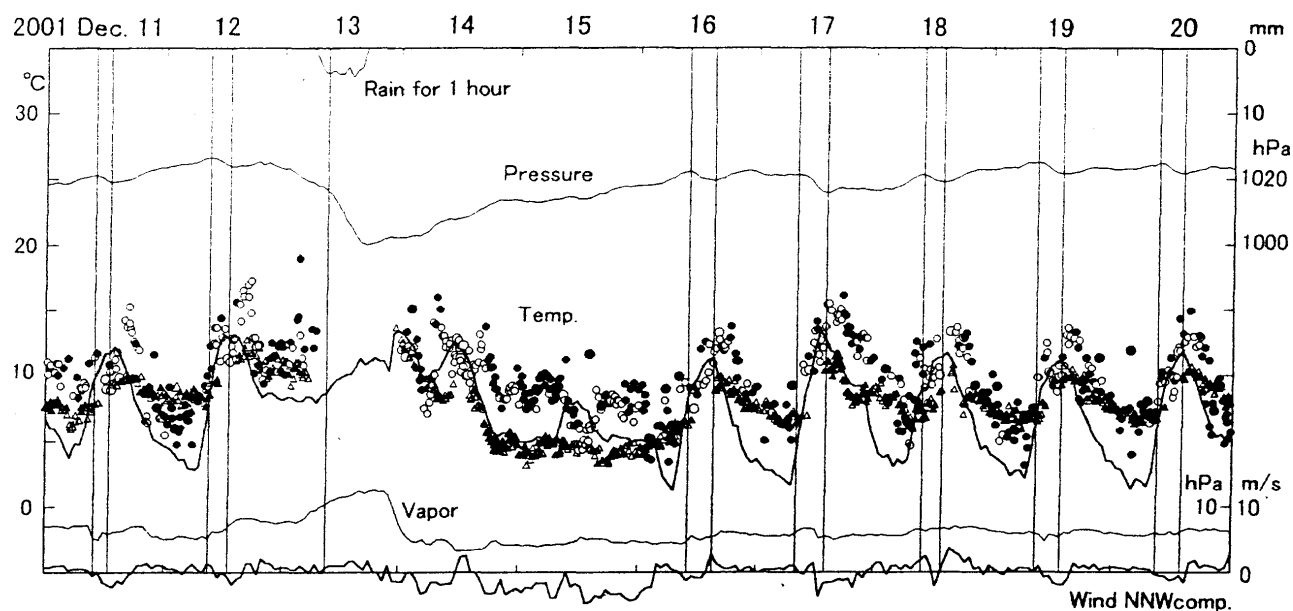


Fig. 3 常時測距観測結果から算出された10日間の光路気温と静岡気象台観測の気象資料の関係。

Ten days routine processing results on calculated laser path temperatures and meteoric data at Shizuoka Station of Japan Meteorological Agency.

作図は測距測定・解析用プログラムLR1にて行った。This graph was drawn with newly developed software LR1. 丸印circle: 谷津山光路気温temperature of Yatsuyama Laser Path, 三角印triangle: 山原光路気温temperature of Yambara Laser Path. 白抜open: 正歪度positive skewness, 黒塗solid: 負歪度negative skewness. 気象資料meteoric data: 1時間降水量 one hour precipitation in mm, 気圧 atmospheric pressure in hPa, 気温 temperature in °C, 蒸気圧 vapor pressure in hPa, 風速北北西成分 NNW component of wind velocity. 太縦目盛 thick vertical mark: 日境界 beginning of day, 細縦線 thin vertical line: 気圧極大・極小 maximum and minimum of atmospheric pressure.

山原光路では単峰の時間帯もあるが、下方に歪んでおり(正歪度)、分峰する場合には上方に峰が加わる。最大受光量は下方の峰が殆どであるが、冬季の12月から2月にかけて上方の峰が最大受光量になる場合も稀にある(Fig. 4abl)。夜間に2峰性になり、昼から夕方までは単峰になることが多い。明瞭な2峰になるのは12月から3月の冬季であり、夏季には単峰となる。山原光路気温にも「昼前異常低温」が認められる。ただし、この異常低温時には欠測が多い。

鳥坂光路は、2峰から3峰の受光曲線を持ち、谷津山・山原光路よりも顕著な変化をしている。夏季にはほぼ同じ高さの峰を持ち、最大受光位置は、両峰を交互に移動する。光路気温は、夏季の8月には、負歪度の上方の峰が1℃程度低く(Fig. 4h)，秋季の11月には殆ど差がない(Fig. 4k)。8月には、夜間に下方の峰、昼間に上方の峰が強化されるが、11月には、夜間に上方の峰、昼間に下方の峰が強化される季節変化が認められる。「昼前異常低温」も認められ、異常低温期には、上方峰が消失し、受光量曲線が下方に移動し、さらに下方に峰が形成される。

賤機光路は、反射プリズムを設置してから間がないことと、測距儀の垂直微動用モータの作動が安定しないため、他の光路に比較し、連続的に受光量曲線が得られていない。2001年4月から6月には、受光量曲線が得られ(Fig. 4d)，夜間に受光量曲線が上方に移動するが、移動量は、谷津山・山原の両光路に比較して大きい。光路気温に「昼前異常低温」が認められる(Fig. 4de)。

#### 中央受光位置の日周変化と気温勾配

大気中の光路は、大気的光速度構造によって変化する。高温の大気は光速度が大きいので、光路付近に気温勾配が存在すれば、気温勾配に対応して光路は変化する。光波測距に使用している780nmのレーザー光速度は、気温に対して1.2ppm/℃、気圧に対して-0.37ppm/hPa、水蒸気圧に対して0.052ppm/hPa変化する。谷津山光路は静岡地方気象台よりも93m上空で、気圧が11hPa低いので、光路気温が気象台気温よりも3.1℃低ければ、気圧と気温による光速度勾配は相殺し、レーザー光は直進する。山原光路は平均263m上空であるので8.8℃、鳥坂光路は平均142m上空で4.7℃、賤機光路は平均114m上空で3.8℃低ければ光速度勾配は相殺し、直進する。

一定光速度勾配の場合には、光路は光速度勾配に反比例する曲率半径の円弧となり(須田, 1976)、光速度勾配が1.57ppm/10m、温度に換算して1.21℃/10m、の場合に曲率半径は地球の半径と等しくなる。光路が直進する場合と地球の曲率半径で屈曲する場合の光路の方向差は、2海里=3.70kmで1分角となる。谷津山光路長は3.71kmであることから1分角となり、10.55kmの山原光路では2分51秒角、6.46kmの鳥坂光路では1分45秒角、6.93kmの賤機光路では1分52秒角の場合に光路の曲率半径が地球の曲率半径と等しくなる。

観測された中央受光位置には明瞭な日周変化が認められ、昼間に下向きで夜間に上を向く。中央受光位置の振幅は約1分角と、地球表面の曲率程度である(Fig. 4)。昼間には地表の日射加熱により、下方ほど高温になる

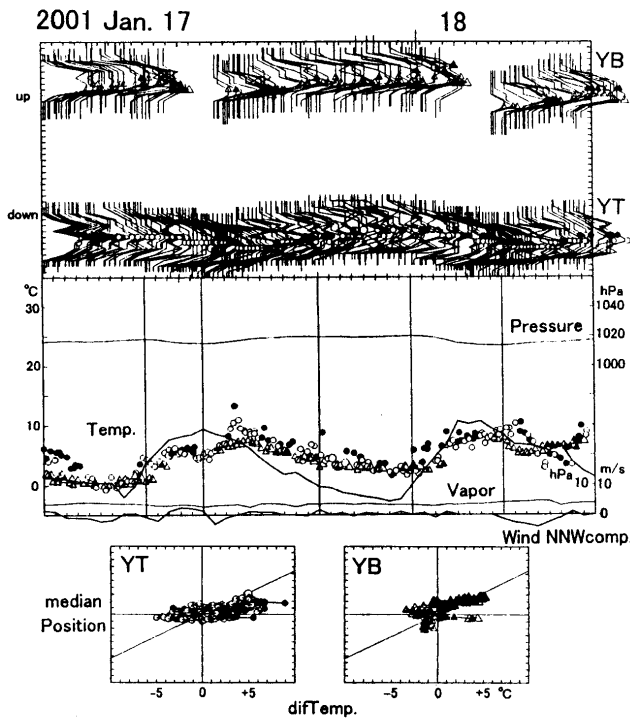


Fig. 4a

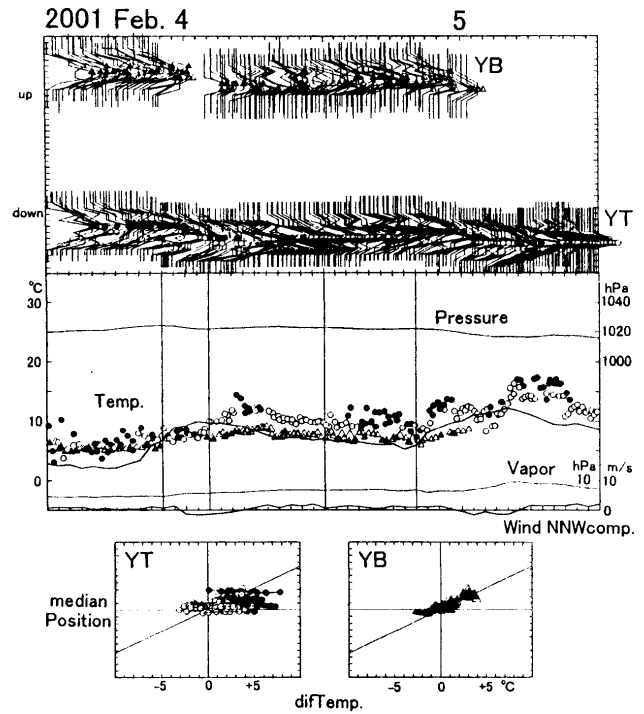


Fig. 4b

Fig. 4 2001年の各月2日間の受光量曲線(上), 光路気温と静岡気象台観測資料(中), 中央受光位置と光路・気象台気温差の関係(下).

Two days result of laser intensity curves with the stepwise vertical directional adjustment (upper), laser path temperature with meteoric data (middle), and relation of median position of laser intensity curve and temperature difference between laser path and Shizuoka Station of Japan Meteoric Agency (lower), for each month of 2001.

丸印circle: 谷津山光路Yatsuyama Laser Path, 三角triangle: 山原光路Yambara Laser Path, 四角square: 鳥坂光路Torisaka Laser Path, 逆三角inverted triangle: 賤機光路Shizuhata Laser Path. 白抜open: 正歪度positive skewness, 黒塗solid: 負歪度negative skewness.

作図は測距測定・解析用プログラムLR1にて行った. This graph was drawn with newly developed software LR1. 下図の斜線は, 気温勾配・光路曲率半径関係から導かれる光路位置と気温差の関係. Oblique line in the lower graphs represents relation between temperature gradient and curvature of laser path.

- |                   |                   |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| a. 2001年1月17-18日  | b. 2001年2月4-5日    | c. 2001年3月12-13日  |
| d. 2001年4月15-16日  | e. 2001年5月14-15日  | f. 2001年6月16-17日  |
| g. 2001年7月26-27日  | h. 2001年8月16-17日  | i. 2001年9月18-19日  |
| j. 2001年10月13-14日 | k. 2001年11月15-16日 | l. 2001年12月19-20日 |

ため, 光路が光速度の大きい下方を向く. 光路と気象台の気温差から算出される平均気温勾配と中央受光位置の関係は, 平均すれば一様な気温勾配に伴う光路屈曲の理論値と良く対応しており(Fig. 4), 光路付近の気温勾配は, 大局的に平均気温勾配と等しいことを示している.

#### 複峰性受光曲線と光路内全反射現象

複峰性の受光曲線は, レーザー光の往復に複数の径路が存在していることを示している. 特殊な大気の状態において, 光が複数の径路を通過する現象は, 猛暑の路面に見られる「逃げ水」や低温の融雪水が海表面を被って生じる「蜃気楼」などがある. これらは, 気温急変面における全反射現象である.

全反射現象には臨界角が存在し, 反射面に直交する方向を0とすると, 臨界角以上で反射面に入射した光は全反射する. 臨界角 $\alpha$ は, 反射面における光速度差 $\Delta v$

と対応し, 次式で表わされる.

$$\Delta v = 1 - \sin(90 - \alpha)$$

谷津山光路では, 受光される垂直微動範囲が10 step程度の80秒角であり, その中に3つの峰が存在することから, 峰の間隔は20秒角程度である.

反射面における気温差が1℃の場合には, 光速度に1.2ppmの差が存在し, 入射角の反射面方向との差 $\Delta\alpha$ が5分角以下の場合に全反射する. 3.7kmの光路において, このような全反射が起こり, この反射面が直線光路から3m以内に存在すれば観測されることになり, 光路長は最大6mm増加する.

受光量曲線の峰間隔が20秒角程度であることから, 気温差0.03℃以上の反射面が, 直線光路の10cm以内に存在すれば全反射光が入射することになる. 谷津山光路気温と気象台気温の差の日周変動幅は, 10℃程度であり, 光路までの高度93mから平均気温勾配の変化は0.1℃/mと算出され, 谷津山光路において気温差に起因する光路の全反射は充分起こることが分かる.

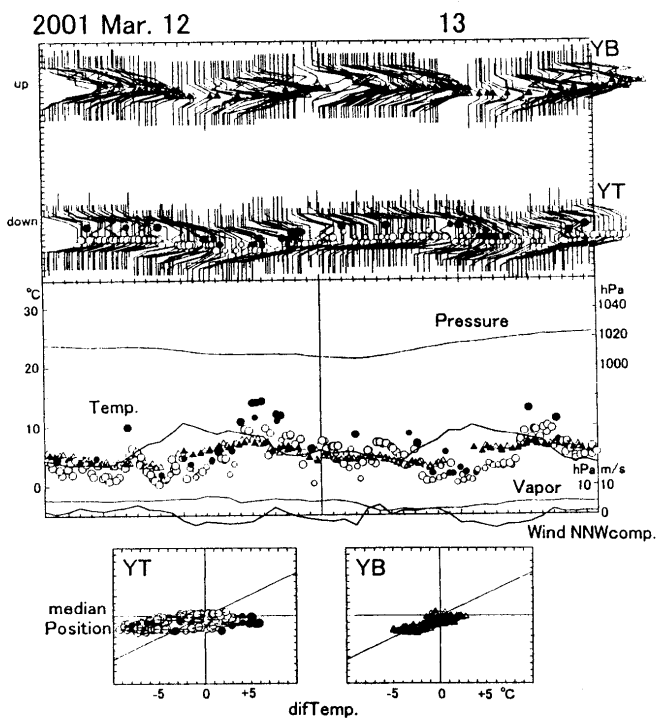


Fig. 4c

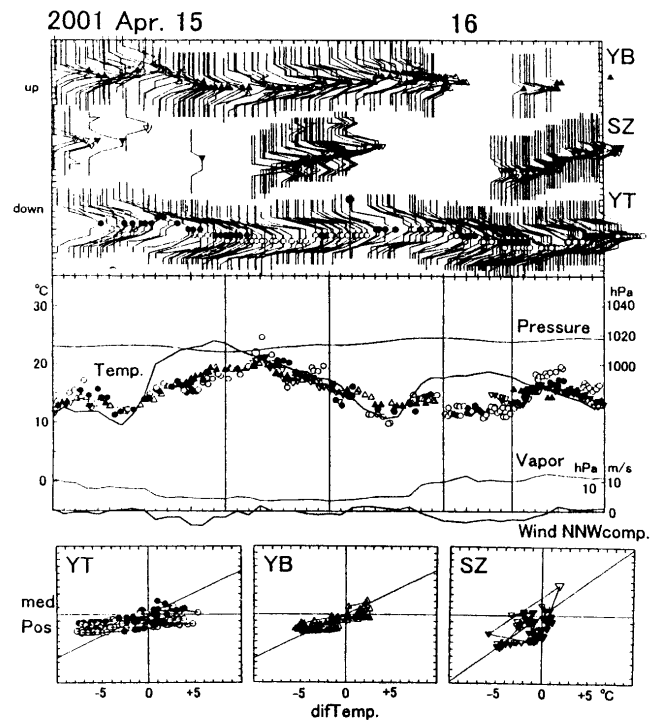


Fig. 4d

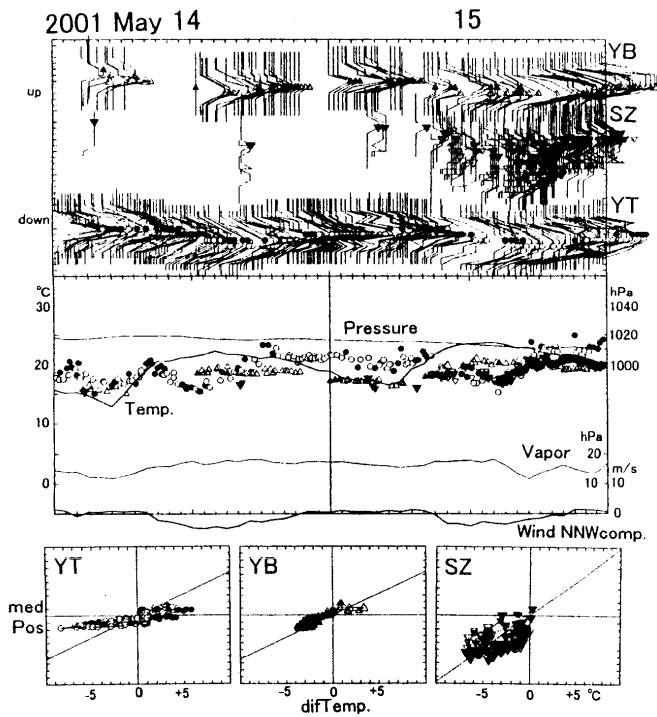


Fig. 4e

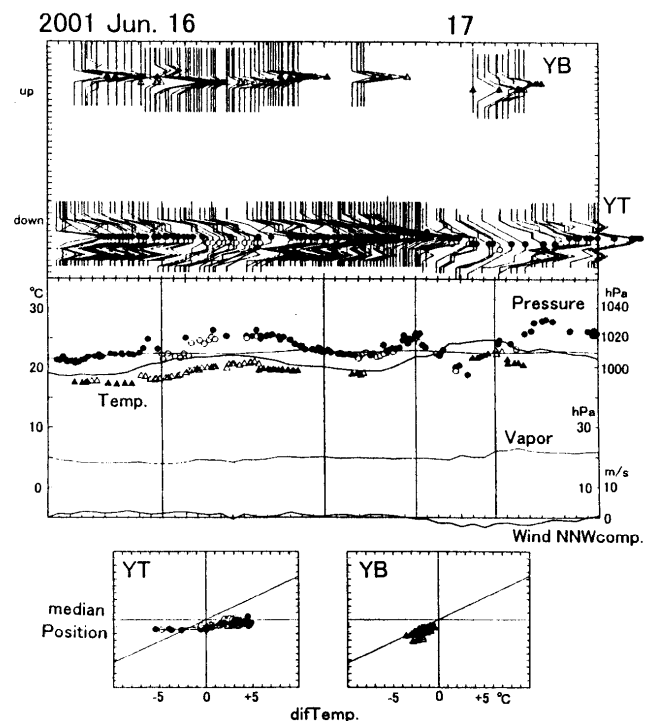


Fig. 4f

受光量曲線における最大受光位置、光路周辺の全反射などによって変動しているが、谷津山光路では、上方の峰(負の歪度)において測定された光路気温が高温であり、この光路気温差は5°Cに及ぶこともある。上方の峰が曇気楼型の反射光の場合には、反射面上側が高温で下側が低温となり、直線光路が低温側、反射光が高温側から来ることから、測定された光路気温の差

と良く対応している。光路が高温側境界面で反射されると、反射点でのみ高温側と接し、光路の大部分は低温側を通過することから、光路の気温に大きな差を生じることは困難である。光路が臨界角で高温側境界面に入射すると、光路は境界面の高温側を通過し、臨界角で出射すれば、光路気温は高温側の気温に近づき、光路気温に大きな差を生じることができる。光路気温

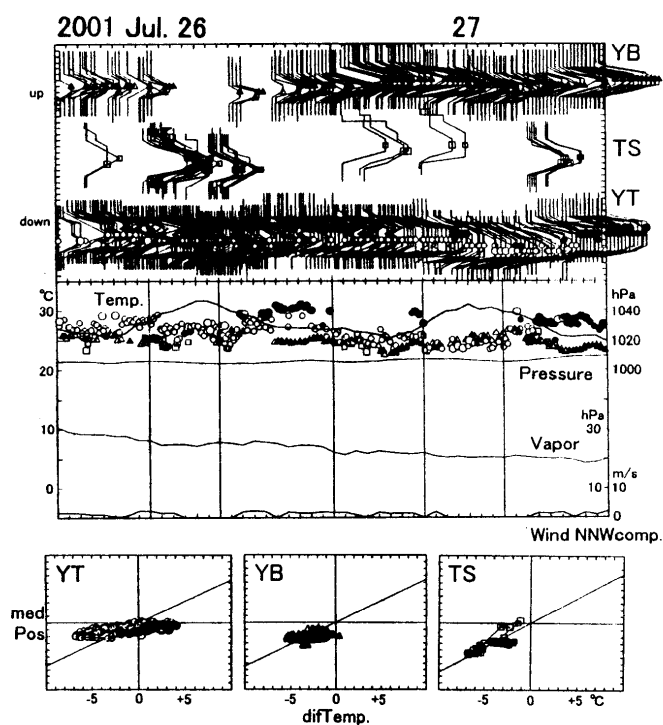


Fig. 4g

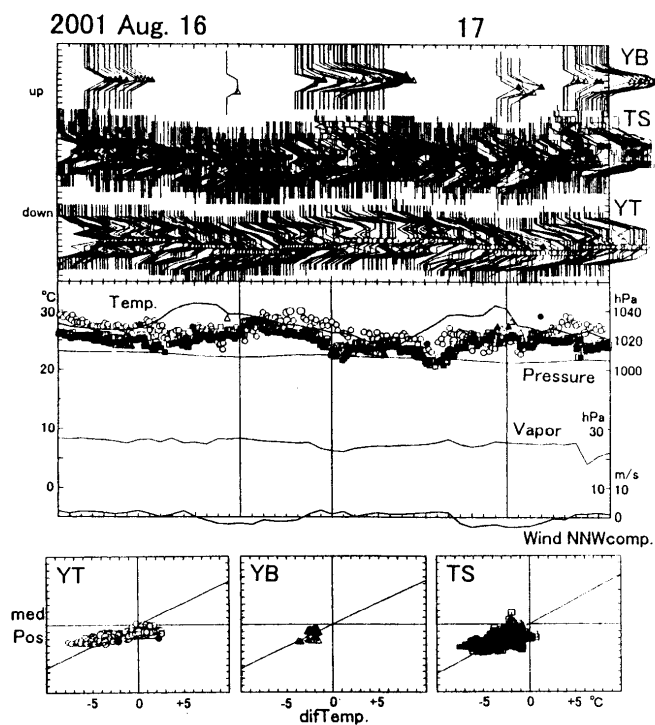


Fig. 4h

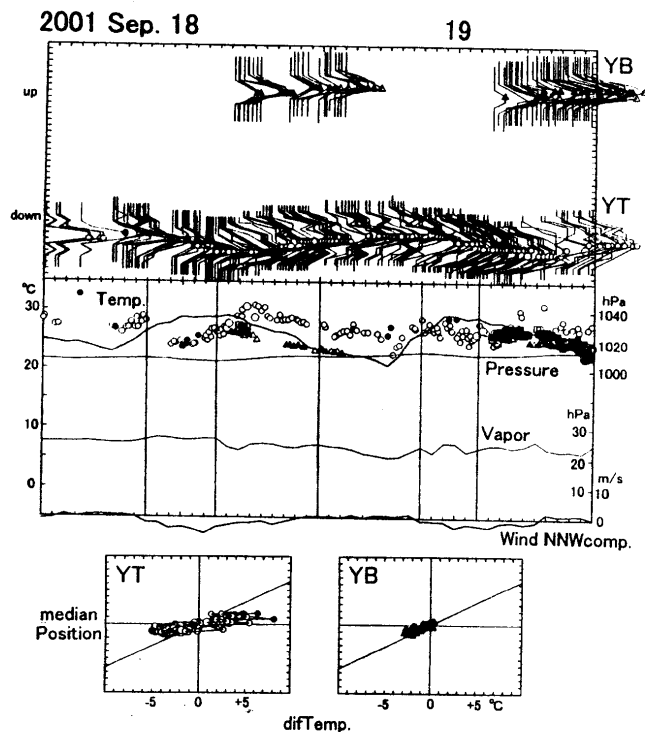


Fig. 4i

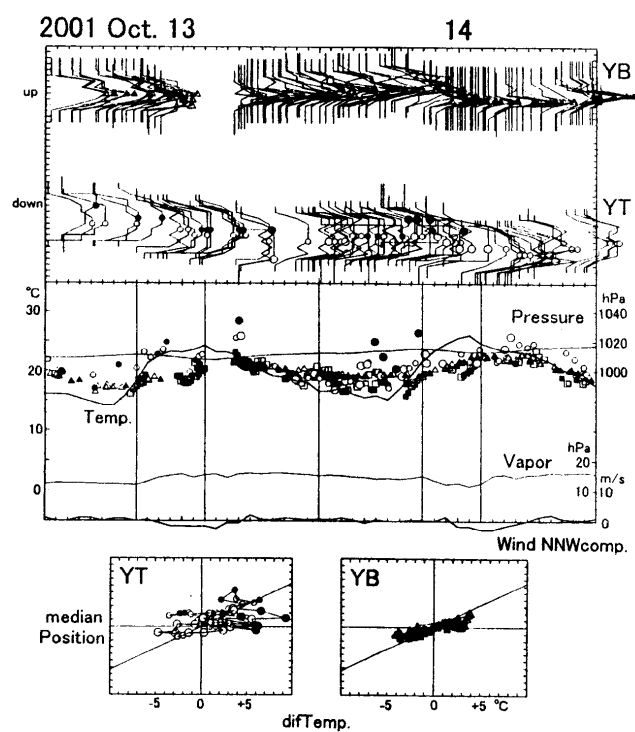


Fig. 4j

に大きな差が存在する場合には、臨界角入出射が起きていることが予測できる。

密度の低い高温の大気が密度の高い低温大気を被っている状態は、重力的に安定であり、成層構造を発達させる。高温の光路気温を持つ上方の峰は、光路上方の安定な境界面に臨界角で入射・出射したレーザー光が測距鏡に戻ってくることによって形成されるのであ

ろう。谷津山光路では、昼過ぎから明け方まで、上方の峰が定常的に存在しておりその安定性が、昼前異常低温の時間帯にのみ消失する。

受光量曲線が3峰性の場合に、下方の峰における光路気温は中央の峰に比較して高温であることが多く、この峰は逃げ水型の光路を通過してきたものと考えられることができる。逃げ水型では、高温の大気を低温の大気

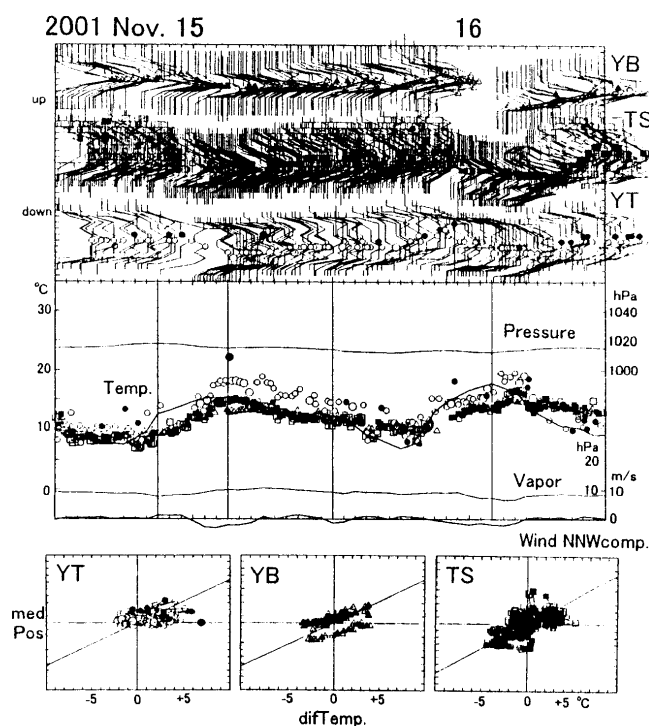


Fig. 4k

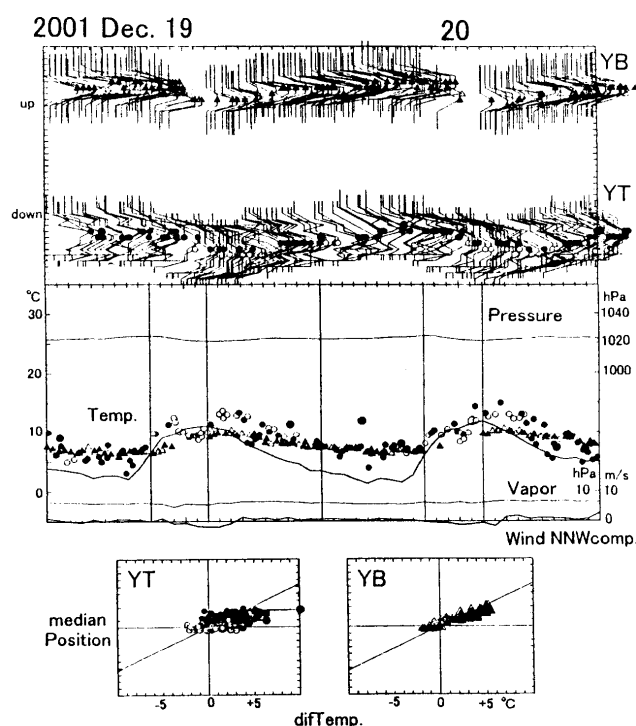


Fig. 4l

が被っているので、重力的に不安定であり、上昇気流の発生によって容易に破壊されてしまう。3峰性の受光曲線が長時間継続しないのは、この不安定に起因するであろう。

以上の検討から、歪度が小さく、受光量曲線の中央にある峰は、レーザー光が直接往復して形成された峰と考えることが可能であり、上下の峰は臨界角入出射あるいは全反射光路を通ったものである。

山原光路は光路長が長いために受光量曲線の幅が、最大でも6 step程度であり、谷津山光路よりも鋭い曲線となっており、常に主峰に最大受光位置が存在するが、夕方から朝まで上方の峰が加わって2峰性となることもある。稀に上方の峰に最大受光位置が存在する場合があるが、その光路気温は、主峰に比較し、1℃程度高く、蜃気楼型の臨界反射を示唆している(Fig. 4a)。主峰位置の変化は、気温勾配変化による光路の曲率半径変化に沿っている。

谷津山光路の受光量曲線に、顕著な多峰性が認められることは、光路長が短く、標高が低いという条件の他に、光路がほぼ水平であることが重要と考えられる。大気に成層構造が形成された場合には、境界が光路と平行していることが反射峰を得る重要な条件となるからである。また、谷津山光路の反射プリズムは谷津山山頂に設置されており、水平な光路の下は、谷津山丘陵と有度丘陵に囲まれた半盆地状の地形となっているために、谷津山山頂が大気構造の境界になることが多いためにも反射峰が多発する理由であろう。

#### 昼前異常低温と受光量曲線

受光量曲線は、昼前異常低温時における急激に下方に移動することによって、大気構造変化を伴っていることを示している。下方に移動した受光量曲線は、翌日の朝まで次第に上方に移動する鋸歯状の変動を行っ

ている(Fig. 4)。昼前異常低温開始時の受光量曲線の急激な下方移動は、気温勾配の急激な増大を示している。気温勾配の増大には、日射加熱による地表気温の上昇と上空への冷気の流入の2つが考えられる。日出とともに急上昇した気象台気温が昼前異常低温開始とともにその昇温速度を減ずることから、光路付近へ冷気が流入し、その影響が地表気温にまでも影響を与えていると考えられる。光路気温が急低下することが異常低温であり、この低下が流入冷気の気温を直接示していることになる。

昼前異常低温時には、受光量曲線の形態も大きく変化している。受光量曲線の下方移動開始まで安定に存在していた上方峰が突然消失し、下方の峰が突然発達するために歪度が正に急変する。上方峰の消失は、夜間の安定な成層構造の破壊が突然起こることを示し、光路が下方に移動する正の歪度は逃げ水型の反射峰と考えることができ、中央峰と下方峰における光路気温に著しい差が検出されない。測定峰にかかわらず光路気温は一定であり、下方峰は全反射によることが示唆される。高温の大気を低温の大気が被う構造は、重力的に不安定であるので、一般に短時間のうちに消失するが、昼前異常低温期には安定に保たれる。日射加熱は増大することから、地表で過熱された気塊は上昇するが、その上昇分を補償するために冷気が定常的に流入し、逃げ水型の大気構造が保たれているからであろう。

昼前異常低温が認められ始める季節である11月には、鳥坂光路で谷津山・山原光路よりも著しい受光量曲線の下方移動が起こっている(Fig. 4k)。受光量曲線は、明瞭な2・3峰を有しており、異常低温期以後に峰の分立が次第に増大し、異常低温期開始前に最大となる。この変化も鳥坂光路が最も明瞭で、谷津山そして山原光路がそれに次ぐ。山原光路でも、異常低温期開始前には上方峰が明瞭に現われている。谷津山光路では上

方峰において測定した光路気温が5℃も高いことがあるが、鳥坂光路においてはどの峰で測定しても光路気温に有意な差がない。

### 光路気温の昼前異常低温と気圧および風向の変化

光路気温の昼前異常低温は、地表の気象台気温にもその影響が認められる。日出とともに気象台気温は急上昇するが、昼前に上昇速度が落ちて穏やかになる(Fig. 4)。この気温上昇速度の低下と光路気温の異常低温は、良く対応している。また、光路気温の変動と同調して気象台気温の変化も認められることから、昼前異常低温は、気象台上空に流入する冷気の状態を現していると考えられる。

気圧の日変化は、年間を通して存在し、日照開始頃に気圧の極大があり、昼過ぎに気圧の極小がある。この日変化は、日射による地表過熱による上昇流が気圧変動として現われていることを示している。昼前異常低温は、気圧の極大と極小の時間帯に対応して起こっている(Fig. 4)。この関係は、昼前異常低温が局地的な気塊運動によるものではなく、接地境界層全体に及ぶ日周変化であることを示している。この気圧の日周変化は、気圧の谷が通過する場合には、極大・極小が乱されるためにそれらの時刻を単純に決定することはできないが(Fig. 3)、そのような例外を除いて常に成立している。夜明け前には地表の放射冷却のために気圧が上昇し、昼過ぎには日射による地表加熱によって気圧が低下するという日周変化が年間通じて繰返されている。この気圧の日周変化を光路気温や地表気温・蒸気圧・風向・風速と対応させるために、自動的に気圧の極大・極小を求め、作図できるようにLR1を改良した(Fig. 3, Fig. 4)。

気圧の変化は地表過熱による気塊の上昇に起因することが、風向変化・風速の変化から知ることができる。静岡地方気象台は、北東-南西方向の丘陵である谷津山の南東麓に位置しており(Fig. 2)、風向は北西および南東と日周変化しており、風速は南東風の方が大きい。光路の異常低温の程度と風向・風速変化を定量的に解析するために、LR1に改良を加え、作図対話窓に風向設定欄を設け、指定風向成分の風速グラフを作図できるようにした。複数の光路について連続して2日間光波測距がなされている期間を各月から選定し、16方位風向を指定することにより、どの風向が昼前異常低温と関係しているかを解析した。その結果、南・南南東・南東方向の風速成分が最も良く対応していることが判明した。

この風速成分は、昼前異常低温のみならず、気象台と光路気温との差と良く対応しており(Fig. 4)、静岡地域の大気構造に大きな影響を与えていると言えよう。昼前異常低温は、日射による地表加熱のみでは起こらず、冷気の流入が必要であるが、この冷気は静岡地方気象台へ南東方ないし南方から供給されいることから、南東方の有度丘陵北西斜面および南方の海域が供給源であることが分かる(Fig. 2)。

日出とともに気象台北西方の谷津山丘陵の南東斜面が加熱され、気象台気温は急速に上昇する。上昇気流が形成されると、上昇を補償するため冷気が流入し、気温の上昇は緩やかになる。気象台南東方の有度丘陵の北西斜面は、夜間の放射冷却によって冷気を蓄えていることと、太陽の高度が上がるまで日陰になってい

ることから、冷気の供給源となる。昼前異常低温は、上昇気流の形成と気象台およびその上空への冷気供給によって継続するが、冷気が供給され尽くされると、静岡地域全域にわたる大規模な対流がおり、気象台気温と光路気温の差も解消し(新妻, 2000)、風向も変化する(Fig. 5)。

### 地殻変動監視用の光波測距時間帯と歪度範囲の決定

光路気温と気象台気温との差が系統的に変化し、それが気象状況に関係ない場合には、光路基準長が変化したとして、地殻変動を監視するために使用することができ。光路気温と気象台気温の差は、激しい日周変動を伴っており、季節変動もある。光波測距定常観測を開始してから4年を経て、充分な観測資料が集積したので、日周変動や季節変動を定量的に除くための解析を行う。

測定中に光路気温が変動する場合は、光路状態が不安定なことを示しており、地殻変動監視のために光路長の変化を算出するには適していない。光路の安定度は、10回の測距結果から算出される標準誤差によって定量的に知ることができる。地殻変動解析のためには、標準誤差の小さいものを選別し、使用した。最大標準誤差の値は、光路長に対応して0.15℃(谷津山)、0.10℃(鳥坂・賤機)、0.075℃(山原)を使用した。これらの光路気温誤差は、測距長に対して0.6mmから0.7mmの標準誤差に対応している。この制限によっての43845の測定結果が選別された。

標準誤差選別後の測定値を1時間毎の時間帯に区分し、平均値と標準偏差を算出したところ、著しい日周変化が明らかになった(Table 1)。標準偏差の小さな時間帯は、4年に渡る期間において光路の気象状態が安定していることを示しており、距離変動を知るための測定には適した時間帯といえる。時間帯による標準偏差の変化は、光路によって異なり、谷津山光路と賤機光路では夜間に標準偏差が小さく日中に大きくなるのに対し、山原光路と鳥坂光路は日中に小さく夜間に大きくなる。標準偏差の小さい時間帯を距離変動解析のための時間帯とし、谷津山と賤機の光路については0時から4時、山原と鳥坂の光路については14時から17時の時間帯を設定した。この制限によって7350の測定結果が選別された。

受光量曲線が複峰性の場合は、測距を行った峰によって光路気温が数℃も異なることがあるので、測定を行った最大受光位置と中央受光位置との差Skwが小さな測定結果を選別した。LR1の表示画面において、Skwの制限範囲を変更しながら気温差分布の両端に分散している測定値が除かれるように、制限範囲を設定した。谷津山と賤機の光路についてはSkwが0から1の範囲、山原と鳥坂の光路においては-0.5から1の範囲に設定した。この制限によって5426の測定結果が選別された。垂直微動の自動制御を開始した1998年3月以前の測定については、Skw制限を行っていないので分散が大きい(Fig. 6)。

### 光路長の変動

繰返し測定によって求められる標準誤差、時間帯および歪度Skwによって選別された測距長と基準長との差を各測線毎に作図した(Fig. 6)。

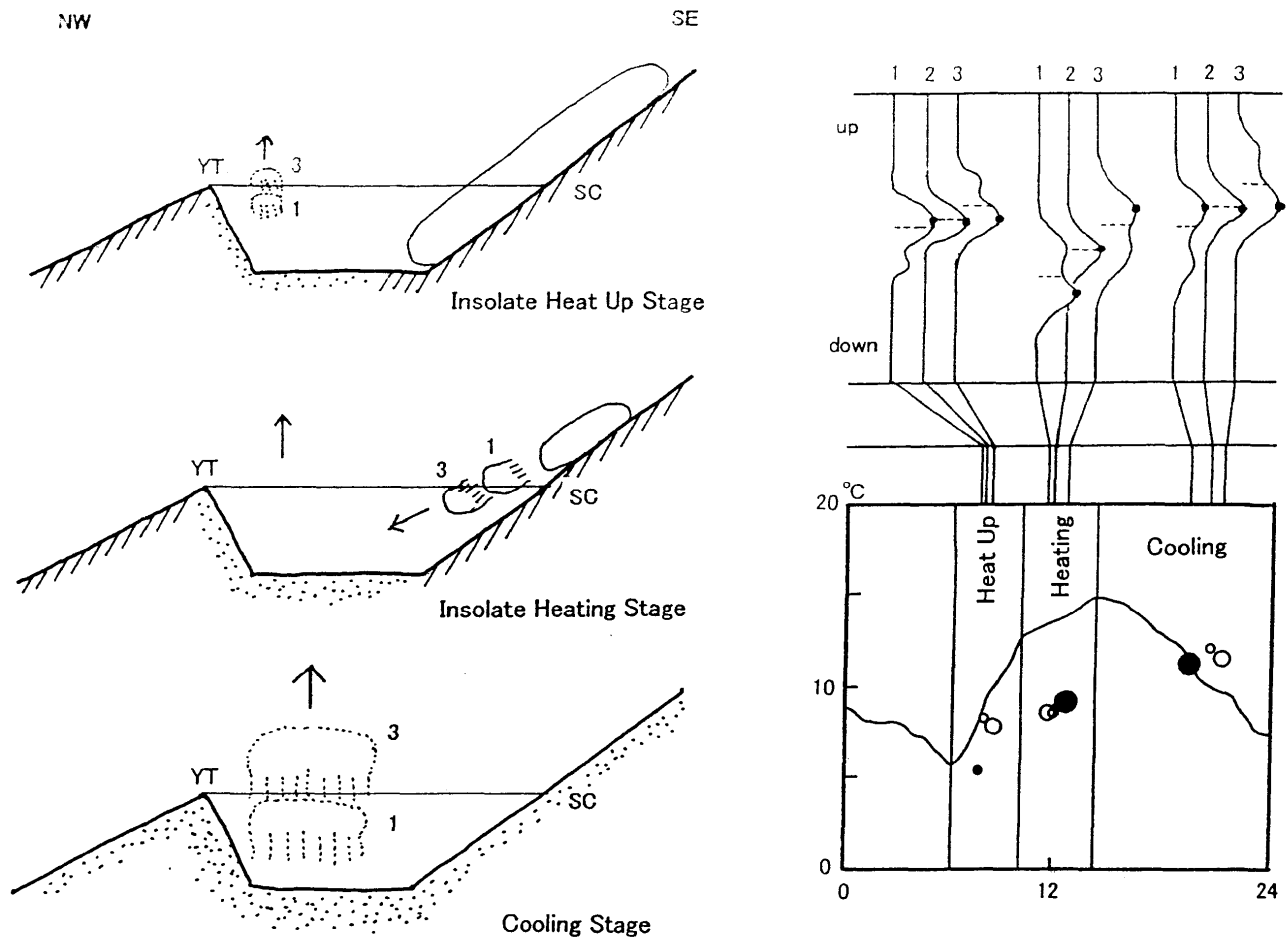


Fig. 5 急昇温期・緩昇温期・降温期における暖気塊上昇・冷気塊下降と谷津山光路における受光量曲線の形態と歪度および光路気温・地上気温の関係 (新妻, 2000).

Lifting of warmer air mass and sinking of cooler air mass in the insolate heat up, insolate heating and cooling stages, and laser path temperature and skewness of laser intensity curve referring surface temperature (Niitsuma, 2000).

左図 Left Figures: 気塊の移動(矢印), 地表加熱状態と谷津山光路. 点線が暖気塊, 実線が冷気塊. 地表の点は日射加熱の程度を表し, 斜線は未加熱部.

Movements of air mass (arrow), insolate heating of surface and Yatsuyama laser path. Dotted line for warm air mass and solid line for cool air mass. Dots mark for insolate heating of surface and shade mark for non-heating surface. YT: Yatsuyama, SC: Crustal Activity Observatory of Shizuoka University on the Udo Hills.

右図横軸は時間 Horizontal axis in Right Figure corresponds to time.

谷津山光路 (Fig. 6: circle) については, 1996年から連続観測があり, 基準長から $\pm 2\text{cm}$ の変動が明らかである. 1997年3月から光路長が伸長を開始し, 基準長よりも長い期間が1998年末まで続く. 1999年夏以降は, 光路長が突然短縮し, 次第に伸長する鋸歯状の変動を示している. 最初に急激な短縮が起こったのは, 1999年10月であり, 光路長が基準長から $2\text{cm}$ 短縮している. 鋸歯状の変化の周期は約1年ではあるが, 短縮が起こったのが2000年には9月, 2001年には8月とその周期は1年よりも短いようである.

山原光路 (Fig. 6: triangle) については, 1998年から連続観測を開始したが, 測距儀の故障によって1999年に測定を中断している. 光路長の最大の変化は, この中断期に起こっており,  $6\text{cm}$ 短縮している. 観測再開は, 谷津山光路の突然の短縮よりも前の9月であり, 山原光路の短縮が先行していたことになる. この短縮以降は, 谷津山光路と同様に鋸歯状の変動を示すが, 短

縮は2段階で起こっているようである. 最初の短縮は谷津山光路の短縮と同期して起こっているが, 2回目の短縮は谷津山光路では明確ではない.

鳥坂光路 (Fig. 6: square) については, 2000年から連続測定を開始したが, 測距儀の故障で中断しており, 2001年に再開したが, 2001年11月からは中断してしまっている. 光路長変化は, 山原光路と良く対応している.

賤機光路 (Fig. 6: inverted triangle) は, 2000年12月に連続測定を開始したが, 測距儀の故障のために, 観測期間が短く, 測距長の変動を得るにいたっていない.

#### 光路長変動と草薙断層・麻機断層の活動

谷津山光路の光路距離は $4\text{cm}$ の幅, 山原光路においては $8\text{cm}$ の幅で伸長・短縮を行っている (Fig. 6). この変動は, 夏季に光路長が伸長し, 冬季に光路長が短縮しているように見ることが出来るが, 最も短縮する時

**Table 1** 1998年3月から2002年3月までの4年間の光路気温標準誤差制限（谷津山0.15℃，山原0.075℃，鳥坂・賤機0.10℃）以下の測定値についての気象台気温と光路気温の差と標準偏差の時間帯による変化 [測定数].

Difference and the standard deviation between laser pass temperatures and surface temperatures at Meteorological station in one-hour time-zone for four years from March 1998 to March 2002 [number of measurements].

| 時間 (Time) | 谷津山 (Yatsuyama)  | 山原 (Yambara)     | 鳥坂 (Torisaka)    | 賤機 (Shizuhata)   |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0         | 0.28±2.61 [842]  | 0.58±1.83 [527]  | 0.61±1.45 [204]  | 0.33±1.04 [ 59]  |
| 1         | 0.35±2.51 [781]  | 0.87±1.88 [538]  | 0.70±1.72 [388]  | 0.48±1.08 [ 76]  |
| 2         | 0.47±2.68 [699]  | 1.05±1.90 [531]  | 0.43±1.69 [243]  | 0.72±0.96 [ 62]  |
| 3         | 0.15±2.67 [705]  | 1.20±2.02 [511]  | 0.41±1.87 [248]  | 0.59±1.10 [ 49]  |
| 4         | 0.63±2.70 [652]  | 1.48±2.05 [512]  | 0.44±1.98 [256]  | 0.76±1.19 [ 49]  |
| 5         | 0.30±2.72 [644]  | 1.20±2.24 [493]  | 0.52±2.21 [224]  | 0.68±1.10 [ 48]  |
| 6         | -0.23±2.62 [618] | 1.01±2.45 [450]  | 0.12±2.10 [208]  | 0.47±0.90 [ 52]  |
| 7         | -0.10±2.94 [621] | 0.09±2.16 [432]  | 0.24±1.65 [126]  | 0.05±1.08 [ 80]  |
| 8         | -0.09±2.95 [495] | -0.74±1.60 [328] | 0.01±1.53 [128]  | -0.21±1.42 [ 57] |
| 9         | -0.56±3.11 [351] | -1040±1041 [232] | -0.08±1.30 [ 71] | -0.37±1.59 [ 35] |
| 10        | -1.07±3.29 [287] | -1.77±1.39 [178] | -0.04±1.43 [ 50] | 0.27±0.83 [ 14]  |
| 11        | -1.33±3.12 [244] | -2.00±1.23 [172] | 0.38±1.09 [ 72]  | -2.92±0.96 [ 11] |
| 12        | -1.04±3.23 [246] | -2.11±1.15 [196] | 0.26±1.37 [ 93]  | -1.43±1.14 [ 13] |
| 13        | -0.66±3.41 [261] | -2.07±1.16 [268] | 0.37±1.32 [ 87]  | -0.60±1.14 [ 3]  |
| 14        | -0.44±3.44 [651] | -1.99±1.03 [426] | 0.14±1.49 [142]  | -3.14±1.08 [ 5]  |
| 15        | -0.09±3.28 [571] | -1.77±1.02 [665] | -0.10±1.59 [163] | -1.77±1.32 [ 12] |
| 16        | 0.51±3.15 [884]  | -1.40±1.08 [920] | -0.38±1.39 [184] | -0.65±1.09 [ 24] |
| 17        | 0.40±2.91[1208]  | -1.04±1.30 [848] | -0.41±1.52 [209] | -0.17±0.90 [ 67] |
| 18        | 0.19±2.73[1184]  | -0.81±1.48 [769] | -0.36±1.62 [242] | -0.21±0.75 [ 87] |
| 19        | 0.36±2.67[1192]  | -0.55±1.57 [777] | -0.22±1.69 [236] | -0.17±0.85 [110] |
| 20        | 0.28±2.64[1127]  | -0.31±1.66 [740] | -0.30±1.52 [256] | 0.04±1.11 [ 87]  |
| 21        | 0.33±2.64[1067]  | -0.03±1.67 [736] | -0.30±1.49 [246] | 0.29±1.03 [ 82]  |
| 22        | 0.30±2.53[1014]  | 0.09±1.80 [686]  | -0.34±1.46 [222] | 0.09±0.97 [ 62]  |
| 23        | 0.27±2.51 [934]  | 0.53±1.83 [596]  | 0.09±1.68 [232]  | 0.46±0.95 [ 61]  |

期が年末であり、最も伸長する時期も、気温が最高になる7月から8月よりも先行しているようである。気温と蒸気圧は明瞭な季節変化を示し、1月から2月にかけて最低、7月から8月にかけて最高となり、光路長変化よりも遅れていることから、光路の気象状態に起因する見かけの光路長の変動とは考え難い。光路長がこのような季節変化をしているとしても、1998年の冬季には1999年の夏季の光路長を保持しており、1999年冬季は1998年冬季と比較し、明確に短縮していることから、1999年秋季に光路長の短縮があったことは確かである (Fig. 6)。

静岡大学地殻活動観測所の傾斜計によると、降雨による地下水面変動にともなう短期的な変動の他に、振幅が約1分角の年周変化が観測されている (Fig. 6)。冬季には西北西方向に傾斜し、夏季には東南東に傾斜している。11月から12月に最大の西北西傾斜となり、2月から3月に最大の東南東傾斜となる。谷津山光路が伸長から短縮に変換した1998年秋には東北東に1分角以上変化している。傾斜の東西成分は、谷津山光路長変化と対応をさせると、西傾斜の時には光路長が伸長している。1998年秋を除くと東西成分と南北成分は対応して変化しており、西北西に傾斜した時に光路長が伸長している。

西北西方向は、有度丘陵の傾動方向であることから (Fig. 2)、傾動が進行すると光路長が伸長する対応が予想できる。傾斜計で測定された1分角の傾動が、光路長にどの程度の影響を及ぼすかを定量的に検討してみる。受光量曲線の幅が1分角程度あり、日周変動も同程度であり、1分角傾斜にともなう光路長の変化は谷津山光路について0.2mmと問題にならない。1分角の傾動

が円弧すべりのような広面積の面の傾動とすると、面に固定された回転軸の回りに回転していると考えることができ、回転軸からからの距離に比例して光路長変化が大きくなる。1分角の回転に対して距離を4-8cm変化させるためには、回転軸までの距離が140-280m以上離れていなければならない。傾斜の増大に伴って光路長が伸長していることから、回転軸が上空に存在し、地下の円弧状のすべり面に沿って回転しているという草薙断層についての予測と合致する (Fig. 7)。

草薙断層は地表面に円弧状に追跡でき (新妻, 2001)、その半径は10km程度であり (Fig. 2)、草薙断層の円弧すべり面がフィリピン海プレートに載り上げている駿河トラフ軸までの距離が約20kmであることから (Fig. 7)、回転半径は10km程度が予想され、観測されている光路長と傾斜の変化は、草薙断層の活動によって充分起こりうる範囲にある。

#### 光路長変動と伊豆半島東方沖地震

光路長変動と地震活動について解析結果を報告するが、用いた地震資料は、気象庁発行「地震・火山月報 (防災編)」の「日本及びその周辺で発生した主な地震と津波予報を行った地震」と「世界の主な地震」に記載されている地震である。

1997年に光路長が基準距離よりも伸長した3月3日から7日にM5.7を含む伊豆半島東方沖群発地震が活発化した。1998年3月から4月にかけて谷津山光路長が20mm伸長し、4月中旬に最長に達した後に伊豆半島東方沖群発地震の活動が4月21日に開始している (Fig. 6)。それ以後1998年12月まで短縮し、伊豆半島東方沖地震は静

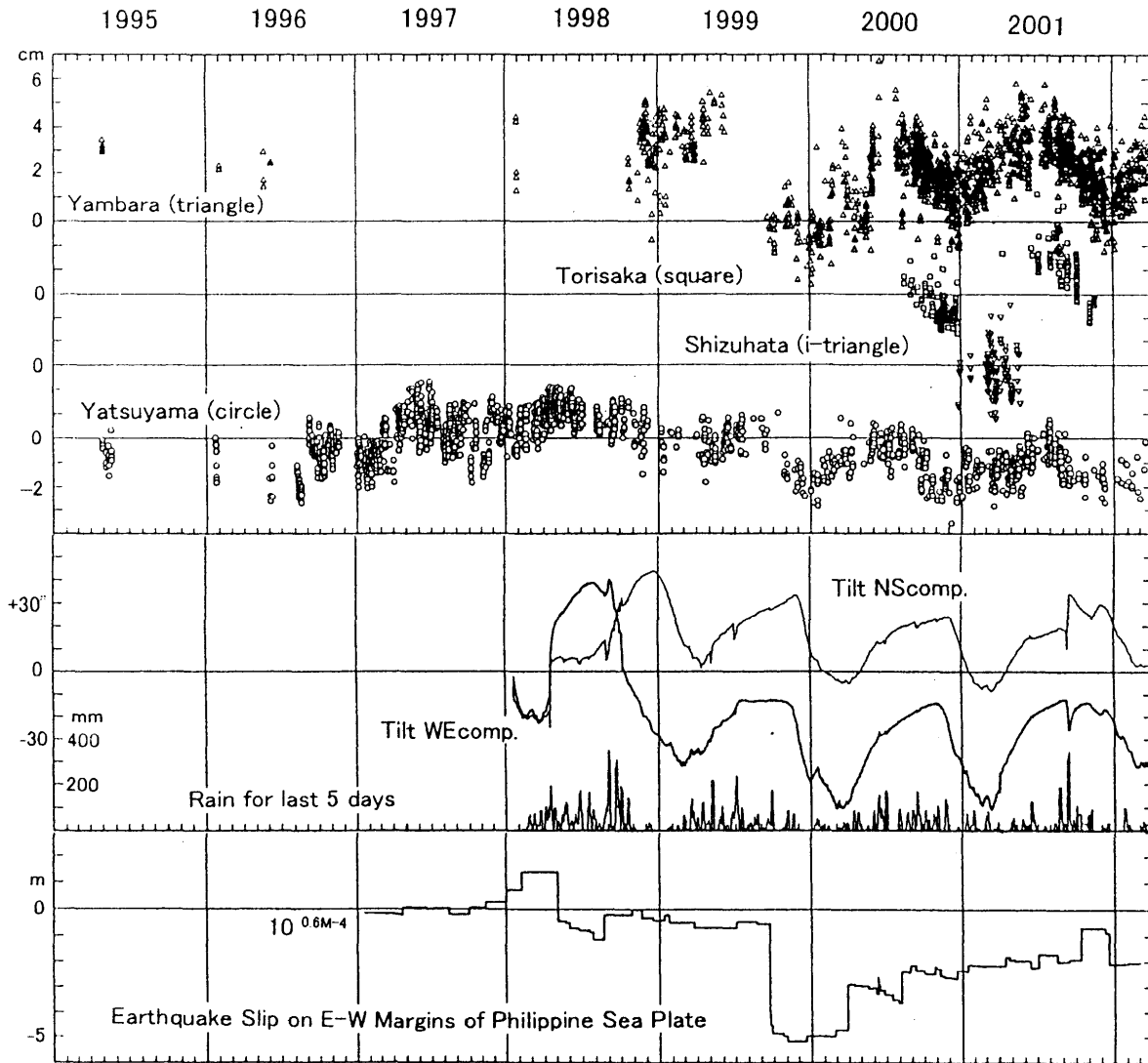


Fig. 6 光路変動・傾斜変動・フィリピン海プレート東西境界における地震マグニチュードMから算出された均衡。

Changes in the distance of laser paths (upper), tilt record (middle) and balance of the Philippine Sea Plate caused by earthquakes along eastern and western margins (lower).

上図Upper graph: 上が伸長, 下が短縮, 目盛間隔は1cm. Upper direction for extension, lower direction for shortening, and the interval of divisions corresponds to 1 cm. 丸印circle: 谷津山光路Yatsuyama Laser Path, 三角triangle: 山原光路Yambara Laser Path, 四角square: 鳥坂光路Torisaka Laser Path, 逆三角inverted triangle: 賤機光路Shizuhata Laser Path. 10回測定における光路気温の標準誤差が山原光路については $0.075^{\circ}\text{C}$ ・鳥坂光路および賤機光路については $0.10^{\circ}\text{C}$ ・谷津山光路については $0.15^{\circ}\text{C}$ 以下, 山原・鳥坂光路においては14-17時の歪度が $-0.5$ から $+1.0$ , 賤機・谷津山光路においては0-4時の歪度が $0$ から $+1.0$ の測定結果を使用した. The plotted data are distances of Yambara Laser Path with less than  $0.075^{\circ}\text{C}$  of standard error on ten repeated measurements for 14:00-17:00 with skewness from  $-0.5$  to  $+1.0$ , Torisaka Laser Path with less than  $0.10^{\circ}\text{C}$  for 14:00-17:00 with skewness from  $-0.5$  to  $+1.0$ , Shizuhata Laser Path with less than  $0.10^{\circ}\text{C}$  for 0:00-4:00 with skewness from  $0.0$  to  $+1.0$ , and Yatsuyama Laser Path with less than  $0.15^{\circ}\text{C}$  for 0:00-4:00 with skewness from  $0.0$  to  $+1.0$ .

中図 Middle graph: 静岡大学地殻活動観測所の傾斜計記録と過去5日間の雨量. Tilt record, measured with tiltmeter of Applied Geomechanics type 701-2 at Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, and precipitation for the last five days. 目盛間隔は, 傾斜については10秒角, 雨量については100 mm. The interval of division is 10 second angle for tilt, and 100 mm.

下図Lower graph: 気象庁の「地震・火山月報(防災編)」に記載されている「日本及びその周辺で発生した主な地震と津波予報を行った地震」と「世界の主な地震」の中でフィリピン海プレート東縁における太平洋プレート沈み込みに関係する地震とフィリピン海プレート西縁における地震のマグニチュードから変位量( $10^{0.6M-4}$ ; 松田, 1975)を求め, 東縁における累積量から西縁の累積量を減じたもの. 目盛間隔は, 1 m.

Balance of the Philippine Sea Plate based on significant earthquakes listed in "Monthly Report on Earthquakes and Volcanoes in Japan" of Japan Meteorological Agency. Curve represents balance in the accumulation of displacement along the eastern margin,  $10^{0.6M-4}$  (Matsuda, 1975), for the earthquake with Magnitude M along the western margin of the Philippine Sea Plate. Interval of division is 1 m.

横軸Horizontal axis: 大目盛は年初で小目盛は月初. Big and small marks represent beginning of year and month. 作図は測距測定・解析用プログラムLR1にて行った. This graph was drawn with newly developed software LR1.

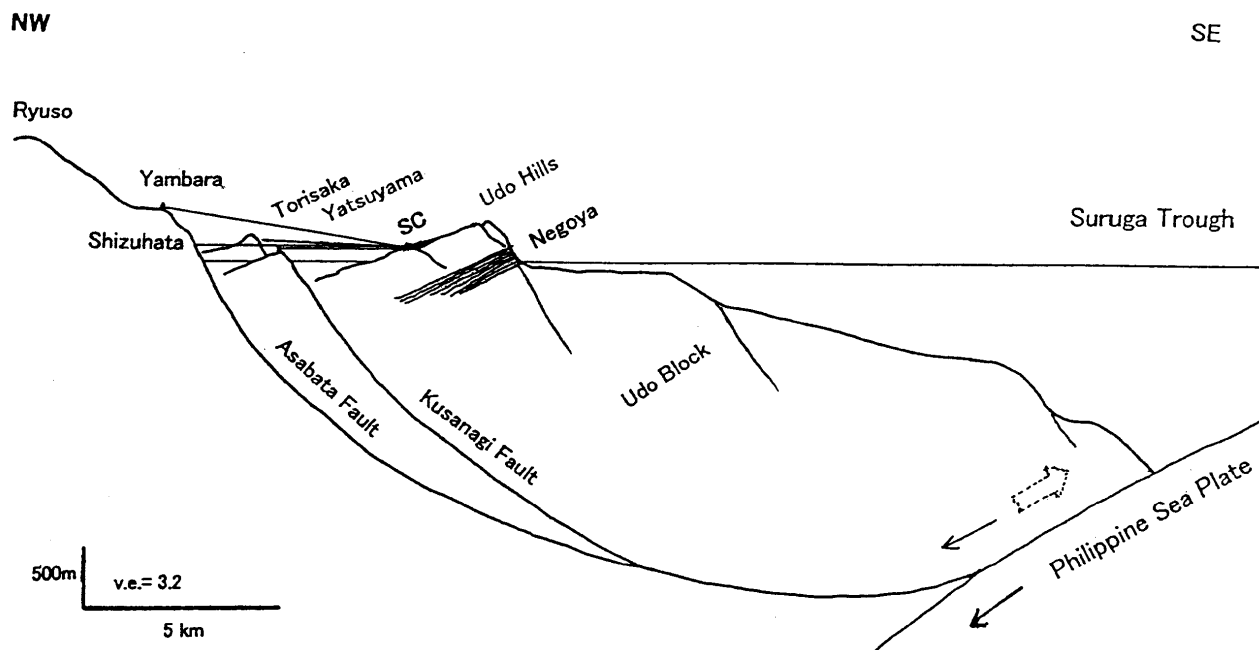


Fig. 7 草薙断層・麻機断層による円弧すべりによって傾動し、駿河トラフにおいて沈み込むフィリピン海プレートに載り上げる有度地塊と測距光路。

Cross-section showing tectonic setting of tilting Udo Block suggesting collapse along Kusanagi and Asabata faults, and subduction of the Philippine Sea Plate.

直線straight solid and dotted lines: 測距光路Laser paths for ranging; SC: 静岡大学地殻活動観測所Crustal Activity Observatory of Shizuoka University.

矢印arrow: フィリピン海プレート沈み込みにともなう運動 movement caused by the subduction of the Philippine Sea Plate, corresponding to decrease the tilt angle of the Udo Block, 白矢印block arrow: 草薙断層・麻機断層に沿う円弧すべりに伴う運動 movement caused by the collapse along Kusanagi or Asabata Fault corresponding to increase in the tilt angle of the Udo Block.

穏化した。1997年から1998年の光路長の伸長と伊豆半島東方沖群発地震は良く対応しており、谷津山光路長の変化から群発地震活動についての予知が期待される。1998年以後、群発地震が起こった光路長まで伸長したことはない。

光路長変化と伊豆半島東方沖群発地震の関係は、フィリピン海プレート東縁の伊豆弧に太平洋プレートが沈み込むことによって、フィリピン海プレートと太平洋プレートとの固着域が解消され、太平洋プレートによる圧縮力が開放されたため地下のマグマが地表に貫入し、伊豆半島東方沖群発地震が起こり、草薙断層によって沈み込むフィリピン海プレートに載り上げている有度丘陵が東方に移動し、光路長が伸長することが指摘されている(新妻, 2000)。

#### 光路長変動と台湾中部地震

1999年秋に起こった谷津山光路と山原光路の短縮は、観測開始以後最大のものである。この短縮の後、光路長は約1年周期の鋸歯状の変動を開始し、地殻変動の様相を一変させた。この短縮と関連させることができる地震活動としては、2000人以上の死者を出した1999年9月21日の台湾中部地震M7.7を上げることができる。

フィリピン海プレートの西縁の沈み込みおよび衝突境界における地震の発生は、西縁の固着域を部分的に解消させ、フィリピン海プレート全体が移動するために、地震発生域以外の境界では圧縮応力が増大し、光路長は短縮する。静岡地域はフィリピン海プレートの

東西境界が扇の要のように収束しているため、両境界における地震活動に敏感に反応し、光路長の変動として観測されることが指摘されている(新妻, 2000)。

1999年までは、フィリピン海プレートの東西縁で起こる地震と光路長変動が良く対応しているが、1999年以降の鋸歯状の光路長変動がどのような関係にあるかを検討する(Fig. 6)。2000年6月までの伸長は、2000年2月26日マリアナ諸島M6.2、3月28日父島近海M7.6、伸長の停滞は5月17日台湾M5.4、6月6日奄美大島近海M6.1の地震と対応している。それ以後は2000年8月6日鳥島近海M7.3、2001年10月13日マリアナ諸島南方M7.3、12月18日与那国島近海M7.3と東西縁で均衡しており、2000年9月と2001年8月の光路長短縮に対応する地震は起こっていない。

#### 鋸歯状光路長変動と三宅島噴火および新島・神津島近海地震

1999年以後の注目される活動には、2000年6月27日から開始した三宅島の噴火と2000年7月1日の最大M6.4を含む新島・神津島近海群発地震の発生があり、光路長が伸長から短縮に転じた時期に当たっている。三宅島噴火に先行して2000年6月10日東海道沖M6.1・M6.5が起きたが、6月11日台湾付近M6.2・6月15日奄美大島東方沖M6.1・種子島M5.9と東西縁の均衡を西側に戻している(Fig. 6)。

三宅島の噴火は近年繰返し起こっているものとは異なり、カルデラ形成を伴う千年から数千年に1回しか

起こらない特殊なものである(中田ほか, 2001). この特殊な噴火とプレート運動の関係は, 1999年9月の台湾中部地震によって西方に移動していた影響がフィリピン海プレート東縁の伊豆弧の引張場を太平洋プレートの西進が相殺していたが, 東海道沖の地震で固着域の解消によって応力が開放され, 更にフィリピン海プレートが西方に沈み込み引張場としたため, 三宅島のマグマの貫入と新島・神津島への北方移動を可能にしたと考えられる.

新島・神津島域は, 銭州海嶺の北東延長部に当たり, フィリピン海プレートの沈み込み境界が駿河トラフ・南海トラフと逆L字型に曲がっているために, プレートが沈み込む際に必然的に発生する破断域に相当している(Niitsuma 1999). 2000年6月からの三宅島の噴火と新島・神津島近海の地震はこの破断の拡大に対応させることが可能である. 沈み込み境界背面の破断は, 沈み込まれる有度丘陵にも多大な影響を与え, 異なった様相の光路長変動が開始したと予想される.

三宅島噴火以前の新島・神津島近海の地震活動は, 1997年には5月22日M5.1・9月14日M3.8で, 1998年は無く, 1999年3月14日にM3.8・M4.7と3月28日M5.0があるのみであり, 2000年4月14日M3.5が起こっている. 1997年5月22日の地震は, 光路長が最も伸長した時期に起こっており, それ以後短縮して伸長したところで9月14日の地震が起こっている. 1998年には光路長が伸長したが, 新島・神津島近海では地震が起きず, 伊豆半島東方沖で地震が起こっている. 2000年4月14日は伸長して短縮する時期に当たっており, その短縮後の伸長に伴って三宅島の噴火が起こっている.

三宅島噴火以後の新島・神津島近海の地震活動は, 2000年7月1日M6.4を最高に, 7月9日M6.1・7月15日M6.3・8月18日M6.0・9月11日M5.3と続くが, それ以後は12月6日M3.8そして2001年1月16日M3.2・2月13日M3.9・6月3日M4.6・12月9日M4.5と活動を低下させている. 2000年9月11日の地震は光路長が最も伸長し, 短縮に向かう時期であり, 鋸歯状変動の最初の急激な短縮の直前に起こっている. 2000年12月6日の地震は, 光路の急激な短縮中に一時伸長して短縮する2段階短縮に移る時期に起こっている. 2001年1月16日と2月13日の地震は, 鋸歯状変動の緩やかな伸長期で一時的に短縮する時期に起こっており, 2001年6月3日の地震も伸長して一時的に短縮する時期に起こっている. 2001年12月9日の地震は, 急激な短縮の2段階短縮に移る時期に起こっている.

光路長変動と新島・神津島近海地震との関係は認めることができ, 光路が伸長してから短縮する時期に起こっている. 鋸歯状の光路長変動における最初の急激な短縮と最初と2回目の2段階短縮との関係が認められたが, 2001年8月の急激な短縮に対応する地震は起こっていない. 新島・神津島近海の地震は, 光路長変動が短期間に伸長・短縮を伴っている時期に起こっており, 短期的伸長・短縮がないめらかな変動をしている1998年には起こっていない. ただし, 被害注意報地震に入れられていないが, 1998年6月25日M4.2が起こっており, 伸長した光路長が短縮に向かう時期である.

#### 鋸歯状光路長変動と南関東の地震

2001年8月の急激短縮と対応する地震活動を検討すると, 2001年7月20日の茨城県南部M4.8の地震が発生し

ている. 茨城県南部・千葉県北部・東京湾・神奈川県南関東では, 日本海溝から沈み込む太平洋プレートの上にフィリピン海プレートが沈み込んでおり, 静岡地域の地殻変動と関連することが予想される. 南関東における地震は, 1998年3月8日M4.4・6月24日M4.6・2000年4月10日M4.6・2000年9月29日M4.5・2001年5月31日M4.5・7月20日M4.8・12月8日M4.5である. 1998年3月8日の地震は, 光路長が伸長し, 伊豆半島東方沖地震が起こる前であり, 1998年6月24日は, 光路長が一時短縮して伸長してところで新島・神津島近海地震の前日に起こっている. 2000年4月10日は, 台湾中部地震後光路長が緩やかに伸長している時期に起こっており, 4日後の4月14日には新島・神津島近海地震が起こっている. 2000年6月3日は, 光路長が最も伸長する時に起こっており, 2000年9月26日は, 光路長が伸長しており, 急激な短縮に変化する前で, その15日前に新島・神津島近海地震が起こっている. 2001年5月31日は, 光路長が伸長して最大に向かっている時期に起こっており, 3日後に新島・神津島近海地震が起こっている. 2001年12月8日の地震は, 新島・神津島近海地震の前日に起こっており, 光路長の急激短縮の2段階目に相当する. これらの対応から, 南関東の地震は新島・神津島近海地震と関連して起こり, 光路長の変動と良く対応しており, 2001年7月20日は, 光路長の鋸歯変動における第2回目の急激短縮と対応していると言える.

#### 鋸歯状光路長変動と中部地方・西南日本の地震

フィリピン海プレートが沈み込み・衝突している中部地方(Niitsuma 1999)と, フィリピン海プレートの北西進に伴って移動する房総沖三重会合点による東西圧縮場にある西南日本(Niitsuma 1996)の地震活動と光路長変動とを比較する.

2000年6月からの三宅島噴火以後においては, 2000年8月25日奈良地方M4.1が伸長期の最終段階, 2000年10月6日鳥取県西部M7.3が第1回目の急速短縮の後に発生しており, 短縮期に島根県東部において2000年11月3日M4.5・12月7日M4.2・12月19日M4.1・M4.1が発生している. その後の短縮から伸長への変換期に新潟県中越地方で2001年1月2日M4.4・1月4日M5.6, 2001年1月12日兵庫県北部M5.4, 2001年2月11日島根県東部M4.3, 緩やかな伸長期に2001年2月23日M4.9の静岡県西部が発生しており, その後の急激な短縮の後, 伸長に転じた2001年4月3日に静岡県中部M5.1が起こっている. この間, 2001年3月24日芸予地震M6.4・3月25日愛媛県中予地方M4.4・3月26日安芸灘M5.0が起こっている. 光路が伸長した時期にはこの地域において地震は発生せず, 2回目の急速短縮期に当たる2001年8月25日に京都府南部M5.1を皮切りに, 2001年9月27日愛知県西部M4.3, 2001年12月28日滋賀県北部M4.2, 2002年1月24日島根県東部M4.5が発生している.

鋸歯状変動において短縮期に中部地方・西南日本において地震が多いことは明瞭であり, 2000年9月からの第1回目短縮期に比較して2001年の第2回目の短縮に地震が少ないことは, 短縮の程度が小さいことと対応していると考えられる.

鋸歯状変動以前におけるこの地域の地震活動と光路長との関係を検討すると, 光路長が最も伸長した1997年6月15日山口県M6.3, 短縮して伸長した1997年9月4日鳥取県M5.2, 短縮期の1997年12月19日石川県西方沖

M4.4, 1998年2月21日新潟県中越地方M5.0, 伸長期の1998年4月22日岐阜県美濃中西部M5.4が起こっている。光路長が伸長して短縮期に入り, 1998年7月1日長野県北部M4.7・8月12日長野県中部M4.1・M4.7・8月14日岐阜県飛騨地方M4.3が起こり, 光路長の変化が少ない1999年9月21日の台湾中部地震M7.7までの期間には, 1999年1月28日長野県中部M4.7, 1999年2月2月12日京都府南部M4.0, 1999年7月16日広島県南東部M4.4が起こっている。台湾中部地震以後の光路短縮期には, 1999年10月29日長野県北部M4.0, 1999年10月30日瀬戸内海中部M4.5が起こり, 伸長期には2000年1月7日長野県南部M3.6, 2000年3月7日新潟県中越地方M4.3, 2000年6月7日石川県西方沖M6.1が起こっている。

鋸歯状変動以前においても, 短縮期に中部地方・西南日本に地震が多いが, 鋸歯変動時よりも地震数が少なく, 明確ではない。

## まとめ

1. 静岡大学地殻活動観測所に設置した4台のレーザー測距儀と谷津山・山原・鳥坂・賤機に4箇所に設置した反射プリズムを用い, 1995年から続けてきた測距結果を解析し報告した。測距を行っている4光路は, 10万年前の海岸平野面を10°傾動させ, 400m隆起させている草薙断層と麻機断層を横切っている。
2. 光波測距は, 光路気温変化に伴う光の往復時間変化によって乱されるために, 光路長を一定と仮定し, 光路気温を算出し, 光路下の静岡地方気象台の気温などの気象資料と比較検討する解析法を用いた。
3. 自動測定プログラムを改良し, 測距結果と気象庁のホームページから入手した気象台観測資料を, 自動解析・作図表示印刷を行う機能を持たせることに成功した。本論文に使用した測定結果についての図は, このプログラムによって作図したものである。
4. レーザー測距儀に付した垂直微動制御機能によって得られる受光量の垂直変化を4年間の観測結果について検討した結果, 測距儀によって測定された光路気温と静岡地方気象台で測定されている地表気温との差から求められる平均気温勾配と対応する光路の垂直変動が認められた。
5. 受光量の垂直変化を表わす受光量曲線は, 複数の峰から構成されており, 峰の高さや位置に激しい日周変化および年周変化が存在することが明らかになった。
6. 受光量の複数の峰は, 光路付近の気温勾配の成層構造に対応し, 気温勾配に対応する大気中の光速度の勾配に起因する全反射, 臨界角入射現象であることが理論的にも, 各峰について測定された光路気温の差によっても明らかになった。
7. 気象台で測定されている地表気温が日出とともに上昇するのに対し, 光路気温が昼前に急低下する「昼前異常低温」が年間を通して認められた。この昼前異常低温は, 気象台北西方の谷津山の南東斜面が日射加熱されて生じる上昇気流を補償するために南東方ないし南方付近から流入する冷気が原因であることが, 気象台における風向・風速および, 受光量曲線形態の急変から明らかになった。「昼前異常低温」と気象台気温の昇温速度の急低下と対応するとともに, 光路気温の変化と気象台気温の変化とも対応している。
8. 日周および年周変化の激しい光路気温変化の影響を受けない測距結果を用いて地殻変動を監視するために,

10回連続して測定された光路気温の標準誤差が光路長に依じて0.75-1.50℃以下の測定結果を選別し, それらについて1時間毎の時間帯について平均値と標準偏差を算出した。北西方向の谷津山・賤機光路と北方向の山原・鳥坂光路では異なる標準偏差の日周変化が認められた。それぞれの光路について標準偏差の小さい時間帯, 0-4時と14-17時, を選択し, 更に, 測距を行った受光量曲線上における峰が直行光路である中央の峰である測定結果を選択し, 光路長変動解析資料とした。

9. 数cmにおよぶ光路長変動が認められ, 対応する傾斜変動から, 駿河トラフに沈み込むフィリピン海プレートに載り上げる草薙断層および麻機断層の円弧すべりと対応させることができる。光路長の伸長と伊豆半島東方沖地震と対応しており, フィリピン海プレートの東西境界で起こる地震活動の均衡と対応している。

10. 1999年9月21日の台湾中部地震M7.7は, 光路長を著しく短縮させるとともに変動様式を鋸歯状に変化させた。

11. 鋸歯状変動は, 緩やかに伸長し, 急激に短縮している。夏季に伸長, 冬季に短縮しているが, その周期は1年よりも短く, 気温変化とは対応していない。

12. 鋸歯状変動において光路長が最も伸長した時期に, 2000年6月の三宅島噴火と新島・神津島近海地震が起こっている。この活動は, 駿河トラフ・南海トラフに沿って沈み込むフィリピン海プレートに形成された銭州開裂帯の活動と対応しており, 光路長の急速な短縮をもたらした。

13. 鋸歯状変動における2001年の急速な短縮とフィリピン海プレートの北東端が沈み込む南関東の地震と対応している。

14. 中部地方および西南日本における地震活動は, 光路長の短縮期に起こっている。

## 謝辞

静岡大学地球科学教室の里村幹夫博士には常に討論していただき, 本稿を査読していただいた。気象庁気象研究所の藤部文昭博士, 東北大学名誉教授の近藤純正博士には気象学的内容について討論いただいた。英文に関しては静岡大学地球科学教室のSatish Kumar博士に校閲いただいた。

以上の方々に御礼申し上げる。

## 引用文献

- 檀原 毅 (1981), 静岡大学地殻活動観測所の概要。静岡大学地球科学研究報告, 6, 25-34.
- 松田時彦 (1975), 活断層から発生する地震の規模と周期について。地震第2輯, 28, 269-283.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001), 三宅島2000年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴。地学雑誌, 110, 168-180.
- 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 (1998), 光波測距による大気境界層の気温連続測定と地殻変動。静岡大学地球科学研究報告, 25, 31-49.

- Niitsuma N. (1999), Rupture and delamination of island arc crust due to the arc-arc collision in the South Fossa Magna, central Japan. *The Island Arc*, **8**, 441-458.
- 新妻信明 (2000), 光波測距による大気境界層の日周・年周変動およびフィリピン海プレートによる有度地塊傾動機構の解明. 静岡大学地球科学研究報告, **27**, 17-35.
- 新妻信明 (2001), 光波測距による草薙断層と麻機断層の活動監視. 静岡大学地球科学研究報告, **28**, 45-55.
- 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(改訂版). 森北出版, 東京, 242p.