

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¹

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

Nobuaki NIITSUMA¹

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.

¹静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷 836

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

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

Earthquakes around Nijima-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)。

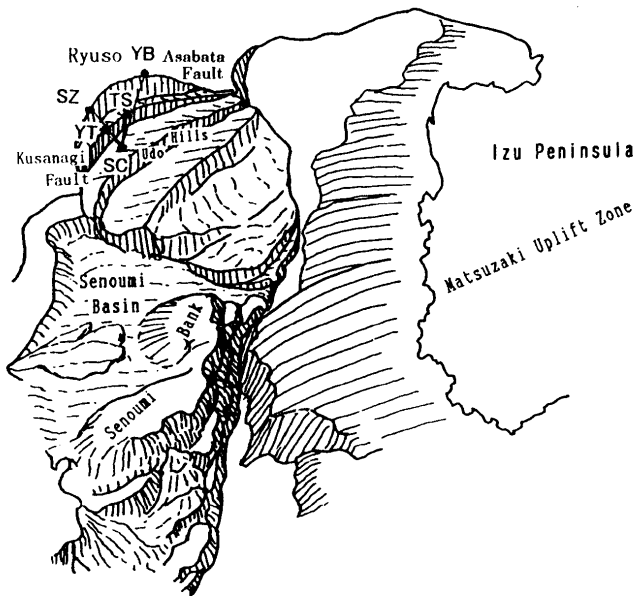


Fig. 1 静岡大学地殻活動観測所から常時測距観測を行っている谷津山・山原・鳥坂・賤機光路、草薙断層と麻機断層による円弧すべり、駿河トラフとの関係。

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)に設置した六桜精密社製の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

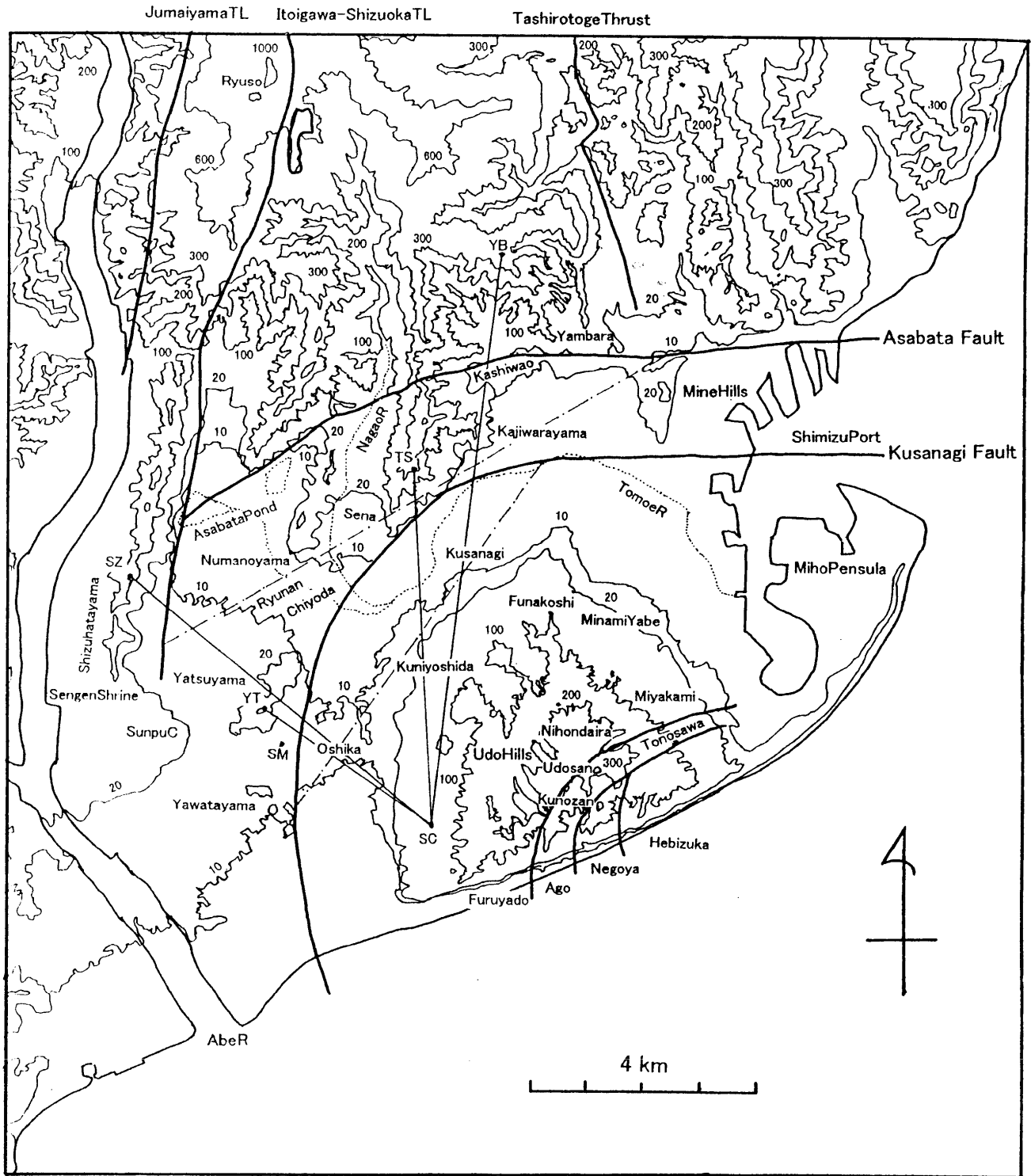


Fig. 2 静岡地域の地形、草薙断層・麻機断層、測距光路の位置。

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Shizuhata. 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

光波測距儀によって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(°C)、 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、光路が横切る接地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、測距儀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台の測距儀を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)、測距儀の方向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°Cに達することもある(Fig. 4acgjk1)。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°C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)。

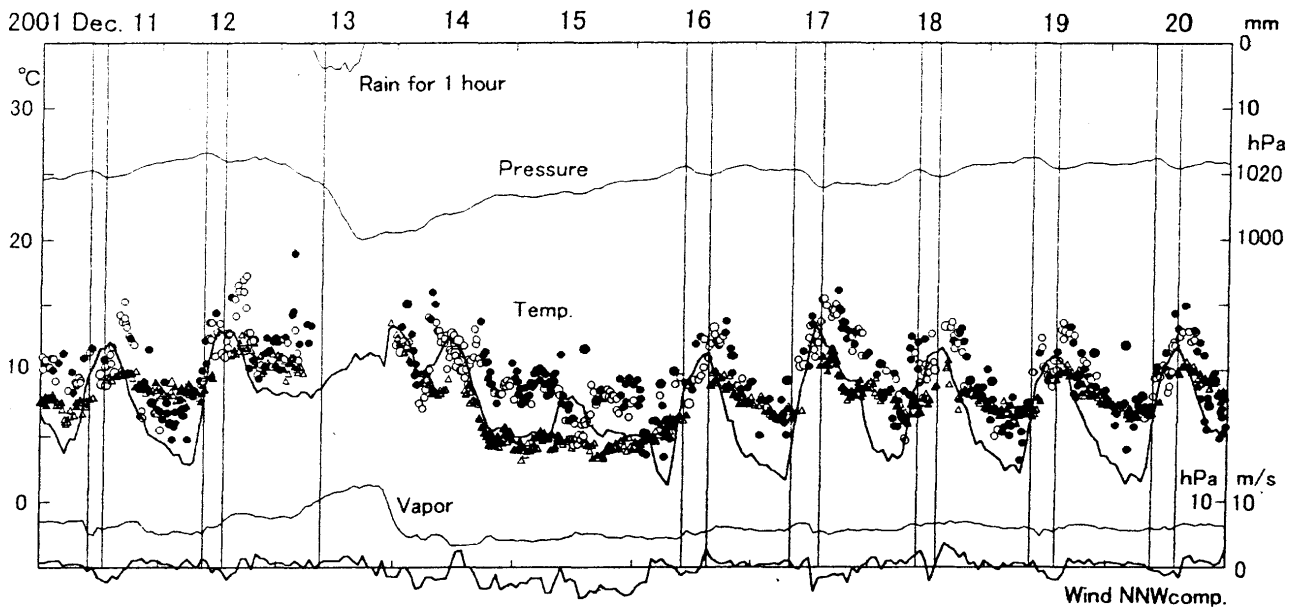


Fig. 3 常時測距観測結果から算出された10日間の光路気温と静岡気象台観測の気象資料の関係。

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°C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、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、大気の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/°C、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°C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°C、鳥坂光路は平均142m上空で4.7°C、賤機光路は平均114m上空で3.8°C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°C/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

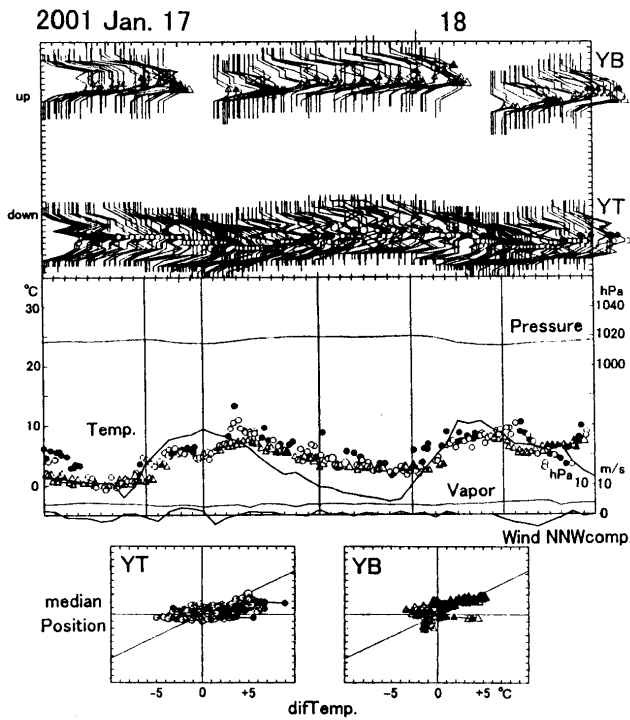


Fig. 4a

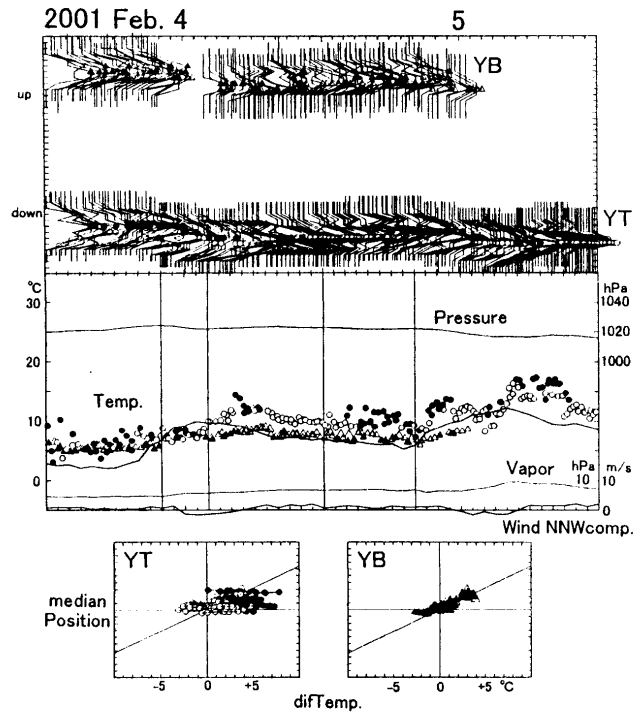


Fig. 4b

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、平均すれば一般的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αは、反射面における光速度差Δv

と対応し、次式で表わされる。

Δv = 1 - sin(90-α)

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Δα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。

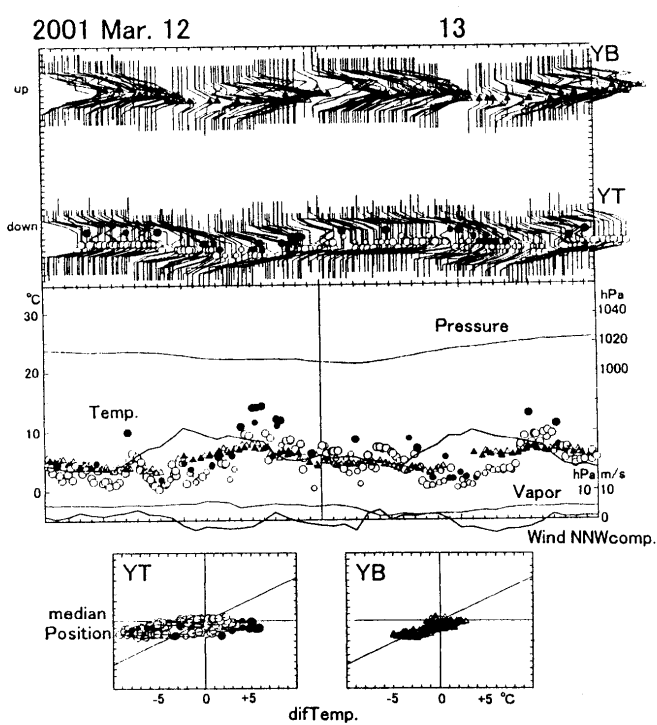


Fig. 4c

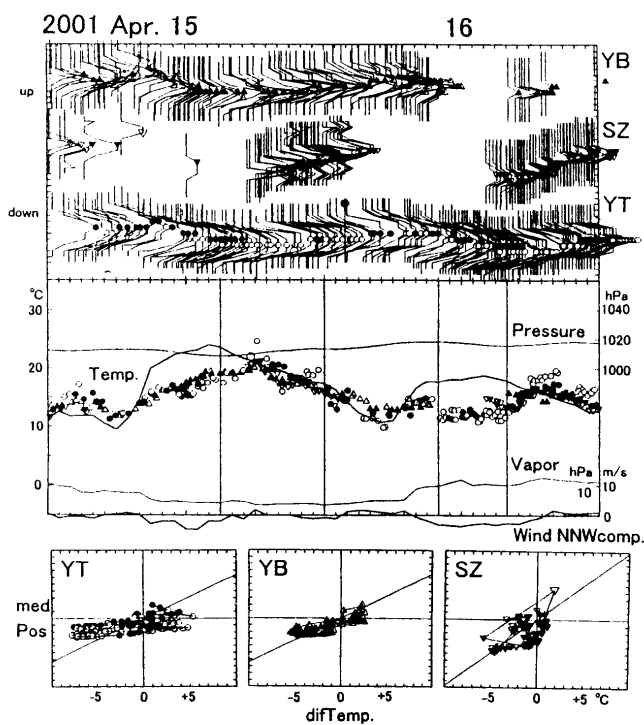


Fig. 4d

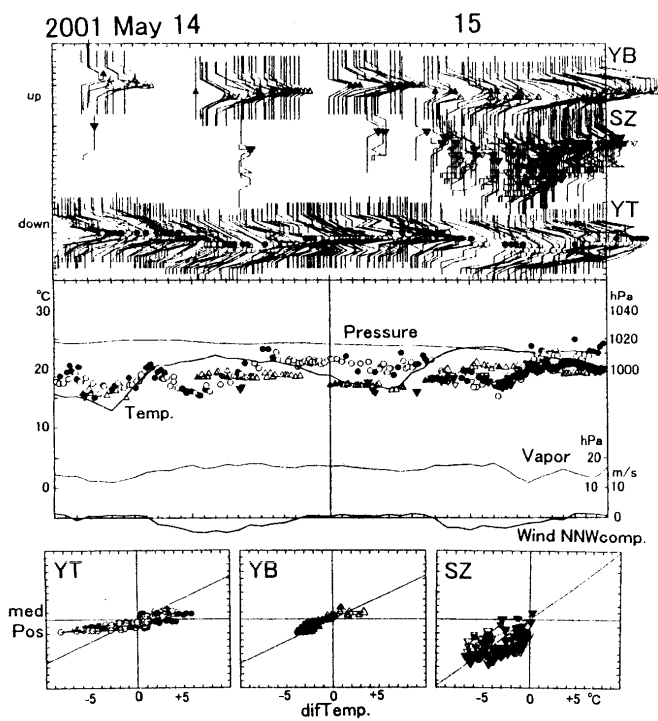


Fig. 4e

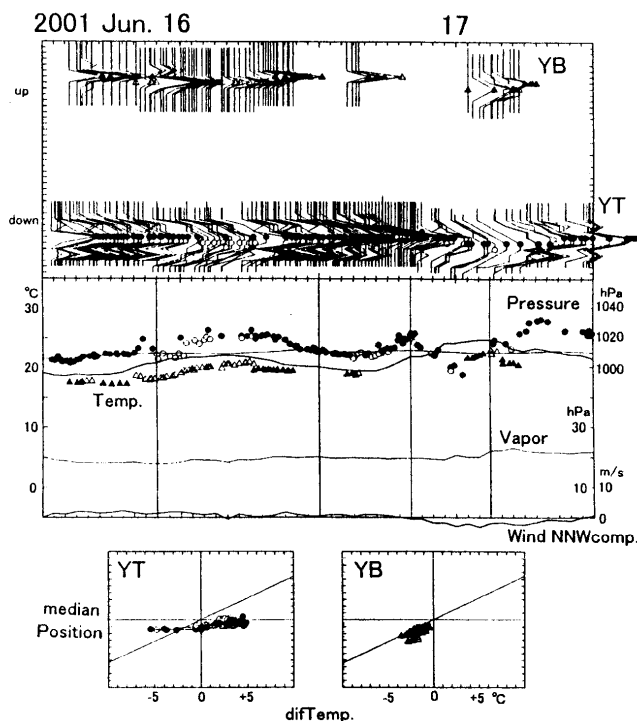


Fig. 4f

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

