

# 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

新 妻 信 明<sup>1</sup>

## Laser ranging for daily and annual change in the atmospheric boundary layer, and mechanisms on tilt of the Udo Block by the Philippine Sea Plate

Nobuaki NIITSUMA<sup>1</sup>

**Abstract** Automatic laser ranging is being carried out to monitor the activity of the tilting Udo Block along the laser paths from the Crustal Activity Observatory of Shizuoka University to Yatsuyama and Yambara. The air temperatures of the laser paths are calculated from ranged distances under the assumption of constant distance. The rangers monitor also refraction of the laser paths caused by the air temperature structure and intensity profile of the reflected laser using a computer controlled step motor.

The atmospheric temperature distributions and their daily and seasonal changes have been explained by the solar heating in the daytime and radial cooling in the night, resulting in lifting of warmer air masses and sinking of cooler air masses.

Systematic offsets have been detected from the calculated air temperature, and compared with the surface air temperature at the Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency. The offsets relate to the changes in the distance of the laser paths, caused by the crustal movement. The amount of the changes is more than several cm in laser path distance. The maximum distance occurred in the middle of April 1998 just before the earthquakes to the east off Izu Peninsula, and the minimum distance occurred in the early January 2000 after the Taiwan Earthquake of September 1999. The changes in distance were correlated with tilt records of the Crustal Activity Observatory.

The Udo Block is tilting northwestward by large-scale gravity collapse along the active Kusanagi and Asabata Faults. The basal part of the collapsed Udo Block is riding on the subducting Philippine Sea Plate along the Suruga Trough. The detected crustal movements have been explained by changes in the tilt of the Udo Block, controlled by the subduction of the Philippine Sea Plate under the Udo Block.

The stress in the Philippine Sea Plate is sensitively related to earthquakes along the eastern and western margins of the Philippine Sea Plate. The earthquakes on the eastern margin release the compressional stress of the westward Pacific Plate motion and the stress field changes from compressional to tensional before the earthquakes in the east off Izu Peninsula related to magma intrusion. The earthquakes on the western margin in Taiwan decrease the resistivity to subduction along the western margin, and induce the subduction. The simulated stress condition of the Philippine Sea Plate is well correlated with the detected crustal movements with reasonable a time lag.

**Key Words:** Laser ranging, tiltmeter, Udo Hill, earthquakes, Izu Peninsula, Taiwan, Pacific Plate, Philippine Sea Plate.

### 緒 言

草薙断層は、約10万年前の海岸平野を大規模な円弧  
迂りによって約10°傾動させて有度丘陵を形成し、その

下底は駿河トラフに沈み込むフィリピン海プレートに  
載り上げている。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、

<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



図 1 光波測距光路図。

Laser paths for ranging.

曲線curves : 断層fault ; IST : 糸魚川-静岡構造線Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, KF : 草薙断層Kusanagi Fault, AF : 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, YI : 谷津山 Yatsuyama, YB : 山原Yambara, TS : 鳥坂Torisaka. YW : 八幡山, SM : 静岡地方気象台Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency.

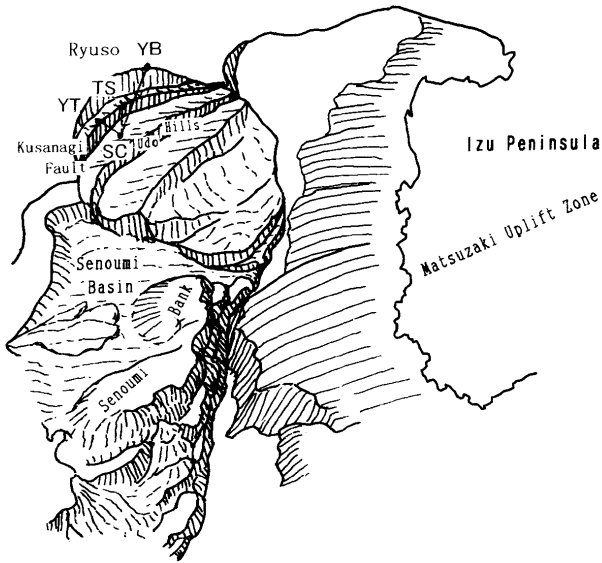


図 2 測距光路と草薙断層・麻機断層による円弧すべり地形。Laser paths for ranging and submarine topography in the Suruga Trough with the Kusanagi and Asabata Faults showing gravitational collapse. SC: 静岡大学地殻活動観測所 Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, YT: 谷津山 Yatsuyama, YB: 山原 Yambara, TS: 鳥坂 Torisaka. 草薙・麻機断層周辺にお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.

1981). 1992年には定常的光波測距のための反射プリズムを谷津山に、1993年には山原に設置し、1995年から定常観測が開始された(図1・2・3)。1998年3月からは、測距儀に大気温度構造によって屈曲する光路をステップモーターによって自動的に補正する改良を加え、1998年11月からは2台の測距儀による2方向の常時観測を開始した。

光波測距儀による定常観測により、光波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、それ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た。測距儀による精密光路気温の定常観測とともに光路の気温勾配による光路の屈折を定常的に観測する方法も開発され、大気境界層の気温構造の精密測定とその日周変動と季節変動を解析する方法が確立された(新妻, 1998)。

光路気温および光路気温勾配の定常観測も3年に及び、観測結果が蓄積したので、大気境界層気温構造の日周変化を月毎に検討し、日射による地表過熱、夜間の放射冷却、暖気塊の上昇、冷気塊の下降などとの関係を明らかにしたので報告する。

静岡地方気象台において測定されている地表気温と光路気温を比較することによって、地殻変動による光路長の変動が検出され、フィリピン海プレートの東西両縁で起こる地震との関係を解析した結果、検出された地殻変動はフィリピン海プレートの動きや応力状態と密接に対応していることが明らかになったので報告する。

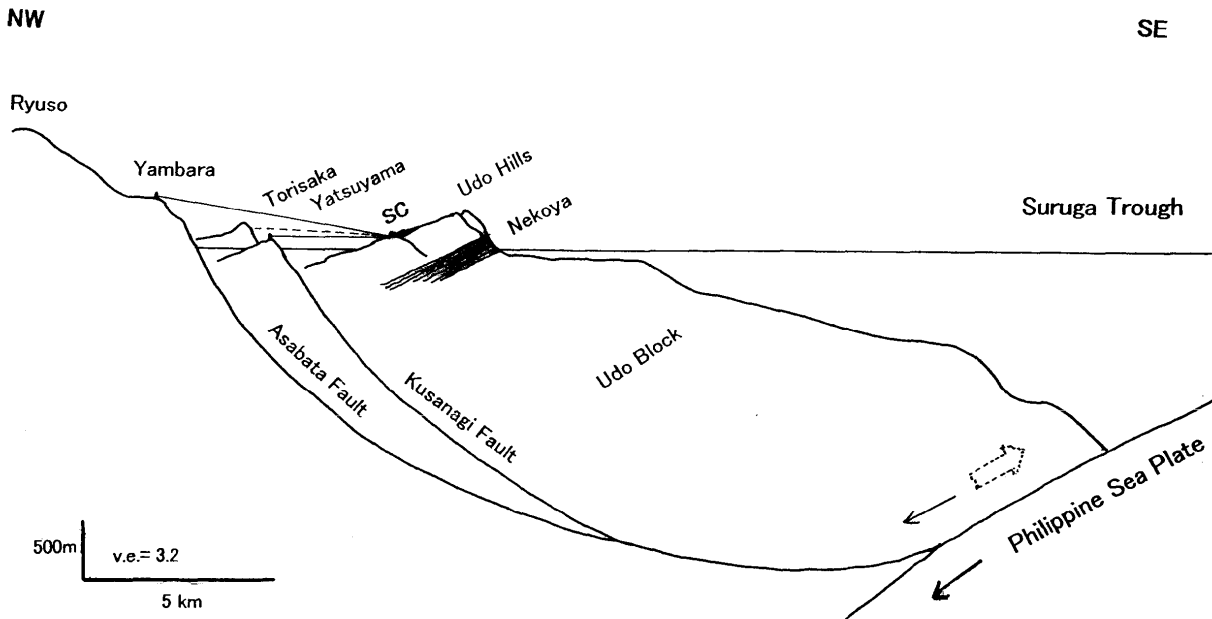


図 3 有度地塊の傾動と草薙断層・麻機断層およびフィリピン海プレートの沈み込み。

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

直線・点線 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: 草薙断層あるいは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 the tilt angle of the Udo Block.

## 観測法

光波測距は静岡大学地殻活動観測所の整準台(標高105.83m, 北緯34° 57' 39.19", 東経138° 26' 18.25"; 檀原, 1981)に設置した六桜精密社製のAuto-Ranger JXを用い, 1996年1月から測定結果はRS232C回線によってNECノート型計算機に取り込み, MS-DOSプログラムによって自動測定を行った。1998年3月には, 測距儀に垂直微動装置を取り付け, 計算機制御によって最大受光位置を走査し, 自動測距を実現した(新妻, 1998)。1998年11月から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・山原交互観測が開始され, 2000年2月29日からWindows95プログラムによる自動交互観測が実現し, 垂直微動走査における受光量変化も記録できるよう改良された。また, MS-DOSによる原因不明の計算機停止問題も解決し, レーザー光が受光できれば常に測距可能な体制が確立した。

レーザー光の反射には, 1992年に谷津山の東海大学の宣伝塔に設置した反射プリズム(標高108m, 北緯34° 58' 49.27", 東経138° 24' 18.85", 静岡大学地殻活動観測所整準台までの距離3708.568m; 新妻・小田川, 1993)と1993年に清水市山原のNTTの無線中継所鉄塔に設置した反射プリズム(標高448m, 北緯35° 03' 21.30", 東経138° 27' 12.93", 静岡大学地殻活動観測所整準台までの距離10552.989m; 新妻ほか, 1996)を使用した。

傾斜観測は, 静岡大学地殻活動観測所の縦坑の基盤に設置したApplied Geomechanics社製の水泡式傾斜計701-2型で行っており, 傾斜計の出力をアドバンテスト社製の2回路デジタルマルチメータで測定し, 光ファイバーによる GPIB 転送によって計算機に取り込み, MS-DOSプログラムにて1秒毎に作図記録している。1998年1月には傾斜計の足を接着剤で固定した。この傾斜計では地震の振動も良く捉えられており, マグニチュード6以上の地震については遠方であっても長時間の振動が観測されている。

地表気象については, 静岡地方気象台における「地上気象観測原簿」に記載されている1時間ごとの現地気圧, 気温, 水蒸気圧, 降水量, 風向, 風速を用いた。

## 光路気温と気温勾配の精密測定

レーザー測距においては, 測距儀がレーザー光を放射し, 反射プリズムがレーザー光を放射方向へ正確に反射し, 戻ってきたレーザー光の往復時間を測距儀が精密に測定し, 距離を求める。往復時間は光路の光速度に依存し, 光速度は気温・気圧・水蒸気圧によって変化するために距離を求めるためには, これらの値について補正する必要がある。この補正の中で気圧・水蒸気圧はmmの測距精度に対応できるが, 光路気温については対応不可能である。そこで, 測距によって得られた光路長 $D_s$ から, 測距儀・反射プリズム間の光路長 $D$ は不変とし, 静岡地方気象台における気圧 $P$ (mm Hg)・水蒸気圧 $E$ (mmHg)を用いて光路気温 $T_c$ を

$$T_c = \frac{106.339 \times P - 15.026 \times E}{310.0 + \frac{D_s - D}{D_s} \times 10^6} - 273.15 \quad (1)$$

算出し, 気象台気温と比較することによって距離変動を知る方法を採用している(新妻ほか, 1996)。地殻変動による光路長変動と比較し, 光路気温の変化ははるかに急速に起こり, 日射による日周変化をするので, この方法を用いることによって一般に困難な上空の光路気温を非接触で連続的に0.1℃よりも高精度で測定できる。

光路に気温勾配が存在する場合には光路は屈折するため, 測距儀からのレーザー光発射方向を調整する必要がある。1998年3月から最大受光方向を自動的に捉えるために垂直微動を装備し, 8秒角間隔で10位置走査により受光強度を測定し, 中央受光位置, 受光位置の標準偏差, 歪度(最大受光位置と中央受光位置の差)を定期的に測定し, 最大受光位置において測距を行ってきた(新妻, 1998)。2000年2月からは垂直微動走査の10位置における受光強度も記録することが可能になった。

谷津山光路と山原光路における2000年3月22日の光路気温・歪度・地表の気象台気温・受光強度垂直変化についての観測結果を示す(図4)。受光量曲線の基線の位置は測定時刻に対応しており, 光路気温・歪度の表示点と対応している。垂直微動間隔(縦軸の1目盛)は8秒角であり, この角度は3.7kmの谷津山において14cm, 10.5kmの山原において40cmの変化に相当する。谷津山の受光強度垂直変化観測によるとレーザー受光範囲が垂直微動範囲の10目盛程度であることからレーザー光の広がり量が1.4m程度, 山原においては5目盛程度であることから2m程度であることが分かる。

最大受光位置は谷津山・山原の両光路において20秒角以上の日周変化をしており, 昼間に下方に, 夜間に上方を向いている。空気中の光の速度は, 高温ほど速く, 低温ほど遅いため, 2点間を最短時間で往復するためには高温側の光路をとるように屈折する。昼間には上空よりも地表が高温であるため, 光路は高温側である下方に屈折する。気温勾配が一定の場合には光路は高温側に凸の円弧を描き, 円弧の半径 $r$ と光速度勾配 $dv/dh$ の間には,

$$dv/dh \doteq 1/r \quad (2)$$

の関係が存在し(須田, 1976), 観測された光路気温と地表気温との差から算出される平均気温勾配と円弧半径に対応する測距儀の最大受光位置は(2)式の関係を満たす線を中心に分布する(新妻, 1998)。

受光量の垂直変化は測定時刻によって変動しており, 光路における気温勾配の様子を詳細に表現している。垂直微動走査によって得られる受光量変動曲線が上下に対称な正規分布型の場合には最大受光位置と統計学的に算出される中央受光位置が一致するが, 一般に最大受光位置は中央受光位置よりも下方あるいは上方にずれる。ここでは, 最大受光位置が中央受光位置よりも下方にずれる場合を正の歪度, 上方にずれる場合を負の歪度とし, 歪度の値は垂直微動の1段階(=8秒角)単位で表すことにする。

光路の異常屈折現象として, 「逃げ水」と「蜃気楼」が知られているが, これらは気温勾配が急変する場合に起こり, 下方への気温上昇勾配が大きい場合にその急勾配面で全反射する現象が逃げ水であり, 上方への気温上昇勾配が大きい場合の全反射現象が蜃気楼である。谷津山光路はほぼ水平であり, 大気が成層構造を持つ場合には全反射現象が起き易い。

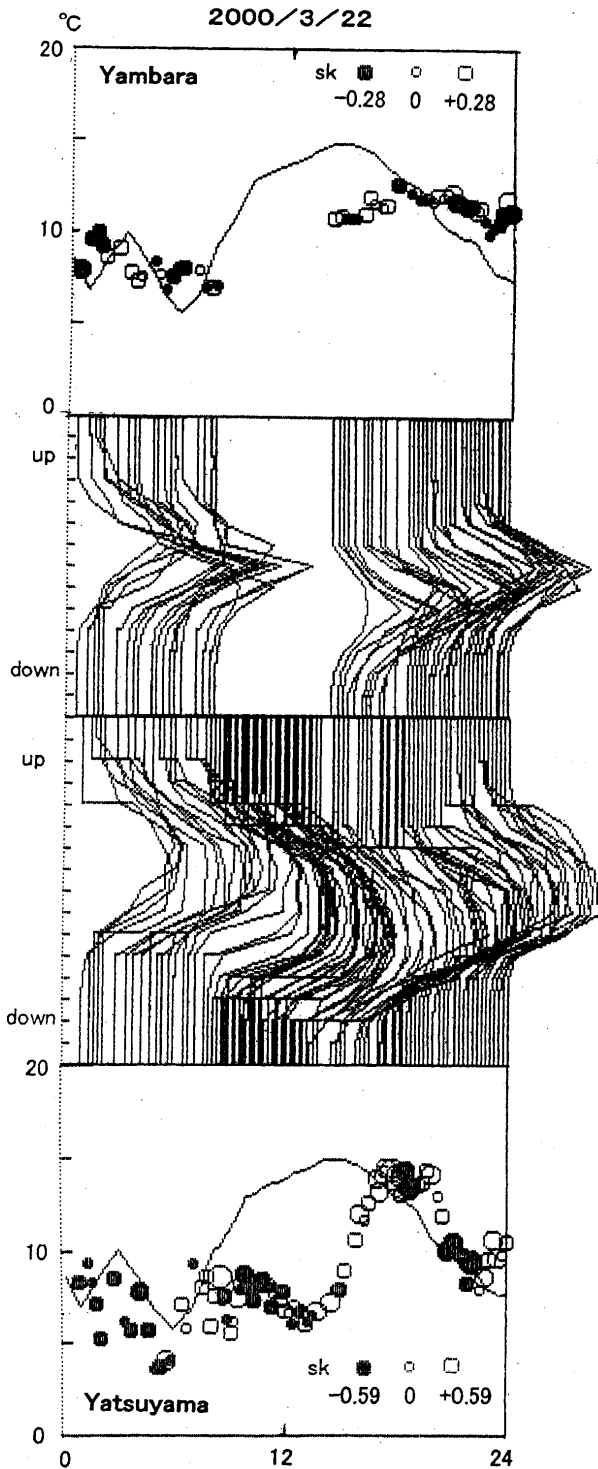


図 4 2000年3月22日0時から24時までの山原光路と谷津山光路の光路気温・歪度・地表気温。

Calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature over 24 hours on March 22, 2000.

上図・下図Upper and Lower Graphs : 地表気温は静岡地方気象台の1時間値を曲線によって上端の山原光路グラフと下端の谷津山光路グラフに示した。歪度は丸の大きさで示し、最も小さい白丸が0で黒丸が負歪度、白丸が正歪度を示しており、丸の位置は光路気温を示している。

Skewness calculated laser path temperature and surface temperature. Small open circle: non-skewness, open circle: positive (downward)

skewness, and solid circle: negative (upward) skewness of reflected laser intensity curve with vertical scan of laser direction. The size of index of skewness circles represent  $\pm 1\sigma$  of skewness distributions in the series of measurements. The skewness circles locate on their laser path temperature and curve represents surface temperature at the Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency at one-hour intervals. Upper and lower graphs show Yambara and Yatsuyama laser paths.

中図 Middle Graphs : 山原光路(上)および谷津山光路(下)における垂直位置変動に伴う受光量(右方)を現しており、曲線の基線は測定時刻に対応し、歪度の丸の位置に対応している。縦軸は1目盛が8秒角に相当する。

Reflected laser intensity curve (rightward) with vertical scan. Baseline locates on the measured time and correlates with the circle position of skewness. Upper and lower graph for Yambara and Yatsuyama laser paths.

横軸horizontal axis : 時刻 time.

逃げ水現象の場合には正常光に全反射光が加わるために中央受光位置は下方にずれ、蜃気楼現象の場合には上方にずれる。谷津山光路における午前中の光路気温低下時に下方に受光峰が突然現われるが(図4)、これは逃げ水現象の開始を示している。

下方への気温上昇勾配をもつ場合には、等気温勾配領域よりも光路気温が低温であれば、光路下方の気温勾配がより大きくなり、逃げ水現象が起きやすくなる。逃げ水現象が起ると、正常光と逃げ水光の双方を受光するために受光幅が広がり歪度は大きくなり、一般に正常光の方が強く負歪度となるが、逃げ水光が強い場合には正歪度となる。

上方への気温上昇勾配をもつ場合には、等温気温勾配領域よりも光路気温が低温であれば、光路上方の気温勾配が大きくなり、蜃気楼現象が起きやすくなる。蜃気楼現象が起ると、歪度が大きくなり、一般に正常光の方が強いために正歪度となるが、蜃気楼光が強い場合には負歪度となる。

光路に気温の異なる気塊が下降あるいは上昇してくると、光路気温は等温気温勾配領域から外れる。暖気塊上昇の場合には、暖気塊の先端(上端)が光路に近付き、全反射の臨界角に達すると逃げ水現象が起き、一般に逃げ水光よりも正常光が強く、負歪度となる(図5上下の1)。暖気塊の末部(下部)が光路を通過していると蜃気楼現象が起り、一般に蜃気楼光よりも正常光が強く、正歪度になる(図5上下の3)。暖気塊は比重が小さいために上昇するので、比重の小さい高温部が先端部(上端部)を形成して蕁型の気温分布を持ち、先端部が通過する直前の逃げ水現象の起こる時間は短く、通過時には光路気温は暖気塊の最高気温を示し、正歪度あるいは0歪度となる(図5上下の2)。末部(下部)の通過には時間を要するので、蜃気楼状態が継続し、正歪度となる。

冷氣塊降下の場合には、冷氣塊の先端(下底)が光路を通過すると逃げ水現象が起り、全反射の臨界角に達するまで逃げ水光が入射し、逃げ水光が正常光よりも強く正歪度になる(図5中1)。冷氣塊の末部(上部)が光路を通過していると蜃気楼現象が起り、蜃気楼光が正常光よりも強く負歪度になる(図5中3)。冷氣塊は

