SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

光波側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

メタデータ	言語: Japanese
	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/10.14945/00000368

静岡大学地球科学研究報告　27 (2000年7月)17頁～35頁
Geosci. Repts. Shizuoka Univ., 27 (July, 2000), 17-35

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[1]

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[1]

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辷りによって約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，

[1]静岡大学理学部地球科学教室，422-8529　静岡市大谷 836
[1]Insititute 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, YT : 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.

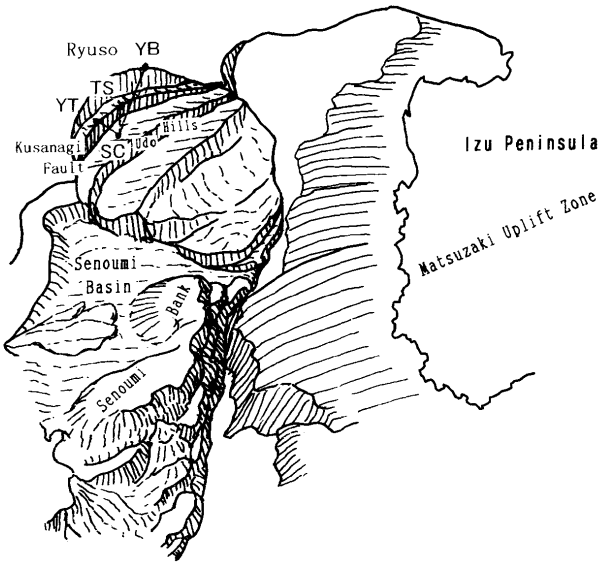

図 2 測距光路と草薙断層・麻機断層による円弧すべり地形.
Laser paths for ranging and submarine topography in the Suruga Trough with the Kusanagi and Asabata Faults showing gravitational collapse.
SC : 静岡大学地殻活動観測所Crustal Activity Observatory of Shizuoka University, YT : 谷津山 Yatsuyama, YB : 山原Yambara, TS : 鳥坂Torisaka.
草薙・麻機断層周辺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

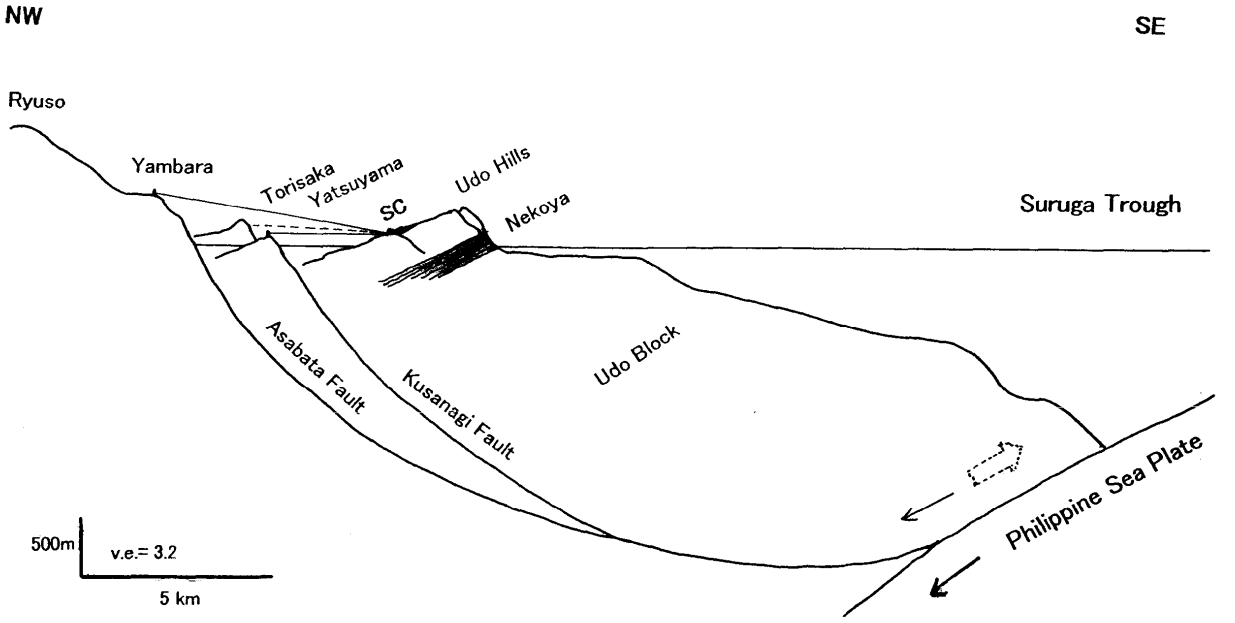

図 3 有度地塊の傾動と草薙・麻機断層およびフィリピン海プレートの沈み込み.
Cross-section for tectonic setting of tilting Udo Block showing to collapse along Kusanagi and Asabata Faults, and subduction of the Philippine Sea Plate.
直線・点線straight solid and dotted lines : 測距光路Laser paths for ranging ; SC : 静岡大学地殻活動観測所 Crustal Activity Observatory 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発射し，反射プリズムがレーザー光を発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Ds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(mmHg)・水蒸気圧E(mmHg)を用いて光路気温Tcを

$$Tc = \frac{106.339 \times P - 15.026 \times E}{310.0 + \dfrac{Ds - D}{Ds} \times 10^6} - 273.15 \qquad (1)$$

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に比較し，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)を定常的に測定し，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光の広がりが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，

$$dv/dh \fallingdotseq 1/r \qquad (2)$$

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．

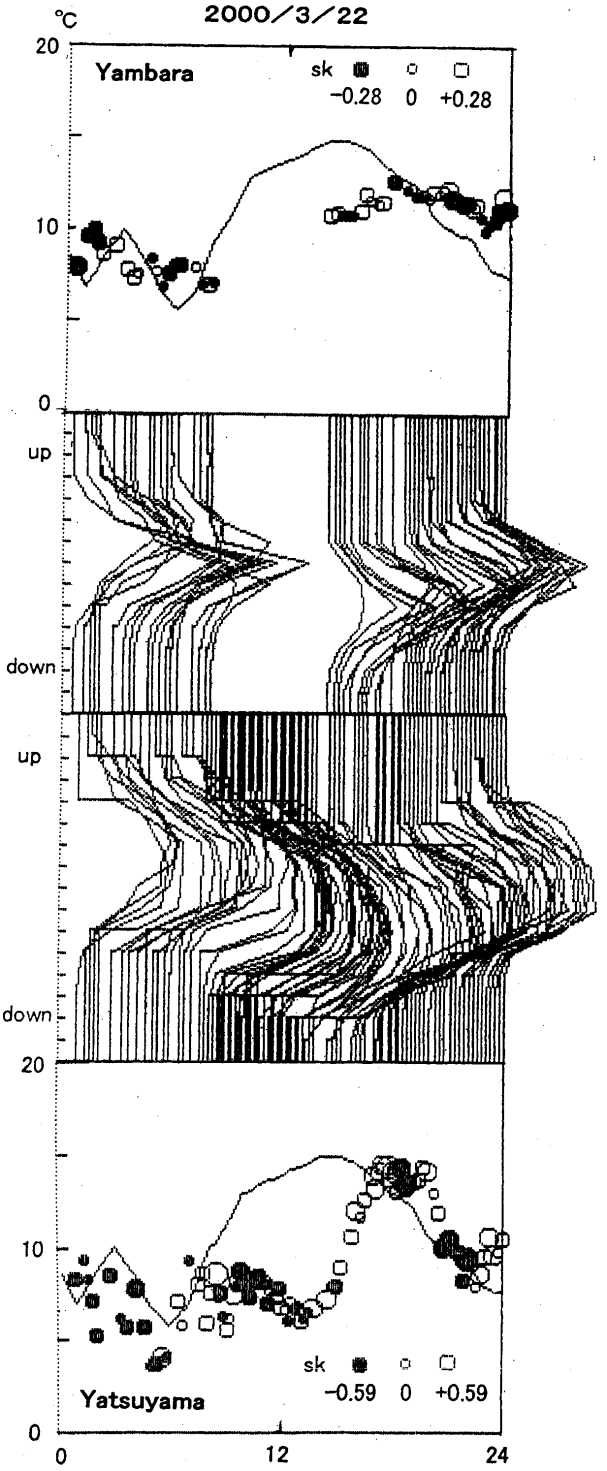

図 4　2000年3月22日0時から24時までの山原光路と谷津山光路の光路気温・歪度・地表気温.

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．逃げ水現象が起こると，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．蜃気楼現象が起こると，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こり，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)を形成して茸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．

冷気塊降下の場合には，冷気塊の先端(下底)が光路を通過すると逃げ水現象が起こり，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)．冷気塊の末部(上部)が光路を通過していると蜃気楼現象が起こり，蜃気楼光が正常光よりも強く負歪度になる(図5中3)．冷気塊は

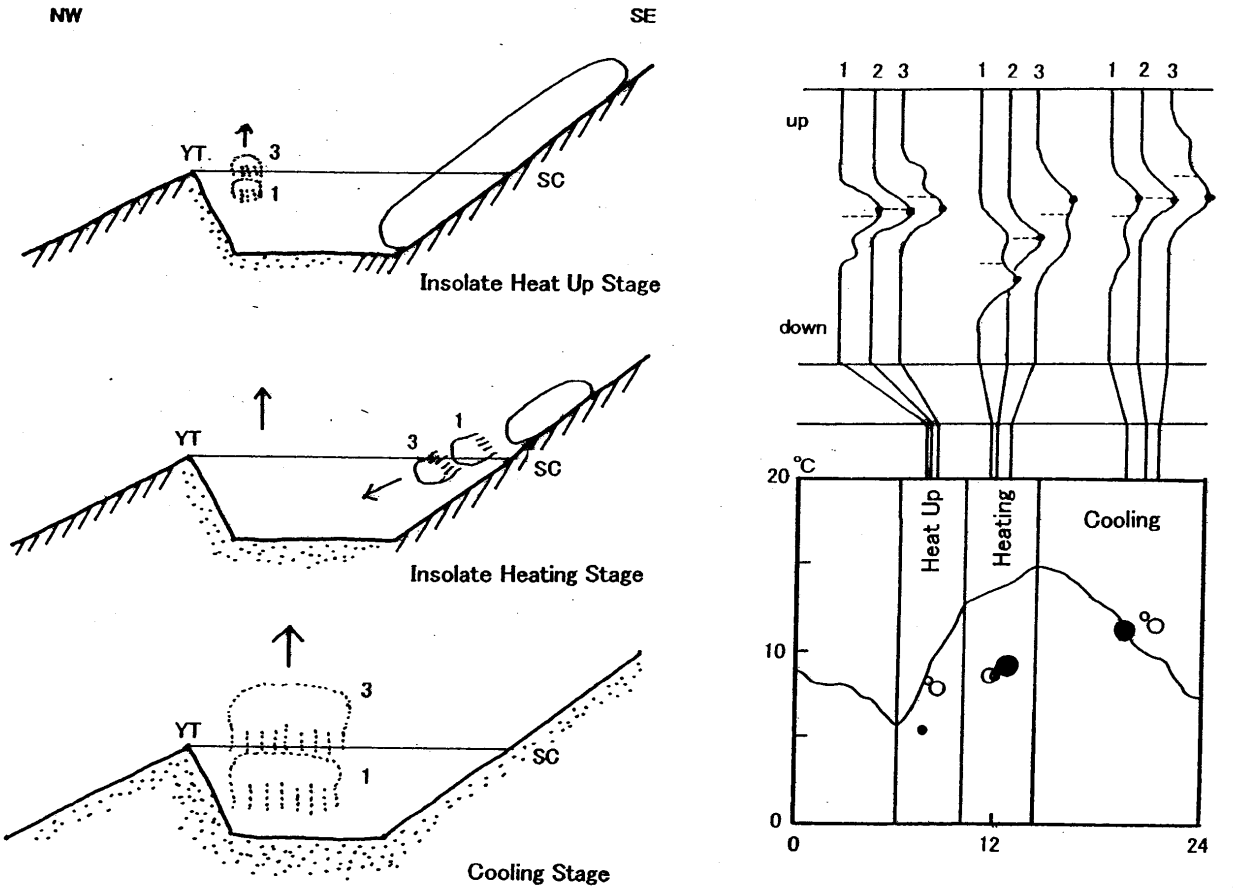

図 5 急昇温期・緩昇温期・降温期における暖気塊上昇・冷気塊下降と谷津山光路における反射光強度曲線の形態と歪度および光路気温・地上気温の関係.

Lifting of warmer air mass and sinking of cooler air mass in the isolate heat up, isolate heating and cooling stages, and calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yatsuyama laser path.

左図 Left Figures : 気塊の移動(矢印), 地形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 isolate heating of surface and shade mark for non-heating surface.

上・中・下図 Upper, Middle and Lower Figures of the left : 急昇温期・緩昇温期・降温期に対応. Isolate heat up, Isolate heating and Cooling stages.

右図 Right Figures : 縦の曲線は垂直位置走査によるレーザー受光強度曲線で縦線の位置は測定時刻に対応している. 気温グラフの丸印は受光強度曲線に対応する歪度であり, 白丸が正歪度, 黒丸が負歪度, 小白丸が歪度0を現し, 丸の位置は光路気温である. 気温グラフの曲線は地表気温. 1・3は左図の気塊の位置に対応し, 2 気塊の先端中央部通過時に対応する. 受光強度曲線上の黒点は最大受光位置, 点線は中央受光位置. 横軸は時間.

Reflected laser intensity curve (rightward strong) with vertical scan. Baseline locates on the time of the air mass position 1 and 3 in Left Figure, and correlates with the circle position of skewness in the lower graph. Line 2 corresponds at the center of air mass core. Black dot and dotted line on laser intensity curve represent maximum and median positions. In the lower graph, 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. Curve in the lower graph represents surface temperature. Horizontal axis corresponds to time.

比重が大きいために降下するので, 比重の大きい低温部が先端部(下底部)を形成して雫型の気温分布を持ち, 先端部が通過する際の逃げ水現象の起こる時間は短いが, その時の光路気温は冷気塊の最低気温を示し, 正歪度あるいは0歪度となる(図5中2). 大部分の時間は末部(上部)が通過する時間によって占められ, 蜃気楼状態となり, 光路気温が多少上昇して負歪度となる.

全反射光側に測距儀を合わせて測距をすると直接光の場合に比較して光路長が伸び, 算出される光路気温も低下するが, 観測された正常光と全反射光の間の角度は最大でも40秒角であり, その角度に対応する光路延長量を算出すると0.068mm, 算出光路気温0.017℃であり, 測距および光路気温測定について殆ど影響を与えない.

谷津山光路(図4)については最大受光の峰部が平坦になっているのは受光量測定が飽和状態に近づいているためであるが，歪度については上方と下方への裾野の形態からその変化を知ることができる．測定された歪度の平均は0で，歪度の標準偏差が谷津山光路では0.59目盛，山原光路では0.28目盛であった．

地表気温は，夜明け前に異常な上昇と降下をするが，日出時に最低気温，昼過ぎに最高気温となり，以後は周期的な揺らぎをもって降下している．

日出後の地表気温の上昇は，日出後の急昇温期Insolate Heat Up Stageとその後の緩昇温期Insolate Heating Stageに2分することができる．急昇温期に入ると谷津山光路の受光曲線が下方に移動し，地表が加熱されていることを読み取ることができる．歪度も負から正に変化し，受光曲線の幅も増大し，曲線頂部が飽和する．これとは対照的に山原光路においては受光強度が不充分で測距できない状態になり，谷津山の標高である100m前後とそれ以上では異なった大気状態にあることが分かる．谷津山光路の歪度は正であり，光路気温は地表気温と光路の最低気温との間にばらついている．正歪度であることは上昇暖気塊が光路に接近したことを示しており，地表日射によって加熱された地表付近の気塊が種々の規模で上昇し，光路を通過していることを物語っている(図5上)．

緩昇温期に入ると，山原光路における受光量不足のために谷津山光路観測が頻繁に行われるようになる．受光曲線はさらに下方に移動し，歪度は負に急変するとともに光路気温が低下を始める．谷津山光路気温の低下は冷気塊が日射を受けない有度丘陵北西斜面(図3)から降下して光路を通過しているためと考えられる．谷津山光路の受光曲線が周期的に変動しており，歪度も正負と交互に変化しているが，負歪度の光路気温は正歪度の光路気温よりも高い．冷気塊の先端が光路に達した時に光路気温は最低になり，逃げ水現象のために正歪度を持つ．冷気塊の末部が光路を通過していると光路気温は次第に上昇し，蜃気楼現象が起こり，負歪度となる．比較的気温の高い負歪度の点が多いことは(図4)，冷気塊が雫型の気温分布を持っていることと調和的である．光路気温と正負の歪度の周期的変動は次々と冷気塊が光路を通過していることを示しており，地表気温の昇温速度が減少していることと良く対応している．急昇温期には谷津山南東斜面が日射の開始とともに加熱され，地表付近から暖気塊が上昇するが，緩昇温期にはその上昇分を埋め合わすために有度丘陵からの冷気塊が降下する大規模な対流系を形成していることになる(図5中)．

午後に地表気温が最高に達すると，谷津山光路気温が急上昇して地表気温を越すが，この急上昇時には正歪度を持っており，光路を幾つもの暖気塊が逃げ水現象を起こしながら上昇通過していることが分かる．緩昇温期の特徴となった有度丘陵北西部の冷気塊量にも限界があり，冷気の供給が底をついた所でもっと大規模な対流系が形成され，谷津山光路は盛んな暖気塊の上昇通路となったと考えられる．この暖気塊が上昇を開始し始めると地表気温は降下を開始している．それ以後の地表気温は多少の揺らぎを持ちながら降下しているが，谷津山光路においては負歪度と正歪度を繰返し，正歪度において光路気温が上昇するのに対して地上気温は低下し，負歪度において光路気温が低下するのに対して地上気温の低下が緩慢になる．地表から大きな暖気塊が光路へ周期的に上昇し，先端部が光路直下に到達し，正常光よりも弱い逃げ水現象が起こり，負歪度となり，暖気塊の末部が通過すると，光路気温は急上昇した後に次第に低下するが，蜃気楼現象のために正歪度を持つ(図4，図5下)．山原光路においても正歪度と負歪度が周期的に繰返しており，この大規模な暖気塊の周期的上昇は山原光路にまで影響を与えていることが分かる．

日出前の異常な昇温については，山原光路気温がそれに先行して昇温していることから暖気の吹き込みがあったものと考えられる．気象台観測原簿によると地表昇温時の風向は西南西であることから暖気が南方から流入し，山原光路に位置していたことを示している．地表気温が昇温する時期には山原光路は正歪度に変化しており，暖気塊は上昇通過していったものと考えられる．谷津山光路においてはこの異常昇温時には負歪度を持ち，光路に暖気塊が存在していることを示している．

地表気温の降温期Cooling Stageに谷津山光路気温が地表気温と平行して降下しているが，気温そのものが地表気温よりも高温であることは，後述するが，設定した光路距離が有度丘陵の傾動のために短縮しているためである．

光路気温と地表気温変動の年周変化

光波測距による受光強度曲線による歪度と光路気温は，大気の詳細な気温構造を明らかにすることが示されたが，次に大気境界層の気温構造が季節によってどのように変化するかを検討する．検討に用いたのは，各月の典型的な測距例として2日以上の連続観測ができたものを原則として採用し，1998年11月以降は谷津山・山原共に観測されているものを選択した(図6・7)．

谷津山光路は有度丘陵と谷津山に囲まれた草薙盆状地の上縁に当たっており，歪度はこの上縁面における気温勾配，すなわち盆状地の中と外との気温差を監視していることになる．

1998年11月から山原光路の連続測距も実施しているが，前節で述べた有度丘陵北西斜面からの冷気降下の影響が認められないことは，山原の反射プリズム設置標高が448mと有度丘陵の最高標高307mよりも高く，山原光路が冷気塊降下の影響を受けないことと調和的である．山原光路気温の上昇や下降は気象台気温よりもなだらかで1時間以上の遅れを伴っている．日出後の光路気温の上昇よりも日出前までの光路気温降下は緩慢であり，鋸歯型を呈する．

1998年3月の谷津山光路気温(図6a)は，日出とともに日射加熱による負歪度と地表からの小規模な暖気塊の上昇通過による正歪度があり，負歪度の光路気温は低く，正歪度の光路気温は地表気温とほぼ同じように高い．日射加熱の進行にともない地表気温は高くなるが，負歪度が著しくなり，光路気温は低下することから冷気塊の降下であることが分かる．日射加熱の減衰とともに地表からの暖気塊の上昇による混合が進行し，地表気温と光路気温は次第に収束し，日出を向かえる．

1998年4月(図6a)には谷津山光路気温に3月の明瞭な変動は残るものの，昼前の冷気塊降下の度合いは減少し，夕方と明け方に地表からの暖気塊の上昇がある．

1998年5月(図6a)には日較差が減少するとともに最高気温は30℃にも達し，冷気塊の降下や暖気塊の上昇に

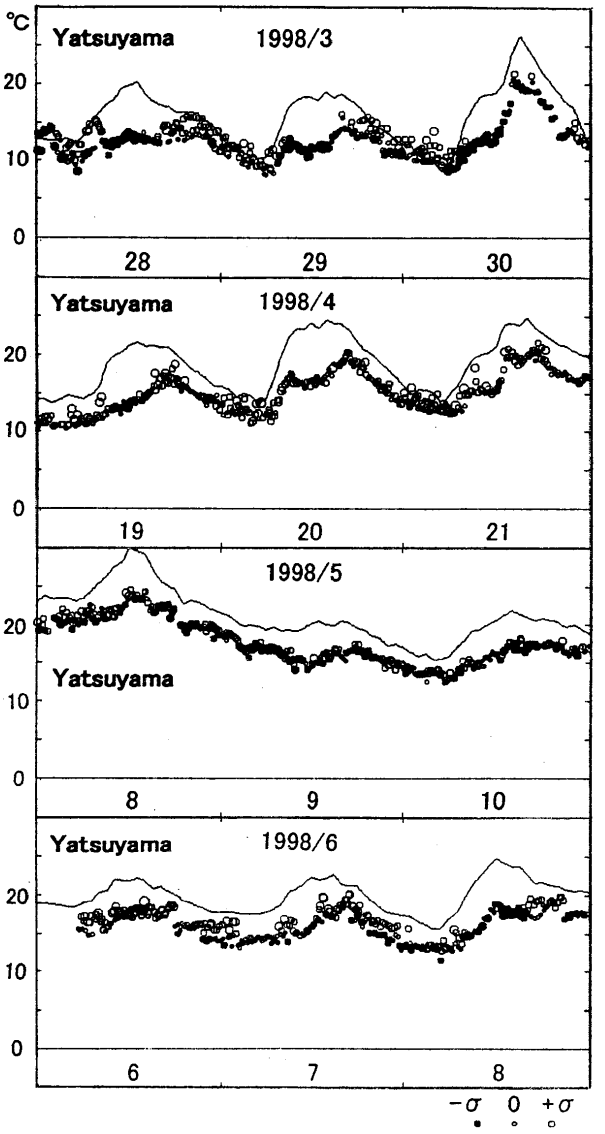

図 6a 谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日間連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
歪度は丸で示し，グラフ下の最も小さい白丸が0で黒丸が負の標準偏差歪度，白丸が正の標準偏差歪度を示しており，丸の位置は光路気温を示している．縦軸が気温で横軸が時刻.
Small open circle: non-skewness, 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 represents $\pm 1\sigma$ of skewness distributions in the series of measurements. The skewness circles located on their laser path temperature and curve represent surface temperature at the Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency with one-hour interval.
上から1998年3月28-30日，1998年4月19-21日，1998年5月8-10日，1998年6月6-8日で，歪度の標準偏差は0.64，0.52，0.35，0.52.
The standard deviations of skewness are 0.64 for 28-30 March 1998, 0.52 for 19-21 April 1998, 0.35 for 8-10 May 1998, and 0.52 step of vertical scan for 6-8 June 1998.

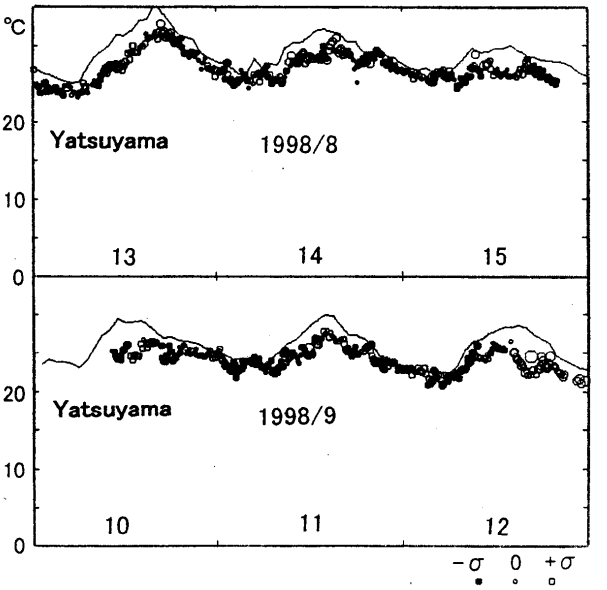

図 6b 谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日間連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
上から1998年8月13-15日，1998年9月10-12日で歪度の標準偏差は0.28，0.33.
The standard deviations of skewness are 0.28 for 13-15 August 1998, and 0.33 for 10-12 September 1998.

対応する谷津山光路気温の変動はなく，光路気温と地表気温は連動して変動している．

1998年6月(図6a)には気温が多少低下するため，5月よりも暖気塊の上昇や冷気塊の降下の影響が多少見られるが，大局的には谷津山光路気温は5月と同じである．

夏季には霞がかかり，測距可能日が極めて限定されるため，測距結果の得られた日は霞が晴れた特別な場合に当たるかもしれないが，1998年8月(図6b)には谷津山光路気温の変動は，日出とともに地表の日射加熱によって形成される地表暖気塊の上端が光路下に在り，負歪度を持ち，地表・光路ともに気温が上昇する朝凪の状態となる．昼前に朝凪が終わり，地表からの暖気塊の上昇によって地表気温は多少低下し，光路気温は上昇する．夕方には夕凪となり地表気温も光路気温も低下するが，光路の歪度は負となっており，上空からの冷却が行われていることを示している．地表大気と光路大気の密度の逆転が限界に達し，混合が始まり夕凪が終了して，日出まで気温は降下する．

1998年9月(図6b)には地表気温と谷津山光路気温は連動して変化しており，歪度の周期的変化も8月と基本的に変わらない．9月12日午後から歪度が正に急変は，暖気の吹き込みに対応していると考えられる．

1998年11月(図7a)になると日較差も増大し，谷津山光路気温に日出からの地表日射過熱，冷気塊の降下が認められるようになる．11月24日夜半における地表気温の上昇は正歪度の光路気温の上昇と対応していることから暖気の吹き込みによるものである．定常観測を開始した山原光路気温の日較差は極めて小さく，昼に

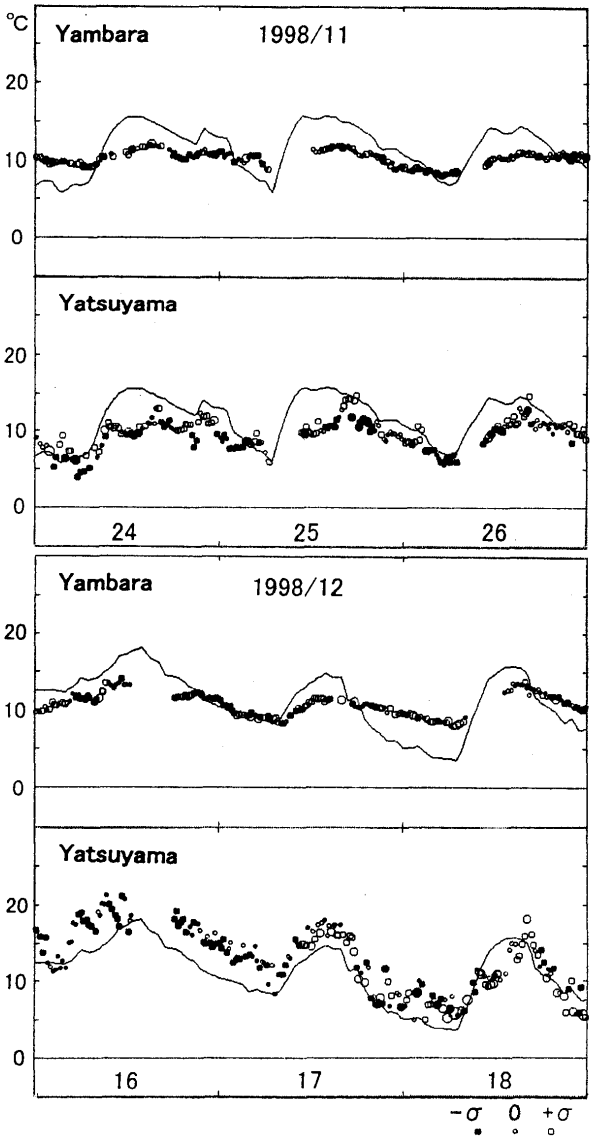

図 7a 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は1998年11月24-26日と1998年12月5-7日で歪度の標準偏差はそれぞれ1.33, 0.35, 0.36, 0.73.
The standard deviations of skewness are 1.33 and 0.35 for 24-26 November 1998, and, 0.36 and 0.73 for 5-7 December 1998.

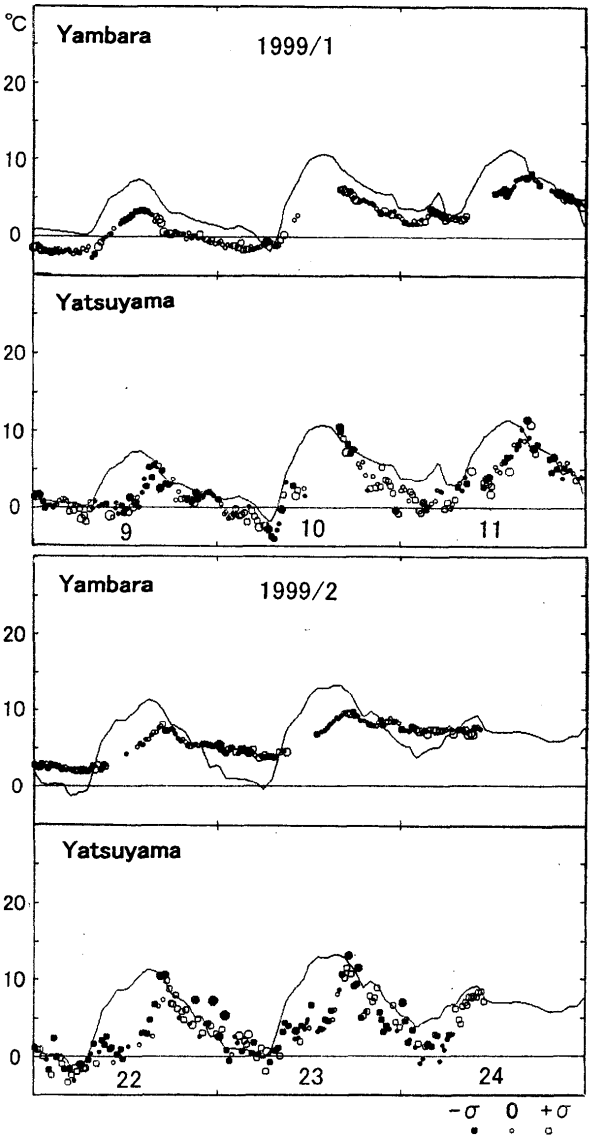

図 7b 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は1999年1月9-11日と1999年2月22-24日で標準偏差はそれぞれ0.37, 0.32, 0.36, 0.82.
The standard deviations of skewness are 0.37 and 0.32 for 9-11 January 1999, and, 0.36 and 0.82 for 22-24 February 1999.

光路気温のわずかな上昇が認められる．11月24日夜半から25日早朝にかけての気象台気温の変動と光路気温変動が対応しており，しかも光路気温変動が先行していることは，暖気と寒気の吹き込みが原因であることが分かる．

1998年12月18日(図7a)には谷津山光路気温に，午前の冷気塊降下と午後の暖気塊上昇という日変化を認めることができるが，その前前日の12月16日はかなり温暖であり，暖気から寒気の吹き込みに変化したことを示している．午前の地表の階段状気温上昇は，それに先行する階段状の山原光路気温の上昇と対応していることから暖気の吹き込みと考えられる．光路気温が階段状に上昇する時には正歪度を持ち，一定になると負歪度を持つことは，光路気温の上昇が上方から吹き込んだ暖気によることを示している．

1999年1月9日(図7b)には地表気温が氷点近くまで低下し，日出とともに地表気温は上昇するが，谷津山光路気温は殆ど上昇せず負歪度に変化することは，日射

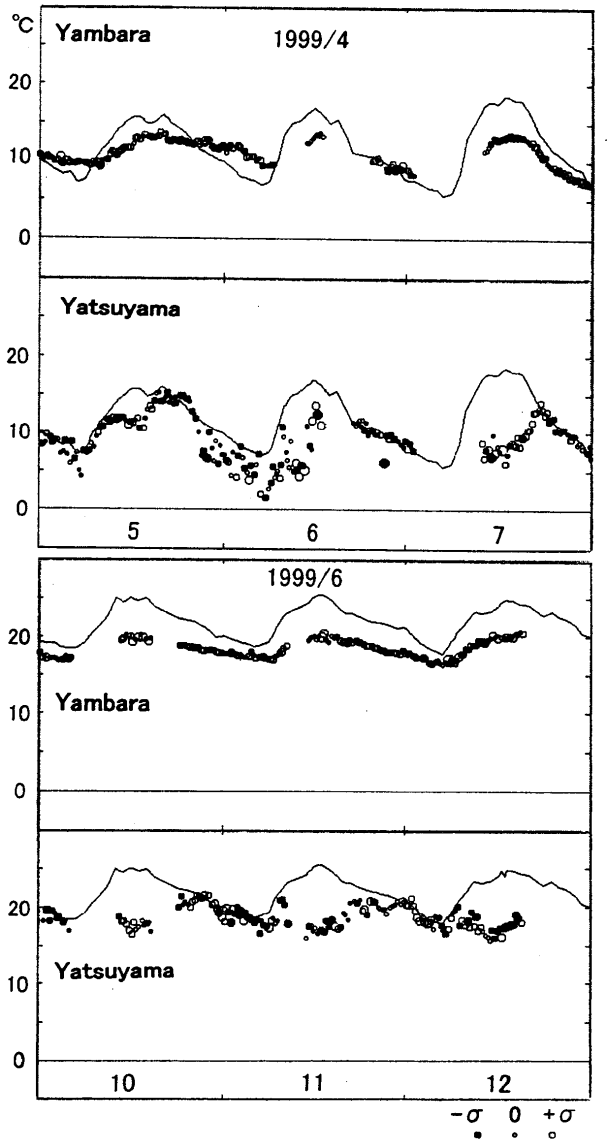

図 7c 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は1999年4月5-7日と1999年6月10-12日で歪度の標準偏差は0.34, 1.08, 0.48, 0.30.
The standard deviations of skewness are 0.34 and 1.08 for 5-7 April 1999, and, 0.48 and 0.30 for 10-12 June 1999.

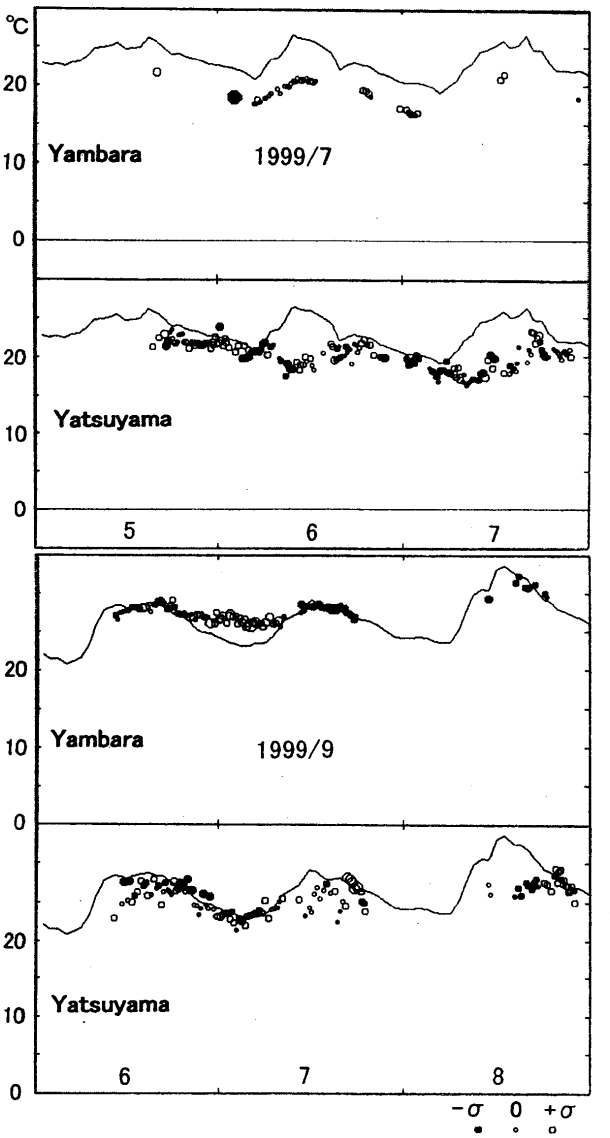

図 7d 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は1999年7月5-7日と1999年9月6-8日で歪度の標準偏差は0.68, 0.29, 0.49, 0.51.
The standard deviations of skewness are 0.68 and 0.29 for 5-7 July 1999, and, 0.49 and 0.51 for 6-8 September 1999.

による地表暖気塊上縁が光路近くまで上昇したことを示しており，日出前の正歪度は放射冷却による地表冷気塊上縁が光路まで達していることを示している．光路気温が殆ど上昇しないことは冷気塊の降下によるものであり，午後に光路気温が地表気温程度まで上昇するが，歪度が負であることが多いことは，地表からの暖気塊の上昇が弱く通過することが少ないことを示唆している．山原光路気温と気象台気温と非常に良く対応して大きな日較差をもって変動している．特に1月9日はほぼ同じような日変化している．光路気温の上昇初期と下降初期に正歪度になっており，不変時には負歪度になっている．11日の日出前の昇温は，光路気温の上昇が先行して正歪度をもつことから，暖気の吹き込みであることを示している．

1999年2月(図7b)にも地表気温は氷点下に下がっており，日出後の日射による地表加熱に対応して谷津山光路の負歪度への変化があるが，光路気温の上昇は午後の混合まで起こっていない．2月24日の異常昇温は正歪

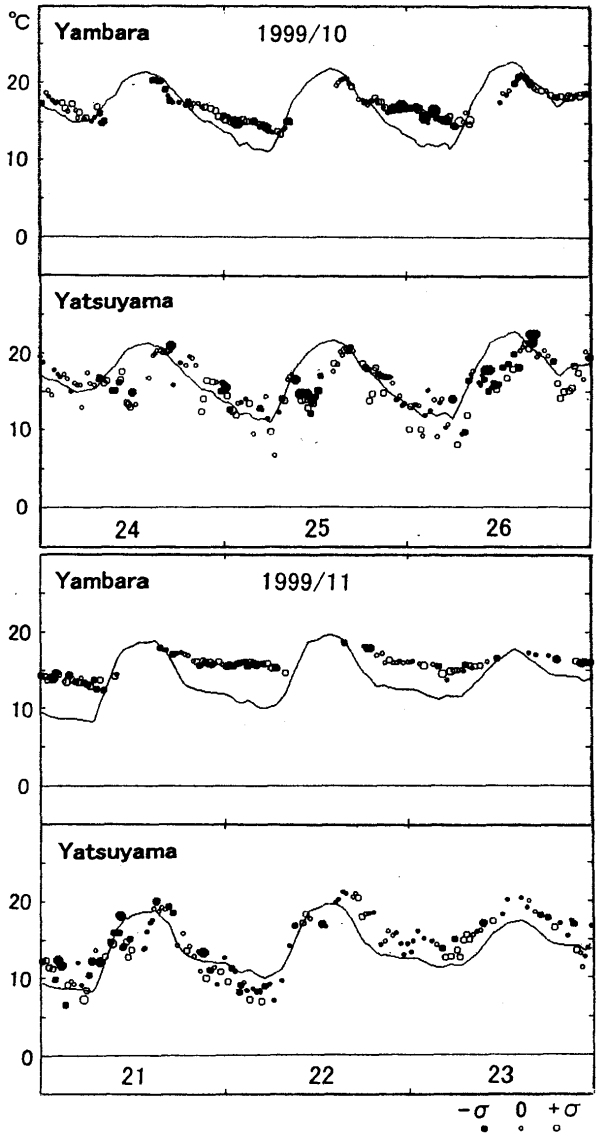

図 7e 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は1999年10月24-26日と1999年11月21-23日で歪度の標準偏差は0.80, 0.45, 1.38, 0.47.
The standard deviations of skewness are 0.80 and 0.45 for 24-26 October 1999, and, 1.38 and 0.47 for 21-23 November 1999.

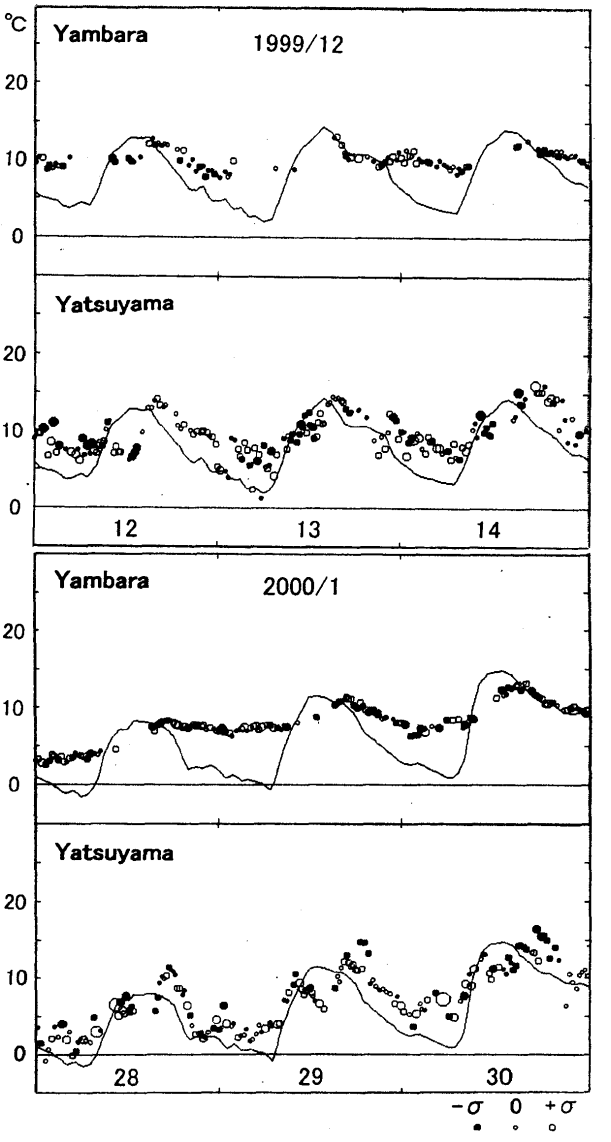

図 7f 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は1999年12月12-14日と2000年1月28-30日で歪度の標準偏差は0.71, 0.43, 0.33, 0.38.
The standard deviations of skewness are 0.71 and 0.43 for 12-14 December 1999, and, 0.33 and 0.38 for 28-30 January 2000.

度と対応しており，暖気の吹き込みであることを示している．山原光路気温は鋸歯状というよりも昼間の日射によって階段状に上昇しており，上昇時には歪度が極めて小さくなっており，気温勾配に殆ど乱れがなかったことが分かる．

1999年4月(図7c)の3日間の谷津山光路気温はそれぞれ異なった変動を示しており，不安定な天候を示している．夜半前は地表気温に対応して光路気温も一様に低下しているが，4月6日の日出前に光路気温が著しく低下して負歪度で不安定なのは夜半前に寒気の吹き込みがあったことを示している．山原光路気温の記録は不完全であるが，4月5日昼の山原光路気温の上昇時と7日夕方からの下降時には正歪度となっている．

1999年6月(図7c)には谷津山光路気温は殆ど変動しないが，日の入り後の正歪度は地表の放射冷却を示している．日出後の光路気温が日出前の光路気温よりも低下することは冷気塊の降下によるものであろう．日出後の山原光路気温上昇と午後の極めて一様な降下が見

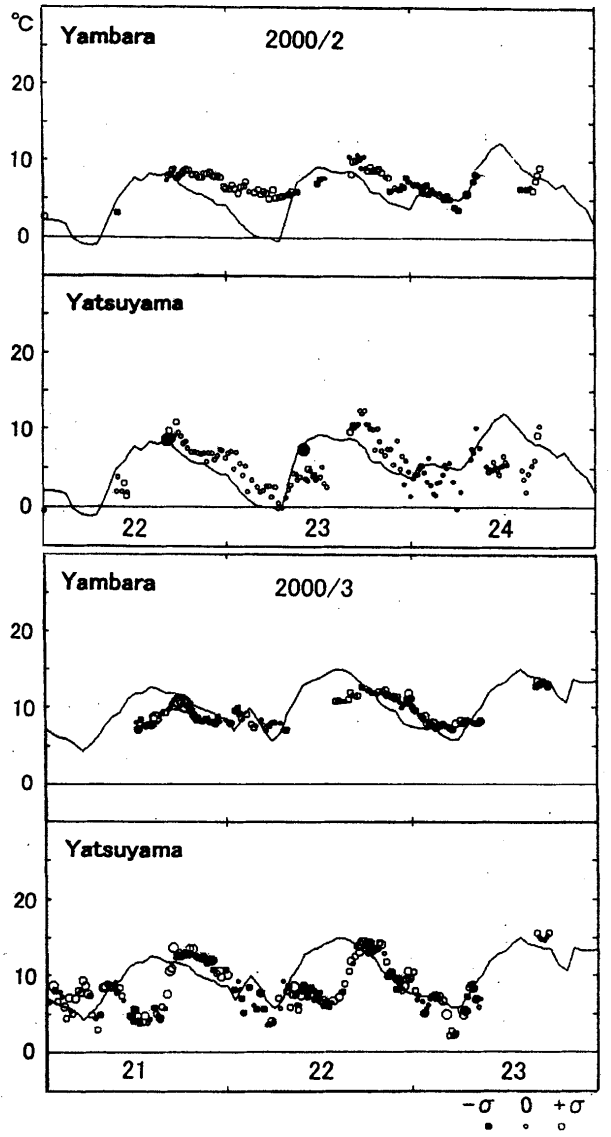

図 7g 山原光路と谷津山光路における光路気温・歪度・地表気温の3日連続記録.
Three day record of calculated temperature and skewness of laser intensity with vertical directional adjustment on Yambara and Yatsuyama laser paths, and surface temperature.
測定は2000年2月22-24日と2000年3月21-23日で歪度の標準偏差は1.43, 1.03, 0.28, 0.59.
The standard deviations of skewness are 1.43 and 1.03 for 22-24 February 2000, and, 0.28 and 0.59 for 21-23 March 2000.

られるが，気象台気温のわずかな気温変動に対応した変動が認められる.

1999年7月(図7d)は，基本的に前月の6月と同様に谷津山光路気温の変化は少なく，冷気塊の降下と午後の混合，によって変動している.

1999年9月(図7d)は，30℃を超える日もあるが，9月7日午後に正歪度の高温の谷津山光路気温によって暖気の流入が覗える．夜半から日出前まで山原光路気温はわずかに低下するが，正歪度となっている.

1999年10月(図7e)には日較差が増大し，谷津山光路気温に日出後の地表気温上昇と光路への冷気塊の降下が現われている．山原光路気温にも鋸歯状の変化が認められるが昇温期には霞んで測距不能になるのでその様子は判然としないが，降温期には光路気温も気象台気温も振動しながら日出まで降下する．光路気温が降下する時には正歪度であり，不変の時には負歪度の傾向がある.

1999年11月(図7e)は，地表気温と谷津山光路気温とほぼ連動して変動しており，昼の冷気塊降下は余り起こっていない．山原光路気温は日較差が小さくほぼ一定を保つが，光路気温と気象台気温の変動との対応があり，光路気温の変動が先行しているようであり，降温期に正歪度の傾向がある.

1999年12月(図7f)の谷津山光路気温は，日出前の混合と日出後の冷気降下の影響が認められ，12月12日夜半には小規模な暖気の流入が認められる．気象台気温の日較差は大きくなるが，山原光路気温の変化は少ない.

2000年1月(図7f)，日出後の地表気温と谷津山光路気温の連動した上昇があり，昼に冷気降下が起こっている．1月28日から30日にかけては寒波が緩む時期に当たっているが，山原光路気温は昼に昇温するが，夜間の降温はわずかで次第に昇温している．夜間の光路気温変動において降温時には正歪度のようである．この変動は気象台気温と対応させることが可能で，光路気温変動が先行しており，暖気の吹き込みを示している.

2000年2月(図7g)，山原光路気温は気象台気温変動より振幅が小さいが，対応する変動に先行しており，降下時に正歪度になっている.

2000年3月21-22日(図7g)，谷津山光路気温は日出後に低下して負歪度を持ち，冷気塊降下が認められる．3月21日の冷気降下による光路気温低下時には負歪度とともに正歪度も持つ．午後には，正歪度を持って光路気温は急上昇し，暖気塊上昇を示している．暖気塊上昇開始には地表気温の低下が認められる．それ以後，負歪度と正歪度の繰返しに光路気温と地表気温が低下するが，正歪度において光路気温が上昇するのに対して地上気温は低下し，負歪度において光路気温が低下するのに対して地上気温の低下が緩慢になることから，周期的に地表から上昇する暖気塊が谷津山光路を通過する様子を示している．この周期的な変化は3月22日から23日にかけて典型的に現われている．3月24日に雨のために欠測が多くなっている．山原光路においても正歪度と負歪度が周期的に繰返しており，光路気温は正歪度で上昇，負歪度で低下することから，地表からの暖気塊の上昇・通過を認めることできる．3月22日早朝に地表気温が異常に上昇するが，この上昇に先だって山原光路気温が上昇していることは，暖気の吹き込みを示唆している．3月22日については前述してある(図4).

気象台気温と光路気温の差

光路気温と気象台気温の日変化と季節変化は，地表の日射加熱・放射冷却，暖気塊の上昇・冷気塊の下降による気温構造変動として捉えることが可能になったので，気象台気温と光路気温を定量的に比較することによって，測距値から光路気温を算出する際に用いている光路長が一定であるとの仮定について検討を行う

ことにする．光路長の変動は，測距儀と反射プリズム間の地殻変動に起因するが，一般に地殻変動の速度は気温の日変化に比較して小さいと考えられる．地殻変動によって光路長が変化すれば，算出される光路気温に光路長変化に対応する気温差が加算あるいは減算され，系統的な差を生じることになる．光路長が短縮すると算出気温は高温側に，伸長すると低温側にずれる．気温差1℃は谷津山光路について4mm，山原光路について10mmの伸縮に対応する．

1998年3月(図6a)には，谷津山光路気温は気象台気温とほぼ同じであり，より高温側の測点もあるが，4月には全て気象台気温よりも低温側になり，5月には光路気温が数℃低くなっている．6月になるとその差は減じるが光路気温は全て低温側にある．

1998年8月，9月(図6b)には，光路気温と気象台気温との差は減じ，9月には気象台気温と同じ測点も出てくる．1998年11月(図7a)には，正歪度で暖気塊が通過している場合にのみ谷津山光路気温が気象台気温を上回っている．12月には，12月18日の冷気塊降下にともなう光路気温の低下時以外は谷津山光路気温が気象台気温よりも高い．

1999年1月(図7b)には，午後の降温期のばらつく谷津山光路気温の平均値が気象台気温に近い値を持つ．1999年4月と6月(図7c)には，谷津山光路気温は降温期に気象台気温と良く一致し，7月・9月(図7d)には谷津山光路気温が気象台気温を多少上回ってくる．1999年10月・11月(図7e)には谷津山光路気温は次第に気象台気温より高くなり，1999年12月・2000年1月(図7f)には一部の冷気塊降下時以外は上回っている．2000年2月・3月(図7g)と谷津山光路気温と気象台気温との差が減じるが，谷津山光路気温は気象台気温よりも高い．

山原光路の算出気温を気象台気温と比較すると，1998年11月・12月(図7a)にはほぼ同じ温度範囲を変化しており，同一気温となることが毎日起こっている．1999年1月(図7b)には山原光路気温は常に気象台気温を下回るが，1999年2月(図7b)・1999年4月(図7c)には毎日交叉している．1999年6月(図7c)には山原光路気温は気象台気温を常に下回り，1999年7月(図7d)にその差が拡大する．1999年9月(図7c)には山原光路気温が気象台気温を上回り，昼間の最高気温も山原光路気温が気象台気温を上回っている．1999年10月・11月(図7e)にも山原光路気温は高い状態を保つが，昼間の最高気温は気象台気温よりも多少低い．1999年12月・2000年1月(図7f)・2000年2月(図7g)には昼間の山原光路の最高気温が再び気象台の最高気温を上回る日がある．2000年3月(図7g)には，山原光路気温は低下し，気象台気温曲線と交叉するようになる．

光路長変化に起因すると考えられる谷津山光路気温および山原光路気温と気象台気温の差は同じ傾向で変化している．

光路長変化

光路長変化に起因すると考えられる光路気温と気象台気温との系統的な差の変動を定量的に解析するために，光路気温と気象台気温がともに下降して安定する21時から24時の間の測距値を対象とし，10回の測距値平均から算出される光路気温の標準誤差が谷津山光路については0.15℃以下(光路長0.6mm以下)，山原光路については0.075℃以下(光路長1mm以下)の算出光路気温の気象台気温からの差を求めた(図8)．

谷津山光路については，1998年3月から4月にかけて20mmの伸長に対応する気温差数℃の急減があり，それ以後1998年12月まで気温差は増加している．その間に1998年5月から6月にかけての減少と1998年9月から11月にかけての減少が認められる．1998年12月には短期的な増加が認められるが，1999年1月から1999年9月までは気温差は0℃付近を保持する．1999年10月から気温差は増加し，1999年12月から2000年1月に最大に達し，2000年2月から3月には減少するが，0℃よりも大きい．

山原光路についても谷津山光路と同様の変動が認められる．1998年3月から2000年3月までの両光路における光路長の変動幅は数cmにも達している．

光路長変動と傾斜変動

傾斜については1998年以降，南北成分と東西成分について1分角を上回る変動記録を得ている(図8)．南北成分と東西成分の変動には降雨による短期的な変動も含まれるが大局的には類似した変動が認められる．その変動は，傾斜計の設置してある静岡大学地殻活動観測所が有度丘陵の傾動方向である北西方向に傾動の度合いを増減させていることに対応付けることができる．ただし，1998年5月から1998年12月まで南北成分と東西成分が逆相に変動している．

傾斜変動で顕著なのは，1998年4月の急激な傾動の増大と1999年12月からの傾動の減少である．傾斜の東西成分と谷津山光路長変動とは良く対応しており，谷津山光路長変動は傾斜変動よりも1-2ヶ月先行している．光路長は伸長すると北西への傾動が増加し，光路長が短縮すると傾動が減少している．

有度丘陵の傾動は草薙断層に沿う円弧すべりによると考えられ，円弧すべりの回転中心は測距儀を設置してある静岡大学地殻活動観測所よりも南東方の上空にある(図3)．この回転中心の周りに有度丘陵を傾動させると，草薙断層の滑落崖の上にある谷津山と観測所間の谷津山光路長は伸長し，傾動を減少させると短縮することになる．観測された光路長変動と傾斜変動は，この草薙断層に沿う円弧すべりと良く対応している．

草薙断層に沿って傾動する有度地塊は，駿河トラフにおいて南東側から沈み込むフィリピン海プレートに載り上げている．この載り上げているすべり面が固着していて，フィリピン海プレートの沈み込みが起これば，有度地塊の傾動は減少し，すべり面の固着が外れて草薙断層が変位すると有度地塊の傾動が増大する．草薙断層が変位して有度地塊の傾動が増加する現象は，草薙を震源とする1993年8月7日の地震(M4.2)の際に観測されており(新妻,1995)，さらに大規模な地震(M6.4)は1935年7月11日に起こっている(長島，1999)．この傾動が約10万年前の最終間氷期の海岸平野面を約10度傾動隆起させ，日本平を形成していることは，草薙断層に沿う円弧すべりが累積して現在に到っていることを示している．

1998年3月には草薙断層に沿う地震は起こっていないことから，フィリピン海プレートの沈み込みが緩み，有度地塊の傾動が増大して谷津山光路が伸長し，1999年11月にはフィリピン海プレートの沈み込みが進行して谷津山光路が短縮したといえる．

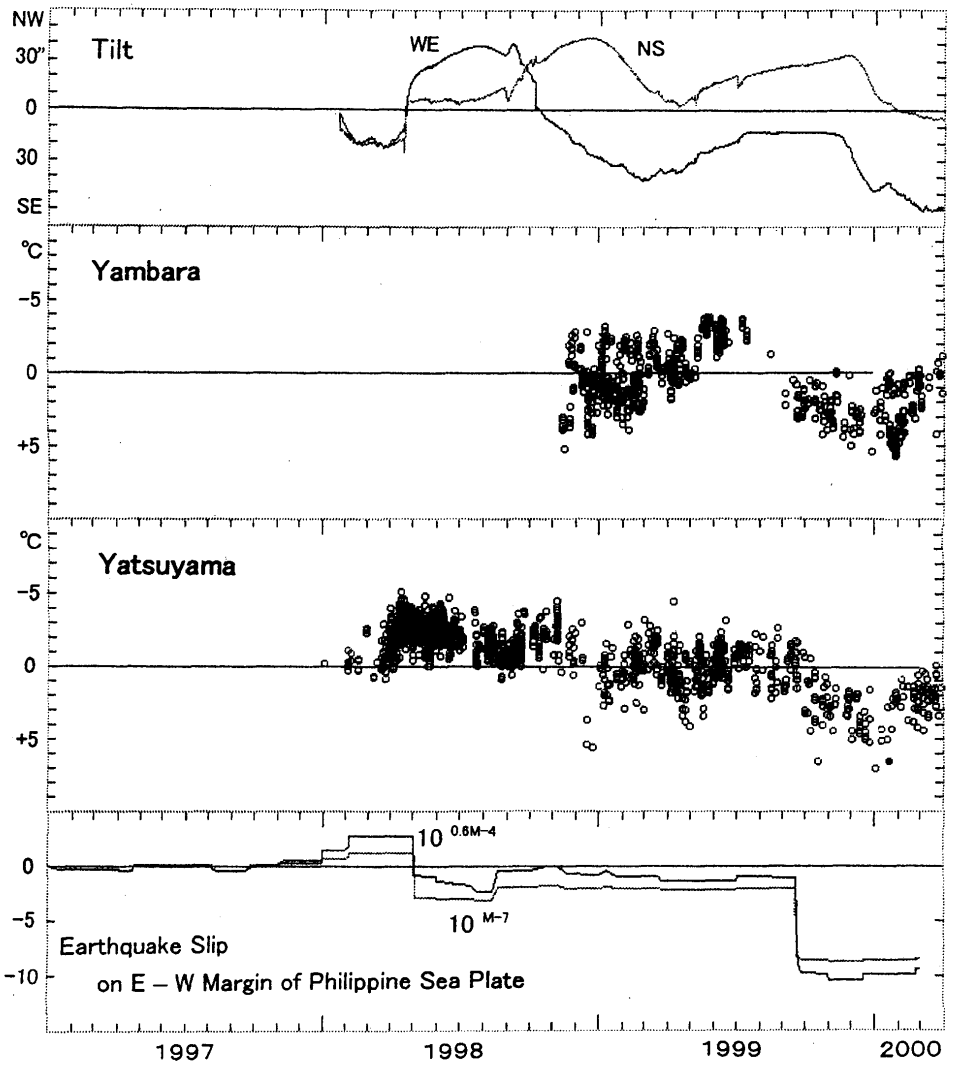

図 8 傾斜変化・山原光路・谷津山光路気温と気象台気温との差の経年変化・フィリピン海プレート東縁および西縁における地震による釣り合い.

Tilt, difference between laser path temperature and surface temperature for Yambara and Yatsuyama paths, and balance of the Philippine Sea Plate caused by earthquakes along eastern and western margins.

上図Upper graph：静岡大学地殻活動観測所で観測された傾斜変化を示し，グラフ上方ほど有度丘陵の傾動方向である北西方向に傾斜し，下方ほど傾動が減じる．濃線がNS成分，薄線がWE成分．1目盛は10秒角.

Tilt record, measured with tiltmeter of Applied Geomechanics type 701-2 at Crustal Activity Observatory of Shizuoka University. Thick line for NS component, thin line for WE component. Upper direction of this graph corresponds to increase in the tilt of the Udo Block. Vertical scale: 10 seconds.

中図Middle graphs：夜間21-24時において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℃・谷津山光路については0.15℃以下の測定値について気象台気温との気温差を縦軸に表示してある．グラフ上方ほど光路気温が地表気温に比較して低く，光路距離が拡大し，下方ほど光路距離が短縮する．気温差1℃の変化は山原光路距離10mm・谷津山光路距離4mmの変化に対応する.

Air temperature difference of laser paths on Yambara and Yatsuyama from surface of the Shizuoka Station of the Japan Meteorological Agency at 21:00 to 24:00 with less standard error in 10 times repeated measurement than 0.075℃ for Yambara laser path and 0.15℃ for Yatsuyama laser path. Upper direction of these graphs corresponds to a lower temperature of laser path than surface temperature and a longer laser path. The difference of 1℃ corresponds to 10 mm of length for Yambara laser path and 4mm for Yatsuyama laser path.

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)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．参考のために変位面積に対応する積算量(10 ^ M-7)の均衡についても薄線で示した.

Balance of the Philippine Sea Plate based on significant earthquakes listed in "Monthly Report on Earthquakes and Volcanoes in Japan" of Japan Meteorological Agency. Thick curve represents balance in the accumulation of dislocation along the eastern margin, 10 ^ (0.6M-4), for the earthquake with Magnitude M along the western margin of the Philippine Sea Plate. Thin curve represents balance on the accumulation of dislocated area along the eastern margin, 10 ^ (M-7), for the earthquake with Magnitude M along the western margin of the Philippine Sea Plate.

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.

有度地塊の傾動変化と地震活動

有度地塊傾動に顕著な変化が認められた1998年4月と1999年11月には，フィリピン海プレートにおいて顕著な地震活動が起こっている．1998年4月21日から伊豆半島東方沖群発地震と1999年9月21日の台湾中部地震である．

伊豆半島東方沖群発地震は深度 1-7 km を震源とし，1998年4月26・27日にM4.4・M4.7の地震を，5月3日にM4.0・M5.7の地震を起こしている．観測された地震数は1998年4月に151回，5月に60回であった．この地震は地殻浅所へのマグマ貫入と関係しており，震源域では伸張性の地殻変動が観測されている．

谷津山光路の伸長は1998年3月下旬に開始し，傾動の増大は4月中旬に開始され，谷津山光路伸長が1998年4月中旬に最大に達した後に伊豆半島東方沖群発地震の活動が開始している．光路の伸長と傾動の増加は，駿河トラフにおけるフィリピン海プレート沈み込みの緩みと対応していることから，フィリピン海プレートを沈み込ませる圧縮力が減少した後に群発地震が起こったことになる．フィリピン海プレートに載る伊豆半島東部におけるマグマの浅所貫入は圧縮力の減少と調和的である．

台湾中部の地震はフィリピン海プレートが台湾においてユーラシアプレートに衝突・衝上して起こったものである．フィリピン海プレート西縁は，駿河トラフ・南海トラフ・琉球海溝とフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込むと同時に足柄・有度傾動地塊南方の伊豆半島松崎沖石花海ゴージ・台湾で衝突している．台湾の衝突境界が地震によって移動すれば，石花海ゴージにおける圧縮力は増大するとともにフィリピン海プレートの沈み込ませる圧縮力が増大することが予想される．台湾中部地震1ヶ月後の10月下旬から谷津山光路の伸長が明確となり，11月中旬から傾動角の減少が起こっていることは，この予想を裏付けている．

台湾中部地震と静岡の地震

1999年9月21日2時47分に台湾中部でM7.7の地震が起こったが，台湾では死者100人を越す地震が1900年以降6回起こっており．3217人と最多の死者を出した地震は1935年に起こっている．静岡では1935年に大谷地震が起こり9人の死者を出している．大谷地震は草薙断層に沿う有度地塊の傾動に伴うものである．フィリピン海プレート西縁の衝突境界に位置する静岡と台湾においては地震の発生に関して，強い相関関係が見出すことができる(表1)．

1999年台湾中部の前年1998年には伊豆東方沖群発地震が起こっているが，1906年台湾地震の前年の1905年には伊豆大島近海地震が起こっており，対応関係が示唆される．今回の台湾地震は発生間隔が35年と最も長いが，前回の1964年台湾地震の翌年1965年に静岡では死者を出した最後の地震が起こっていることから，静岡において被害地震発生の可能性は極めて高い，

有度地塊が駿河トラフにおいてフィリピン海プレートに押されて傾動を減じており，光路長は短縮から伸長に転じているが，傾斜の減少は継続しており，草薙断層に沿う大谷地震の再来が危惧される．

フィリピン海プレートと太平洋プレートの運動

静岡地域ではフィリピン海プレート西縁が駿河トラフで沈み込みあるいは衝突しているが，東縁は伊豆海溝で太平洋プレートが沈み込み，2重沈み込み帯の最北部に位置している．伊豆海溝に沿って伊豆火山弧がフィリピン海プレート上に載り，その最北部に伊豆半島が位置し，足柄において本州に衝突している(NIITSUMA, 1999)．

太平洋プレート運動が最大速度となるオイラー赤道はマリアナ海溝の北部を通っており，太平洋プレートは10.8cm／年の速度で西北西進している．オイラー緯度が増大するとともに速度を減じるが，オイラー緯度13°以内では，太平洋プレートの相対運動はフィリピン海プレートの沈み込みと伊豆・小笠原・マリアナ海溝によって2重に消化されており，それよりも高オイラー緯度においては，太平洋プレートが直接沈み込む日本・千島・アリューシャン海溝およびトンガ・ケルマデック海溝で消化されている．オイラー緯度が45°を越すと，カリフォルニアのサンアドレアス断層とニュージーランドのアルパイン断層と横ずれ断層によっても北米プレートとオーストラリアプレートとの相対運動が消化されている(図9)．

オイラー緯度に対して太平洋プレート運動が対称性を有していることはプレート運動の原動力を考えるに当たって有力な手掛かりを与える．太平洋プレートは東太平洋海膨で拡大・生産されているが，この拡大がプレート運動の原動力であれば，太平洋プレートは海溝において強制的な沈み込みを起こしていなければならない．しかし，オイラー赤道に当たるマリアナ海域では背弧海盆が拡大していることから，東太平洋海膨の拡大はプレート相対運動を賄いきれていないことを示している．この背弧海盆の拡大に関しては，マリアナに沈み込んでいるスラブが錨の役割を果たしており，太平洋プレートの相対運動は全てマリアナ海溝における沈み込みによって消化されているとの考えもあるが(UYEDA, 1982)，その場合にはマリアナにおける背弧拡大は，背弧側の琉球海溝における沈み込むためにその相対運動を解消していることになる．いずれにしろ太平洋プレートのオイラー赤道に当たる地域では海洋底の沈み込みが盛んであることは確かである．

沈み込む海洋底の年齢を比較すると日本海溝の方がマリアナ海溝よりも古い海洋底が沈み込んでいることから，マリアナ海溝における異常で急速な沈み込みを太平洋プレート運動の駆動力と考えることよりも，オイラー赤道に存在して太平洋プレートを駆動している候補となるのは琉球海溝の存在が重要である．ここではマリアナ海溝と琉球海溝が二重に太平洋プレートの相対運動を消化しており，東太平洋海膨の拡大を上回っていることになる．他の海溝による沈み込みが太平洋プレート運動を駆動しているとすると，オイラー緯度についての対称性が厳密に守られていなければ実現困難である．また，オイラー赤道付近にはマリアナ弧の背弧のマリアナトラフ拡大のみならず琉球弧においても沖縄トラフが拡大している．背弧拡大はスラブの傾斜が増大すること，あるいはスラブが錨の役割を果たし，受動的に背弧側がたまたま拡大方向に移動したとする考えがあるが，いずれにしろ海溝における沈み込みが活発であることが要件となる．オイラー赤道が受動的なものであれば，強制的な沈み込みが太平洋プレー

表1 台湾中部の被害地震のマグニチュード・死者・<間隔>と静岡および中部日本の被害地震との対応関係.

台湾			静岡			
1904年	M6.0	145人	1905年6月2日	安芸灘	M7 1/4	11人
1906年	M6.8	1258人	1905年6月7日	大島近海	M5.8	
<10年>						
1916年	M6.0	1人	1916年2月22日	浅間山	M6.2	
1916年	M6.5	16人	1916年11月26日	神戸	M6.1	1人
1917年	M6.2	57人	1917年5月18日	静岡	M6.3	2人
<18年>						
1935年	M7.1	3276人	1935年7月11日	大谷	M6.4	9人
			1936年2月21日	河内	M6.4	9人
<6年>			1936年12月27日	新島	M6.3	3人
1941年	M7.0	357人	1941年7月15日	長野	M6.1	5人
			1941年11月19日	日向灘	M7.2	2人
			1944年12月7日	東南海地震	M7.9	1223人
<23年>			1945年1月13日	三河地震	M6.8	2306人
			1946年12月21日	南海地震	M8.0	1330人
1964年	M7.0	106人	1964年6月16日	新潟地震	M7.5	26人
			1965年4月20日	静岡	M6.1	2人
<35年>			1965年8月3日	松代群発地震		
			1998年5月3日	伊豆半島東方沖群発地震	M5.7	
1999年9月21日	M7.7	2119人				

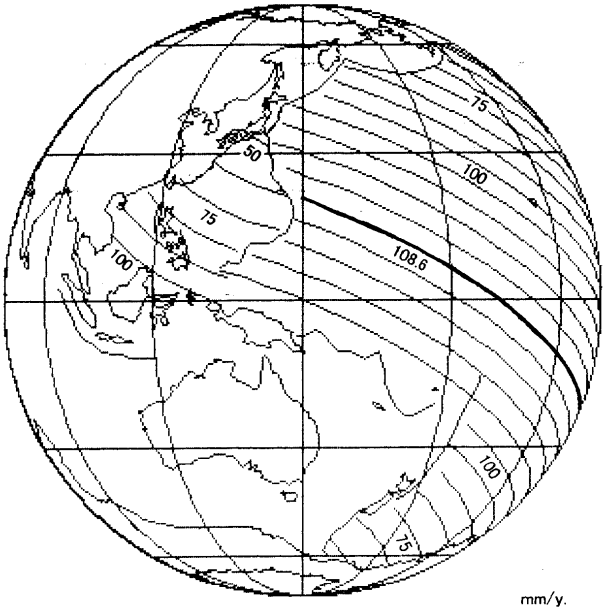

図 9 太平洋プレートとフィリピン海プレートの運動.
Relative motions of Pacific and Philippine Sea Plate with respect to Eurasian Plate.

東経150°，北緯0°を中心とする正射投影．プレート運動方向を現す曲線の間隔は運動速度の逆数に比例するように取ってあり，間隔が広いほどプレート運動速度は小さい．数字はプレート運動速度でmm／年．プレート運動はユーラシアプレートに対する相対運動である．太平洋プレート運動曲線の太線は最大運動速度の位置（オイラー赤道）．使用してプレート運動のオイラー極と回転速度はSeno et al(1993)による．フィリピン海プレートの南縁におけるプレート運動は太平洋プレートのプレート運動と一致し，太平洋プレート運動はフィリピン海プレートの東西両縁で消化されている．

Orthogonal projection with the center of latitude 0° N and longitude 150° E. Curves represent the directions of Pacific and Philippine Sea plate motion along the small circle for their Euler poles (SENO *et al.*, 1993).

Interval of the curves is in inverse proportion to the velocity of plate motion. Euler equator of Pacific Plate motion represented with thick curve, along which Pacific Plate motion absorbs double trench system of Izu-Mariana and Nankai-Ryukyu. Numbers are velocity of plate motion in mm/year. The southern margin of the Philippine Sea Plate continues with the Pacific Plate.

ト運動にともなって起こることになり，背弧海盆の拡大など起こらず，むしろ衝突などの伸縮過程が起こるはずである．

これらの考察から太平洋プレート運動について最も重要な役割を担っているのは，マリアナ海溝と琉球海溝における沈み込みであると結論することができる．

太平洋プレートとフィリピン海プレート運動は，ニューギニアの北側で一致し（図9），両プレートの相対運動のオイラー極は西カロリン海盆南部に存在している（SENO *et al.*, 1993）．フィリピン海プレート運動のオイラー極は，カムチャツカ半島の南方の千島海溝にあることから，プレート運動の原動力は南側に存在することは明かであり，フィリピン海プレート南限のオイラー緯度は40°であることから，独自の駆動力は存在せず，太平洋プレートと連続している南縁における太平洋プレートの運動がフィリピン海プレート運動を駆動しているといえる．

西カロリン海盆のオイラー極はフィリピン海プレートと太平洋プレートを止める釘の役割を果たしており，オイラー極は太平洋プレート運動にともなって西北西方向に進むことになる．この西北西方にはKの字型の基本骨格を有するハルマヘラ・セレベス・ボルネオの3島が存在しているが，その間のモルッカ海峡では海洋底が両側で沈み込み，鞍状になっていることから

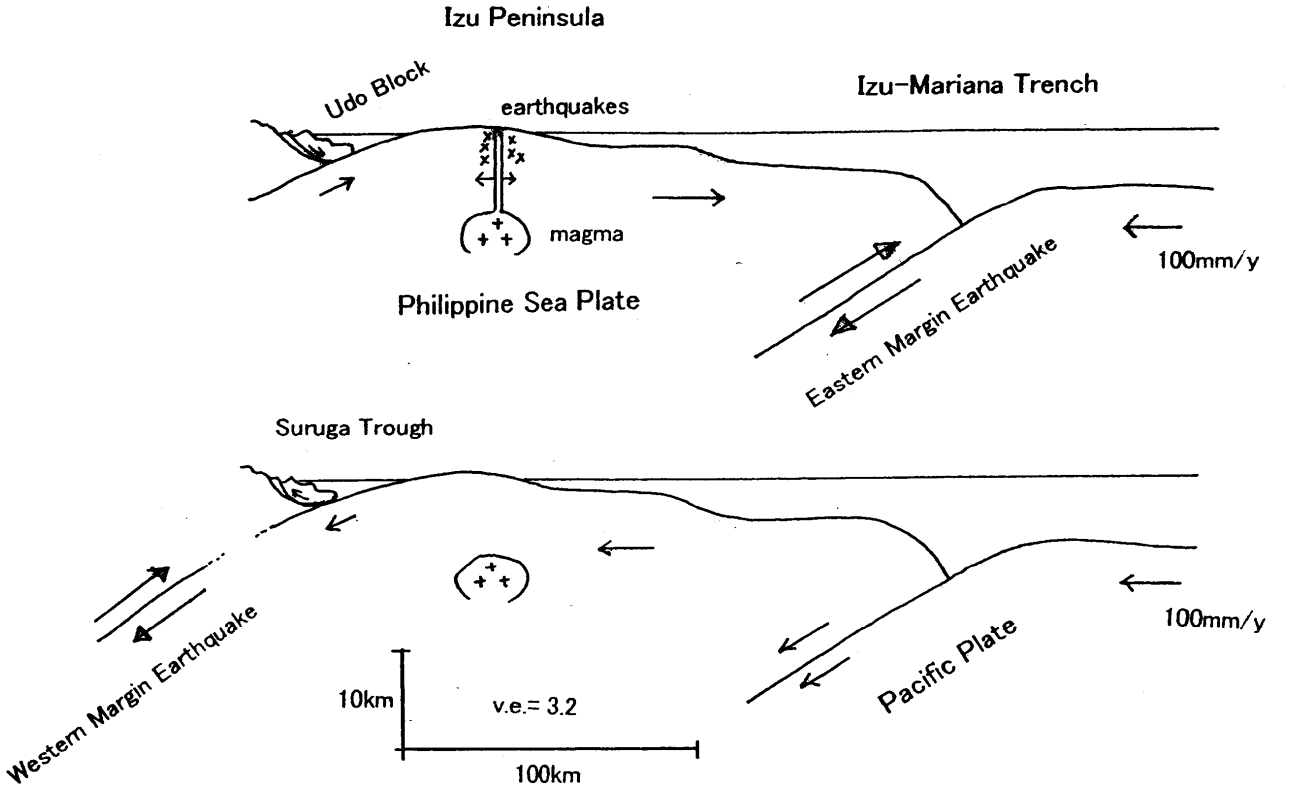

図 10 有度丘陵の傾動運動とフィリピン海プレート運動および伊豆東方沖地震.
Tilting of the Udo Block and stress condition of the Philippine Sea Plate caused by the earthquakes that occur along the eastern and western margins.
上図 Upper figure : フィリピン海プレートの東縁である伊豆・マリアナ海溝における地震によって太平洋プレート運動が消化されると，フィリピン海プレートにかかっていた圧縮力が開放されるため，駿河トラフにおける沈み込みが緩み，有度地塊の傾動は進行して傾動角は増加し，これまでの圧縮力で上昇できなかったマグマが地殻上部に貫入して伊豆半島東方沖群発地震を起こす(上図).
Earthquake along the eastern margin of the Philippine Sea Plate absorbs relative plate motion of the Pacific Plate, and the stress condition of the Philippine Sea changes from compressional to tensional. The tilt angle of the Udo Block increases because of the reduction in the stress for the subduction along the Suruga Trough. Magma under the Izu Volcanic Arc intrudes into the shallow crust and induces earthquakes in the east off the Izu Peninsula.
下図Lower figure : フィリピン海プレート西縁において地震が発生すると，駿河トラフにおけるプレート沈み込みを阻止していた力が失われるために，プレート沈み込みが強化され，有度地塊の傾動は戻されて傾動角が減少する.
Earthquake along the western margin of the Philippine Sea Plate decreases the resistivity to subduction along the western margin, and the tilt angle of the Udo Block decreases via the subduction along the Suruga Trough.

(McCaffrey *et al.*, 1980)，異常な海洋底の沈み込みによって相対運動が消化されているものと考えられる．この異常な海洋底の沈み込みは，マリアナ・琉球海溝による沈み込みによって駆動されている太平洋プレート運動においてオイラーの定理を守るための強制的な沈み込みの結果といえよう．

西カロリンのオイラー極より北側の太平洋プレート運動は，ヤップ・パラオ海溝における太平洋プレートの沈み込みとフィリピン海溝における海洋底の沈み込み，そしてマニラ海溝におけるルソン島の南シナ海への衝上によって消化されている．マニラ海溝におけるルソン島の南シナ海への衝上の北方延長に台湾の衝突帯が位置している．

西カロリンのオイラー極の南東側においてはオーストラリアプレートの北上と太平洋プレートの運動によってフィージー・ニューヘブリデス・バヌアツ・ソロモン・ニューギニアにおける複雑な島弧・海溝系が形成されている．

フィリピン海プレートと有度地塊の傾動

有度地塊の傾動に関係しているのは太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込みである．地震・火山月報(防災編)の「M6以上，被害，震度4，津波予報のあった地震」と「世界の主な地震」に基づき1997年1月から2000年2月までの地震マグニチュードMから算出される断層変位量（10^0.6M-4；松田，1975）を積算すると，太平洋プレートが単独で沈み込む北太平洋のアリューシャン・千島・日本海溝については17.7mで，2重沈み込み帯における伊豆・小笠原・マリアナ海溝について7.8mでフィリピン海プレートの沈み込み・衝突については17.2mで合計26.0mである．南太平洋のトンガ・ケルマディック海溝において17.7mとオイラー緯度に対して対照性が良くとれている．断層面積に対応する10^Mを比較すると，北太平洋が101，2重沈み込み帯における太平洋プレート沈み込みが32でフィリピン海プレートの沈み込み・衝突が117で合計149，南太平

洋が120と対称性が保たれている．

2重沈み込み帯におけるフィリピン海プレートの東西両縁で起こった地震のマグニチュードから算出される断層変位の積算量の差を用い，フィリピン海プレートの均衡状態を検討する(図8)．1997年9月から1998年2月にかけて鳥島・父島でM6.0からM6.6の地震が頻発し，フィリピン海プレートの均衡は東縁沈み込み過剰になり，太平洋プレート運動は東縁で消化されたためにフィリピン海プレートの応力は開放され，圧縮から引張に転じたことが予想され，1998年4月21日から伊豆半島東方沖群発地震が始まり，1998年5月3日にM5.7の最大の地震が起こった．その翌日1998年5月4日には石垣島南方でM7.6の地震が起きて，均衡は負に転じ，伊豆半島東方沖群発地震は沈静化した．1998年8月20日に鳥島近海でM7.1の地震によって均衡は正に戻されるが1997年の状態にまで達していない．その後は東縁と西縁においてM6程度の地震によって一進一退を繰返すが，1999年9月21日の台湾中部地震M7.7によって均衡は負に大きく転じて2000年2月に至っている．均衡が負になるとフィリピン海プレートは西方への沈み込みを阻止する力を失い，西縁におけるプレート沈み込みが強化される．

参考のために地震の際に生じる断層面積に対応する考えられるマグニチュードについてもフィリピン海プレート東西両縁の積算量による均衡も算出してみると(図8)，断層変位量と大局的には変わらないが，西縁における地震がより大きく寄与して，均衡がより大きく負にずれる．

ここで求めたフィリピン海プレートの均衡曲線は，谷津山光路長の変化曲線や傾斜変化と極めて類似している．ただし，地震による均衡変化が谷津山光路長変化よりも2-3ヶ月先行しており，光路長はフィリピン海プレートの両縁で起こる地震に伴う均衡の変化に鋭敏に対応して変動していることを示している．

フィリピン海プレート東縁で地震が起こると，太平洋プレートの西北西進運動が消化されるためにフィリピン海プレートの応力状態は圧縮から引張に転じ，有度地塊下のフィリピン海プレートの沈み込みも緩慢となるために，有度地塊の傾動は大きくなるが，伊豆半島のような伊豆火山弧においては圧縮応力によって上昇を阻止されていたマグマが地殻浅所に貫入し，伊豆半島東方沖地震のような群発地震を起こす(図10上)．

フィリピン海プレート西縁に地震が起こると，フィリピン海プレート沈み込みを阻止する力を失い，フィリピン海プレートが沈み込むためにフィリピン海プレートに載り上げている有度地塊の傾動が戻され，傾動角が減じるとともに光路長が短縮する(図10下)．この戻りが限界を越すとフィリピン海プレートと有度地塊との固着が外れてフィリピン海プレートとは独立して傾動する1935年の大谷地震のような地震が起こる．

有度地塊はフィリピン海プレートの東西両縁が収束するフィリピン海プレート北端部に位置することが(図9)，このように鋭敏な反応をもたらしているものと考えられる．

光波測距の充実

山原光路長は10kmを越し，レーザー反射光強度が不十分で，欠測が多い．特に夏季には霞みがかかり，殆ど測定できない日が続く．現在，3個の反射プリズムを使用しているが，倍の6個に増やすことを計画している．

有度丘陵北西の草薙・麻機には円弧状の沈降帯が存在し，奈良時代の遺跡が著しく沈降・埋没している(矢田，1995)．沈降帯の北側は山地となり，その境界に草薙断層と麻機断層が存在し(図１)，有度地塊の傾動に関係していると考えられる(図3)．谷津山光路は草薙断層を挟んでいるが，山原光路は草薙断層と麻機断層の両方を挟んでおり，両断層の変位を合わせて捉えていることになる．両断層の変位を分離するために草薙断層北側の鳥坂に反射プリズムの設置を計画している(図1・2・3)．

麻機断層の変位を2次元的に捉えるためには，複数の光路が必要であるので，麻機の北西方に反射プリズム設置場所を選定中である．

これら合計4光路における定常的な観測が開始されると，草薙断層・麻機断層の変位と有度地塊の傾動との関係がフィリピン海プレート運動とともに解明できるとともに，大気境界層の気温構造の日周変動や年周変動をより詳細に解明することが可能なるであろう．

結 論

静岡大学地殻活動観測所における光波測距儀・傾斜計を用いた観測により，有度地塊の傾動変化が詳細に観測された．レーザーの往復する光路長を一定と仮定して算出された光路気温，光路下の静岡地方気象台で測定されている地表気温，垂直微動走査によるレーザー光屈折状況，などを比較検討した結果，数℃にも及ぶ光路気温と地表気温との差が，地表の日照加熱や放射冷却と暖気塊の上昇と冷気塊の下降によることが判明し，大気対流の規模の日周変化や季節変化が明らかにされた．

大気構造が安定な夜間の21-24時の間で，標準誤差の小さい光路気温を用いて光路長の変動について検討した結果，1998年3月から4月中旬にかけての光路長の顕著な伸長と，1999年10月末から2000年1月にかけての顕著な短縮が見出された．1998年4月の最大値と2000年1月の最小値の差は数cmにも達している．この光路長の伸長は，1998年4月下旬から開始されたマグマ貫入によると考えられる伊豆半島東方沖群発地震と良く対応しており，短縮は1999年9月の台湾地震と良く対応している．

傾斜計観測によると，光路長が短縮時には有度丘陵の傾斜が緩く，伸長時には急になっていることから，有度地塊の円弧すべりによる傾動状態の変動であることが明らかにされた．円弧すべりの下底が駿河トラフにおいて伊豆側のフィリピン海プレートに乗り上げていることから，この下底が固着状態でフィリピン海プレートが沈み込めば，有度丘陵は押し戻されて傾斜が緩くなり光路長が短縮し，沈み込みが起こらず引張されると傾動が急になり光路長が伸長することが予想でき，有度地塊の傾動状態とフィリピン海プレートの応力状態の対応付けができた．

西北西進する太平洋プレート運動をフィリピン海プレートの東西どちらの縁で消化するかによってフィリピン海プレートの応力状態は支配されており，東縁で消化されれば太平洋プレートによる圧縮が開放されるので引張的になり，駿河トラフにおける沈み込みは緩み，伊豆半島ではマグマの貫入が起こるが，西縁で消化されるとプレート沈み込みを阻止する力が失われ，

沈み込みは強化されことになる．東西両縁で起こった地震による変位の積算量と有度地塊傾動の変動は良く対応している．東縁の地震による引張の影響はまず傾動に現われた後にマグマ貫入に伴う群発地震が起こる．また，西縁の台湾中部地震による有度地塊傾動の変動が2-3ヶ月遅れることは，地震によってフィリピン海プレートの応力状態が変化し，その影響が傾動地塊やマグマ貫入に影響を与えていることを示しており，有度地塊はフィリピン海プレートの状態を監視するための絶好な対象であることが結論される．

謝　辞

静岡大学理学部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．静岡地方気象台防災業務課の稲葉利明博士・青木　元博士・柿下 毅博士に討論していただいた．気象庁気象研究所の藤部文昭博士には査読いただいた．英文に関してはPaleontological Reasearch InstitutionのRobert M. Ross博士に校閲いただいた．光波測距用反射プリズムの設置・使用に関しては，東海大学・NTT西日本・NTTコミュニケーションズ・NTTファシリティーズに特段の便宜を計っていただいている．

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.

McCaffrey R., Silver E.A. & Raitt R.W. (1980), Crustal structure of the Molucca Sea collision zone, Indonesia. *Geophysical Monograph*, **23**, 161-177.

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.

長島　昭 (1999)，静岡強震．静岡地学，**79**，21-28; **80**，29-36.

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.

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・小田川信哉 (1993)，谷津山－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.

Seno T., Stein S. & Gripp A.E. (1993), A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 1794-1798.

須田教明 (1976)，電磁波測距儀(改訂版)．森北出版，東京，242p.

Uyeda S. (1982), Subduction zones: an introduction to comparative subductology. *Tectonophysics*, **81**, 133-159.

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～歴史時代の地滑り跡・活構造．地震学会講演予稿集，no. 2，P65.