

GPS観測網による伊東周辺 の地殻変動の観測*

(1989年5月～1989年10月)

国立防災科学技術センター

1 はじめに

関東・東海固定点GPS観測網が1988年3月に導入されて、観測が行われている。観測機器の初期故障が次第に改善され、現在90%程度のデータの取得率となっているが、機器の信頼性を高め、より安定した観測が出来るようにするのが当面の課題の一つとなっている。

本報告では、1989年伊豆沖群発地震・海底噴火活動に伴う地殻変動について、伊東、初島、下田におけるデータを解析した結果の報告をする¹⁾。

2 観測と解析

10観測点(図1上右の“・”で示した場所)に設置したMINI-MAC2816ATによる2周波の位相データと、気圧・気温・湿度の地上気象データは、筑波の当センターにテレメータにより伝送され、取得されている²⁾。

1989年7月に伊東沖で発生した海底噴火に伴う地殻変動が観測され、GPS固定点観測の手法が地震・火山噴火予知に極めて有効な手段を提供することが実証された。

観測は一日8時間行われており、観測点の視野の関係でデータの取得が出来ない衛星があり、14番衛星を含む3時間余りの衛星配置(図2)の時間について、解析を行った。解析に用いた衛星は、3番・11番・13番・14番(PRN番号)である。衛星軌道情報は、放送暦を使用した。

解析に当たっては、初島(HTS)、伊東(ITO)、下田(SMD)の3点の L_1 、 L_2 2周波の位相データを使用した。2周波のデータを用いて電離層での伝播遅延を補正し、地表気象観測データ(気圧、気温、湿度)を用い、Saastamoinenの経験式とCFA-2.2のMapping functionにより、対流圏における遅延の補正を行った。現在の衛星軌道精度が日本上空では数10mと思われるので、対流圏補正の違い(特に湿潤大気による項)は、測位解に影響しない³⁾。

測位解析では、初島・伊東及び初島・下田の組合せによる2点づつの解析を行った。前者の場合には、初島を固定し、後者の場合には、下田を固定する取扱いをした。固定した地点の座標値は、1988年4月～5月に取得された33日間のデータにより求められた解(10cmより良い精度を有すると考えられる)⁴⁾を使用した。

解を得る手順は、サイクルスリップを自動的に除去した後、マニュアルで位相データの0-C値を見て、残っているサイクルスリップを除き、又大勢からはずれているデータの除去も行う。解析のモードは、衛星軌道情報を固定するBaseline Modeとする。座標系はWGS84系とし、測位解の設定精度

* Received Jan. 10, 1990

は、水平方向が3 cm、鉛直方向が5 cmとした。

解析は、群発地震活動を含む5月より10月の期間（第20週より第38週）について行った。初島・下田・伊東におけるこの間のデータの取得率は、観測不能がそれぞれ、4、3、10日、観測された衛星の数が3以下が1、1、2日、データ不良が0、0、4日となっている。全体としては、約94%の取得率である。

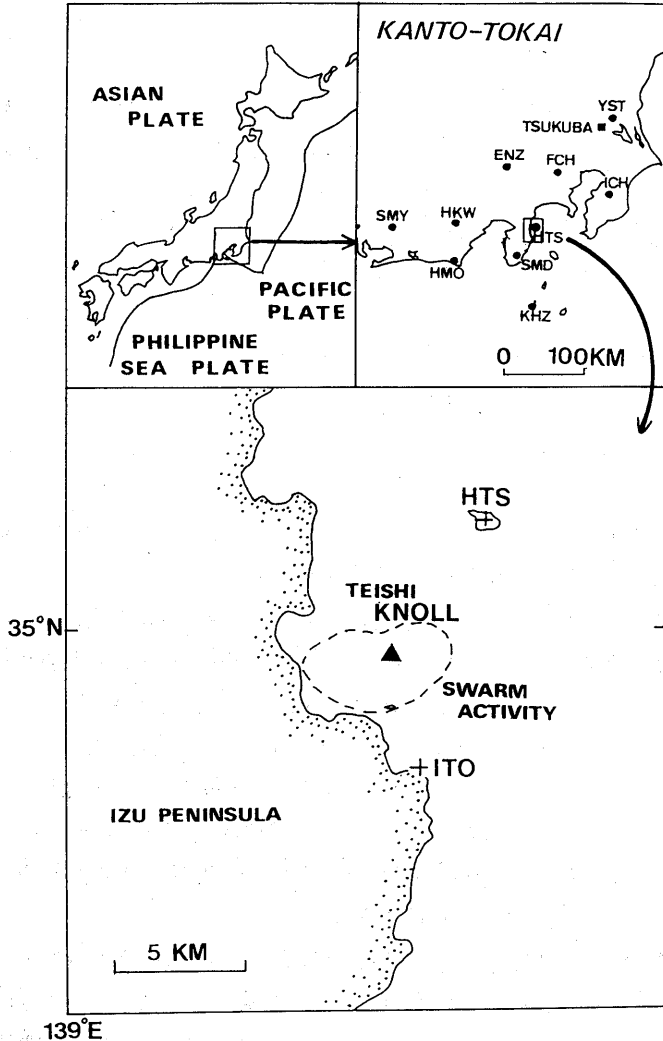
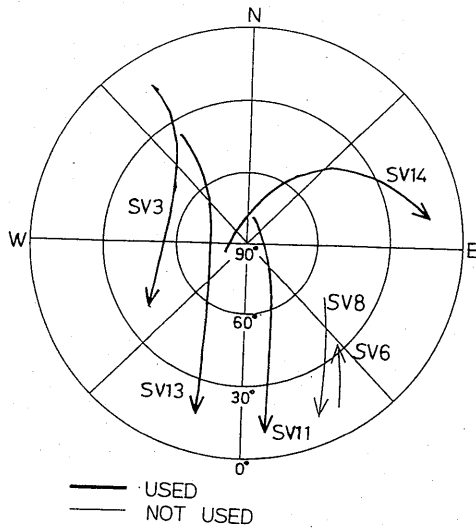


図1 関東・東海固定点GPS観測網²⁾における受信機設置点(右上図の“・”印で示した10点)。下図には、観測点伊東(ITO)と初島(HTS)、手石海丘、1989年7月の群発地震活動域を示す。

Fig. 1 Locations of the observation stations of the fixed-point GPS baseline determination network of NRCDP in Kanto-Tokai, central Japan²⁾.



第2図 観測期間中におけるGPS衛星の走向。太い実線で示した4つの衛星のデータを使用した。

Fig. 2 Sky plots of satellite visibility during a tracking session of the observation in 1989.

1) 初島・伊東基線解析

初島・伊東測位解を求めるに当たっては、ほぼ自動的に精度の良い解が求まったが、若干の日については、正規化され χ^2 値が3以上となり、その際は大抵サイクルスリップがあり、マニュアルモードで除去することにより、精度の高い結果が得られた。又、バイアスは殆ど全ての場合に、FIXされ、個々の解の誤差は数mmであった。図3に1989年7月の群発地震・噴火活動の期間を中心として、解析の結果得られた解を示す。上より順に南北成分、東西成分、高度、基線長を示し、図中の網目で示した期間（7月3日～9日）に群発地震活動が最も活発で、海底噴火の起きた7月13日は矢印で示してある。

図に見るように群発地震・火山活動のあった1週間程度の期間に顕著な地殻変動が見受けられ、それがほぼ観測されている。活動の期間中の欠測は、14番衛星がunhealthyのため解を得ることが出来なかったものである。活動の前の期間Ⅰ（141～184 DOY : Day of Year, 1月1日よりの通算日, 5月21日～7月4日）、変動後の期間Ⅱ（192～206 DOY, 7月11日～7月25日）、更にその2カ月後の期間Ⅲ（256～280 DOY, 9月13日～10月7日）をそれぞれ一様として扱い、約10日間のデータについて統計を取ってまとめたのが表1である。使用できる衛星が4つで、バイアスが全てFIXされたもののみを使っている。バイアスがFIXされない場合や衛星が3つの場合の解は、系統的にずれるために除いてある。上記の条件を満たす日は、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの時期に13、10、10日間である。表には緯度、経度、高度、基線長の平均及び標準偏差（S. D.）を示している。水平位置の（ ）で囲んである数値は、それぞれN34° 57' , W220° 51' からの距離である。S. D.を見ると第1期には、水平方向は約3 mm (0.3ppm)、上下方向はその7倍程度大きい2.2cm (2.2ppm)、第Ⅱ期は、南北方向が1.5倍程度の4.4mm (0.4ppm) に対して、東西成分は、3倍程度大きく、10.8

mm (1.1ppm) となり、一方上下方向も、同程度の1.7cm (1.7ppm) となっている。第Ⅲ期になると、南北方向が2倍程度の7mm (0.7ppm) となっている外は、他の成分は同じ程度のS. D. である。基線長の方は第Ⅰ、Ⅱ期とも約3mm (0.3ppm) で、第Ⅲ期には約2倍の7.6mm (0.76ppm) となっている。この期間によるS. D. の系統的増加は、主に太陽活動の増大に伴う電離層における電子密度のゆらぎの増加に起因しているものと推測される。

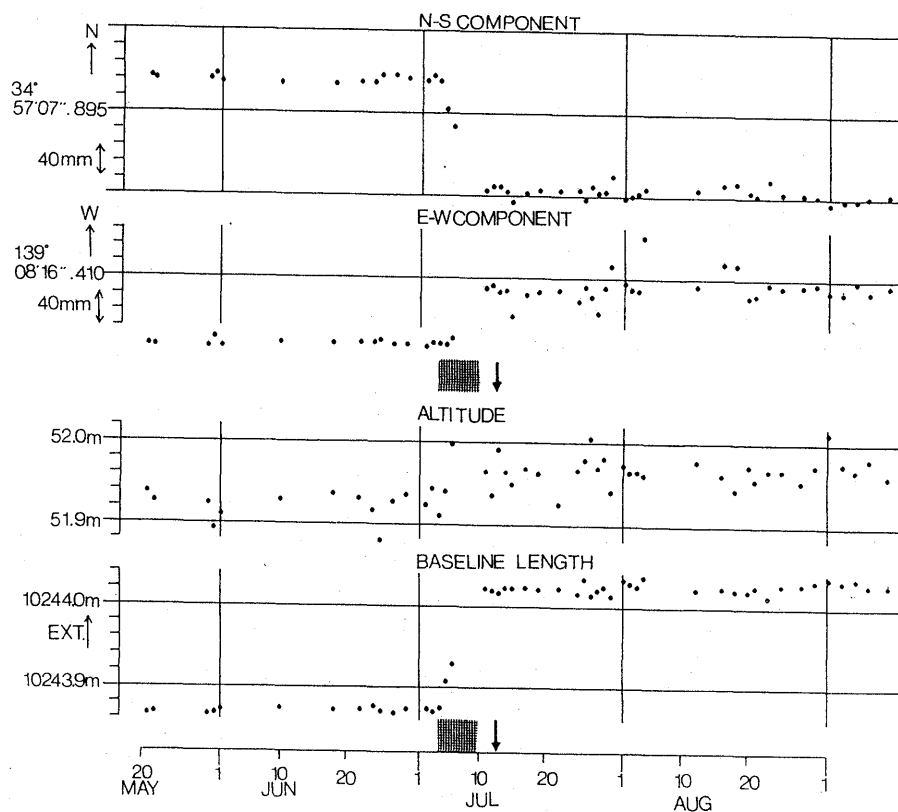


図3 観測点ITOの位置の時間変化。網目で示した期間に群発地震が最も活発で、地殻変動も大部分がこの期間に起きた。その後2~3日して海底噴火があった(図中の矢印の時期)。

Fig. 3 Time evolution of the position of ITO site (geodetic solutions were obtained by fixing the site of HTS).

Latitude, longitude, altitude of ITO site and the baseline length between ITO and HTS are shown. The period shown by net corresponds to the most active seismic swarm, and a undersea volcano erupted on 13th July, 1989 (indicated by an arrow).

表1 1989年伊豆東方沖群発地震・噴火活動の前後のITOの位置、解の標準偏差及び期間 I, II, IIIのそれぞれの間の地殻変動量。

Table 1 Mean geodetic solutions of ITO site at three periods I (before the 1989 off-ITO swarm and undersea volcanic eruption), II (just after the activity) and III (well after the activity). Also shown S. D.s and differences between successive periods.

I T O t o H T S

	I (141~18500Y 21 May~4 July)	II (192~206 11 July~25 July)	III (256~280 13 Sep~7 Oct.)
N	13	10	10
latitude $\bar{\phi}$	7".89641 (243 ^m 3421)	7".891973 (243 ^m 2061)	7".89185 (243 ^m 2016)
σ_{ϕ}	0.30 ^c m	0.44 ^c m	0.70 ^c m
$\Delta\phi$	-13.7 ^c m		0.4 ^c m
longitude $\bar{\lambda}$	43".58680 (1105 ^m 2654)	43".58921 (1105 ^m 3270)	43".58946 (1105 ^m 3330)
σ_{λ}	0.26 ^c m	1.08 ^c m	1.30 ^c m
$\Delta\lambda$	6.1 ^c m		0.6 ^c m
altitude \bar{h}	51 ^m .915	51 ^m .969	51 ^m .959
σ_h	2.2 ^c m	1.7 ^c m	1.7 ^c m
Δh	5.4 ^c m		1.0 ^c m
baseline \bar{L}	10243.8758	10244.0206	10244.0261
σ_L	0.28 ^c m	0.26 ^c m	0.76 ^c m
ΔL	14.5 ^c m		0.6 ^c m

各期間の平均値の差 $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh , ΔL も表中に示してあるが、それによると、図4の右半分に示すように、川奈は初島に対して、西に6.1cm (± 1.1 cm), 南に13.7cm (± 0.5 cm), 上方に5.4cm (± 2.2 cm) 移動し、基線長が14.5cm (± 0.3 cm) 伸びたことがわかる。又第III期には、第II期に対してそれぞれ、0.4cm (± 0.7 cm), 0.6cm (± 1.3 cm), 1.0cm (± 1.7 cm), 0.6cm (± 0.8 cm) の変化が求められているが、いずれもS. D. の範囲内であるので、群発地震、噴火活動後の地殻変動はなかったと考えて良いであろう。

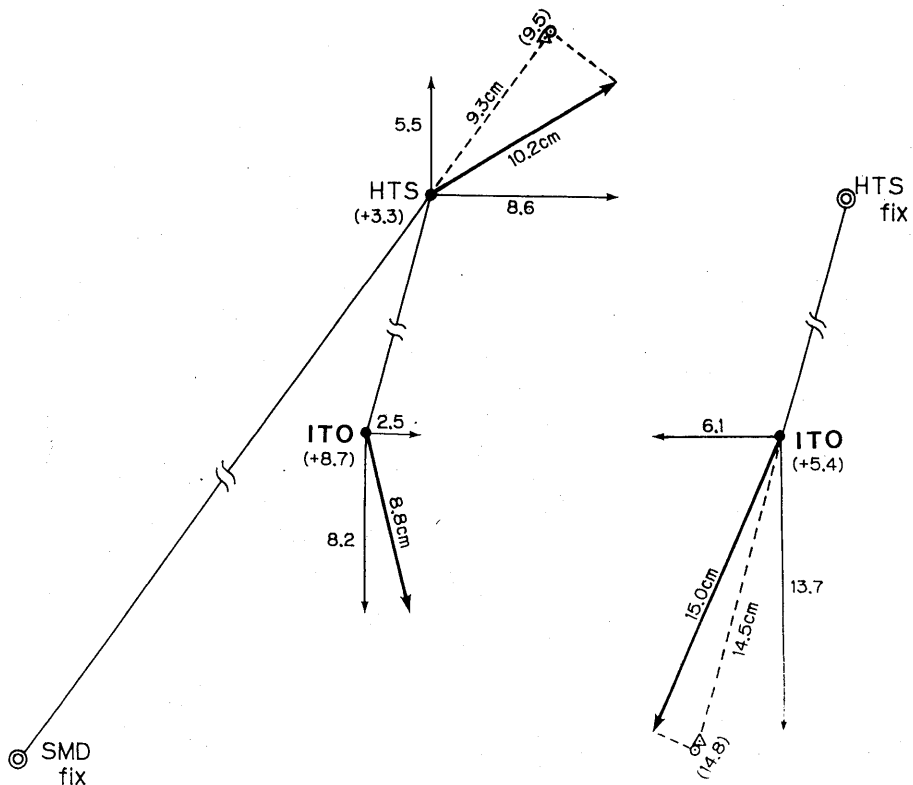


図4 1989年伊豆東方沖群発地震活動に伴う初島、伊東の変動・右側が初島に対する伊東の相対変位を示し、左側の下田(SMD)を固定して求めた。両観測点の“絶対”変動量を示す。()内は上下方向で、+は上向きである。

Fig. 4 Movement of the ITO site at the time of the 1989 off-ITO swarm and submarine volcanic eruption : the relative movement of ITO in relation to HTS (right), and the absolute movement of ITO and HTS obtained by making use of data at SMD distant about 40km from HTS (left).

2) 初島・下田

上記に示したように初島・伊東の相対変位が、かなりの精度で求めたが、地殻変動をモデル化するには、絶対変位が必要である。その為、下田を固定として初島の位置を求める計算を、活動の前期Ⅰ(38~183 DOY, 5月18~7月2日)、後期Ⅱ(193~235 DOY, 7月12日~8月23日)に分けて、解析を行った。基線長が40km近いせいか、初島・伊東の場合に比べて、バイアスのFIXは殆ど成功しなかったが、精度が良い χ^2 が1近いが、バイアスの未決定数が2個以内であるものについて、統計を取ったものが表2である。それによると、この条件を満たす日数はそれぞれ8日、10日である。それぞれの期間のデータについて、平均と標準偏差S. D.は、表2に見るように、前期では南北方向で2.1cm (0.5ppm)、東西方向で4.6cm (1.2ppm)、高度で1.8cm (0.5ppm)、基線長で1.1cm (0.28ppm)となり、それが、後期では、それぞれ1.4cm (0.36ppm)、4.1cm (1.1ppm)、1.5cm (0.38ppm)、1.5cm (0.38ppm)と、前後期ほぼ同じ値となって、初島・伊東の場合に比べて、大き

さが2~7倍になっている。しかし、相対精度は0.3~1 ppmで、ほぼ似た値となっている。前・後期の解の差より変動量を求めると、表の $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh , ΔL にあるように、北に5.5cm (± 2.1 cm), 東に8.6cm (± 4.6 cm) に移動し、3.3cm (± 1.8 cm) の隆起があって、基線長は9.3cm (± 1.5 cm) の伸びとなっている。

表2 下田 (SMD) を固定として求めた初島 (HTS) の、位置および今回の活動前後の変動量。

Table 2 Mean geodetic solutions of HTS site at the period I (before the activity) and II (after the activity).

H T S (S M D - F I X)

	I (38~183 DOY 18 May ~ 2 July)	II (193~235 12 July ~ 23 Aug.)
N	8	10
latitude $\bar{\phi}$	N 35° 02' 26".91018	26".91198
σ_{ϕ}	2.1 cm	1.4 cm
$\Delta\phi$	5.5 cm	
longitude $\bar{\lambda}$	W 220° 49' 50".07013	50".06679
σ_{λ}	4.6 cm	4.1 cm
$\Delta\lambda$	-8.6 cm	
altitude \bar{h}	73 ^m .180	73 ^m .213
σ_h	1.8 cm	1.5 cm
Δh	3.3 cm	
baseline \bar{L}	39773 ^m .2844	39773 ^m .3772
σ_L	1.13 cm	1.53 cm
ΔL	9.3 cm	

3) 地殻変動

1) と2) の結果をまとめると、図4に示すように、初島が東に8.6cm、北に5.5cm移動し、3.3cmの隆起をしたのに対し、手石海丘の南側の伊東、川奈は、東に2.5cm、南に8.2cm移動し、8.7cmの隆起をしたことがわかる。但し東西、南北、上下方向の誤差がそれぞれ $\pm 4.6\text{cm}$ 、 $\pm 2.1\text{cm}$ 、 $\pm 1.8\text{cm}$ であることに留意する必要がある。今回の活動に伴う地殻変動を説明するモデルが、岡田・山本⁵⁾、多田・橋本⁶⁾らによって提唱されているが、前者では地震震源の分布の時間変化を考慮して、開口部を3カ所に考えるマグマ貫入モデル（開口量最大50~110cm、開口面積3km、深さ10km~1km）を考え、更にM5.5の最大地震による変位（右横ずれ20cm、スラスト成分10cm）も求めている（もともと地震による変動は無視出来る位小さい）。一方、多田・橋本は、長さ5km、幅5km、上の深さ1km、開口幅70cmの開口割れ目モデルを提唱しているが、今回の結果は岡田・山本のモデル⁵⁾に辺長・上下変動のいずれについてもより合っているようである。

（藤縄幸雄，島田誠一，大見士郎，
関口渉次，江口孝雄，岡田義光）

参 考 文 献

- 1) Shimada, S., Fujinawa, Y., Sekiguchi, S., Eguchi, T., Okada, Y. (1989a) : GPS detection of a volcanic fracture opening in Japan, submitted to *Nature*.
- 2) Shimada, S., S. Sekiguchi, T. Eguchi, Y. Okada, and Y. Fujinawa (1989b) : Preliminary Results of the Observation by Fixed-Point GPS Simultaneous Baseline Determination Network in Kanto-Tokai District. *J. Geod. Soc. Japan*, 35, 85-95.
- 3) 藤縄幸雄・島田誠一・岸井徳雄・関口渉次・江口孝雄・岡田義光（1989）：「関東・東海固定点GPS観測網による電波伝播遅延量の推定」，1989，GPSワークショップ1989収録，42-48，GPS検討会
- 4) 関口渉次・平原和朗・辻宏道・仙石新・綿田辰吾・里村幹夫・島田誠一（1989）：「MINI-M AC固定観測網のreference frameへの結合実験」，1988年度経緯度研究会収録
- 5) 岡田義光・山本英二（1989）：「1989年伊東沖の群発地震・火山活動の一解釈」，1989年秋季大会日本地震学会講演予稿集，118.
- 6) 多田堯・橋本学（1989）：「伊豆半島北東部の異常地殻活動の原因について(4)-開口割れ目モデルと1989年伊東沖海底火山噴火-」，1989年秋季大会日本地震学会講演予稿集，120.