

伊豆半島東方沖の地震火山活動

岡田 義光 *

Seismo-volcanic Activity at Eastern off Izu Peninsula, Central Japan

Yoshimitsu OKADA

President

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
okada@bosai.go.jp

Abstract

At eastern off Izu Peninsula, central Japan, earthquake swarms have been intermittently repeated over 30 years since June 1978. Synchronized to the occurrences of the swarms, remarkable crustal deformation has also been repeatedly detected by means of tiltmeters, strainmeters, leveling surveys, laser distance measurements, and GPS observations. Based on these data and newly derived formula for crustal deformation due to an opening dislocation, these repeated events were successfully modeled by the dyke intrusion of the underground magma, which led to the interpretation that a series of earthquake swarms were attempted eruptions. In addition to such co-swarm crustal deformations, it was also revealed that small precursory crustal deformation signals are preceded to major swarm activities.

Key words : Izu Peninsula, Earthquake swarm, Dyke intrusion model, Attempted eruption

1. はじめに

今から約80年前、1930年2月から5月にかけて、伊豆半島の伊東市沖を震源域として、有感地震3,600個以上を含む極めて大規模な群発地震活動があった(Nasu, 1935)。これに引き続き、同年11月には伊豆半島北部を震源とする北伊豆地震(M7.3)が発生し、当時掘削中であった東海道線の丹那トンネルが約2.7mの横ずれを生じたため、やむなくトンネル内にこれを修正する曲線部分が設けられる事態となった。1923年9月に神奈川県西部の丹沢山中を震源として関東地震(M7.9)が発生した約7年後の出来事である。

その後、伊豆半島周辺は40年以上にわたって静穏な状態が続いたが、1970年代に入ると、1974年伊豆半島沖地震(M6.9)、1976年河津地震(M5.4)、1978年伊豆大島近海地震(M7.0)と大粒の地震が頻発する一方、伊豆半島中部で小規模な群発地震活動が頻発するようになった。そして1980年代以降は、1930年の時とほぼ同じ伊東市の沖合付近に発生場所を限定して、激しい群発地震活動が断続的に繰り返されるようになり、その活動は今日まで約30

年にわたって継続している。

筆者は1970年1月に東京大学地震研究所助手に採用され、富士川地殻変動観測所で10年間の勤務をしたのち、縁があって1980年3月、つくばの防災科学技術研究所(当時は国立防災科学技術センター:以下、防災科研)に入所した。この期間は、上述した伊豆半島における地震活動活発化の時期とまさに重なっており、青春時代から今日に至るまで伊豆半島との長いお付き合いが続くこととなった。本論では、これに関わる自分の研究史を振り返ってみることとしたい。

2. 伊豆半島東方沖の群発地震活動

約40年間の沈黙を破って、伊豆半島東方沖で最初に群発地震活動が生じたのは、伊豆大島近海地震(M7.0)の発生から5か月を経過した1978年6月である。それ以来、今日まで30年間にわたって、伊豆半島東方沖の群発地震活動は断続的に繰り返されてきた。

図1(a)は、伊豆半島東方沖で最近50年間に発生したマグニチュード(M)2.0以上、深さ30km未満の地震の震

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 理事長

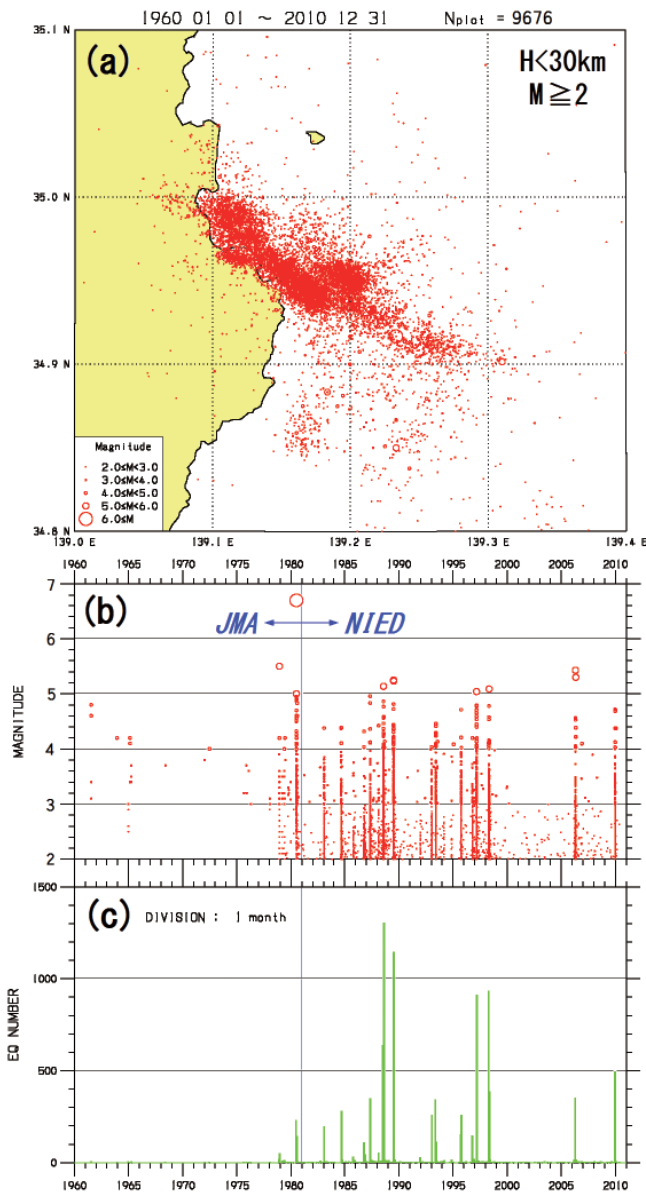


図 1 伊豆半島東方沖で最近 50 年間に発生した M2.0 以上、深さ 30 km 未満の地震。1980 年以前は気象庁、1981 年以降は防災科学技術研究所のものを使用している。(a) は震源分布、(b) は M-T 図、(c) は月別地震回数を示す。

Fig. 1 Seismic activity at eastern off Izu Peninsula in recent 50 years (M2.0 or larger and focal depth less than 30 km) based on JMA catalog before 1980 and NIED catalog after 1981. (a) Hypocenter map, (b) M-T diagram, (c) Monthly earthquake number.

源分布を示す。震源データとして、1980 年以前は気象庁、1981 年以降は防災科学技術研究所のものを使用している。群発地震の発生場所は毎回少しずつ異なっているが、全体としては北西-南東方向に直線状の配置を見せている。この方向は、伊豆半島を乗せたフィリピン海プレートが日本列島に進んでくる方向に一致している。

図 1 (b) は、(a) に示された地震の M-T 図、また、(c) は月別地震回数の推移を示している。気象庁地震予知情報課 (2006) のカウントによれば、群発地震の始まった

1978 年から 1998 年までの 20 年間には大小合わせて 37 回の群発地震活動があり、うち 16 回は大規模なものであった。この間に発生した最大の地震は、1980 年 6 月の伊豆半島東方沖地震 (M6.7) であり、また、1989 年 7 月の群発地震活動時には、その終了頃に伊東市沖合の手石島付近で海底噴火という事件が発生した。

1998 年 4 月の大規模群発地震のあとは、4 年間にわたって群発地震が鳴りをひそめ、一部では終息したのではないかとの見方もなされたが、2002 年 5 月を皮切りに小規模な群発地震活動が再発し、2006 年 4 月に発生した通算 44 回目の群発地震はかなり規模の大きな活動へと発展した。そして、もっとも最近では、2009 年 12 月に大規模な群発地震活動が再び生起し、この地域はまだまだ目を離せない状況にあることが確認された。

3. 群発地震活動に伴う地殻変動

伊豆半島東方沖の群発地震活動に特徴的なことは、単におびただしい数の地震が集中的に発生するというだけではなく、これに同期して、周辺で顕著な地殻変動が毎回のように観測されることである。その典型的な例は 5 章 (1989 年 7 月伊東沖の海底噴火) で紹介されているが、たとえば、川奈崎と 10 km 離れた熱海沖の初島との距離が 1 週間ほどの間に 20 cm 前後伸びるとか、伊東市付近の地面が 10 cm 近く隆起する等の現象が観測されている。

ただ、1978 年に群発地震が始まってから最初の 10 年間ほどは、水準測量や辺長測量といった旧来の測地的手段が主であったため、群発地震に伴う地殻変動が緩慢に連続的な変化をしているのか、それとも群発地震時に急激に進行する階段状の変化をしているのかについては、はっきりしたことは不明であった。同じ時期には、伊豆半島の各地で地下水位や水温、ラドン濃度といった地下水観測も実施されており、これらは群発地震に伴ってかなり大きな変化を見せることが知られていたが、理論的な説明は難しく、また、震動による地盤や計測器への影響ではないかとの疑いも捨て切れなかった (表 1)。

このような時に頼りとなるべきは地殻変動連続観測用の測器であるが、当時、群発地震域の周辺で稼働していたのは、防災科研が中伊豆に設置していた傾斜計と、気象庁が網代と東伊豆に設置していた体積ひずみ計だけであった。このうち、中伊豆と網代については記録がノイズであり、群発地震に伴う信号を捉えることができなかったが、何故か、もっとも遠距離にある東伊豆に設置された体積ひずみ計のみが、3 回ほどの群発地震に同期して明瞭な地殻変動を記録していた。しかし、東伊豆 1 点だけの観測であったこと、降雨の影響が疑われたこと、震源からの距離に比較して信号のレベルが大き過ぎ、理論的な説明が困難であったことなどから、このデータが本物の地殻変動を示しているかどうかは疑問視される状況であった。

このような時、防災科研では群発地震の震源域にごく近い伊東市川奈の地下 92 m に高感度地震計と傾斜計を 1989 年 3 月に設置したところ、その直後の同年 5 月に発

表1 1978年からの20年間に於ける伊豆半島東方沖の群発地震活動と、これに伴う地殻変動。上段から、地震回数とエポック名(5,000回以上の大イベントは茶色で示す)、および各観測項目の信号検出状況(測量欄の○=○は複数のエポックの複合を示す)。

Table 1 Swarms at eastern off Izu Peninsula and associated strain, tilt and groundwater changes during 20 years since 1978

(○=○: Effects of several epochs are contaminated).

Submarine Eruption

Observation item	Earthq Number counted at Kamata	Epoch	Eruption Epochs																								
			8409	8510	8512	8610	8705	8802	8804	8807	8905	8907	9112	9301	9305	9309	9402	9509	9607	9610	9703	9706	9804	N ≧ 5000			
Strain (volume)																											
Strain (3comp)																											
Tilt (borehole)																											
Tilt (vault:PEN) Tilt (vault:WTT)																											
Radon																											
Discharge rate																											
Water temperature																											
Water level																											
Continuous EDM																											
Continuous GPS																											
EDM survey																											
Leveling																											

表2 半無限媒質中の断層モデルによる地表変形(上段)と内部変形(下段)の表現式。○は既往の研究, ●は本研究
Table 2 Formula for surface deformation (upper) and internal deformation (lower) due to fault models in a semiinfinite medium. Open circles show previous studies, while closed ones correspond to this study.

地表変形		計算の条件							与えられた表現式										
		断層面の向き			断層運動の型			媒質		変位			歪			傾斜			
		垂直	水平	任意	横ずれ	縦ずれ	開口	ホアツン	任意	u_x	u_y	u_z	$\frac{\partial u_x}{\partial x}$	$\frac{\partial u_x}{\partial y}$	$\frac{\partial u_y}{\partial x}$	$\frac{\partial u_y}{\partial y}$	$\frac{\partial u_x}{\partial x}$	$\frac{\partial u_x}{\partial y}$	
点震源	Steketee(1958)	○	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	Maruyama(1964)	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	Okada(1975)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Okada(1985)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Chinnery(1961)	○	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
矩形断層	Maruyama(1964)	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	Press(1965)	○	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
	Savage & Hastie(1966)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sato & Matsu'ura(1974)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Yamazaki(1975)	-	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Matsu'ura(1977)	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Matsu'ura & Tanimoto(1980)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Davis(1983)	-	○	○	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Okada(1985)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	内部変形	Steketee(1958)	○	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-
Maruyama(1964)		○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Yamazaki(1978)		-	○	-	-	-	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Iwasaki & Sato(1979)		○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Okada(1992)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Chinnery(1961,1963)		○	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Mansinha & Smylie(1967)		○	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Mansinha & Smylie(1971)		-	○	○	○	○	-	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
Converse(1973)		○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Alewine(1974)		-	○	○	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Iwasaki & Sato(1979)		○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Yang & Davis(1986)		-	○	○	-	-	-	-	-	○	○	○	△	△	△	△	△	△	△
Okada(1992)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

△ : 理論式ではなくFORTRANコードが与えられている

生じた小規模な群発地震に伴って明瞭な傾斜変化を捉えることに成功した。この際、東伊豆の体積ひずみ計でも、それまでと同様の明瞭な変化が記録されたことから、群発地震に同期して地殻変動が生じていることは確かな事実となった。さらに、その2か月後の1989年7月には伊東市沖で激しい群発地震活動が始まり、手石海丘での海底噴火という事態に至ったが、この際には、川奈の傾斜計と東伊豆の体積ひずみ計に加えて、防災科研が世界に先駆けて開始したGPS固定点連続観測や、東京大学地震研究所が始めていた光波測距儀による辺長連続観測でもはっきりとした信号が捉えられ、群発地震に同期する地殻変動の存在は、もはや疑いないものとなった。

これを契機に、伊豆半島東部では地殻変動観測の一層の強化がなされ、その後も繰返される群発地震のたびに、似たようなパターンの地殻変動が何度も何度も観測されるようになった(表1のピンクで塗られた部分)。このような大量の地殻変動データに裏打ちされて、地震調査研究推進本部地震調査委員会と気象庁は、2010年9月9日、伊豆半島東部で発生する群発的な地震活動を対象として、予測的な評価を平成23年度から開始すると発表した。これまでに数多くの事例が蓄積され、東伊豆での体積ひずみ変化と群発地震活動の様相との相関関係が経験的に確立されたためである。具体的には、群発地震活動が活発化する前に、①マグニチュード1以上の地震回数、②最大地震の規模と震度、③震度1以上の地震回数、④活発

な活動期間を予測することとしている。地震活動の予測情報が業務として出されるようになる対象は、東海地震に次いで2例目となる。

4. 開口断層モデル

ここで話はやや横道にそれる。筆者は防災科研に入所したのち、関東・東海地域の地殻活動観測網を建設するプロジェクトに従事したが、それが一段落した1984年、当時の科学技術庁中期在外研究員制度により、ニューヨーク郊外のコロンビア大学ラumont研究所に3か月間滞在する機会を得た。住まいを探し、車を借り、2人の子供を小学校と幼稚園に入れるなどしている内、あっという間に1か月が過ぎ、何か仕事をしなくてはと思っている頃、滞在先の研究者から、雨が降ると水盤が膨れて地面が傾斜するという話を聞き、このような事象の定式化はどの程度できているのかに興味を覚えた。この種の問題は一般に「食い違いの弾性論」と呼ばれ、図2のようにある面を境として両側の弾性体に変位の不連続を有する際に、周囲の媒質はどのように変形するかという問題である。

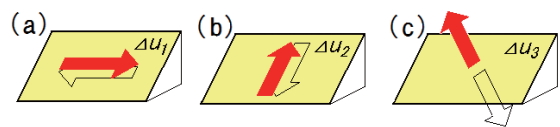


図2 一般的な(a)横ずれ断層, (b)縦ずれ断層, および(c)開口断層

Fig. 2 (a) strike slip, (b) dip slip, and (c) tensile fault.

このうち、面に平行な不連続を有する (a) 横ずれおよび (b) 縦ずれ断層は地震の震源モデルとなり、また、面に垂直な成分の変位不連続を有する (c) 開口断層については、さきほどの水盤の問題や火山における岩脈貫入などのモデルとなる。

このような問題については、すでに Steketee (1958) が積分の形で一般的な表現式を与えている。あとは力づくでコンピュータによる数値積分を行ってもよいが、できれば数学的な解析解を得る方が正確かつ効率的であり、望ましい。このため、地震の震源モデルとしての横ずれおよび縦ずれ断層については幾多の研究者により積分が解かれ、具体的な計算式が導かれていることは、学生のころに学んでいた。しかし、開口断層に関する定式化についてはあまり知識がなく、調べてみたところ、ごく特殊な場合の解しか得られていないことが分かった(表 2 上段)。

中期在外で残された 2 か月くらいで取組むには手頃なテーマと思い、数式の変形に明け暮れる毎日が始まった。電話や会議に邪魔されることなく、ひとつの数式をチェックするのに朝から晩まで、場合によっては 2～3 日もかけられるというのは、まことに贅沢な環境であった。開口断層に対する解析解を新たに付け加えると同時に、これまで発表されてきた断層に関する計算式の中にはあまりに冗長なものも見られたため、全体を整理し直して体系化し、断層モデルによる地表変形を表わす完全で簡潔な理論式のセットを導くことができた。これに関する論文は米国滞在中にほぼ完成させ、翌 1985 年の米国地震学会誌に掲載された (Okada, 1985)。図 3 は、断層面が垂直な場合の横ずれ断層、縦ずれ断層、および開口断層による地表の上下変動と水平変動を示している。

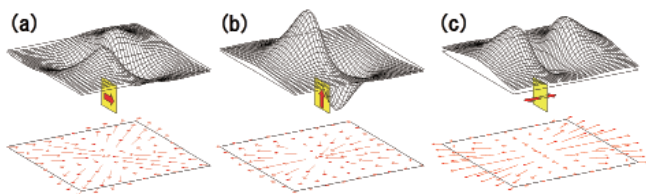


図 3 垂直な (a) 横ずれ, (b) 縦ずれ, および (c) 開口断層による地表の上下変動(上段)および水平変動(下段)

Fig. 3 Vertical and horizontal displacements at ground surface due to vertical (a) strike slip, (b) dip slip, and (c) tensile faults.

元々は数学的な完全性を追求する動機で始めた仕事であったが、一方で、GPS や SAR などの宇宙技術を利用した測地観測が台頭してきた時期でもあり、大量で高品質の地殻変動データが得られるようになれば、やがてそれらを解釈する道具がきっと必要になるであろうとの予感があった。

できたばかりの数式が応用される機会は、すぐに訪れた。1986 年 11 月に伊豆大島三原山で発生した割れ目噴火である。この事件の前後に実施された全島を一周する水準測量の結果から、伊豆大島では図 3 (c) で予測された通りの上下変動パターンの出現が確認された。筆者は、この

年科学技術庁併任となり霞ヶ関に通う身となっていたが、この現象については、国土地理院の今は故人となられた多田堯さんと、京大防災研に移られた橋本学さんにより、北西－南東方向に走向を持つ長さ 20 km、幅 15 km、開口量約 2 m の開口断層による定量的モデル化がなされた (橋本・多田, 1988)。

この 1986 年伊豆大島噴火の際には、割れ目噴火口のすぐ横に位置していた防災科研の御神火茶屋観測点でも大変に珍しい記録が得られている。図 4 は、同観測点のボアホール傾斜計の東西成分が、噴火の約 2 時間前に突然東へ大きく傾斜したのち、噴火直前には西向きへ大きく逆転傾斜したことを示している。これに対して Yamamoto *et al.* (1991) は、開口断層モデルによる上下変動パターンの特徴に基づき、マグマの深部から浅部への上昇に伴って生じた傾斜の時間変化であるとの解釈を与えた。

さて、中期在外から帰って 4 年後の 1988 年、今度は野口伸一さんが代表者となった科学技術振興調整費：個別重要国際共同研究の一環として、サンフランシスコ郊外

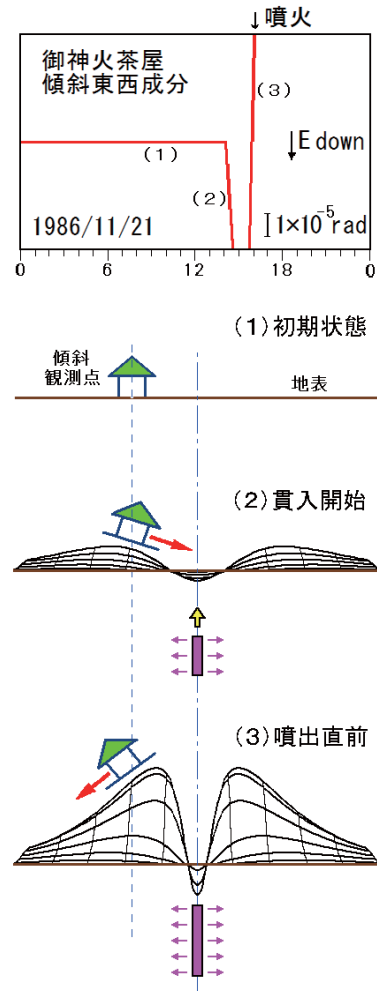


図 4 1986 年伊豆大島噴火に先立つ御神火茶屋における傾斜東西成分記録とその解釈 (Yamamoto *et al.*, 1991)

Fig. 4 Record of EW-component tiltmeter at Gojinka, Izu-Oshima, prior to 1986 eruption and its interpretation (Yamamoto *et al.*, 1991).

のUSGS（米国地質調査所）メンロパーク支所に4か月間滞在する機会を得た。アパートを探し、車を借り、2人の子供を中学校と小学校に入れる等の雑事を済ませたのち、今度は断層モデルによる弾性体内部の変形を求める計算式作りに没頭した。こちらも、表2の下段に示すとおり、完全な表現式のセットは存在しない状態であった。内部変形を求める計算式は地表変形の場合よりも数段複雑で難しく、米国滞在中には半ばまでしか完成できなかった。帰国の後、相当に苦労を重ね、米国地震学会誌に成果を発表できたのは1992年であった(Okada, 1992)。

現実の地殻変動観測は地球表面近くでなされるため、観測結果と理論予測とを比較して地震活動や火山活動のモデル化を行う作業には、地表変形の計算式があれば十分である。この目的にはOkada(1985)がよく引用されており、合成開口レーダ(SAR)により米国ランダース地震に伴う地殻変動を初めて捉えNatureの表紙を飾ったMassonet *et al.*(1993)にも使用された。また、この計算式はIASPEI(国際地震学・地球内部物理学協会)の100周年記念号(2003年)に記載された用語集にも“Okada model”として取上げられ、当該分野の標準モデルとして国際的に広く認知されるようになったことは誠に光栄である。

一方、地震や火山噴火といった現象が周囲の媒質にどのような影響を与えるかといった問題を評価したり、地震や火山噴火の発生に係る理論的考察を行うためには、弾性体内部での変位や歪といった変形状況を与えるOkada(1992)が威力を発揮する。2004年12月スマトラ沖地震(M9.3)が3か月後に東隣のニアス地震(M8.7)を誘発したとするMcCloskey *et al.*(2005)や、最近では2009年駿河

湾の地震が東海地震に及ぼす影響を論じたAoi *et al.*(2010)等、数多くの研究論文でこの計算式は使用されている。

5. 1989年7月伊東沖の海底噴火

話を伊豆半島に戻そう。一連の伊豆半島東方沖の群発地震活動の中で、もっともエポックメイキングであったのは1989年7月の活動である。この時は激しい群発地震が10日間ほど続き、これに同期して周辺のひずみ計や傾斜計に大きな変化が記録されると同時に、GPS観測や光波連続測量などでも顕著な地殻変動が捉えられた。そして、これらの活動も衰えたころ、突然、伊東市沖の手石島付近で海底噴火が発生するという事態を生じた。この事件の前後の流れを要約すると、以下のようになる。

(1) 1989年5月の小規模群発地震活動

1989年7月の活動に先立って、5月下旬に川奈崎の近傍でごく小規模の群発地震が発生した。最大の地震はM2.6であり、集中的な地震発生はほぼ1日で完了した。このように小規模な活動であったにも拘らず、川奈の傾斜計と東伊豆の体積歪計には、はっきりとした地殻変動が記録された。

Yamamoto *et al.*(1991)が指摘しているように、この時川奈で観測された $2 \mu \text{ rad}$ もの傾斜変化(図5左)は、微小地震に相応する通常の地震断層モデルからはとても期待できない大きな量であり、火山性の要因を考えざるを得ないものであった。

(2) 1989年7月の大規模群発地震活動と震源移動

1989年7月の群発地震活動は6月30日に始まり、最初の4日間のごく弱い活動であったが、7月4日朝から急激

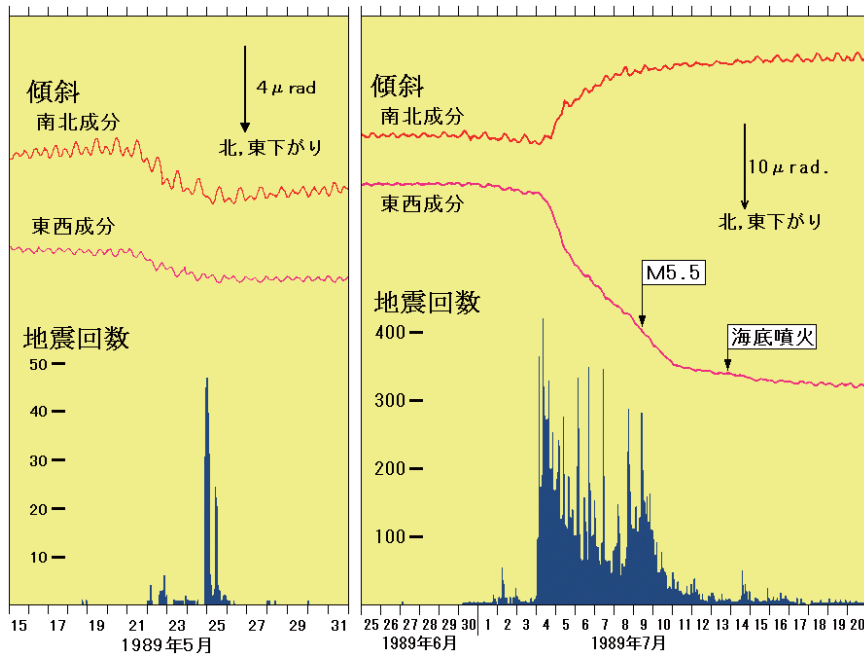


図5 1989年5月および7月に発生した伊東沖群発地震の時間別地震回数と、川奈における傾斜記録(スケールは両者で異なることに注意)

Fig.5 Hourly earthquake number and tilt record at Kawana station in May and July of 1989. Note the scale is different between two.

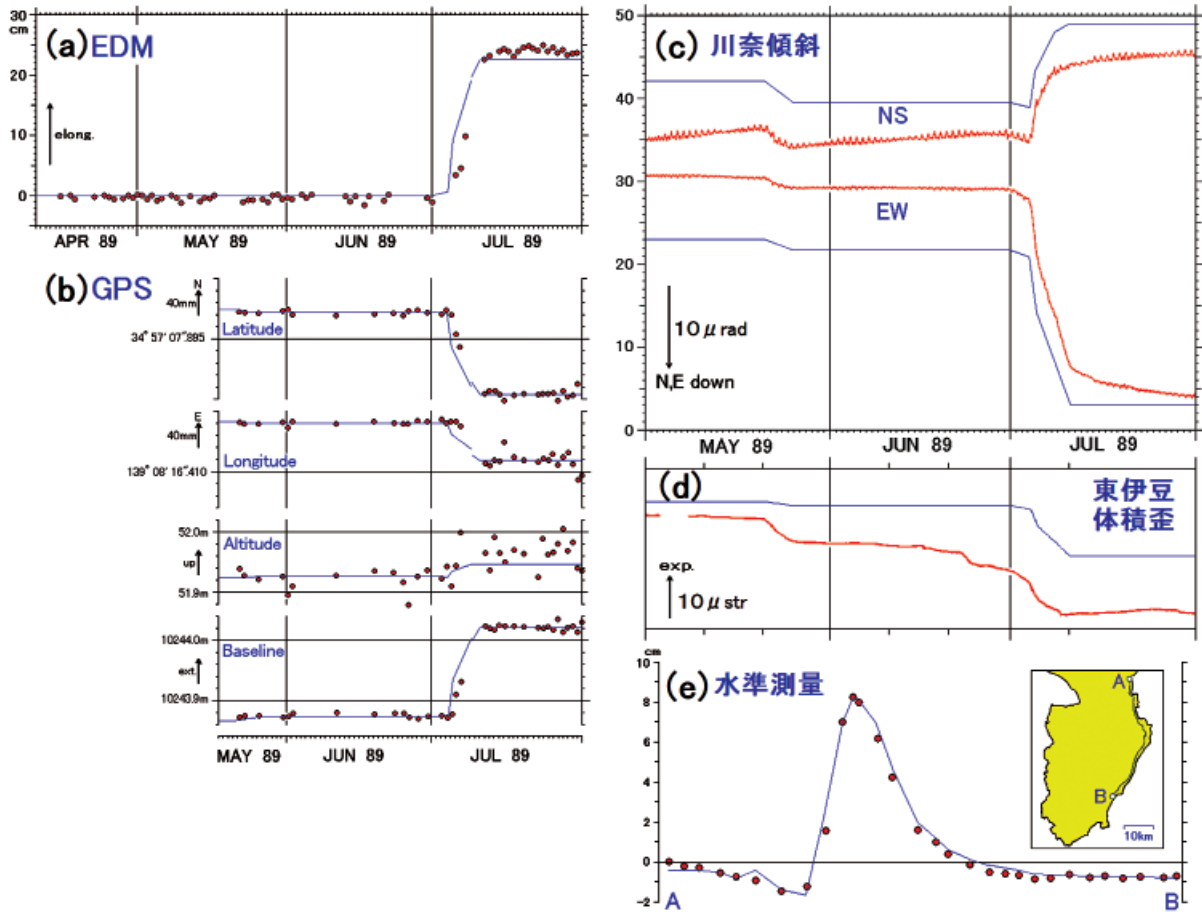


図6 1989年5月および7月の伊東沖群発地震に伴った地殻変動。(a)伊東－初島間の光波連続測距,(b)川奈－初島間のGPS,(c)川奈の傾斜計,(d)東伊豆の体積ひずみ計,(e)伊豆東岸の水準測量. 赤い点および赤線は観測値, 青線は図9, 10に示すモデルから計算される理論値を示す.

Fig. 6 Crustal deformation associated to swarms at May and July of 1989. (a)Distance between Ito and Hatsushima detected by EDM, (b) Position change between Kawana and Hatsushima detected by GPS, (c)Tilt at Kawana station, (d)Volume dilatation at Higashiizu station, (d)Leveling survey along the east coast of Izu Peninsula. Red dots and lines show observed data, while blue lines show theoretical deformations expected from the model given by Figs. 9 and 10.

に活発化した(図5右). 激しい群発地震は1週間ほど続いたが, この間, 7月9日にはM5.5の最大地震が伊東市宇佐美付近で発生した.

群発地震の震源は, 当初海岸線付近の深いところから始まり, 沖合の浅い方へと拡がっていったことが報告されている. このように群発地震活動の初期には震源の深さが深く, その後徐々に浅くなるという特徴は, その後のたび重なる群発地震の際にも共通して観測されており, このことはマグマないし開口割れ目が上方へ伝播していったことを示唆するものと考えられる.

(3) 群発地震に伴う顕著な地殻変動

1989年7月のイベントで特徴的だったことは, 群発地震活動に同期して非常に顕著な地殻変動が観測されたことである. 川奈の傾斜計には $20 \mu\text{rad}$ 程度の大きな変化が観測され(図5右), また, 伊東－初島間の光波測距やGPS観測でも, 約10 kmの距離が1週間で20 cm前後も伸びて, $20 \mu\text{str}$ 前後の伸張が観測された. さらに, 水準測量結果についても, 伊東市付近の地盤が10 cm近く隆

起していることが観測された(図6).

(4) 低周波地震の発生

群発地震活動の最盛期は7月4日から10日までの1週間ほどであったが, その末期頃になってから低周波地震が観測され始めた. その震源は伊東市沖の手石島付近のごく浅部であると推測され, これはマグマの貫入がかなり浅い部分にまで進んでいたことを示すものと考えられる.

(5) 群発地震・地殻変動の終息と微動・手石海丘の出現

群発地震活動が7月11日にほぼ終息したのに同期して, 激しい地殻変動もようやく収まった. しかし, それと入れ替わるように, 7月11日の夜と12日の朝には振幅の大きな火山性微動が観測され, 13日夕刻には, 大きな微動と共に手石島付近で海底噴火が目撃された(図7).

Oshima *et al.* (1991)による海底地形測量報告によれば, 噴火を生じた海域付近の海底地形は, 7月9日の時点では何の異常もなかったのが, 13日の噴火直前の測量では高さ25 m, 直径300 mほどの海丘が見つかったという. 噴



図7 1989年7月13日伊東沖で発生した海底噴火 (Oshima et al., 1991)

Fig. 7 Submarine eruption emerged at eastern off Ito City on July 13, 1989 (Oshima et al., 1991)

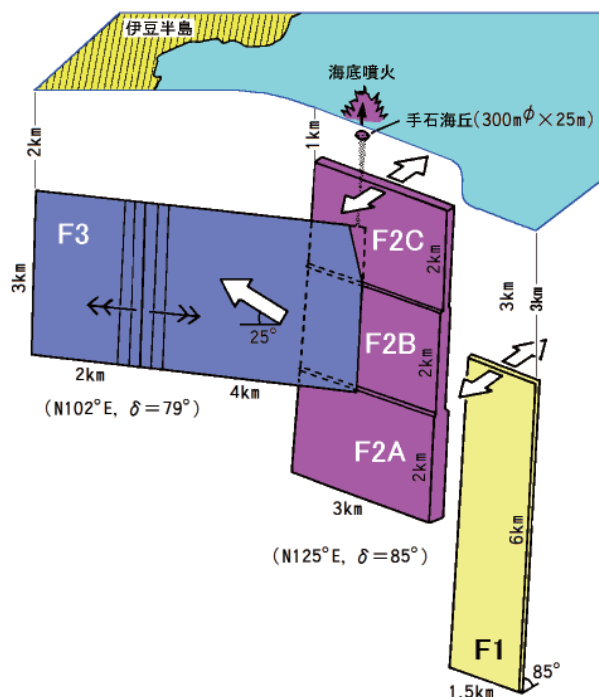


図9 1989年伊豆半島東方沖の地震火山活動に対する断層モデル

Fig. 9 Fault model to explain 1989 seismo-volcanic activity at eastern off Izu Peninsula.

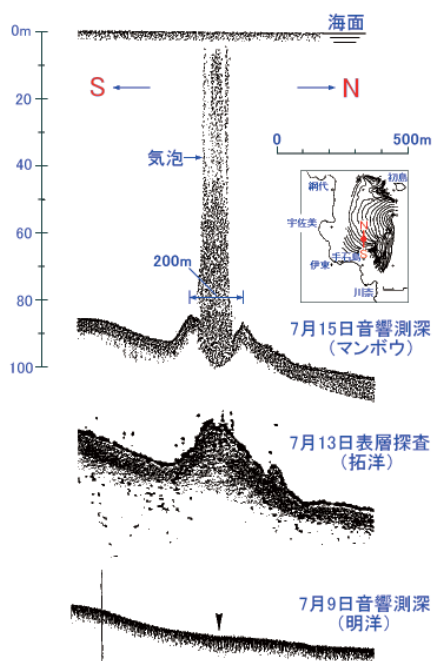


図8 1989年7月13日海底噴火前後の手石島付近の海底地形南北断面の変化 (Oshima et al., 1991)

Fig. 8 Observed topography change in N-S direction of sea bottom near Teishi island before and after submarine eruption on July 13, 1989 (Oshima et al., 1991).

火後の15日には、この海丘の頂部が陥没し、中から気泡が上昇している様子が観測された(図8)。

「手石海丘」と名付けられたこの海丘の正確な形成日時は不明であるが、微動の発生や海丘の形成といった火山性の事件は、一連の群発地震とそれに伴う地殻変動がある程度収まった後に始まったように思われる。このような地震活動と火山活動との相補性は、雲仙岳をはじめ、多くの火山においてかなり共通した現象として見られるようである。

この出来事については、上記に述べたように非常に顕著で豊富な地殻変動データが得られたため、Okada (1985)に基づいて、これらの観測結果を説明する定量的な断層モデルを図9のように構築することができた (Okada and Yamamoto, 1991)。ここで、F1は1989年5月の小規模群発地震に伴って川奈崎付近に貫入した岩脈状マグマに対応する開口断層、F2が7月の大規模群発地震に関係した岩脈状マグマ貫入に対応する開口断層である。なお、F3は伊東市宇佐美付近を震源として7月9日に発生したM5.5の最大地震に対応する横ずれ断層を示している。

このモデルの主要部であるF2は、北西-南東走向の幅3km、高さ6km、開口量約1mの開口断層であるが、モデルではこれを深さ別に高さ2kmずつの3つの開口断層F2A、F2B、F2Cに分割し、その各々に対して図10に示すような開口量の時間変化を与えている。ここで作成されたモデルから理論的に期待される地殻変動を、伊豆半島東部で実施されていた各種の地殻変動観測結果と比較すると、図6の青線で示す通りとなり、大変によく一致を得ることができた。

なお、図10において、最浅部の開口断層F2Cについては、最終ステージにおいて $30\text{ cm} \times 3\text{ km} \times 2\text{ km} = 1.8 \times 10^6\text{ m}^3$ の体積欠損があるように見られるが、この体積は、海上保安庁水路部によって発見された手石海丘のおよその体積 $4\pi/3 \times (150\text{ m})^2 \times 25\text{ m} / 2 = 1.2 \times 10^6\text{ m}^3$ とほぼ一致する。海底噴火の発生地点が断層面F2とF3の交点に近いことも考え合わせ、想像をたくましくすると、開口断層F2を満たしたマグマが横ずれ断層F3の衝突によって上昇し、

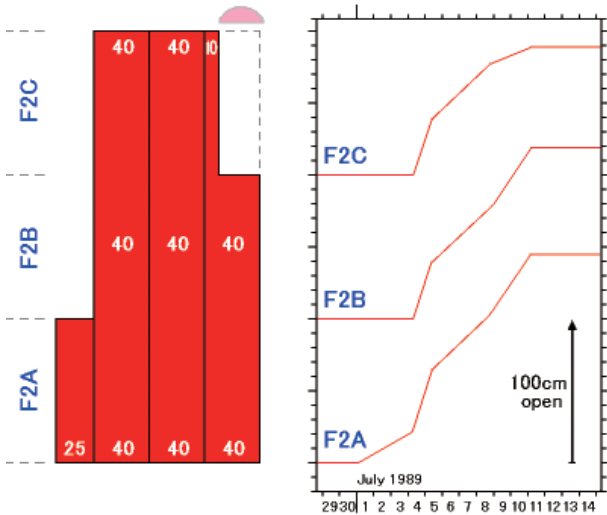


図10 図9に示す開口断層 F2A～F2C に対する開口量の時間変化

Fig. 10 Opening history for tensile faults, F2A–F2C shown in Fig.9.

手石海丘を形成したとも考えられる。

この1989年7月の事件でひとつ不思議なことは、海底噴火そのものに伴う地殻変動が何も観測されていないことである。手石海丘のすぐ近くに位置していた川奈の傾斜計記録(図5右)にも、海底噴火に伴う信号は何も観測されていない。これに対して山元ほか(1991)は、マグマが海底の未固結堆積層底部に流出して手石海丘を作り、その後なんらかの不安定性によって間隙水との接触が起こり、ごく小規模なマグマ水蒸気爆発を行ったため、主要なエネルギーは上方へ向かい、海底下の固体部分には地殻変動を起こすような影響を及ぼさなかったであろうとの解釈を行っている(図11)。

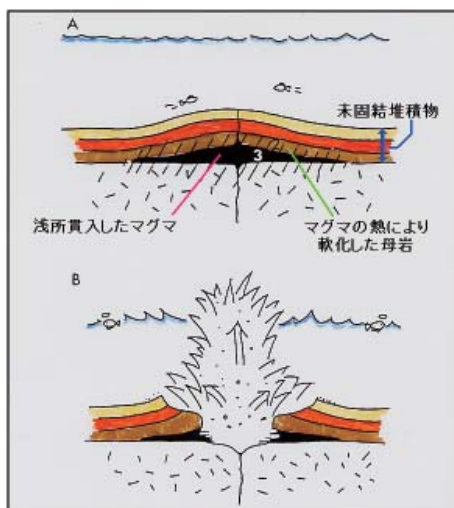


図11 1989年伊東沖噴火時の海底未固結堆積層へのマグマ貫入(山元ほか, 1991)

Fig. 11 Magma intrusion to sea-bottom unconsolidated layer associated to 1989 submarine eruption at eastern off Ito (Yamamoto *et al.*, 1991).

6. 伊豆地域における開口断層運動の背景

表1に示したとおり、海底噴火を伴った1989年の群発地震活動以降、伊豆半島東部では地殻変動観測体制が一層強化され、その後も繰返される群発地震のたびに同じようなパターンの地殻変動が何度も観測されるようになった。そして、これらのイベントに対しては、基本的に1989年と同様の開口断層による観測結果のモデル化が、より豊富なデータに基づいて精緻になされるようになった。

さらに、これらの知見を過去に適用し、植木(1992)は1930年の伊東沖群発地震とこれに伴った伊豆東岸の地殻上下変動(Tsuboi, 1933)に対しても開口断層モデルを適用し、成功をおさめた。この1930年群発地震の原因に関しては、すでにKuno(1954)が伊東沖海底下へのマグマ貫入であろうとする先見的な洞察を行っており、その解釈は正しかったことが、半世紀を経て再発した群発地震に対する近代的な観測と解析により裏付けられたことになる。すなわち、伊豆半島東方沖で最近に至るまでしつこく繰り返されてきた群発地震活動は、すべてマグマのいたずらによる「噴火未遂事件」であったと推定される。たまたま1989年7月には少量のマグマが海底にまで届き、海底噴火という事態に至ったというわけである。

さて、個々の群発地震活動は図9に示されたモデルと同様の北西-南東走向の開口断層によってモデル化されているが、この方向は図1に示した震源分布の配列方向と一致している。したがって、最近20年間に発生した伊豆半島東方沖の群発地震を総体として捉えるならば、図1の震源分布そのものがひとつの巨大な開口断層を示していると言ってよいであろう。さらに、この方向は橋本・多田(1988)によってモデル化された1986年伊豆大島噴火の開口断層の走向とも一致している(図12: Tada and Hashimoto, 1991)。

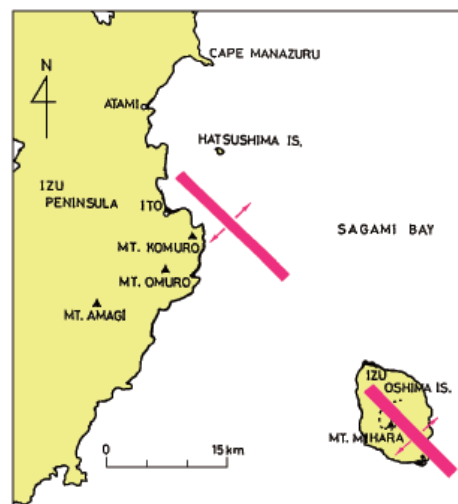


図12 伊豆半島東方沖群発地震および1986年伊豆大島噴火の開口断層モデル(Tada and Hashimoto, 1991)

Fig. 12 Tensile fault models corresponding to earthquake swarm at eastern off Izu Peninsula and 1986 Izu-Oshima eruption (Tada and Hashimoto, 1991).

一般に、媒質が北西-南東方向の圧力を受けた場合、その破壊モードとしては、同方向に長軸を有する開口断層と、南北走向の左横ずれ断層、および東西走向の右横ずれ断層の3パターンが存在する(図13)。開口断層は、外部からの圧力に直交し抵抗力の最も少ない北東-南西方向に開くということが、水圧破壊による地殻応力測定の実験原理である。一方、個々の地震は、同じ応力を受けた環境下で、南北走向の左横ずれ断層、または東西走向の右横ずれ断層として発生していることが、地震の発震機構解析により確かめられている。

伊豆半島東方沖の群発地震活動と1986年伊豆大島噴火の双方に共通する北西-南東走向のトレンドは当地域のフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの収束方向に一致しており、これらの現象は自然界における壮大な水圧破壊実験を見ていると言うこともできるであろう。

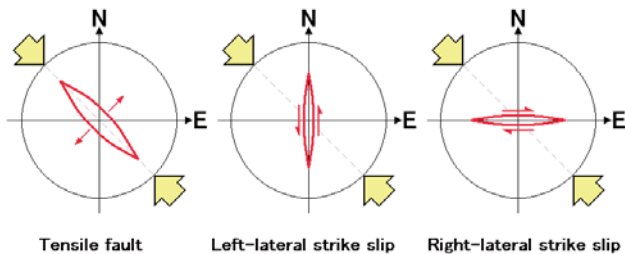


図13 北西-南東方向に圧力を受けた媒質の3つの破壊モード
Fig. 13 Three rupture modes of the medium subjected to pressure of NW-SE direction.

7. 群発地震活動に先行する地殻変動

前章までに述べたように、伊豆半島東方沖で発生する群発地震の特徴と発生メカニズム、さらにはそのテクトニックな背景などは1990年代前半頃までにはほぼ解明され、その後は開口断層によるモデル化も半ばルーチン化する状況となったため、研究としての新鮮味は次第に薄れていった。

そこで、ほかに何か面白いことはないかと記録を丹念に調べていると、群発地震に伴う大きな地殻変動とは別に、規模の大きな群発地震の前には、地震が発生し始めるのに先立って微小な前駆的地殻変動を生じていることが明らかになった(Okada et al., 2000)。

図14は、1997年3月の群発地震が始まる6日前から開始直後の1日までの1週間における時間毎の地震回数と、川奈における傾斜計記録とを比較したものである。群発地震は3月3日の01時台から始まっているが、傾斜計の東西・南北両成分のトレンドは、この群発地震が始まる前から僅かながら変化しているように見える。そこで、24時間ごとの傾斜変化ベクトル図を描いてみたのが図15である。

ここで、毎日規則的に繰り返されているゴマすり運動のパターンは、月と太陽の引力に起因する潮汐現象に対

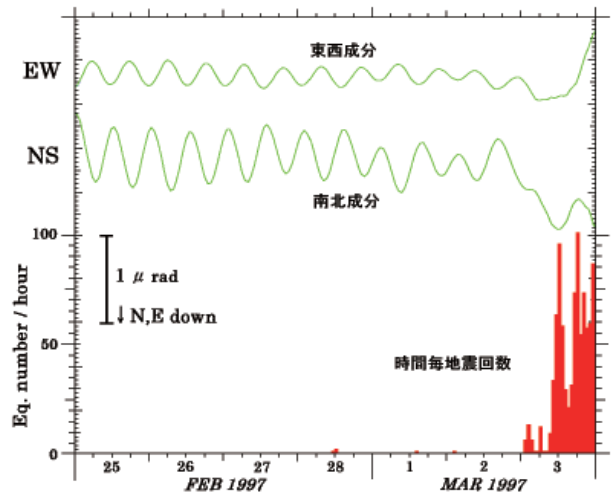


図14 1997年3月の群発地震開始前から直後までの1週間における時間毎地震回数と川奈における傾斜記録の比較
Fig. 14 Comparison of hourly earthquake number and tilt record at Kawana in one week prior to and just after the swarm in 1997 March.

応している。川奈観測点のすぐ北側は西南西-東北東方向に延びる海岸となっており、満潮になると海側(北北西)に、また干潮になると陸側(南南東)に地盤が傾くため、常時の傾斜ベクトルは、海岸線に直交する方向に主軸を持つ楕円形の上を移動している。

ところが、3月2日の夕刻、すなわち群発地震が始まる3月3日01時の6~7時間ほど前から、傾斜ベクトルは明らかに北東方向へとずれていっていることがわかる。

ここに見つけられた前駆的変動が何らかの偶然によるものではなく、本物の信号であるということは、他の機関が周辺で実施していた独立な観測結果によって確かめることができた。図16は、図14に示した1週間における川奈の傾斜ベクトル図を、東京大学地震研究所が川奈のすぐ近くの新井に設置したボアホール地殻活動総合観測装置による同期間の傾斜ベクトル図(石井, 1997)、および気象庁が東伊豆に設置した体積ひずみ計による1週間の記録(気象庁地震予知情報課, 1997)と比較したものである。緑色で示した部分は群発地震が始まる前の12時間分に対応しているが、いずれの記録についても、定常状態から抜け出して明瞭な前駆的变化を示していることが明らかである。

このような前駆的地殻変動は、1997年3月に続く1998年4月の大規模群発地震の際にも再び見出され、1998年4月25日の毎日新聞1面には「伊豆群発」予知に成功-気象庁と防災研-21日の有感地震に先立ち」という見出しの新聞記事が掲載された。筆者が知る限り、三大紙の1面に「予知に成功」という活字が躍ったのは、後にも先にもこれが初めてであると思う。

さらに、過去の記録にさかのぼってみると、大規模な群発地震活動の際には同様の前駆的地殻変動が例外なく

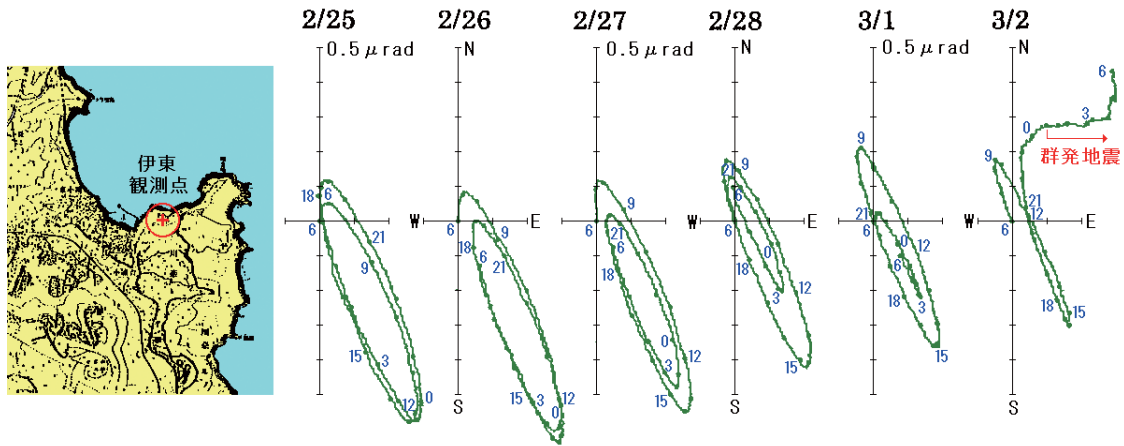


図 15 図 14 に対応する川奈での 24 時間ごとの傾斜ベクトル図
 Fig. 15 Tilt vector diagram at Kawana for every 24 hours in the period shown in Fig. 14.

現れていたことが分かった。図 17 は、過去 5 回の大規模な群発地震活動の際に川奈で得られた傾斜ベクトル図を並べたものである。緑色の部分は群発地震が始まる前の 12 時間分を示しており、いずれの場合も地震活動が始まる数時間～半日前に北東方向への傾斜変化を始めていることがわかる。次に、この前駆的変動をより見易くするため、元の傾斜記録から潮汐成分を取り除いたベクトル図を描いてみると、図 18 のようになる。

図 17 および図 18 から、川奈で観測される前駆的な傾斜変化は次のような特徴を有していることが分かった。
 (1) 大規模な群発地震の直前のみ顕著に出現し、(2) 先行時間は数時間から半日程度、(3) 信号レベルは $0.1 \mu\text{rad}$ のオーダー、(4) 傾斜方向は常に北東下がりであり、群発地震そのものに伴う大きな傾斜運動に滑らかに接続する。

上に述べた最後の特徴 (4) から、前駆的地殻変動の原因は、群発地震に伴う地殻変動と同じ要因、すなわち深部におけるダイク貫入であると推測することができる。伊豆半島東方沖の群発地震は、最初に深さ 10 km 付近から始まり、その後急激に浅くなるという推移をたどることが常であるが、ここで見つけられた前駆的地殻変動の存在は、マグマの貫入が約 10 km より深いところは地殻変動のみを地表に生じさせ、10 km より浅い所に貫入すると、初めて微小地震を発生させ始めるということを想像させる。

一方、大規模な群発地震の時にのみ先行的な傾斜変化が現れるという最初の特徴 (1) は、群発地震が大規模になるか、それとも小規模で終わるかは予め決まっているということを意味しており、このことは当地域における群発地震活動の実用的な直前予測に大いに役立つものと期待される。

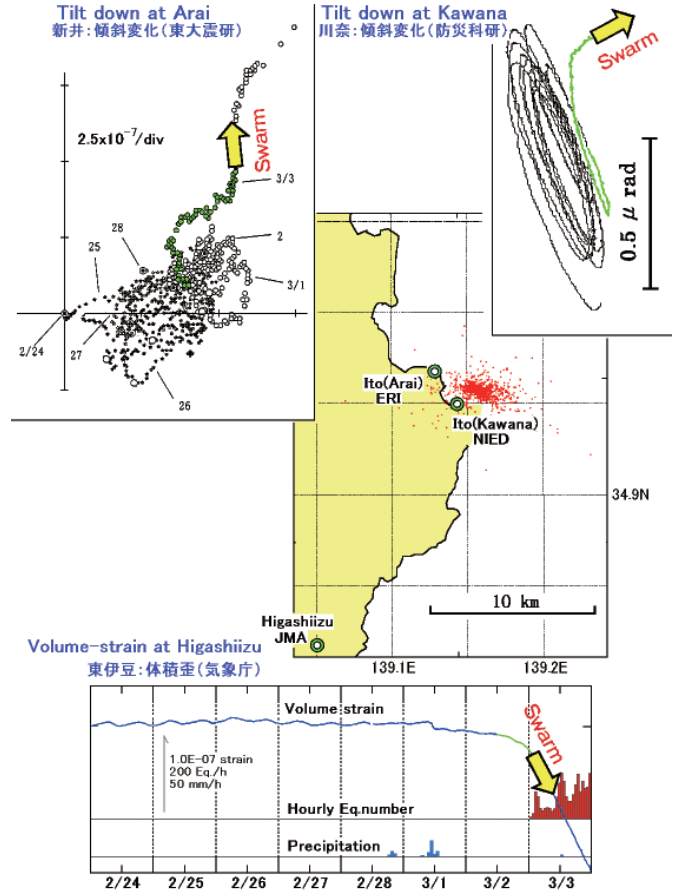


図 16 図 14 に対応する 1 週間における川奈と新井での傾斜ベクトル図、および東伊豆の体積ひずみ記録。緑色の部分は、群発地震が始まる前の 12 時間分を示す。

Fig. 16 Tilt vector diagrams at Kawana and Arai, compared to volume strain record at Higashiizu in the period of one week shown in Fig. 14. Green portions show the 12 hour period data preceding the start of earthquake swarm.

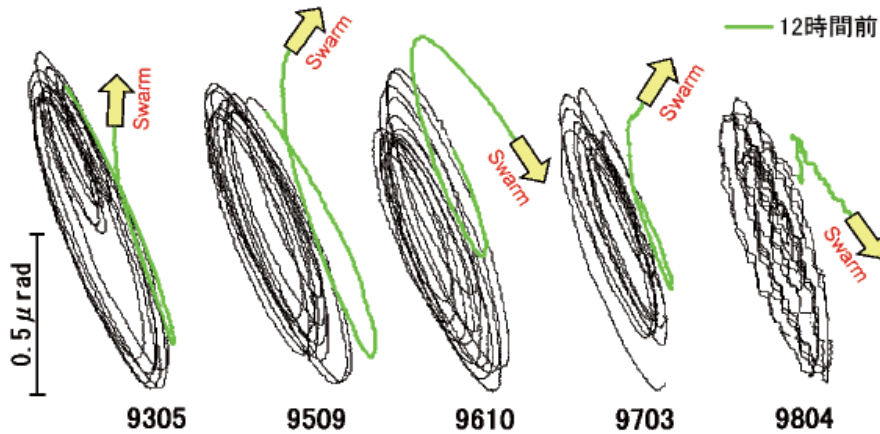


図 17 過去の大規模群発地震活動時に記録された川奈における傾斜ベクトル図。緑色部分は群発地震が始まる前の12時間分を示す。

Fig. 17 Tilt vector diagrams at Kawana station associated to the past large scale swarm events. Green portions show the 12 hour periods preceding the start of earthquake swarms.

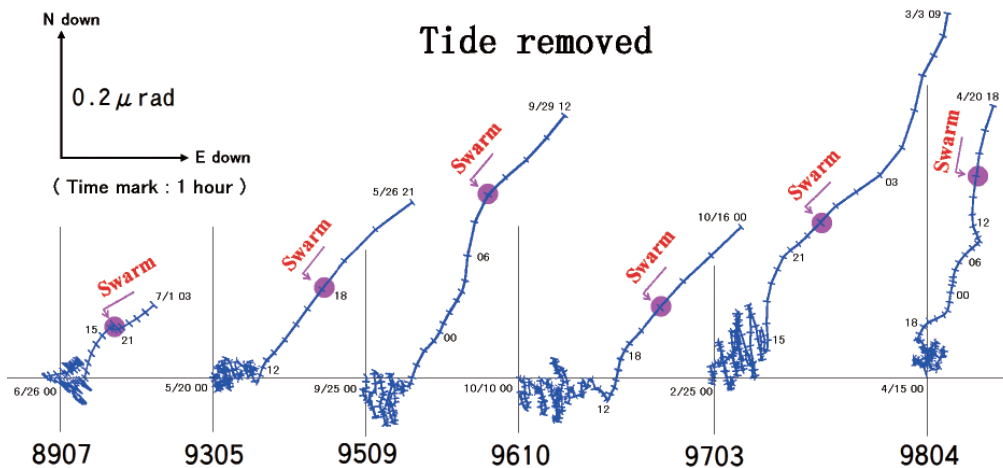


図 18 傾斜ベクトル図から潮汐成分を取り除いたもの。前駆的傾斜は常に北東下がりとなっている。

Fig. 18 Tide removed tilt vector diagrams at Kawana station associated to the past large scale swarm events. Pre-swarm tilting is always NE down.

8. おわりに

伊豆半島東方沖の地震火山活動に関連した研究生活を振り返ってみると、以下のような教訓が得られる。

(1) 人のやっていないことを見つけること

開口断層による地殻変動の計算式を加え、地中断層による地表変形及び地中変形の完全な表現式のセットを完成させた Okada (1985) および Okada (1992) に関しては、これまでに全世界から 150 件を超える計算コードの提供依頼を受けている。この問題に取り組んだ当初は、このように古典的な問題はとっくに決着がついているだろうと考えていたが、調べてみると、まだ誰も手をつけていない分野が残っていたことに驚いた。教科書に残るような集大成の仕事ができたことは大変誇りに思う。

(2) 独立なデータとの比較検証を行うこと

伊豆半島東方沖の群発地震に同期して顕著な地殻変動が生じていることは、1985 年頃から東伊豆の体積ひずみ

計により捉えられていたが、それが間違いないと認められるようになったのは、川奈に設置された傾斜計が東伊豆と同時に記録を得た 1989 年 5 月の小規模群発地震時である。また、川奈で見つかった、よりデリケートな前駆的地殻変動の信号が真実であると確かめられたのも、他機関が近傍で行っていた地殻変動観測の記録に同種の信号が現れていることからであった。

(3) 先見に囚われず、科学的データに基づくモデル化により大胆な可能性予測を行うこと

1989 年 7 月の海底噴火により、伊豆半島東方沖で繰り返されてきた群発地震は火山性であったことが自明となったが、この事件の前に噴火の可能性を公言した研究者は皆無だった。振り返ってみれば、この地域は大室山に代表される東伊豆単成火山群の分布地域に属していること(荒牧・葉室, 1977)、従来から見られた大きな地殻変動はダイクの貫入を強く示唆していたこと、また、1930

年に発生した伊東沖群発地震も火山活動との関連性が濃厚であったこと等、噴火の可能性は十分に考えられた。

1989年7月、通常の地震断層モデルでは到底説明し得ない大きな地殻変動が観測された時点で、現象は火山性であるということをもっと強く認識すべきであったし、強い火山性微動が現れた時点で噴火の確信を持つべきであった。しかしながら、伊東沖という場所では過去にはつきりとした火山性の現象が記録された例は一度もなかったということが、最後に至るまで噴火発生の断言を躊躇させてしまった。結局のところ、経験のない事柄は予測できないという結果に終わってしまったわけであるが、今後はこのような壁を突破し、大胆な可能性予測を行ってゆかなくてはならない。

参考文献

- 1) Aoi, S., Enescu, B., Suzuki, W., Asano, Y., Obara, K., Kunugi, T., and Shiomi, K. (2010) : Stress transfer in the Tokai subduction zone from the 2009 Suruga Bay earthquake in Japan. *Nature Geoscience*, **3**-7, doi: 10.1038/NNGEO885.
- 2) 荒牧重雄・葉室和親 (1977) : 東伊豆単成火山群の地質 : 1975-1977 中伊豆の異常地殻活動に関連して. *地震研究所彙報*, **52**, 235 - 278.
- 3) 橋本学・多田堯 (1988) : 1986 年伊豆大島噴火前後の地殻変動. *火山*, **33**, S136 - S144.
- 4) 石井紘 (1997) : ポアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震. *地震予知連絡学会報*, **58**, 254 - 263.
- 5) 気象庁地震予知情報課 (1997) : 伊豆半島およびその周辺の地震活動. *地震予知連絡学会報*, **58**, 229 - 238.
- 6) 気象庁地震予知情報課 (2006) : 伊豆半島東方沖の地震活動の概要. *地震予知連絡学会報*, **76**, 191 - 206.
- 7) Kuno, H. (1954) : Geology and petrology of Omuro-yama volcano group, North Izu. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, **9**, 241 - 265.
- 8) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaut, T. (1993) : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**, 138 - 142.
- 9) McCloskey, J., Nalbant, S. S., and Steacy, S. (2005) : Indonesian earthquake: Earthquake risk from co-seismic stress. *Nature*, **434**, 291.
- 10) Nasu, N. (1935) : Recent seismic activities in the Idu Peninsula, 2. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **13**, 400 - 415.
- 11) Okada, Y. (1985) : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135 - 1154.
- 12) Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018 - 1040.
- 13) Okada, Y. and Yamamoto, E. (1991) : Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **96**, 10361 - 10376.
- 14) Okada, Y., Yamamoto, E., and Ohkubo, T. (2000) : Coswarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **105**, 681 - 692.
- 15) Oshima, S., Tsuchide, M., Kato, S., Ohkubo, S., Watanabe, K., Kudo, K., and Ossaka, J. (1991) : Birth of a submarine volcano "Teisi Knoll". *J. Phys. Earth*, **39**, 1 - 19.
- 16) Steketee, J. A. (1958) : On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium. *Can. J. Phys.*, **36**, 192 - 205.
- 17) Tada, T. and Hashimoto, M. (1991) : Anomalous crustal deformation in the northeastern Izu Peninsula and its tectonic significance - Tension crack model -. *J. Phys. Earth*, **39**, 197 - 218.
- 18) Tsuboi, C. (1933) : Vertical crustal displacement in the seismic region of Ito, on the east coast of the Idu Peninsula. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **11**, 488 - 499.
- 19) 植木真人 (1992) : 1989 年伊東沖海底噴火に関する地震学的研究. 東北大学博士(理学)論文.
- 20) Yamamoto, E., Okada, Y., and Ohkubo, T. (1991) : Ground tilt changes preceding the 1989 submarine eruption off Ito, Izu Peninsula. *J. Phys. Earth*, **39**, 165-176.
- 21) 山元孝広・曾屋龍典・須藤茂・高田亮・宇都浩三・坂口圭一・小野晃司 (1991) : 1989 年伊東沖海底噴火の岩石学・地質学的モデル. *月刊地球*, **13**, 134 - 137.

(原稿受理 : 2010 年 10 月 20 日)

要 旨

伊豆半島東方沖では、1978年6月以来、30年以上にわたって群発地震活動が断続的に繰り返されている。これまで、傾斜計やひずみ計、水準測量、辺長測量、GPSなどによって、これらの群発地震活動は顕著な地殻変動を伴っていることが繰り返し観測されてきた。新たに導かれた開口断層による地表変形の計算式で解析することにより、これらは地下のマグマが岩脈状に貫入するモデルで説明できることが明らかとなり、一連の群発地震活動はすべて噴火未遂事件であったとの解釈ができるようになった。また、群発地震に伴う地殻変動のみならず、群発地震が開始する直前には微小な前兆的地殻変動も発生していることが発見された。

キーワード：伊豆半島，群発地震，岩脈貫入モデル，噴火未遂

著者略歴

1969年12月東京大学大学院理学系研究科地球物理学博士課程中退，1970年1月東京大学助手（地震研究所附属富士川地殻変動観測所），1980年3月国立防災科学技術センター（防災科学技術研究所の前身）入所。1993年4月～1996年4月防災科学技術研究所地震予知研究センター長，1996年5月～2001年3月同地震調査研究センター長，2001年4月～2006年3月同企画部長。2006年4月より現職。