

1993年伊豆半島東方沖群発地震活動に伴う温泉の変化

—アンケート調査より—

佐藤 努¹⁾・野田 徹 郎¹⁾

1. はじめに

1993年5月26日、静岡県伊東市沖で群発地震活動が始まった。この活動は、15年前から年に1, 2回の頻度で繰り返されてきた伊豆半島東方沖群発地震活動の延長である(岡田, 1993)。特に、1989年7月の活動は手石海丘の噴火に至り、これによって火山活動の関与が明らかになった。今回の活動は、1989年の活動と震源域や地殻変動がよく似ていたため、活動の成り行きが注目された。地震活動は3回ほど活発化したが、幸い噴火には至らず6月18日に終息した。

1989年の活動は手石海丘の噴火で幕を閉じたが、その前兆として顕著な温泉の変化が観測されている(黒川, 1990; Notsu et al., 1991; Sato et al., 1992)。今回の活動においても火山活動の関与を示唆する地殻変動が観測されており、同時に温泉の変化も注目された。そこで我々は群発地震活動中、伊東を中心とする地域を対象に温泉の変化についてアンケート調査を行った。本報ではその結果を報告する。

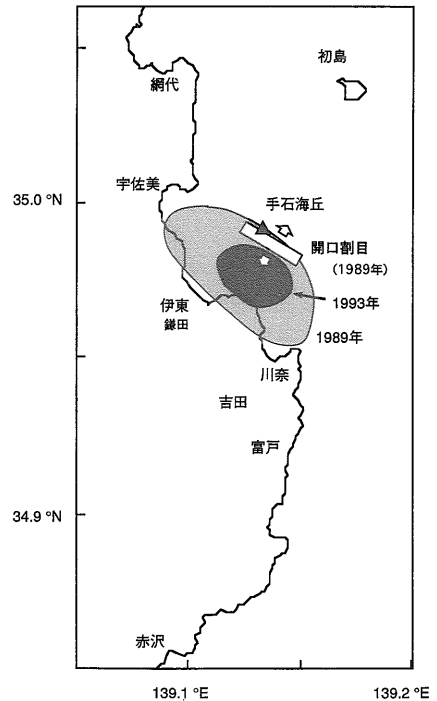
2. 1993年伊豆半島東方沖群発地震活動

2-1. 地震活動

1993年5月26日に始まった群発地震活動は、27日に1回目のピークを迎えた(第7図参照)。その後地震は減少したが、31日早朝から再び活発化し、15時12分には最大地震(M4.8, 伊東で震度4)が起きた。この日伊東で震度4を記録した地震は、こ

の地震を含め4回を数えた。3回目のピークは2日後の6月2日の夕方に訪れ、このとき震度4の地震は3回であった。その後地震は減少し、6月18日に活動は完全に終息した。

第1図に、今回の活動の震源域を示した(濃い網



第1図 1993年伊豆半島東方沖群発地震活動の震源域(気象庁; 濃い網掛け部分)。1989年の震源域は薄い網掛けで示した。また白抜の長方形は、1989年の地殻変動を説明する開口割目モデルで、太い矢印は割目の開く方向を示す(Okada and Yamamoto, 1991)。

キーワード: 伊豆半島, 群発地震, 温泉, アンケート, 伊東, 地震

1) 地質調査所 環境地質部

掛け部分). また, 1989年の震源域も薄い網掛けで示してある. 両者を比較すると今回の活動の震源域は, 規模は小さくなったが, ほぼ同じであったと言える. また震源深さも10 km以浅で共通していた.

気象庁鎌田観測点(伊東)で観測された地震回数は9,562回で, 1989年の活動の38%であった. 一方, 震度3以上の揺れは伊東で32回(1989年の71%)も感じており, 今回の活動は1989年と比較して, 規模が小さい割には大きな揺れが数多く生じた活動といえる.

2-2. 地殻変動

今回と1989年の活動との類似性は, 地殻変動にも見られた. 東伊豆の体積歪計(気象庁)や川奈の傾斜計(防災科学技術研究所)は, 群発地震活動の開始とほぼ同時に変化を記録し始めた. 変動量は体積歪計が 3.8×10^{-7} strainの縮み, 傾斜計が10 μ radの東南東下がりであり, その変化の様子は1989年の活動と非常によく似ていた(岡田, 1993). 体積歪計や傾斜計とともに, 伊東-初島のEDM観測(4 cmの伸び; 東京大学地震研究所)や伊豆半島東沿岸の水準測量(2~3 cmの隆起; 国土地理院)などで変化が観測されている. しかし, いずれの変動量も1989年の50%以下であった.

1989年の地殻変動は, マグマが何らかの形で震源域に力を加え, 南東-北西に延びる地殻の割目を開かせた結果であると考えられている(Okada and Yamamoto, 1991; Tada and Hashimoto, 1991). 今回の地殻変動も, 規模は小さいが1989年と同様, マグマが関与したと考えられる(岡田, 1993).

2-3. 温泉の変化

1989年の手石海丘の噴火は, 地殻変動が鈍化して3~4日後に起きた. 今回の活動では地殻変動は6月3日頃鈍化し, 結局はその15日後に活動は終息したが, その間, 手石海丘噴火前に見られた幾つかの前兆現象の有無が注目された. その例を挙げると, 火山性微動や長周期地震, そして伊東周辺で起きた温泉の変化である.

1989年に見られた顕著な温泉の変化として, 伊東では噴火の3日前より十数年使われていなかった井戸から温泉水が噴き出した(Notsu et al., 1991; Sato et al., 1992). 一方, 宇佐美では温泉の水位が10 m以上も下がった(黒川, 1990). 東京大学地震研究所によって噴火後に行われた温泉の変化に関する

アンケート調査(以下, 地震研の調査と記す)の結果も, 伊東で湧出量や水位の上昇が, 宇佐美でそれらの低下が起きたことを示している(茂木ほか, 1990). 南北に4 kmしか離れていないこの2つの温泉で, 湧出量や水位の相反する変化が生じたのは, 地殻変動を引き起こした開口割目と温泉との位置関係によると思われる(第1図). すなわち伊東では割目が地殻を押し広げる方向であったため, 縮みの歪変化を受けて温泉が自噴し, 一方, 宇佐美は割目が延びる方向であったため, 伸びの歪変化や小規模なクラックが形成して水位が下がったのであろう.

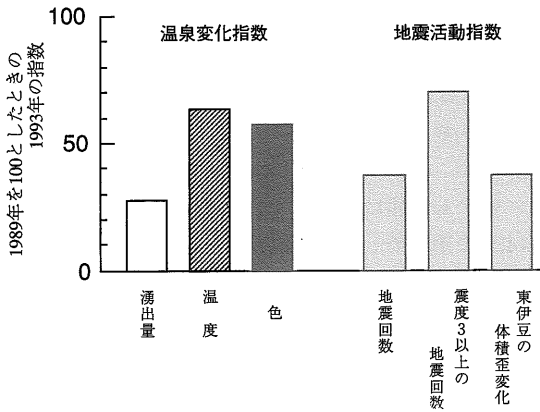
1989年の活動に伴う温泉の変化は, 地質調査所が地震予知を目的として行っている自噴量や温度の連続観測によっても捉えられている. その変化は, 赤沢6号井(手石海丘より南に15 km)において自噴量, 温度のそれぞれ100 l/min, 0.5°Cの上昇(吉川・永井, 1990), 姫の湯(手石海丘より南西に14 km)において自噴量の3 l/minの上昇(高橋, 1993)であった. しかし, これらの変化は伊東や宇佐美で見られたような噴火の前兆現象ではなく, 活動中に生じた中規模地震(M4~5)に伴う変化であると考えられている.

今回の群発地震においても, 両観測井において自噴量の上昇が観測された(地質調査所, 1993). また, 伊東や宇佐美における他機関の連続観測井においても温泉の変化が観測されている(岡田, 1993). このことから, 少なくとも震源域を中心とした半径およそ10 kmの範囲で, 温泉に変化が生じていることが予想された.

3. 温泉アンケート調査

今回の群発地震活動に伴う温泉の変化を明らかにするため, 我々は活動期間中, 伊東を中心とした地域において温泉の変化についてのアンケート調査を行った. 調査の手法としてアンケートを用いた主な理由は, 下記のとおりである.

イ. 今回の活動は1989年の活動とよく似ており, 顕著な温泉の変化(温泉の自噴や10 m以上の水位低下など)が起こる可能性があった. それらは機器による連続観測でなくても, 人間の五感によって十分検知可能と思われる.



第4図 1989年に対する1993年の活動時の温泉変化指数と地震活動指数. 温泉変化は発生の割合の比, 地震回数は気象庁鎌田観測点における地震回数(気象庁)の比で, 体積歪は気象庁東伊豆観測点における体積歪変化量の比.

の項目において今回の調査の割合の方が小さくなっている. 地震活動と同様に, 温泉の変化も1989年と比べてその規模が小さかったことが分かる.

温泉の変化の規模の縮小の割合を示す値として, 1989年の温泉の変化の発生の割合を100としたときの今回の温泉の変化の発生の割合の比(以下温泉変化指数)を求めると, 湧出量が28, 温度が64, 色が58であった(第4図). 同じように地震活動についても, その規模を反映する鎌田における地震回数(気象庁), 伊東で震度3以上を感じた地震(気象庁), 東伊豆の体積歪変化量(気象庁)について, 1989年の地震回数や歪変化を100としたときの今回の地震回数や歪変化の比(以下地震活動指数)を求めた(第4図). この温泉変化指数と地震活動指数とを比較すると, 湧出量は地震回数や体積歪変化量と, 温度や色は震度3以上の地震回数と, それぞれ指数が近い値となっていることが分かる.

一般に, 湧出量は帯水層が受ける地殻歪変化量に応じて変化する. 伊東で生じた地殻歪変化量は不明だが, その代用として, 割目から見て伊東と同じ方向(割目が地殻を押し広げる方向)に位置する東伊豆(赤沢の南南西およそ3km; 第1図参照)の体積歪変化のデータが使用できると思われる. 第4図によると, 湧出量に関する温泉変化指数は東伊豆の歪変化に関する地震活動指数と調和的であり, これは湧出量の変化が地殻歪変化によって生じたことを示唆する.

一方色の変化は, アンケートにおいて“濁った”という回答が最も多く, “配管のスケールの剝離による”との注釈が幾つかの回答に見られた. そのスケールの剝離の原因は, 地震による地面の揺れと推定される. 第4図では, 色の変化に関する温泉変化指数は震度3以上の地震回数に関する地震活動指数と調和的である. つまり, 今回の活動では揺れの大きい地震が全地震回数に対して多かったため, 色の変化が起こりやすかったと思われる.

温度の変化について, 第4図における指数の比較だけからは色の変化と同じ原因で起きたと推測される. しかし, その変化のおよそ30%は湧出量や水位の変化と共に起きており, すぐに温度の変化はスケールの剝離によって生じた結論づけることはできない.

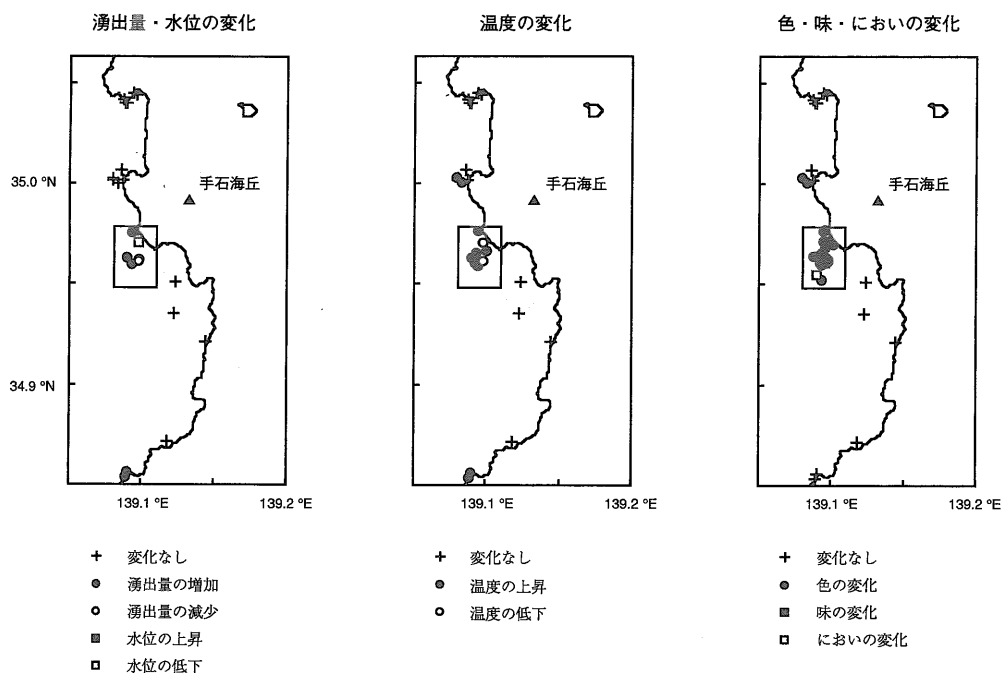
4-2. 温泉の変化の地理的分布

第5図は, アンケートの結果を地図上にプロットしたものである. 伊東については「変化なし」の源泉を削除して簡略化した. また湧出量と水位の変化は, 地震研の調査結果ではそれぞれ独立に表示されていたが, ここでは1つにまとめた.

この図から, 今回の活動に伴う温泉の変化のほとんどが伊東で見られたことが分かる. また, 網代と宇佐美, 網代と吉田は1989年の活動中にそれぞれ湧出量・水位, 温度の変化が見られたが, 今回は見られなかった. このことから, 今回の温泉の変化は1989年と比べて地理的にも縮小したことが分かる. 逆の表現にすると, 群発地震活動の規模が大きいときは震源域から離れた地域でも温泉の変化が見られるとなるであろう.

図中最南部の2ヶ所で見られた湧出量の増加は, 地質調査所が地震予知を目的として観測を行っている赤沢1号及び6号井の結果である. その変化量は, 1989年の活動時のおよそ20%であった(地質調査所, 1993).

今回の活動では, 温泉の自噴のような顕著な変化はいずれの地域においても見られなかった. また, 伊東と宇佐美で1989年の活動中に見られた湧出量・水位の相反する変化(伊東で増加, 宇佐美で減少)も見られなかった. しかし, 地殻変動データは震源域中の割目の開口を示しており, 今回の活動中湧出量・水位の相反する変化が起きる可能性は大きかったと思われる. 温泉にこのような変化が現れな



第5図 温泉の変化の地理的分布(伊豆半島東海岸)．伊東(図中の長方形)は源泉数が多いため，変化なしを削除して簡略化した．最南に位置する2源泉(赤沢1及び6号井)の変化は，地質調査所の連続観測データより．

ったのは，割目の開口量が小さかったためか，あるいは割目の向きや場所が1989年の活動時と同じではなかったためであろう．

第6図は，伊東の温泉の変化についての拡大図である．湧出量・水位や温度の変化は中央から少し南にかけて見られ，色の变化は伊東ほぼ全域で起こった．図中の網掛け部分は，1989年の地震研の調査で変化が見られた地域である．今回変化が見られた源泉の分布は，各項目ともにこの分布とほぼ一致し，著しい地理的分布の変化は見られなかった．

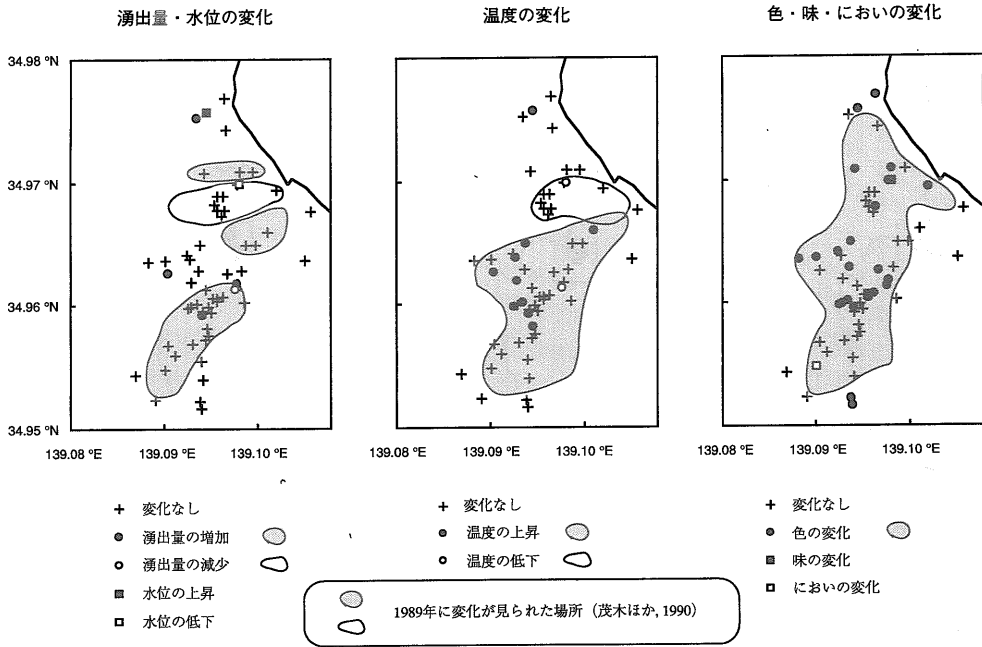
4-3. 温泉の日別変化

今回のアンケート調査は早い時期に行ったため，変化の見られた日が多いの回答に記入されていた．そこで日別の温泉変化数を，第7図に示した．

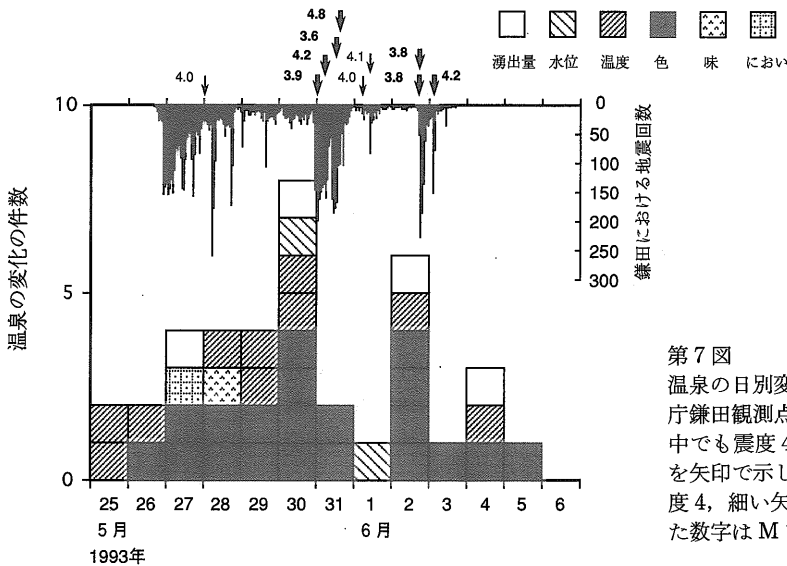
温泉の変化が最も多く見られたのは5月30日で，地震活動が最も活発であった2回目のピーク(31日)の1日前に当たる．また，31日にはほとんど変化が見られておらず，これは30日にピークがあること併せて大変興味深いことである．

図中で変化の大半を占める色の变化の原因は，地震の揺れによる濁りと思われる(4-1.章)．よって，30日に見られた色の变化のピークが31日の地震活

動の前兆である可能性はほとんどないと思われる．また地震回数が少ないため，30日の地震活動によって引き起こされたとも考えにくい．30日に色の变化が集中して見られたのは，1回目の地震活動のピーク時に生じた濁りが2〜3日経って地上に現れたためと考えるのが自然であろう．すると，6月2日にも見られる色の变化のピークは3回目の地震活動のピーク(6/2)によるものではなく，2回目の地震活動のピーク(5/31)の影響が遅れて現れた結果であるという解釈になる．地震活動の影響が2〜3日遅れるのは，色の变化の原因が単に配管中のスケールの剥離による濁りというわけではなく，井戸のストレーナー周辺の帯水層中で起きた濁りも多く含まれるためと考えられる．土粒子に付着した沈殿物が地震動によって遊離し，温泉を濁しているであろう．またこの時に透水係数などの帯水層パラメータに変化が生じれば，湧出量や温度の変化も同時に起こり得ると考えられる．このような変化が起こり得る帯水層の範囲は，ストレーナーから半径数mと思われる．それは伊東における平均的な湧出量，帯水層の厚さ，間隙率の値(それぞれ100 l/min, 100 m, 0.1)をあてはめると，温泉水が3日で井戸に達する



第6図 温泉の変化の地理的分布(伊東：第5図の長方形の範囲)．網掛け部分は地震研の調査による1989年の活動時の温泉の変化の分布(茂木ほか，1990)．



第7図
温泉の日別変化数(下段)．中段は気象庁鎌田観測点における地震回数．その中でも震度4またはM4.0以上の地震を矢印で示した(上段)．太い矢印は震度4，細い矢印は震度3の地震を，また数字はMを示す．

範囲は半径約4mになるからである。

第7図において，3回目の地震活動のピーク(6/2)の後に色の変化のピークは見られていない．これは，1回目または2回目の地震活動の際，震度4程度の地震で遊離し得る沈殿物がほとんど遊離してしまい，色の変化が起きにくくなったためと考えられる。

群発地震の始まる直前の5月25日に，温度の変

化が2つの源泉で見られている．また同じ日に，伊東南部に位置する東京大学理学部HRN観測井や伊東の西およそ13kmに位置する名古屋大学理学部大仁観測井でも，温度の変化が観測されている(東京大学理学部，1993；山内ほか，1993)．これらの変化は，群発地震活動の前兆現象である可能性も考えられる。

5. あとがき

1993年伊豆半島東方沖群発地震活動に伴う温泉の変化は、1989年の活動と比べて小規模であった。それは地震活動そのものが小規模であったためと、本報では結論付けることができる。温泉の変化は地震活動の規模に応じて起きており、逆に温泉の変化から群発地震活動の動向を知ることができるかもしれない。そのためには今後、温泉の変化が見られた源泉の帯水層や地理的な特徴を分析し、地震活動や地殻変動の詳しい解析結果と照らし合わせて、より定量的な解釈を行う必要があるであろう。

地質調査所では、活発な地震活動が予想される東海・伊豆地域においてテレメータによる地下水観測を実施している。なるべく地震に対して鋭敏な変動を示す箇所が選ばれ、連続的にデータを得ている。ところで地震発生の場所は一定しないため、観測網は広域にわたる必要がある。また限られた連続観測点を有効に展開するには、より鋭敏な観測点を探す不断の努力が必要である。今回のアンケート調査は、特定の活動に対し同時に多数の前兆データを得るという調査方法としての意味と併せて、近頃活発な地震・火山活動を示し、社会的にも注目されている伊東市近隣域に対して鋭敏な変動を示す観測点を見つけようという目的を有している。

地震予知技術の完成は、広域に展開された鋭敏な観測点で時系列データの収集と解析が行われ、一方で地下水の変動と地震発生機構とを関係づけるモデルが示され、両者がインタラクティブに向上することによって成し遂げられるものと考え。まだ伊豆半島東方沖の活動について、温泉の変動メカニズムを説明するモデルを明示するには至らないが、幸いこの地域では地殻歪の観測など多くのデータが集積されつつあり、それらとアンケート調査結果や連続観測データを対比することによりモデルを提示することができれば、地震予知解析のケーススタディとして有用なものになると考える。

最後になるが、本調査は伊東周辺の方々の御協力が無くては成し得なかった。温泉の変化に関して「今回はあまり注意を払わなかったが、また何か起こったら注意したい」という回答もあり、非常に励まされる思いであった。「毎年行っている2月の点検時に変なおいがして、今年は何かあるのではと

思っていたら群発地震が起きた」という興味深い話も聞いた。温泉を使用しておられる方々の温泉に対する関心は非常に高く、これらの方々からの情報は新たな活動の予知にも欠かせないものであると我々は考える。

謝辞：アンケートに御協力いただいた伊東市および熱海市の方々に厚く感謝致します。また伊東温泉組合の田中 出氏には大変お世話になりました。お礼を申し上げます。

文 献

- 吉川清志・永井 茂(1990)：伊東市赤沢6号温泉井の自噴量・水温変動とその原因—伊豆半島東方沖付近の地震・火山活動との関連—。地震, **43**, 243-256。
- 黒川義男(1990)：宇佐美温泉で観測された1989年伊豆東方沖群発地震と海底噴火の前兆。神奈川県温泉地学研究所報告, **21**, 39-46。
- 茂木清夫・望月裕峰・黒川義男(1990)：1989年7月の伊東沖群発地震・海底噴火に伴う温泉変化。地震予知連絡会会報, **43**, 290-299。
- Notsu, K., Wakita, H., Igarashi, G. and Sato, T. (1991): Hydrological and geochemical changes related to the 1989 seismic and volcanic activities off the Izu Peninsula. *J. Phys. Earth*, **22**, 213-221.
- Okada, Y. and Yamamoto, E. (1991): A model for the 1989 seismo-volcanic activity off Ito, central Japan, derived from crustal movement data. *J. Phys. Earth*, **39**, 177-195.
- 岡田義光(1993)：1993年5月伊豆半島東方沖の群発地震活動(速報)。日本地震学会ニュースレター, **5**(2), 15-16。
- Sato, T. (1991): Hydrologic changes associated with seismic and volcanic events, in Ito Hot Spring area, 東京大学理学部地球物理学科修士論文。
- Sato, T., Wakita, H., Notsu, K. and Igarashi, G. (1992): Anomalous groundwater changes: Possible precursors of the 1989 volcanic eruption off the east coast of the Izu Peninsula. *Geochem. J.*, **26**, 73-83.
- Tada, A. 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.
- 高橋 誠(1993)：地震予知のための地下水テレメータ観測システム。地学雑誌, **102**(3), 241-251。
- 地質調査所(1993)：第105回地震予知連絡会資料。
- 東京大学理学部(1993)：第105回地震予知連絡会資料。
- 山内常生・宮島力雄・奥田 隆(1993)：豊橋および大仁における異常な歪変化と地下水量の変化。日本測地学会1993年度大会予稿集。

SATO Tsutomu and NODA Tetsuro (1993): Changes in hot-springs associated with the 1993 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula—result of a questionnaire survey—

<受付：1993年8月17日>