兵庫県南部地震における岐阜県瑞浪市白狐 温泉ガスの異常変動

名古屋大学理学部地球惑星科学教室* 伊藤 貴盛・杉崎 隆一・川邊 岩夫
名古屋大学大学院人間情報学研究科** 永 峰 康一郎

Anomalous Behavior of Mineral Spring Gases at Byakko Spa, Mizunami, Gifu Prefecture before and after the Southern Hyogo Prefecture Earthquake

Takamori Ito, Ryuichi SUGISAKI and Iwao KAWABE

Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University, Furo-cho,
Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-01, Japan

Koichiro NAGAMINE

Graduate school of Human Informatics, Nagoya University, Furo-cho,
Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-01, Japan

(Received October 3, 1995; Accepted March 13, 1996)

Mineral spring gas compositions at several sites in central Japan have been continuously monitored in our laboratory for the earthquake prediction study since 1979. The mineral spring gas flow rate has been also monitored since 1993. Southern Hyogo prefecture earthquake occurred on January 17, 1995. At this event, we observed preseismic and coseismic anomalous behavior of mineral spring gases at Byakko spa, a monitoring site of ours, 220 km away from the epicenter. The gas flow rate decreased remarkably and rapidly 3 hours before the event. This decrease may be attributed to a decline of water flow rate due to a preseismic crustal deformation at the site. Three gas ratios, He/Ar, N₂/Ar and CH₄/Ar, conspicuously increased after the event. The ratios of N₂/Ar and He/Ar began to increase one or two days before the event, while CH₄/Ar did at the occurrence time of the event. These changes can be interpreted as the result of changes of a mixing process of the gases dissolved in ground water. The present observation indicates the efficacy of monitoring of subsurface fluids for earthquake prediction.

Key words: Geochemical earthquake prediction, Preseismic gas anomaly, Coseismic gas change, Mineral spring gas, Subsurface fluid.

§ 1. はじめに

著者らの研究室では、地震に伴う温泉ガスの質的量的変化を調べるために、1979年以来、中部地方の数カ所の温泉にガスクロマトグラフを用いた温泉ガス自動分析装置を設置し、観測を続けてきた。ここで用いるガス組成分析の特徴は、起源の異なる各ガスの濃度比に注目することであり、それにより、一般のガス分析で必要とさ

れる温度、圧力に関する補正などが一切無用であり、極めて単純な操作で精密な測定が可能となることである [SUGISAKI (1978), 杉崎・志知 (1978)]. 1983年には、この温泉ガス組成分析装置の分析結果を観測点から名古屋大学へ転送するために公衆回線を利用したテレメータシステムを導入した [名古屋大学理学部 (1983)]. 1989年には、観測システムをパーソナルコンピュータによって制御されるものに置き換え [永峰 (1990)], 高密度の観測を安定して行えるものに改良されている

*** 〒464-01 名古屋市千種区不老町

Fig. 1. A map showing location of the monitoring site (Byakko spa) and the epicenter of Southern Hyogo prefecture earthquake.

[NAGAMINE (1994)]. また、1993 年からは、観測点の 1 つ、白狐温泉に温泉ガス湧出量計を設置して連続観測を開始した [伊藤・他 (1994)].

地震と温泉ガス組成の変動との関係については多くの研究がなされており、我々の観測点でも、1984 年長野県西部地震 ($M=6.8$) 発生前後に温泉ガス組成の異常変動をとらえている [SUGISAKI and SUGIURA (1985, 1986)]. さらに、いくつかの地震直後に He およびガス湧出量のスパイク状の増加を観測している [伊藤・他 (1994), NAGAMINE and SUGISAKI (1991), NAGAMINE (1994)].

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震は、近年発生した内陸型地震としては特に大きく、震源に近い神戸・西宮地域においては、IGARASHI *et al.* (1995), TSUNOGAI and WAKITA (1995), 京都大学大学院理学研究科・東京大学地震研究所 (1995) に、それぞれ地下水の Rn 濃度、 Cl^- などの溶存化学成分、湧水量の顕著な前兆変化が認められている。一方、我々の中部地方の観測点では震源からの距離がこれらに比べてはるかに遠いにもかかわらず、preseismic 変化などこの地震に関連すると思われる温泉ガスに関する変化を捉えることができた。本稿では、兵庫県南部地震に関連して現われた白狐温泉の温泉ガスの変化を報告し、その考察を行う。

§ 2. 観測の概要

本研究で報告する観測点は岐阜県瑞浪市の白狐温泉に位置し、兵庫県南部地震の際の震央距離は 220 km である (Fig. 1). 白狐温泉は、東濃地方で多く見られる放射能泉の一つであり、温泉水中に高濃度の He が含まれることが特徴である。この温泉では、近くを NE-SW 方向に走る屏風山断層系の断層によってもたらされると考えられる 25°C 前後の温泉水が花崗岩の割れ目から湧出し、泉源は約 100 m² の小さな池となっている。

この観測点にはパーソナルコンピュータによって制御されるガスクロマトグラフ分析計 ((株)大倉理研製 802TDH・O₂ キャリアー) が設置され [永峰 (1990)], 温泉水から分離して湧出するガスを 1 日に 46 回採取し、He, H₂, Ar, N₂, CH₄ の 5 成分を分析している。また、ガス湧出量計により、各 6 分間に湧出するガス量の測定を連続して行っている [伊藤・他 (1994)]. 観測結果は 1 日 1 回 (深夜) 公衆回線を用いたテレメータシステム [永峰・他 (1989)] により自動的に著者らの研究室へ転送され、高密度のデータが得られている [NAGAMINE (1994)].

§ 3. 観測結果

SUGISAKI and SUGIURA (1985, 1986) は、1984 年 9 月 14 日の長野県西部地震 ($M=6.8$) の際に白狐温泉の

Fig. 2. Fluctuation of gas flow rate at Byakko. Since the gas flow rate considerably fluctuates in a short period, each average in one hour is plotted. A solid arrow indicates the occurrence time of the earthquake.

Fig. 3. Fluctuation of gas flow rate normalized by the average flow rate in preceding 24 hours (see text). Horizontal broken lines show the ranges of $\pm 6\sigma$ (standard deviation) variations in this period. The normalized gas flow rate (R_i) remarkably decreased by 6σ just before the earthquake.

温泉ガス組成に前兆的变化が現われたことを報告している。今回の兵庫県南部地震は、1984年の長野県西部地震に比べると、マグニチュード ($M=7.2$) がやや大きく、観測点からの震源距離は約4倍である。したがって、前兆変化は小さく、必ずしも同様の変化が観測されるとは限らないものと考えられる。しかし、この10年間に観測装置およびシステムの改良が進んだことにより [伊藤・他 (1994), 永峰 (1990)], 以前観測されなかった地震と関連した変化を観測することができた。以下地震前、地震発生時、ならびに地震後のガスの量的質的な変動について記述する。

3.1 preseismic 変化

Fig. 2 は温泉ガス湧出量の1時間毎の平均値を示している。ガス湧出量のデータは6分毎に得られているが、1時間毎の平均値をとったのは、白狐温泉ではそのガスの湧出の状態が様ではなく、散発的であるため、個々の測定値のままではばらつきが大きく、長期的な変動を明らかにできないためである [伊藤・他 (1994)]。地震発生の半日前にはガス湧出量は約25 ml/minであったものが、地震の約7時間前から減少を始め、約3時間前に約12 ml/minと、それ以前の値の約半分という異常な減少を示した。その後、増加に転じ、もとの湧出量と同程度に戻った頃に地震が発生した。ガス湧出量

Fig. 4. Fluctuations of gas ratios before and after the earthquake. All measured values are plotted. A solid arrow indicates the occurrence time of the earthquake.

の短期的で、これほど大きな減少は1993年1月、ガス湧出量観測開始以来、1度も観測されたことがなかった。

このようなガス湧出量の激減が他の期間に起こっていないことを確かめるために、以下のようなデータ処理を行った。その方法は次式で示される。

$$R_i = y_i / \bar{y}_i \quad (1)$$

y_i は先ほど示したガス湧出量の1時間毎の平均値、 $\bar{y}_i$ は y_i より前の1日間のガス湧出量の平均値である。 $\bar{y}_i$ はガス湧出量の長期的な変動を反映するので [伊藤・他 (1994)], R_i は y_i がその時刻に期待される値の何倍になっているかを示している。Fig. 3 にガス湧出量の全観測期間における R_i の変動を示すが、兵庫県南部地震の直前では $R_i \approx 0.5$ と極めて低い値となっていることがわかる。この値は、1-6 σ を下回るもので、このようなガス湧出量の低下がみられたのは、過去2年の観測期間を通じて、この時に限られる。図でデータが欠けているところは、観測装置の汚れのために信頼できる観測値が得られなかった期間 [伊藤・他 (1994)], および観測装置のシステムダウンである。

Fig. 4 からわかるように、地震に際して He/Ar, N₂/Ar, CH₄/Ar 比はいずれも上昇している。しかしこれらの比の上昇が始まる時期は同じではない。CH₄/Ar 比は明瞭に地震発生と同時に上昇を始めているのに対して、

He/Ar, N₂/Ar 比は地震発生時に急増したのではなく、むしろ N₂/Ar 比は地震発生前の、1月15日頃から上昇に転じていると見ることができる。He/Ar 比も、N₂/Ar 比と同様に、地震発生前の1~2日前から増加が始まっているように見える。ただし、He/Ar 比の地震発生時の変化量は測定誤差によるバラツキに比べて必ずしも大きいとはいえず、その挙動は N₂/Ar 比の変化より不明確である。また、N₂/Ar 比の変化も、Fig. 5 を見ると、地震前の変化量は普段の変動に比べて大きいとはいえず、今回は preseismic 変化の可能性を報告するにとどめておく。

Figs. 4 と 6 からわかるように、地震発生前の約1カ月半の間 He/Ar, N₂/Ar, CH₄/Ar 比は全て減少を示している。長野県西部地震においても He/Ar, N₂/Ar, CH₄/Ar 比はいずれも地震発生前の約1.5カ月前に極小値を示し、その後上昇を始め、上昇中に地震が発生した [SUGISAKI and SUGIURA (1985, 1986)]. 両方の地震に際してのガスの挙動は、変化期間を除けば、互いによく似ている。

3.2 coseismic および postseismic 変化

Fig. 4 に示すように He/Ar, N₂/Ar と CH₄/Ar 比はいずれも地震前は徐々に減少し、地震後に以前よりも高い値になっている。地震後の変化は、初め急激に上昇し、徐々に緩やかな上昇になっている。この上昇傾向は

Fig. 5. Fluctuations of gas ratios and gas flow rate before and after the earthquake. Data points represent average values for one hour. A solid arrow indicates the occurrence time of the earthquake.

2月初旬にはほとんど収まり、以後は7月の時点まで特に上昇または低下する傾向はない (Fig. 6). また、地震後の各組成比の値は、いずれもここ数年間で最も高いものであり、異常なものであるといえる。ただし、Fig. 6 中に破線で示したような、1994 年の変化から予想される、緩やかなバックグラウンドレベルの経年上昇を仮定すると、 N_2/Ar 、 CH_4/Ar 比は1995年5~6月にバックグラウンドレベルに復帰しているとも考えられ、各組成比が高い値で安定しているのが直接地震の影響によるものか、あるいは他に原因があるのかは判断できない。いずれにせよ、地震後半年経過した時点で、 He/Ar 、 N_2/Ar 、 CH_4/Ar 比が従来の観測値に比べて、一様に高い状態にあること自体は異常であると考えられ、今後の観測データの変動に注意したい。

なお、観測値のばらつきが CH_4/Ar 比で特に小さく見えるのは、地震による CH_4 の変化が他のガスよりも大きいこと以外に、白狐温泉ガス中の CH_4 濃度が約 13% と高いことと、 O_2 をキャリアーに使用したとき、ガスクロマトグラフの TCD (熱伝導度検出器) の感度が比較的よいためにクロマトグラムの面積を計算するときの誤差が小さいためであろう。

一方、ガス湧出量も Fig. 2 に示すように、地震発生後に増加している。しかし、ガス湧出量は長周期の季節変動が大きい [伊藤・他 (1994)]、地震の影響のみによるガス湧出量の増加がいつまで持続しているのかは

明確には判断できない。しかし、数日以内に元のレベルである約 25 ml/min まで戻っていないのは確かである。

地震発生以降に見られた温泉ガスの組成変化は、各比の上昇が完了するまでには時間を要するものの、上昇開始はほぼ地震発生時刻と一致する。また、地震前から上昇傾向が見られるものの、その変化は地震後のものと比べるとかなり小さい。したがって、ここでは地震後の上昇は coseismic 変化と考えることとする。

以前に報告している温泉ガスの coseismic 変化は、その質的量的変化の継続時間が数分から数時間である [伊藤・他 (1994), NAGAMINE and SUGISAKI (1991), NAGAMINE (1994)]。地震後の変化が少なくとも数カ月間という長期間継続するということが確認されたのは湧出量・組成ともに今回が初めてである。これは観測点の改良以後に起こった地震の中では、観測点から非常に遠いものを除けば、兵庫県南部地震が異常に大きかったためであろう。

今回と同様の变化、あるいはその兆候が過去になかったかを調べるため、Fig. 6 の中に、昨年発生した地震のうち、比較的大きな被害地震であった、(A) 北海道東方沖地震 (10月4日、 $M=8.1$ 、震央距離 1260 km) と、(B) 三陸はるか沖地震 (12月28日、 $M=7.5$ 、800 km)、さらに、名古屋での震度が兵庫県南部地震と同じ III であった地震、すなわち、(C) 5月28日の滋賀県

Fig. 6. Fluctuations of gas ratios at Byakko in the period of January 1994 to July 1995. Data points of gas ratios represent average values for one day. Vertical arrows and broken lines indicate the occurrence times of earthquakes: (A) and (B) are the 1994 Hokkaido-toho-oki earthquake ($M=8.1$, $\Delta=1260$ km) and the 1994 far off Sanriku earthquake ($M=7.5$, $\Delta=800$ km), respectively. Two earthquakes of (C) and (D) were recorded with the seismic intensity of III at Nagoya. (C) occurred in a NW part of Shiga prefecture ($M=5.3$, $\Delta=92$ km). (D) occurred in a central part of Ise Bay ($M=4.6$, $\Delta=84$ km). Thick broken lines show possible secular trends of N_2/Ar and CH_4/Ar .

北西部を震源とする地震 ($M=5.2$, 92 km), および (D) 12月23日の伊勢湾を震源とする地震 ($M=4.6$, 84 km) の発生時刻を Fig. 6 に垂直の破線で示す。いずれも、地震後には兵庫県南部地震の際に見られたような変化は見られない。

Fig. 6 では、兵庫県南部地震のとき以外にも、より小さな CH_4 の急増がみられるが、少なくとも有感地震の発生時刻と対応するものはなく、現在のところそれらの変動の原因は不明である。

§ 4. 考 察

4.1 preseismic なガス湧出量変化について

ガス湧出量の変動は、ガス水比と温泉水の湧水量の変化に分けて考えることができる。ガス水比とは、遊離したガスとそれを供給した水の体積の比である。

温泉ガス湧出量の preseismic 変化は極めて急激的であるが、これに対応する温泉ガス組成変化は認められない (Fig. 5)。温泉ガスの組成が変化していない以上、ガスの質的な変化は考えられず、ガス水比に大きな変化があった可能性は小さい。従って、preseismic にガス湧出量の急激な減少が観測されたとき、実際には温泉水の湧水量が急減していたものと判断できる。湧水量ならば

ガスの組成とは独立に変化し得る。湧水量の測定を行っていればこの点を明確にすることが出来るのであるが、泉源が池になっていることや、不規則な温泉水の汲み上げが行われているため、湧水量の測定は極めて困難であり、行っていない [NAGAMINE (1994)]。

大きな地震の際に先行して地下水に変化が現われるという事例はしばしば報告されている [宮部 (1933), 力武 (1989)]。ガス湧出量にみられた前兆変化も、これら従来から知られている地下水の変化に類するものであると考えられる。

今回のように白狐温泉の湧水量が数時間にわたって約半分になったとしても、泉源の水位などに人間が見て気づくほどの変化があったとは思われない。マグニチュード 8 クラスの濃尾地震の際には各地の地下水に前兆変化があったことが報告されているが [力武 (1989)]、他のもっと小さなマグニチュード 7 クラスの地震でも人間が気づかず、記録として残っていないだけで、実際には変化が起こっていた可能性が大きい。

前兆としての地下水の挙動は、地殻歪変化を反映していると考えられる。地震直前に震源域に応力が集中する際、その周辺地域においても広域的な地殻歪変化のために、地下水を含んだ空隙が変形し、地下水圧が変化した

Fig. 7. CH_4 - N_2 -He compositions of mineral spring gases from Byakko spa in the period of 1994 to 1995. The broken line indicates simple mixing of the atmospheric air component and the subsurface gas component at the time of the earthquake.

り、あるいは透水特性が変化する可能性が考えられる。この地下水を含んだ空隙は様々な形状をしているが、温泉水の通路となりうるものは主に断層系であると考えられる。白狐観測点の場合は屏風山断層系がそれに相当するものであろう。それは、地殻中の弱い部分であるために、地殻応力が変化した際、歪変化が集中し、震源から遠いにもかかわらず白狐観測点で変化があらわれたと考えられる。

4.2 主に coseismic な組成変化について

地震に関連して地下流体の挙動に変化があらわれる原因として、地震前後の地殻歪変化と地震動が考えられる。地震動も広義には地殻歪変化ではあるが、ここでは静的な地殻歪変化を地殻歪変化、動的なものを地震動とよぶこととする。地震の前から現われる変化の原因は地殻歪変化であると特定できる。それに対して、地震と同時に又は地震後に現われる変化の原因は、地殻歪変化と地震動の2つの可能性がある。

均質媒体では、震源における dislocation による静的歪は距離の -3 乗、地震波のエネルギーは距離の $-1 \sim -2$ 乗に比例して減衰することを考えれば、今回のように 200 km を越える十分に遠方の地震では地震動による変化の方が静的地殻歪変化による変化に比べて卓越したものになるであろう。しかしながら、実際の地殻は不均質であり、地殻歪変化は、断層系で集中して大きくあらわれることが期待される。これは、前兆変化が白狐

観測点で見られたことから考えても妥当であろう。したがって、少なくとも現時点では地震発生より後にあらわれた温泉ガス変化の根本的な原因を特定することは容易ではなく、特定することはできない。そこで、今回は coseismic 変化そのものについて本質的には何が変わったのかを詳しく見ることにする。

湧出する温泉ガスの起源は大気起源と地下起源の2つに分けて考えることができる。これら2種類の起源のガスは温泉で湧出する以前に水に溶けた状態で地下で混合している。Ar は大気起源、He と CH_4 は地下起源、 N_2 は両方に起源をもつ [川辺 (1991), SUGISAKI (1978), 杉崎・志知 (1978)]。今回の観測が示すところによると、地震後に、大気起源と考えられる Ar の濃度が、全てないしは一部地下起源の He, CH_4 , N_2 の3成分濃度に対して相対的に下がっている。このことから、地震後は、大気起源ガスの割合が相対的に低下しているということができる。

NAGAMINE (1994) は白狐温泉ガスの地下起源の成分のうち、He はウランやトリウム の α 壊変に、 CH_4 と N_2 は深部の堆積岩中の有機物の熱分解ガスに、それぞれ起源を持つことを指摘している。Fig. 6 を見ても明らかのように、地下に起源を持つ成分のうち、He の長期変動パターンは N_2 や CH_4 のそれとは異なったものとなっている。このことは、地下で加わるガス組成が必ずしも一定ではないことを示している。

Arを除く3成分の関係をFig. 7に示す。プロットした観測値は、観測期間の違いに対応させて異なる記号で識別できるようにしてある。coseismicに大気起源と地下起源のガスの混合比のみが変わっただけならば、地震後のガスは大気 ($N_2=78\%$, $He=CH_4=10^{-4}\%$) 組成を示す N_2 に極めて近い点と地震発生時のガス組成を示す点を結ぶ直線上を変化するはずである。そしてこの直線の延長上にその時の真の地下起源ガスの組成があることになる。しかし、現実の地震後のガスデータは、この直線から大きく外れた位置にプロットされる。このことは、白狐温泉中に加わっている地下起源のガスの組成が、地震の前後で変化したことを意味する。すなわち、地下起源ガスの組成にかなり大きな coseismic な変化が起こったことが分かる。さらに、Fig. 7 において地震の前年1年間と地震後では全く異なった範囲にガス組成データが分布し、地震による変化が季節変動・経年変化に比べても十分大きかったことが分かる。そして地震後のガス組成の変化では CH_4 の相対的増加が特徴的であり、一方、地震発生前では He の微増が特徴的である。

地震後の温泉ガスの He/Ar , N_2/Ar , CH_4/Ar 比は、いずれも、ここ数年間で最も高くなったが、過去にそれぞれがほぼ同じような高い値を示したことがある。その時期は長野県西部地震が発生した約半年前にあたる。SUGISAKI and SUGIURA (1986) によれば、1982年から、3つの比は小さな変動を伴いながら1984年4月まで徐々に増加し、その後急減して、再び上昇に転じたとき長野県西部地震が発生しているが、このときの各成分比の地震前の最大値と、今回の地震後の値がほぼ一致する。一般に地震前の地殻歪変化は地震時およびその後の歪変化と比べると遙かに小さい。しかし長野県西部地震は震源が白狐観測点から近いこともあり(震央距離50 km)、このとき生じた一時的な地下の地震前の状態変化が、今回の地震後の状態と似ていたのかもしれない。一方、このように3成分のArに対する比の値が同時に高くなるのは長野県西部地震の場合のように地震の前兆である可能性もあり、今後の変化に注目する必要がある。

§ 5. 結 論

兵庫県南部地震の際に、岐阜県瑞浪市の白狐温泉では震源から約220 kmも離れているにも関わらず、顕著な温泉ガス湧出量の pre-seismic 変化とガス組成の pre-seismic および coseismic 変化を観測した。

ガス湧出量にあらわれた直前変化は、地震発生の3時間前にガス湧出量が、一時的に、それまでの約半分に

なるというものである。これは、地殻歪変化による湧水量の変化を反映していると考えられる。

組成にあらわれた変化は、地震後に He/Ar , N_2/Ar , CH_4/Ar 比が地震前に比べて高い値に変化するというものである。 CH_4/Ar 比は地震発生と同時に増加したが、 N_2/Ar , He/Ar 比の増加は地震発生の1~2日前から既に始まっている。これは、地震発生直前からその発生後にかけて、地下でのガスの混合の状態に変化が起こり、温泉ガスの中の大気起源のガスの割合が減ったことを意味する。また、地下起源のガスである He , CH_4 , N_2 の相対量にも、地震直前から地震後にかけての変化があらわれている。地震直前では He の微増が見られ、地震直後では CH_4 の急増が特徴的である。

1984年の長野県西部地震の際にも、この白狐温泉のガス組成には顕著な前兆変化が認められている。今回の兵庫県南部地震に対して得られた結果をあわせて考えると、地下流体の挙動の精密な連続観測が、地震予知に対して有効な手段であることがあらためて結論される。

謝 辞

本研究を行うにあたり、地震の資料等を供与していただいた名古屋大学理学部地震火山観測地域センターの方々に謝意を表す。温泉ガス観測結果の解析・図化などのデータ処理には主に名古屋大学大型計算機センターを利用した。

文 献

- IGARASHI, G., S. SAEKI, N. TAKAHATA, K. SUMIKAWA, S. TASAKA, Y. SASAKI, M. TAKAHASHI and Y. SANO, 1995, Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, **269**, 60-61.
- 伊藤貴盛・杉崎隆一・永峰康一郎, 1994, 地震に伴う温泉ガスの挙動—温泉ガス湧出量自動連続観測装置の開発—, *地震* **2**, 47, 241-251.
- 川辺岩夫, 1991, 地震に伴う地下水・地球化学現象, *地震* **2**, 44 特集号, 341-364.
- 京都大学大学院理学研究科・東京大学地震研究所, 1995, 六甲高雄観測室における観測結果, *地震予知連絡会会報*, **54**, 695-707.
- 宮部直巳, 1933, 地震に伴う地下水の異状に就て, *地震* **1**, 5, 627-664.
- 永峰康一郎, 1990, 地震地球化学観測のためのパーソナルコンピューターを用いた温泉ガス自動観測システムの開発, *地球化学*, **24**, 85-94.
- NAGAMINE, K., 1994, Origin and coseismic behavior of mineral spring gas at Byakko, Japan, studied by automated gas chromatographic analyses, *Chem. Geol.*, **114**, 3-17.
- 永峰康一郎・榊原淳一・杉崎隆一, 1989, MNP モデムとパーソナルコンピューターを用いた地震地球化学観

- 測テレメーターシステムの開発, 地震 2, **42**, 211-217.
- NAGAMINE, K. and R. SUGISAKI, 1991, Coseismic changes of subsurface gas compositions disclosed by an improved seismo-geochemical system, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 2221-2224.
- 名古屋大学理学部, 1983, 愛知県鳳来町および岐阜県瑞浪市における断層ガスの連続観測, 地震予知連絡会会報, **29**, 256-259.
- 力武常次, 1989, 濃尾地震の前兆現象, 地震 2, **42**, 451-466.
- SUGISAKI, R., 1978, Changing He/Ar and N₂/Ar ratios of fault air may be earthquake precursors, *Nature*, **275**, 209-211.
- 杉崎隆一・志知龍一, 1978, 地震の前兆現象としての断層ガス中の He/Ar, N₂/Ar 比の変動, 地震 2, **31**, 195-206.
- SUGISAKI, R. and T. SUGIURA, 1985, Geochemical indicator of tectonic stress resulting in an earthquake in central Japan, *Science*, **229**, 1261-1262.
- SUGISAKI, R. and T. SUGIURA, 1986, Gas anomalies at three mineral springs and a fumarole before an inland earthquake, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **91**, 12296-12034.
- TSUNOGAI, U. and H. WAKITA, 1995, Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan, *Science*, **269**, 61-63.