



# 地球化学的地震予知 研究について

小 泉 尚 嗣\*

## Review of Geochemical Research for Earthquake Prediction

Naoji KOIZUMI \*

### Abstract

Geochemical research for earthquake prediction is reviewed in this paper. In Japan, the term 'geochemical research for earthquake prediction' incorporates also hydrological and/or geohydrological researches for the same purpose. Brief introduction is made of the dilatancy-diffusion model on which earthquake-predictive geochemical research was largely based in the 1970's. Theoretical aspects of groundwater response to crustal strain changes in a water-saturated, porous and elastic medium are also discussed, because it seems to supplant the dilatancy-diffusion model as the theoretical basis for the earthquake-predictive geochemical research. Several studies on groundwater level, temperature, quality, and on the concentrations of Rn, He and H<sub>2</sub> in groundwater and subsurface gas are also briefly introduced. Some problems in this research are pointed out together with suggestions for future studies.

キーワード：地震予知，地震前兆現象，地下水，地球化学，地下ガス

Key words : earthquake prediction, earthquake precursor, groundwater, geochemistry, subsurface gas

### 1.はじめに

地下水や地下ガス中の特定の化学成分の濃度(比)や同位体比に注目し，その時間変化と地震発

生との関連を調べたり，その空間分布を調べて，プレートテクトニクスや活断層等との関連を調査したりすることが，地球化学的地震予知研究であ

\* 京都大学防災研究所(現在：通商産業省工業技術院地質調査所)  
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (at present: Geological Survey of Japan, Agency of Industrial

Science and Technology, Ministry of International Trade and Industry)

本論文に対する討論は平成9年12月末日まで受け付ける。

る。日本の場合はこれに加えて、地下水の物理量（水位・自噴量・水温）の時間変化と地震との関連を調べる研究も、「地球化学的地震予知研究」に含める事が多い。本論文でもこの考えを踏襲するが、必要に応じて前者を化学的地震予知研究、後者を地下水学的地震予知研究として区別する。

土壌ガスや大気中の Rn 濃度と地震との関連に注目した、地球化学的地震予知研究の先駆的なものは Hatuda (1953), Okabe (1956) らに認められるが、これらは、当時の日本の地震学関係者にあまり評価されなかった(岡部, 1986)。その後、1966年のソ連タシケント地方の地震(M5.5)発生前に、地下水中の Rn 濃度が変化したということで再評価され(Ulmov and Mavashev, 1971), ダイレイタンスー水拡散モデル(Scholz et al., 1973)が理論的裏付けとなって、1973年頃から、東京大学の脇田らを中心に日本でも研究が再開された(脇田, 1984)。さらに、中国での海域地震(1975年2月, M7.3)の予知の成功の際、地球化学的観測が非常に有効であったことが伝えられると、文部省測地学審議会は「第三次地震予知計画の一部見直しについて」(1975年7月)を建議し、地下水に関する研究の推進を訴えるに至った。このようにして地球化学的手法が、特に短期的予知に有効な手段になりうるものとして、日本の地震予知研究に本格的に取り入れられる事となったのである。

## 2. 地球化学的地震予知研究の理論的背景

地下水は圧力・熱を伝えるとともに種々の物質を運搬する。したがって、地球化学的地震予知研究にとって、地下水の挙動と地震との関係を明らかにすることが大切である。以下、地下水の挙動と地震発生を結びつけるモデルとしてダイレイタンスー水拡散モデルと水で飽和した多孔質媒体の弾性変形モデルを紹介する。

### 2.1 ダイレイタンスー水拡散モデル

種々の地震前兆現象を地震発生過程と関連づけて統一的に説明する理論として一躍脚光を浴び、

上述のように、地球化学的地震予知研究の理論的基礎ともなったダイレイタンスー水拡散モデル(Nur, 1972; Scholz et al., 1973)について簡単に説明する。

ダイレイタンスーとは岩石破壊前に生ずる体積膨張のことで、Nur (1972)や Scholz et al. (1973)はこの現象を地下水の移動に結び付けて、以下のような地震発生モデルを提唱した。地震発生が間近な領域では、応力の増大によって、微小破壊が進行し、岩石中に空隙が生じ体積が膨張する。このことによって、岩石中の空隙内の圧力(空隙圧)が低下する(岩石の破壊強度が増加する)。その後、周辺域から地下水が流入し、微小破壊域の岩石空隙は水の飽和状態に近づく。これは逆に空隙圧の上昇を生じるため、応力が増大中に岩石の破壊強度を低下させるので地震の発生にいたる。以上が、ダイレイタンスー水拡散モデルの概要である。Scholz et al. (1973)は、このような考えに基づいて、地震波の縦波と横波の速度比( $V_p/V_s$ )・地殻変動・地電流・大地比抵抗・微小地震活動度・地下水等の地震前の挙動について統一的に解釈した。ここでは、地下水の挙動は地震発生に直接関与する形になっており、従来、他の地球物理学的観測量に比べて、地震との結びつきに関する理論的根拠が薄弱であった地球化学的地震予知研究の有効性を示すこととなった。

しかし、このモデルはやがて疑問視されるようになり(例えば、茂木, 1982)、現時点でこのモデルを支持する人は少ない。ダイレイタンスーが生ずるにしても、震源近傍のごく限られた領域であり、Scholz et al. (1973)の考えたような、地表近くにまで影響を及ぼす大規模な地下水流は生じないと考えられている。この結果、地球化学的地震予知研究は有力な理論的根拠を失うこととなり、次に述べるような、地殻の歪と地下水との関係が改めて注目されるようになった。

### 2.2 地殻歪変化に対する地下水の応答

一水で飽和した多孔質媒体の弾性変形モデル  
地震にともなう地下水の異常が、地殻歪の変化によって生じているのではないかという考え方が

ある。実際、地球潮汐にともなう微小な地殻歪の変化（体積歪にして $10^{-7}$ ～ $10^{-8}$ の大きさの変化（Melchior, 1983））に対応して、被圧地下水の水位や自噴量が変化することは古くから知られている。Roeloffs (1988) がまとめた、地球潮汐のM2分潮（周期12.4時間）に対応する地下水位変化の振幅は0.4～8cmとなっていて、これは容易に測定できる量である。このような地殻の体積歪変化に対する地下水の応答のモデルとして、もっとも一般的なのが多孔質媒体の弾性変形モデルである。なお本節では、主に地下水位変化に絞って話をすすめることにする。

このモデルは、被圧帯水層（不透水層で挟まれた帯水層）が水で飽和した弾性的な多孔質媒体であるとして考え、それが歪んだときの水圧の変化を観測井における水位の変化としてとらえるものである。一般に鉛直方向に有限の厚みを持ち、水平方向に無限に広がる均質で等方な多孔質媒体を考える（図1）。これは、いわゆる水平成層構造における地下水帯水層をイメージさせるが、岩盤中に発達した割れ目系に存在する地下水に対しても、その割れ目系の傾斜がそれほど大きくなく、個々の割れ目の向きがランダムであるならば、このモデルは適用できる。割れ目の向きが全体として一つの方向性を持つときは、割れ目の面に垂直な応力の寄与が大きくなる（Bower, 1983；川辺, 1991）。

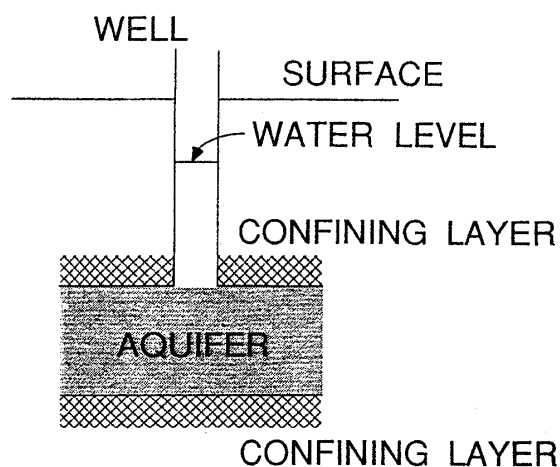


図1 被圧帯水層のモデルと観測井

Bredehoeft (1967) は、このモデルに基づき、非排水条件（考えている系からの水の出入りが無いものとする条件）を仮定して、地球潮汐による体積歪変化（ $\Delta\varepsilon$ ）によって生ずる地下水位の変化（ $\Delta h$ ）を、以下のような簡単な式で表わした。

$$\Delta h = -\Delta\varepsilon/S_s \quad (1)$$

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \quad (2)$$

$\rho$ は地下水の密度、 $\alpha$ は帯水層の圧縮率、 $n$ は帯水層の空隙率、 $\beta$ は地下水の圧縮率であり、 $S_s$ は比貯留量とよばれる定数である。(1)式で符号が負になるのは、体積が縮んだときに、水位が上昇することを意味する。この解では、地下水の移動の効果を考慮していないので、歪の変化と水位の変化に時間差（位相差）は生じないし、後に述べるような周波数依存性もない。(1)式は、井戸水位の潮汐変化の振幅の従来の観測値（数mm～数cm）をよく説明し、広く受け入れられるところとなった。ただし、この(1)式については、Narasimhan et al. (1984) から疑問も寄せられている。

他方、不圧地下水の場合の水位変化（ $\Delta b$ ）は（Bredehoeft, 1967）,

$$\Delta b = -(\Delta\varepsilon/n)b \quad (3)$$

となる。ここで、 $b$ は不圧帯水層の厚みで $n$ は

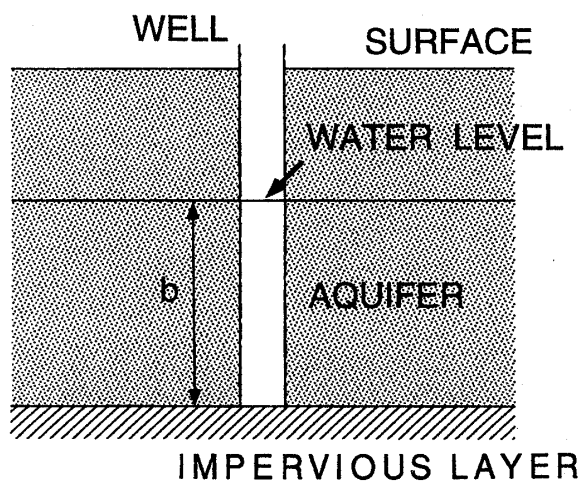


図2 不圧帯水層のモデルと観測井

その空隙率である(図2)。 $b$ を100 m,  $n$ を0.1,  $\Delta\epsilon$ を $10^{-7}$ としても水位変化の振幅は, 0.01 (cm) であって, 体積歪変化が不圧地下水の水位変化として検出されるのはかなりむずかしいことがわかる。

さて, 不透水層といえども水をまったく通さないというわけではないし, 非排水性を仮定しているといっても, 水が実際に移動しなければ観測井の水位を変化させることはできない。「不透水性」や「非排水性」の程度は, 観測井の口径・不透水層や帯水層の厚みといった幾何学的条件や, 不透水層や帯水層を形成する物質の物性(空隙率や透水係数等)に依存することに加え, 対象とする水位変化のタイムスケールによっても相対的に左右される。したがって1980年代以降は, 地殻歪変化に起因する地下水位変化の周波数依存性が問題にされるようになってきた(Rojstaczer, 1988a, b; Koizumi, 1993; 小泉, 1994)。

このように, 被圧地下水は地殻の体積歪変化に対して敏感に反応する。また, クラックの生成等で帯水層等の物性が変われば, 地下水の運動状況が変化し, 体積歪変化に対する応答のパターンそのものが変わりうることも理解できる。もちろん, 帯水層の傾きが無視できない場合や, 体積歪変化の周期が短くなって, 通常は無視している地下水流速の加速度が無視できなくなる場合には, また別の解析が必要になる(例えば, Cooper et al. 1965)。多孔質媒体の弾性変形モデルに関する種々の方程式はRice and Cleary (1976)に詳しい。

### 3. 地下水学的地震予知研究の成果

前の章では, 地震前に地殻歪変化やクラックの生成があると, 地下水の動きに影響を与え得ることを示した。地下水の動きが影響を受けると, それに伴って, 地下水温にも変化が生じるだろう。以下に地下水位(自噴量)と水温の分野について, 主に日本における研究成果を紹介する。

#### 3.1 地下水位(自噴量)

地下水位や自噴量は, 地下水に関する観測項目の中で, 地殻歪や応力の変化に伴う地下水圧(空

隙圧)変化に最も直接的に対応する観測量である。ただし, 自噴量の精度良い観測は一般にむずかしく, 地下水位に関する研究が圧倒的に多い。日本では, 東京大学や地質調査所による研究(Wakita, 1984; 高橋, 1993)に加えて, 神奈川県温泉地学研究所を中心とし, 民間の人々が協力・参加している「なまずの会」によるものもある(例えば, Oki and Hiraga, 1988; 板寺・他, 1995)。ここでは, 地震前後の井戸水位(自噴量)変化の分布と地震のメカニズムとの関連の問題と, 地球潮汐のような長期間の変動と地震のような短期間の変動に対する地下水位のレスポンスの違いについて述べよう。

地震前後の多数の井戸の水位や自噴量の変化を調べると, その増減の符号の空間分布が地震のメカニズムから予想される(地震後の)体積歪変化の分布に類似した変化を示すことがある。Wakita (1975)は, 1974年伊豆半島沖地震(M6.9)によるコサイスマミックな井戸水位変化(の増減を示す)符号の分布とこの地震の横ずれ断層型のメカニズムが対応すると報告しているし, 川辺(1991)は, 1923年関東大地震(M7.9)や1946年南海地震(M8.0)の際の井戸水位や温泉自噴量変化の符号の分布も, 地震のメカニズムに基づく体積歪変化の分布で説明できるとしている(図3)。さらに川

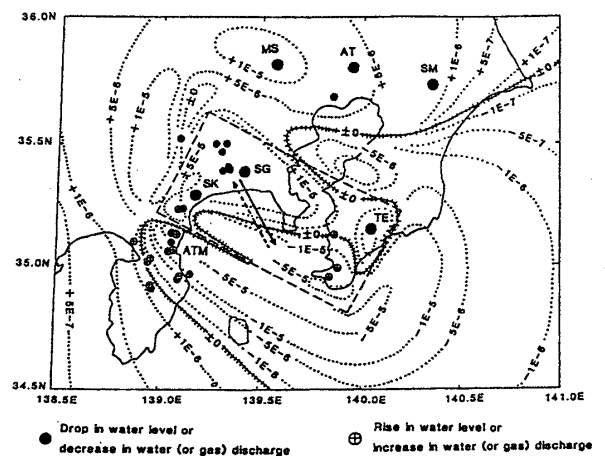


図3 1923年関東地震時, および, 地震後の地下水異常の分布と地震断層モデルから計算される面積歪変化(負の値は縮みを, 正の値は伸びを示す)。体積歪変化は面積歪変化に比例すると考えて良い(川辺(1991)より)。

辺 (1991) は、上述の2つの地震前の井戸水位・温泉自噴量変化の符号の分布が、地震後のそれにほぼ一致することから、地震前に（将来の地震断層面で）地震発生時と同方向の相当量の前駆滑りがあったのではないかと推定している。地震前に地震後のメカニズムに対応するかのような井戸水位変化の符号の分布は、中国の横ずれ断層型の内陸地震でも報告されている（馮，1982）。

これらは、非常に興味深い結果ではあるが、2つの問題点を含んでいる。1つは測定している地下水が被圧地下水であるかどうかの吟味が必ずしも十分でないという点である。もう1つは、水位のモニターが厳格に行われている最近の被圧地下水の観測井で、地震時の地下水や自噴量変化が何度も報告されているところでは、その符号が、地震のメカニズムによらず一定である例が圧倒的に多いという事実である（例えば、吉川・永井，1990; Matsumoto, 1992）（図4）。つまり、地震時の水位変化の符号は、観測井付近の構造等によって強く条件づけられており、地震のメカニズムの寄与はごく小さいようである（Kümpel, 1992）。

同様のことが、断層破碎帯における地震時の歪ステップについても報告されている（Watanabe, 1991）。実際、兵庫県南部地震（1995年1月17日，M7.2）に伴った多数の地下水異常の空間的なパターンは地震のメカニズムから推定される体積歪変化では説明できないことがわかっている（King et al., 1995; 遠田・他，1995; Koizumi et al., 1996）

水位の潮汐変化と体積歪の潮汐変化を比較して、水位-体積歪換算係数を出し、地震時の水位変化を体積歪に換算した上で、地震のメカニズムから推定される体積歪の値とほぼ一致するのを見いだした研究がある（Igarashi and Wakita, 1991）。しかし同じ論文で、地震時の理論体積歪から推定される水位変化と大きく食い違う例も報告されている。地球潮汐のような長期にわたる周期的な現象に対しては、体積歪変化に比例した水位（自噴量変化）を示すような井戸でも、地震のような短期間の過渡的な現象には異なった反応を示すというのが一般的であると考えてよい。このことを、長波長の波動に対しては、観測井付近の局所的な

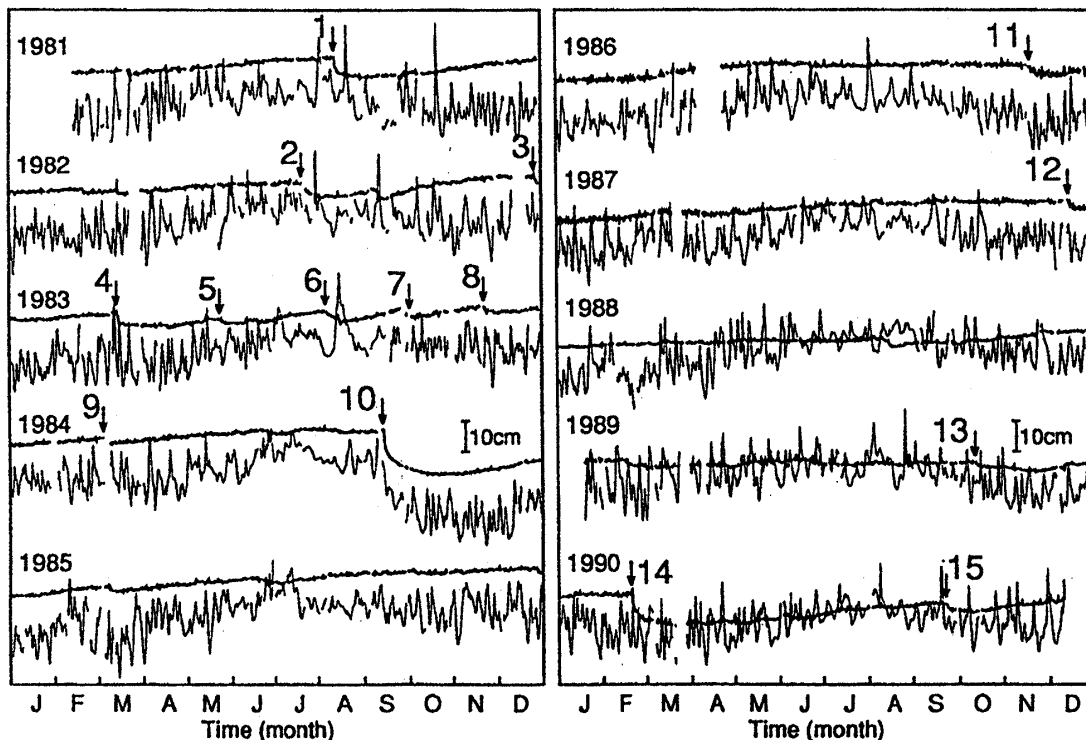


図4 1981年2月～1990年12月の静岡県榛原観測井における水位変化（太線：補正水位，細線：元の水位）。数字のついた矢印は地震発生を示す（Matsumoto(1992)より）。

構造は影響を与えなくても、短波長の波動には影響を与えると理解することもできる。

以上からわかるように地震に伴う地下水位の振る舞いは複雑である。また、過去に、不圧地下水の多数の井戸で地震の前兆現象が報告されている点も無視できない。地盤の不均質性・地震に伴うクラック生成・地下水の移動の効果を考慮した、新たな理論の形成が求められている。

### 3.2 水温

地震に関連して地下水（特に温泉）の水温が変化する例が、昔から多数報告されている。脇田（1978）によって紹介されているものの中には、数°Cから場合によっては、10°Cを超える変化が記録されている例がある。このような地震に関連した地下水温観測・研究に画期的な進展を与えたのは、Shimamura（1980）や Nakamura and Wakita（1984/85）による、水晶振動子の発振周波数が温度によって変化することを利用した精密水温計（精度0.001°C）の開発であった。この精密水温計は長期に安定に駆動し、低消費電力で、ダイナミックレンジも広いという特徴を持っている。このような特徴を持つ水温計は国内外の多くの観測点に置かれるようになり（島村 1986）、いくつかの地震の前兆的水温変化や地震発生時の変化が報告されている（Shimamura et al. 1984/85）。

この水温計の開発によって、地下深部の歪を水温によって間接的ではあるが観測できることが明らかになった。例えば、Furuya and Shimamura（1988）は、東海地方の11の観測井に上述の精密水温計を設置し、体積歪計との比較を行った結果、多くの井戸で、地球潮汐による体積歪変化が原因と思われる水温の潮汐変化を検出した。さらに、体積歪変化との比較から、その潮汐変化の振幅比が  $1.1 \times 10^5 \sim 6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ C/strain}$  になることを見いだした。一方、体積弾性率や熱膨張率・比熱等の物質定数から、岩石の断熱膨張・圧縮に起因するものは  $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ C/strain}$  程度、水の断熱膨張・圧縮に起因するものは  $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ C/strain}$  程度と見積もることができる。上述の結果

から、水温の潮汐変化は岩石や水の断熱膨張・圧縮で説明できるものもあるが、水の移動による熱輸送の効果を考えなくては説明できない大きな変化をするものもあると Furuya and Shimamura（1988）は述べたのである。

小泉・他（1995）や Kitagawa et al.（1996）は、鳥取県の1つの温泉について、気圧変化・潮汐・地震に起因する水温変化の体積歪変化に対する感度（以降単に歪感度と記す）を、地殻が均質・等方な弾性体であるとの仮定の下に個別に求めて比較した。地震による水温変化の歪感度は、気圧変化・潮汐による水温変化の歪感度より1000倍以上も大きくなることから、地震による水温変化と気圧変化・潮汐による水温変化とはメカニズムが異なることが示された。

上述の水晶発振式精密水温計よりやや精度は劣るが高精度サーミスタを用いた精密水温観測（精度  $1/100^\circ \text{C} \sim 1/1000^\circ \text{C}$ ）も多数の研究者によって行われており、興味深い結果が報告されている（例えば、Mogi et al. 1989; 吉川・永井 1990, 小泉 1991, Notsu et al. 1991, Umeda et al 1991）。

地下深部の歪を直接測定できるものとしてボアホール型の歪計があるが、精密水温計は、より低価格で設置もしやすい点が魅力的である。

## 4. 化学的地震予知研究の成果

地表と地下の間には、地下ガスや地下水によって日常的に物質のやりとりがある。供給される物質の種類や濃度は周辺の地質に依存するし、岩石中に割れ目のあるところでは、そのような物質の移動が効率的に行われる（例えば、Hatuda, 1953; Torgersen and O'Donnell, 1991）。したがって、ある種の化学成分濃度の地表および地下表層における分布は周辺のテクトニクスに依存し、その時間変化は、地震発生前後の、応力場・歪場の変化（それに伴う地下水・地下ガスの流れの変化）に左右されるだろう。このような考えに基づき化学的地震予知研究は行われている。注目する化学成分によって、以下に述べるような種々の研究が行われている。

#### 4.1 ラドン (Rn)

ラドンは、化学的地震予知研究に用いられる元素としてはもっともポピュラーなもので、日本・中国・旧ソ連・アメリカ等の多くの国で測定されてきた (Hauksson, 1981; King, 1980, 1985)。ラドンは、(1)放射線ガスなので、放射線の $\alpha$ 線を測定することによって低濃度でも測定ができ、(2)不活性ガスなので濃度変化の理由として物理的な要因のみを考えればよく、(3)上層内のガスの濃度が大気中のそれに比べて数千倍である (Hatuda, 1953)、という特徴をもつからである。ラドンには、 $^{222}\text{Rn}$  (半減期: 約 3.8 日)・ $^{220}\text{Rn}$  (半減期: 約 55 秒)・ $^{219}\text{Rn}$  (半減期: 約 3.9 秒) の 3 つの同位体があるが、存在比や半減期を考慮して、通常は、 $^{220}\text{Rn}$  (トロン) や  $^{219}\text{Rn}$  は無視される。ただし、必ずしも  $^{220}\text{Rn}$  は無視できないという研究報告もある (加藤・他, 1985)。上述したように、Rn の測定は、通常  $\alpha$  線を計測することによって行われるが (Noguchi and Wakita, 1977; 西村, 1979; 山内・下, 1982; 田坂・佐々木, 1992),  $\gamma$  線を測定することによって行われる場合もある (中尾他, 1987; 桂・他, 1989; 下・他, 1990)。特に、田坂・佐々木 (1992) の開発したピンフォトダイオードを用いた測定方法では、従来の方法とは異なり、 $\alpha$  線の波高分析が可能で、核種が同定できるところが特長である。兵庫県南部地震前に震源域付近の西宮市で地下水中の異常な Rn 濃度変化を検出した Igarashi et al. (1995) もこの方式を用いて測定を行っている。

日本においても、多数の観測点で地下水中の Rn 濃度や坑内大気中の Rn 濃度が測定されている (例えば、高橋, 1993; Wakita et al., 1986; 山内・他, 1988)。Rn 濃度に現れた地震の前兆現象として最も信頼性の高いのは、伊豆大島近海地震 (1978 年, M7.0) の際のものであろう (Wakita et al., 1980b)。この水中 Rn 濃度変化は、他の観測点の地下水位変化や体積歪変化とも対応し (図 5)、非常に信頼度の高い前兆現象であった。しかし、その後の 15 年におよぶ観測の中で、これほど顕著な前兆現象は一例も観測されていないと Wakita et al. (1988) 自身が述べている。そのか

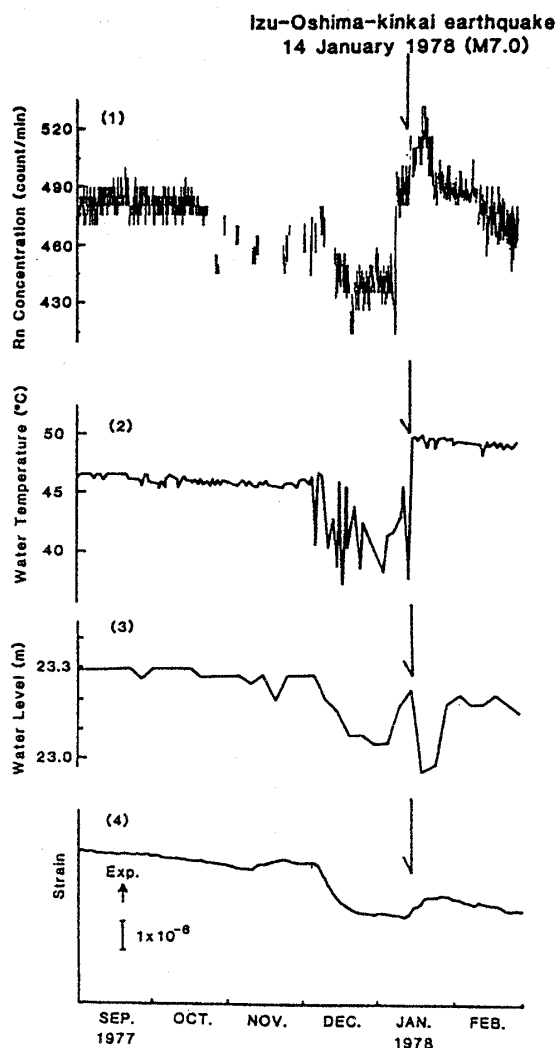


図 5 1978 年伊豆大島近海地震前の前兆的な変化。(1)水中 Rn 濃度変化 (震央距離 25 km), (2) 深さ 500m の井戸の水温度変化 (震央距離 30 km), (3) 深さ 500m の井戸の水位変化 (震央距離 30 km), (4) 伊豆半島先端に設置されたボアホール型の歪計の変化 (震央距離 50 km) (Wakita et al.(1988)より)。

わりにわかってきた事は、平常時の Rn 濃度の変化の仕方や、地震に対する敏感さは、観測点によって大きく異なるということであった (Wakita et al., 1986; 小泉・他, 1991)。後の章でも述べるように、これは他の地球化学的観測量でもいえる事である。

山内・下 (1982), Yamauchi (1992) は、地殻変動観測坑内での大気中の Rn 濃度計と伸縮計のデータを比較して、坑内大気中 Rn 濃度の降雨レスポンスが特定の方向の伸縮データのそれと類似

していることを見いだした(図6)。Yamauchi (1992)は、(1)応力が地殻に作用し、(2)岩盤の特定の方向の割れ目が開き、(3)その割れ目からRn濃度の高い地下ガスが坑道内に流入するというモデルを考えた。また、タンクモデルを用いて降雨に伴う地殻歪レスポンスとRn濃度変化をシミュレートする方法を考案し、降雨に対する地殻歪レスポンスが通常とは異なるときに地震が発生することを発見した。そして、地震前の応力変化で観測点付近の割れ目の開閉が通常と異なれば、ラドン濃度の降雨レスポンスに異常が生じ得ると推測している。また、Yamauchi (1992)では、坑内大気中Rn濃度変化が坑内湧水中のRn濃度変化に先行することを見いだしていることも興味深い(図6)。以上の結果は、地震に伴う地殻変動異常の結果として、(地下浅部起源の)化学成分の濃度が変わり得ることを、観測事実と解析によって示す貴重なものである。

山内の結果はデータ処理の成果でもある。統計的な手法を用いて、地下水温や気象要素等の影響を取り除いて、地震にともなう地下水中のRn濃

度変化を検出した例に、Igarashi and Wakita (1990)やWakita et al. (1991)の研究が挙げられる。彼らは、Rn濃度 $Y$ が、全体的な大きな動き(トレンド成分： $T$ )と地下水温や気象要素等による寄与( $X_1, X_2, \dots$ )と不規則変動成分( $I$ )との和からなると考えて、

$$Y = T + (X_1 + X_2 + \dots) + I$$

とし、ベイズ手法を用いた多変量回帰のプログラムBAYTAP-G(石黒・他, 1984)を用いて、( $X_1 + X_2 + \dots$ )や $I$ を除去した。図7は、Igarashi and Wakita (1990)が、福島県の鹿島観測井の水中Rn濃度から地下水温の影響と不規則変動成分を取り除いたものである。鹿島観測井から100 km離れたところで、マグニチュード( $M$ )が6.4の地震が矢印の所で発生し、その後、Rn濃度(トレンド成分)が減少したことが明瞭に示されている。Igarashi and Wakita (1990)は、1984年～1988年の間に、このような地震後のRn濃度変化を12例見だし、鹿島観測井が地震に対して敏感な井戸であることを明らかにした。この12例

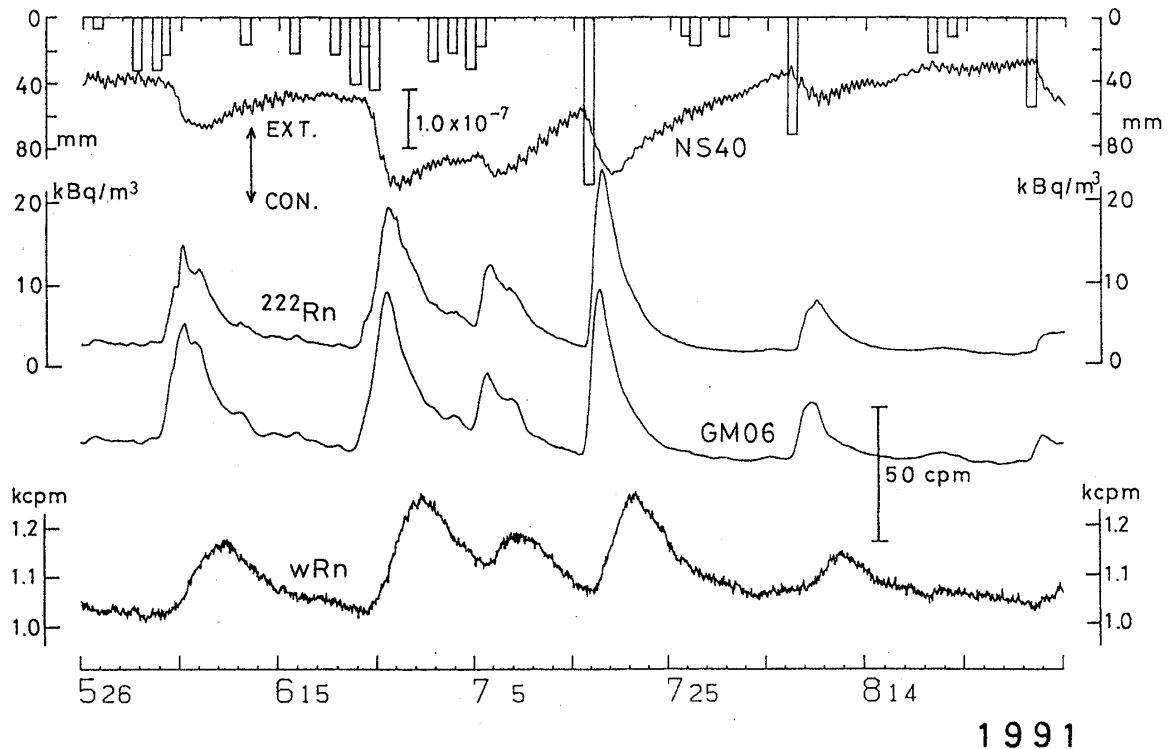


図6 愛知県三河の地殻変動観測坑における観測例。図の上から、降雨・地殻の伸縮(EXT.は伸びをCON.は縮み)・坑内大気中Rn濃度・坑内の $\gamma$ 線強度・坑内湧水中Rn濃度(Yamauchi (1992)より)。



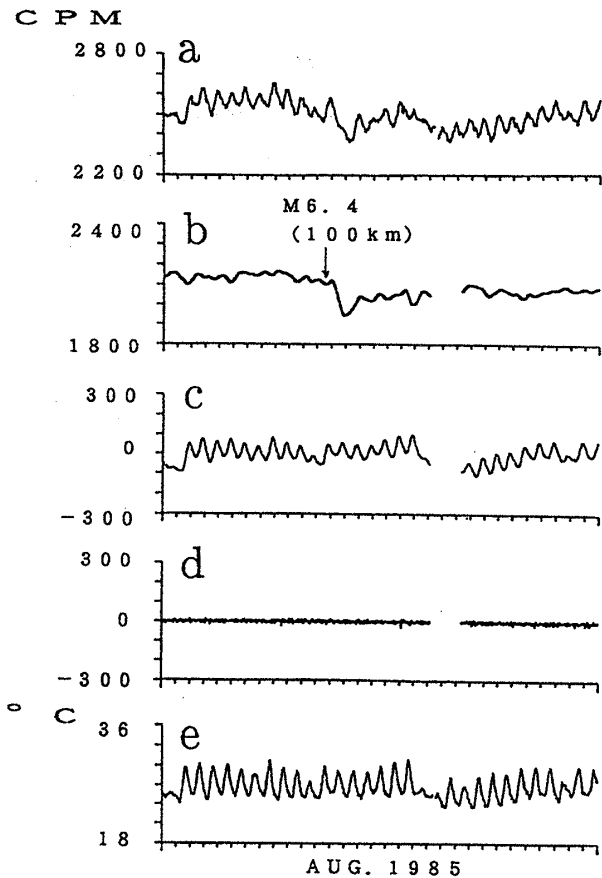


図7 福島県の鹿島観測井における，地震後の水中Rn濃度変化(a~d) (Igarashi et al. (1990)の図を一部変更)。  
a. 元のデータ，b. トレンド，c. 気温の寄与分，  
d. 不規則変化，e. 気温。

の地震後の変化を調べたところ，地震のマグニチュードが大きいほど，地震の発生位置が鹿島観測井に近いほど，振幅が大きくなり，地震とRn濃度変化との関係の深さが明らかになった。さらに，地震前のRn濃度変化も2例見いだされた。このように，ノイズを除去し，地震との因果関係がはっきりしている地震後の変化についての理解を増した上で前兆現象に言及したので，非常に説得力をもつ結果となった。また，Igarashi et al. (1993)はこのような鹿島観測井におけるRn濃度の地震に対する「感度」が長期的には変化するという興味深い事実も報告している。

以上のような地下水・地下ガス中のRn濃度の時間変化を調べて地震発生との関連を調査する研究とは別に，岩盤中に割れ目系の発達したところ

で，地下から地表に効率的にRnが供給されることを利用して，断層調査のために，地表付近のRn濃度や $\gamma$ 線強度の分布を調べる一連の研究もある(例えば，Hatuda, 1954; 貞広・見野, 1980)。

#### 4.2 地下水の水質

地下水水質の観測の重要性を一般に認識させたものに，松代地震(1965~1968年)がある。松代地震は，長期かつ広域的な群発地震(ほとんどが深さ7km以浅の地震)であると同時に，地盤の著しい隆起・伸縮，新たな断層の生成，大量の湧水，地磁気や重力の変化といった多彩な地学現象を伴う地震でもあった(大竹, 1976)(図8)。Kitano et al. (1967)やYoshioka et al. (1970)によって，この湧水が，炭酸ガスに過飽和で， $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Cl}^-$ 濃度の高い( $\text{CaCl}_2$ 型)の水であることがつきとめられた。 $\text{CaCl}_2$ 型の水は通常の地下水では認められず，たとえば，油田塩水のような

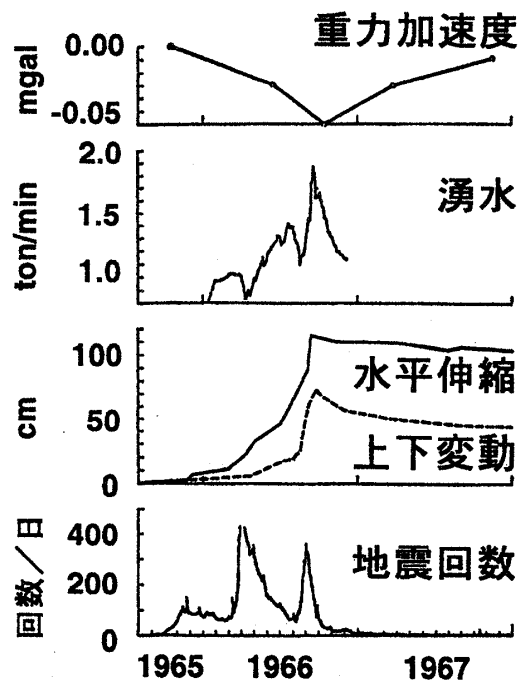


図8 松代地震前後の各種観測量の時間変化。重力加速度は松代一等重力点の値で1965年10月の推定値を基準としている。湧水は松代町一陽館旧源泉における湧出量。水平伸縮は皆神山-可候峠基線の伸び，上下変動は地震研究所特設水準点Cの隆起量を示す(大竹(1976)の図を一部変更)。

長期にわたって堆積物に閉じこめられていた地下水に認められるものである。このことは、地下深部の高圧な地下水が、割れ目に沿って上昇・拡散する過程で岩石の破壊（地震）を引き起こすという松代地震水噴火説（中村，1971）の有力な論拠となった。ただ、図8を見ると、地震回数の3つのピークから、観測井（松代町一陽館旧源泉）の湧水量のピークは1～4カ月遅れている。複数の観測井の水質の時間変化を調べた Yoshioka et al. (1970) の結果でも、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Cl}^-$  濃度がピークに達するのは、井戸によって1966年末から1969年末までばらついた。地球物理学者と地球化学者が協力して1つの地震活動の発生過程に迫ったという点で、松代地震は地震研究上の特筆すべき事件であったが、同時に、震源付近から地表付近に移動してきた物質によって震源付近の場の情報を知るには、相当な時間がかかることを松代地震は示したともいえるのである。その後、松代地震発生域では、マントル起源と考えられる高濃度のHeが測定され、次の章に示すHeに注目した地震予知研究のひとつのきっかけとなった（Wakita et al., 1978）。

地震予知研究の一環として、地下水の水質に注目するという考えは、それほど目新しいものではない。しかし、この地下水の水質の連続観測を特にねばり強く行なって成果を挙げたのは、吉岡龍馬らを中心とするグループであった（吉岡，1980；吉岡・他，1984；Koizumi et al., 1985）。彼らの研究の特徴は、(1)対象とする地下水を活断層周辺の温鉱泉水としたこと、(2)1日1回の採水を原則としたこと（他の研究者では、水質の測定頻度が、多くて月に数回といった物が多かった）、(3)最低、数年以上の観測を行なったこと等である。塩素イオン ( $\text{Cl}^-$ ) という、安定で、分析が容易で、温鉱泉水一般に認められるイオンの濃度に絞って観測・研究を行なったことが、上述の(2)、(3)を可能にした。彼らが、15年以上の観測を行なっている山崎断層の塩田温泉の塩素イオン濃度は、周辺の地震活動と対応して顕著な変化を示す（図9）。この変化の要因としては、温泉水を形成する水質の異なる2種類の地下水の混合比が、地震に伴っ

て変化することが考えられている（Koizumi et al. 1985）。地震に伴って再現性よく水質が変化する他の例としては、地質調査所が観測している伊豆の赤沢1号井があげられる（吉川・永井，1990）。ここでも、地震にともなう水質変化は、水質の異なる2種類の地下水の混合比の変化によって説明される。さらに、この2種類の地下水と同じ水質の地下水が観測井近傍に存在することが確かめられている。つまり、震源付近から地下水が上昇してきて水質を変化させたのではなく、地震にともなって観測井付近の物理的な状況（応力場・歪場）が変わって地下水の混合比が変わった結果、水質が変化したのである。

以上のように地震に伴って地下水の水質が変化した例として、(1)震源付近からの（観測点付近とは水質が異なる）地下水の上昇によるものと、(2)地震によって観測点付近の物理的な場が変わって地下水の混合システムが変化したことによるものを紹介した。現在では、地震にともなって観測される水質変化は(2)の要因によるものが多いと考えられている。

#### 4.3 ヘリウム (He)

Heは最も軽い不活性ガスである。大気より地下ガスの方が濃度が高いことが期待される上に、軽くて不活性であるから、地下深部の情報を伝え得るガスとして早くから注目されていたが、その連続測定の高難しさから、地震予知のための手法として用いられることは少なかった。

このような状況の中で、杉崎・志知（1978）は、地下水中の溶存ガスのHe/Ar比に注目した研究を行なった。彼らの研究の特徴はHe/Ar比に注目したということと、測定器としてガスクロマトグラフを選んだということである。HeもArも不活性ガスであって、主に岩石中の放射性元素（ウラン・トリウム・カリウム）から生産される。しかし、Heはその軽さゆえに、地表に出てもたちまち拡散してしまって大気中の濃度が約5 ppmと低いのに対し、重いArは大気中の濃度が約0.9%にも達し、地下水や地下ガスに再びとりこまれることも多い。地殻を構成する岩石から産出される

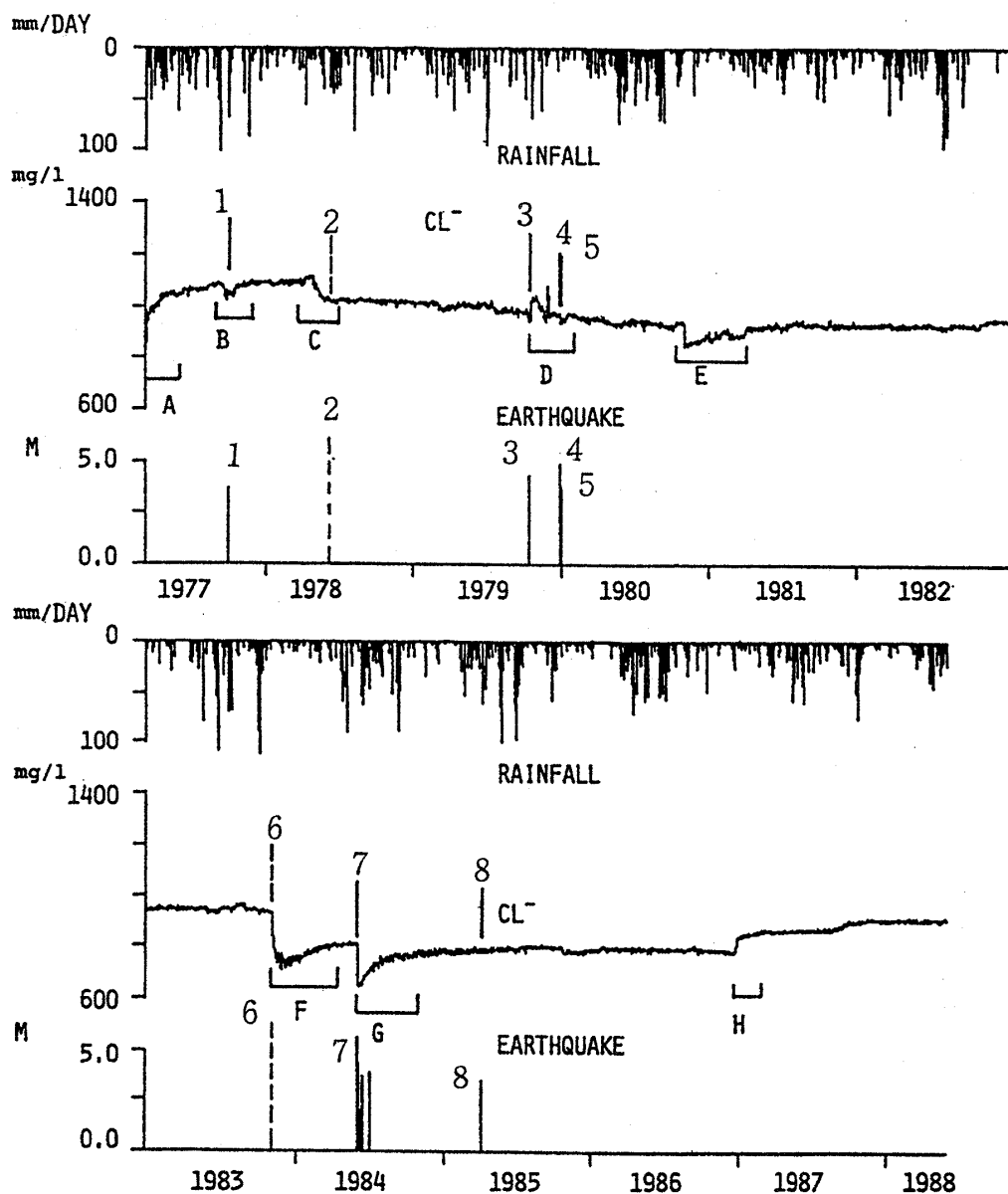


図9 塩田温泉の塩素イオン濃度と地震活動. 上図: 山崎断層観測室での日雨量. 中図: 塩素イオン濃度, A~Hは塩素イオン濃度が異常な変化をした期間を示す. E・Hの変化は人工的な要因による. 下図: 山崎断層の中・南部で発生したM3.5以上の地震(実線)と中国地方で発生したM6以上の地震(破線)の時系列. 地震の深さはすべて30 km以浅.

ガスのHeとArの比を見積もると、岩質によっては大気中のその $10^5$ 倍にもなる(杉崎・志知, 1978)。しかも、ガスクロマトグラフを用いてガスを分析すると、(He/Arも含めて)ガス成分の比が個々の絶対値の測定よりもたやすく、同時に測定できるという利点があった。かれらは、地下水の溶存ガスや火山の噴気ガス中のHe/Arを精力的に測定し、地震の前にHe/Arが変化する例を多数報告している(杉崎・志知, 1978; Sugisaki

et al., 1983; Sugisaki and Sugiura 1985, 1986, Nagamine and Sugisaki, 1991)。また、地球潮汐による体積歪変化に対応してHe/Arが変化しているとの報告もなされたが(Sugisaki, 1981), これは、単に半日周期の変化をしていることを示しているに過ぎない可能性もある。

さて、Heの同位体には、上述の質量数4の $^4\text{He}$ 以外に質量数3の $^3\text{He}$ がある。 $^3\text{He}$ には、地球形成時に地球がトラップした始原的なものと天水に

含まれるトリチウムの崩壊によって生成されるものがある。一方、 $^4\text{He}$  はウランやトリウム放射性崩壊の過程で生成されるものがほとんどである。大気中の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は約  $1 \times 10^{-6}$  の値で、マントル中ではその十数倍から数十倍、逆にウラン等の放射性元素が大量に存在する大陸地殻では、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は大気中の値の  $1/10$  以下になる。 $\text{He}$  は他の物質と化学反応せず移動が速いので、この同位体比は、マグマの生成や固化などの過程で化学的分別作用の影響を受けない。したがって  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は、マントルから地殻、地殻から大気への物質移動の有効なトレーサーとなる。

このような観点にたつて、地下水や地下ガス中の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の分布が、世界各地で測定されている。Sano and Wakita (1985) は、日本における測定で、(沈み込む海洋プレートから見て) 火山フロントの手前(前弧側)では、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  が低く、火山フロントの向こう(背弧側)では高くなることを見いだした。つまり 図 10 のようなプレート

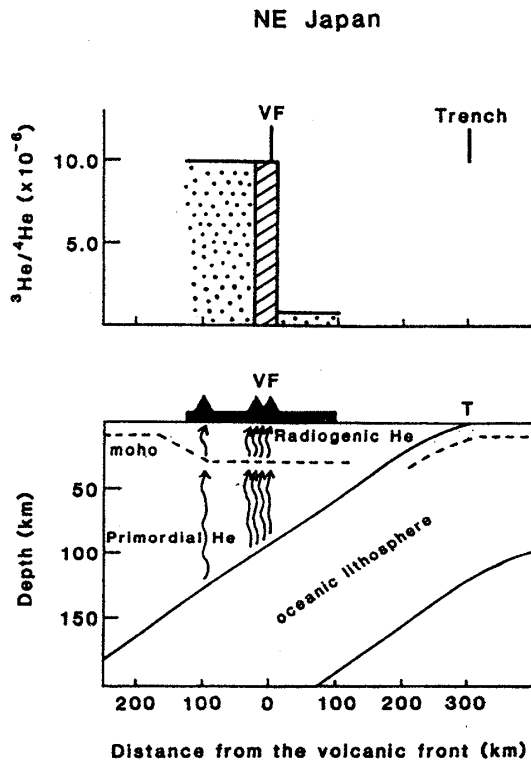


図 10 東北日本における  $^3\text{He}/^4\text{He}$  の変化の模式図とそれを説明するモデル (Sano and Wakita (1985) より)。

沈み込みに伴う部分溶融-溶融物質・熱の上方への移動-火山フロントの形成というプレートテクトニクスの論理を、地球化学的手法で支持する形となった。このような  $^3\text{He}/^4\text{He}$  の分布とプレートテクトニクスとの対応は、他の島弧-海溝系や海嶺でも確認されている (Sano et al. 1987, Sano and Wakita 1987)。さらに、火山活動のない前弧の領域であって、微小地震活動が非常に活発な紀伊半島の温鉱泉中のガスの  $^3\text{He}/^4\text{He}$  が背弧の領域と同程度に高いことを見だし、Mizoue et al. (1983) の地震学的な結果も考慮して、紀伊半島地下にマグマの存在を示唆した興味深い報告もある (Wakita et al. 1987)。

以上のような  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の空間分布とテクトニクスに関する研究に比べ、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の時間変化と地震発生や火山噴火との関連を調べる研究はまだ始まったばかりである。これは、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が質量分析計で測定されることから、連続観測がむずかしいことによる。それでも、サンプリング間隔こそ長いものの、1984年の長野県西部地震 (M6.8) 後に、地震断層に近い温泉水中のガスほど、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が増加したことを見だし、マグマの貫入に伴う ( $^3\text{He}$  を多く含む) 流体の上昇が、長野県西部地震のトリガーになったという報告等は興味深い (Sano et al. 1986)。

地震発生におけるマグマの存在の重要性が注目されている現在 (例えば、Hasegawa et al., 1991), この種の研究がさらに進むことが期待される。

#### 4.4 水素 ( $\text{H}_2$ )

化学的地震予知研究の対象となる化学成分が一般に化学的に安定であるのに対し、水素は非常に反応性に富む気体である。後に述べるように、この研究においては、岩石の破壊現象 (地震) に伴う化学反応の生成物としての水素が注目され、それゆえ、地震発生の際の情報を直接もたらす化学成分として期待されたのである。しかし、水素に注目した研究はその反応性ゆえに、他の化学的地震予知研究とは異なる困難な問題を含むこととなった。

Wakita et al. (1980a) が、山崎断層周辺の土壌ガス中の水素濃度の分布を調べたところ、断層上の土壌ガス中の水素濃度は大気中の値 (0.5 ppm) よりも高濃度で、中には 3% 以上の濃度のものであることを見いだした (図 11)。この水素は濃度が高いだけでなく同位体比  $D/H(^2H/^1H)$  のことも非常に特異で、Kita et al. (1980) は、この同位体比から、測定した水素が水の還元反応から生成したものと仮定すると、生成された水素の反応時の温度は約  $200^{\circ}C$  であると推定した。この温度は、日本列島の平均的な地温勾配 ( $20\sim 30^{\circ}C/km$ ) を考えると、地下 10 km 程度の深部の温度に相当する。この深さが山崎断層周辺の微小地震の深さ分布と調和的であることから、Wakita et al. (1980a) は、微小地震 (破壊) によって形成された岩石の新しい表面と水が反応して水素を生成しているという仮説を提唱した。Kita et al. (1982) は、室内の岩石破碎実験を行い、水の存在下で、石英や花崗岩を破碎すると水素が発生することを確認した。しかも、その生成量は、温度  $200^{\circ}C$  付近で最大になることを見いだした。反応機構としては、破壊作用によって、岩石中の Si-O 結合が切れて、反応性に富む遊離基が形成され、それと、水分子が反応することによって水素が生成されると考えた。地震前に断層近傍の土壌ガス中の水素濃度が異常な変化を示す例もいくつか報告された (Satake et al. 1984/85, Sugisaki

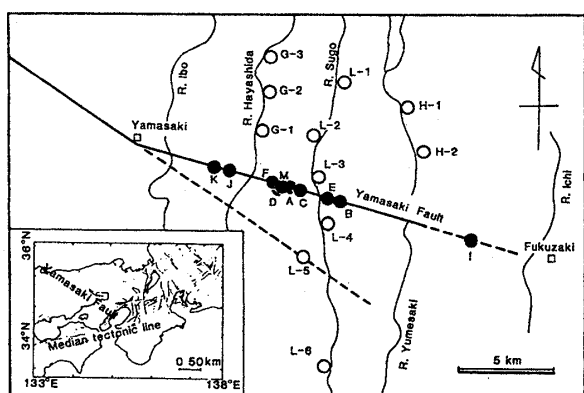


図 11 山崎断層とその周辺部での土壌ガス中の水素濃度分布. 黒丸は高濃度の水素が測定されたところ. 白丸は水素濃度が大気中のそれとほぼ同じ値のところ (Wakita et al. (1980a) より).

and Sugiura, 1986)。

この研究は、観測と実験・理論がかみあった見事な成果であった。しかし、その後の研究の進展は、上述の結果を必ずしも支持してはいない。観測を重ねるにつれ、土壌ガス中の水素濃度は、非常に時間変化が激しく、同一の場所でも、10 日程度で 2~3 桁も変化するのが珍しくないことが分かってきた (例えば Sugisaki et al. 1983)。実際、1984 年 5 月 30 日に山崎断層で M5.6 の地震が発生した直後に、中村・脇田 (1985) は、山崎断層で再び水素の分布を測定したが、断層上で高濃度の水素は認められず、Wakita et al. (1980) とはまったく異なる結果となった。水素の同位体比から推定される水素の反応時の温度も Sugisaki et al. (1983) の測定した阿寺断層では約  $70^{\circ}C$  となっている。反応機構の点についても、Kita et al. (1982) の示した反応機構だけでは、断層で観測される数%にもおよぶ水素濃度を説明するには不十分だとする立場 (Sugisaki et al., 1983) や地表で測定される水素に対し (多様な水素の生成反応の中から) 地震による岩石破碎時の化学反応のみを重視するのはおかしいという立場 (Masuda and Tsurumaki 1982) がある。また、サンアンドレアス断層での測定結果から、岩石中の 2 価鉄が水と反応して水素を発生する反応を重視する考えもある (Sato et al. 1984/85)。

地震の発生しているところで水素が生成されたとしても、水素のような反応性に富む気体が、生成時の情報を保持して地表にまで達すると考えるのはむずかしい。他方、断層部での水素に異常な同位体比のものであることや、水素濃度のばらつきを考慮にいれても、活動的な断層では水素濃度が高いことを示す報告 (Sugisaki et al., 1983) もある。水素を対象とした化学的地震予知研究は興味深い課題を提供していることは確かなことである。

#### 4.5 その他の化学成分

He の章で紹介したガスクロマトグラフでは、Sugisaki et al. (1982) の手法を用いると、He・Ar に加えて Ne・H<sub>2</sub>・N<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub> 等が同時に測定

できる。日本各地の地下水や地下ガス中のこれらのガス成分を測定し、大気起源ガスの代表的ガス成分である Ar との比をとってテクトニクスや地震活動との関連を調査している一連の研究がある (Sugisaki and Sugiura, 1986; Sugisaki, 1987; Nagamine and Sugisaki, 1991)。Kawabe (1984/85) は、四国の松山市の 2 つの鉱泉においては、これらのガス成分比の中でも特に  $\text{CH}_4/\text{Ar}$  が地震活動に対して敏感であるという報告をしている。ガスクロマトグラフによる測定は、このように多成分のガスが同時に分析できる点で魅力的で、野外に置く自動連続測定装置も開発された。しかし、その保守が、Rn 濃度観測等に比べると難しいこともあって、ガスクロマトグラフによるガスの連続測定は、それほど普及していない。

なお、この他に  $\text{CO}_2$  に注目した研究 (Sugisaki et al., 1983) や、地下水中の水素と酸素の同位体比 ( $^2\text{H}/^1\text{H}$  や  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) に注目した研究もある (O'Neil and King, 1981)。

## 5. 地球化学的手法を用いた短期的地震予知研究の問題点

前述したように、地球化学的地震予知研究は、主に短期的地震予知に有効な手段として導入された。日本での過去 20 年程度の研究の歴史の中で、多数の前兆現象例が報告されたが、同時に種々の問題点も明らかになってきた。この章では、いくつかの日本の研究成果を紹介しつつ、地球化学的地震予知研究の問題点を 2 つほど述べる。

### 5.1 地震に対する「感度」の場所による違い

地震に対する「感度」が観測井によって大きく異なるという問題である。図 12 を見ていただきたい。これは、東京大学理学部が福島県の大葉断層周辺で水中ラドン濃度観測をしている 3 つの観測井を示したものである。この中の KSM (鹿島) 観測井は、前述したように、地震に対する感度の高い観測井である (Igarashi and Wakita, 1990)。しかし、同じ、大葉断層上にある、SOM 観測井や NRH (楡原) 観測井では、そのような地震に対応する変化はほとんど検出されない。このような場

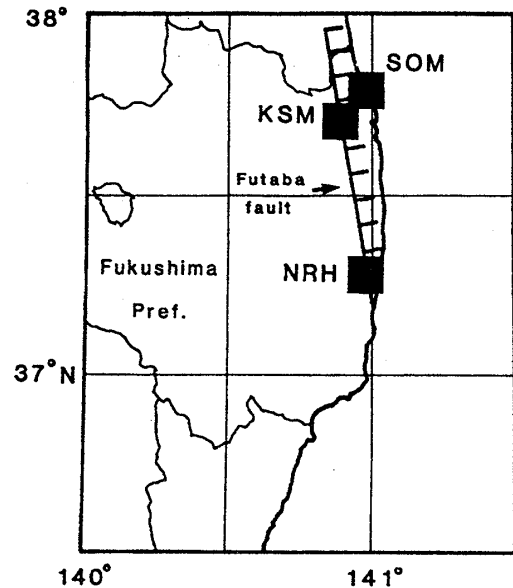


図 12 大葉断層と 3 観測井 (KSM, SOM, NRH) の位置 (Igarashi and Wakita (1990) より)。

所による「感度」の極端な違いは多数報告されており、地球化学的地震予知研究における一般的な認識となりつつある。地震に対する「感度」の相違は、観測井周辺の局所的な構造の不均質性によると推定されているが、その詳細は明かではない。ある観測井の地震に対する「感度」がどの程度のものであるかは、測定してみないとわからないというのが実状なのである。

このような、観測井における「感度」の違いが明らかになるにつれて、複数の観測点で観測される前兆現象の強度の違いから、やがて発生する地震の場所を推定しようという試みは難しくなりつつある。この種の考えには、前兆現象の信号としての強度に距離依存性があると同時に、観測点側の「感度」がほぼ一定であるという前提条件が必要だからである。ただし、他方で、ある特定の地域の地震活動にのみ対応して、観測量が変化するという報告もある (西村, 1985)。このような観測点の地震発生場所に対する「選択性」は、地電位差観測による地震予知 (いわゆる VAN 法による地震予知) に成功していると言われるギリシャにおいても指摘されており (Varotsos and Lazaridou, 1991)、地震発生「場所」に対する情報を地球化学的観測で得るための鍵となる可能性がある。

## 5.2 前兆現象の再現性の不十分さ

ある地震に対して前兆現象が検出されても、別の同じような地震に対して必ずしも前兆現象が検出されないという問題である。このような事例はすでに Hatuda (1953) が報告している。1944年東南海地震 (M7.9) の際に、京都大学構内の土壤ガス中のラドン濃度が前兆的变化を示したものの、1946年南海地震 (M8.0) では、地震前の変化は検出されなかったのである。東南海地震も南海地震もともに、南海トラフ沿いに発生した低角逆断層型の巨大地震であった。1978年伊豆大島近海地震 (M7.0) 前に明瞭な水中ラドン濃度変化を示した中伊豆観測点でも (Wakita et al. 1980), 1980年伊豆大島東方沖地震 (M6.7) では、前兆的变化は検出されなかった。

図9に示したように、1977年から1988年までの、山崎断層沿いにある塩田温泉の塩素イオン濃度変化と周辺の地震活動とはよく対応する。しかし、地震に関連した塩素イオンの濃度変化をひとつひとつ見ていくと、そのパターンは一様ではない。また、1980年以前は、1~5の地震に対して、前兆的な塩素イオン濃度変化が認められたが、それ以降は認められない。1~8の地震は、いずれも、東西圧縮の横ずれ断層型の地震であり、中国地方で発生した2つのM6クラスの地震(2, 6)を除いて、山崎断層周辺で発生した地震である。

前兆現象の再現性がないという問題は、何も地球化学的な前兆現象に限ることではない。他の前兆現象にも共通する事である。しかし、地球化学的地震予知研究は、他の分野に比べて研究の歴史が浅く、前兆現象出現の理論的根拠が薄弱であるために、この問題の説明が難しい。

## 6. おわりに

地球化学的地震予知研究の成果と課題について述べてきた。地震に伴って観測された地球化学的な(地下水学的な)異常は、地震前後に観測点付近で発生する異常地殻変動やクラック生成に起因するものが多いと現時点では考えられる。したがって、大部分の地球化学的な前兆現象は、Ishibashi (1988) の分類で言うところの tectonic precur-

sor (地震の震源域から離れた場所の局所的な応力場や歪場の変化を示すもの) であると考えられることができる。岩石の主破壊の前に、種々のガスが放出される現象はいくつかの研究で確認されているが (Giardini et al., 1976, 加藤・他, 1985, 1989), 地震の発生する場でガスが放出されるということと、それが地表で観測されるということは別問題ととらえるべきであろう。

今後は、前兆現象検出に固執することなく、仮説検証型の観測・実験を今まで以上に行ない、地球化学的地震予知研究の弱点である理論面の充実に努めることが大切であろう。

## 謝 辞

本論で図を引用させていただいた多数の研究者の皆様から感謝します。また、適切な助言を頂いた3名の匿名の査読者に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Bower, D.R.: Bedrock fracture parameters from the interpretation of well tides, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, pp. 5025-5035, 1983.
- 2) Bredehoeft, J.D.: Response of well-aquifer systems to earth tides, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp.3075-3087, 1967.
- 3) Cooper, H.H.Jr., J.D.Bredehoeft, I.S.Paradopoulos and R.R.Bennet: The response of well-aquifer systems to seismic waves, *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, pp. 3915-3926, 1965.
- 4) 馮 学才: 我国大地震前地下水異常特征及物理機制, *地震地質*, Vol.4, pp.35-39, 1982.
- 5) Furuya, I. and H.Shimamura: Ground-water microtemperature and strain, *Geophys.J.*, Vol. 94, pp. 345-353, 1988.
- 6) Giardini, A.A., G.V.Subbarayudu and C.E. Melton: The emission of occluded gas from rocks as a function of stress: its possible use as a tool for predicting earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.3, pp.355-358, 1976.
- 7) Hasegawa, A., D.Zhao, S.Hori, A.Yamamoto and S.Horiuchi: Deep structure of the northeastern Japan arc and its relationship to seismic and volcanic activity, *Nature*, Vol.352, pp.683-689, 1991.

- 8) Hatuda, Z.: Radon content and its change in soil air near the ground surface, Mem.Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B, Vol.XX, pp.285-306, 1953.
- 9) Hatuda, Z.: Radioactive method for geological exploration, Mem.Coll. Sci., Univ.Kyoto, Ser. B, Vol.XXI, pp.231-271, 1954.
- 10) Hauksson, E.: Radon content of groundwater as an earthquake precursor: Evaluation of worldwide data and physical basis, J.Geophys. Res., Vol.86, pp.9397-9410, 1981.
- 11) Igarashi, G. and H.Wakita: Ground-water radon anomalies associated with earthquakes, Tectonophysics, No.180, pp.237-254, 1990.
- 12) Igarashi, G and H.Wakita: Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells, J.Geophys. Res., Vol.96, pp. 4269-4278, 1991.
- 13) Igarashi, G., Y.Tohjima and H.Wakita; Time-variable response characteristics of groundwater radon to earthquakes, Geophys. Res.Lett., Vol.20, pp.1807-1810, 1993.
- 14) Igarashi,G., S.Saeki, N.Takahata, K. Sumikawa, S.Tasaka, Y.Sasaki, M.Takahashi and Y.Sano: Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, Science, Vol. 269, pp.60-61, 1995.
- 15) Ishibasi, K.: Two categories of earthquake precursors, physical and tectonic, and their roles in inter-mediate-term earthquake prediction, Pure Appl. Geophys., Vol.126, pp. 687-700, 1988.
- 16) 石黒真木夫・佐藤忠広・田村良明・大江昌嗣: 地球潮汐データ解析—プログラム BAYTAP の紹介—, 統計数理研究所彙報, Vol.32, pp.71-85, 1984.
- 17) 板寺一洋・横山尚秀・長瀬和雄・小鷹滋郎・平野富雄: 神奈川県西部地域における地下水位観測 (1994), 神奈川県温泉地学研究所報告, Vol.26, No.3, pp.99-106, 1995.
- 18) 加藤 完・西澤 修・楠瀬勤一朗・池田喜代治: 一軸圧縮過程のウエスタリー花崗岩から放出されるラドン濃度の変動, 地震 2, Vol.38, pp. 173-182, 1985.
- 19) 加藤 完・西澤 修・楠瀬勤一朗・風早康平: 一軸圧縮過程のウエスタリー花崗岩から放出される水素とラドン濃度の変動(2), 地震 2, Vol. 42, pp.67-72, 1989.
- 20) 桂 郁雄・中尾節郎・岸本兆方・渋谷拓郎・見野和夫・西田良平: 鳥取観測所坑内での  $\gamma$  線線量率連続測定, 地震 2, Vol.42, pp.299-310, 1989.
- 21) Kawabe, I.: Anomalous changes of  $\text{CH}_4$  / Ar ratio in subsurface gas bubbles as seismogeochemical precursors at Matsuyama, Japan, Pure Appl. Geophys. , Vol.122, pp.194-213, 1984/85.
- 22) 川辺岩夫: 地震に伴う地下水・地球化学現象, 地震 2, Vol.44, pp.341-364, 1991.
- 23) 吉川清志・永井 茂: 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 2, Vol.43, pp.243-256, 1990.
- 24) King, C-Y.: Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes, J.Geophys. Res., Vol.85, pp. 3065-3078, 1980.
- 25) King, C-Y.: Geochemical measurements pertinent to earthquake prediction, J.Geophys. Res., Vol.85, p.3051, 1985.
- 26) King, C-Y., N.Koizumi and Y.Kitagawa: Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake, Science, Vol.269, pp.38-39, 1995.
- 27) Kita, I, S.Matsuo, H.Wakita and Y. Nakamura: D/H ratios of  $\text{H}_2$  in soil gases as an indicator of fault movements, Geochem.J., Vol.14, pp. 317-320, 1980.
- 28) Kita, I, S.Matsuo and H.Wakita:  $\text{H}_2$  generation by reaction between  $\text{H}_2\text{O}$  and crushed rock: an experimental study on  $\text{H}_2$  degassing from the active fault zone, J.Geophys. Res., Vol.87, pp.10789-10795, 1982.
- 29) Kitagawa, Y., N.Koizumi and T.Tsukuda: Comparison of postseismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain releases: Yudani hot spring, Japan, Geophys. Res. Lett., Vol.23, pp.3147-3150, 1996.
- 30) Kitano, Y., R.Yoshioka, S.Okuda and K. Okunishi: Geochemical study of groundwaters in the Matsushiro area (Part 1), Bull.Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.17, pp.47-71, 1967.
- 31) Koizumi, N., R.Yoshioka and Y.Kishimoto: Earthquake prediction by means of change of chemical composition in mineral spring water, Geophys. Res. Lett., Vol.12, pp.510-513, 1985.
- 32) 小泉尚嗣・中尾節郎・矢部 征・桂 郁雄・平野



- 憲雄・西田良平・吉岡龍馬：地震予知研究センター鳥取観測所の地下水・地球化学多点観測，京大防災研年報，No.34，pp.365-375，1991.
- 33) 小泉尚嗣：自噴井における地下水温潮汐変化に関する解析—岡山県の西粟倉観測井の場合，地震 2，Vol.44，pp.155-164，1991.
- 34) Koizumi, N.: Frequency dependence of the groundwater discharge at an artesian well as recognized from tidal fluctuation records, *J.Geophys. Res.*, Vol.98, pp.825-835, 1993.
- 35) 小泉尚嗣：地殻歪と地殻内流体，火山，Vol. 39，pp.169-176，1994.
- 36) 小泉尚嗣・北川有・佃 為成・矢部 征：鳥取県湯谷温泉におけるコサイスマミックな水温変化について，地震 2，Vol.48，pp.315-329，1995.
- 37) Koizumi, N., Y.Kano, Y.Kitagawa, T.Sato, M.Takahashi, S.Nishimura and R.Nishida: Groundwater anomalies associated with the Hyogo-ken Nanbu Earthquake 1995, *J.Phys. Earth*, Vol.44, pp.373-380, 1996.
- 38) Kämpel, H.-J.: About the potential of wells to reflect stress variations within inhomogeneous crust, *Tectonophysics*, Vol.211, pp.317-336, 1992.
- 39) Masuda, H. and M.Tsurumaki: Geochemical study of mineral springs in the southeastern part of Hyogo Prefecture, Southwest Japan, *J. Geosci., Osaka City Univ.*, Vol.25, pp. 1-17, 1982.
- 40) Matsumoto, N.: Regression analysis for anomalous changes of groundwater level due to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.19, pp. 1193-1196, 1992.
- 41) Melchior, P.: The tides of the planet earth, Pergamon Press, 641p., 1983.
- 42) Mizoue, M., M.Nakamura, N.Seto, Y. Ishiketa and T.Yokota: Three layered-distribution of microearthquakes in relation to focal mechanism variation in the Kii Peninsula, southwestern Honshu, Japan, *Bull.Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, Vol.58, pp.287-310, 1983.
- 43) 茂木清夫：日本の地震予知，サイエンス社，352p，1982.
- 44) Mogi, K., H.Mochizuki and Y. Kurokawa: Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes, *Tectonophysics*, Vol.159, pp.95-108, 1989.
- 45) Nagamine, K. and R.Sugisaki: Coseismic changes of subsurface gas compositions disclosed by an improved seismo-geochemical system, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.18, pp.2221-2224, 1991.
- 46) 中村一明：松代地震から学んだこと，科学朝日，10月号，pp.127-133，1971.
- 47) 中村裕二・脇田 宏：水素ガス分布—断層活動の指標—，月刊地球，Vol.7，pp.27-31，1985.
- 48) Nakamura, Y. and H.Wakita: Precise temperature measurement of groundwater for earthquake prediction study, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.122, pp.164-174, 1984/85.
- 49) 中尾節郎・岸本兆方・渋谷拓郎・見野和夫・西田良平・桂 郁雄：観測坑内におけるガンマー線連続観測(I)，京大防災研年報，No.30，pp.57-65，1987.
- 50) Narasimhan, T., B.Kanehira and P. Witherspoon: Interpretation of earth tide response of three deep, confined aquifers, *J.Geophys. Res.*, Vol.89, pp.1913-1924, 1984.
- 51) 西村 進：地中空気中のラドンの自動計測，RA-DIOISOTOPES, Vol.28, pp.29-32, 1979.
- 52) 西村進：伊豆半島土肥町小土肥温泉でのラドンの連続測定，地震 2，Vol.38，pp.587-596.，1985.
- 53) Noguchi, M. and H.Wakita: A method for continuous measurement of radon in groundwater for earthquake prediction, *J.Geophys. Res.*, Vol.82, pp.1353-1357, 1977.
- 54) Notsu, K., H.Wakita, G.Igarashi and Y.Sano: Hydrological and geochemical changes related to the 1989 seismic and volcanic activities off the Izu Peninsula, *J.Phys. Earth*, Vol.39, pp. 245-254, 1991.
- 55) Nur, A.,: Dilatancy, pore fluids, and premonitory variation of  $t_p/t_s$  travel times, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol.62, pp.1217-1222, 1972.
- 56) Okabe, S.: Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. A*, Vol. XXVIII, pp.99-115, 1956
- 57) 岡部 茂：ラドンと地震—昔と今，地球化学実験施設彙報，No.4，pp.16-27，1986.
- 58) Oki, Y., and S.Hiraga: Groundwater monitoring for earthquake prediction by an amateur

- network in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.126, pp.211-240, 1988.
- 59) O'Neil, I.R. and C-Y.King: Variations in stable isotope ratios of ground-waters in seismically active regions of California, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.8, pp.429-432, 1981.
- 60) 大竹政和：松代地震から10年, *科学*, Vol.46, pp. 306-313, 1976.
- 61) Rice, J.R. and M.P.Cleary: Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.14, pp.227-241, 1976.
- 62) Roeloffs, E.A.: Hydrologic precursors to earthquakes: A review, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.126, pp.177-209, 1988.
- 63) Rojstaczer, S.: Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: Sensitivity and noise level, *J.Geophys. Res.*, Vol.93, pp. 13619-13634, 1988a.
- 64) Rojstaczer, S.: Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading, *Water Resour. Res.*, Vol.24, pp.1927-1938, 1988b.
- 65) 貞広太郎・見野和夫：活断層における $\gamma$ 線測定(I), *地震* 2, Vol.33, pp.51-70, 1980.
- 66) Sano, Y. and H.Wakita: Geographical distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism, *J.Geophys. Res.*, Vol.90, pp.8729-8741, 1985.
- 67) Sano, Y., Y.Nakamura, H.Wakita, K.Notsu and Y.Kobayashi:  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio anomalies associated with the 1984 Western Nagano Earthquake: Possibly induced by a diapiric magma, *J.Geophys. Res.*, Vol.91, pp.12291-12295, 1986.
- 68) Sano, Y., H.Wakita and W.F. Giggenbach: Island arc tectonics of New Zealand manifested in helium isotope ratios, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.51, pp.1855-1860, 1987.
- 69) Sano, Y. and H.Wakita: Helium isotopes and heat flow on the ocean floor, *Chem. Geol.*, Vol.66, pp.217-226, 1987.
- 70) Satake, H., M.Ohashi and Y.Hayashi: Discharge of  $\text{H}_2$  from the Atotsugawa and Ushikubi Faults, Japan and its relation to earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.122, pp. 185-193, 1984/85.
- 71) Sato, M., A.J.Sutton and K.A.McGee: Anomalous hydrogen emissions from the San Andreas Fault observed at the Cinega Winery, Central California, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 122, pp.376-391, 1984/85.
- 72) Scholz, H.C., L.R.Sykes and Y.P. Aggarwal: Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, Vol.181, pp. 803-809, 1973.
- 73) Shimamura, H.: Precise quartz thermometers for borehole observations, *J.Phys. Earth*, Vol.28, pp.243-260, 1980.
- 74) Shimamura, H., M.Ino, H.Hikawa and T.Iwasaki: Groundwater micro-temperature in earthquake regions, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 122, pp.933-946, 1984/85.
- 75) 島村英紀：精密地下水温計, 北大地球物理研究報告, No.47, pp.1-15, 1986.
- 76) 下道国・山内常生・松田秀晴・宮島力雄: GMサーベイメーターによる地殻変動観測坑内空気中のラドン濃度の測定, *地震* 2, Vol.43, pp. 111-120, 1990.
- 77) 杉崎隆一・志知龍一: 地震の前兆現象としての断層ガス中の  $\text{He}/\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2/\text{Ar}$  比の変動, *地震* 2, Vol.31, pp.195-260, 1978.
- 78) Sugisaki, R.: Deep-seated gas emission induced by the earth tide: A basic observation for geochemical earthquake prediction, *Science*, Vol. 212, pp.1264-1266, 1981.
- 79) Sugisaki, R., H.Takeda, I.Kawabe and H. Miyazaki: Simplified gas chromatographic analyses of  $\text{H}_2$ , He, Ne, Ar,  $\text{N}_2$  and  $\text{CH}_4$  in subsurface gases for seismogeochemical studies, *Chem. Geol.*, No.36, pp. 217-226, 1982.
- 80) Sugisaki, R., M.Ido, H.Takeda, Y. Isobe, H.Satake, Y.Hayashi, N.Nakamura and Y.Mizutani: Origin of the hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity, *J.Geol.*, Vol.91, pp.239-258, 1983.
- 81) Sugisaki, R. and T.Sugiura: Geochemical indicator of tectonic stress resulting in an earthquake in Central Japan, *Science*, Vol.229, pp. 1261-1262, 1985.
- 82) Sugisaki, R. and T.Sugiura: Gas anomalies at three mineral springs and a fumarole before an inland earthquake, Central Japan, *J.Geophys.*

- Res., Vol.91, pp.12296-12304, 1986.
- 83) Sugisaki, R.: Behavior and origin of helium, neon, argon, and nitrogen from active faults, *J.Geophys. Res.*, Vol.92, pp.12523-12530, 1987.
- 84) 高橋 誠: 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*, Vol.102, pp.241-251, 1993.
- 85) 田坂茂樹・佐々木嘉三: 深い地下におけるラドン族の観測, 環境ラドン(下 道国・辻本 忠編), 松田齋(財団法人電子科学研究所), pp.53-63, 1992.
- 86) 遠田晋次・田中和弘・千木良雅弘・宮川公雄・長谷川琢磨: 1995年兵庫県南部地震に伴うコサイスミックな地下水挙動, *地震 2*, Vol.48, pp. 547-553, 1995.
- 87) Torgersen, T and J.O'Donnell: The degassing flux from the solid earth: Release by fracturing, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.18, 951-954, 1991.
- 88) Ulomov, V.I. and B.Z.Mavashev: The Tashkent earthquake of 26 April 1966, *Acad.Nauk Uzbek SSR FAN*, pp.188-192, 1971.
- 89) Umeda, Y., K.Ito and T.Asada: Changes in crustal strain and hot spring temperature as related to volcanic eruptions, *J.Phys. Earth*, Vol. 39, pp.231-243, 1991.
- 90) Varotsos, P. and M.Lazaridou: Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, *Tectonophysics*, Vol.188, pp.321-347, 1991.
- 91) Wakita, H.: Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, Vol.189, pp.553-555, 1975.
- 92) 脇田 宏: 地下水の水位・化学組成変化, 地震予知の方法(浅田敏編著), 東京大学出版会, pp.146-166, 1978.
- 93) Wakita, H., N.Fujii, S.Matsuo, K.Notsu, K.Nagao and N.Takaoka: "Helium spots": Caused by a diapiric magma from the upper mantle, *Science*, Vol. 200, pp.430-432, 1978.
- 94) Wakita, H., Y.Nakamura, I.Kita, N. Fujii and K.Notsu: Hydrogen release: New indicator of fault activity, *Science*, Vol.210, pp.188-190, 1980a.
- 95) Wakita, H., Y.Nakamura, K.Notsu, M.Noguchi and T.Asada: Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake, *Science*, Vol.207, pp.882-883, 1980b.
- 96) Wakita, H.: Groundwater observations for earthquake prediction in Japan, *Proc.Int.Symp. Continental Seismicity and Earthquake Prediction*, Seismol. Press, pp.494-500, 1984.
- 97) 脇田 宏: 地球化学的地震予知研究の10年, 東京大学理学部地殻化学実験施設彙報, No.3, pp.2-26, 1984.
- 98) Wakita H., Y.Nakamura and Y.Sano: Background fluctuations in groundwater radon observation, *J.Phys. Earth*, Vol.34, S81-S89, 1986.
- 99) Wakita, H, Y.Sano and M.Mizoue: High  $^3\text{He}$  emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic forearc region, *J.Geophys. Res.*, Vol.92, pp.12539-12546, 1987.
- 100) Wakita, H., Y.Nakamura and Y.Sano: Short-term and intermediate-term geochemical precursors, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.126, pp. 267-278, 1988.
- 101) Wakita, H, G.Igarashi and K.Notsu: An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M6.0 earthquake: A possible precursor?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.18, pp.629-632, 1991.
- 102) Watanabe, K.: Strain variations of the Yamasaki Fault zone, Southwest Japan, derived from extensometer observations (Part2)-on the short-term strain variations derived from strain steps-, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol.41, pp.53-85, 1991.
- 103) 山内常生・下 道国: 通気式電離箱による横坑内のラドン濃度の測定, およびその濃度変化と地震発生の関係, *地震 2*, Vol.35, pp.435-446, 1982.
- 104) 山内常生・下 道国・宮島力雄: 横坑内におけるラドン濃度の変化—豊橋および菊川における観測—, *地震 2*, Vol.41, pp.335-342, 1988.
- 105) Yamauchi, T.: Variations in air radon concentrations in tunnels for observation of crustal movement in the Tokai region of Japan, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, Vol.12, pp.193-201, 1992.
- 106) Yoshioka, R., S.Okuda and Y.Kitano: Calcium chloride type water discharged from the Matsushiro area in connection with swarm earthquakes, *Geochem.J.*, Vol.4, pp.61-74, 1970.
- 107) 吉岡龍馬: 山崎断層, 塩田温泉の塩素濃度の変化と地震, *地震予知研究シンポジウム(1980)*, pp.159-162, 1980.
- 108) 吉岡龍馬・西田良平・佃 為成・見野和夫・小泉尚嗣・北岡豪一・矢部 征・岸本兆方: 1983

年10月31日鳥取県中部の地震に伴う温泉水の異常, 京都大学防災研究所年報, No.27, pp.455-464, 1984.

(投稿受理:平成8年8月20日  
訂正稿受理:平成8年12月4日)