
 論文

 地球化学的地震予知の基礎的研究
 — 地下ガス組成変化と地殻内での歪変化ならびに破壊現象 —

杉崎 隆 —*

 A Basic Study on Geochemical Earthquake Prediction
 —Compositional Variations of Subsurface Gases with relation to Stress Changes and Fractures in the Earth's Crust—

RYUICHI SUGISAKI*

Abstract

The principle and procedure of the geochemical earthquake prediction proposed by the author are described and the result of the project is presented. The method utilizes the compositional anomalies of subsurface gases prior to a possible earthquake. The gases stemmed from depths may be emitted from mineral springs, active faults, and other outlets. These gases can be detected by mutual ratios among several gas species. Observations showed (1) emission of deep seated gas with high He/Ar ratio induced by the earth tide, and (2) H₂ emission from active faults associated with historical earthquakes. The former have been accumulated in the ground and the latter are produced by rock fracturing. Both gases are expected to be discharged from a depth by stress change and fracture resulting in an earthquake. The examples of the gas anomalies observed at some earthquakes showed that monitoring of several gases with automatic gas-chromatographs at several stations can be feasible for earthquake prediction and may be useful for discussion of focal mechanisms.

1. 緒言

地震は地下に歪が蓄積され、やがて力学的バランスが失われて起るものと考えられている。つまり地震は物理現象である。したがって、物理学的立場から地震予知を行おうとするのは当然である。地震の前には地下の歪の進行によっていろいろな

物理的現象が起るから、このような現象を地震の前兆としてとらえようとする。これが世界で予知に関する研究および事業の大勢を占めている地球物理学的方法である。傾斜計、伸縮計を中心とした測地学的観測網はかなりの密度で日本全土にも設置されている。しかし、地震の前兆はすべて物理的現象とは限らない。歪の進行によって引き起される非物理的現象は数多く存在するはずである。ここに論じる“地球化学的予知法”は、歪の変化

 *名古屋大学理学部
 School of Science, Nagoya Univ.

に伴う化学現象を捕捉しようとするものである。

このような地震の前兆としての“化学現象”が最初に注目されたのはソ連においてであった¹⁾。

1966年、ソ連のタシケント市における直下型地震の前に地下水中のラドン (Rn) 濃度が数年に亘って増加し続けたことが観測され、これが予知に利用される契機となった。現在ではソ連はもとより、日本、中国、アメリカなどでかなり研究、観測されるようになってきている。Rn は地下の岩石中のラジウムが自然崩壊して生じる放射能をもつ気体であり、これが地下の歪によって作られた微小割れ目を通じて地上に上昇してくるものと解釈されている。しかし、Rn が地震のときに増加するという事実は上記タシケント地震より20年以上前、我国の初田甚一郎²⁾により観測されていた。初田は1944年12月7日の東南海地震のとき、京都大学構内の浅いボーリング孔内で Rn が増加していたことを報じている。同様なことは岡部³⁾によっても指摘されていたが、我国の地震予知体制の中では注目されなかった。このように固有な領域以外の成果を評価せず、諸外国に後れをとったことは日本の科学にとって反省の材料となるものであろう。

さて、上のごとく、Rn の地震予知への応用に関する研究は広範に行われているとはいうものの、かなり経験的研究に終始しているという感を免れない。岩石破壊時の Rn の放出といった実験的研究⁴⁾もあるが、大半は時系列上の地下水または地下ガス中の Rn 濃度変化と大小、遠近の地震との対比に終始しているものである。この傾向の原因については後にも触れるが、地震予知における地球化学的方法の正当性を確立し、更に学問的関心を惹くうえで、この現状はいささか物足りない。筆者は1976年以来、地震予知を目的とした地下ガス組成の観測を行ってきたが、この方法の科学的基礎となる資料の蒐集、とくにガス組成変動と地下歪変化との因果関係の解明に努めてきた。本稿では筆者およびその協力者が行ってきた研究を中心として、この方法の基礎的な考え方と、それに関する観測ならびに実験の結果を中心に記述し、実際の地震についての若干の例を挙げることにす

る。

2. 本研究の原理と方法

2.1 地下ガスの起源

地震は地下の破壊現象であるから、地下深部に由来するガスは地下深部の情報を提供するものと期待される。地下深部で生成され、しかも大気中に存在しないか、或は極めて少量しかないガス種が、有効な情報提供者となり得るであろう。気体は地下の微小な割れ目中を拡散、移動するものであるから、逆に大気成分も当然地下に浸透し得る。したがって、観測に当っては大気成分と異なる地下固有のガスに着目する必要がある。最初に触れた Rn はその一つであり、地下のラジウム (Ra) により生産され、大気中にはほとんど含まれない。この種のガスとして、ヘリウム (He)、アルゴン (Ar)、水素 (H₂)、メタン (CH₄)、二酸化炭素 (CO₂)、およびチッ素 (N₂) などをあげることができる。このうち最初の2つ (He と Ar) は共に岩石中の放射性元素により生産され、He はウラン (U)、トリウム (Th) などから、Ar はカリウム (K) から生産される。他のガスはいろいろな化学反応や有機物の分解などによって生成される。

まず He と Ar について考察してみよう。表-1 に示すように、He や Ar のそれぞれの親元素である U、Th と K の濃度は岩石の種類によって異なっている。しかし、U、Th と K は天然における地球化学的行動が似ており、共に酸性火成岩に濃集し、塩基性火成岩中には乏しい。従って (U + Th) / K の比は岩石の種類によってあまり大き

表-1 岩石中の U, Th, K 含有量とそれから生産される希ガスの存在比⁷⁾

岩 石	U (ppm)	Th	K (%)	He/Ar*	
				10 ⁶ 年	10 ⁸ 年
玄武岩	0.83	5	0.58	10.8	10.8
花崗岩	3.96	13.5	2.50	8.82	8.82
頁岩	3.7	12	2.24	8.95	8.95

* この欄の年代は希ガスの蓄積される期間

く変動しない。それらから生成されるHeとArの比も当然大きな変動はなく、ほぼ10の値を示す。一方大気中のこの比は 5×10^{-4} であり、岩石中の比に較べると2万分の1程度で無視できる程小さい。このことはあるガスが地下深部に由来するか、大気に由来するかを判定規準としてHe/Ar比が有用であることを示すものである。

非放射性起源のガスであるCO₂, CH₄, N₂, H₂などの起源は一つではない。これらは火山ガスや温泉ガスで代表されるように無機起源の場合もあるし、地下で有機物が分解して生じることもある。これらの起源については以下の章でその都度触れることとするが、N₂を除くといずれも大気中の濃度が極めて低いことはこれら地下ガスの判定にとって有利である。

2.2 ガス相互比の重要性

緒言において述べたように、地下ガス放出の監視のために最も広く用いられている元素はRnである。これは3.85日の半減期を以て α 崩壊するから、Rnの発生源からあまり遠い観測点においてはその追跡が困難であり、かつその変化を支配する機構を考える場合、減衰という要素を考慮する必要がある。一方、ここで最初にとり上げるHeやArはそれ自身安定である。またRnと同じようにHeやArは希ガスであって、一般の天然の条件下では他の物質と反応することがない。したがって地下で生産されるこれらのガスは化学的な分別はなく、その相互比は拡散、溶解といった物理的分別を除くと天然で極めて変化し難い。しかもその物理的過程による分別は、岩石中のHe/Ar比が空気中のその2万倍ということからみると無視できるくらい小さく、地下ガス放出の判定に考慮する必要はない。

いま仮に地震と関係して地下に貯えられていたガスが放出されると、当然HeやAr以外のガスも同様に放出される可能性がある。その際Heのみを測定していればHeはこれらのガスによって希釈され、He濃度は下る。従って地下ガス放出をHe濃度のみで判定することは難しい。しかし、上記のようにHe/Ar比は他のガスの多寡に影響されないから、この比は深部起源ガスの確認に有

効である。たとえば表-2にかつて筆者が分析した日本の天然ガス田の分析値を示す。いずれもHeの濃度は空気中のそれと変わらないくらい低いが、He/Ar比は大気中のその5倍~300倍に及んでいる。天然ガス鉱床のように地質時代を通じて地下に長く貯溜されているガスには放射性起源のガスが加わっていること、しかし個々のガスは主成分であるCH₄によって希釈され絶対濃度が低いことがこの表から理解されよう。

表-2 日本の天然ガスの分析例⁴⁾(%)

No.	CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂	CO ₂	He	Ar	He/Ar
(西長岡ガス田)							
KR-9-2	96.9	1.87	0.43	0.59	0.00066	0.0039	0.17
KR-15-1	98.2	1.04	0.32	0.016	0.00048	0.0031	0.15
(南関東ガス田)							
K-1	96.7	0.021	1.75	1.56	0.00009	0.035	0.003
K-3	97.3	0.007	0.290	2.36	0.00057	0.0076	0.078

外国でも地震予知にHeを重視する研究は少ない⁵⁾。しかし、その単独利用は以上のような難点がある。同様な事情はRnについても同じであろう。他のガスについても後述する測定上の理由と共に1成分のみを観測するより、多成分による議論が有効である。

2.3 測定法の問題

地震予知のための研究は当然息の永い観測が必要とされる。したがって、予知のためにどんなに有効と思われる地球化学的指標があったとしても、連続観測が技術的な困難なものは現実性がない。Rnが早くから実用化したのは、それがもつ放射能のために測定が比較的容易であったためと思われる。また有効性が早くから指摘されていたHeの研究があまり普及しなかったのは、技術的な困難が大きかったことによるものであろう。例えば後に述べる地殻歪によるガス放出の研究を行った Tugarinov and Sardarov⁶⁾は現場に設置された質量分析計を使用し、また土壌中のHeの研究を行った Reimer⁵⁾も質量分析型He検出器を利用した。しかし質量分析計は高価であり、かつ実験操作が極めて繁雑である。また同位体比測定は別と

してガスの絶対濃度の測定は比較的誤差が多いといわれている。従って、地震予知のためのルーチン観測向きではない。

一方、筆者は早くからガスクロマトグラフ法の利用を提唱していた⁷⁾これは1950年頃から市販された機器で、値段も質量分析計の数10分の1程度、しかも分析操作が比較にならない程簡便である。ガス分析には一般に真空技術とか、温度、圧力補正といった複雑な操作がつきまとうが、ガスクロマトグラフ法によれば、これらの操作は一切必要なく、大気下で試料ガスを注射器を用いて注入すれば精度のよい分析結果が得られる。分析可能な成分はキャリアーガス、分離カラムの種類等により異なるが、ここで主にとりあげる H_2 , He , Ne , Ar , N_2 , CH_4 はモレキュラーシーブ5Aの8mカラムと酸素キャリアーの使用により50分以内に分析可能である⁸⁾。

この方法の特長は個々のガスの絶対濃度の測定精度もさることながら、相対量が極めて精密に測定できるということである。それは記録紙上に描かれる各成分ガスのピーク面積の比がそれらの体積比(モル比)に比例するから、定量時における温度、圧力の変動などに由来する注入量(全モル数)の変動と一切無関係に面積比が決定できるためである。図-1は筆者が設置している観測点において、分析の補正の為に1日1回測定している標準ガスの He/Ar の面積比を示したもので、か

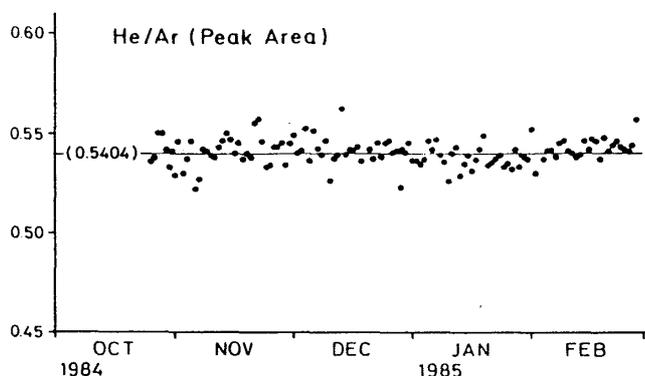


図-1 白狐観測点における標準ガスの He/Ar の面積比の測定値の変動例(1日1回正午測定, 平均値と標準偏差は0.5404および0.0067である。)

なり長期に亘って安定していることがわかる。同一カラムを長期間使用していると、カラム劣化によるピーク保持時間の短縮でピークの形が崩れ、この比は幾分変わってくるが、常に試料ガスと標準ガスを同じ条件で測定しているため、各ガスの体積比の精度は変わらない。比をとらず各ガス成分の絶対濃度を測定しようとするれば、誤差はさらに大きくなる。1日4回の試料と1日1回の標準試料を測定して、カラムは6~8ヶ月間使用に耐える。使用後は脱水により再生が可能である。

ガスクロマトグラフは上記のように極めて簡便な装置であるから、比較的簡単に自動化できるという利点がある⁸⁾。筆者は大倉理研(株)製の自動観測器を使用して、現地における自動観測を実施しているが、順次改善され、最近の機種では月1回程度の保守、調整で通常は無人運転が可能となっている。さらに各ガスのピーク面積は積算計によってデジタル表示されるから、この結果を記憶させ、1日分のデータをまとめて一般公衆回線を利用して短時間内に伝送するシステムも試作された⁹⁾。得られたデータに対しては計算機による自動処理を行っている。筆者が現地に設置している測定-伝送のシステムの模式的ブロック図を図-2に示す。

2.4 観測点の問題

どういう場所で観測するかということは地震予知の成否に関わる重要な問題である。大気の影響のないなるべく深い井戸がよいことはいまでもないが、日本の水井戸は、水利用の立場から、比較的高間隙で透水係数も高い、第三紀層より新しい地層から揚水していることが多く、水の流動が速すぎて、そこでは多くの地下深部起源のガスが望めない。表-3はこのような代表的な水井戸である名古屋大学理学部構内の深井戸(深さ100m)の溶存ガス分析結果である。これをみると O_2 が著しく減少し、 N_2 が幾分ふえていて CH_4 がごくわずかに発生しているものの、他は $10^\circ C$ における大気の水への理論溶解量とほぼ等しいことがわかる。この $10^\circ C$ は地表水が地下に浸透し大気と交流を断たれたときの水温を意味する。つまり、このような水井戸で地震予知に役立つような深部起源のガスを期待することは難しいのである。

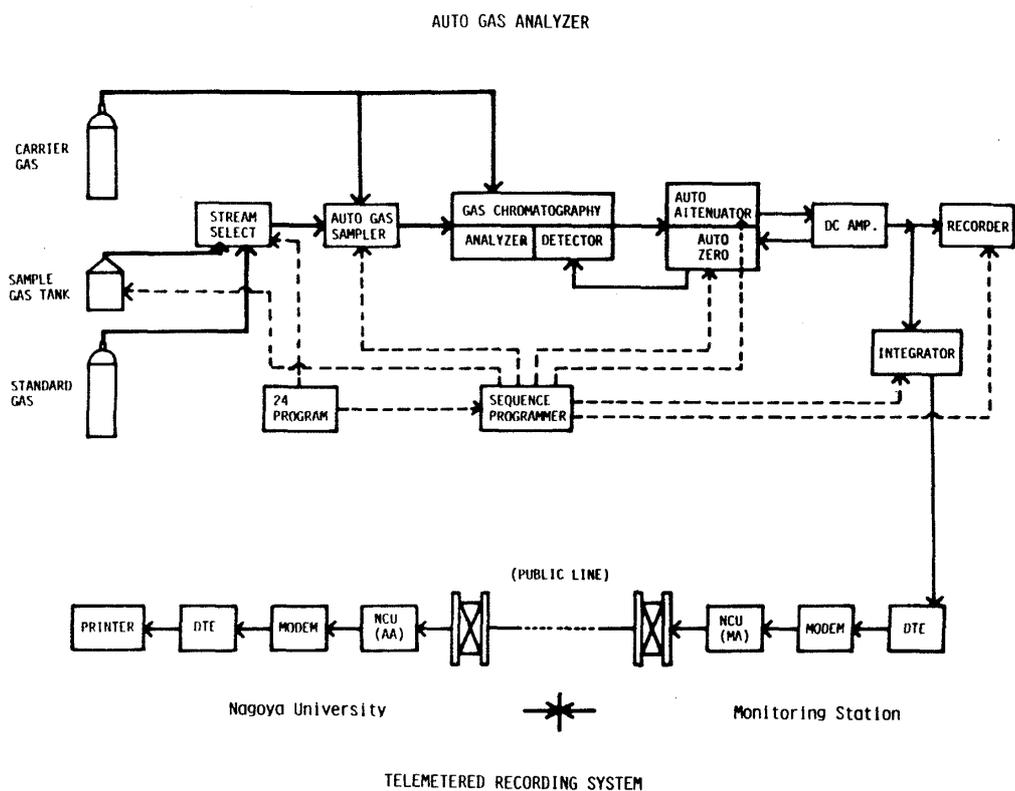


図-2 自動分析(上半)―伝送(下半)のシステムのダイアグラム(分析系はガスクロマトグラフ装置を中心に自動化してある。1日4回の試料測定結果と標準ガス測定結果は伝送システムに記憶され、1日1回定時(深夜)に一般電話回線を利用して名大へ伝送される。)

表-3 10°Cにおける水-大気平衡下にある溶存ガス(a)と深層地下水の溶存ガス(b)との比較⁴²⁾

	a	b
ml/L	水温10°Cのとき1気圧の大気と平衡にある水に溶存するガス	名古屋大学東山構内深井戸溶存ガス(井深100m 水温15.5°C)
H ₂	0.000010	0.00078
He	0.000052	0.000048
Ne	0.00021	0.00024
CH ₄	0.0000	0.181
N ₂	14.6	17.6
O ₂	7.87	0.98
Ar	0.373	0.374

そこで地下深部との交流が期待される深部に達する断層が注目される。しかし断層中のガスを直接調べることも容易でない。地表で大気に触れずに地下深部から上ってくるガスだけを採取することは困難である。そこで、断層から湧出する水中

に溶存するガスを調べるのが有利であろう。ただし溶存ガスの抽出はあまり簡単ではないので、湧出する水の中に遊離ガスが気泡となって存在しておれば、この気相と溶存ガスとが溶解平衡に近いと仮定することにより、この気泡を分析することも一つの方法であろう。このように断層付近でガスの調査、検討を行い、観測地点を決定する手続きがまず必要である。

かくして筆者は中部地方における3観測点を選定した。図-3に示す白狐、湯谷、熱川の各観測点であり、何れも温泉、鉱泉から分離するガスを上記の自動観測器により測定し、データを名古屋大学理学部地震予知観測地域センターに伝送している。気体の成分は当然若干の変動はあるが、その一例を表-4に示す。これをみると、He/Ar比が犬山観測点のものを除くと何れも空気の50~200倍に達しており深部起源ガスの放出を示している。また図-3の犬山観測点においては極めて

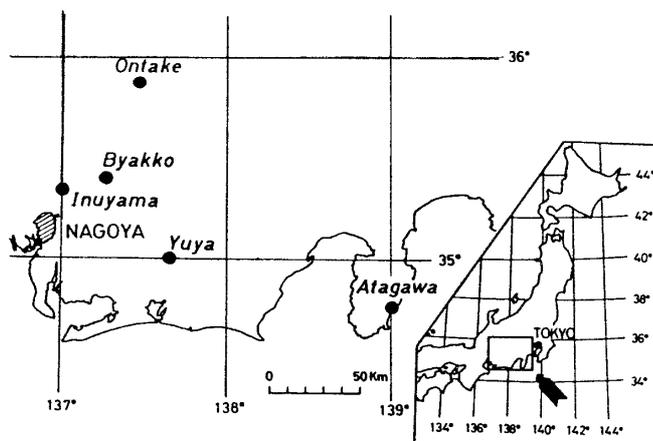


図-3 名大における地震予知のための地球化学的観測点(犬山観測点以外は図-2に示す自動分析-伝送装置を設置。御岳(噴気孔)については本文参照。)

表-4 各観測点における気泡ガスの組成と地質状況

観測点	白狐	犬山	湯谷	熱川
地質	白亜紀花崗岩	ジュラ紀砂岩	鮮新世砂岩	鮮新世安山岩
He (ppm)	645	7.3	337	228
Ar (%)	0.658	1.01	0.785	1.01
N ₂ (%)	84.2	93.6	92.0	87.1
CH ₄ (%)	13.9	0.0	6.30	0.0

(注) いずれの観測点も H₂ がときどき現れる。

湧出量が少いことと He/Ar 比が低いことのため自動観測器は設置していないが、2~4日間隔でガスを採取、研究室にもち帰って分析している。

3. 地殻歪による地下ガスの放出

地震は地下の応力による変形がある極限に達して生じる破壊現象であると理解されている。地震予知の為に行われている測地学的観測は土地の変形を監視しようとするものである。また歪の進行に伴って地下に微小割れ目が発生することも岩石破壊実験の結果から推定されていて、地震に先行するこの微小割れ目の発生を地震波速度変化などから推定しようとする試みも行われる。これらはいずれも地球物理学的方法による地震の先行現象の捕捉手段であるが、地球化学的方法ではこの先行現象をどのようにして捉えようとするのであろうか。

地震のときに地下水位が変動することは古くか

ら観測されていて、たとえば1933年3月3日三陸沖の地震が8,500 km離れたアメリカ西海岸の地下水位に影響を及ぼしたという例をはじめ¹⁰⁾この種の報告は数多い。また汽車の通過によって地下水位が動揺するという現象も早くから知られており、局所的におこる応力の発生と消散に伴う帯水層の圧縮と膨張のため、間隙水圧の上昇、降下が生じ、井戸水位の変動をもたらすものと解釈されている¹¹⁾。

これらの事実から気づくことは、地下に加わる応力による歪みに対して間隙中の圧力、つまり地下水圧は極めて鋭敏に反応するということである。そこで間隙圧、つまり地下水位の変動を地下の歪み変化の指標として使うということが考えられる。最近の中国における地震予知の事業を支えているものの一つがこうした地下水位の変動の調査であることはよく知られている。ただし日本では地下水利用量と降雨量とが中国に比べてはるかに多く、それが地下水位の変動を大きく支配しているため、地下歪みによる間隙圧変化に基づく地下水位の変動だけを抽出することが容易でない。

同じ流体で地下岩石中の応力変化に基づいて生じるガス体の挙動を調べて地震予知に利用する方法として Rn が浮かび上がってきたことは冒頭に述べた。このように地下の流体の挙動に着目し、これを利用して地震前の地下の歪変化を検出しようとするのが地球化学的地震予知の原理である。

しかし、地下の応力変化にガス組成が反応することを検討した研究は極めて少い。たとえば Rn の場合 Teng¹²⁾ などが行った周期解析による検討などはあるが、明確な結論が得られているわけではない。最近 Fleischer¹³⁾ は地下深部の Rn 濃度は地下の空隙体積の大きさを変化させる応力によって影響されると主張しているが、とくに実験的証明を示してはいない。

ところで、地下の流体が地下の間隙圧力と関係をもつという推論から地下水位の変動を調べた研究は古くからあった。たとえば地球は月の引力によって微弱な変形を示し、地球潮汐の現象を表わすが、この影響で地下の帯水層が圧縮または膨張する。その結果、地下水の水位が昇降変化するであろうという予想の下に Robinson は1938年 New

Mexico 州にある深度800 mの2つの掘り抜き井戸の水位を観測した。¹⁴⁾ここは海岸から1,000 m近くも離れていて海洋潮汐の影響は先ず考えられない。その結果、1日2回の水位変動の周期が観測され上記の予想を裏付けることができた。

以上のケースと同様に、地下の応力変化によって地下深部起源のガスが放出されるということを証明するには地球潮汐とガス成分との関係を検討することがよいと考えられる。Tugarinov と Sardarov ⁶⁾は地球内部からHeやArなど放射性起源のガスが放出される場合、この関係が観察されるのではないかと考えて深さ3 m~140 mの井戸や250 m~3,200 mの天然ガス井のガス成分の時間的変動を観測した。彼らの結果の詳細は与えられていないが、周期的なHe/Ar比の変動を認め、これは地球潮汐によって引き起されたものと推定した。

3.1 白狐温泉における観測

筆者は同様な考えから観測点の一つである瑞浪市白狐温泉におけるHe/Ar比の変動を観測した。¹⁵⁾この温泉は屏風山断層沿いにあり、鮮新世の瑞浪層群にうすく覆われた花崗岩の割れ目から湧出している。泉源は約100 m²の池を形成し、温泉水の湧出量は約800 トン/日と見積られる。水温は年間を通じて25℃と変わらず、また水は 30×10^{-10} Ci/Lのラドンを含む。池の各所では気泡が常に分離し、

それは約800 ppmのHeと15%程度のCH₄とを含む。He/Ar比は0.1と極めて大きく(表-4)、地下深部起源であることを示している。

このガスは水中に沈めた大きな漏斗に集められ、通常は6時間毎に自動ガスクロマトグラフに直接導入、分析されている。3時間毎の分析の結果では図-4に示すようにHe/Ar比の周期的変動が観測された。この変化に関係して以下のことが考慮される。①この地点は海洋から60 km以上離れており、高度は190 mである。したがって、海洋潮汐の影響は考えなくてもよいであろう。②温泉水の温度変化は1℃にも達しない。水温1℃の変化はガス-水の溶解平衡にあるときHe/Ar比における0.002の変動に相当する。実際に観測された変動幅(0.12~0.15)はこれよりはるかに大きい。したがってこの変化は水温変化によるものではない。③地球潮汐によってもたらされるこの地点での歪変化はHe/Ar比の変動とよく対応する。このことから気泡ガスのHe/Ar比を変動させる主な要因は地球潮汐による歪変化と考えられる。

この地点(137.2877°E, 35.3846°N, 高度190 m)における歪変化は均質な地球を仮定し、理論的に公表された式¹⁶⁾により計算される。面積歪として表わされた理論的歪変動曲線はそのまま実測のHe/Ar比の変動カーブと一致しないが、前者を4時間だけ後らせると両者はよく一致する。

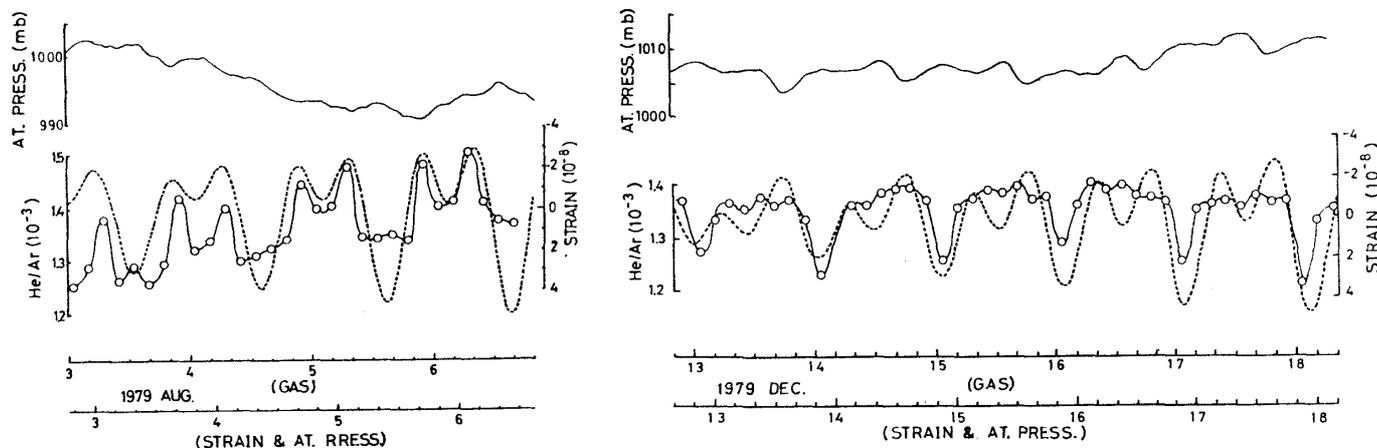


図-4 白狐観測点における気泡ガス中のHe/Ar比の変動(白丸と実線)と地球潮汐による理論的歪変化(点線)ならびに気圧変化(上側)

図-4 はその状況を示す。この観測は1979年の夏と冬に行われたが、夜間に He/Ar 比が大きくなる夏期に対し、冬期では昼間にその比が大きいのので、He/Ar 比の変動は気温とは無関係である。また冬には気圧の変動と関係があるようにみえるが、気圧は元々地球潮汐の影響を受けるし、夏期の大きな気圧変化と He/Ar 比のそれとは伴っていない。従って、He/Ar 比の変動は気温、気圧によって影響されたものではないといえることができる。そしてほぼ1日2回の周期は理論的地球潮汐の変動周期と対応している。

この図をみると He/Ar 比の増加は4時間のおくれがあるが、潮汐による圧縮量極大(図では負の歪)に対応し、減少は逆に伸張期に現れている。このことは高い He/Ar 比によって特徴づけられる地下深部起源のガスが圧縮下で地下から絞り出されてくることを示唆している。かくして温泉水に溶解している深部起源のガスは地表近くで気泡として水から分離するが、地下の圧縮力が小さくなると、深部起源のガスの分圧が相対的に低下し、He/Ar 比が低い大気中のガスがこの気泡に加わるものと考えられることができる。この解釈は前記の地下水位変動の場合と本質的に同じである。しかし、ガス質の変動が歪変化よりおくれるということはガスが地下深部から上昇するのに若干の時間を要することを示唆するものであり、これまたこの温泉水中のガスが深部から集められたということを示唆するものである。

3.2 湯谷温泉における観測

上記白狐温泉と同じ種類の観測がもう一つの観測点である愛知県南設楽郡鳳来町湯谷温泉の部落泉源において行われた。ここでは豊川左岸の中腹の鮮新世の泥岩露頭の割れ目から毎分約10L程度の鉱泉水が湧出しており、その水温は22℃である。また中央構造線が近くを走っており、地下深部との交流が示唆されるが、温泉水から分離放出される気泡ガスは He 200 ppm と CH₄ 12% を含み、地下深部に由来するガスであることを示している(表-4)。

その He/Ar 比の2時間おきの変動の測定結果と、この地点(137.6192°E, 34.9756°N, 高度95m)における地球潮汐により引き起される理論的歪変化を示したものが図-5である。白狐温泉の場合ほど両者の一致はよくないものの、変化の周期はよく似ていて、ここでも地下深部ガスが地下の歪により放出される機構を示している。

3.3 考察

上記に示した2つの観測例は He/Ar 比の変動が地下の歪の変化を反映している証拠と認めることができ、地球化学的な地下ガス組成の観測は地殻歪の検出に役立つことが期待できよう。図-4, 5に示すように潮汐歪は10⁻⁷弱のオーダーである。一方、地震をひきおこす歪は平均5.3×10⁻⁵と見積られている¹⁷⁾。従ってもしも観測点付近で地震をひき起す地下歪が発生したならば、これらのガス組成のうえに大きな変動が現れることが期待され

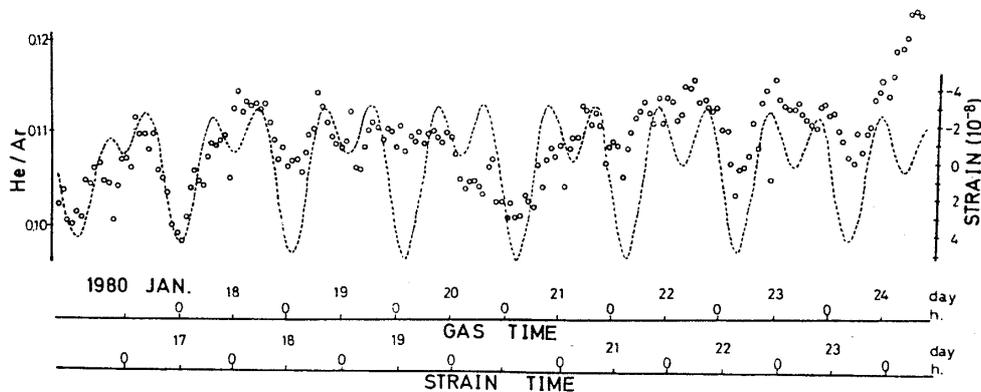


図-5 湯谷観測点における気泡中の He/Ar 比の変動(白丸)と地球潮汐による理論的歪変化(点線)

る。

ところで、筆者の所有するもう一つの観測点、静岡県南伊豆町熱川温泉における測定では、このような地球潮汐とガス組成との関係は認められない。この観測点は海岸にあり、海洋潮汐との関係も検討したが、目下のところ不明である。ここでは観測開始以来日が浅いので、将来の研究にまつことが大きい。

以上のべた種類のガス組成変動の観測例は少ないが、Rnの変動と地震との関係については若干の総括がある¹⁸⁾。地震と関係したRn異常の出現と地震の規模、震央距離、およびStrain stepの観測などから推定される歪の量との関係などをみるとRn異常は 10^{-8} の歪に相当する所まで観測され得るという報告¹⁹⁾もある。しかし、 10^{-8} の歪量は地球潮汐による歪変化量より小さい。そこで、Rnの長期観測に対しては潮汐歪がノイズとして働くので、Rnの異常がかくされてしまうようにも思われる。またRn変動と潮汐歪との対比の研究がほとんど公表されていないことも、Rn法にとって物足りない感がなくはない。しかし、多くの経験的観測からRn異常と地震との関係が認められる場合が多いことも疑いのない事実である。一般に測地観測では地球潮汐程度の歪を十分に感知する。それは地球物理学的方法が客観的に地震予知に役立つだろうと考えられている根拠の一つをなしている。地球化学的方法の正当性を主張する場合、この種の研究が不可欠であろう。

以上のことと関連して、重要なことは地震予知のための観測点の選定である。地下深部に由来するガス濃度の高いもの、例えばHe/Ar比の高いガスが観測点の資格であることは前述したが、この関係、つまり地球潮汐と地球化学的パラメーターとの対応も地震予知のための場所の選定にとって重要な判定材料となる。この種の研究を行っている我々の仲間の間で予知がうまくゆくかどうかはよい場所を選べるかどうかにかかっていることが、何となく認められている。中国の地震予知でもいろいろな前兆を的確に供給する、中国医学という“ツボ”に似た地点があるといわれている。ここでのべた方法は観測点の選定に対して客観的な手段を与えるものである。

4. 岩石破壊に伴うガスの発生

岩石が破壊されるとき、各種のガスが発生することは実験的に確かめられていて、 H_2 、 N_2 、He、 CH_4 、 CO_2 、Rnなどの放出が報告されている^{4), 20)}。地震は破壊現象であるから、その発生の際これらのガスの放出を伴うものと考えられる。前節では地殻歪による間隙体積の変化が引き起す地下ガスの放出現象をのべたが、ここでは破壊によって生成されるガスを取扱う。

4.1 断層から放出されるガス

地震という破壊現象に際して、最も明確に現れる破壊箇所が断層である。従って断層に胚胎し、もしくはそこから放出されるガスは破壊現象と関係したものと考えることができよう。図-6に示すように断層面にビニールパイプを埋設し、そこからガスを採取することが断層ガスの調査として一般に行われている方法である。筆者およびその協力者は主に中部地方の活断層中のガスをこの方法で採集分析した結果、断層ガスの種類に関する特徴が判明した^{21), 22), 23), 24)}。

- (1) 断層から放出される特徴的なガスは CO_2 と H_2 である。それらはいずれも断層破碎帯の中心部に集中している。
- (2) CO_2 は主に堆積岩、それも比較的若く、柔い段丘堆積物などに多く出現する。

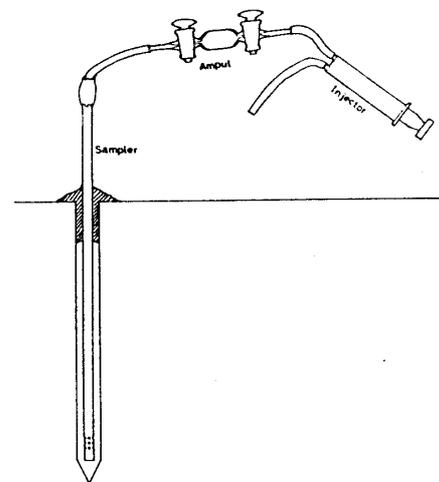


図-6 断層ガスの採取法 (左のビニール管は長さ1 m)

(3) H_2 は主に堅牢な基盤岩、とくに花崗岩などの火成岩や変成岩中の断層に出現する。

以上のうち CO_2 は夏期にピークがある季節変化を示すこと、その炭素同位体比が有機物のそれと類似していることなどの理由から、主にバクテリアの作用で生成したものであると結論された。それが断層中心部に集中してみられるのは、断層破砕帯では水や空気の流通が良いので、生化学的活動が促進されたためであろう。従って、基盤岩石から発生する H_2 が地震現象と関係していると考えられることができる。

本州中央部で調査した活断層とそこで得られた H_2 濃度を図-7に示す。同一の断層でも測定場所や時間によって著しい変動がある。この図はその観測された値すべてをプロットしてある。そして、最も高い値が観測された順序に断層を上から配列してある。この図で注目されることは、上方に配列した1,000 ppm以上の濃度が観測された8つの断層である。その1つ(飛驒断層, 仮称)を除き、他はいずれも阿寺, 山崎, 跡津川, 深溝, 根尾谷, 根来(中央構造線), 牛首といった本邦

で最も活動的な断層とみなされ、一般には微少地震を伴うか、歴史地震と関係していて、ここでは“歴史断層”とよぶものである。一方、同図の下の7つの断層は地形上、リニアメントが認められる他、第四紀層を切り、かつ野外で確認された破砕帯において試料が採取されたものであるが、最近活動的でないと考えられる“先歴史断層”である。後者のグループの最高 H_2 濃度は高々200~300 ppmにすぎず、前者のグループとは画然と区別できる。

これらの断層ガスはその試料採集法のうえから空気の混入が絶無であるという保証はなく、このような H_2 濃度の相違は空気の混入の度合いのそれに帰せられるかもしれない。しかし、先歴史断層のうち神坂断層と長平沢断層における試料採集の条件は他と異なり極めて優れている。飯田市と中津川市を結ぶ中央自動車道の恵那山トンネル(全長8625 m)は、多くの断層を横切っている。上記2つの断層は同第二トンネルのパイロット坑道掘削中にトンネル内に現われ、花崗岩内に極めて新鮮な破砕帯を露呈した。地表からの垂直距離はそれぞれ約400 mと約700 mにあり、地表風化は認められず、地上からの影響は無視できる。ここにボーリング機により深さ2 mのパイプを各3本ずつ埋設し、周囲はコンクリートで固めた。従って、

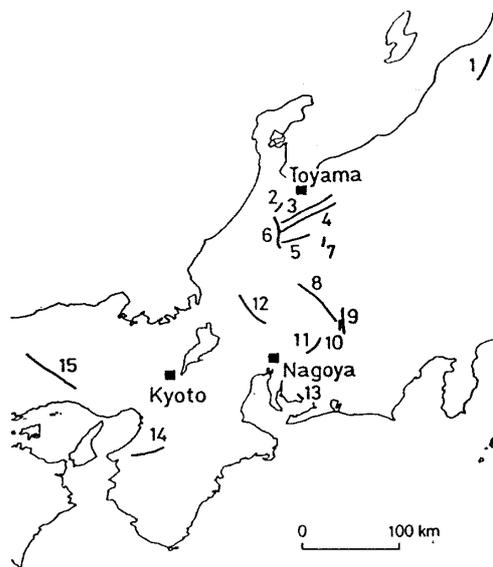


図-7(a) H_2 濃度が測定された活断層

1. 鹿瀬
2. 法輪寺
3. 牛首
4. 跡津川
5. 神原
6. 御母衣
7. 飛驒(仮称)
8. 阿寺
9. 長平沢
10. 神坂
11. 猿投
12. 根尾谷
13. 深溝
14. 根来(中央構造線)
15. 山崎

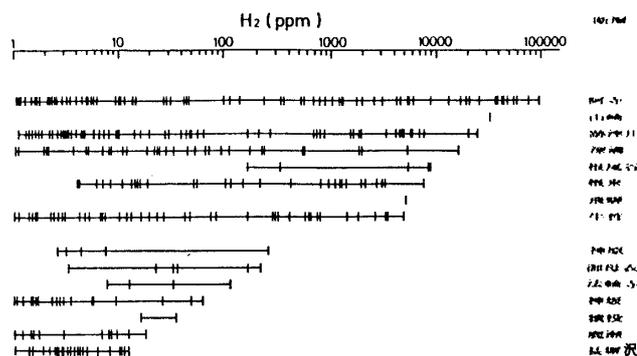


図-7(b) 断層破砕帯における H_2 (上の8つは飛驒断層(仮称)を除き、有史以来発生した地震にはほぼ対応されている。下は不明。鹿瀬,⁴³⁾根来,⁴⁴⁾山崎⁴⁵⁾の諸断層は他の研究者の測定結果による。それ以外のデータは筆者およびその協力者による。)

他の地表における打ち込みによるものよりはるかに有利なサンプリング条件が得られている。空気の混入が少ないことは断層ガス中の O_2 がいずれも少なく、最低0.3%のものもあることから示される。それにもかかわらず、ここでは最高100 ppm程度の H_2 が観測されたにすぎず、それも年々低下している。このように先歴史断層での H_2 は本来低いものであると考えられ、この図に現われた歴史断層と先歴史断層との H_2 濃度における相違は偶然のものとは思われない。その意義については後に再び触れることとする。

このように最近活動した断層で高濃度の H_2 が発生していることは、地震に伴う地下の破壊と何らかの関係があるという推論を導くものである。そこで次項には岩石を破壊したとき実際に H_2 が多量に発生することを示す実験について述べる。

4.2 水素の発生に関する実験

岩石または鉱物を真空中で破壊したとき H_2 が放出されるという実験的研究²⁰⁾や、また石英や花崗岩粉末と水との反応によって H_2 が発生するという報告はある^{25), 26)}しかし、これらの実験で発生する H_2 の量はごく微量であり、実際の歴史断層でみられるように数%に及ぶ H_2 の放出を再現したものではない。そこで、水と岩石との反応の実験を天然の条件に近づけて行うことを試みた。

実験は三角フラスコ内に岩石粉末を入れ、蒸溜水を加えて容器内で発生するガスを調べた。その結果、①温度が高いほど反応速度が大きい。②容器内の気相を O_2 で置換すると H_2 発生量が減少し、 Ar で置換すると増加する。③石英、長石よりもペグマタイトの方が H_2 発生量が多い、ということがわかった。

天然の条件では破碎帯内の気相/固相の容積比は極端に小さい。そこで反応容器中に多量の岩石粉末を入れ、気相部分の体積を小さくして、自然の条件に近づけることを試みた。使用した岩石粉末は300gでこれと80mlの蒸溜水を混ぜ、約200mlのペースト状のものを作り、これを250mlの三角フラスコ中に入れた。気相部分は他のガスで置換せず、空気のままとし、その容積は約50mlである。これを50℃に保ち、容器内のガスを逐次分析した。

用いた粉末は、(i)ペグマタイト（岐阜県苗木産）、(ii)花崗岩（愛知県足助産、武節花崗岩）、(iii)(ii)から抽出した黒雲母、ただし純度は約80%、(iv)(ii)から(iii)を抽出した残り、ほとんど石英と長石、(v)チャート（岐阜県上麻生産、三疊系、層状チャート）、(vi)泥質片岩（岩手県、三疊系）、(vii)泥岩（秋田県、新第三系女川層）、(viii)阿寺断層における断層粘土、(ix)神坂断層（恵那山トンネル内）における断層粘土、(x)沈降性シリカ（試薬特級）、以上10種類である。

以上の実験結果を図-8に示す。これを要約すると次のようになる。(1)いずれの実験においても H_2 の発生が認められるが、岩石の種類によりその発生量は大きく異なる。(2)とくに上記ペグマタイトは最高3%の H_2 が得られ、歴史断層破碎帯で観測されるものと匹敵する。(3)堆積岩でも H_2 は発生するが、火成岩に比べると比較的少ない。(4)石英、長石より黒雲母の方が H_2 発生能力が大きく、後者はペグマタイトや花崗岩の発生源の主要なものと考えられる。(5)実際に野外で高濃度の H_2 が発生している地点の断層粘土（上記VIII, IX）や水から沈降して生じたシリカ(X)の場合の発生量は極めて小さい。

また同じ花崗岩でも個体によって H_2 発生量は大きく異なり、表-5に示すように花崗岩で0.36~5.98%、玄武岩で0.94~7.66%と1桁以上の差を示した。

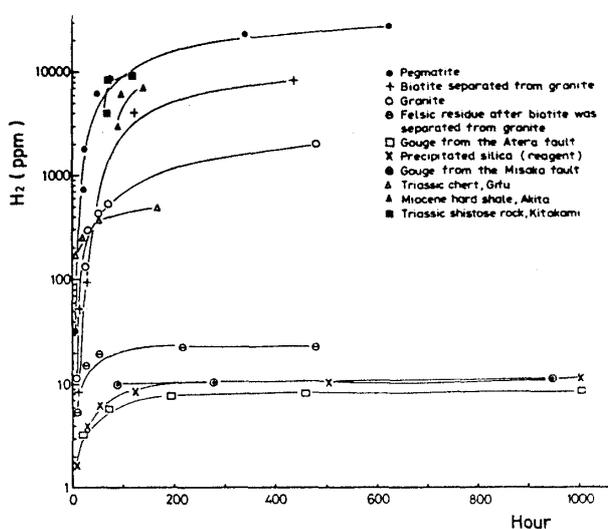


図-8 水素発生実験の結果（詳細は本文参照）

表一五 水-岩石反応実験における水素発生量*

岩石	H ₂ 濃度 (%)
[花崗岩]	
C-4 (足助)	1.17
稲武	5.98
下山	0.36
[玄武岩]	
坂下A	3.79
〃 B	7.66
〃 C	0.94

* 岩石粉末 300g と蒸留水 80ml 使用

4.3 考察

以上のべた活断層における観測事実と室内実験に基づいて地中 H₂ の起源を考察してみよう。真空中での岩石、鉱物破壊実験においても確かに H₂ は発生する。しかしその量は極めて少なく、また同時に CO₂ や CH₄ も同程度の濃度だけ放出されている。一方、火成岩などの破碎帯中では CO₂ や CH₄ がほとんどないという事実をみると、H₂ の発生はここに行った岩石粉末-水の反応実験結果と断層運動との関連性を前提として最も合理的に説明できる。

断層運動により地下深部の岩石が破壊され、それによって生じた新鮮な岩石表面が地下水と反応して H₂ を発生する。このような破壊は現在活動中の断層で著しく、一方、古い断層は活動的でないので破壊は進まず、発生する H₂ 量に関して図-7 に示すような歴史断層と先歴史断層との差を

生じたものであろう。

実験でわかるように H₂ の発生速度は時間と共に減少していく。したがって、歴史断層である阿寺断層の地表付近の断層粘土は常に水と接触しており、H₂ の発生能力を失っているため、室内実験では H₂ がほとんど発生しなかったと解釈できる。地下深部であっても神坂断層は先歴史断層で活動時期が古いため、やはりその断層粘土からは H₂ がほとんど発生しなかったのであろう。

この H₂ を発生させる反応機構についてはここでは触れないが、Schrader ら²⁵⁾ は鉱物破壊によってその表面に露呈したシリコン原子のラジカルが水と反応して H₂ を発生したことを主張し、また Sato ら²⁷⁾ は岩石中の二価鉄の役割を強張している。反応機構はとにかく、岩石破壊に際して、かなり大量の H₂ が発生することは地震の発生と関係して注目される事実である。

5. 事例(1)―大野群発地震―

断層破碎帯における高濃度の H₂ の存在ならびに岩石粉末と水との反応による H₂ の発生は、地震という破壊現象に関連して H₂ が発生する可能性を示唆する。その可能性を示す例が、前述の湯谷観測点において得られている^{28), 29)}

この観測点で湧出している温泉水中の気泡ガスにときどき H₂ が出現する。1981年以後の H₂ の観測結果を図-9 に示す。1日の変動量も大きいから、この図では1日4回の観測の平均値をプロットしてある。図中で水平の線は測定器の改造や故障などによる欠測を示し、それ以外のデータの

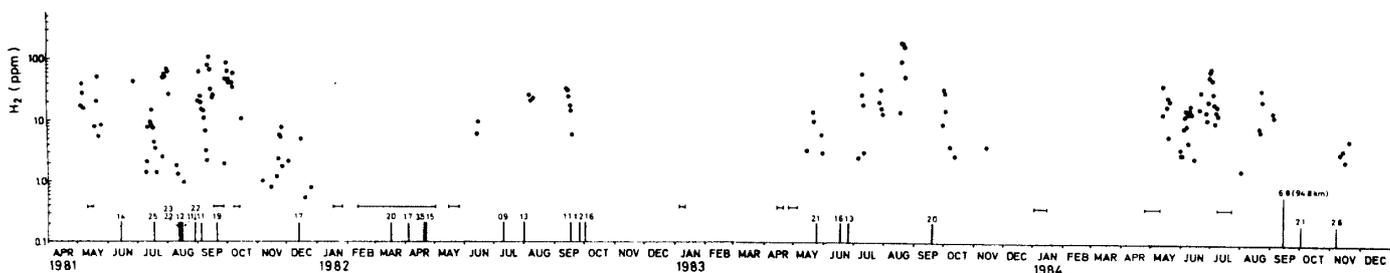


図-9 湯谷観測点における H₂ の発生 (黒丸) と大野群発地震 (縦線, その添え字はマグニチュードを示す。)(プロットしていない所は H₂ が発生していない。また水平線は欠測期間を示す。長野県西部地震 (1984年9月) は長い縦線で示すが、この夏には大野群発地震が起っていないことに注意。)

点がない所では H_2 が検出されなかったこと、つまり検出限界 (0.5 ppm) 以下であることを表わしている。そして H_2 はある期間継続して出現するが、その期間内でも 1 ppm から 200 ppm に及ぶ 2 桁の変動幅を示している。この観測期間内で、後にのべる長野県西部地震 (1984年9月14日) を除くと近くで大きな地震は起っていない。そしてこの期間に起きた地震と H_2 発生との関係を整理した結果以下のことが明らかとなった。

この観測点のごく近い所に規模の小さい地震がある期間に頻発する。図-10にその震央分布を示すが、それらはこの観測点の南約3kmの西北西-東南東の線上に近く分布している。また、その震源の深さは1~14kmにわたっている。震源決定に際しての誤差を考慮に入れると、この震源分布は直線に近いとみなすことができ、その分布状態は大野部落を横切る活断層の存在を想定させるものである。野外の事実として、豊川に沿う河床では破碎帯が確認されている。また同部落の西側で豊川の流路が約200mずれていて、右ズレの運動を示唆している。この線に沿う地震はある期間に集中して起っており群発地震と考えることができる。ここでこの断層を大野断層、地震を大野群発地震とよぶこととする。この地震は図-9の横軸に縦線で示され、その数字はマグニチュードを示す。1984年の夏を除くと、 H_2 の変動は大きいものの、それは大野群発地震の起る10~40日ほど前から出現し、地震が起っているほぼ全期間にわた

って継続して放出されている。

以上の観測事実からつぎの推論を導くことができる。“大野群発地震の活動期になると、震源付近の岩石が破壊される。その破碎岩石と地下水とが反応して H_2 が発生し、それが深部から湧出する湯谷温泉のガス中に現れた。”つまり前項でのべたように岩石粉末と水との反応と同じような反応が地下で起っているものと考えられる。これらのもつ意義と1984年夏期に出現した H_2 については後で触れる。

6. 事例(2)—長野県西部地震—

中部地方で観測を始めてから、この地方で起った最大級の直下型地震が“長野県西部地震”である。それは1976年以来長野県王滝村を中心として活発であった群発地震の中央部に1984年9月14日に発生したもので、マグニチュード6.8、震源の深さ2kmとされている。さらに大規模な山腹崩壊を誘発し、29人の人命を含む甚大な被害をもたらした。

この地震は筆者により設定された地球化学観測点から比較的近かったので、地震と地下ガス組成との関連性を検証するのに好適な機会であった。即ち白狐、犬山、湯谷の3観測点に対する震央距離はそれぞれ50km、71km、および95kmであった。また震央距離177kmの熱川観測点では顕著な事実は観察されなかった。

震源地から最も近い白狐温泉における He/Ar 比の変動を図-11に示す。上側の図-11(a)は1日4回の各平均値をプロットしてある。これを見易くするために各10日分のデータを移動平均して描き直したのが下の図-11(b)である。これをみると He/Ar 比は小さな変動をくり返しながら1982年以来増加を続けてきた。移動平均処理後の図で認められるいくつかのピークはいろいろな地震との対応が明らかな場合もあるが、しからざる場合もある。かくして He/Ar 比は1982年以来増加を続け、1984年4月7日頃ピークに達し、その後急減し、7月29日頃極小値を示した。その後、増加に転じてから約45日後に地震が起った。図では示さないが、 N_2/Ar 比、 CH_4/Ar 比も同様の変化

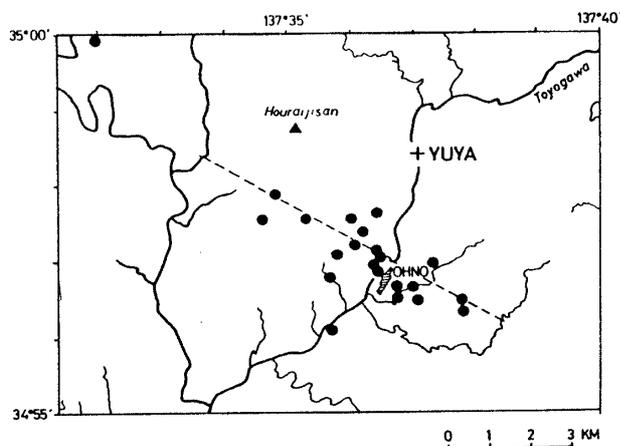


図-10 湯谷観測点と大野群発地震の震央

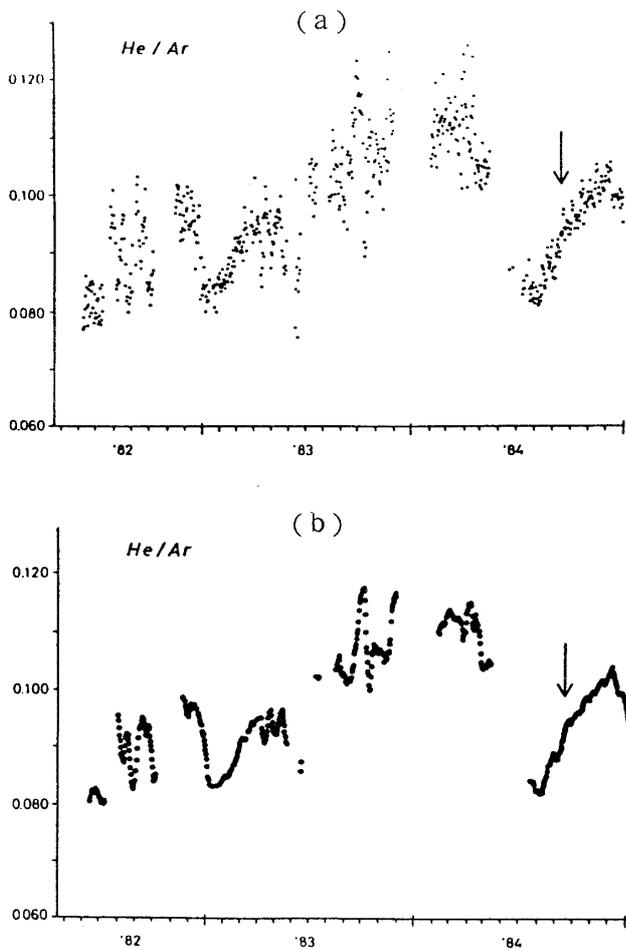


図-11 白狐観測点におけるHe/Ar比の変動

(a) 1日4回の観測値の平均

(b) 上の各点を10日分のデータについて移動平均したもの(3日以上データの欠落があると平均はそこで打ち切れ、次のシリーズから再計算された結果をプロット。)(矢印は長野県西部地震)

をたどった³⁰⁾前項においてのべたようにこの地点におけるHe/Ar比の変動は地球潮汐による歪変動と関係しているから、図-11に示す曲線はこの観測点近くに働いた歪変化を反映したものと考えることができる。時期的ならびに地理的にみて、この曲線で示される歪変化は長野県西部地震に関係したものと判断してさしつかえないであろう。

震央距離95kmの湯谷観測点においてはHe/Ar比よりもCH₄/Ar比が白狐観測点におけるものとよく似た行動を示した。図-12にそれを示す。また犬山観測点においてはHe濃度が低いため確実な変動を検討することはできない。

つぎに各観測点におけるH₂の挙動は顕著であった。元々H₂は常時出現するとは限らない。He量との関係で検出限界が左右されるが、白狐温泉においてこの観測開始以来5年間、Heを検出したことはなかった。正確に言えば、10ppm以上存在しないとこの観測点における積算計にカウントされない。しかし、1984年9月2日からH₂のカウントが記録されるようになり9月4日頃ピークに達し、10日後に長野県西部地震の発生をみた。レコーダーチャート記録紙上には積算計にカウントされないH₂の小さなピークの出現が地震発生の1月前からみとめられた。これを用いてH₂変動を示したものが図-13である。また犬山観測点に

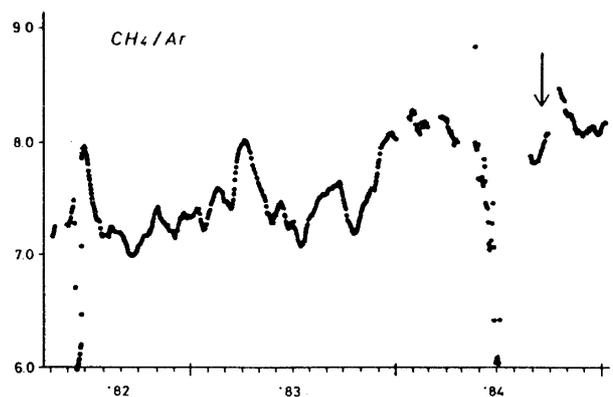


図-12 湯谷におけるCH₄/Ar比の変動(図-11の下の図と同様に統計的に処理してある。矢印は長野県西部地震。)

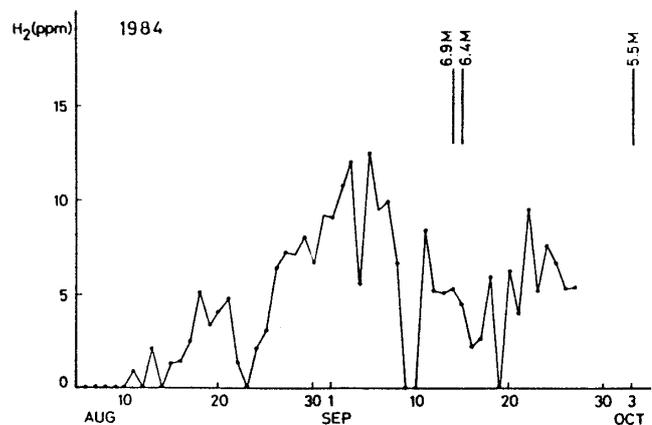


図-13 白狐温泉におけるH₂の出現と長野県西部地震とその余震(数字はマグニチュード)(8月10日以前、5年間H₂は観測器(積算計)に検出されなかった。)

おいては1~2ppm程度の H_2 はときどき現れるが、1982年以来5ppm以上の H_2 が検出されたのは1982年8月6日にこの地点から8.4kmのところに発生したマグニチュード3.1の地震の際と、長野県西部地震のときであり、やはり地震発生と H_2 の放出との関連性を示した。

前述のように湯谷観測点においては H_2 の出現は付近の群発地震と関連しているが、1984年の夏期には大野群発地震が活動しなかった。にもかかわらず H_2 が5月上旬から検出されていて、その原因が不明であったところ、9月14日の長野県西部地震の発生をみた(図-9)。ちなみにこの年の大野群発地震は10月2日(M=2.7震央距離2.7km)と11月7日(M=2.6震央距離5.5km)の2つが観測されているにすぎない。それ以前の観測結果からみて、5月上旬以降に出現した H_2 すべてをこれらの地震と関係づけることは時期的に無理がある。夏期を中心として出現した H_2 はこの長野県西部地震に関連したものと考えられる。

最後に触れておきたいのは御岳火山噴気孔ガス組成の著しい変動である。同火山は1978年秋、有史以来の沈黙を破って噴出した。その規模は大したものではなく、溶岩を溢出させるには至らなかったが、山頂付近にいくつかの噴気孔を作った。そのうちの一つの噴気孔が火山ガスの研究のために愛知教育大学 杉浦孜を中心として年1回主に夏期にガスが採取分析されていた。そしてHe/Ar比、 N_2/Ar 比、 H_2/Ar 比、 SO_2/H_2S 比等が年々増加し、1984年9月7日、長野県西部地震のちょうど1週間前には各成分とも、1981年ごろの数10倍~数100倍に達していた。地震の約2ヶ月後にはいずれも地震前の値に近く回復していることが認められた。He/Ar比の変動例を図-14に示す。この噴気孔は震源からの距離9kmであって、これらは地球化学的前兆現象が極めて顕著に現れた例として注目すべきものである。また後に述べることと関係して付言しておきたいのは、これらのガス成分の変動は地球化学的にみると深部に由来する火山ガス、換言すればより高温下に存在するガスの放出量が増大したことを示すことである。³⁰⁾

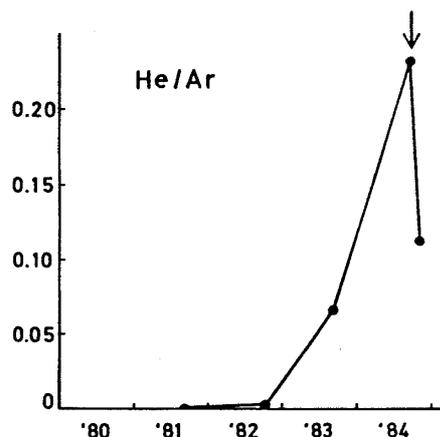


図-14 御岳火山噴気孔(長野県西部地震の震央距離9Km)におけるHe/Ar比の変動(矢印は長野県西部地震で、1984年の最初の値はその1週間前(9月7日)に観測された。)

7. 考察—地下ガス変動の要因と地震活動—

以上述べた基礎的な観測と実験ならびに地震時における地下ガスの挙動の観測結果を地震発生の機構と結びつけて考慮する。以上の説明からわかるように、ここで観測したガスの起源については2種類あり、一つは地下で何らかの原因によって生成、蓄積されているもの、他は破壊現象に伴って新しく発生するものである。Heが前者を代表し、 H_2 は後者の代表である。とすると両者の挙動はおのずから異なることが予想される。そしてその挙動は地震発生機構とどのように結びついているであろうか。

地震の発生に至る過程については1970年代の前半に盛んに議論され、二つのモデルが提出された。一つはNur³¹⁾、Scholzら³²⁾によるモデルであり、他は茂木³³⁾、Stuart³⁴⁾、Miachkinら³⁵⁾によるものである。我国では前者のScholzらによるものがダイラタンシー理論として主に紹介されよく知られているが、同じ頃提出された茂木らのモデルも本研究と関連して注目される。これらのモデルはいずれも岩石破壊実験の結果を参考とし、地震に伴う諸現象を説明しようとして提出されたものであって、共通して主張しているのは“地震の前の地殻歪が増大すると、岩石中に微小割れ目が発生する”こ

とである。この割れ目は Scholz らによると水で満たされると考える (ウェットモデル) のに対し、茂木らは地下水による割れ目の充填を重視しない (ドライモデル)。このいずれを採るかによって、予想される地震の前兆現象の出現のパターンが異なってくる。これらのモデルを検証しようと多くの試みが地球物理学的観測によって行われたが、明確な結論を得ないまま最近ではそのような研究は下火になっているように思われる。しかし、上の例で示されるように、とくに長野県西部地震の場合にはいろいろな観測点において地球化学的先行現象が観測された。これらは以上のモデルを検証する材料となり得るであろう。

まず He/Ar 比の変化であるが、たとえば白狐温泉における長野県西部地震に対応する He/Ar 比のピークは1984年4月上旬に現れ、地震はその約150日後に発生した (図-11)。He/Ar 比の変化は地下の歪変化により惹起されるであろうという観測事実 (図-4) に基づけば、図-11に示す1982年以後の He/Ar 比変化曲線は、この地域の歪変化を与える曲線と考えることができ、その歪は1984年3月迄増大し続け、その急激な減少後に地震が起ったと考えることができよう。この歪量変化と地震発生時期との関係は水の流入を重視しないドライモデルから推定されるもの (たとえば Miachkin ら³⁵⁾ による模式図) と一致している。このモデルによれば、最初の間テクトニックな歪の蓄積によって地下の微小割れ目が発達するが、つぎの段階では後に地震断層が起る限られた領域に歪が集中し、この断層領域以外では応力の低下によって割れ目が閉じる。断層領域では歪が進行し続けるが、それ以外の領域ではこの機構によって歪が減少する。これは岩石破壊実験において、最大応力値に達しても直ちに急激な破壊に至ることなく応力が徐々に減少する段階があるという事実より推論されたものである³⁸⁾。白狐観測点は震央距離50kmであり、以上のドライモデルと対応した He/Ar 比の変化を示したものであろう。

以上の推論と関係して御岳火山噴気孔のガス組成変化も注目される。前述のごとく、1984年の地震直前の観測値は地下深部の高温下の環境にある

火山ガスの放出速度が極めて高くなっていたことを示す。この機構として、地震をひき起した歪による地下流体の絞り出しが考えられる。活火山からの絞り出し現象として火山物理学の領域でよく知られているのはハワイのキラウエア火山の溶岩湖の湖面の高さの変動である。今から60年程前に Jagger³⁶⁾ が行った観測結果を理論的に検討した下鶴³⁷⁾ によると、湖面の高さの変動は地球潮汐による歪変化とよく対応している。溶岩湖は地下のマグマ溜りと垂直な通路を通してつながっており、地球潮汐の結果地下のマグマ溜りが圧縮されると、その分だけマグマが絞り出されて湖面が上昇するという解釈を下鶴は与えた (後の図-18参照)。これは前に紹介した大陸内の掘り抜き井戸の水位変動や白狐観測点における He/Ar 比の変動と同じ機構による説明である。長野県西部地震のときの深部起源の火山ガス放出量の増加に対しても同じ解釈が可能であろう。

御岳火山噴気孔ガスの変化と関連して、今一つ注目されることは、ガス異常の出現時期の問題である。例えば白狐観測点などにおける He/Ar 比のピークは地震の約150日前に出現している。一方、御岳火山の観測はいずれのピークも地震直前に現れているようにみえる。もちろん年1回の観測で詳しい議論はできないが、地震後の観測値と前のものを比較すると、そう解釈できる。ドライモデルによると、震央付近の異常現象は地震の発生時 (coseismic) とほぼ同時に起るが、震源地から離れるほどその異常は地震に先行すると推定されている。御岳山噴気孔は震央距離9kmであり、最も震源に近い観測点であった。このように、今回の観測結果はこのドライモデルの機構を支持しているように考えられる。これに関係して、地球化学的地震予知の契機となったタシセント直下型地震の際の Rn 濃度の変化も coseismic に起ったようにみえる。

以上 He/Ar 比変化を地震の発生機構と結びつけて考察してきたが、H₂ の発生についてはどう解釈されるであろうか。H₂ は He と異なり自然に生産、蓄積されているものではない。通常は検出されない観測点においてそれがあつた時期に放出さ

れることは、そのときに何らかの機構で H_2 が生産されることを示すものである。断層沿いの H_2 の発生機構と同じく、地震による破壊岩石と水との反応を考えるのが自然であろう。この推論を支持する証拠として放出される H_2 濃度の変動幅を挙げることができる。地震に対応する He/Ar 比などの変動は高々20~30%程度であるが、 H_2 のそれは $10^2 \sim 10^3$ のオーダーで変動する。これは H_2 が He や N_2 と異なる起源をもち、単なる歪変化による絞り出しでなく、新しくテクトニックな活動で生産されることを示唆している。 H_2 発生の室内実験によれば H_2 の発生量は使用する岩石粉末の量に比例している。前記の大野群発地震のときに発生した地震のマグニチュードは図-9に示すように0.9~2.5である。これらの地震によって発生したエネルギーは $1.4 \times 10^{13} \sim 3.6 \times 10^{15}$ エルグに相当し、その変動幅はほぼ 10^2 のオーダーであり、これは丁度湯谷観測点において放出された H_2 の変動幅によく一致している。一般に地震により破壊される岩石の体積は地震により発生するエネルギーに比例しているから、上記の H_2 の発生実験結果とあわせ考えると、地震によって破壊される岩石の体積に比例して H_2 が発生したものと推定される。

図-15は大野群発地震で1982年から1983年までの観測期間中、欠測期間を除いて群発地震発生時期を便宜上4つに分け、各期間内に発生した地震エネルギーの1日当りの平均値と観測された H_2 の1日当りの平均濃度との関係をプロットしたものである。これを見ると両者はほぼ比例していて上記の推論を支持している。諸外国の観測においても H_2 の変動幅は 10^3 のオーダーに及び、ここで示したケースと似た結果が得られているので、³⁸⁾ この H_2 発生に関する同様な機構を考えることができよう。

また実験に基づく推定からみると、白狐や湯谷の観測点での H_2 の発生は地下水の流入が関与しているように思われる。 H_2 発生の時期はいずれも He/Ar 比の低下の後であることから考えると、ドライモデルによる地震前の微少クラックの閉鎖のみならず、地下水の流入も同時に進行したもの

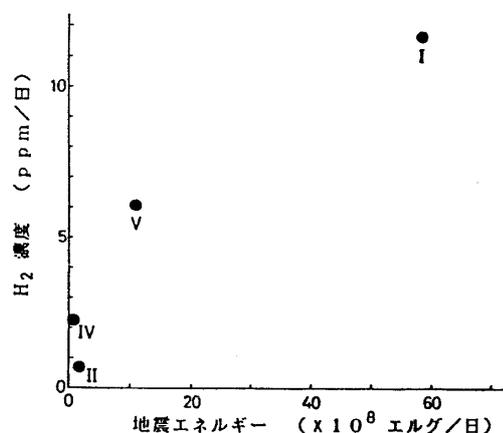


図-15 大野群発地震において発生された地震のエネルギーと H_2 発生量 (図-9における大野群発地震の発生時期を便宜上つぎの4つに分け、各々をローマ数字で示した。(I)1981年5月1日~10月15日, (II)1981年11月5日~12月25日, (III)1982年3月~4月, (IV)1982年6月10日~10月10日, (V)1983年5月10日~10月15日)

であろう。この点ウェットモデルとは矛盾するものではない。大野群発地震の震源は大野活断層沿いにあり、またその深さが1~14kmであることを考えると、地下水の浸透は当然予想されることである。

さて、白狐観測点において He/Ar 比などは、1982年以来逐次増大してきたが、 H_2 は長野県西部地震の直前に出現したという観測事実を上記までの推論と関連づけて考えることとする。既述のように初期の頃の He/Ar 比の増加は地下歪の増大による間隙圧の増大を示すものであろう。これは地球潮汐歪と He/Ar 比変化との関係から推定される。つぎの段階で H_2 が出現したという事実は、それ以前のクラックの他に新たにこの観測点付近で小規模な破壊または新しい微少割れ目が発生したこと、そこへ地下水が流入したことを示唆する。なぜならば、 H_2 は新しく生成した粉碎岩石、つまり新しい鉱物表面と水との反応により生成し、その反応後 H_2 発生の機能は失われることが、上記の実験や活断層の活動時期と H_2 発生量の関係などから結論されているからである。この過程が実際に進行したならば、 He/Ar 比の低下後に、新しい起源の地下ガスがこの破壊のために加わる可能性が生じる。その証拠として図-16を

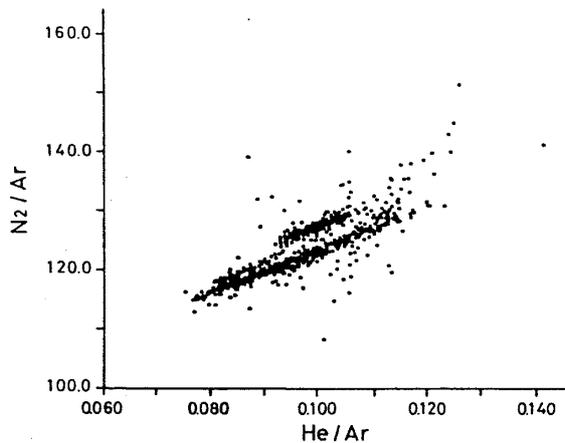


図-16 白狐観測点におけるHe/Ar比とN₂/Ar比との関係 (各点は1日4回の測定の平均)

描いた。このHe/Ar比とN₂/Ar比との関係を見ると、両者の相関は極めて高い。しかし詳細にみると、その関係は2つあるように見える。もしも回帰直線をひくならば、この図上に右上りの平行した2本の直線が得られよう。上側の直線を示す点群は上記He/Ar比のピーク期(1984年4月)後の観測値に相当し、下側のものはそれ以前のものである。下側の直線を最小二乗法で計算すると、

$$(N_2/Ar) = 444 (He/Ar) + 79.6$$

という関係が得られる。さて、HeもArも共に希ガスであり、化学反応にあずからないからこのような変化は機械的な過程を示すものである。また大気中におけるN₂/Ar比は85であり、He/Ar比は 6×10^{-4} で実際上0とみなすことができる。いま上記の回帰直線でHe/Ar = 0の点ではN₂/Ar比は79.6となり、大気値に近い。このことは、“白狐観測点のガス組成の変動は空気成分と地下深部起源の均質な端成分ガスとの混合比が地下歪変化によって変動した結果生じたものである”ということを明確に示すものである。この関係がHe/Ar比の低下後に上側の直線に移ったということは“それ以前と異なる新しい端成分ガスがこの混合に加わった”ということになる。その後しばらくしてH₂の発生をみることになるが、この新しい端成分ガスおよびH₂の発生はこの観測点において新しい破壊または微小クラックの発生を示している。換言すれば、地球化学的な観測から推論される“混合過程(Mixing effect)”な

らびに“新しい発生源の出現(Source effect)”はそれぞれ地球物理学的な“歪変化”と“破壊または新しいクラックの発生”に対応しているものである。

これらのことはいずれも岩石破壊実験などから推論される地震発生機構のモデルと矛盾するものではない。ただ、これらのモデルが予想する地球物理学的破壊領域は極めて小さく、このように震源地から遠い所でこの種の過程が実際に進行することは異論のあるところであろう。しかし、Dovrovolskyら¹⁹⁾の地震準備領域(Earthquake preparation zone)の考えは 10^{-8} に相当する歪変化の所までこのような現象が発生すると主張している。本研究の結果はむしろこの考えと調和的である。

最後に、このように新しい発生源から由来するガスも、その放出機構はやはり歪変化に左右されていることを指摘しておきたい。図-17に示すように、白狐観測点におけるH₂の発生の日変化は他のガスのそれと平行している。He/Ar比の日変化を支配するものは潮汐歪であることは前に述べたが、この図は起源の異なるガスもそのような影響下にあることを示している。

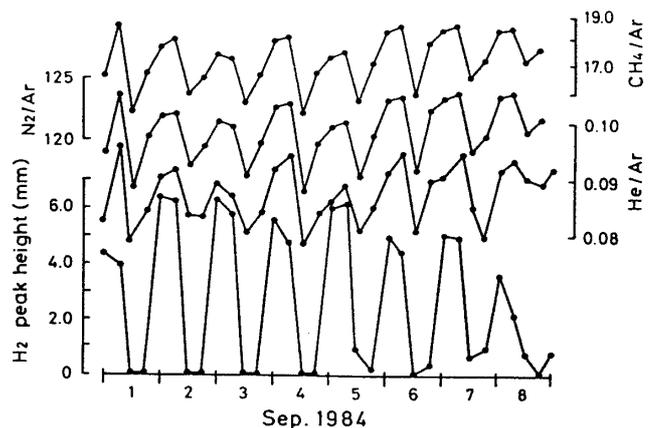


図-17 白狐観測点における各成分の日変化(いずれの成分も同調していることに注意)

8. 結論

以上、筆者とその協力者の研究を中心として地下ガスを利用した地震予知法の基本的考え方と実例を紹介してきたが、最後に実際の地震予知への

適用の実現性を展望してみよう。

まず地震予知の基本戦略であるが、緒言で述べたように物理現象である地震の予知が物理学的方法によって行われている現状は常識的には肯定されるけれども、方法として現行の物理的手段が最適かということは再考の余地がある。たとえば、観測モデル地域として地球物理学的観測が極めて密に行われている山崎断層で1984年の同断層に関係した地震の際顕著な前兆を示したものは電磁気観測であった。³⁹⁾これは地面の歪変化を直接測るのではなく、間接的に地殻変動を検知するもので、地球化学的方法と類似している。また長野県西部地震の際にも測地学的には前兆らしきものはほとんど捕捉されなかった。⁴⁰⁾

測地学的方法においては地下流体の動き、たとえば降雨の影響などは観測の擾乱源としてその効果を除く方向で取扱われている。

しかし、地球化学的な方法は地殻の力学的条件に支配されるこれら間隙流体の行動を追跡する。この場合観測地点が適当であれば、その増幅率は極めて大きいと考えられる。その理由をここに考えてみたい。現在測地学的方法としてその成果が期待されているものに体積歪計がある。図-18は前項で引用した下鶴によるハワイ、キラウエア火山の溶岩湖面の変動を示す模式図である。これは正に自然の体積歪計である。しかし、そのスケールを比較してみると、前者は高々100~200 mの深さにすぎないのに、マグマ溜りの深さはそれより

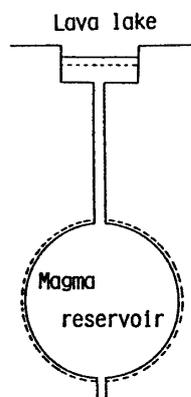


図-18 下鶴³⁷⁾によるキラウエア火山における溶岩湖面の変動を説明する模式図

1~2桁大きい。そしてその容積に至っては比較にならない。つまり広域的な歪変化を反映するという点で勝負にならない。伸縮計、傾斜計といった計器は 10^{-9} に近い歪に反応していることは事実である。地球潮汐の効果も確かに測定できる。しかし、その長さは精々200 mであって、地表近くの極めて局地的な歪を検出しているのではなからうか。表-3に示すように100 m程度の礫層中を流れているような地下水中のガスは、深部の情報を期待できないであろうことは指摘した。高感度の分析機器によってこれらごく微量なガスは測れるが、そのガスが地下深部の広域的な歪状況を反映しているものではないのである。それに反して、ここにとりあげた白狐や湯谷の温泉水はその性格からみて、かなり深部に由来しているであろうことは再三強調した。この種の水は降雨などの地表近くの影響を簡単に受けることはなく、その動きは広域的な地下の歪を反映しているであろう。その歪変化は断層など間隙のある部分に集中するから、そこに存在する流体は当然増幅された情報を提供してくれるものであろう。このように自然の作った巨大な歪計を利用して確実な情報を捕捉しようとするのが、ここにのべた地球化学的地震予知法の特長である。

また、この方法も単一な成分によるよりも多成分の観測の方がより効果的であることは容易に理解し得るところである。本文でとりあげた白狐温泉における歪変化と破壊現象に対応するガスの混合効果と発生起源効果といった推論は、ここに示したように多成分のガスの観測によって初めて可能となったものである。H₂だけとかHeだけの観測であれば、このように立入った議論は不可能であつたらう。幸なことに、このように多成分の間関係を同時に、しかも簡便かつ正確に測定できる機器としてガスクロマトグラフを容易に利用できる。しかも、自動化、伝送方式もテスト済みである。ハードの点からしても、この方法が実行可能であることは承認できよう。

この地球化学的方法を実行予算の面からみてみよう。測地学的観測所を1ヶ所設けるにはトンネルを穿つだけでも莫大な予算が要る。体積歪計埋

設の為のボーリング孔も然りである。これらの一基分の予算はテレメーターを備えた地球化学的観測施設の10ヶ所分以上に相当する。後者の10ヶ所はかなり信頼のできる観測網を形成できるであろう。

日本列島には、大小さまざまな断層がはりめぐらされていて、それに関係して深部に由来する流体が湧出してくる場所が多数ある。これらは自然が作りあげた歪計である。このような深部起源の流体を地球化学的方法によって検知することは、とくに日本の地質学的条件を考慮すると、地震予知のうえで大変有効であると結論できるのである。

謝 辞

ここに述べたプロジェクトは筆者が企画し、実行したものであるが、数多くの協力者なしにはその遂行は不可能であったろう。直接の協力者は名古屋大学で共に卒業研究を行った阿武裕志、武田浩、井戸正彦、柴田 智の諸君であり、また測定分野での支えとなって下さった方々は吉岡茂雄、山本鋼志、橋元由美子、上条文子、滝 清子である。愛媛大学の川辺岩夫ならびに富山大学の水谷義彦、佐竹 洋、中村則明、林 義光の方々とは共同して研究を行った。さらに藤井昭二、宇井啓高(富山大学)、桑原 徹(名城大学)、足立 守、鈴木和博(名古屋大学)の方々は地質学者としての協力を、また名古屋大学地震予知観測地域センターの青木治三、志知竜一、大井田徹、山崎文人および宮島力雄の諸氏は地震学者としての協力を頂いた。名古屋大学・深尾良夫、東京大学・茂木清夫の両氏には本文に記した地震発生機構に関する有益な御意見を頂いた。ここに誌して感謝の意を表明するものである。

また測定器の開発、改良、および修理に関しては大倉理研(株)の宮崎博夫、一岐白合雄両氏をはじめ同社員の方々の協力を頂いた。3観測点における地元の方々の御援助と共に感謝する次第である。

また本研究の一部は文部省科学研究費、自然災害特別研究および一般研究によって行われた。数値計算は名古屋大学大型計算機センターによった。これら関係機関に謝意を表明する。

参 考 文 献

- 1) Sadovsky, M. A., I. L. Nersesov, S. K. Nigmatullaev, L. A. Latynina, A. A. Lukk, A. M. Semenov, I. G. Simbireva, and V. I. Ulmov: The Processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asia, *Tectonophysics*, vol. 14, pp. 295-307, 1972.
- 2) Hatuda, Z.: Radon content and its change in soil air near the ground surface, *Mem. College Sci., Kyoto Univ., Ser. B*, vol. 20, pp. 285-306, 1953.
- 3) Okabe, S.: Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Mem. College Sci., Kyoto Univ., Ser. A*, vol. 28, pp. 99-115, 1956.
- 4) Jian, F., G. Li, and W. K. Kellog: Experimental studies of the mechanics of seismo-geochemical precursors, *Geophys. Lett.*, vol. 8, pp. 473-476, 1981.
- 5) Reimer, G. M.: Use of soil-gas helium concentrations for earthquake prediction: Limitations imposed by diurnal variation, *J. Geophys. Res.*, vol. 85, pp. 3107-3114, 1980.
- 6) Tugarinov, A. I., and Sardarov, S. S.: Changes in the flows of radiogenic gases from depth produced by elastic deformation of the earth's crust, *Dokl. Akad. Nauk SSSR, Earth Sci. Sect.*, vol. 223, pp. 20-23, 1977.
- 7) Sugisaki, R.: Changing He/Ar and N₂/Ar ratios of fault air may be earthquake precursor, *Nature*, vol. 275, pp. 209-211, 1978.
- 8) Sugisaki, R., H. Takeda, I. Kawabe, and H. Miyazaki, Simplified gas chromatographic analysis of H₂, He, Ne, Ar, N₂, and CH₄ in subsurface gases for seismo-geochemical studies, *Chem. Geol.*, vol. 36, pp. 217-226, 1982.
- 9) 名古屋大学理学部: 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, 地震予知連報告, vol. 29, pp. 256-259, 1983.
- 10) Toleman, C. F.: *Groundwater* (McGraw Hill Book Co.), 1937.
- 11) 酒井軍治郎: 地下水学 (朝倉書店), 1965.
- 12) Teng, T.: Some recent studies on groundwater radon as an earthquake precursor, *J. Geophys. Res.*, vol. 85, pp. 3089-3099, 1980.
- 13) Fleischer, R. L., and A. Mogro-Campero: Association of subsurface radon changes in Alaska and the northeastern United States with

- earthquakes, *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 49, pp. 1061-1071, 1985.
- 14) Robinson, T. W.: Earth-tide shown by fluctuations of water-levels in wells in New Mexico and Iowa, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 20, pp. 656-666, 1939.
- 15) 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.
- 16) Mikumo, T., and M. Kato: Time domain analysis of earth tide records, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.*, vol. 26, pp. 71-81, 1976.
- 17) Rikitake, T.: Probability of earthquake occurrence as estimated from crustal strain, *Tectonophysics*, vol. 23, pp. 299-313, 1974.
- 18) Fleischer, R. L.: Dislocation model for radon response to distant earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 8, pp. 477-480, 1981.
- 19) Dobrovolsky, I. P., S. I. Zubov, and V. I. Miachkin: Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure appl. Geophys.*, vol. 117, pp. 1025-1044, 1979.
- 20) Giardini, A. A., G. V. Subbarayuda, 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.
- 21) Sugisaki, R., M. Anno, M. Adachi, and T. Ui: Geochemical features of gases and rocks along active faults, *Geochem. J.*, vol. 14, pp. 101-112, 1980.
- 22) Sugisaki, R., M. Ido, H. Takeda, Y. Isobe, Y. Hayashi, N. Nakamura, H. Satake, and Y. Mizutani: Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity, *J. Geol.*, vol. 91, pp. 239-258, 1983.
- 23) 杉崎隆一・井戸正彦・武田 浩・磯部由美子・佐竹 洋・林 義光・中村則明・水谷義彦: 活断層より放出されるガス (1)炭酸ガスについて一断層ガスの化学的特徴と断層活動一, *地震*, vol. 37, pp. 45-54, 1984.
- 24) 杉崎隆一・井戸正彦・武田 浩・磯部由美子・佐竹 洋・林 義光・中村則明・水谷義彦: 活断層より放出されるガス (2)水素について一断層ガスの化学的特徴と断層活動一, *地震*, vol. 37, pp. 55-65, 1984.
- 25) Schrader, C. R., R. Wissing, and H. Kubsch: Zur Oberflächenchemie von mechanisch aktiviertem Quarz, *Z. anorg. Alleg. Chem.*, vol. 365, pp. 191-198, 1969.
- 26) Kita, I., S. Matsuo, and H. Wakita: H₂ generation by reaction between H₂ O and crushed rocks: An experimental study of H₂ degassing from the active fault zone, *J. Geophys. Res.*, vol. 87, pp. 1079-1095, 1982.
- 27) Sato, M., A. J. Sutton, and A. McGee: Anomalous hydrogen emission from the San Andreas Fault observed at the Cienega Winery, central California, *Pure appl. Geophys.*, vol. 122, pp. 376-391, 1984.
- 28) Sugisaki, R.: Relation between hydrogen emission and seismic activities, *Pure appl. Geophys.*, vol. 122, pp. 175-184, 1984.
- 29) 杉崎隆一・鈴木和博・山崎文人: 地震活動と地下からの水素の放出との関係一地震発生機構における意義一, *地震*, vol. 38, pp. 125-133, 1985.
- 30) Sugisaki, R., and T. Sugiura: Geochemical indicator of tectonic stress resulting in an earthquake in central Japan, 1985, *Science*, vol. 229, pp. 1261-1262, 1985.
- 31) Nur, A.: Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of t_s/t_p travel times, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 62, pp. 1222-1227, 1972.
- 32) Scholz, C. H., L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal: Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, vol. 181, pp. 803-810, 1973.
- 33) 茂木清夫: 岩石破壊と地震予知, *材料*, vol. 23, pp. 320-331, 1974.
- 34) Stuart, W. D.: Diffusionless dilatancy model for earthquake precursors, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 1, pp. 261-264, 1974.
- 35) Miachkin, V. I., W. F. Brade, G. A. Sobolev, and J. H. Dietrich: Two models for earthquake forerunners, *Pure appl. Geophys.*, vol. 113, pp. 169-181, 1975.
- 36) Jagger, T. A.: The lava tide, seasonal tilt and the volcanic cycle, *Month, Weather Rev.*, Mar., pp. 142-145, 1924.
- 37) Shimozuru, D.: Lava lake oscillations and the magma reservoir beneath a volcano, *Bull. Volcanol.*, vol. 39, pp. 570-580, 1976.
- 38) Mavlyanov, G. A.: Hydrogeochemical characteristics of some seismoactive zones in central Asia, *Academy Sci. Uz. SSR, Tashkent*, 1967.
- 39) 乗富一雄: 山崎断層における1984年5月30日, M = 5.5 地震に関連して観測された電磁気異常変化について, *地震学会予稿集*, No. 2, p. 12, 1984.

- 40) 上宝地殻変動観測所：1984年長野県西部地震前後の飛騨地方北部及び周辺の地震活動と地殻変動，地震予知連報告，vol. 33, pp. 135-143, 1985.
- 41) Sugisaki, R.: Genetic relation of various types of natural gas deposits in Japan, Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists, vol. 48, pp. 85-99, 1964.
- 42) Sugisaki, R.: Geochemical study of ground water, J. Earth Sci., Nagoya Univ., vol. 10, pp. 1-33, 1962.
- 43) 金折裕司・木方建造・千木良雅弘：河成段丘下の断層の地化学調査（その1）－河成段丘中の土壌ガス組成－，電中研，研究報告No. 381036, pp. 1-25, 1982.
- 44) 竹花康夫・小林洋二・脇田 宏・中村裕二：中央構造線根来断層における水素の放出，地震，vol. 35, pp. 103-115, 1982.
- 45) Wakita, K., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N., and Notsu, K.: Hydrogen release: new indicator of fault activity, Science, vol. 210, pp. 188-190, 1980.

(1985年8月19日受理,
1985年10月1日訂正受理)