

地質調査所における地下水・地下ガスによる地震予知研究の概要(その3)

地震予知・地球化学的研究グループ

2.2 地殻変動地域における土壤ガス中の化学成分の挙動に関する研究

地震の発生は地殻深部・マントル上部にたまった歪の解放(岩石の破壊)による現象であるが この解放に至る過程において地下では歪を引起す応力に対応して岩石中の気体は移動しやすくなる. また 応力により岩石中に微細なクラックの発達は一層ガスの放出を容易にし これらのガス体は地殻の弱線である断層あるいは破碎帯を通路として地上に放出されることが考えられる.

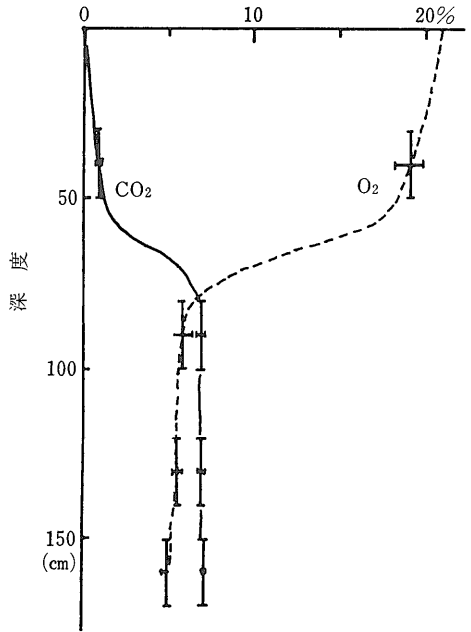
このような観点から 最近 地震予知技術に関する新たな課題として地下ガスが注目され 国内外において多くの研究報告がみられるようになってきている. 例えば 断層周辺の地下ガスの実態に関しては King, C. Y. (1978) Wakitaら (1980) Reimer, G. M. (1980) Sugisaki (1980) Ronaldら (1981) 竹花ら (1982) など. 断層周辺の地下ガス中の化学成分の経時的变化と地震活動との関係については 杉崎・志知 (1978) King, C. Y. (1980) Birchard, G. F.・Libby, W. F. (1980) Reimer, G. M. (1981) など. 岩石破壊による放出ガスに関する実験的研究としてはGiardini, A. A.ら (1976) 北京市地震隊水化学組 (1977) Kitaら (1982) など. 国内の断層周辺の地下ガス中の同位体比に関する研究も進められ ヘリウムについてはWakitaら (1978) Sanoら (1982) 水素についてはKitaら (1980) 希ガスの同位体組成については Alexander, Jr.・Ozima (1978) Nagao ら (1980) などがあり 今後さらに新たな知見が得られることが期待される.

当所においても 地下ガスによる地震予知の可能性を追求する立場から まず 断層周辺の地下ガスの実態把握を目的として 主に山岳地域の活断層 地震断層を対象として断層周辺地域の土壤ガス中の化学成分濃度 一部については経時的变化 ヘリウム同位体比の研究 岩石破壊に伴う放出ガスに関する基礎実験などを進めている. 以下にその概要を述べる.

2.2.1 土壤ガスの観測方法

1) 土壤ガスの採取法

土壤の構成物質は岩石の風化により土壤化した無機物と植物などの腐植物を主とする有機物からなり それら

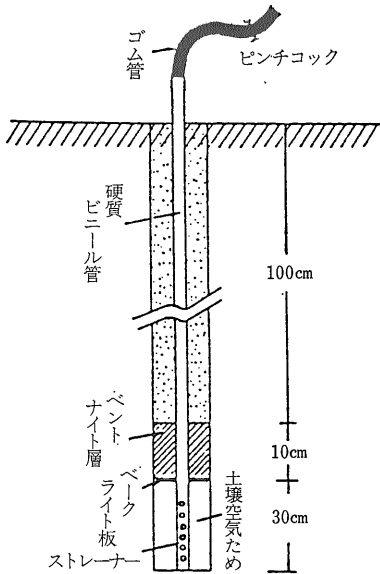


第27図 土壤深度別によるCO₂とO₂濃度分布

の空間は水及び空気で満されている.

土壤空気は 通常 ちっ素約80% 酸素と二酸化炭素の含量約20%であり 大気組成と大差ないが 細かくみると酸素がやや少く 二酸化炭素 ちっ素がやや多い. 二酸化炭素は有機物の分解や微生物などの活動により発生するもので 一般的には土中空気中の酸素と二酸化炭素の間には逆相関の関係がみられる. ところが断層 破碎帯などの存在は 微生物活動をうながしたりあるいはこれらの弱線を通路として地下からの二酸化炭素の供給などにより O₂+CO₂が20%を上回ることがある. また 低価の鉄 マンガンの存在は酸素の消費を進行させ やや酸欠状態も起り得る. そのほか 観測孔新設直後には水素の発生をみることもある.

大気の混入による影響: 土壤ガスの垂直的な組成分布を検討するため 茨城県関城町において深度の異なる観測孔 (50~170cm) を設置して深度別のガス分析を試みた. その結果を第27図に示す. 50cm 以浅の場合は大気組成に近く日変化もみられるが 100cm以深になると組成もほぼ一定する (地質調査所 1983b). 観測孔の深度を 1 m以上にすることにより大気の直接的な混入はかなり防止できる.



第28図 土壤ガス採取観測孔断面図

上記の結果から 地調では第28図に示す観測孔を設置して土壤ガスの採取を行っている。αトラック数の観測の場合は 土中に直径5cm 深さ80cmの穴をあけ同寸法の塩化ビニールパイプ(下部30cm間には通気孔をあけて

おく)を埋め込む。上部にゴム栓をし そのゴム栓に硝酸セルローズフィルム(例えばコダック製CA80-15, LR115タイプII)を吊して一定期間放置後回収し、水酸ナトリウム溶液でエッチングを行い トラック数を計測する。(加藤ら1981b)。

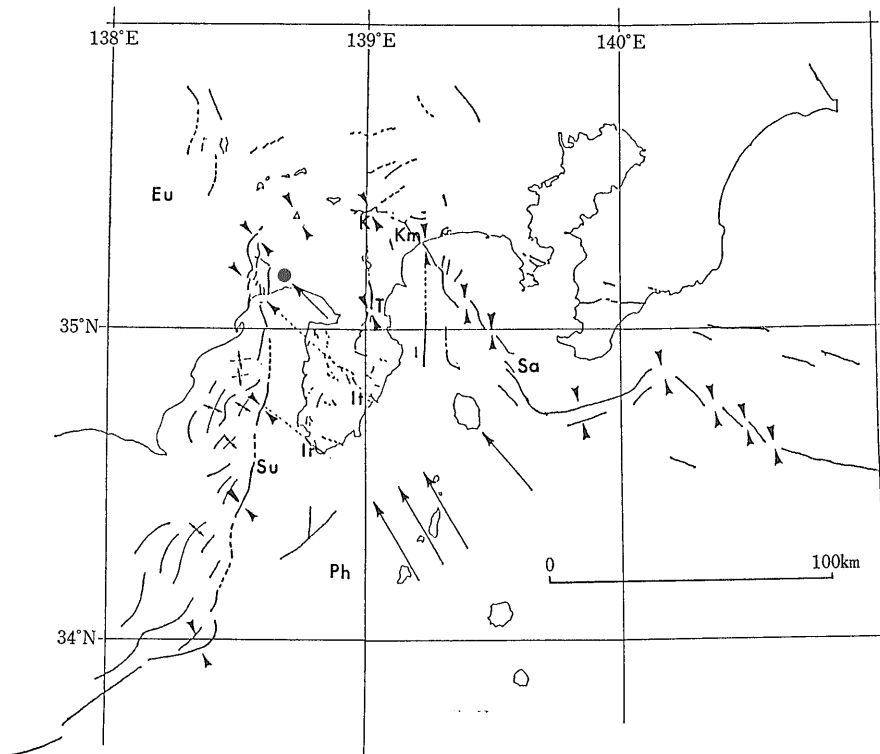
2) ガス分析法

土壤ガスの場合は現地において炭酸ガス検知管 あるいは二酸化炭素計によりCO₂量の概略値 酸素計によりO₂の概略値を把握し 観測点の設置位置の選定に役立っている。採取試料は実験室に持ち帰り ちっ素 酸素 二酸化炭素 アルゴン ヘリウム 水素 ネオン メタン等は ガスクロマトグラフ ラドンは ラドンカウンターにより分析を行っている。

2.2.2 主要活構造発達地域——神縄・国府津—松田断層——

この地域はフィリピン海プレート北端部に位置し 活断層の調査 地殻応力の測定などからいわゆる地震の「ツボ」と考えられている地域である(第29図)。

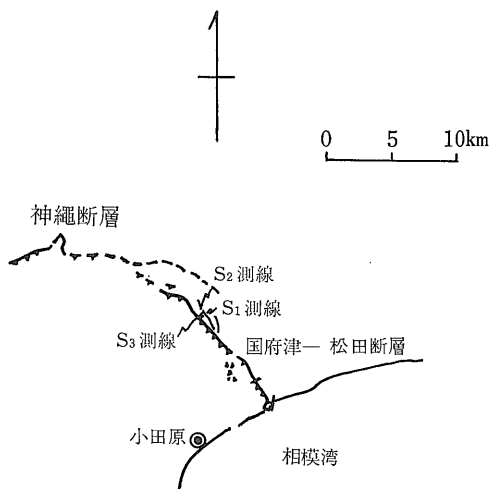
神縄・国府津-松田断層地域における土壤ガス観測位置を第30図に示す。



第29図 東海・南関東の活断層略図(小出1983)

- Su : 駿河トラフ
- Sa : 相模トラフ
- Ph : フィリピン海プレート
- Eu : ユーラシアプレート
- K : 神縄断層
- Km : 国府津-松田断層
- T : 丹那断層
- It : 稲取-土肥構造線
- Ir : 石廊崎断層

矢印は圧縮力の方向
 三角印の間が主な衝突点(昇階段状の屈曲またはギャップ)
 ● : 伊豆半島の圧縮中心(中村・島崎1981)

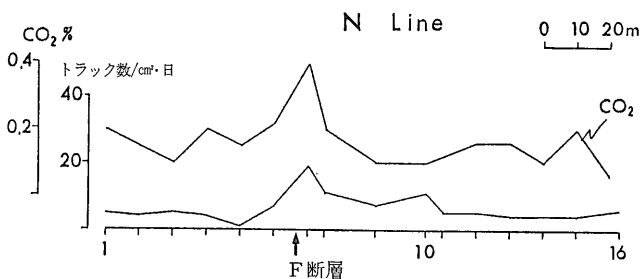


第30図 神縄国府津—松田断層地域における土壌ガス観測位置図

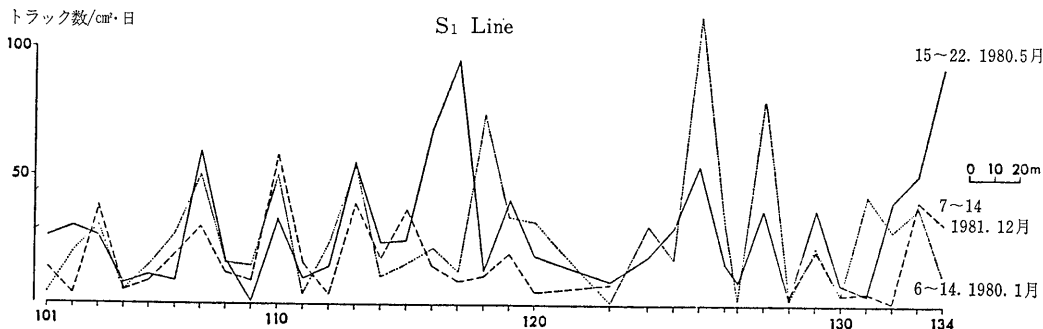
(a) 神縄及び新期南北断層

神奈川県山北町湯平平地区で神縄断層を横切る1測線(190m)上に20観測点 新期南北断層を横切る1測線(160m)上に16観測点を設置し 土壌ガス中のαトラック数と二酸化炭素濃度の測定を行った。

その結果 両断層地区ともトラック数及び二酸化炭素濃度のピークは星野ほか(1977)によって示された断層と一致した(第31図加藤ら1982)。



第31図 神縄新規南北断層における土壌ガス中のαトラック数及び二酸化炭素濃度分布



第32図 国府津—松田断層地域におけるS₂測線上のαトラック数の定期観測

(b) 国府津-松田断層

小田原市田島の鴨宮トンネル付近で新幹線沿いの測線(300m)上に70観測点 神奈川県大井町相互台で3測線(第30図)上に88観測点を設定し αトラック数の観測を行った。

その結果 田島測線上のαトラック数のピークは活断層研究会(1980)によって示されている国府津-松田断層系のd断層位置とほぼ一致している。相互台測線上ではαトラック数のピークが約10ヶ所にみられ 幅広い破碎帯の存在が推定される(第32図 加藤ら 1982)。

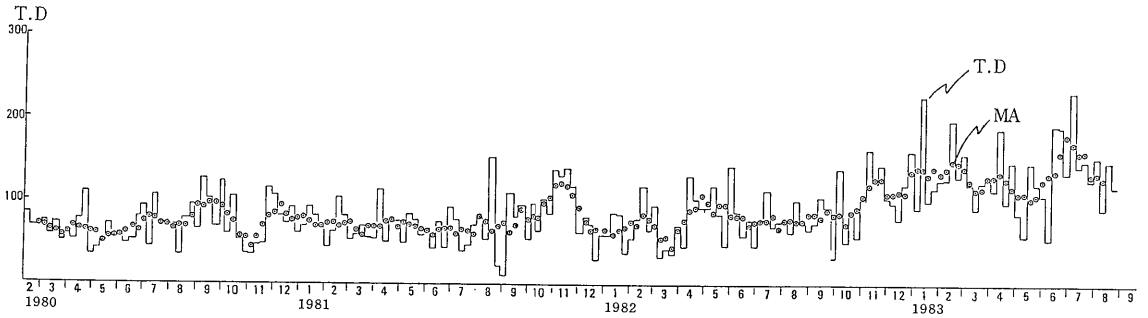
なお 相互台地区においては52年2月より8観測点を定点としてαトラック数の定期観測(1回/週)を実施中であるが 58年1月頃よりトラック数の増加傾向がみられる(第33図 地質調査所1984c)が 現在のところ増加とこの地域の応力変化との関連があるのかどうかは不明である。

2.2.3 主要活構造発達地域—阿寺断層—

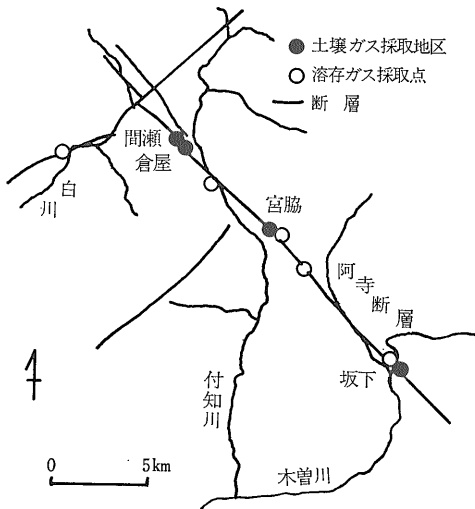
阿寺断層は中部地方を北西—南東方向に走る第一級の活断層である。断層の変位速度からは $2 \sim 3 \times 10^8$ 年に一度は大地震を起こしていることが推定されている。

土壌ガスの観測は第34図に示すように 北から間瀬 倉屋 宮脇及び坂下の4地区を対象として断層を横断する測線上に観測孔を設定し 化学成分濃度及び繰返し測定を行った。

その結果 本地域は花崗岩類が分布するためラドン濃



第33図 国府津—松田断層地域における土壤ガス中のαトラック数の定期観測結果図（8観測点のトラック密度の平均値(TD)と5週間の移動平均値(MA)）



第34図 阿寺断層地域における土壤ガス観測位置図

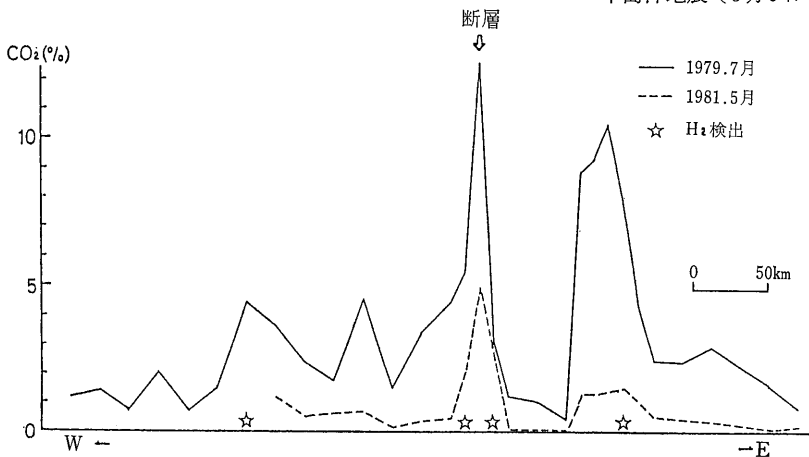
度のバックグラウンドが1,000~8,000cpmと非常に高い。また 断層近接部では10,000cpm以上の値を示す例も得られている。二酸化炭素濃度は間瀬及び坂下の測線の断層近接部に濃度ピークがみられ 夏季 冬季にかかわらず高濃度であり生物活動以外に地下からの供給の可能性が考えられる。間瀬の例を第35図に示す。ちっ素 アルゴン ヘリウムは各測線とも大気とほぼ同値である。水素は間瀬の断層付近の観測孔に新設当初0.3%の値が得られたが その後の測定では検出されていない。掘さく時の岩石と水との反応により発生したものと考えられる。

なお 阿寺断層系の副断層沿いに存在する越原鉱泉の溶存ガスはCH₄ 11.8% He 730ppm N₂/Ar 55.9を示し 深部起源ガスの供給が示唆される(吉川ら1982)。当該地域の観測井候補として今後とも測定を行う予定である。

2.2.4 主要群発地震発生地域——伊豆半島——

伊豆半島は昭和49年頃から半島内及び伊豆大島間で群発地震が活発化している地域で 現在までに1974年伊豆半島沖地震(5月9日 M6.9) 1978年伊豆大島近海地震(1月14日 M7.0) 1980年伊豆半島東方沖地震(6月29日 M6.7) など比較的大きな地震が相次いで発生している。

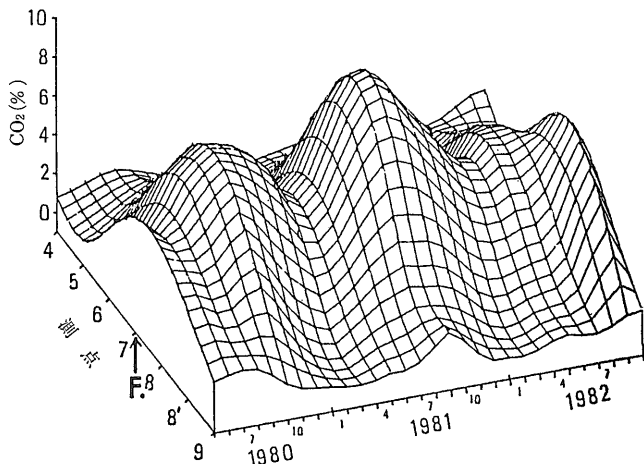
本地域では丹那断層系の年川浮橋地区及び1978年伊豆大島近海地震時に現出した稲取断層を対象とし 断層周辺の土壤ガス中の化学成分濃度ならびに経時的変化について検討を行っている。観測地区位置略図を第36図に示す。



第35図 阿寺断層間瀬地区における土壤ガス中の二酸化炭素濃度分布図



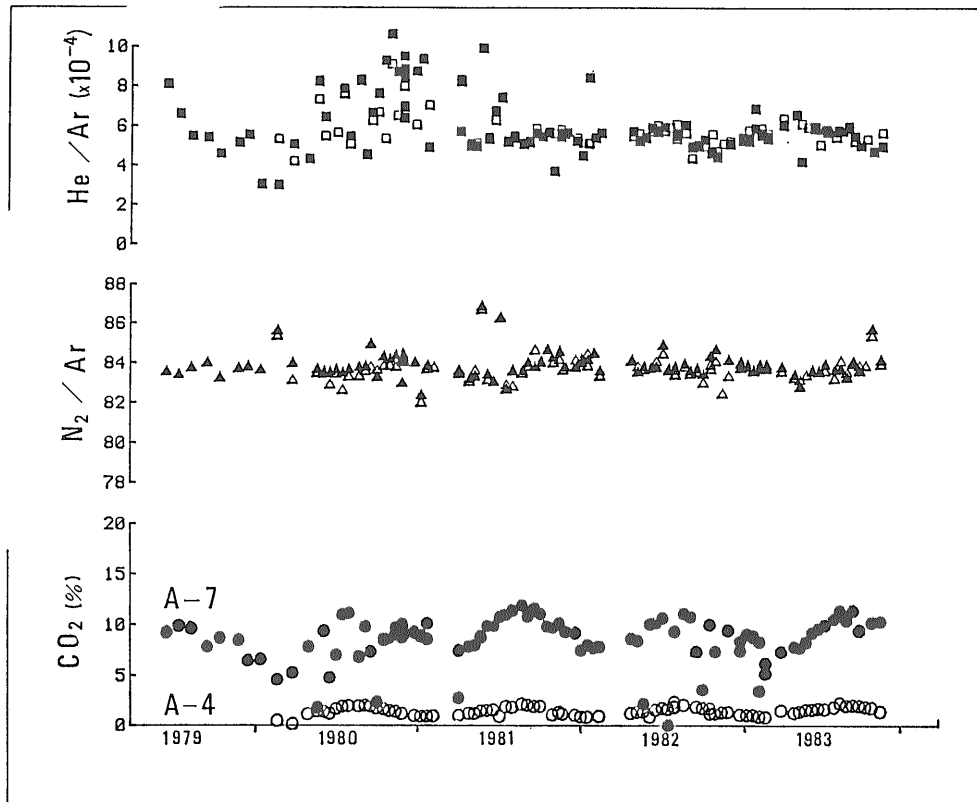
第36図 伊豆半島の活断層と土壌ガス観測地点位置略図 (1: 浮橋地区 2: 年川地区 3: 稲取地区)



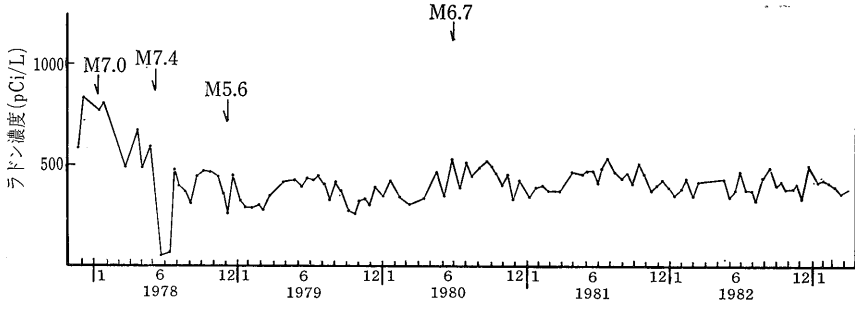
第38図 年川地区における土壌ガス中の二酸化炭素濃度の時間 空間分布 F: 断層位置

その結果 3地区の断層を横断する測線上のラドン及び二酸化炭素濃度は明らかに断層近接部で異常値を示し 断層を通して地下からの供給が考えられる (加藤ら 1981b). また ヘリウムについては稲取地区を除きヘリウムの同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) が $1.5 \sim 2.2 \times 10^{-6}$ ヘリウム ネオン比 ($^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$) が $0.3 \sim 0.7$ といずれも大気より高い値を示し 深部からの供給の可能性がある.

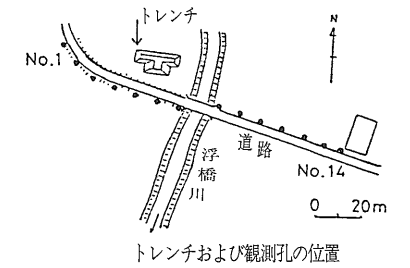
長期的観測 (2回/月の測定) の一例として 年川地区



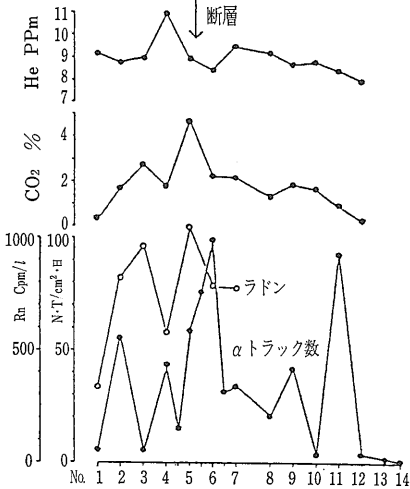
第37図 伊豆半島年川地区における土壌ガスの定期観測結果 (白スキ: バックグラウンド 黒: 断層直上部)



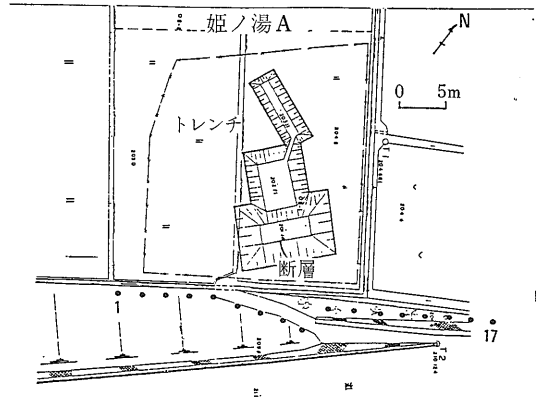
第39図
年川地区における土
壌ガス中のラドン濃
度の定期観測結果
(第36図の測点の測
定値を合計し点数で
割り平均値を求めて
表示)



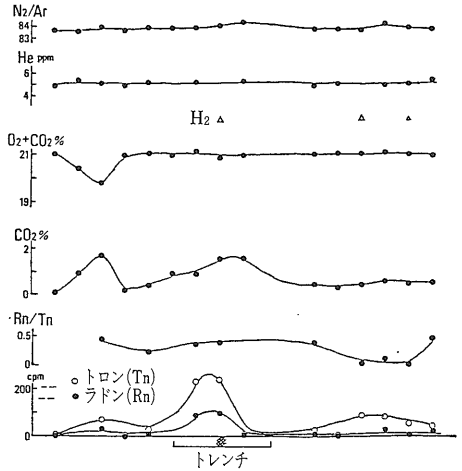
トレンチおよび観測孔の位置



第40図 伊豆半島浮橋断層周辺の土壌ガス中の
化学成分濃度分布



姫ノ湯 A 0 5m



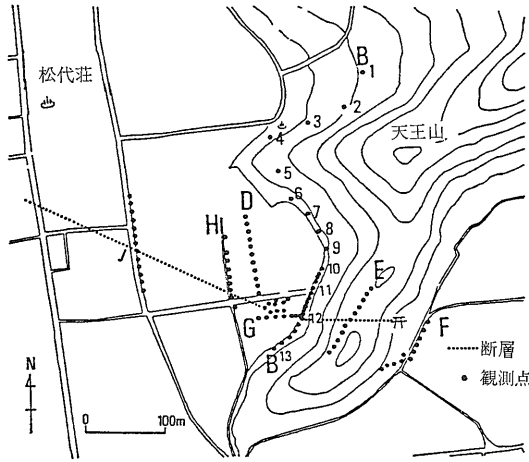
第41図 伊豆半島姫ノ湯断層周辺の土壌ガス中の化
学成分濃度分布

での測定結果を第37～39図に示す。

第37図中 A-7は断層直上 A-4はバックグラウンド値を示す位置である。断層直上部においては 二酸化炭素及びヘリウム濃度が高く 二酸化炭素には季節的变化がみられる。ヘリウムは55年6月下旬からの伊豆半島東方沖群発地震の頃から56年前半までは変動が大きく値も高いが それ以降はバックグラウンド値と同程度になっている。年川地区の各測点の観測測果を二酸化炭素濃度について時間と空間に対して三次元表示したのが第38図である。測線上の断層近接部に濃度のピーク 経時的には夏高冬低 59年度後半以降は低濃度の推移が読みと
1984年7月号

れる。

ラドン濃度の測定結果を第39図に示す。53年1月に発生した伊豆大島近海地震前後のラドン濃度は約800pCi/lで 平常値に比してかなり高い値を示している。53年6月の宮城県沖地震 (M7.4) 後には急激な減少がみら



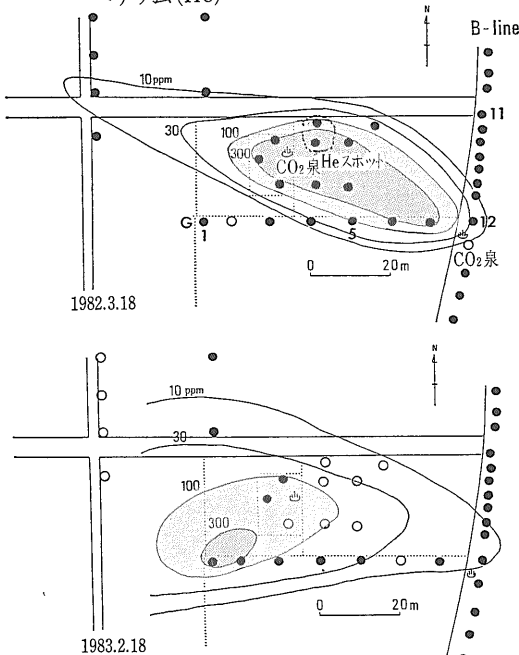
第42図 松代田中地区土壌ガス観測点図

れ 地殻変動に伴いガス供給量に変化したものと推定される。54年以降は 夏高冬低のパターンはみられるものの比較的低濃度で安定している(地質調査所 1983c)。

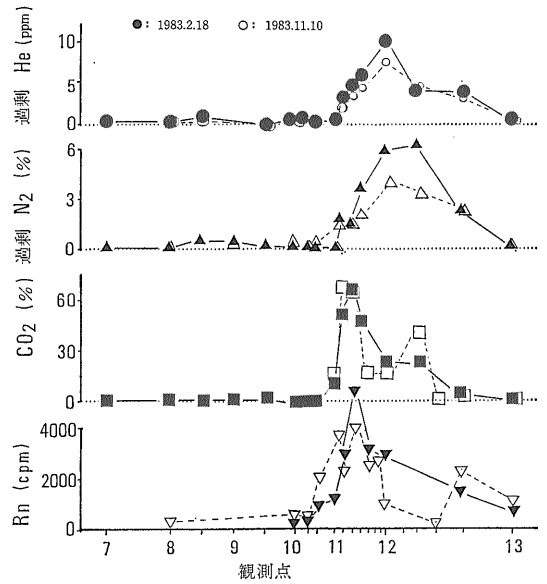
最近の伊豆半島の地震活動の静穏化と関連しているのかも知れない。

また 伊豆半島においては活断層調査の一環として浮橋及び姫ノ湯断層のトレンチ調査が実施されたが

ヘリウム(He)



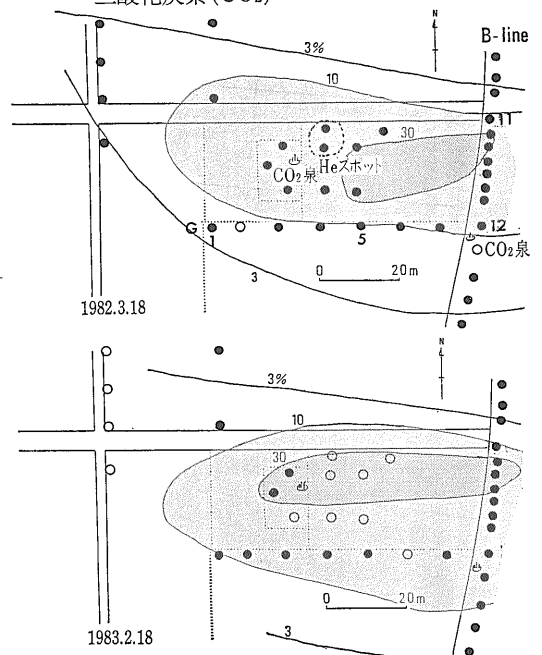
第44図 松代田中地区における土壌ガス中のヘリウム・濃度分布(1982.3.18及び1983.2.18測定)



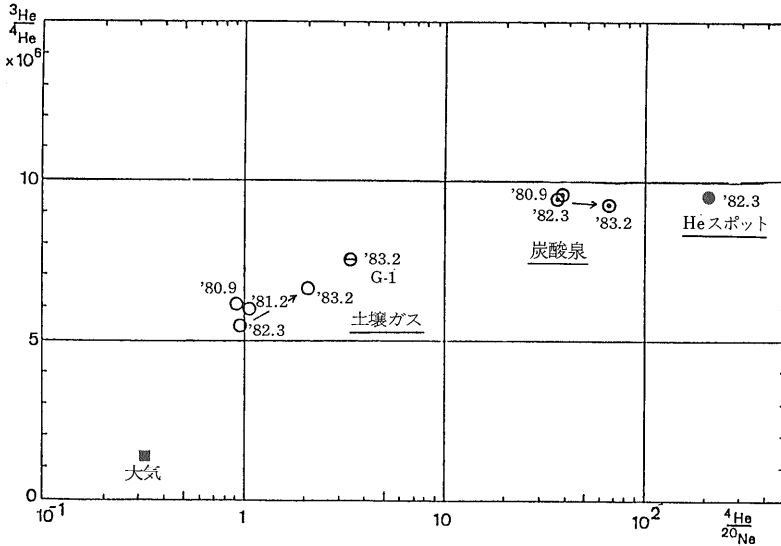
第43図 松代田中地区B測線における土壌ガス中の化学成分濃度の線返し測定結果(黒：1983.2.18測定 白ヌキ：1983.11.10測定)

これらの調査に合わせて断層周辺の土壌ガス調査を併行的に実施し断層と化学成分濃度との関係を明らかにした。

第40図は浮橋 第41図は姫ノ湯断層地区の結果である。
二酸化炭素(CO₂)



第45図 松代田中地区における土壌ガス中の二酸化炭素の濃度分布(1982.3.18及び1983.2.18の測定)



第46図
松代田中地区における土壌
ガス及び二酸化炭素湧泉中
の³He/⁴He ⁴He/²⁰Neの経
時的変化

両者とも断層近接部に二酸化炭素 ラドン濃度などに濃度ピークがみられ 断層指示成分として有効なことが示された。

2.2.4 主要群発地震発生地域——松代——

松代地域は昭和40～41年頃群発地震が活発化し 大量の地下水の噴出現象などが知られている。土壌ガス調査はこの群発地震時に現出した長さ 3km幅 0.5kmの地割れ帯に生じた地震断層を対象として行った。

調査地は東寺尾 瀬関 田中の各地区で観測点は約130点である。田中地区の観測点を第42図に示す。

測定の結果 各測線におけるラドン ヘリウム 二酸化炭素の濃度のピークは 群発地震の際生じた割れ目の方向とよい一致を示した。田中地区には多量の遊離ガス(CO₂ 96%)を伴う温泉が存在し 付近の土壌ガス中にはヘリウム300ppm 二酸化炭素70%と非常に高い値を有する点が存在する。温泉の近くにはヘリウムスポット(Wahitaら 1978, Nagaoら 1980)があり ヘリウム同位体比 (³He/⁴He)は9.5×10⁻⁶と空気(1.4×10⁻⁸)に比し約7倍の値が得られた。このように とくに田中地区の土壌ガスには深部起源と考えられるヘリウム 二酸化炭素等の供給が確認された(高橋・吉川 1982)。田中地区で得られたB測線の繰返し測定の結果を第43図に示す。断層位置は湧泉の位置などからNo.12の観測点付近と推定しているが 各成分とも断層近接部に高濃度のピークがみられる。

また 地下から供給されるガスと断層との関係について面的調査を行い 第44 45図に示すような結果が得られた。ヘリウム 二酸化炭素などのガスは炭酸泉 ヘリウムスポットを中心として断層方向に異常帯が分布する

が 二酸化炭素はヘリウムに比して広く拡散する傾向があること 濃度分布パターンは時期により異なることなどが明らかとなり 今後に予定される定点での連続観測点の選定についての重要な知見が得られた。

さらに 田中地区B測線の土壌ガスNo.12及び炭酸泉についてヘリウム同位体比 ⁴He/²⁰Ne 比の繰返し測定を行った結果 第46図に示すように ガス質は経時的に変化し この変化は供給源と考えられる炭酸泉の値の変化と調和的である。

以上 断層を中心とした土壌ガス中の化学成分の実態について概述したが 地下ガスの研究は58年度から特別研究として発足し 活断層周辺の地下ガスの化学成分の経時の変化と地殻活動との関係 連続的観測機器の開発 変動要因等のデータ解析手法 炭素同位体比 (¹³C/¹²C) の測定による生物起源 深部起源の判定などの研究を進め 新予知技術としての実用化を図ることとしている。

その他 岩石破壊に伴う放出ガスについては 花崗岩を試料とした一軸圧縮過程における応力, AE(微小破壊音)の変化と放出ラドン量との関係についての実験を行っている。今までに得られた結果によると 岩石破壊による放出ラドン量は 応力増加 AE発生開始とともにラドン濃度が高くなり 全破壊後に最高値を示す試料(ウラン2.3~7.5ppm, トリウム18~29ppm)と圧縮過程から全破壊に至るまで殆んど変化を示さない試料(ウラン1.9ppm, トリウム13ppm)とがある。この両者の違いは放射性元素の含有量の差に起因するらしい。また ここで放出されるラドンはトリウム系列の²²⁰Rnの壊変によるものと考えられる(加藤ら 1984)。今後 さらに各種の岩石について実験を計画している。

3 おわりに

昭和53年度から5カ年「地震予知に関する地球化学的研究」により地下水・地下ガスの研究を実施してきたが得られた成果を要約すると次のとおりである。

3.1 地下水総合観測システムに関する研究

(1) 観測データの収集・処理体制の整備

観測強化地域等に指定されている東海・南関東・島根県東部・宮城県東部地域の地下水井あるいは温泉井を対象とし、水位・水温・ラドン・水質等の連続あるいは定期観測によるデータの収集及び処理（コンピューターの導入）体制を整備した。特に巨大地震発生の可能性が指摘された東海地域の観測井については、データのテレメータ化を図り即時処理体制を整え、「地震防災対策強化地域判定会」及び「地震予知連絡会」開催時には短期的地震予知情報に関する資料を提供し、社会的・行政的要請に答えることができるようになった。

(2) 各観測井の井戸特性の把握

(1)項で収集される各種観測データ中に含まれる自然的及び人為的要因による影響について検討し、井戸特性を把握した。

(3) 地殻変動に伴う異常検出の解析

水位に対しては、気圧・潮汐・降水量による影響が顕著であることが明らかとなり、気圧・潮汐の補正法を確立した。降水量については降水条件の複雑さに問題があり、補正法は今後に残された。ラドンに対する気象的要因の影響は測定装置の測定誤差範囲内にあり、特に補正の必要はないが、ラドン測定のための揚水については所定の揚水量を保持することが重要である。

(4) 地震予知に適する観測井の選定

本研究期間中に観測の対象とした地下水観測井は、基礎調査井も含め約90井に達するが、地質条件（2）項の要因等も含めて検討し、今後観測を継続する観測井として南関東4井・伊豆半島12井（不定期2井を含む）・東海10井・宮城県東部3井の計29井を選定した。

(5) 地震に対応したとみられる変化例の蓄積

研究期間中に1978年伊豆大島近海地震・1980年伊豆半島東方沖地震等の地震に際し、水位・自噴量・水温・ラドン・水質等に前兆的あるいは地震直後の変化例が得られ、地下水による地震予知の有効性が確認されたが、今

後とも事例の蓄積が必要である。

3.2 地殻変動地域の土壌ガス中の化学成分の挙動に関する研究

(1) 地下ガス観測法の標準化

地震予知を目的とした土壌ガス・地下水中溶存ガス・遊離ガスの採取法・分析成分及び分析法について標準化を行い、経時的变化等の相互比較を容易にした。

(2) 断層周辺の地下ガスの実態把握

神縄・国府津・松田断層ほか3地域の山岳地帯の活断層を対象とし、断層周辺部の土壌ガス中の化学成分濃度ならびにそれらの経時的变化について検討した結果、特に断層近接部ではラドン・ヘリウム・二酸化炭素の異常濃集が認められ、大気系ガスとは異質なことが、深部起源ガスの判定にヘリウム・ラドン⁴He/²⁰Ne、³He/⁴Heなどの同位体比が有効なことなど新しい知見が得られた。

このような成果は地下ガスによる地質構造調査技術（断層・破碎帯・岩相区分など）・新地震予知技術など応用面への発展が期待される。

3.3 今後の課題

東海地域等における地下水位・ラドン等の自動観測・解析過程において生じたいくつかの課題がある。

① 観測データの安定化と信頼度の向上。自動観測施設はすべて無人であるので、装置の故障や不調は致命的である。従って、装置等の保守・管理には細心の注意を払う必要がある。

② 観測データの精度の向上。水温や水位計は一種の歪計と考えられ、微小な変化が地殻変動を反映する可能性がある。できるだけ精度の高いセンサーを導入することが望ましい。水位についてはmm精度のセンサーを試作し必要な観測井に設置したが、水温については水晶温度計の導入を図る必要がある。

③ 観測量のマルチチャンネル化。地下水の観測においてもS/N比の向上。局部的要因を除去するためにアレイ観測などが望ましいが、当面の対策として近く地下水データあるいは他機関の観測データ（例えば気象庁の歪データなど）との比較検討も有効であろう。

④ 地下水変動機構の追求。震源域周辺での地下水の変動には、震源域内で物質が移動することにより生ずる異常（第1種）と震源付近の圧力や歪の変化が伝播して生ずる異常（第2種）とが考えられ、前者は深部の裂か水などに、後者は水の出入りの少ない被圧地下水などに表われることが期待される（垣見・東野1980）が、異常のメカニズムについては現在のところよく分っていない。

今後 観測データの解析に際してはこれらのことも含めて検討することが重要である。

その他 地下水 地下ガス中の酸素 炭素等の同位体比の研究を進め 地震予知へのアプローチの可能性を探ることなどである。

58年度以降 地震予知に関する地下水の研究は経常研究として観測研究を引継ぎ 短期的地震予知情報に関する解析を進め 社会的 行政的要請に答えることとしている。また 地下ガスの研究は本研究で得られた成果を基礎として新しい地震予知技術の開発を旨し 58年度から特別研究「地震予知に関する地下ガスの研究」として発足している。

文献

- Alexander, Jr. E. C., Ozima, M. (1978) Terrestrial rare gases, Edited by Alexander and Ozima, Cent. Acad. Publ. Japan, Tokyo, 226p.
- Birchard, G. F., Libby, W. F. (1980) Soil radon concentration changes preceding and following four magnitude 4.2-4.7 earthquakes on the San Jacinto fault in Southern California, *J. Geophys. Res.*, 85, p. 3100-3106.
- 地質調査所 (1975) 川崎市東部における最近の水位上昇 予知連会報 14, p. 26-28.
- 地質調査所 (1976) 多摩川下流域における地下水位と水質の変化 予知連会報 15, p. 57-64.
- 地質調査所 (1980) 静岡付近地震 (1979. 5. 23 M4.3) 前後のラドン濃度変化 予知連会報 23, p. 93-95.
- 地質調査所 (1981 a) 伊豆半島東方沖群発地震による熱海梅園水位観測井の水位変動について 予知連会報 25, p. 154-158.
- 地質調査所 (1981 b) 1980年伊豆半島 東方沖地震と地下水温 水質の変化 予知連会報 25, p. 148-153.
- 地質調査所 (1981 c) 東海地域榛原観測井における伊豆半島 東方沖地震前後の水位変化について 予知連会報 25, p. 226-229.
- 地質調査所 (1981 d) 地下水に関する研究 東海地域の地震予知に関する総合研究報告書 科技庁研究調整局 p. 318-325.
- 地質調査所 (1983 a) 筑波観測井におけるコサイスミックな水位変動と震央分布 予知連会報 30, p. 103-107.
- 地質調査所 (1983 b) 土壌ガスの時間変動と垂直分布——茨城県下での観測—— 予知連会報 30, p. 108-111.
- 地質調査所 (1983 c) 伊豆半島における土壌ガス観測 予知連会報 30, p. 160-163.
- 地質調査所 (1984 a) 伊豆半島河津町の自噴泉の溶存ガス組成変動 予知連会報 31, p. 267-268.
- 地質調査所 (1984 b) 志太温泉における地震前のラドン濃度変化 予知連会報 31, p. 357-359.
- 地質調査所 (1984 c) αトラック法による国府津—松田断層のラドン濃度の定期観測 予知連会報 31, p. 211-214.
- Giardini, A. A. Subbarayudu, G. V. and Melton, C. E. (1976) The emission of occluded gas from rocks as a function of stress: Its possible use as a tool for predicting earthquakes, *Geophys. Res. Lett.* 3, p. 355-358.
- 星野一男・長谷敏和 (1977) 神縄断層を切る南北性断層について 地質雑誌 83, p. 62-64.
- 伊田一善 (1952) 静岡県藤枝町天然ガス 地質調査報告 地調月報 3, p. 169-174.
- 池田喜代治・永井茂・後藤肇次・阿部喜久男・永田松三・大場信雄 (1979) 伊豆半島東部地域における地下水中のラドン濃度と伊豆大島近海地震前後におけるその変化について 地調特別報告 7, p. 129-149.
- 池田喜代治・村下敏夫・田口雄作・井野盛夫 (1981) 東海地方東部地域における地震予知研究——地下水中のラドン自動連続観測とその結果についての考察——地調月報 32, p. 151-166.
- 池田喜代治・東野徳夫・田口雄作・高橋誠・井野盛夫 (1982) 1982. 8. 12. 伊豆大島近海の地震と地下水中のラドン濃度変化 地震学会昭和57年度秋季大会予稿集 No. 2, p. 151.
- 垣見俊弘 (1979) 川崎隆起——地下水問題を中心に—— 地震予知連絡会10年のあゆみ p. 88-109.
- 垣見俊弘・東野徳夫 (1980) 東海地域地下水観測網 地震シンポジウム (1980) p. 107-115.
- 垣見俊弘・山崎晴雄・寒川旭・杉山雄一・下川浩一・岡重文 (1982) 1/50万活構造図 東京 地質調査所
- 加藤完・衣笠善博・村下敏夫・垣見俊弘・池田喜代治 (1977) 静岡県清水市における地震予知のための水位及び水質観測井の設置について 地質ニュース 279, p. 14-19.
- 加藤完・佃栄吉・村下敏夫・池田喜代治・井野盛夫 (1979) 東海地域における地震予知のための地下水観測井の増設について 地質ニュース 294, p. 16-22.
- 加藤完 (1979) 地質調査所松江地区水位観測井の島根県中部地震 (1978) 前後における地下水位について 地調月報 30 p. 433-439.
- 加藤完・池田喜代治・佃栄吉・杉山雄一・村下敏夫・井野盛夫 (1980) 東海地方東部地域の地震予知に関する地下水観測システムについて 日本地下水学会誌 22, p. 1-21.
- 加藤完・池田喜代治・東野徳夫・垣見俊弘・井野盛夫 (1981 a) 東海地方東部地域の地震予知に関する地下水観測システム——観測井及び観測機器について——地調月報 32, p. 45-55.
- 加藤完・池田喜代治・高橋誠・永田松三・柳原親孝・伊藤吉助 (1981 b) αトラック法による伊豆半島の活断層調査 地調月報 32, p. 199-212.
- 加藤完・池田喜代治・高橋誠・永田松三 (1982) αトラック法による神縄及び国府津—松田断層地域の調査 第四紀研究 21, p. 67-74.
- 加藤完・池田喜代治・楠瀬勤一郎・西沢修 (1984) ——軸圧縮過程の花崗岩から放出されるラドン濃度の変動—— 地調月報 35, p. 1-11.
- 活断層研究会編 (1980) 日本活断層 p. 146-153.
- King, C. Y. (1978) Radon emanation on San Andreas fault, *Nature*, 271, p. 516-519.
- King, C. Y. (1980) Episodic radon changes in subsurface

- soilgas along active faults and possible relation to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 85, p. 3065-3078.
- 岸和男・永井茂 (1975) 川崎における異常地盤隆起の原因を探る 地質ニュース 254, p. 22-31.
- 岸和男 (1979) 伊豆半島東部における地下水位湧出量の観測と伊豆大島近海地震におけるその変化について 地調特別報告 7, p. 71-85.
- Kita, I., Matsuo, S., Wakita, H. and Nakamura, Y. (1980) D/H ratios of H_2 in soil gases as an indicator of fault movements, *Geochem. J.*, 14, p. 317-320.
- Kita, I., Matsuo, S. and Wakita, H. (1982) H_2 generation by reaction between H_2O and crushed rock: An experimental study on H_2O degassing from the active fault zone, *J. Geophys. Res.*, 87, p. 10, 789-10, 795.
- 小出仁 (1983) エシユロン断層系の地震地質学的意義と地震発生機構について 地学誌 92, p. 173-192.
- 永井茂・村下敏夫 (1976) 川崎市における地盤の変動と地下水との関係 工業用水 215, p. 46-69.
- 永井茂・池田喜代治・後藤隼次・阿部喜久男・永田松三・大場信雄 (1979) 伊豆大島近海地震前後における地下水の水温 水質の変化 地調特別報告 7, p. 87-118
- Nagao, K., Takaoka, N., Wakita, H., Matsuo, S. and Fujii, N. (1980) Isotopic compositions of rare gases in the Matsushiro earthquake fault region, *Geochem. J.*, 14, p. 63-69.
- 中村一明・島崎邦彦 (1981) 相模駿河トラフとプレートの沈み込み 科学 51, p. 490-498.
- 北京市地震队水化学組 (1977) 岩石破裂と気含量変化关系的实验研究 地球物理学报 20, p. 277-282.
- 永田松三・大場信雄・池田喜代治・永井茂・後藤隼次・阿部喜久男 (1979) 伊豆半島東部地域における地下水中の溶存ガス組成と伊豆大島近海地震前後におけるその変化について 地調特別報告 7, p. 119-128.
- Reimer, G. M. (1980) Use of soil-gas helium concentrations for earthquake prediction: Limitations imposed by diurnal variation, *J. Geophys. Res.*, 85, p. 3107-3114.
- Reimer, G. M. (1981) Helium soil-gas variations associated with recent Central California earthquakes: Precursor or coincidence?, *Geophys. Res. Lett.*, 8, p. 433-435.
- Ronald, W., Klusman, W. and Webster, J. D. (1981) Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crustal gas emission relevant to earthquake prediction, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 71 p. 211-222.
- Sano, Y., Tominaga, T., Nakamura, Y. and Wakita, H. (1982) $^3He/^4He$ ratios of methane-rich natural gases in Japan, *Geochem. J.*, 16, p. 237-245.
- Scholz, C. H., Sykes, L. R. and Aggarwal, Y. P. (1973) Earthquake prediction: A physical basis-rock dilatancy and water diffusion may explain a large class of phenomena precursory to earthquakes, *Science*, 181, p. 803-810.
- 杉崎隆一・志知竜一 (1978) 地震前兆現象としての断層ガス中の He/Ar N_2/Ar 比の変動 地震 第2輯 31, p. 195-206.
- Sugisaki, R., Anno, H., Adachi, M. and Ui, H. (1980) Geochemical features of gases and rocks along active faults, *Geochem. J.*, 14, p. 101-112.
- 杉山雄一・佃栄吉・加藤完・池田喜代治 (1981) 東海地域の地下水観測データの解析——地下水位変動の解析(その1)——地調月報 32, p. 133-150.
- 杉山雄一・下川浩一・坂本亨・秦光男 (1982) 静岡地域の地質 地域地質研究報告 5 万分の1 図幅. 東京(8) 第98号 82p.
- 田口雄作 (1981) 筑波研究学園都市の深井戸における水位および水温の年変化について 水温の研究. 25, 4, p. 14-23.
- 田口雄作・永井茂 (1982) 伊豆半島東方沖群発地震(1980年)による熱海観測井の水位変動について. 地理評 55, p. 239-257.
- Tagutschi, Y., Takahashi, M., Nagai, S. and Tono, N. (1982) The interpretation of changes in groundwater level caused by earthquakes, The 3rd Joint Meeting of UJNR panel on earthquake prediction technology 1982, p. 99-123.
- 高橋誠・吉川清志 (1982) 松代における土壌ガス組成とその分布 地震学会 昭和57年度秋季大会予稿集No. 2, p. 155.
- 竹花康夫・小林洋二・脇田宏・中村裕二 (1982) 中央構造線根来断層における水素の放出 地震 第2輯 35, p. 103-115.
- 東野徳夫・加藤完・池田喜代治・永井茂・佃栄吉・杉山雄一・村下敏夫 (1981) 地下水に関する研究. 東海地域の地震予知に関する総合研究報告書 科技庁研究調整局 p. 76-91.
- 東野徳夫・石戸恒雄・加藤完・田口雄作・永井茂・盛谷智之・池田喜代治・吉川清志 (1982) 地下流体の地電流変化の観測研究 フィリピン海プレート北端部の地震 テクトニクスに関する特定総合研究 中間報告書 科学技術庁研究調整局 p. 184-202.
- 佃栄吉・杉山雄一・衣笠善博・垣見俊弘・加藤完・池田喜代治・永井茂・東野徳夫 (1980 a) 地下水観測データの解析研究 東海地域の観測データの総合的解析処理に関する総合研究報告書 科技庁研究調整局 p. 29-37.
- 佃栄吉・衣笠善博・杉山雄一 (1980 b) 東海地域地震予知のための地下水位変動データ処理・監視システム 地調月報. 31 p. 619-634.
- Wakita, H., Fujii, N., Matsuo, S., Notsu, K., Nagao, K., and Takaoka, N. (1978) Helium spots caused by a diapiric magma from the upper mantle, *Science*, 200, p. 430-432.
- Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N., and Notsu, K. (1980) Hydrogen release: New indicator of fault activity, *Science*, 210, p. 188-190.
- 吉川清志・高橋誠・加藤完 (1982) 阿寺断層における土壌ガス 溶存ガス組成について 地震学会 昭和57年度春季大会予稿集No. 1, p. 96.