

川崎市の地盤隆起と地下水のラドン濃度変化について

金谷 弘* 池田喜代治** 阿部喜久男***

KANAYA, H., IKEDA, K. and ABE, K. (1980) Some problems related to the variation in radon concentration in ground water in the ground upheaval area of Kawasaki-city. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 31(9), p. 447-460.

Abstract: Abnormal ground upheaval in Kawasaki-city was first noted in 1971 and it has been a matter of serious concern as it could be interpreted to be related to some form of crustal movement.

Radon concentration in groundwater was measured during the period from April 1975 to March 1977 in order to obtain data relating to possible earthquakes. No significant variation in radon concentration was observed during that period.

A large amount of radon must be added in order to bring about a significant increase in its concentration in ground water. This means that both the presence of faults or water channels which transport gas or water quickly and the presence of a geologic unit with strong radon emanation are necessary. In areas where these conditions are met, radon measurement would be a very valuable tool for detection of the changes in crustal dynamics, i.e., precursor of earthquakes.

The conditions for selecting sites for effective radon measurements were determined by this study.

要 旨

川崎市及びその周辺地域の地盤隆起について昭和49年12月26日の地震予知連絡会の発表に伴い、地震予知観測の一環として、当地域で地下水のラドン濃度の観測を行った。地下水のラドン濃度の有意な変化は認められなかったが、地下水のラドン濃度を規制する諸要因とそれに関連する諸種データを検討した結果、地震予知に役立つ地下水のラドン濃度変化を生じやすい地質構造断面のモデルが考えられるに至った。この結果は今後、地下水のラドン濃度観測を地震予知の手段として利用する際に、一つの示唆を与えるものと思われる。

1. 緒 言

川崎市幸区を中心とする地域に比較的大きな地盤隆起が観測され、直下型地震の前兆現象ではないかとの懸念から、各機関により1975年から当地域に諸種観測網が敷かれた。このため、地質調査所においても、ソ連のタシケント地震(1966.4.26)や中国の海域地震(1975.2.4)

の予知成功例等を考慮し、地震予知の地球化学的手法の一部として、地下水中のラドン濃度観測を実施した。これらの結果は既に地震予知連絡会や講種出版物に、その詳細が報告されている。

本稿においては、当地域における地下水の、ラドン濃度変化に関する研究をとりまとめ報告するとともに、地下水中のラドン濃度変化の観測による地震予知の可能性について2, 3の考察を試みる。

当観測を実施するにあたり、井戸を利用して戴いた川崎市水道局平間浄水場、関係各社及び龍台寺の方々に厚くお礼を申し上げる次第である。また、川崎市幸区平間の科学技術庁防災科学技術センター微小地震観測井のボーリングコアを提供戴いた同センター高橋 博部長に謝意を表する次第である。

2. 水理地質学的枠組

川崎地域の地下水については既に報告されている(岸・永井, 1975; 阿部・永井ほか, 1976)ので、ここでは要点のみをかいつまんでのべる。

当地域でラドン濃度測定の対象とした地下水は、通常第2帯水層と呼ばれる洪積層中に存在するものと、第3帯水層と呼ばれる、第三紀上総層郡中に存在する帯水層

* 物理探査部

** 環境地質部

*** 技術部

のものであって、いずれも被圧地下水である。第2帯水層は、多摩川旧河道を埋積した砂礫層中にあり、幅500-1,000mで帯状をなす。また、地表から帯水層迄の深さは20-30m、その厚さは15-20mである。本帯水層の水は、伏流水型・淡水型・中間型・塩水型の4つのグループに分けられる。第3帯水層は黒色または茶褐色の着色水を有し、有機物が多く、第三紀層地下水特有の炭酸水素ナトリウム型と呼ばれる水質組成をもち、淡水型・中間型・塩水型の3つのグループに分けられている。

ラドン濃度測定は、主としてこれら2つの帯水層から揚水している既存井について行った。これらは、川崎市工業用水道井12本(殆んどが第2地下水)及び周辺25事業所の井戸28本(第2地下水及び第3地下水)を利用して実施した。また、これらより深い深層地下水(川崎市川崎区富士見公園地質調査所観測井、GS-1)と、更に地表に最も近い地下水(第1帯水層、自由面地下水)についても予察的測定を実施した。

3. ラドン濃度測定方法とその精度

試料水のラドン濃度測定については既に詳しく述べられている(池田・阿部, 1977)ので、ここではその概要と2, 3の問題点について記載するにとどめる。

試料水は極力空気に触れないように静かにガラス製抽出分離装置に1000 ml 採取する。これに液体シンチレータ溶液40 ml を加えよく振とうし、数分経過後シンチレータ溶液と試料水が完全に分離した後に、計測用ガラスバイアル瓶に25 ml 採取する。これを液体シンチレーションカウンターで測定する(野口, 1964)。液体シンチレーションカウンターは米国パッカー社製 Tri-Carb 3385型を用いた。

採取する試料水中にはラドン222のほかに、ラドン220やラドン219も当然含まれるが、これらはラドン222に比較して半減期が短いため、測定迄(3時間以上)に大半が壊変するものと考え、その影響は無視した。

3.1 測定誤差に関するいくつかの要因

この一連の測定において測定誤差の要因となるものをいくつか列挙する。

まずガラス製抽出装置の製作精度があげられる。また試料水採取の際に、比較的條件の悪い野外で抽出を行うため、個人差が生ずる。次に、分離した液体シンチレータ溶液を計測用ガラスバイアル瓶に分取し密栓する際に、0.5 ml程度の気相(空気)を混入させることがあり、これも当然誤差となる。また液体シンチレーションカウンターに計測用ガラスバイアル瓶を入れて測定を行う場合、測定試料のラドン濃度に比例した計数値も、バ

ックグラウンドの計数値も統計的変動を伴う。このほか、装置の安定度など、当然最終結果に影響がおよぶものもある。

測定誤差ではないが、地下水のラドン濃度の見かけの変化を生じさせるいくつかの要素がある。

井戸水を汲み上げる際、溶存ラドンを追出す型式のポンプにエアリフトポンプがある。他にも地下水中の溶存ラドンの量を変える可能性の型式のポンプもある。

常時揚水を行っていない井戸を利用する場合、ケーシング中に静止している水のラドン濃度は、周辺からのラドンの供給をうけないため、時間とともに減少する。汲み上げ初期の水は静止水であるため、帯水層中の水の本来のラドン濃度を正確に示さない。

1本の井戸が2層以上の帯水層にまたがり、かつ間欠的に揚水を行う場合には、各帯水層の諸種定数が違っていると、1本の井戸としてのラドン濃度が定常状態に到るのに一定量の汲み上げが必要となる。

明らかに同一帯水層からの揚水でありながら十分な汲み上げを行ったにもかかわらず、ラドン濃度が徐々に変化をきたす例がある。このような場合は、帯水層の構造、大きさ、影響圏など井戸固有の性質に起因すると思われる。

3.2 測定誤差要因についての検討

測定誤差及び見かけ上の変化をもたらす要因について、いくつかの確認を行った。

まずガラス製ラドン抽出装置の製作精度及び野外で抽出を行うときの採水精度について検討するため、数人による単純測定を繰り返した。この結果、全体で±2%程度の差がでることを確認した。ただしこの誤差は作業の慣れにより軽減することが可能である。

次にラドン濃度が同じならば、計測用ガラスバイアル瓶に入る液体シンチレータの液量が、単純に発光量に比例すると考える。ガラスバイアル瓶を密栓する時、最大0.5 ml程度の空気を瓶中に封じ込めたとしても、瓶の全容量は25 ml であるので、最大2%の誤差を生ずることになる。

液体シンチレーションカウンターで測定を行う場合、 1×10^{-10} Ci/l の濃度の試料水では、その計数率が10分間あたり3120カウント(バックグラウンドを含む)、バックグラウンド420カウントとなる。測定を3回繰り返しその平均値を最終値とするので、測定計数から計算される相対標準偏差 1σ は、 1×10^{-11} Ci/l の濃度の試料水で7.2%、同じく、 1×10^{-10} Ci/l で0.8%、同じく、 1×10^{-9} Ci/l で0.4%である。

これらを最終的にとりまとめると、一連の作業をルー

チンで行うには、試料水のラドン濃度が 1×10^{-11} Ci/l のとき、10-12%、 1×10^{-10} Ci/l以上のとき、3-5%程度の誤差が存在する。このほかにも誤差を生ずる要因がいくつか考えられるので、測定系全体としての誤差は、この値をいくらか上まわるものと思われる。

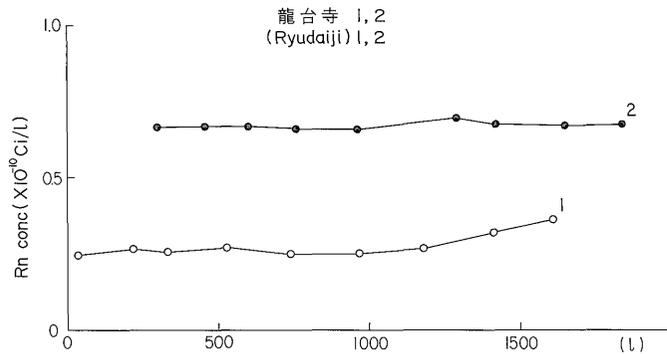
間欠的揚水に基づいた井戸水の測定を行うとき、見かけ上のラドン濃度の変化が見られることがある。これを避けるためには、同一条件で採水を行わねばならない。これに関して、いくつかの井戸について観察を行った。

川崎市高津区久本の龍台寺境内にある2本の掘抜き井戸及び川崎市水道局の工業用水井戸4本につき揚水量とラドン濃度変化の関係を求めた。龍台寺の井戸は丘陵の中腹にあり、下末吉層の中に介在する自由面地下水の帯水層から揚水する井戸であり、渇水期には枯渇現象をおこす。また日常の揚水量は僅かである。この2本の井戸については、約12時間揚水を停止した後、実験を開始した。実験時の揚水量は毎分4lであった。川崎市工業用水道井は、既述の通り被圧地下水であり、1カ月間揚水

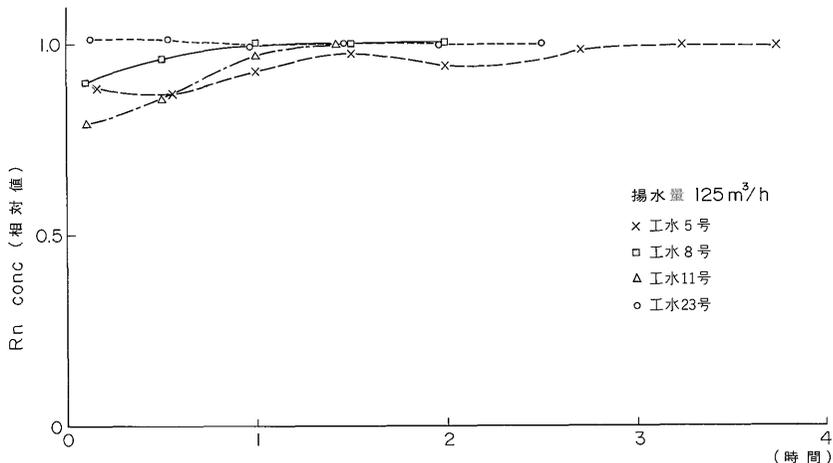
停止の後、汲み上げを行った。当井戸は工業用水道用であるため、単位時間当りの揚水量は非常に大きく、毎時125 m³である。

第1図に示すように、龍台寺の井戸のラドン濃度変化は、No. 1の井戸では汲み上量が、1200 lを越すと漸増し始め、測定誤差の範囲を越えてしまうが、No. 2の井戸では、ほぼ変わらず一定値を示している。この2本の井戸の間隔は直線距離にして約20m程度であり、深さも同一層準の帯水層と考えられるにもかかわらず、両者の間で変化様式が異なるだけでなく、ラドン濃度がNo. 1で 0.25×10^{-10} Ci/l、No. 2で 0.67×10^{-10} Ci/lと両者間に2.5倍程度の差が見つけられることが注目される。川崎市工業用水井戸では、第2図に示すように2つのパターンが認められ、揚水開始より殆んどラドン濃度に変化が認められないもの、徐々にラドン濃度を増し定常状態に達するものがある。

これらの結果からみて、見かけ上のラドン濃度変化による誤認を防ぐためには、井戸の変化様式を十分把握し



第1図 龍台寺における2本の井戸の揚水量に伴うラドン濃度変化



第2図 川崎市工業用水道井における揚水量に対するラドン濃度変化

や、丹沢水系と同様な低い値を示す。

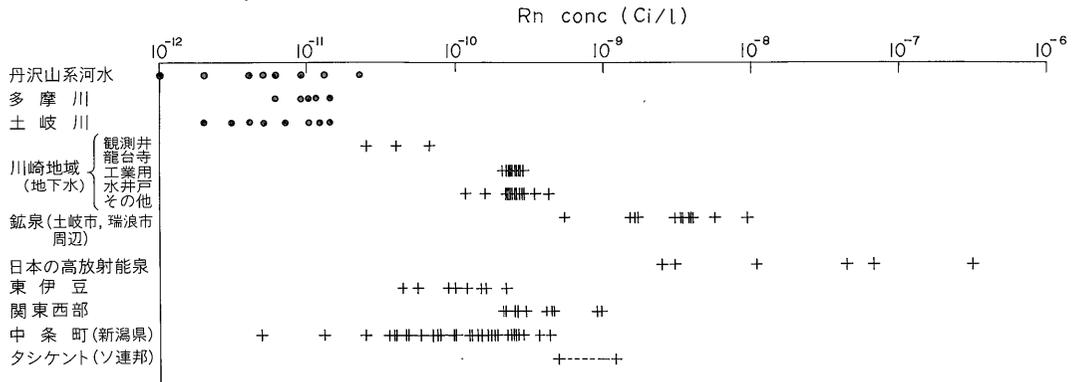
これらの事実から、大気と接した地表水や、流れの速い河川水は、その周辺からのラドンの供給にもかかわらず、比較的短時間にそれらを大気中に放出するため、それ自体は低い濃度値を示す様になると考えられる。

4.2 地下水のラドン濃度

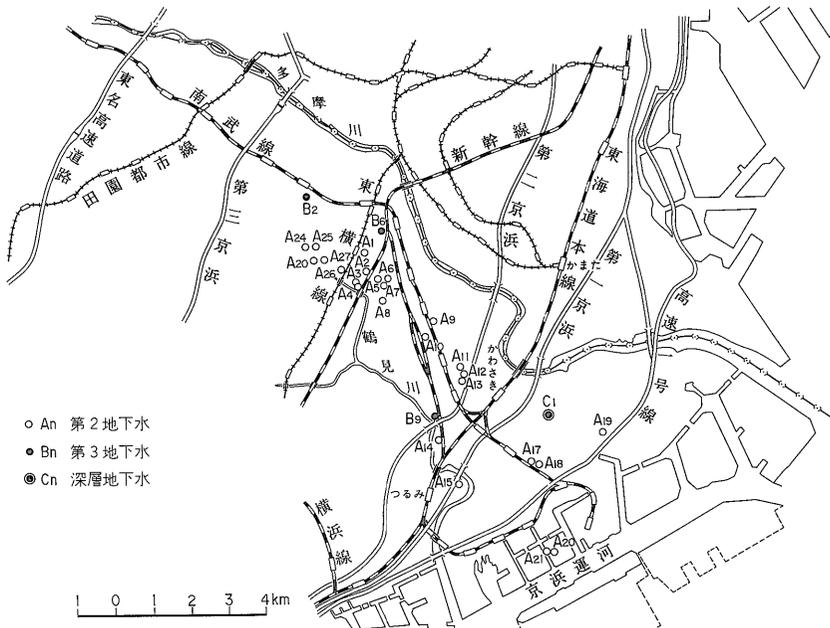
地下水のラドン濃度は、地下水(地層水)の流速が河川に比較して非常に遅いことや、ラドンの半減期の短いことなどからみて、帯水層を構成する地層・岩石及び近傍地層・岩石からの供給により定常状態に達し、一定のラドン濃度を保持するものと思われる。換言すれば、地下水のラドン濃度は帯水層及びごく近傍の地層・岩石の

ラジウム含有量とそのラドン放出率により決定されるものと考えられる。

われわれがラドン濃度測定を行った地下水は、川崎市及び川崎市周辺の第2地下水、第3地下水、深層地下水、岐阜県土岐市、瑞浪市周辺の鉱泉水(測定値の一部は村上・野口ほか、1965より引用)である。日本における放射能泉の主なものについては、山梨県増富、岐阜県高山、島根県池田、鳥取県三朝などの報告がある(理科年表、1971)。またその後測定された伊豆東部、関東西部の地下水(池田・阿部、1977)、新潟県中条町の地下水(木村ほか、1975)のラドン濃度も合わせ、さらにソ連邦タシケントの報告(萩原、1974)の値を加え、その変



第5図 日本のいくつかの地域における表流水、地下水、鉱泉水等のラドン濃度変化



第6図 川崎市と周辺地域の観測井及び工業用水道井の位置

化範囲を第5図に集約した。

第5図は次のことを表わしている。

1. 池、湖、河川水中のラドン濃度は、空気中へのラドンの放散のため低く、 10^{-11} Ci/l 程度以下の値を示している。

2. 通常の井戸・自噴井等におけるラドン濃度の変化範囲は、特殊な地域を除き、 $n \times (10^{-11} - 10^{-9})$ Ci/l で、低い濃度の地下水と高いものとの濃度比は100-200倍程度に及んでいる。

5. 川崎地域における観測結果とその考察

昭和50年4月より、川崎市及びその周辺地域における、川崎市所有の井戸または各種事業所の現用井戸を対象に、地下水(地層水)のラドン濃度の定期測定を開始した。対象としたのは川崎市工業用水道井で、汲み上げ可能な8井とその後追加された4井の計12井、それに周辺25事業所の28井を選んで測定を試みたが、後者のなかから測定可能な15事業所の19井だけを引継ぎ利用することにした。井戸数が減少したのは、事業所の都合などに

第1表 川崎市及び周辺域における地下水のラドン濃度

	井戸名	ラドン濃度 ($\times 10^{-10}$ Ci/l)	井戸深度 (m)	ストレーナ位置 (m)	参照番号
1	川崎市工業用水井戸 2号井	2.60	44.5	25.6-40.2	A-2
2	〃 5号井	2.28	43.4	24.1-39.6	A-4
3	〃 7号井	2.27	42.8	26.9-38.2	A-8
4	〃 8号井	2.70	43.9	28.5-40.2	A-7
5	〃 9号井	2.57	42.8	26.9-38.1	A-6
6	〃 11号井	2.16	44.8	27.1-40.5	A-1
7	〃 13号井	2.07	46	26.9-37.6	A-10
8	〃 16号井	2.35	51.5	22.5-41.5	A-27
9	〃 19号井	2.85	46.0	25-40	A-26
10	〃 21号井	2.70	42.5	20-36	A-25
11	〃 22号井	2.33	49.0	20-43.5	A-24
12	〃 23号井	2.62	45	21-41.5	A-3
13	東芝タンガロイ	2.23	55	34-44	A-9
14	池貝鉄工神明工場	2.73	73	39.4-46.4	A-11
15	味の素 5号井	2.30	68.5	32-45	A-12-2
16	〃 11号井	2.57	90	65-72	A-12-1
17	〃 12号井	2.81	90	66-72	A-13
18	横一浜ケミカル	2.79	100	31-36, 46-50, 64-71, 81-94	A-14
19	朝日製鉄	2.43	160	143-154	A-15
20	東洋製鋼 1号井	2.36	91	31-48.4, 63.3-87.8	A-16-1
21	〃 2号井	2.27	91	39.7-49.5, 83.5-88	A-16-2
22	昭和電線	2.85	60.6	40-45.1	A-17
23	東芝電気硝子	2.38	75	—	A-18
24	大東化学	3.50	30	23.1-29.7	A-19
25	三菱化工機 1号井	2.38	58	28.5-34.5, 50-52.5	A-21
26	〃 2号井	1.58	46	27-35, 43-44.5	A-20
27	中之島	2.59	—	—	A-22
28	多摩製紙	4.11	12	—	A-23
29	沖電線	2.33	150	63-72, 86-106, 129-140	B-2
30	日本ビタミン油	2.47	150	13-20, 120-130	B-6
31	日本純薬	1.15	100	31-36, 46-50, 64-71, 89-94	B-9
32	地質調査所観測井	0.41	1000	808.70-819.02, 861.10-1015.74	C-1

より継続して利用不可能なもの、技術的にラドン抽出がルーチンワークとして非常に困難、または問題のある井戸水、例えば溶存有機物が非常に多くかつ多量のガスを伴うものなどがあったためである。これらについては一度だけその値を求めるにとどまった。測定は原則として、川崎市工業用水道井については1カ月に1回、周辺事業所については年に3ないし4回、深層地下水については1週間に1回行った。これらの結果は、第1表及び第6図に示すとおりである。

この結果を概観すると、次のことがわかる。

1. 川崎市及びその周辺に存在する第1地下水、第2地下水、第3地下水、深層地下水のラドン濃度の変化範囲は、 $0.4-4 \times 10^{-10}$ Ci/l の値を示す。

2. 各井戸のラドン濃度についてみると、第2地下水を採取している川崎市工業用水井戸では $2.1-2.9 \times 10^{-10}$ Ci/lで、非常に狭い範囲に入っている。第3地下水で低いラドン濃度を示すものは、天然ガスを多量に伴うタイプのものに多く、ガス水比を考慮したとしても、総量として低い値を示す。それ以外は第2地下水の濃度に近い値を示すものも少なくないが、全体としては第2地下水よりやや低い値を示す。地質調査所観測井(GS-1)の深層地下水のラドン濃度は、ガス水比の補正を行っても、 0.4×10^{-10} Ci/l ともっとも低い値を示す。

3. 観測期間中の地下水のラドン濃度の変化は、いずれも測定に伴う誤差の範囲内であり、顕著な変化は見出されなかった。これらを第7図に示す。

6. 岩石のラジウム含有量とラドン放出率

地下水のラドン濃度を規制している要素はいくつかあ

るが、ラドン222の半減期が3.8日と短いこと、地下水の動きが非常に遅いことなどから、重要と思われるものをいくつか検討してみた。

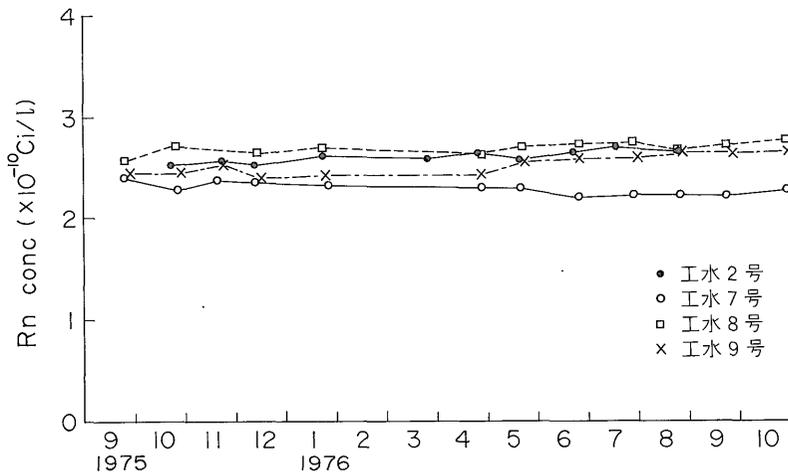
6.1 岩石のラジウム含有量

ラジウム含有量の測定対象となるべき井戸の、帯水層及びその上下部分の岩石試料は、殆んど入手できなかった。これは、井戸掘削の際にコアを採取しなかったり、掘削後、長年月を経過しているなどの理由による。

これらの岩石のラジウム含有量の目安をうるため、川

第2-1表 地質調査所観測井(GS-1)ボーリングコアのラジウム含有量分析値

No	井戸深度 (m)	ラジウム含有量 ($\times 10^{-12}$ g/g)	備 考 質 (岩 質)
1	96.2	7.4	砂質シルト
2	134.0	7.3	砂質シルト
3	189.2	7.7	シルト
4	250.3	5.3	砂質シルト
5	318.0	5.4	シルトと細粒砂
6	384.2	5.3	砂とシルト
7	464.6	6.5	シルトに細粒砂挟み
8	558.3	5.7	シルトに細粒砂挟み
9	632.3	5.8	シルト
10	695.8	6.8	シルト
11	795.3	5.2	シルト岩
12	885.1	9.0	シルト岩
13	904.5	5.1	砂
14	918.0	6.2	砂
15	1001.4	6.1	シルト岩
	平均	6.3	



第7図 川崎市工業用水道井にみられるラドン濃度の経年変化

第2-2表 防災科学技術センター平間微小地震観測井ボーリングコアのラジウム含有量分析値

No.	井戸深度 (m)	ラジウム含有量 ($\times 10^{-12}$ g/g)	備考 (岩質)
1	58.05	6.9	砂質シルト
2	72.2	6.7	砂質シルト
3	85.2	5.5	砂質シルト
4	110.0	4.8	シルト (一部砂を含む)
5	130.0	7.8	シルト
6	152.0	7.5	シルト
7	158.0	5.8	シルト
8	180.6	9.5	シルト (一部砂を含む)
9	251.3	7.9	シルト
10	310.0	9.6	砂 (シルト互層)
11	335.7	6.5	シルト (砂を含む)
12	371.9	6.0	シルト
13	384.3	8.3	砂とシルト互層
14	468.6	5.0	砂質シルト
15	469.0	6.9	砂質シルト
16	532.0	4.4	砂 (塊状シルト薄層を含む)
17	558.5	5.9	砂質シルト, 砂互層 (含炭質物)
18	578.0	4.1	砂 (シルト互層)
19	592.3	8.3	含礫泥質砂
20	596.0	7.2	シルト
21	608.0	7.1	シルト (砂板状互層)
	平均値	6.7	

第3表 高津保健所下露頭試料のラジウム含有量分析値とラドン放出率

試料番号	ラジウム含有量 ($\times 10^{-12}$ g/g)	ラドン放出率 (%)	備考 (岩質)
1	5.1	31	シルト
2	6.1	29	シルト
3	5.8	24	シルト
4	4.8	19	砂質シルト
	平均	26	

崎市高津区久本の高津保健所下の露頭からの採取試料, 川崎市幸区平間の科学技術庁防災科学技術センター微小地震観測井のボーリングコア (52-609m), 川崎市川崎区富士見公園の地質調査所観測井(GS-1)のボーリングコア (92-1005m)についてラジウム含有量を, γ 線スペクトロメトリー法により定量した。これら試料の層準

は, 福田ほか (1976) の岩相層序区分によれば, 更新統より上総層群の基底砂礫を経て, 中新統の鎌倉 (三浦) 層群にわたり, 岩石的には砂, 砂質シルト, シルト, 粘土質シルト, 砂質シルト岩, シルト岩及び礫またはそれら互層よりなる。

これらのラジウム含有量測定結果(第2-1表, 第2-2表及び第3表)から, 川崎地域の層序における垂直方向のラジウム含有量変化をみると, $4.1-9.5 \times 10^{-12}$ g/g と含有量も変化範囲も, とともに比較的小さい。岩質による含有量の違いは大きくはないが, 砂で少なくシルトでやや大きい傾向が観察される。これはウランないしラジウムが砂より, シルト質のものにより保持されやすいことを示すものと思われる。

6.2 岩石のラドン放出率

ラドン放出率の実験(BARRETTO *et al.*, 1975)によれば, 各種岩石の放出率は $\sim 20\%$ を示す(第8図)。その放出率の平均値は数%である。しかし各種土壌(第9図)にみられる放出率は10-50%を示し, 岩石よりも良好なラドン放出体であることがわかる。

各岩石・土壌中に含まれるラジウム含有量と放出率を合わせ考えた場合の空気中へのラドン放出量は, 花崗岩で最も大きく, 石灰岩, はんれい岩, 蛇紋岩及び砂質土壌で非常に小さいことが報告されている(BARRETTO *et al.*, 1975)。

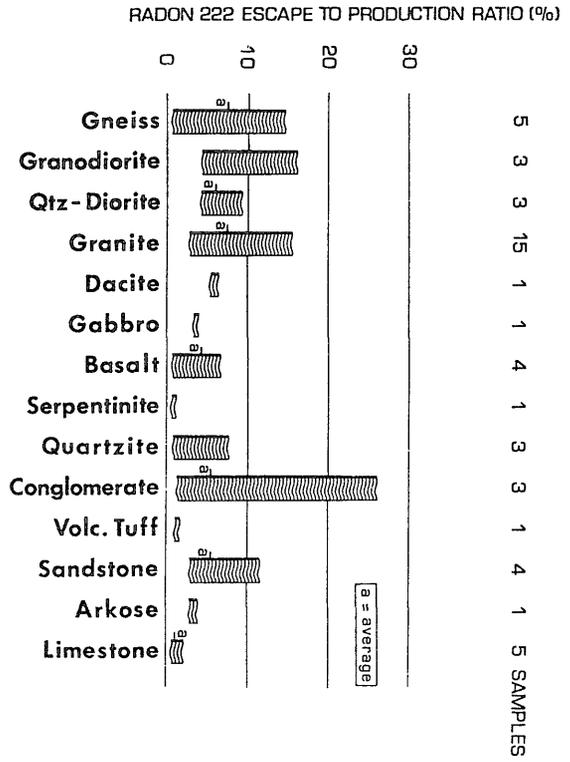
われわれも高津区久本の高津保健所下の露頭の試料について, ラドン放出率の実験を行った。試料は木槌等を用いて細粒化し(粒度分布は第10図), γ 線スペクトロメトリー法でラジウムの定量を行い, 次に試料500gを試料瓶に入れ, これに蒸留水1.5lを加えてガラス瓶を密栓し, 1カ月以上これを放置する。その後, 上ずみ液1.00lをとり, ラドン抽出を行った。この結果(第3表)は放出率約20-30%を示し, BARRETTO *et al.* (1975) のラドン放出率の実験と同じ傾向が見られる。

6.3 その他の要素

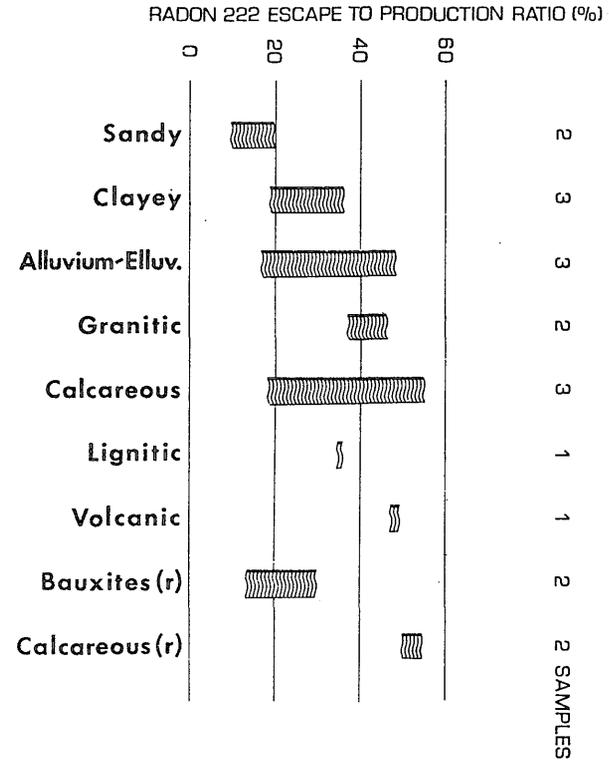
帯水層中のラドン濃度の変化を起こさせる要因として, 火山地帯における火山ガスや, 天然ガス鉱床におけるガスに含まれるラドンガスが, 帯水層のラドン量を減少または増加させることも考えられる。しかし, これらの要素は川崎市の第2・第3帯水層におけるラドン濃度変化とは, やや異質のものであり, 今回の考察では除外して考えた。

7. 地下水のラドン濃度とラドン放出量の関係

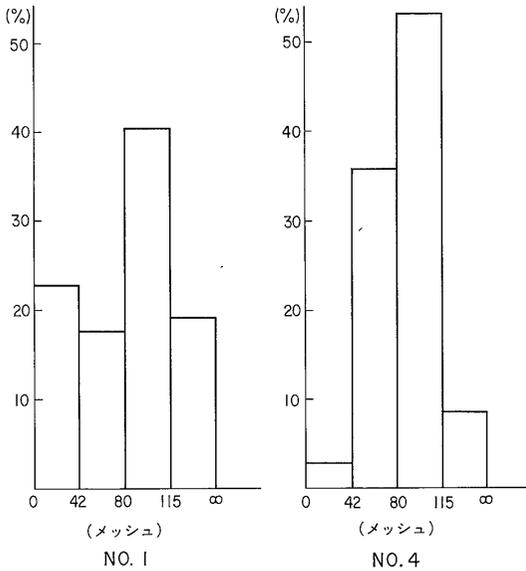
実際に測定された地下水のラドン濃度及び岩石のラジウム含有量から, 川崎市周辺におけるラドン放出量の検



第8図 各種岩石からのラドン222の放出率 (BARRETTO *et al.*, 1975 による)



第9図 各種土壌からのラドン222の放出率 (BARRETTO *et al.*, 1975 による)



第10図 ラドン222の放出率実験に用いた岩石試料の粒度分布図

第4表 地層中にラジウムが $3.4 \times 10^{-13} \text{g/g}$ 含まれるときの含水率及びラドン放出率が変化した場合の水のラドン濃度

含水率(%)	ラドン放出率(%)				
	10	20	30	40	50
20	1.36	2.72	4.08	5.44	6.80
30	0.739	1.59	2.38	3.17	3.97
40	0.51	1.02	1.53	2.04	2.55
50	0.34	0.68	1.02	1.36	1.70

($\times 10^{-10} \text{Ci/l}$)

討を行った。当市周辺のラドン濃度測定に用いた井戸の岩石試料が全部採取されているわけでないので、厳密な対比は行えないが、その概要を把握することは可能である。

議論を進めるに先立ち、次の条件を仮定した。

1. 帯水層は揚水を行う井戸周辺で十分均質な構造を有すること。
2. 地下水のラドン濃度は帯水層を形成する地層・岩石中のラジウムから供給され、外部からの影響はないものとする。また帯水層の含水率は一様とする(飽和帯のみ)。
3. 地層・岩石中のラジウムから放出されるラドンは全体の収支において考えるものとし、構成鉱物の単位では考えない。

これらの条件をもとに、地層・岩石のラジウム含有量

が $3.4 \times 10^{-13} \text{g/g}$ (等価ウランで $eU = 1 \text{ppm}$) のとき、含水率を20-50%、ラドン放出率を10-50%変化させた時の、地下水のラドン濃度を計算した(第4表)。

高津保健所下の露頭より採取した4個の試料のラジウム含有量の平均、防災科学技術センター観測井のボーリングコア試料の21個の平均、地質調査所観測井(GS-1)ボーリングコア試料15個の平均(第2-1表及び第2-2表)は、それぞれ $5.4 \times 10^{-13} \text{g/g}$ 、 $6.8 \times 10^{-13} \text{g/g}$ 、 $6.5 \times 10^{-13} \text{g/g}$ であり、全体の変化範囲は、 $4.1-9.5 \times 10^{-13} \text{g/g}$ である。

地質調査所観測井(GS-1)のボーリングコアの含水率(福田ほか, 1976)は、おおよそ20-30%、高津区久本の高津保健所下の露頭における砂、シルトの含水率も20-30%であり、類似の値を示している。これらからみて、当地域における帯水層の含水率を20-40%程度とみなした。

他方、地下水のラドン濃度は、川崎市第2地下水の平均、 $2.5 \times 10^{-10} \text{Ci/l}$ 前後のものが多く、その変化範囲は地質調査所観測井(GS-1)の $0.4 \times 10^{-10} \text{Ci/l}$ から、川崎市高津区の多摩製紙の $4.1 \times 10^{-10} \text{Ci/l}$ におよんでいる。

これらをもとに、川崎市及び周辺地域の帯水層の平均含水率を30%とし、ラジウム含有量測定を行った前記3カ所で作られた平均、 $5.4-6.8 \times 10^{-13} \text{g/g}$ に対して、地下水のラドン濃度平均、 $2.5 \times 10^{-10} \text{Ci/l}$ とすると、各帯水層中のラドン放出率は約16-20%の範囲に入る。

これまでの結果から、川崎地域において観測された地下水のラドン濃度は、地層・岩石のラジウム含有量とラドン放出率及び含水率からみて十分調和的な値を示していることがわかる。当地域の地下水には、ラジウム含有量の垂直変化の範囲が小さいことを考え合わせると、類似のラドン濃度¹⁾のものが多くと考えられる。換言すれば、当地域ではラドン濃度の大きく異なる地下水の存在が期待できないことを意味している。

8. 地下水のラドン濃度の変化要因

8.1 地下水の混合による変化

ここでは、地下水のラドン濃度が変化するいくつかのケースについて検討を行う。最も単純な例として、異なる2つの帯水層の水が何らかの理由により混合する場合を考えると、

- 1) A, B 2つの帯水層の水のラドン濃度が同じであるとき、両者の混合が起こっても当然ラドン濃度の変化は

¹⁾ 地質調査所観測井など2, 3のガスを伴う井戸水に見られるように、当地域の平均的なラドン濃度に対し数分の1程度の値しか示さないものもある。

生じない。

2) A, B 2つの帯水層の水のラドン濃度が明らかに異なる場合、ラドン濃度はAの方がBより高く、その濃度比が10であるとする。Bの水がAの水に対して、量比で10%及び20%加わったとする。その時のラドン濃度変化はAのラドン濃度に対して8.2%減, 15%減を示す。

3) 逆にAの水がBに対し量比で10%及び20%加わったとする。その時、混合した水のラドン濃度変化は82%増, 150%増と大きな変化を示す。

4) 2つの帯水層の水が混合する場合の速さについてみると、ラドン222の半減期は3.8日であるので、ラドン濃度は3.8日で最初の1/2, 13日弱で1/10に減衰する。このことは、時間のかかる地下水の混合はラドン濃度に変化を与えにくいことを意味する。

2つの帯水層の水の混合によりラドン濃度が変化する場合、混合した帯水層の水のラドン濃度は、その半減期に従い減衰あるいは増加し、混合した帯水層のもののラドン濃度に近づくため、2つの地下水の混合によりラドン濃度が変化するには、その変化を維持するため一定量の水が長期にわたり混合し続ける必要がある。

8.2 地層の収縮による変化

地層が外力をうけ収縮する場合に生じる地下水のラドン濃度の変化を川崎地域を例にとりて検討してみる。

当地域の地層・岩石の含水率は、既に述べたとおり20-30%ありかなり高い。これらが収縮すると、そこに含まれる水がしぼり出される。その際、地層を構成している各粒子の相対的移動はあっても、粒子そのものに破壊(亀裂)が起こらないと仮定する。外部から加わった力により地層が 10^{-3} 及び 10^{-2} の収縮(100 mの長さに対し10 cmと1 m)を起し、水がしぼり出されたとする。その時、地層は全体積で0.3%及び3%収縮することになる。含水率が重量比で20%及び30%(地層構成粒子の密度を水の2倍とする)であるとする、地層中の水の体積比は33%及び46%である。含水率20%で収縮率 10^{-3} のとき地層中の水の体積変化は33%→32.7%、含水率30%のとき46%→45.7%となる。同様に含水率20%で収縮率が 10^{-2} のとき水の体積変化は33%→30%、含水率30%で同じく46%→43%となる。以上のように地下水中のラドン濃度をきめる主な要素が、既に述べたように地層・岩石のラジウム含有量・ラドン放出率・含水率とすると、含水率の多い通常の砂、シルトなどの中の地下水では、地層の収縮に起因した大量の地下水混合及びそれによる大きなラドン濃度の変化を期待できない。

8.3 その他の変化

水の混合とは別に、気相で運ばれるラドンが供給され

ることによって、地下水中のラドン濃度が変化するケースが考えられる。ラドンがどのような場所で発生し、集められ、どのように運ばれ帯水層に供給されるか、その概要を定性的に理解することはできても、定量的に検討することは容易なことではない。しかし、いくつかの断層におけるラドン濃度の変化がこれ迄に報告されている。これはラドンが断層等を通じ比較的容易に地表へ放出されていることを意味するものであり、地下水中のラドン濃度がこれによって変わる可能性の大きいことを示すものである。

9. 地震予知の手段としての地下水のラドン濃度変化についての考察

既述の通り、地下水中のラドン濃度の変化要因として、いくつかの要素とパターンが考えられる。いずれにしても、加わった外力による地下の状態の変化に基づいて、ある帯水層にラドン濃度の異なる別の地下水が混入するか、あるいは下位の地層・岩石に亀裂が生ずることによりラドン放出量が増加し、それらが断層等を通じ上位の帯水層に比較的短時間に供給される必要がある。このことは、層序における垂直方向のラジウム含有量の変化が大きく、放出率が或る程度あり、かつ放出量の変化が短時間に地下水のラドン濃度に反映するような地質構造の場所が観測点として有利である。これらの要因について考察を行う。

日本列島を形成する各種岩石で、ラジウム含有量が判っているものを用いてこの面から検討してみる。花崗岩以外のデータ量は決して十分ではないが、目安をうることは可能であろう。

通常、花崗岩はラドンのよい放出体であるといわれている。特に酸性度(D. I. 値)の高いものは、ラジウム含有量も多く、ラドン放出率も比較的高い。また花崗岩は基盤岩としても分布が広いので、そのラジウム含有量をまとめて第5表に示す。その結果を概括すると、各地質構造区分におけるラジウム含有量の平均値の変化範囲は、含有量の非常に低い丹沢トナール複合岩体を除き、 $5.3-17.9 \times 10^{-13}$ g/gであり、岩石区により4倍弱の差がみられる。

他方、堆積岩の分析値は花崗岩質岩にくらべやや少ない。分析値のあるものについてこれを羅列(第6表)してみると、南部北上帯登米統のラジウム含有量平均値の変化範囲は、 $3.4-8.8 \times 10^{-13}$ g/g(金谷・片田, 1975)で、四国地方西部の秩父帯、四万十層群、和泉層群の平均値の変化範囲は $3.4-10.9 \times 10^{-13}$ g/g(石原・金谷, 1973)を示している。このほか、上部古生代粘板岩と新

第三紀シルル岩数10個のまとめ (石原ほか, 1969) によれば, 古生代粘板岩の地域別平均値は, $7.5-10.2 \times 10^{-18}$ g/g の範囲内にあり, 第三紀シルト岩の平均値は, 7.8×10^{-18} g/g である。これらの分析値から推定すると, 日本における砂岩-頁岩の平均値は, 地域別に見ても時代別に見ても, $3.4-12 \times 10^{-18}$ g/g の範囲内に入るものと思われる。

第5表 日本の花崗岩質岩石の地域別ラジウム含有量平均値

地 帯 名		n	ラジウム含有量 ($\times 10^{-18}$ g/g)
甲府・甲斐駒岩体		50	9.8
丹沢トナール複合岩体		29	1.1
東 中 国	山 陰 帯	106	12.9
	山 陽 帯	139	13.3
	領 家 帯	58	7.8
中 部	土 岐一苗 木 帯	80	17.9
	領 家 北 部 帯	62	6.1
	領 家 南 部 帯	83	7.5
阿 武 隈	東 列	50	9.4
	中 列	128	8.1
	西 列	125	5.3
北 上	石英>カリ長石系	303	6.5
	カリ長石>石英系	57	8.2
船 津 花 崗 岩		41	8.8

(全てγ線スペクトロメトリー法による分析値)

第6表 日本のいくつかの地域における堆積岩のラジウム平均値

		岩 石	n	ラジウム含有量 ($\times 10^{-18}$ g/g)	
四 国 地 方 西 部	和 泉 層 群	頁 岩	15	10.9	
		砂 岩	6	6.5	
	四 万 十 層 郡	古第三系 (南 帯)	頁 岩	11	7.8
			砂 岩	9	4.1
		白 垂 系 (北 帯)	頁 岩	39	7.8
			砂 岩	35	4.1
	秩 父 帯	頁 岩	8	9.9	
		砂 岩	7	5.4	
登 米 統	頁 岩	55	8.8		
	砂 岩	15	3.4		

石原・金谷 (1973) の第5表をもとに作りかえ

川崎地域における露頭, ボーリングコアの砂(岩) - シルト(岩) のラジウム含有量平均値は既述の通り, 5.4, 6.5, 6.8×10^{-18} g/g (水分補正をしていない) であり, 関東の他地域における予察的結果も, 凝灰質を除く砂(岩)・シルト(岩) でその変化範囲は, $2.7-8.5 \times 10^{-18}$ g/gを示している。これらの事実からみると, 基盤岩と帯水層を多く胚胎する第三紀-第四紀の堆積物(岩)との間には, ラジウム含有量からみて大きな差は認められず, 1-3倍程度の範囲に入る可能性が高い。

ラドン放出率について BARRETTO *et al.* (1975) 及びわれわれが今回行った補足実験からみると, 新鮮な岩石を粉碎 (60-115メッシュ) して行った放出率の平均値は数%であり, 新鮮な岩石に多少の亀裂が生じた程度ではラドン放出率が飛躍的に増加するとは考えにくい。他方, 土壌, 固結度の低い地層・岩石などのラドン放出率は20-30%を示す。放出率の増大は岩石の風化と大きな関係があると思われる。

これらを総合すると, 日本におけるラドン放出量の層序における垂直方向の変化は比較的小さいといえよう。すなわち, 地質基盤から上位の地層に向けてのラジウム含有量の減少傾向が顕著でなく, これとは逆に, ラドン放出率が被覆層で多く基盤で低い傾向を示すため, 地質垂直断面でみた各地層・岩石からの単位時間当りのラドン放出量は, 変化範囲の幅がきわめて狭いことが予想される。地域によっては, むしろ基盤岩のラジウム含有量が被覆層より低い傾向を示す場合もありうる。これは地下水のラドン濃度変化を利用して地震予知を行うに有利な環境ではない。

川崎地域の地盤隆起中心地点を通る地震波速度の観測結果によれば, 当地域の垂直断面は, 2.0 km/sec, 2.8 km/sec, 4.8 km/sec, 6.1 km/sec の4つの速度層に分けられ, 隆起中心点でみた各層基底の深度は, 約1.3 km, 2.7km, 7 kmである (地震波速度研究グループ, 1976)。このうち2.8 km/sec の速度で約2.7 km の深度を示すものは新第三系の基底面 (垣見ほか, 1973) と考えられ, 4.8 km/secを示す速度層はその速さからみて四万十層群または古生層に該当する可能性がある。四万十層群または古生層であるとする, そのラジウム含有量は上位の地層と大差なく, 有力なラドン供給源としては期待できない。

当地域の地下水はガスを伴うものが多く, 特に第3地下水, 深層地下水がこれに属する。これは, 当地域が南関東ガス田として知られるガス層を胚胎することに関係するが, 今回はガスを伴う地下水のラドン濃度への影響について検討を行わなかった。

このほか、基盤岩、例えば花崗岩中に掘削された井戸水を利用することがある。この場合、水は明らかに裂か水(亀裂水)と考えられるが、この種の地下水のラドン濃度変化をきたす要因については、ここでは触れないことにする。また、伊豆・箱根等では火山性ガスが地下水のラドン濃度に影響をおよぼしていると考えられるが、これらについては別の機会に検討を行いたい。

ま と め

川崎地域の地下水のラドン濃度観測結果に、いくつかの分析値、実験値及び単純なモデルを想定し、地震予知との関連性について検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

地下水のラドン濃度変化を生ずるケースとしては、帯水層自体のラドン放出量が増加する、濃度の異なる水の混入が起る、気相として運ばれたラドン帯水層に影響を与えるなどの場合が考えられる。

1. 含水量の多い帯水層では、地震予知の立場からいわれている歪みの変化があったとしても、ごく僅かの水を動かすのみでバランスがとれる。このため、固結度の高い岩石について適用される、歪→破壊によるラドン放出量の増加という考え方を含水量の多い帯水層に適用する事は困難であろう。むしろ、帯水層からの揚水条件の変化によって、見かけのラドン濃度変化が生じることを、十分に考慮する必要がある。

2. 各種岩石のラジウム含有量を、地域別または時代別の平均値によって比較した。平均値でみる限り、いずれも大きな差は期待できない。しかし、花崗岩のラジウム含有量がある程度高く、花崗岩上部に風化部があり、それが良好なラドン放出体となっている時、その被覆層のラジウム含有量が少なく、ラドン放出率も低い等の適当な条件の揃った地質断面が選択されるならば、比較的大きなラドン放出量変化を示すことが期待できる。

3. 地下水のラドン濃度変化を生じやすい地質断面は、ラドン放出量の互いに大きく異なる地層・岩石の組合せが適当な形で存在すること、例えばラドン濃度の互いに異なる帯水層が重なり、高濃度の水が低濃度の水に容易に混入しうる構造を有する場合、あるいは基盤岩のラドン放出量が、帯水層を胚胎する被覆層に影響を与える程十分大きく、かつそれらが気相として運ばれ帯水層に供給される場合などが、これに該当しよう。いずれにしろ、地震予知に適したラドン濃度観測井は、地殻に加わった力により、高濃度のラドンが断層またはチャンネルを通路として比較的短時間にラドン濃度の低い地下水に混入できる地質構造を有する必要がある。

文 献

- 阿部喜久男・永井 茂・池田喜代治・村下敏夫(1976) 地下水の水位・水質変化と水年代. 地質ニュース, no. 254, p. 22-31.
- BARRETTO, P. M. C., CLARK, R. B., ADAMS, J. A. S. (1975) Physical characteristics of radon-222 emanation from rocks, soil and minerals: its relation to temperature and alpha dose, in ADAMS, J. A. S., LOWDER, W. M. and GESELL, T. F., eds., *The natural radiation environment II*, U.S. Energy Research and Development Admin., U.S.A., vol. II, p. 731-740.
- 福田 理・垣見俊弘・河内英幸・高木慎一郎・田中信一(1976) 川崎地区水位・水質観測井について(その1). 地質ニュース, no. 259, p. 1-14.
- ・永田松三・垣見俊弘(1976) 川崎地区水位・水質観測井について(その2). 地質ニュース, no. 260, p. 1-9.
- 地震波速度研究グループ(1976) 川崎付近における地震波速度変化の観測(第1回, 第2回扇島爆破実験). 地震予知連絡会報, no. 16, p. 60-64.
- 萩原尊礼編(1974) 地下水の地球化学的調査による地震予知の研究(ソ連邦ウズベク共和国科学アカデミー地震研究所刊行物の邦訳). p. 31-34.
- 池田喜代治・阿部喜久男(1977) 地震予知に関連する地下水の化学的性質. 地質ニュース, no. 273, p. 20-29.
- 石原舜三・関根節郎・大場きみじ(1969) 上部古生代粘板岩と新第三紀シルトストン中のウラン量. 地調報告, no. 232, p. 221-231.
- ・金谷 弘(1973) 諸岩石中のウランおよびトリウム量について. 鉱山地質, 特別号 no. 5, p. 32.
- 垣見俊弘・衣笠善博・木村政昭(1973) 50万分の1後期新生代地質構造図「東京」. 地質調査所.
- 金谷 弘・片田正人(1975) 南部北上山地登米相と薄衣相のカリウム・トリウム・ウランおよび帯磁率. 地調月報, vol. 26, p. 13-27.
- 木村重彦・大平成人・小前隆美(1975) 自然環境中

- のラドンによる水流動の研究(I). 農業土木試験場報告, no. 13, 34 p.
- 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, no. 254, p. 22-31.
- 村上悠紀雄・野口正安・大橋収司(1965) 土岐市周辺地区におけるラドン分布(演旨). 日本原子力学会誌, vol. 7, p. 105-109.
- 野口正安(1964) 液体シンチレーターによるRadonの放射能測定. *Radioisotopes*, vol. 13, p. 362-367.
- 理科年表(1971) 地学部. 丸善, p. 93.

(受付: 1980年6月2日; 受理: 1980年6月18日)