

## 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—

池田喜代治\* 村下敏夫\* 田口雄作\* 井野盛夫\*\*

IKEDA, K., MURASHITA, T., TAGUTSCHI, Y. and INO, M. (1981) Studies on earthquake prediction in the eastern part of Tokai District—On automatic observations of radon concentration in groundwater—. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 32(3), p. 151-166.

**Abstract:** Automatic observations of radon concentration in groundwater for the earthquake prediction in the eastern part of Tokai District began in 1977 to investigate the relation between the crustal movement and change of radon concentration. Data obtained by the automatic observation system are transmitted through the telemetering system to the Geological Survey of Japan in real time.

Eight observation wells were installed at Fuji-no-miya, Kambara, Shimizu, Shizuoka, Hamaoka, Daito, Fukuroi and Arai from east to west in the eastern part of Tokai District. The distance from Fuji-no-miya to Arai is about 100 kilometers. The depth of the observation wells ranges 60 to 393 meters, and the strainers of them were set in Tertiary or Quaternary formations. Radon concentration in groundwater ranges from 0.6 to  $5 \times 10^{-10}$  Ci/liter.

Results of systematic studies of the automatic observation, from the view point of the earthquake prediction, are summarized as follows:

- 1) Radon concentration is affected by degassing of free gases in intake process of groundwater to observation instrument, if water contains free gases in quantity.
- 2) Radon concentration is affected by pumping rate of the observation well.
- 3) Groundwater containing a large quantity of  $Fe^{2+}$  and  $Mn^{2+}$  causes much trouble in automatic observation.

Coseismic and periodic changes in radon concentration were found through analyses of data obtained by these observations.

## 要 旨

東海地方東部地域における地震予知研究の一環として地下水中のラドン濃度の自動観測を1977年から開始した。同地域における地殻の異常とラドン濃度変化の関係を研究するためである。観測地点は駿河湾西岸から遠州灘にかけてのほぼ東西約100 kmの範囲内、富士宮、蒲原、清水、静岡、浜岡、大東、袋井及び新居の8カ所にある。観測井の深度は、60-393mで第四紀層及び第三紀層の地下水を対象としている。予察調査時のラドン濃度は  $(0.6 \sim 5) \times 10^{-10}$  Ci/l であった。観測には、地下水の揚水-自動測定-テレメタリングの観測システムが用いられている。このシステムでの揚水-自動測定によるラドンの測定方法を検討した結果、次の様なことが明らかとなった。

すなわち、1)地下水中に遊離ガスを多量に含む場合には観測装置への地下水の導入過程における遊離ガスのいつ脱がラドン濃度に影響する。2)地下水の揚水量がラドン濃度に影響する。3)地下水中に鉄(II)イオン、マンガ(II)イオンを多量に含む水質は、自動観測に大きな障害となる。

また本観測システムによって得られたこれまでのラドンの観測データの解析結果から、地下水中のラドンの年周期的な変化及び地震に対応したと思われる変化を把握することができた。

## 緒 言

1974年、地震予知連絡会は東海地域を特定観測地域から観測強化地域への指定変更を行った。地質調査所はこれに対応し、同地域における地下水に関する地震予知研究の一環として地下水中のラドン濃度変化についての研究を行っている。すなわち、1976年から静岡県清水市一

\*環境地質部  
\*\*静岡県総務部地震対策課

大東町間の地域の既存井を対象とした地下水中のラドン濃度の定期観測を開始した。定期観測と平行してラドン濃度の自動観測化をはかり、1977年には地質調査所清水観測井を掘さくして、水中ラドン自動連続測定装置による自動観測を開始した。以後、1978年2月には大東、1979年2月には浜岡に地質調査所観測井を掘さくし、清水と同様の自動観測を開始した。他方、静岡県は独自に予備調査を行った後(井野・池田, 1977), 1977年末から78年3月にかけて富士宮、蒲原、静岡、袋井及び新居の既存井をラドン観測井とし、清水観測井と同じシステムによるラドンの自動観測を開始した。これらの観測井におけるラドン測定値を、リアルタイムで集中監視するために、地質調査所は、1978年6月に観測井と地質調査所を結ぶテレメータ化を完成させた(加藤ほか, 1977, 1979, 1980, 1981; 佃ほか, 1980)。

地下水中のラドン濃度は、1972年のソ連のタシケント地震の際に地震の前兆として大きな変化を示した(萩原, 1974)ことから、地震予知の地球化学的手法の一つとして注目を集め、以来、ソ連、中国では地震予知研究の重要な観測項目の一つとして事例研究が進められている。これらの成果として、地震の前兆としての変化を示した実例が数多く紹介されている(脇田, 1978; 脇田・中村, 1979)。わが国では、1975年、川崎における異常地盤隆起現象の解明に関連し、地震予知研究の手法の一つとして、はじめて、脇田ほか(1976)によって地下水中のラドン観測が行われた。地質調査所においても、この現象解明のために実施した地球化学的調査研究の一項目として、これを取り入れたのははじめ、関東地方西部地域、伊豆半島東部地域、東海地方東部地域等においても、同様な観測を実施中である。1978年1月14日に発生した伊豆大島近海地震(M=7.0)の際には、伊豆半島地域における観測地点で、地下水中のラドン濃度変化が観測されている(池田ほか, 1979)。また、脇田ほか(1978)もその前兆としてのラドン濃度変化を中伊豆町で観測したと報告している。

東海地域におけるラドン濃度の自動観測及びテレメータ化の完成は、富士宮市-新居町の約100km間に分布する8観測井からの密度の高い時系列情報を把握することを可能とした。しかしながら、無人自動観測に伴う測定上の問題も生じている。これらの問題点を解決し、かつ、人為的な要因で起る変動を除去し、正確で信頼性のあるデータを継続的に得ることが本研究上最も必要なことである。

本報告は、各ラドン自動観測井の水理地質学的及び地球化学的背景、並びに測定方法と、その問題点について

の検討結果を述べる。また、これまでの観測によって得られた各観測井のラドン濃度観測結果をとりまとめて報告する。

## 1. ラドン観測井位置及びその水理地質学的背景

東海地方東部地域を対象としたラドン自動観測井の位置を第1図に示す。観測井群は東海地震の震源域と想定される(石橋, 1976)駿河湾西岸から遠州灘沿岸にかけての東海地方東部地域に配置され、その諸元は第1表に示すとおりである。深度は60-393mであって、清水、浜岡、大東及び蒲原の観測井は、第三紀中新世及び鮮新世の地層中の地下水、富士宮、静岡、袋井及び新居の各観測井は第四紀更新世の地層中の地下水を対象としている。次に各観測井の水理地質学的な背景について述べる。

### 1) 清水観測井

本観測井は庵原川扇状地にある庵原中学校の敷地に位置する。校庭の北にある山地は第三紀中新世和田島層群・小河内層群で砂岩・シルト岩・礫岩の互層からなる(静岡商工会議所, 1976)。

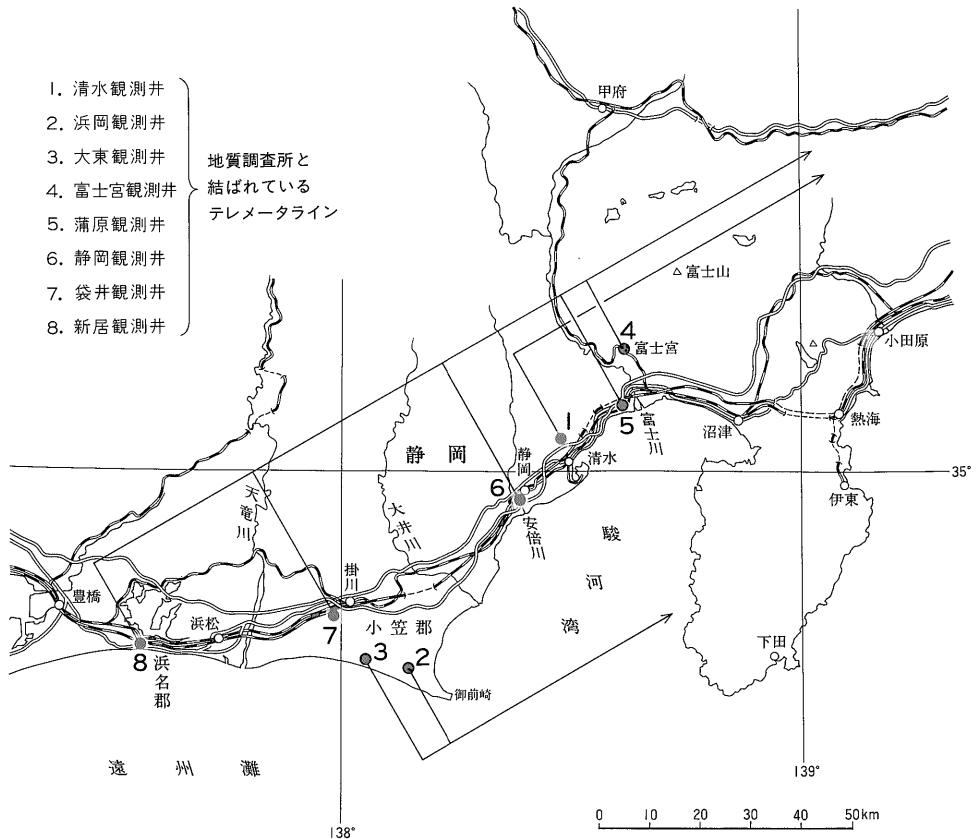
掘さく試料によると、深度24mまでは主として砂礫層で、褐色を呈する。24mを超えると砂と粘土からなる層で、青色を呈する。電気検層の記録によると、褐色の砂礫層は70-145 $\Omega\cdot m$ の比抵抗(ロング・ノルマル,  $a = 1.6m$ )であるが、青色の砂・粘土の層は25-74 $\Omega\cdot m$ の比抵抗と低い。これらから判断すると、24mを境にして上部は扇状地堆積物、下部は山地を構成する上記の和田島層群・小河内層群に相当するであろう。

ストレーナーのある地層は下部の砂層、粘土混り砂層及び砂礫層であって、揚水試験の結果によると透水性が悪く(第1表参照)、帯水層というよりむしろ難帯水層の区分に近い水理学的性質を示している。本観測井及び井戸柱状図から推定した本観測井周辺の地下地質断面を第2図に示す。

### 2) 浜岡観測井

本観測井は浜岡町を流れる新野川の東側の台地にある町立佐倉保育園の敷地内に位置する。台地を構成する地層は、第三紀中新世相良層群である。

掘さく試料によると、19m以浅は未固結の中粒砂層、19mを超えて47mまではやや固結したシルト岩、47mを超え145mまでは中-細粒砂混り泥岩、145mを超え160mまでは砂質粘土、その下位はやや固結した黒色泥岩である。電気検層の比抵抗は、ロング・ノルマル(前出)で約80m以浅が6-18 $\Omega\cdot m$ 、80mを超えると4-9 $\Omega\cdot m$ と低い。低い部分の比抵抗曲線の形は、鋸の刃のように凹凸がはげしい特徴を示している。



第1図 ラドン観測井位置図

第1表 観測井の諸元

番号	名称*	口径 mm	深度 m	ストレーナー m	静水 位 m	比湧水量 m <sup>2</sup> /day	透水係数** cm/sec	地質
1	清水	200	60	49.0-54.5	9.26 (52年3月)	7.4	$1.1 \times 10^{-4}$	中新世和田島層群・小河内層群
2	浜岡	200	270	153.9 <sup>3</sup> -264.4 <sup>8</sup>	14.65 (53年12月)	0.7	$4.9 \times 10^{-6}$	中新世相良層群
3	大東	200	260	144.5-166.5 210.5-221.5	2.53 (52年12月)	1.4	$7.6 \times 10^{-6}$	鮮新世掛川層群
4	富士宮	350	120	53.8-67.1 78.5-96.8 102.3-114.5	54.88 (49年12月)			更新世鶯ノ田礫層
5	蒲原	350	121	60.0-121.0	11.13 (47年8月)	8.3		第三紀岩渕安山岩層
6	静岡	300	150	100.8-117.3	0.43 (47年3月)	60.0	$3.0 \times 10^{-8}$	更新統
7	袋井	300	130	64.0-75.0 99.5-124.5	23.52 (46年1月)	73.1		更新世小笠礫層
8	新居		393	260.5-271.5 299.0-304.5 365.0-370.5	9.10 (51年10月)	6.2		更新世西浜名累層

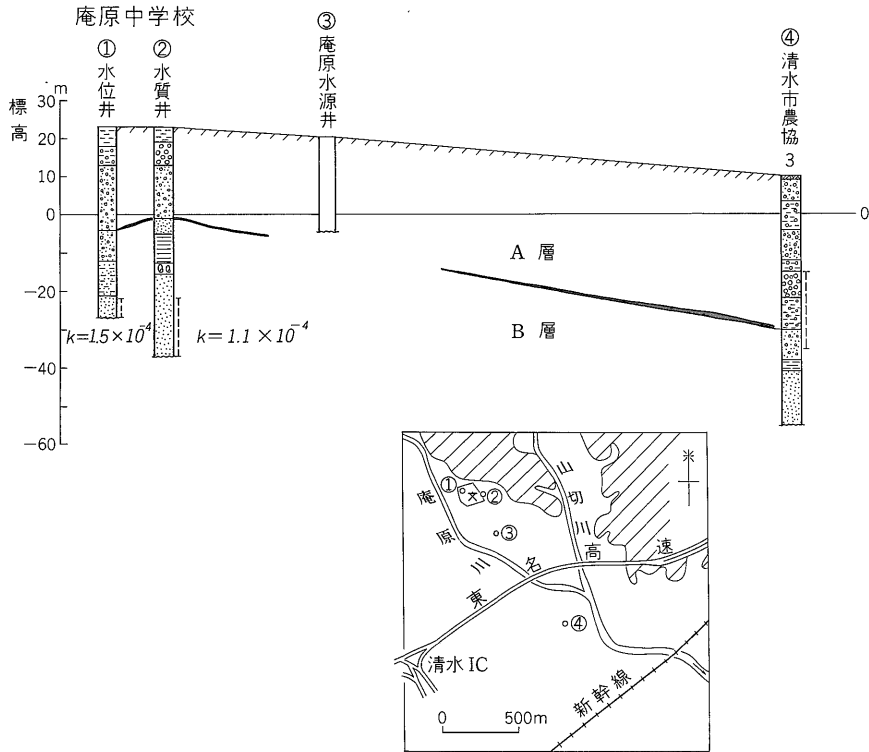
\*番号1-3の正式の名称は、例えば「地質調査所清水地区水質観測井」、番号4-8は例えば「静岡県地震予知ラドン観測井富士宮観測所」であるが、表では地名で表現した。

\*\*水位降下試験と水位上昇試験の値の平均値

ストレーナーの部分の地層は泥岩で、透水係数から判断しても難帯水層の区分に入る。又、揚水試験における水位降下-時間の曲線は、揚水時の地下水補給が乏しいことを示唆している。

### 3) 大東観測井

本観測井は菊川右岸の大東町役場駐車場に位置している。付近の丘陵は第三紀鮮新世掛川層群によって構成されている。



第2図 清水観測井付近の地下地質断面図  
 透水係数 K:cm/sec, A層:扇状地堆積層, B層:世和田島層群・小河内層群

掘さく試料によると、7.5m以浅は菊川の堆積物と考えられる砂層と泥炭を含む砂質粘土で、その下位に厚さ5.5mの砂丘礫、更に厚さ12mの貝殻を混える青灰色砂質粘土・シルトが続き、25m以深は泥岩-砂質泥岩である。電気検層の比抵抗は、ロング・ノルマル(前出)で90m以浅の泥岩層が3-4Ω・m、それ以深が5-12Ω・mを示している。140-180m、210-220mの付近の比抵抗曲線は、透水性のよい薄い層が介在していることを示す複雑な形を示している。

ストレーナーは、比抵抗曲線に基づいて、深度144.5-166.5mと210.5-221.5mの2カ所に設置した。透水係数から推測される地層は難帯水層の区分に入り、揚水試験の水位降下-時間曲線は透水性が横方向に変化していることを示唆している。

4) 富士宮観測井

本観測井は、富士川と潤井川との間にある星山丘陵の西北端に位置している。この一帯は富士溶岩流中の大宮溶岩に覆われている。

地質柱状図では54m以浅が上記の溶岩で、下位に礫層がある。この礫層は更新世の鷲ノ田礫層と考えられる。ストレーナーはこの礫層にある。静水位は富士溶岩の基底よりも深いところにある。

5) 蒲原観測井

本観測井は富士川右岸の地震山にある蒲原町の上水道配水場敷地内に位置している。

地質柱状図によると、深度60mまでは砂礫層、60-121mは硬い火山砂礫層であるが、電気検層では深度55m付近の粘土層を境に上・下部層に区分される。本井の南にある水井戸では、深度67m付近に泥炭混り粘土の薄層があり、この薄層と本井の上記粘土層とが同一のものと考えられる。下部層は岩渕安山岩層と考えられているが詳細については不明である。揚水試験の結果では、清水観測井とあまり変わらない。

6) 静岡観測井

本観測井は安倍川右岸の静岡市立長田南中学校敷地内に位置している。

電気検層の外、導電率及び水温の孔内測定の結果を照合すると、150mまでの地層は60m以浅の大礫層と灰色粘土層からなる層、60mを超え95mまでの礫層、95mを超え124mまでの礫層、最下部の粘土層と砂礫層からなる層に分けられる。ストレーナーは下部の礫層中であり、透水性は上記3例に比べてよい。

7) 袋井観測井

本観測井は小笠山山腹上の袋井市豊次に位置してい

る。付近は第四紀更新世の小笠礫層が広く分布している。

地質柱状図によると、12m以浅は大礫(玉石)、12mを超え59mまでは赤色粘土混り砂礫、その下位は青色の砂礫と粘土、98.5mから再び茶褐色砂礫となる。

ストレーナー部分の砂礫層は、比湧水量から推測すると、計8本の観測井の中で最も透水性がよい。

8) 新居観測井

本観測井は浜名湖西岸砂州上の新居町新居に位置している。

地質柱状図では、基盤岩(372m以深)の上は、砂(主としてシルト質)層と砂礫層との互層で2枚の粘土層(厚さ13mと24m)を挟んでいる。全体として粗粒堆積物であって、更新世の西浜名層(磯見・井上, 1972)に相当するものと考えられる。

ストレーナー部分の砂礫層の透水性は、比湧水量から推測して、清水と蒲原の両観測井と同様に悪い。

2. ラドン観測井の地球化学的背景

各ラドン観測井はそれぞれの水理地質学的な条件を反映し、観測井中の地下水に含まれるラドン濃度<sup>1)</sup>も、溶存化学成分の特徴も多様である。8観測井のラドン濃度の測定結果及び溶存化学成分の分析結果を第2表に示し、その化学的性質を表わすキヤダイアグラムを第3図に示す。

1) 清水観測井

本観測井付近には、庵原川扇状地堆積層中の地下水と本観測井が観測対象としている第三紀層中の地下水があり、両者の水質は全く異なる。前者をA層、後者をB層とすると、清水市水道水源井、清水農協の井戸はA層、

本観測井はB層の地下水である(第2図参照)。A層地下水は、Ca-HCO<sub>3</sub>型の地下水であるが、B層地下水は、第2表及び第3図に示すようにpH 9.1の弱アルカリ性、Na-HCO<sub>3</sub>型の特徴のある地下水である。ラドン濃度は、A層の清水市水道水源井で4.55、清水農協で4.98(いずれも×10<sup>-10</sup> Ci/l)を示すのに対し、B層は1.9×10<sup>-10</sup> Ci/lであって、浅いA層の方がB層の約3倍のラドン濃度をもっていることが明らかとなった。

2) 浜岡及び大東観測井

浜岡観測井では相良層群、大東観測井は掛川層群、ともに第三紀層中の地下水が対象である。相良層群には、大東町付近でガス徴をもった地下水が存在することが知られている(河井・戸谷, 1958)。浜岡観測井では高濃度のHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を含むが、Cl<sup>-</sup>は34 mg/lの淡水地下水であって、キヤダイアグラム上では溶存成分の90%以上がNa-HCO<sub>3</sub>であり、僅かに遊離ガスを含む。大東観測井は相良層群を不整合に覆う掛川層群中の地下水を対象とする。この地下水も浜岡と同様HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度が著しく高い特徴をもつが、Cl<sup>-</sup>濃度約900 mg/lを含みや塩分濃度の高い地下水である。さらにフミン質を多量に含むため著しく着色している。遊離ガス量は浜岡観測井よりも多い。浜岡、大東ともに水質は難透水性の地層中の地下水であることを反映している。浜岡、大東両観測井のラドン濃度は1.1、1.5×10<sup>-10</sup> Ci/lである。

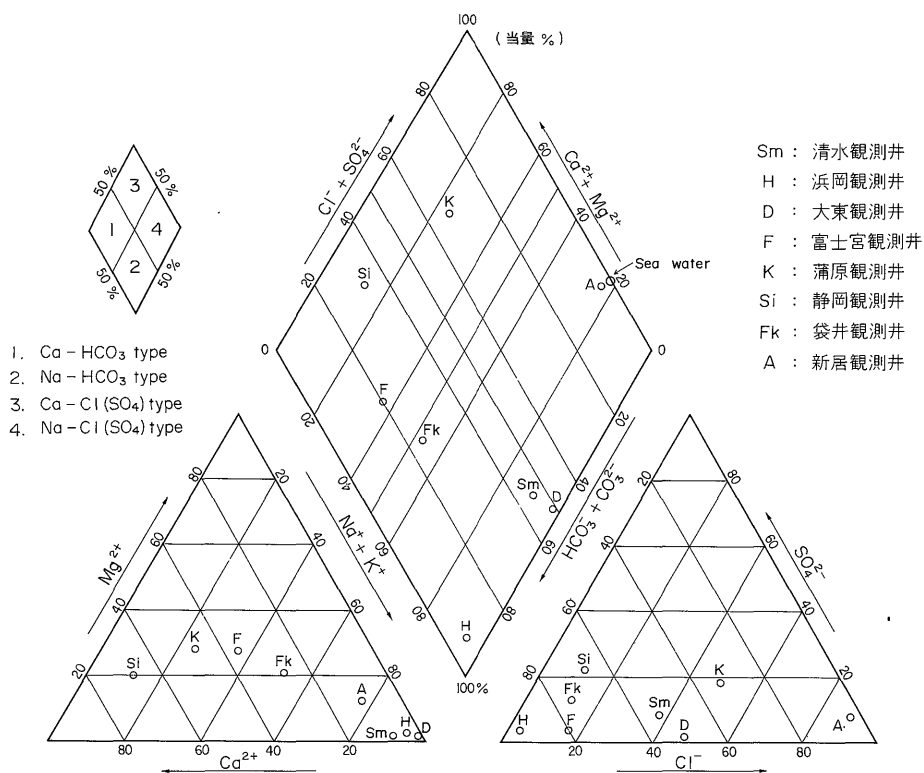
3) 富士宮観測井

富士基底溶岩の下位の礫層中の地下水であると推定される本観測井の水質は、溶存化学成分が少なく、Ca-HCO<sub>3</sub>型である。第4図に示すキヤダイアグラムにみられるように、その化学的性質は富士溶岩地下水同様のグループに属する。本観測井の水理地質学的な条件を勘案すると、富士溶岩を通じて供給される富士山系の地下水であると考えられる。ラドン濃度も富士溶岩中の地下水のそれとほぼ等しく、かつ低濃度である(第3表)。

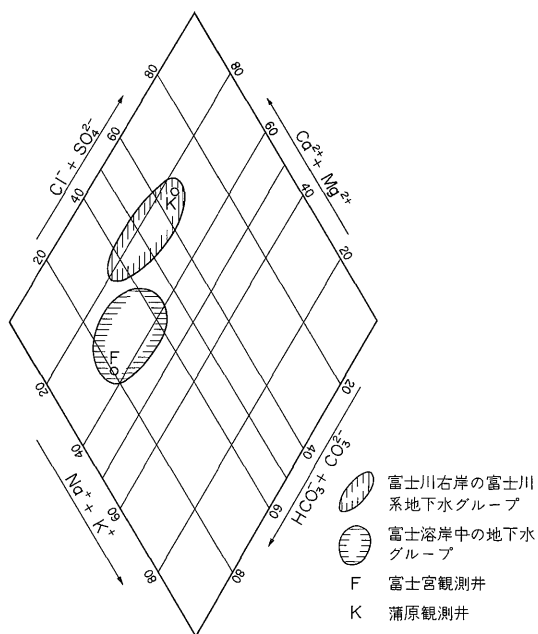
1) 3-2), 3) で後述するように自動観測はα線強度を測定する方法で行うが、測定しているα線は3.82日で減衰するので、Rn-222の濃度である。

第2表 東海地方東部ラドン観測井水質分析表

試料採取地点	ストレーナーの位置( )は井戸深度(m)	電気伝導率(μs/cm)	水温(°C)	pH	炭酸水素イオン HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	塩化物イオン Cl <sup>-</sup> (mg/l)	硫酸イオン SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	ナトリウム Na <sup>+</sup> (mg/l)	カリウム K <sup>+</sup> (mg/l)	カルシウム Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	マグネシウム Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	鉄 total Fe (mg/l)	ラドン Rn-222 ×10 <sup>-10</sup> Ci/l	採取年月日
清水観測井	(60) 49 -54.5	358	17.3	9.1	114.1	44.9	12.0	63.5	0.8	4.8	0.5	0.08	1.96	'79. 6.14
浜岡 "	(270) 154 -264.4	2,400	21.1	7.9	1708.	33.7	43.0	563.	24.5	14.0	6.1	2.20	1.12	'79. 6.11
大東 "	(260) 144.5-221.5(2)	4,960	22.2	8.0	1610.	874.1	8.0	1040.	28.1	7.6	7.9	0.28	1.51	'79. 6.11
富士宮 "	(120) 53.8-114.5(3)	181	17.3	6.6	77.5	4.6	11.0	11.5	1.9	11.0	5.2	0.05	0.62	'80. 2.29
蒲原 "	(121) 60 -121	476	20.5	7.7	84.2	68.3	33.4	19.7	2.3	41.2	11.1	0.10	4.63	'80. 2.29
静岡 "	(150) 100.8-117.3	222	18.2	7.7	68.0	6.4	18.0	4.2	1.0	21.2	3.8	0.25	2.56	'80. 6.13
袋井 "	(130) 64 -124.5(2)	120	17.7	7.9	56.1	5.2	6.8	11.8	0.5	5.4	2.6	0.06	5.4	'80. 2.29
新居 "	(393) 260.5-370.5(3)	4,800	22.5	7.3	112.9	1297.	175.7	732.	6.5	93.0	66.0	0.33	2.04	'80. 2.29



第3図 ラドン観測井の地下水の溶存化学成分の性質 (キーダイアグラム)



第4図 富士川流域における地下水の化学的性質

第3表 富士溶岩地下水中のラドン濃度

試料 No.	採取年月日	ラドン濃度 Rn-222 ( $\times 10^{-10}$ Ci/l)	備考
F-4	'76. 3. 4	0.30	水中ポンプ揚水中の地下水
F-5	"	0.77	"
F-6	"	0.38	"
F-11	3. 5	0.69	"
F-12	"	0.22	"
F-13	3. 6	0.29	"

4) 蒲原観測井

本観測井は駿河トラフの陸上延長線上にあると推定されている地震山付近に位置し、この地下水は富士川下流右岸沿いの富士川町から蒲原町にかけて分布する第四紀層中の富士川系地下水と推定され、同様の化学的性質を示す。すなわち、 $\text{Cl}^-$  68 mg/l、 $\text{SO}_4^{2-}$  33 mg/l を含み、富士川左岸に分布する富士溶岩系の地下水と比較すると溶存成分が多いという特徴がある。ラドン濃度は  $4.6 \times 10^{-10}$  Ci/l と比較的高い値を示している。

5) 静岡観測井

本観測井は安倍川右岸の安倍川扇状地上に位置する。

この扇状地面には主要な帯水層が3層分布する(東京通産局, 1974)といわれ, 本観測井はこの付近で層厚平均50-60mの最も厚い透水性のよい二番目の砂礫層を採水層としている。水質は第2表に示すように溶存成分の少ないCa-HCO<sub>3</sub>型であって, 安倍川系の循環地下水と推定される。

静岡市付近の第四紀層中の地下水中のラドン濃度は第5図に示す。各位置で測定した結果(1.9~4.8)×10<sup>-10</sup> Ci/lであり, 本観測井では2.56×10<sup>-10</sup> Ci/lである。

6) 袋井観測井

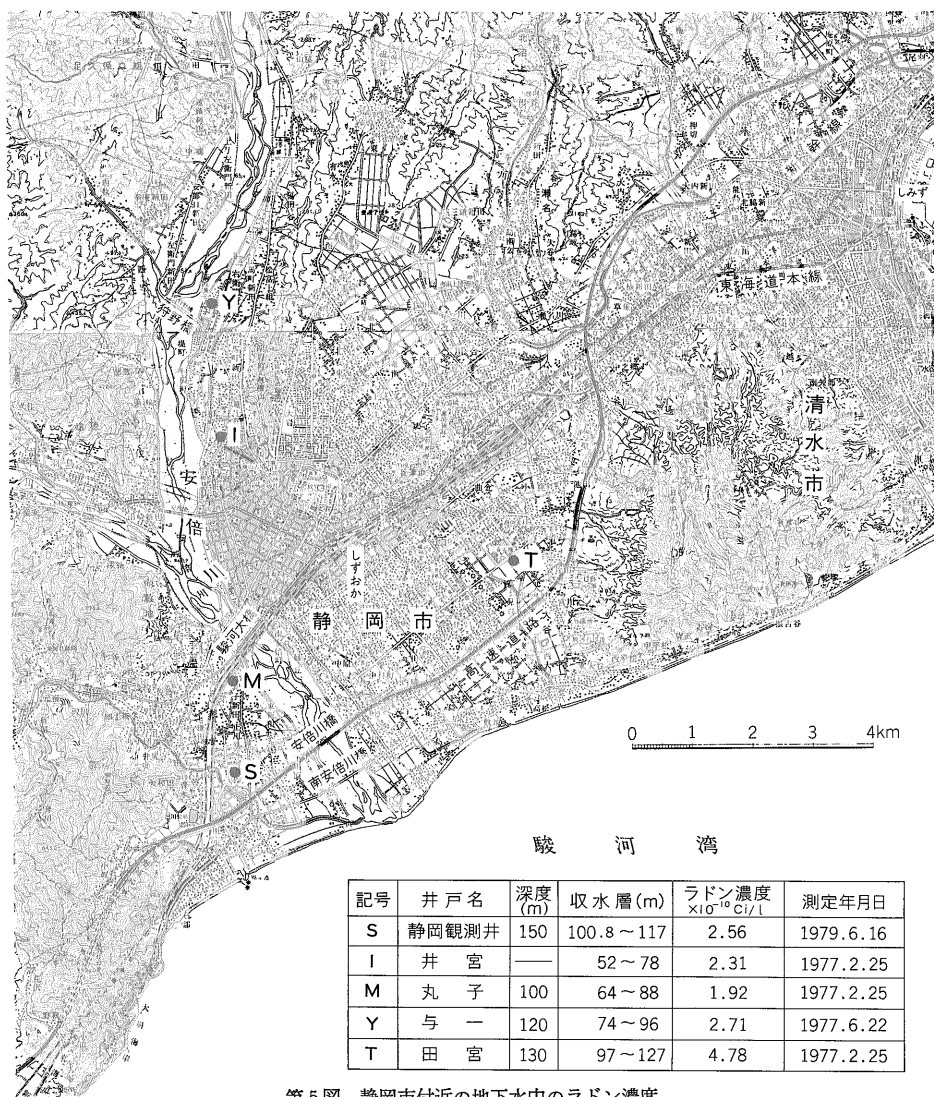
本観測井の地下水は, 浜岡, 大東両観測井が対象としている第三紀層の上位にある第四紀の陸成層, 小笠礫層

中の地下水である。礫層を主体とした透水性の良い帯水層中の地下水を反映し, 水質は溶存成分の少ないCa-HCO<sub>3</sub>型である。小笠丘陵地帯で涵養される循環地下水と推定される。

本観測井のストレーナーは, 深度64-75m, 99.5-124.5mの2層である。静止状態にした井戸で採水器を用いて両層の地下水を採取し, ラドン濃度を測定した結果, 上部地下水が4.91, 下部地下水が6.07(×10<sup>-10</sup> Ci/l)を示し, 深い方が高い濃度を示している。本観測井では上述の2層からの混合水を測定している。

7) 新居観測井

本観測井の地下水は, 8観測井の中では最も塩分濃度



第5図 静岡市付近の地下水中のラドン濃度

「この地図は, 国土地理院発行の5万分の1地形図(静岡)を使用したものである。」

が高く、約 1,300 mg/l の Cl<sup>-</sup> を含む。溶存成分の化学的性質は、Na-Cl 型であって、キーマイグラム上では海水とほぼ同じ位置に図示される(第3図)。従って本地下水は海水の影響を受けたことのある地層中のかん水であると推定される。本地下水中のラドン濃度は、 $2.04 \times 10^{-10}$  Ci/l である。

### 3. 観測方法

#### 1) 地下水の試料採取方法

地下水の試料採取は、空気との接触をさけるために水中ポンプにより連続揚水し、揚水管から直接ラドンの測定装置に導入する方法を用いた。

揚水した地下水は、地下における被圧状態から開放されるため水中の溶存ガスの分離現象が生ずる。この現象は測定装置への給水管内で生ずることが多く、配管方法によっては正しい計測値が得られないことを見出した。

一般に空気と水との間の Rn-222 の分配係数 K は次式のように表わされる (MISAQI, 1975)。

$$\frac{Q_w}{Q_a} = \frac{C_w V_w}{C_a V_a} = K \frac{V_w}{V_a}$$

ここで  $Q_w = C_w V_w$  : ある体積の水中のラドン量

$Q_a = C_a V_a$  : ある体積の空気中のラドン量

$C_w$  : 水中のラドン濃度

$C_a$  : 空気中のラドン濃度

$V_w$  : 水の体積

$V_a$  : 空気の体積

上式の K は温度依存性があり、一般に水と空気が同体積 ( $V_w/V_a = 1$ ) のときの K が用いられる。すなわち、

$$K (\%) = \frac{\text{水中のラドン濃度}}{\text{水と同体積の空気中のラドン濃度}} \times 100$$

MISAQI によると K は次式で求められる。

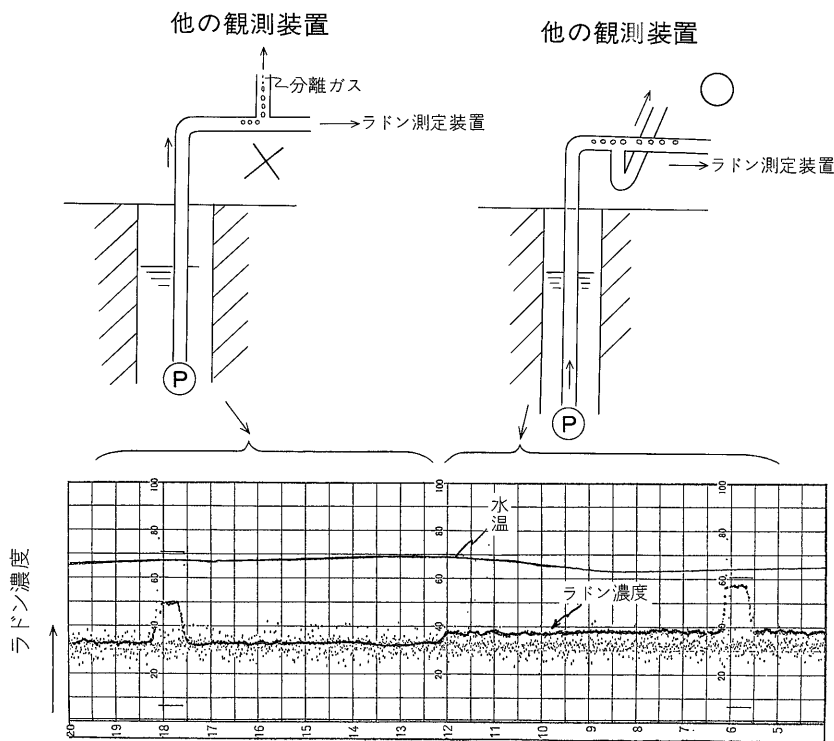
$$K (\%) = (0.1057 + 0.405e^{-0.0502t}) \times 100$$

ここで t は水温 (°C)

上の式から温度 20°C の水と空気が同体積で混在する場合、水の方のラドン量は 25.4%、空気の方のラドン量は 74.6% の分配率となる。

空気の代りに他の気体、例えば、大東、浜岡観測井の遊離ガスの主成分であるメタンの場合でも殆んど分配率に変化がないと考えられる。例えば 20°C の温度下で試料採取した地下水からガスが遊離すると、そのガス中のラドン濃度が水中のラドン濃度の約 3 倍になるように平衡が進み、水からガス中にラドンが移動する。従って、このガスが途中で逃げるような配管方法を用いると、正しいラドン量の計測はできない。

配管方法の具体例と、それが測定結果に与える影響を第 6 図に示す。実際の観測井では、地下水から分離した



第 6 図 ラドン測定装置給水系統の配管方法が測定値に及ぼす影響



ガスが配管途中でトラップされたり、いつ脱しないような方法を用いている。

2) 水中ラドン連続測定装置

測定にはアロカ株式会社製、水中ラドン連続測定装置 (NW-101 型、以下ラドン測定装置という) を用いた。本装置はNOGUCHI and WAKITA (1977) によって開発され、

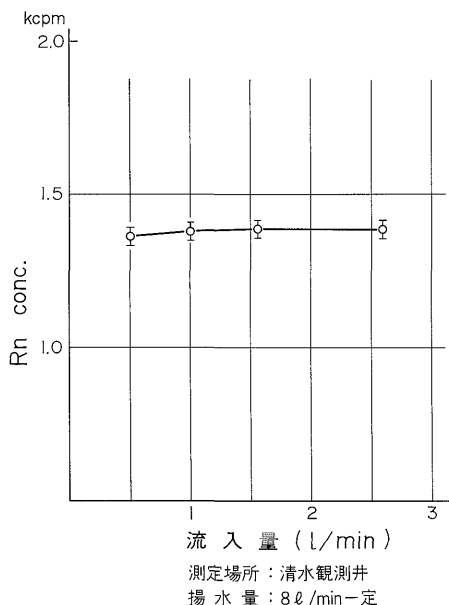
試料水を装置の検出部の水タンクに導入し、その中で水中から分離したラドンガスを ZnS(Ag) シンチレータで  $\alpha$  線強度として測定する方式になっている。

3) 水中ラドン連続測定装置の使用条件設定に関する実験

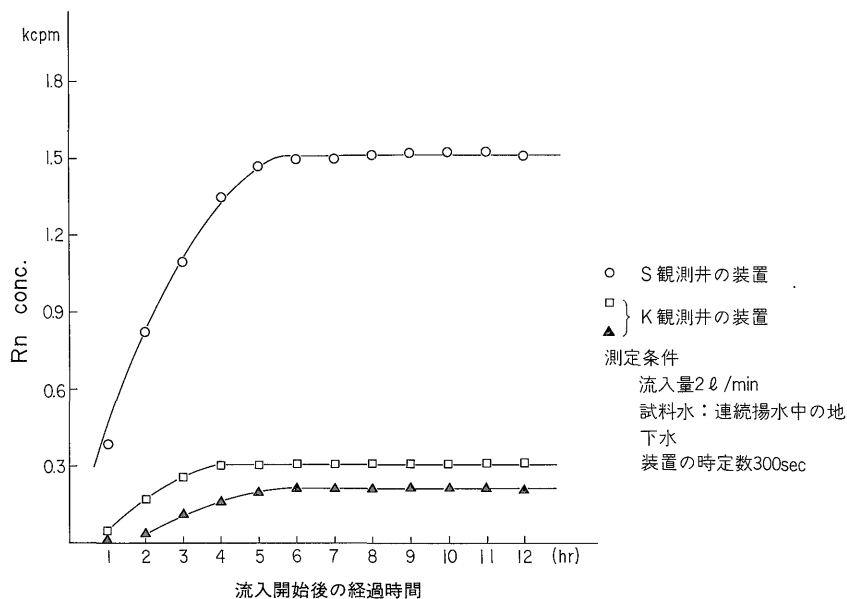
(イ) 流入量の影響：本装置の検出部に流入する水量を 0.5, 1.0, 1.7, 2.6 l/min の 4 段階に変化させ、各段階について計数率を求めた(第7図)。この結果 0.5-2.6 l/min の範囲では計数率の有意の変化は認められない。

(ロ) 応答特性：装置に試水を導入開始してから試水本来の計数率値に達するまでの時間を、ラドン濃度の異なる 3 試料について測定した。これらの結果から本装置の 100% 応答時間は 6 時間であると考えられる (第8図)。

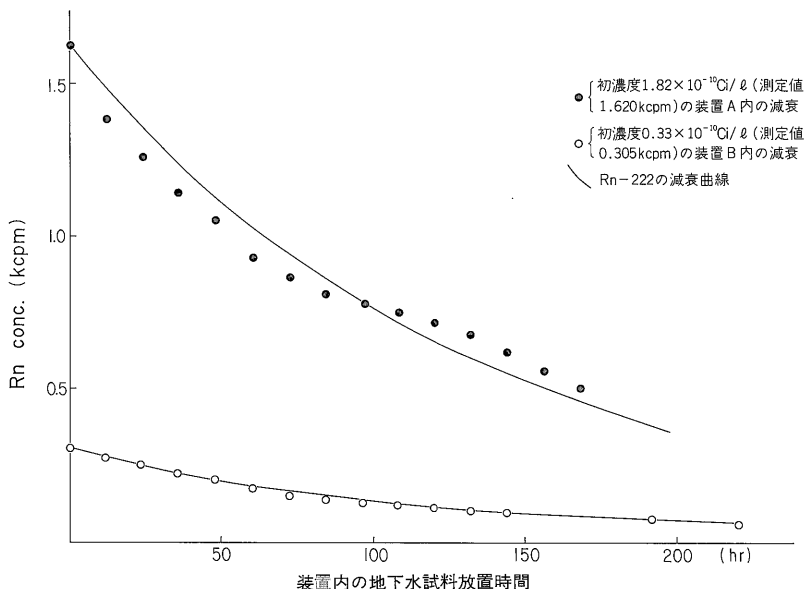
(ハ) ラドン濃度-出力特性：観測井に設置してある使用中の本装置に導入される地下水のラドン濃度を液体シンチレーション法で測定し、そのラドン濃度と装置の計数率出力値との比較を行った。また、試水の流入を止めて、検出部に残っている水中のラドン (Rn-222) 崩壊によるラドン濃度の理論値と計数率値との関係を求めラドン濃度-出力特性を求めた (第9・10図)。この結果、双方とも理論値と実験値はほぼ一致し、本装置の測定する  $\alpha$  線量は Rn-222 であることを示し、また、B の装置ではラドン濃度と出力計数率との関係は直線関係が得られたが、A の装置ではやや曲線状となった。双方ともラドン濃度  $1 \times 10^{-10}$  Ci/l に対し、出力計数率は約 0.9 kcpm となる。



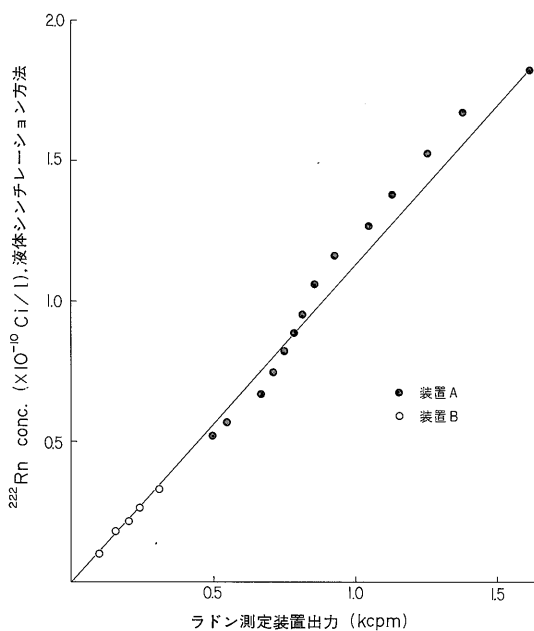
第7図 ラドン装置への流入量変化の影響



第8図 試料水流入開始後のラドン測定装置の応答特性



第9図 測定装置内の地下水試料のラドン濃度の減衰



第10図 ラドン濃度—装置測定出力値

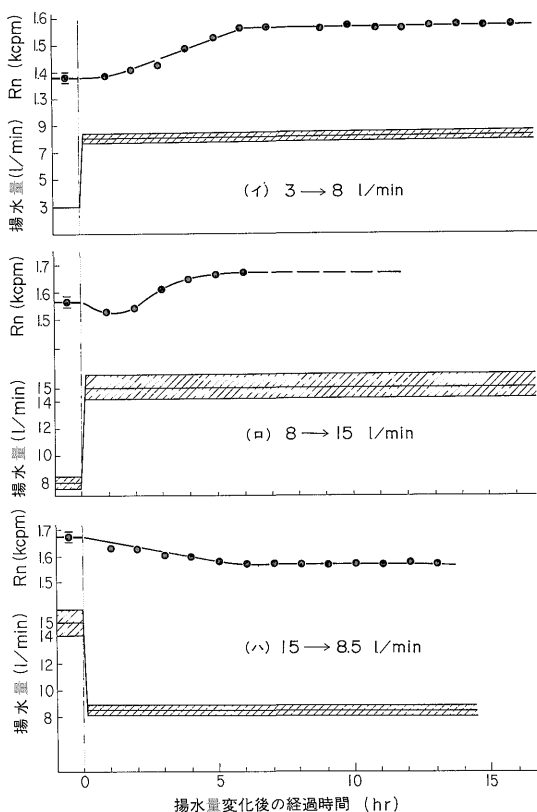
4) 揚水量とラドン濃度との関係

清水観測井で、揚水量を 3 l/min から 8 l/min, 15 l/min, 8.5 l/min と逐次変化させ、これに伴うラドン濃度の経時変化を調べる実験を行った。ラドン測定装置への流入量を 2 l/min の一定とし、上記各段階に揚水量を設

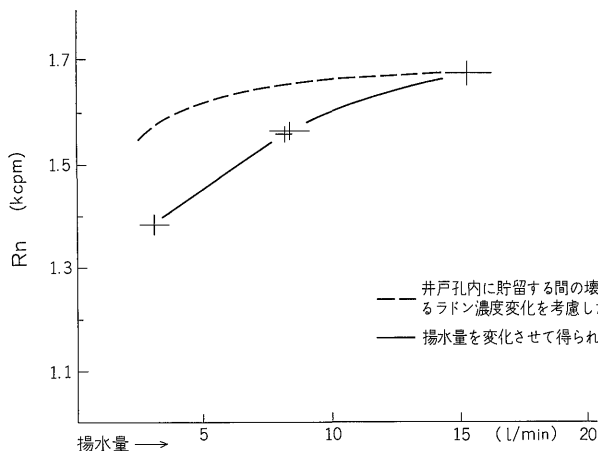
定後、ラドン測定装置の応答の経時変化を求めた。実験に当って、井戸管内の地下水の貯留容量、装置の応答特性を考慮し、各段階について最低 6 時間以上の経時変化を求め、かつ、ラドン濃度がそれぞれの段階の揚水量のもとにおける平衡値を示めした (第11図)。

第11図(i), (ii), (iii)から、各段階ともに揚水量を変化させてから約 6 時間後には、ラドン濃度は平衡に達している。一定の揚水量とその揚水量のもとで平衡に達したラドン濃度との関係を示したのが第12図であり、揚水量の変化に伴って地下水中のラドン濃度が明らかに変化する。

第13図に示すように井戸管内の地下水が静止状態のときは、井戸管内のラドン濃度の分布は殆んどストレーナー付近だけに限られるという測定結果が報告され(脇田, 1975), 池田・金谷 (1976) もこのような現象を川崎で観測している。このような事実から、水中のラドンは極めて拡散速度が遅く (拡散定数, 18°Cで  $1.14 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ), 井戸孔内では対流が殆んど行われていないものと考えられる。このため井戸管内は一種の貯留槽としての役割を果たし、比較的變遷速度の速いラドンの場合、この貯留槽の大きさはラドン濃度測定に当って無視できない。揚水量が少ないときは、ストレーナーから井戸孔内に入ってからの地下水の貯留時間が長くなり、その間に地下水中のラドンが壊変し、ラドン濃度は減少する。第12図中、点線で示した曲線は、清水観測井の揚水量の変化を貯留時間の効果だけに限定した揚水量とラドン濃度

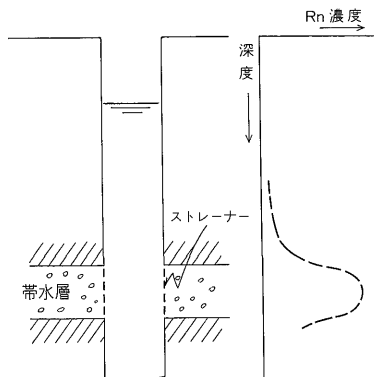


第11図 清水観測井の揚水量変化に伴うラドン濃度の経時変化



第12図 揚水量とラドン濃度との関係 (清水観測井)

の関係線である。実験の結果は、第12図の実線で示すように地下水の滞留時間による影響よりも揚水量がラドン濃度にかかなり大きな影響を与えることを示している。これは井戸の構造、帯水層の水理学的な特性によるものであって、恐らく観測井ごとに異なった関係が得られるも



第13図 模式的な静止井の地下水中のラドン濃度の分布

のと推定される。

#### 4. 観測結果及び考察

ラドン測定装置による観測結果は、アナログ量として装置の記録計に記録されると同時に、テレメータシステムにより10分間隔のデータが地質調査所庁舎の親局に送信される。これらのデータの図化出力されたものの1例が第14図であり、各観測井について10分間隔測定値の1日間の平均値をプロットして作成した観測結果が第15図である。

##### 4.1 観測結果の変動係数

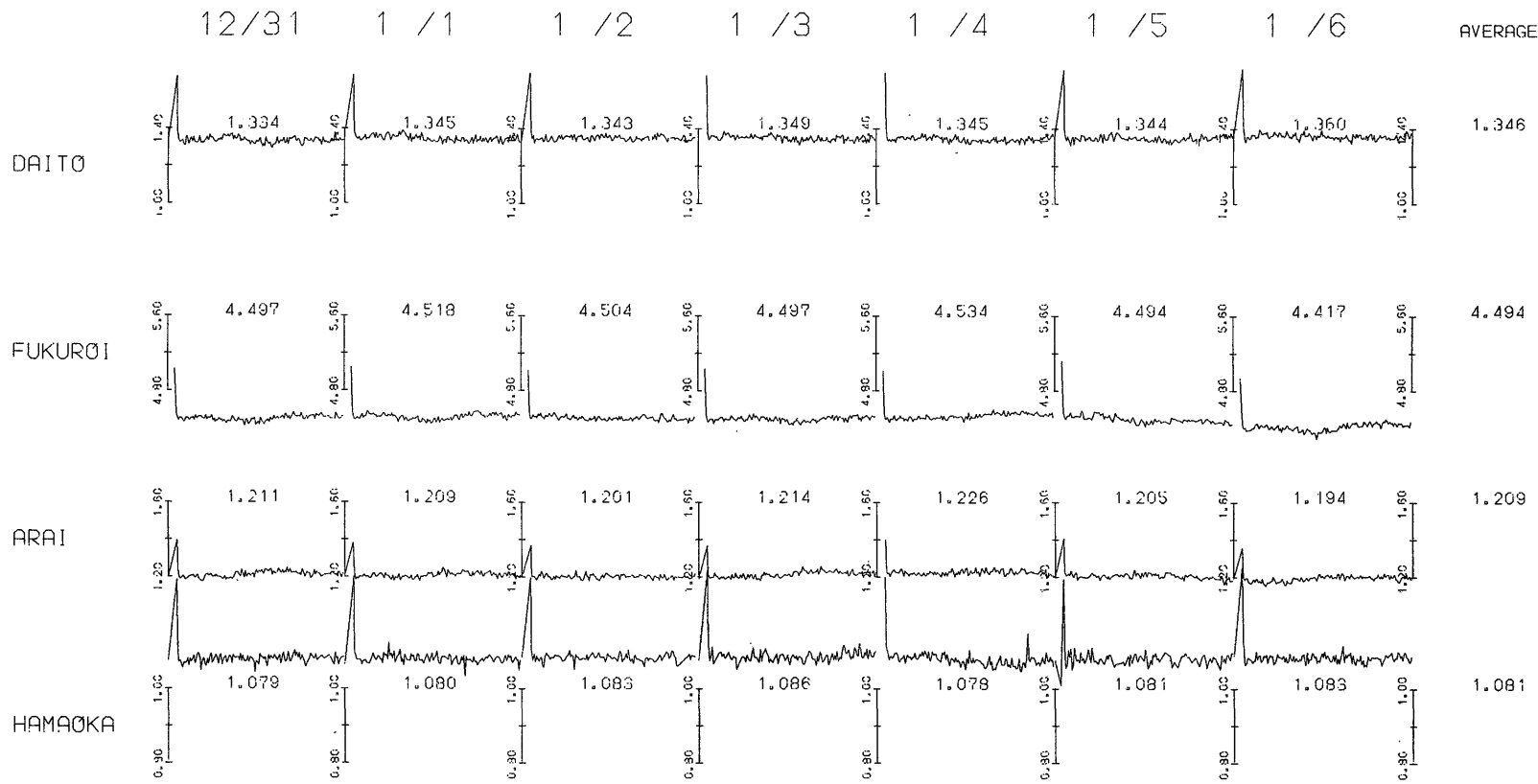
清水観測井の例では、10分間隔測定値の1日間の変動係数は、通常、C.V. 1.3%、また、1日平均値の月間の変動係数は、通常、C.V. 2%程度である。これまでのわれわれの行っている測定方法では、ラドン測定装置検出部の温度特性によると思われる日変化を示したことがあるが、地下水自体のラドン濃度の日変化は明確ではない。しかし、長期的には、各観測井ごとに、それぞれラドン濃度の変化に差異が認められる。

##### 4.2 各観測井の長期的なラドン濃度変化とその特徴

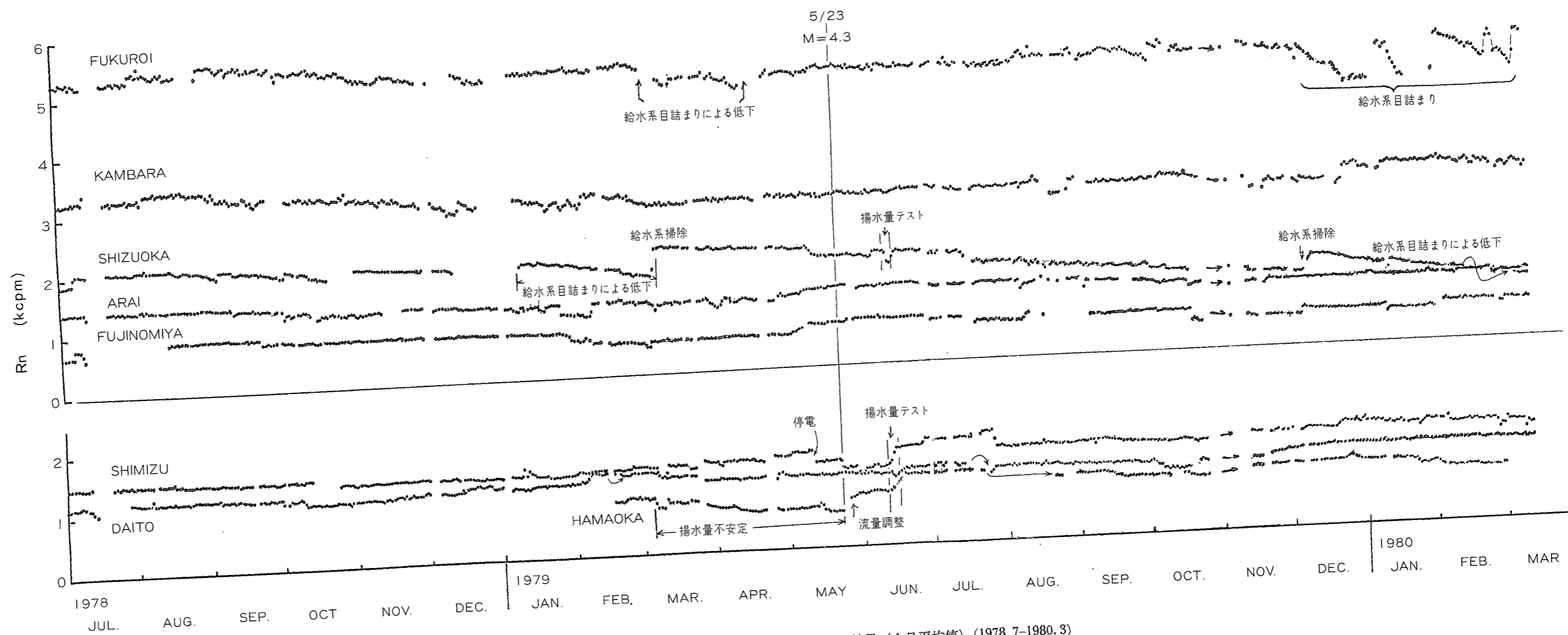
1日の平均値から毎月の平均値を求めて作成したラドン濃度の経年変化を第16図、第17図及び第18図に示す。これらから各観測井の長期的な濃度変化として次のような特徴がみられる。

清水観測井：本観測井は1977年4月から自動観測を行っている。観測開始当初のラドン濃度は1.17 kcpmであったが、1978年には夏期に高く、冬期に低くなる変化がみられ、その後、次第に濃度が増加する傾向を示し、1980年4月現在1.72 kcpmとなっている。全体としては過去3年間ラドン濃度は次第に増加する傾向が認められる(第16図)。

大東観測井：本観測井は1978年2月から自動観測を行



第14図 テレメータ受信データの図化例 (1979. 12. 31—1980. 1. 6)

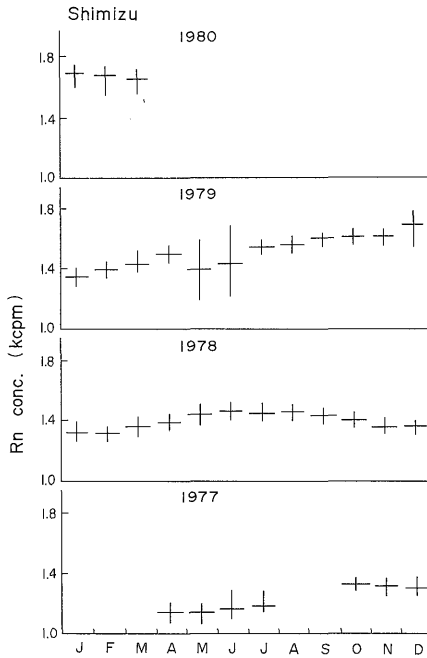


第15図 東海地方東部地域におけるラドン連続観測の結果 (1日平均値) (1978.7-1980.3)

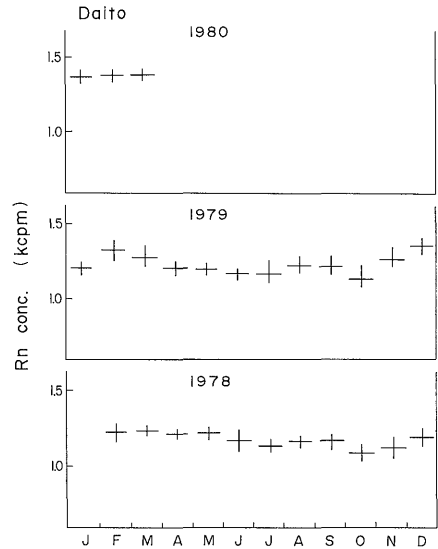
っている。1978年には、月平均値 1.10-1.22 kcpm の範囲の変動を示し、3月に高く、10月に低い傾向を示した。1979年には、月平均値 1.13-1.35 kcpm の範囲の変動となったが、やはり、2月に高く、10月に低く、冬高・夏

低型の年周期的な変動が認められる。つまり、本観測井では年周期的な変化を繰返しながらラドン濃度が増加している (第17図)。

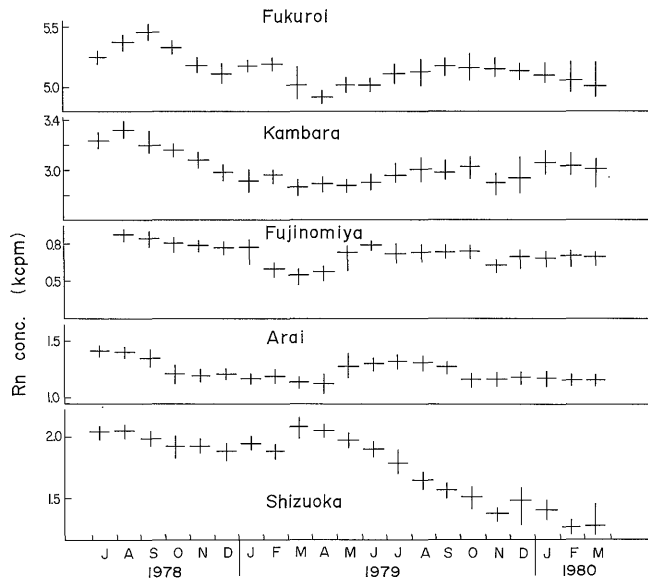
浜岡観測井：本観測井では地下水中に鉄(II)イオンが多く、また、細砂も混入し、これらの沈着による給水系統の目詰まりが、観測中断が多発する原因となっている。1979年2月から観測を開始したが、上記の原因によると考えられるラドン濃度の減少が同年5月まで引続い



第16図 清水観測井におけるラドン濃度の経年変化(1977.4-1980.3)  
+ : ラドン濃度の月平均値と変動幅



第17図 大東観測井におけるラドン濃度の経年変化(1978.2-1980.3)



第18図 富士宮、蒲原、静岡、袋井及び新居の各観測井のラドン濃度の経年変化(1978.7-1980.3)

て認められる。5月以降は、揚水量を調整、目詰まり状態を解消した結果、観測開始当初よりもラドン濃度が増加し、1.0 kcpm 前後の値で1980年1月まで推移している。しかしながら、1月末から再び同様な原因によると考えられる減少が認められる(第15図)。

富士宮観測井：8観測井中で最もラドン濃度が低く、0.4-0.8 kcpm の範囲の変動が認められる。夏期に高く、冬期に低い年周期的な変化がみられる(第18図)。

蒲原観測井：月平均値 2.85-3.32 kcpm の変動を示す。夏期に高く、冬期に低い年周期的な変化がみられる(第18図)。

静岡観測井：本観測井は1979年1月以来ラドン濃度が少しずつ減少する傾向を示し、3月初めに急回復する状態がみられる。この減少は給水系の目詰まりによる揚水量の低下が原因で起り、急回復は目詰まりを除去したときの変化である。1979年7-12月の減少傾向と12月初旬の急回復は同じ理由によるものである。しかし、全体としては次第に減少する傾向を示している(第18図)。

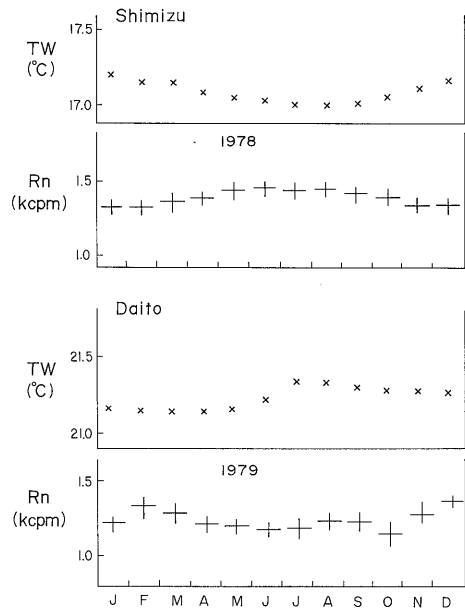
袋井観測井：8観測井中最も高いラドン濃度を示し、月平均値の変動の範囲は、4.90-5.44 kcpm である。9月頃に高く、4月頃に低い年周期的な変化がみられる(第18図)。

新居観測井：月平均値の変動の範囲は、1.15-1.41 kcpm であって、変動範囲の小さい安定した観測結果が得られている。5月から9月までは高く、10月から翌年の4月までは低い年周期的な変化が2年続いて認められる(第18図)。

#### 4.3 年周期的な変化

上記の8観測井のうち5観測井のラドン濃度は、年周期的な変化を示すことが明らかとなった。この年周期的な変化は、富士宮、蒲原、袋井及び新居の各観測井では夏高・冬低型であり、蒲原を除くといずれも第四紀層中の地下水を対象としている観測井である。これに対して第三紀層中の地下水を対象とする大東観測井では、冬高・夏低型であり位相がほぼ半年ずれた形の年周期変化を示している。これらの年周期型変化の要因について考えてみた。

ラドン濃度の上述のような年周期的変化は季節的な要因によるものであることが推察される。しかし、観測井によって夏高・冬低型、冬高・夏低型の位相のずれがあり、単純な気温支配型の季節変化ではない。一般に地下水の水温が、気温の季節変化と位相のずれを生ずることはよく知られている事実である。したがって水温の変化による影響の可能性が考えられる。1年以上の水温の測定記録をもつ清水と大東について、水温の長期的な変



第19図 清水、大東観測井のラドンと水温の経年変化  
+ : ラドン濃度の月平均値と変動幅  
x : 地下水水温の月平均値

動を調べた結果、両者には水温の季節的变化がみられ、この変化のパターンはほぼ半年ずれていることが明らかとなった。両観測井の水温とラドン濃度の変化を対照させた結果を第19図に示す。清水については1978年の夏高・冬低のラドン濃度変化を示した時期に限定した。両観測井においては、水温が高くなる時期にラドン濃度が低くなり、水温が低くなるとラドン濃度が高くなる関係がみられ、地下水中のラドン濃度の年周期的な変化は水温の変化が支配的であるように思われる。他のラドン観測井での地下水水温の動向が明らかとなれば、この関係はもっと明確になることが期待される。

#### 4.4 長期的なラドン濃度の増加及び減少傾向

夏高・冬低型の年周期的なラドン濃度変化を示した富士宮、蒲原、袋井及び新居の各観測井では、1978年よりも1979年の方が0.1-0.3 kcpm ラドン濃度が減少している。これに対して清水、大東の観測井では逆にラドン濃度は増加を示している。これらの増加及び減少の長期的な変化の要因については、前記の水温等のデータを含めた今後の検討が必要である。現状では、前者のグループが蒲原を除いて第四紀層中の地下水であり、後者が第三紀層中の地下水であるという水理地質学的な相違が、ラドン濃度の動向に影響しているのかも知れない。

特に清水観測井のラドン濃度は増加傾向がみられ、現在、観測当初の約150%の増加を示しており注目に値す

る。本観測井では、地球化学的背景で述べたように、観測対象としている地下水層の上位に、約3倍のラドン濃度の第四紀層地下水が分布しているの、揚水に伴いこの地下水の混入による影響か、あるいは地殻の歪の蓄積を反映したラドン濃度の増加か何れとも判定し難い。当面、第四紀層地下水からの影響についての検討を必要とする。

#### 4.5 地震に対応したラドン濃度の短期的変化

1979年5月23日に清水観測井の僅か約6km南方を震央とする「静岡付近地震」(M:4.3)が発生したが、このとき、本観測井のラドン濃度は、地震の約24時間前から異常な減少を示しはじめ、地震の約24時間後に平準化した。この変化については別報で詳述するが、短期的でかつかなり明確な形で表われた地震の前兆としての変化であると考えられ、一部既に報告済み(地質調査所, 1980)である。

### 5. 観測上の問題点

#### 5.1 地下水の水質による障害

浜岡、静岡両観測井の観測結果(第15図参照)にも表われているように、観測井の水質、特に地下水の給水過程で酸化されて沈殿する鉄分、マンガン分は、給水系に目詰まりを生じ、装置への流入量を著しく減少させる原因となったり、或いは水中ポンプの負荷を高めて揚水量減少の原因となって、ラドン濃度の観測値に影響を与えている。目詰まりの除去によって回復することが明らかとなり、保守回数頻度を高める必要がある。

#### 5.2 揚水量の変化の影響

3.4)で述べた実験結果でも明らかなように、測定のために揚水する地下水量の変化は、ラドン濃度に影響を与える。従って揚水量を一定に保つことが必要である。地下水の揚水量は、給水系の目詰まり、ポンプ揚程の変化、ポンプ性能の劣化などによって変化しやすいので、ラドン測定中の揚水量を必ずチェックする必要がある。著者らは自動的に揚水量を制御する装置の試作をアロカ株式会社に依頼し、実用化のめどが立ったので1980年4月から一部の観測井について本装置を稼働させている。

#### 5.3 その他の問題点

本観測システムで用いている装置、すなわち、水中ポンプ、ラドン測定装置、テレメータシステム及びコンピュータ等の機器の故障、又は停電等はデータ欠測の原因となる。常時これらの機器が正常に作動するように、保守点検整備を行う必要がある。

### 6. 結 語

東海地方東部地域を対象とした地下水中のラドン濃度を観測する目的で、富士宮一新居間の、地質調査所3井、静岡県5井について、ラドンの自動測定-テレメータリングシステムを完成させた。ラドンの自動観測方法についてのいくつかの基礎的な実験を行った結果、揚水量の変化が観測結果に大きな影響を与える要因の一つであることが明らかとなった。すなわち、清水観測井では、井戸孔内に貯留される地下水中のラドンが、その滞留時間中における壊変の影響によるよりも、揚水量の変化がかなり大きなラドン濃度の変化をもたらしている。これは井戸の構造、観測対象地下水の水理学的条件に支配されて現われるものと考えられる。そして「揚水量-ラドン濃度特性」と称せられるべきものであって、個々の井戸によって異なる特性であろう。地震予知のためのラドン自動観測では、個々の観測井についてこのような特性を前もって確実に把握しておく必要があると考えられる。また、揚水量の変動によるラドン濃度変化を与える影響を取り除くためには、その制御が不可欠である。

この他、観測実施上の問題点として、地下水の水質に起因する障害が挙げられる。特に鉄、マンガン分は給水系統の目詰まりの原因となり、観測精度に影響を及ぼしている。目詰まりは、日常の保守、点検等を密に実施することにより解決することも可能ではあるが、今後、観測井を設置する場合の一つの条件として水質を吟味する必要がある。

観測当初から1980年3月までの観測結果から、自動観測井8カ所のうち5カ所は、地下水中のラドン濃度が年周期的な変動を示すことが明らかとなった。すなわち、本地域では第四紀層中の地下水は、夏高・冬低型の変化、第三紀層中の地下水は、冬高・夏低型の変化を示す傾向があり、これらの変化の要因が、水温の年周期変化と関係があるらしいということが本研究の結果明らかとなった。このような変動の性質も地震予知研究を目的としたラドン濃度観測では、把握しなければならないものの一つである。

この他、長期的なラドン濃度変化の動向で注目されるのは、清水観測井である。1977年4月の観測当初1.16 kcpmであったラドン濃度は、年々増加する傾向を示し、1980年4月現在1.7 kcpmを超えている。この増加の原因は未だ明らかではないが、他の観測井には見られない特異な変化である。

〔謝 辞〕 本研究を遂行するに当っては、静岡県はじめ関係市町の関係者の御協力をいただいている。とくに本稿をとりまとめるに当って東野徳夫地震化学課長から



有益な御意見をいただいた。これらの方々に対し厚く謝意を表す。

文 献

地質調査所 (池田喜代治・佃 栄吉・杉山雄一・田口雄作) (1980) 静岡付近地震 (1979. 5. 23  $M=4.3$ ) 前後のラドン濃度変化. 地震予知連絡会報, vol. 23, 建設省国土地理院編, p. 93-95.

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の邦訳). 148p.

池田喜代治・金谷 弘 (1976) 川崎観測井におけるラドン測定について (講演). 第3回地球化学的方法による地震予知研究会 (東京大学理学部).

———・永井 茂・後藤隼次・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. 地質調査所特別報告, no. 7, p. 129-149.

井野盛夫・池田喜代治 (1977) 静岡県ラドン観測予定井のラドンの測定結果についての報告. 静岡県, 6p.

石橋克彦 (1977) 東海地方に予想される大地震の再検討. 地震予知連絡会報, vol. 17, 建設省国土地理院編, p. 126-132.

磯見 博・井上正明 (1972) 浜松地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1 図幅), 地質調査所, 35p.

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および水質観測井の設置について. 地質ニュース, no. 279, p. 14-19.

———・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, no. 294, p. 16-22.

———・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, vol. 22, p. 1-21.

———・池田喜代治・東野徳夫・垣見俊弘・井野盛夫 (1981) 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—. 地質調査所月報, vol. 32, p. 45-55.

河井興三・戸谷嗣津夫 (1958) 静岡県小笠町付近の天然ガス. 石油技術協会誌, vol. 23, p. 198-208.

MISAQI, F. L. (1975) Monitoring Radon-222 content of Mine Waters. International Report 1026, U.S. Depart. of the Interior, 17 p.

NOGUCHI, M. and WAKITA, H. (1977) A Method for Continuous Measurement of Radon in Groundwater for Earthquake Prediction. *Journal of Geoph. Res.*, vol. 82, p. 1353-1357.

静岡県商工会議所 (1976) 静岡・清水地域の地質, 地質図説明書<改訂版>. 289p.

東京通産局総務部開発業務課 (1974) 静岡県静岡地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 191, p. 29-49.

佃 栄吉・衣笠善博・杉山雄一 (1980) 東海地域地震予知のための地下水変動データ処理・監視システム. 地質調査所月報, vol. 31, p. 619-634.

脇田 宏・野津憲二・中村裕二・浅田 敏・野口正安・森岡正名 (1975) 観測井水中のラドン濃度分布と経年変化 (日本地下水学会昭和49年秋期講演会要旨). 日本地下水学会誌, vol. 17, p. 53.

———・———・———・森岡正名・野口正安 (1976) 多摩川下流域の地盤隆起と地下水中のラドン濃度の変化. 地震第2輯, vol. 29, p. 71-81.

——— (1978) 中国の地震予知と地球化学. 地震学会, 1977年地震学会訪中代表団報告集, p. 113-134.

———・野津憲治・中村裕二・野口正安・浅田敏 (1978) 時系列にあらわれた地下水中のラドン濃度の異常変化. 地震学会講演予稿集1978, 1, p. 70.

———・中村裕二 (1979) 中央アジアにおける地球化学的地震予知研究 (ソ連邦ウズベク共和国科学アカデミー地震研究所の邦訳). 東京大学理学部地殻化学実験施設彙報, no. 1, 108p.

(受付: 1980年8月11日; 受理: 1980年9月5日)