

## 地下水の塩水化についての研究

## —第2報 塩水化地下水の地球化学的研究—

池田喜代治\*

Study on Salt Water Intrusion into Ground Water  
Part 2. Geochemical Research of Salt Ground Water

By

Kiyoji IKEDA

## Abstract

The  $\text{Cl}^-$  contents of coastal ground water in Fuji city, Shizuoka prefecture have increased rapidly since 1960. The salt ground water is mainly in the layer of Fuji lava, and the salt-water zone has been widened rapidly. Two different types are noticed in the way of increase of  $\text{Cl}^-$  contents; one shows annual cyclic fluctuation, while another shows constant increase. The former is characteristic of the ground water in the Fuji lavas, and is observed in the most part of the salt-water zone, whereas the latter represents the ground water in the layers of volcanic sand and gravel.

The chemical components of the salt ground water are generally characterized as  $\text{CaCl}_2$ -type (noncarbonate hardness type), and differ very much from those of the sea water at the early stage of salting. They show 1) higher  $\text{Ca}^{2+}$  content, 2) slightly higher  $\text{SO}_4^{2-}$  content, and 3) lower  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  contents than the chemical components of sea water and ground water proportionally mixed. However, after several years, the ground water shows the similar contents to the above mixed values. The coastal ground water shows the highest of  $\text{Cl}^-$  content which reaches up to 18,000 ppm in April. From these facts, it is conjectured that the origin of  $\text{Cl}^-$  in salt ground water is the sea water.

The difference between analyzed and mixed values in the chemical components is considered to be due to the chemical reaction between the sea water and layer substances. To testify this hypothesis, an experiment has been carried out. The result suggests that the change of chemical compositions at the early stage of salting is due to base-exchange and dissolution reaction between sea water and clay in the water-bearing layers.

## 要 旨

静岡県富士市の海岸平野の被圧地下水は、昭和35年から急速に  $\text{Cl}^-$  が増加し始めた。最初に  $\text{Cl}^-$  が増加した地下水は、富士熔岩を帯水層とする地下水で、この層を通じて塩水化地下水の範囲は急速に広がった。

本地域における  $\text{Cl}^-$  の増加には2つの型があり、1つ

は1年を周期として増減を繰り返す型、もう一つは  $\text{Cl}^-$  の増加は緩慢であるが減少しない型である。前者は熔岩層を帯水層とする地下水のもので塩水化地区の大半をしめ、後者は火山砂礫を帯水層とする地下水のものである。

一般にこの地区の塩水化地下水の溶存化学組成は、塩水化の初期の頃には  $\text{CaCl}_2$  型 (noncarbonate hardness type) の水質を示し、海水の組成とは著しい相違があ

\* 技術部

る。すなわち海水の侵入の計算値より、 $\text{Ca}^{2+}$  がかなり高い、 $\text{SO}_4^{2-}$  がやや高い、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  が低いなどの特徴を示す。ところがこの地区の熔岩層の地下水は、 $\text{Cl}^-$  濃度の増減を数回繰り返しているうちに、徐々に海水侵入の計算値に近づき、 $\text{Cl}^-$  の最高値を示す時期の4月においては臨海部の地下水の  $\text{Cl}^-$  値は、18,000ppm 付近で最高に達する。これらのことからこの地区の地下水の塩分の起源は海水であることはほぼ確実である。

塩水化初期の化学組成は、海水の侵入過程で地層との接触による化学的反応が行なわれたことを示すものであるという考えから、このような反応を裏付けるいくつかの実験を行なった。この実験の結果、塩水化初期にみられるような化学組成の変質は、主として海水と帯水層中の粘土物質とのイオン交換反応および溶出反応によつて起ることが明らかになった。

## 1. 緒 論

海岸平野の臨海部などで、いままで地下水の  $\text{Cl}^-$  濃度が数 ppm であったのが、ある時期から急に増加し始め、数百、数千 ppm にも達する例がしばしばみられているが、このような現象を地下水の塩水化という。最近の地下水の過剰汲み上げが、この地下水の塩水化のもつとも大きな原因と考えられる。わが国では、八戸・東京・高岡・和歌山・浜松・大阪・尼崎・新居浜・松山および三原などの各地の地下水が、多かれ少なかれ塩水化している。これらの地区の塩水化は、比較的緩慢であったが、富士臨海部で発生した塩水化現象は、 $\text{Cl}^-$  の増加と塩水化範囲の広がる速度が非常に速かつたことと、周期性のある増減を示したことが特徴である。これらの特徴を示す要因として、透水性のよい熔岩を帯水層とする地質学的な要因と、富士山の融雪期と結氷期による地下水への供給量の変動の水文学的な要因を挙げて村下敏夫らは説明している。

これまでの塩水化地域の地下水の化学組成は、つねに海水の侵入を想定した値と著しく相違していて、塩水の起源が海水であろうと考えられる場合でも、化学分析の結果から判定することは困難であった。今回の研究では、地下水の塩水化の進行に関して、塩水化地下水の化学組成と塩水の起源の問題などについて化学的な検討を行なった。塩水化地下水の化学組成は、継続的な観察の結果、最初著しく  $\text{Ca}^{2+}$  の多い  $\text{CaCl}_2$  型を示していたのが、その後しだいに化学組成を変えて  $\text{NaCl}$  型になつてきている。このような化学組成の変化がどうして起つたのか、塩水化に関する化学的な機構について考察を行なった。

地下水の化学分析の方法は、JIS K0101-1960 工業用水試験方法<sup>2)</sup> を原則とした地質調査所化学課資料501(2) 工業用水分析法<sup>3)</sup> を用い、半谷高久の水質調査法<sup>4)</sup> などを参考にした。

研究にあつて、静岡県富士臨海地区総合開発事務所・同富士川工業用水道事務所・同製紙工業試験場・富士市ならびに製紙企業から、多大の御協力を得た。ここに厚く謝意を表する。

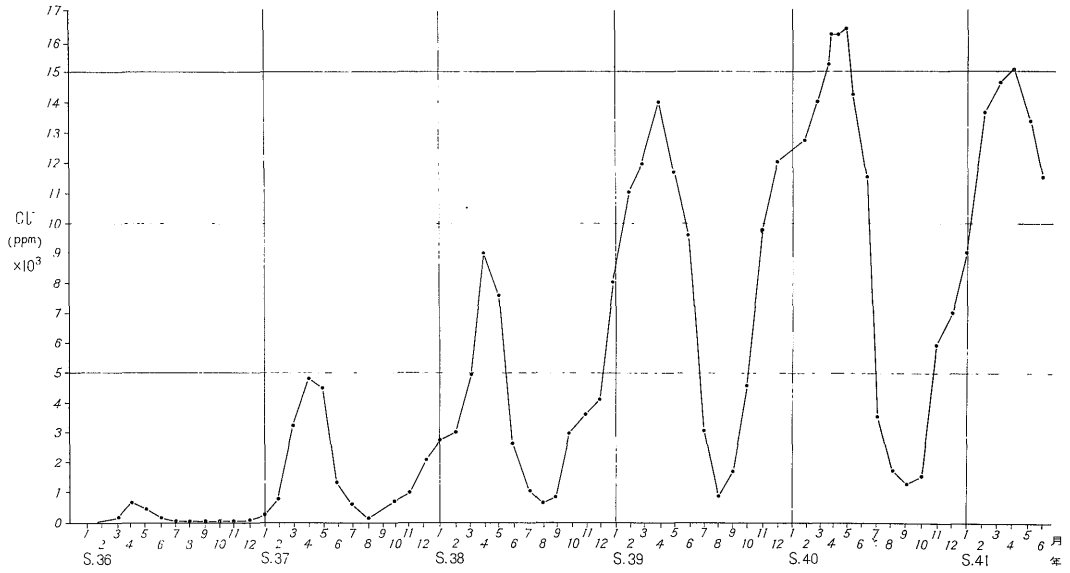
## 2. 塩水化地下水の $\text{Cl}^-$ の推移

塩水化の詳しい経過についての説明は、第1報に述べられているので、ここでは塩水化の過程を検討してみることにする。

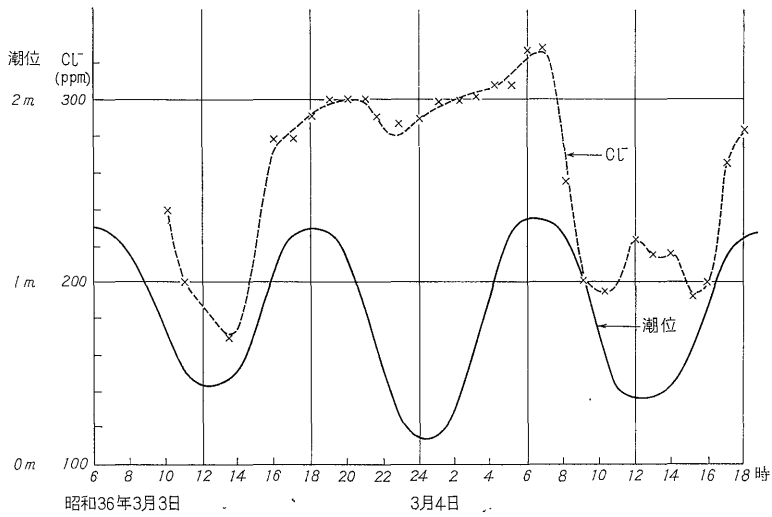
まず塩水化は井戸深度が富士熔岩層に達し、熔岩中の被圧地下水を利用している井戸から始まっている。塩水化は非常に速く進行し、僅か数年で10km<sup>2</sup> の範囲となつた。塩水化が速いのは富士熔岩層の透水性がきわめて良いことが、大きな要因となつている。塩水化地下水の  $\text{Cl}^-$  濃度は、透水性の良い熔岩層では、おもな地下水の供給源である富士山体の融雪直前の時期に相当する毎年4月に最高値を示し、9月の増水期に最低値を示す周期的な増減を繰り返している。第1図に海岸から、ほぼ1kmの井戸の一例を示したが、昭和36年から昭和40年にかけて年々最高値の  $\text{Cl}^-$  値と、最低値の  $\text{Cl}^-$  値が高くなつている。これらの塩水化地下水は、 $\text{Cl}^-$  の変動が著しく、1日に1,000ppm 以上の増減を示すことも珍しいことではない。それに潮位の変動と  $\text{Cl}^-$  の増減が第2図に示すように比較的よく一致していて、満潮時に  $\text{Cl}^-$  が増加する傾向にある。以上のような現象は、海水圧と淡水圧のバランスが、透水性のよい熔岩層のなかで敏感に反応しているためではないかと考えている。

他方おおよそ和田川より東側で富士熔岩の分布を欠く地域では、火山砂礫層が帯水層となつているが、この地下水も塩水化してきている。酒井邦男<sup>5)</sup> の観測記録によると  $\text{Cl}^-$  増加の速度は、熔岩層の塩水化と比較すると緩慢であるけれど  $\text{Cl}^-$  は増加一方の型である(第3図参照)。塩水化の過程には、第4図で示される滝川沿いに存在する井戸群を南から北の方向に進行したものと、熔岩層を通じて進行した高濃度の塩水が和田川の上流側から熔岩の分布しない井戸群を、西から東に侵入していつたと考えられる2つの過程がある。これらの進行方向はちようど、和田川と滝川間の地域を包みこむような形をなしている。

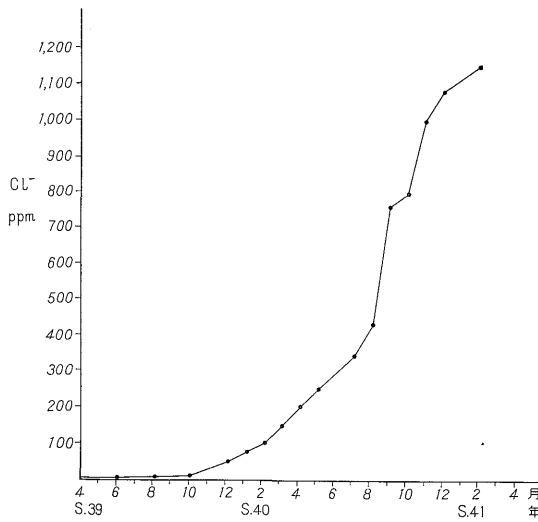
## 3. 塩水化地下水の溶存化学成分と組成の変動



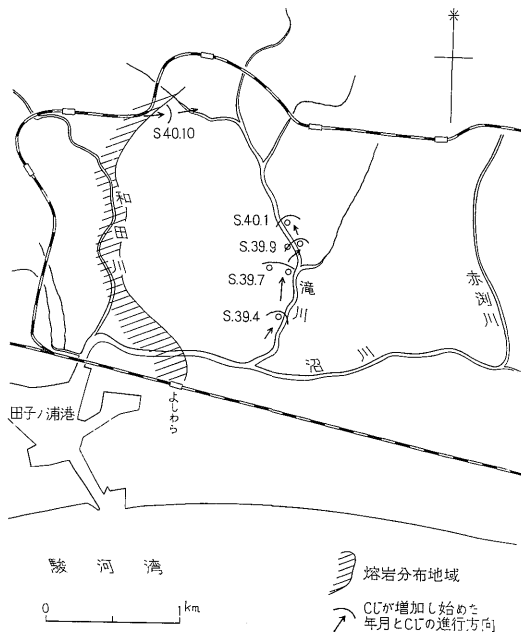
第1図 熔岩中の地下水のCl<sup>-</sup>濃度の推移を示す図  
 井戸所在地：富士市（臨海部）  
 井戸深度：102 m  
 収水層：93~102 m（熔岩層）



第2図 塩水化初期における臨海部井戸のCl<sup>-</sup>の変動と潮汐変動を示す図



第3図 火山砂礫層中の地下水のCl<sup>-</sup>増加を示す図  
井戸所在地：富士市吉原  
井戸深度：100 m  
収水層深度：50~100 m (火山砂礫層)



第4図 富士熔岩の分布しない滝川沿岸における地下水の塩分増加の進行を示す図

富士熔岩層の地下水が塩水化される以前の水質について述べておく必要がある。これらの水質については、昭和32年に比留川貴ら<sup>9)</sup>によつて発表されている。この報告では岳南地域の地下水を、富士山体から供給される

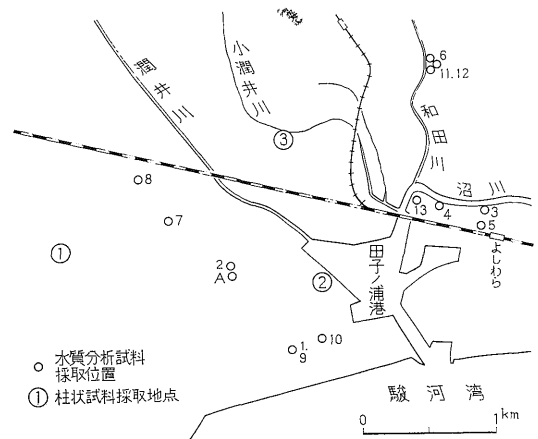
富士熔岩地下水と、富士川流域の富士川堆積物中に存在する地下水について分類し、それぞれの地下水の溶存化学成分についての分布と特徴を示している。これによれば富士山体から供給される富士熔岩地下水の溶存化学成分は、次のように示される。

富士熔岩の地下水の溶存化学成分			
pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	
7.0~8.2	0.7~1.2epm	1.0~6.5ppm	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	total SiO <sub>2</sub>
1~10ppm	5~12ppm	2~6 ppm	25~50ppm

上記のような淡水地下水が、急速なCl<sup>-</sup>増加を示しはじめた昭和36年3月における、富士臨海地帯の地下水の水質分析結果を第1表に示した。これら塩水化地下水の溶存化学成分は、次のような特徴をもっている。

- 1) 塩水化以前7.0以上を示していたpHが、7.0以下の微弱酸性側になる傾向を示した。
- 2) HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が塩水化以前よりも少なくなった。
- 3) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はCl<sup>-</sup>増とほぼ直線的な関係で増加を示している。
- 4) Ca<sup>2+</sup>はCl<sup>-</sup>増に対する増加割合が、かなり高いが、試料ごとの差が大きい。
- 5) Mg<sup>2+</sup>はCl<sup>-</sup>増とほぼ直線的な関係で増加を示している。
- 6) Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>は、Ca<sup>2+</sup>ほどではないがNa/Cl, K/Clの値が試料によつて異なる傾向がある。
- 7) Fe, SiO<sub>2</sub>は塩水化以前と大きな相違を示さない。

以上のような特徴は、その後の昭和38年3月の水質分析結果表(第2表)と、昭和40年、41年の分析結果を含めた一つの井戸の数回の分析結果を示した第3表に



第5図 試料採取位置図

第 1 表 富士熔岩層地下水の塩水化初期 (昭和 36 年 3 月) における水質

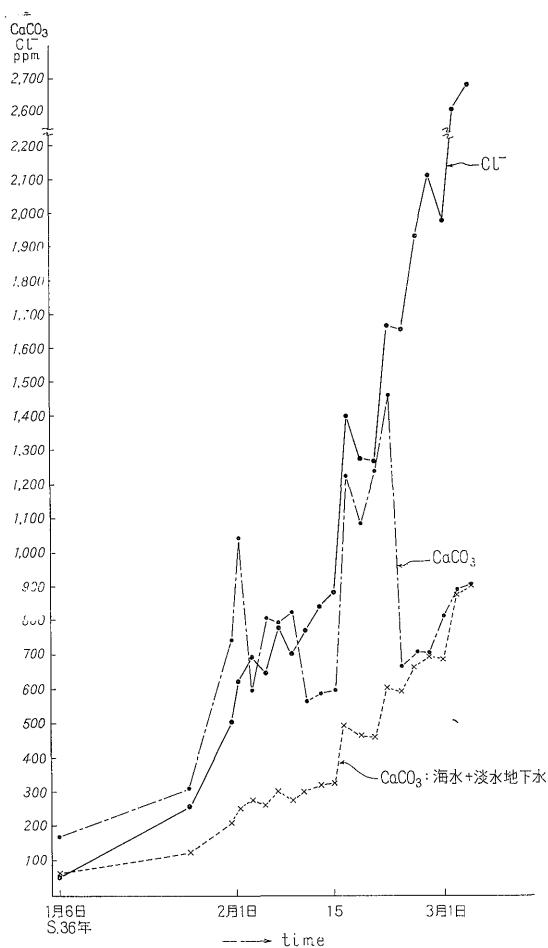
試料採取 年 月	試料採取 No.	水 温 (°C)	pH	RpH	溶存酸素 (DO) (Oppm)	Free CO <sub>2</sub> (ppm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	total Fe (ppm)	Ca <sup>2+</sup> (ppm)	Mg <sup>2+</sup> (ppm)	全 硬 度 (CaCO <sub>3</sub> ) (ppm)	SiO <sub>2</sub> (ppm)
昭和36年 3月	1	14.3	6.52	—	—	—	56.5	6156.1	0.0	1.53	872.4	2910	62.6	0.04	525.7	445.1	3141.0	31.4
"	2	16.7	6.60	—	—	—	54.3	1414.0	0.0	3.32	229.6	502	19.7	0.10	280.8	110.8	1157.5	41.0
"	3	13.7	7.21	—	—	—	61.8	442.8	0.0	0.03	72.4	227	7.2	0.05	45.9	31.8	245.0	33.7
"	4	15.4	6.50	—	—	—	57.3	4570.7	0.0	2.30	673.7	2215	60.4	0.30	389.7	338.8	2265.5	38.9
"	5	14.1	6.90	—	—	—	64.5	2656.7	0.0	0.66	394.2	1310	35.9	0.09	200.6	187.8	1273.5	34.1
"	6	15.6	7.22	—	—	—	58.4	5.0	0.0	7.60	5.0	6	2.4	0.02	12.0	4.3	47.5	45.0

第 2 表 富士熔岩層地下水 (昭和 38 年 3 月) の水質

試料採取 年 月	試料採取 No.	水 温 (°C)	pH	RpH	溶存酸素 (DO) (Oppm)	Free CO <sub>2</sub> (ppm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	total Fe (ppm)	Ca <sup>2+</sup> (ppm)	Mg <sup>2+</sup> (ppm)	全 硬 度 (CaCO <sub>3</sub> ) (ppm)	SiO <sub>2</sub> (ppm)
昭和38年 3月	7	15.7	—	—	—	—	53.1	2335.9	—	—	362.0	1055.0	31.0	—	293.9	166.3	1417.0	—
"	8	16.3	—	—	—	—	65.3	64.2	—	—	28.9	23.9	3.6	—	29.2	12.2	123.0	—
"	9	—	—	—	—	—	69.5	3158.0	—	—	452.0	1910.0	68.4	—	129.8	180.1	1065.0	—
"	10	—	—	—	—	—	69.5	3142.7	—	—	454.0	1950.0	68.4	—	130.6	164.0	1000.5	—
"	11	15.5	—	—	—	—	46.4	955.8	—	—	156.0	365.0	16.0	—	183.3	77.2	772.0	—
"	12	—	—	—	—	—	67.7	34.1	—	—	28.1	18.7	2.7	—	27.8	6.5	96.0	—
"	13	14.3	—	—	—	—	68.9	12740.0	—	—	1804.0	7190.0	—	—	468.1	866.2	4737.0	—

第 3 表 富士熔岩層地下水の同一井戸の塩水化による水質の変化

試料採取年 月	試料採取 No.	水温 (°C)	pH	RpH	溶存酸素 (Oppm)	Free CO <sub>2</sub> (ppm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	total Fe (ppm)	Ca <sup>2+</sup> (ppm)	Mg <sup>2+</sup> (ppm)	全硬度 (CaCO <sub>3</sub> ) (ppm)	SiO <sub>2</sub> (ppm)
昭和34年9月 (塩水化前)	A-1	15.5	7.10	-	5.30	5	66.5	5.6	0.0	3.5	12.2	9.0	1.6	0.04	12.5	5.0	55.5	43.0
36. 2	A-2	15.3	7.10	-	-	12	58.0	21.4	0.0	4.6	15.1	11.0	1.8	0.02	16.7	7.1	71.0	47.5
36. 2	A-3	15.4	6.91	-	-	7	58.0	254	0.0	6.0	58.0	72.1	5.0	0.10	76.8	28.0	307.0	46.0
36. 3	A-4	15.5	6.52	-	-	-	54.3	1414	0.0	3.3	229.6	502	19.7	0.10	280.8	110.8	1158.5	41.0
40. 6	A-5	15.1	6.78	7.55	-	-	114.1	16741	0.0	5.1	2315.0	9150	335	0.36	435.3	1148.0	5811.5	26.0
40. 10	A-6	15.5	6.80	7.60	3.30	13	101.3	3729.3	0.0	3.8	508.7	2100	96.6	0.12	104.6	223.0	1179.6	38.2
41. 2	A-7	14.9	7.00	7.60	4.30	15	108.6	14807	0.0	4.2	2088.1	8090	301	0.56	408.2	1009.0	5168.0	21.8
41. 7	A-8	15.9	7.02	7.85	4.50	11	97.0	2343.7	0.0	5.0	327.1	1350	62.5	0.40	59.9	135.4	707.5	44.0



第 6 図 熔岩中の地下水の塩水化初期の Cl<sup>-</sup> と硬度 (CaCO<sub>3</sub>) の挙動を示す図

示されるように、次第に変わってきている (これらの採取位置は第 5 図参照)。塩水化の進行によって個々の成分が、どのような挙動を示しているかについて述べると次のようである。

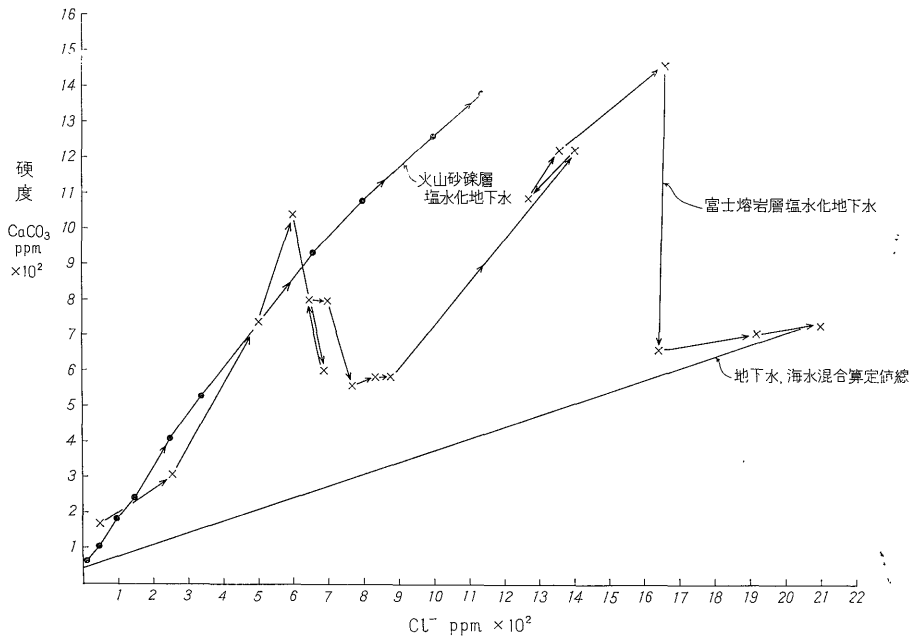
硬度：もつとも興味深い挙動を示しているのが硬度成分 (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>) である。熔岩中の地下水が Cl<sup>-</sup> 増加の初期の頃には、Cl<sup>-</sup> 増に対する硬度の増加の割合は非常に高い。第 6 図にある井戸の連続的な Cl<sup>-</sup> と硬度の測定結果を示したが、Cl<sup>-</sup> の変動と硬度の変動は、必ずしも一致せず、むしろ Cl<sup>-</sup> 増加時に硬度の減少している時点さえ観察される。この井戸では Cl<sup>-</sup> 濃度が、2,000ppm 以上になると、Cl<sup>-</sup> 値に対する硬度の値は低下し、硬度 (CaCO<sub>3</sub>)/Cl<sup>-</sup> (重量比) は 0.34 前後の比率を保つような傾向を示している。硬度/Cl<sup>-</sup> が低下する傾向は、熔岩を帯水層とする塩水化地下水全般について認めるこ

とができる。硬度/Clの低下を示すCl<sup>-</sup>濃度は決まった濃度でなく、海岸により近い塩水化の中心では、低いCl<sup>-</sup>濃度で硬度/Clが低下し、塩水化の中心から遠くなるほど高いCl<sup>-</sup>濃度で硬度/Clが低下する傾向を示す。

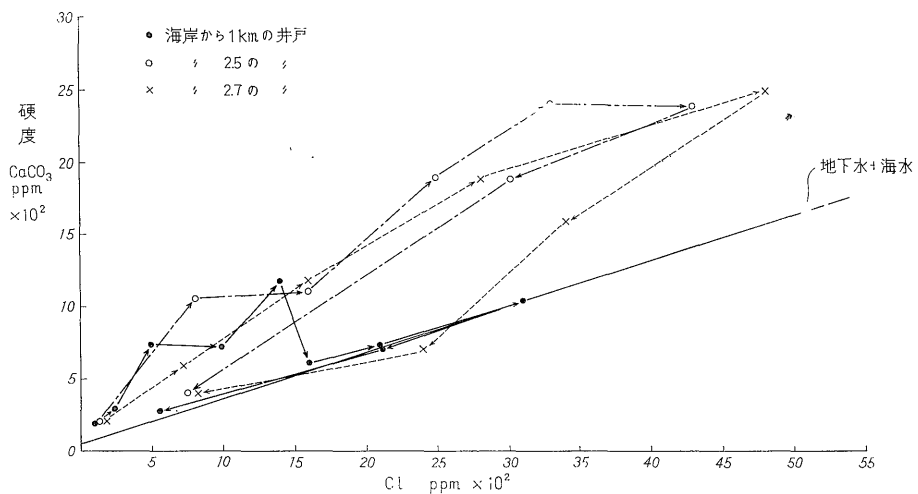
熔岩が分布していない地域では塩水化地下水のCl<sup>-</sup>に対する硬度の割合も、かなり高い比率を示し、いままで

の測定結果では、Cl<sup>-</sup>濃度が、かなり高くなつても、その傾向は変わらない(第7図参照)。

硬度とCl<sup>-</sup>の関係についてのもう一つの大きな特徴は、Cl<sup>-</sup>の増加を示す4月以前と、減少を示す4月以降で硬度/Cl<sup>-</sup>が異なり、Cl<sup>-</sup>が増加を示している時期の硬度/Cl<sup>-</sup>が高い結果を示すことである(第8図参照)。



第7図 塩水化地下水のCl<sup>-</sup>と硬度の変動および熔岩層地下水と火山砂礫層の代表的な例

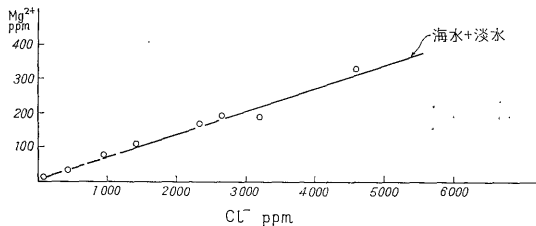
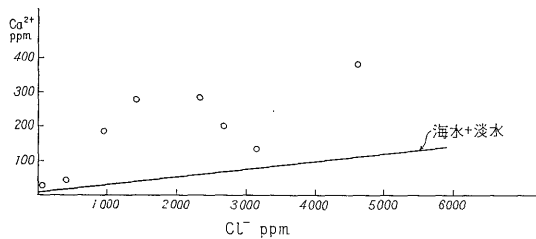


第8図 Cl<sup>-</sup>の周期的な増減と硬度の挙動を示す図

第4表 Cl<sup>-</sup>増加期と減少期の硬度/Cl<sup>-</sup>の変化

	増加期		減少期	
	Cl <sup>-</sup> (ppm)	硬度/Cl <sup>-</sup> (重量比)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	硬度/Cl <sup>-</sup> (重量比)
井戸 A	800	1.35	750	0.53
〃 B	2,810	0.66	2,430	0.29
〃 C	500	1.50	550	0.54

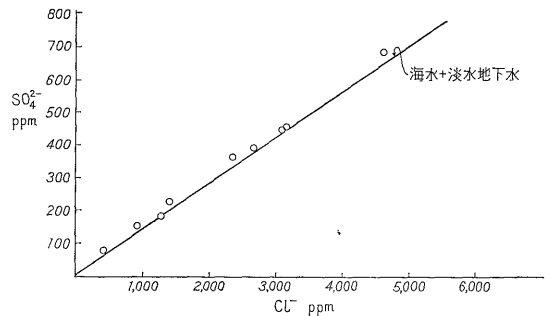
上述のいくつかの硬度の挙動は、主としてCa<sup>2+</sup>によるもので、第9図に示すように、Mg<sup>2+</sup>はCl<sup>-</sup>と直線的な関係で増減を示しているのに、Ca/Clが大きく変動を示すためである。



第9図 塩水化地下水のCl<sup>-</sup>とCa<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>の関係を示す図

pH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 富士熔岩層の塩水化以前の地下水のpHは7.0~7.3であつたが、塩水化するとpHが低下し、7.0以下になつている。先の第3表で塩水化初期のpHが、Cl<sup>-</sup>の増加に伴つて7.1から6.9、6.52と漸減しているが、この傾向は塩水化初期の熔岩層地下水の特徴である。pHの低下とともにHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が減少する傾向があり、pHの低下はHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の減少が原因と考えられる。塩水化初期の上記のような現象は、さらにCl<sup>-</sup>が増加した場合には認められず、逆にpHが7付近にもどる傾向がある。塩水化後数年経つた現在では、上記のようなpHが低下する現象は認められないようである。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はCl<sup>-</sup>とよく正相関して増減する。Cl<sup>-</sup>増に対するSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の増加の割合は、ほぼ一定の値を示している(第10図参照)。塩水化地下水の4~5年間の経過を第5表に示すと、塩水化初年度と昭和38年3月の



第10図 塩水化地下水のCl<sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の関係を示す図

第5表 塩水化した地下水のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup>値

測定年月	SO <sub>4</sub> /Cl (重量比)*
昭和36年3月	0.140~0.154 (5コ)
38年3月	0.142~0.154 (4コ)
40年6月	0.134~0.138 (2コ)
40年10月	0.121~0.149 (3コ)
41年2月	0.140 (1コ)
41年7月	0.131~0.142
標準海水	0.139

\* Cl<sup>-</sup>1000ppm以上のものについて計算した。

測定したSO<sub>4</sub>/Clがやや高く、その後はほぼ海水の値を前後するような値を示している。

Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>: Cl<sup>-</sup>値に対するNa<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>の値は、経年的には大きな変動をしている。この変動は硬度と逆の動き方である。塩水化地下水の数年間の経過を第6表に示す。Cl<sup>-</sup>に対するNa<sup>+</sup>とK<sup>+</sup>の低い値を示しているものが、次第に高くなる傾向にある。ことにK<sup>+</sup>は、Na<sup>+</sup>よりこの傾向が強い。また表によると、Cl<sup>-</sup>が増加する時期のNa/Cl, K/Clは、Cl<sup>-</sup>が減少する時期のNa/Cl, K/Clよりも低い傾向を示し、周期的なCl<sup>-</sup>の増減期における硬度の挙動と逆の動きをしている。

塩水化地下水の化学成分組成の変動は、熔岩層の場合に著しく、熔岩の分布していない火山砂礫層の場合では比較的小さい。熔岩層の塩水化地下水は、硬度とCl<sup>-</sup>の関係(第5図)で明らかなように、日々その塩水の組成が変化しているように考えられる。さらに長期的な観測の結果は、塩水化地下水の化学成分組成が、Cl<sup>-</sup>の周期的な変動のなかで、すなわちCl<sup>-</sup>の増加期と減少期で、Ca<sup>2+</sup>とNa<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>の比率を変える特徴を示し、このような繰り返しのしながら年々だいにCaCl<sub>2</sub>型の水質からNaCl型の水質に移り変わり、海水の組成に近い数値を示すようになっていく。



第6表 塩水化地下水の Na/Cl, K/Cl の変動

測定年月	Na/Cl (重量比)		K/Cl (重量比)	
	平均値		平均値	
昭和36年3月	0.34~0.49	0.47 (4)	0.0102~0.0140	0.0127 (4)
38年3月	0.38~0.62	0.52 (5)	0.0134~0.0217	0.0184 (4)
40年6月		0.55 (1)		0.0200 (1)
40年10月		0.56 (1)		0.0260 (1)
41年2月		0.55 (1)		0.0202 (1)
41年7月	0.56~0.58	0.57 (2)	0.0266~0.0275	0.0271 (2)
標準海水		0.555		0.0200

Cl 1000ppm 以上の地下水についての結果 ( ) 内は試料数

#### 4. 実験

塩水化した化学成分の組成が、かなり大きな変動を示すこと、時間の経過によつてしだいに海水の組成に近づいているなどの点から、海水と地層とのイオン交換反応あるいは地層からの化学成分の溶出などの、物理化学的な反応を考慮する必要があると考え、そこで次のような実験を行なった。

1. 帯水層である熔岩の化学成分組成
2. 熔岩と粘土の蒸留水による溶出実験
3. 熔岩と粘土の海水とのイオン交換容量と溶出成分、溶出量の測定
4. 海水の pH 低下と free CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> の変化に関する実験

##### 4.1 実験に用いた試料

富士市の熔岩分布地域ですでに塩水化範囲にある3本のボーリング柱状試料を実験に用いた。柱状試料は先の第5図に示す①, ②, ③の位置におけるもので、これらの3カ所の地表からの地質状況と、塩水化層の位置を第11図に示す。塩水化層は図の中の地層比抵抗曲線が、深度100m前後に分布する熔岩層を指示している。実験に用いたこれらの熔岩層の熔岩および粘土層の粘土の採取位置も第11図に示した。

##### 4.2 実験方法

熔岩の化学組成の分析法

直読式発光分光分析を用いた。

直読式分光器：日本ジャーレル・アッシュ・コンパクト・アトムカウンター

試料形状：ペレット

発光条件：hi. voltage spark

熔岩と粘土の蒸留水による溶出実験法

100メッシュ以下の熔岩および粘土試料5gを三角フラスコに入れ、蒸留水100mlを正確に加えてガラスの

共栓をする。1時間に一回ずつ位よく振りまぜ、5回繰り返したら放置し、24時間後に、遠心分離し、上澄液の水質分析を行なつて溶出成分と溶出量の測定をした。

熔岩と粘土の海水によるイオン交換容量の測定と溶出の測定法<sup>注1)</sup>

100メッシュ以下の熔岩および粘土の試料を用い、第12図に示すようなガラス器具の浸出装置を用いた。浸出装置は海水を入れる分液ロート、浸出管および受器からなつていて、分液ロートと浸出管はガラスのスリ合せで連絡されている。浸出操作は、試料2gと塩酸で加熱処理したのち乾燥した石英砂を等量ないし2倍量加え混ぜ合せたものを、浸出管のガラス濾過板上に定着させる。この定着操作は、あらかじめ浸出管に海水を入れて満しておき、そこへ試料を少しずつ落とすと気泡のまざらない均一な定着層ができる。浸出は海水容器のコックと浸出管のコックを開いて、1時間20ml位の速度で海水を試料層に通過させる。通過液は約10mlずつ分取し、おのおのについて HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> の分析をし、海水との比較による各成分の増加量と、減少量から、試料100g当りのイオン交換量と溶出量の計算を行なった。

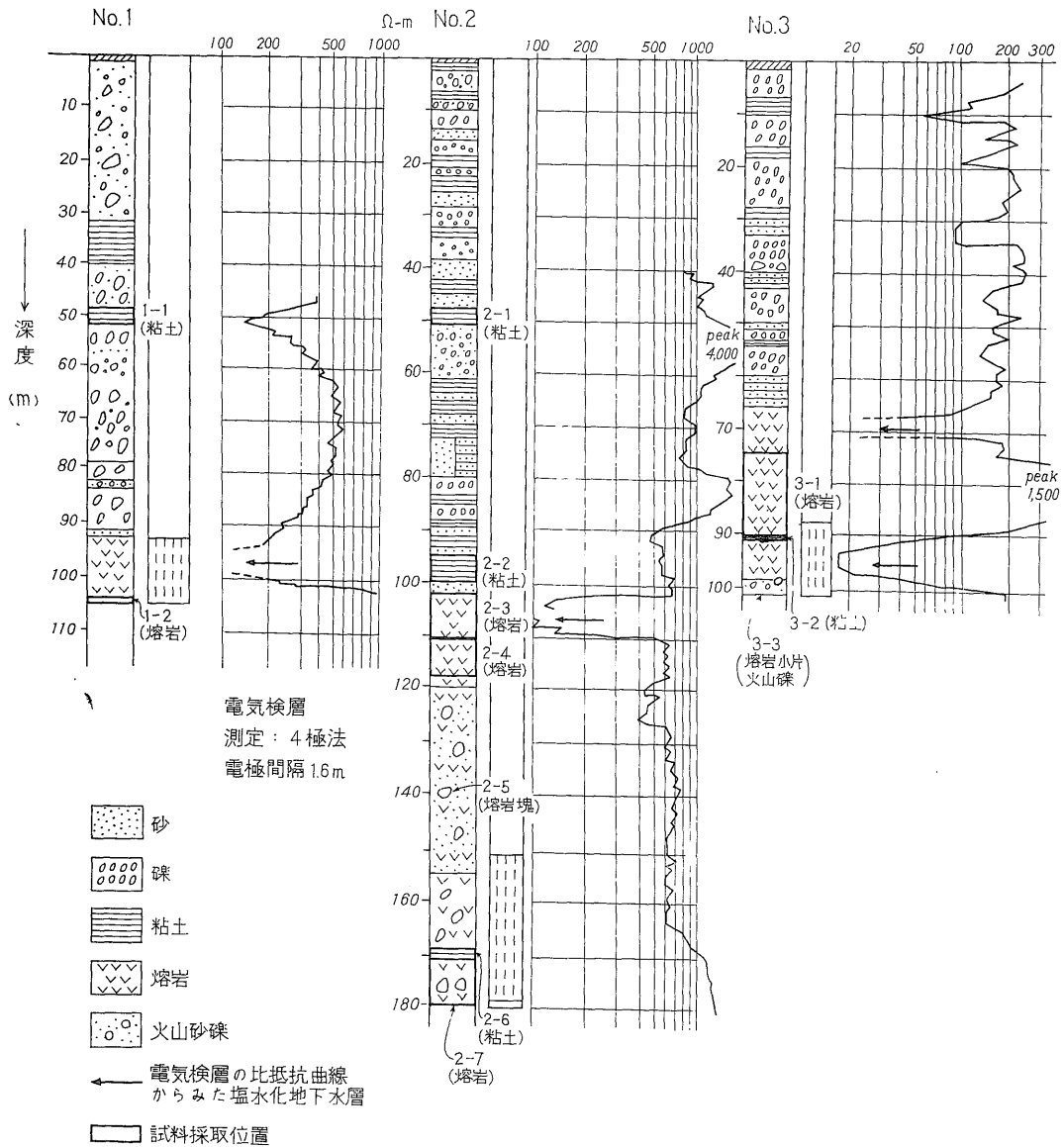
pHの低下と HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, freeCO<sub>2</sub> の変動に関する実験  
粗粉碎した100gの試料をガラス瓶中の、2.00mlの海水の中に浸し振りまぜ、10時間後に上澄み液をとつてpH, freeCO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> の測定を行ない、原海水との比較を行なった。

##### 4.3 実験結果

###### 熔岩の化学組成

実験に用いたのは、柱状試料の熔岩と、地表における

注1) この測定法には一般に醋酸アンモニア法が多く用いられているが、筆者は、海水を用いたので、この結果は海水と試料との接触によるイオン交換容量である。



第 11 図 柱状地質断面と塩水化層および柱状試料の採取位置を示す図

愛鷹系の熔岩、富士系の熔岩の2点を加えた9試料である。これらの結果を第7表に示した。

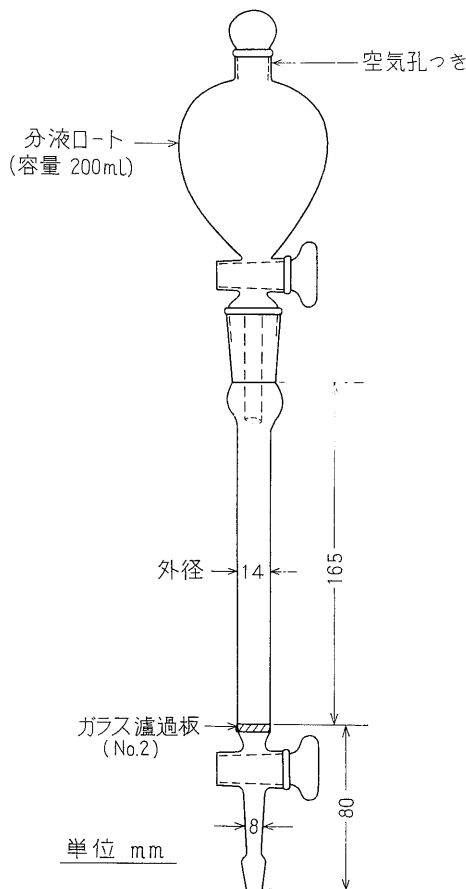
柱状試料では、塩水化した熔岩、その下位にある熔岩、火山砂礫層の火山砂礫片(愛鷹火山噴出物と考えられるものも含む)のいずれも、化学組成は似ており、特徴的な相違が認められない。地表の2試料も同様である。富士山体の火山岩の特徴である鉄の含量の多いことと、Caの多い結果を示している。

熔岩と粘土から蒸留水で溶出される化学成分と溶出成分

柱状試料の熔岩、粘土についての実験結果を第8表に示した。塩水化層前後の柱状試料であるのでCl<sup>-</sup>が多いことを予想したが、いずれもCl<sup>-</sup>の存在量は、かなり少なかった。粘土についてはNo. 3-2の粘土がCl<sup>-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+Cl<sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(当量%) 74%を示したのみで、他の粘土試料は3%以下であった。これらの粘土試料はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

第7表 熔岩の化学成分

No.	分析試料	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	total Fe (asFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	MnO (%)
	富士市澁川(地表) 愛鷹熔岩	—	16.2	14.3	1.73	8.1	4.8	2.85	0.19
	〃 三度蒔(地表) 富士基底熔岩	—	17.4	12.5	1.39	9.8	5.9	2.80	0.19
1-2	No.1 試錐 -104~-105m 熔岩	—	14.0	14.3	1.38	8.6	4.5	2.30	0.18
2-3	No.2 試錐 -102~-110m 熔岩	—	15.3	12.0	1.23	8.8	3.9	2.50	0.17
2-4	〃 〃 -111.5~-117.5m 熔岩	—	15.6	12.0	1.21	8.9	4.1	2.75	0.17
2-5	〃 〃 -120~-155m 転石	—	17.0	13.5	1.37	9.7	5.2	2.88	0.19
2-7	〃 〃 -171~-180m 熔岩	—	15.7	11.8	0.88	8.2	6.3	2.65	0.18
3-1	No.3 試錐 -75~-91.5m 熔岩(白色)	—	14.7	14.0	1.46	8.3	5.0	2.30	0.21
3-3	〃 〃 -97m 岩小片	—	17.1	10.7	0.95	9.1	5.4	2.40	0.17



第12図 浸出装置

が異状に多く、SO<sub>4</sub>/HCO<sub>3</sub>+Cl+SO<sub>4</sub> (当量%) は74~99を示している。また No. 2-1, 2-2 はpHが4.7, 4.3と低く、2-2 は遊離の鉍酸が存在している。

熔岩の溶出水については、熔岩の化学成分がほぼ同じ組成を示しているにもかかわらず、溶出水の化学成分の組成は試料毎の差が認められる。塩水化層に相当する熔岩は、No. 2-3 のようにSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が多く、SO<sub>4</sub>/HCO<sub>3</sub>+Cl+SO<sub>4</sub> (当量%) が86を示し、上記の粘土試料No. 2-2, 2-3 と同じような溶出組成を示している。これもCl<sup>-</sup>は少なく、塩水化層でこのようなSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>を主成分とする塩が溶出することについては、今後さらに検討する必要がある。このほかNa<sup>+</sup>が、化学組成のうえで特徴的な役割を示し、No. 2 試錐における溶出水中のNa<sup>+</sup>の存在比は、深い方の試料に高くなる傾向を示し、Na/(Na+K+Ca+Mg) (当量%) は、深度-102~-117.5m が21~29%、-120~-155m 53%、-171~-180 m 61%を示している。K<sup>+</sup>については、3~4%でほとんど変化していない。上記のような溶出成分の差が生じるのは、熔岩の性質の相違によるものと考えることができれば、深度-117m の上と下で、熔岩が違っていることになる。

上述のような溶出化学成分のNa<sup>+</sup>の垂直的な変化は、地下水の溶存化学成分のNa<sup>+</sup>の垂直的な変化の特徴とよく合っている。地下水(塩水化以前の)のNa<sup>+</sup>およびK/Naは、それぞれの地下水が存在している層の熔岩の溶出水とよく似た結果を示しており(第9表)、地下水の組成が、帯水層物質の可溶性成分によって決定されるような関係を示しているものと考えられる。

第8表 柱状試料からの蒸留水に

No.	試料採取深度	溶出量 r.e./100g		pH	Mアルカリ度			Cl <sup>-</sup>			SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
		anion	cation		CaCO <sub>3</sub> (ppm)	epm	当量 %	ppm	epm	当量 %	ppm	epm
1-1	No.1 試錐-48.2~-50.7m 粘土	2.48	2.54	7.0	14.1	0.282	23	1.3	0.037	3	44.2	0.920
1-2	// -104~-105m 熔岩	1.11	1.10	7.0	23.5	0.470	85	0.7	0.020	4	3.1	0.065
2-1	No.2 試錐-48.5~-51.6m 粘土	3.70	3.82	4.7	1.1	0.021	1	0.6	0.017	1	87.0	1.810
2-2	// -94~-100m 粘土	7.73	6.18	4.3	0.0	0.00	0	1.0	0.028	1	184.3	3.840
2-3	// -102~-110m 熔岩	1.22	1.28	6.3	2.1	0.042	7	1.4	0.040	7	25.3	0.527
2-4	// -111.5~-117.5m 熔岩	1.19	1.13	7.0	23.0	0.460	77	1.1	0.031	5	5.0	0.104
2-5	// -120~-155m 熔岩(転石)	0.72	0.82	6.9	9.4	0.188	52	4.8	0.135	38	1.8	0.037
2-6	// -169~-171m シルト	1.94	1.98	6.8	6.8	0.136	14	15.7	0.442	46	18.7	0.390
2-7	// -171~-180m 熔岩	0.48	0.48	6.7	7.8	0.157	65	1.0	0.028	12	2.7	0.056
3-1	No.3 試錐-75~-91.5 熔岩	0.44	0.42	6.6	7.3	0.146	66	0.7	0.020	9	2.7	0.056
3-2	// -91.5m 粘土	1.87	1.87	6.6	4.7	0.094	10	24.7	0.697	74	7.0	0.146
3-3	// -91.5~-98.5 熔岩	0.71	0.73	6.7	6.8	0.136	40	5.9	0.166	45	2.5	0.052
	吉原市渡蒔 富士基底熔岩	0.62	0.64	7.0	14.0	0.240	77	0.9	0.025	8	2.2	0.046
	滝川 熔岩	0.41	0.45	6.8	7.3	0.146	71	0.9	0.025	12	1.7	0.035

第9表 深度別熔岩溶出水と地下水の Na<sup>+</sup> の存在比と K/Na の比較

	Na/Na+K+Ca+Mg	K/Na (当量比)
熔岩溶出水 { -102~-110m	21~29 (当量%)	0.14~0.10
{ -171~-180m	61	0.065
地下水 { 100m前後 (富士熔岩地下水)	25~26	0.18~0.24
{ -153~-177m	40	0.075

熔岩、粘土の溶出水の化学組成を、4成分系のダイヤグラムに示すと(第13図参照)、熔岩は、塩水化層に相当するもの以外は、およそ Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>型(carbonate hardness type)を示し、粘土は NaCl型、CaSO<sub>4</sub>型(noncarbonate alkali, noncarbonate hardness type)を示している。

溶出量は試料100g当りのミリ当量で第8表に示してあるが、粘土は熔岩よりも溶出量が多く、2~3倍を示している。塩水化層に相当する熔岩の溶出量は、他の試

料に比較してとくに多いことはない。

海水を浸出液とした熔岩、粘土のイオン交換容量と溶出成分量

第10表に粘土を浸出した海水の分析値を示す。熔岩を浸出した海水の分析値は、原水との差を認めることができなかつたので、この測定条件では熔岩のイオン交換容量と溶出成分はないと考えた。粘土を浸出した海水は、最初に分取した9mlの溶液では、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>などの増減がはつきりあらわれたが、2回目の

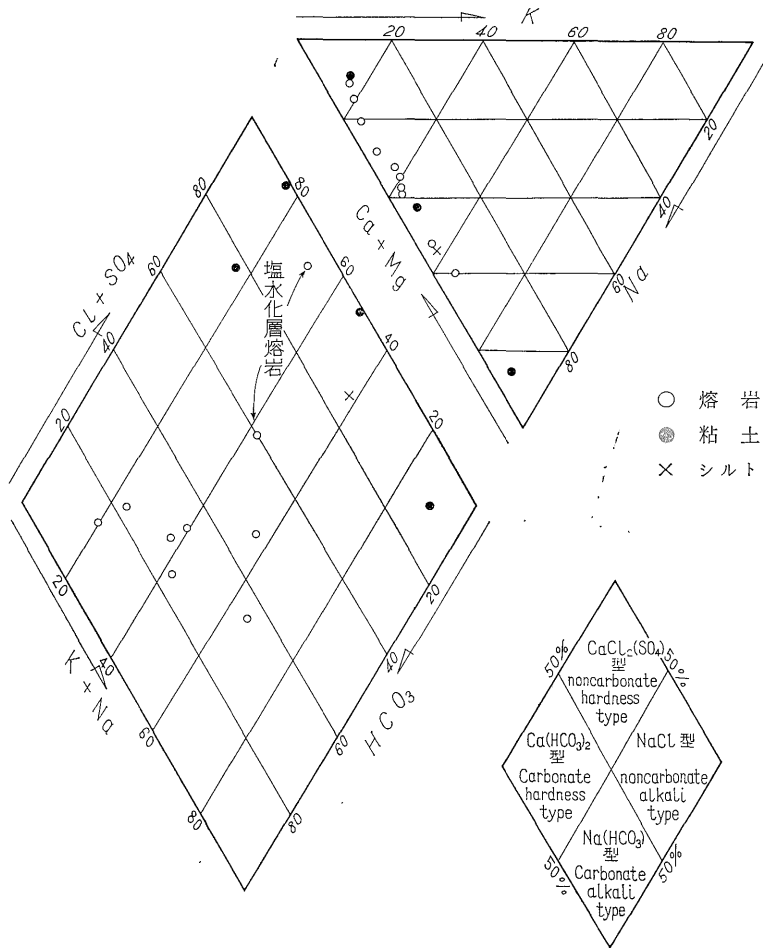
第10表 粘土を浸出した海水の組成

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		anion total epm	Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		anion total epm
	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm		ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	ppm	epm	
原海水*	122.6	2.01	15,618	440.43	2175.	45.24	487.68	8670	376.28	3127.98	340.0	17.00	1060.1	87.24	488.50	
第1回目の浸出海水(9ml)	113.5	1.86	15,618	440.43	2403.	49.98	492.27	8580	372.37	2757.04	557.5	27.82	1062.8	87.40	494.63	
第2回目の浸出海水(10ml)	113.5	1.86	15,618	440.43	2267.	47.15	489.25	8660	375.84	2887.37	384.5	19.18	1065.8	87.72	490.11	

\* 海水は江の島海岸で昭和39年10月に採取したものをを用いた。

よる 溶出実験結果

当量 %	anion total epm	Na <sup>+</sup>			K <sup>+</sup>			Ca <sup>2+</sup>			Mg <sup>2+</sup>			cation total epm
		ppm	epm	当量 %	ppm	epm	当量 %	ppm	epm	当量 %	ppm	epm	当量 %	
74	1.239	3.0	0.131	10	2.8	0.072	6	13.4	0.670	53	4.82	0.397	31	1.270
11	0.555	1.9	0.083	15	1.0	0.026	5	5.9	0.295	53	1.83	0.151	27	0.555
98	1.848	4.0	0.174	9	5.0	0.128	7	26.4	1.320	69	3.16	0.260	15	1.912
99	3.868	30.5	1.323	43	5.8	0.148	5	20.0	1.000	32	7.50	0.618	20	3.089
86	0.609	4.2	0.183	29	0.7	0.018	3	4.2	0.210	33	2.80	0.231	35	0.642
18	0.595	2.7	0.117	21	0.65	0.017	3	4.2	0.210	37	2.68	0.220	39	0.564
10	0.360	5.0	0.217	53	0.5	0.013	3	1.5	0.075	18	1.27	0.105	26	0.410
40	0.968	12.5	0.543	55	1.3	0.033	3	3.3	0.165	17	3.04	0.250	25	0.991
23	0.241	3.3	0.144	61	0.4	0.010	4	0.8	0.040	17	0.51	0.042	18	0.236
25	0.222	1.7	0.074	35	0.4	0.010	5	1.5	0.075	35	0.64	0.053	25	0.212
16	0.937	18.5	0.805	86	1.4	0.036	4	1.5	0.075	8	0.25	0.021	2	0.937
15	0.354	3.4	0.148	40	0.5	0.012	3	2.5	0.125	34	1.01	0.082	23	0.367
15	0.311	2.8	0.122	38	0.5	0.012	4	0.8	0.040	12	1.78	0.147	46	0.321
17	0.206	1.7	0.074	33	0.4	0.011	5	1.4	0.070	31	0.85	0.070	31	0.225



第13図 蒸留水による柱状試料抽出水の化学的組成を示す図

10mlでは、これらの変化は僅かに認められ、3回目以降では、 $\text{HCO}_3^-$ を除いて原水値との差を認めることはできなかった。

浸出後の分析値と海水原水の分析値から、各成分の増減を求め第11表に示した。

anion では  $\text{HCO}_3^-$  の僅かな減少と、 $\text{SO}_4^{2-}$  の大幅

第11表 粘土 (No.1-1 試料) を浸出した後の海水の各成分の増減

	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
1回目分取液 (9ml)	-0.15	±	+4.74	-3.91	-0.94	+10.82	+0.16
2回目 " (10ml)	-0.15	±	+1.91	-0.44	-0.61	+2.18	+0.48
3回目 " (10ml)	-0.15	±	±	±	±	±	±

単位は epm

な増加を示し、cation では  $\text{SO}_4^{2-}$  の増加にもかかわらず、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  が減少を示し、イオン交換反応が行なわれたことを示している。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  の減少分は、 $\text{SO}_4^{2-}$  の増加分と合せて、 $\text{Ca}^{2+}$  の増加となつて表われている。粘土 100g 当りのイオン交換量 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  の減少量) と、 $\text{SO}_4^{2-}$  の溶出量とを計算すると次のように示される。

海水を浸出させたときの粘土 100g 当りのイオン交換容量と溶出量の実験結果  
(単位 m. eq/100g)

溶出成分量	イオン交換量
$\text{SO}_4^{2-} + 3.09$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ - 2.71$
	$\text{Ca}^{2+} + 5.86$

この実験では、溶出量が蒸留水で行なつた実験値よりも高い結果も示している。

粘土および熔岩と接触した海水の pH 低下と  $\text{HCO}_3^-$ 、free  $\text{CO}_2$  の変動

第12表 海水中に熔岩、粘土を入れ、10時間後の pH、free  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$  の変動の測定結果

	pH	free $\text{CO}_2$ (epm)	$\text{HCO}_3^-$ (epm)
原海水	7.4	0.35	2.01
No.2-3 熔岩	6.8	0.60	1.95
No.1-1 粘土	6.5	0.70	0.56

実験結果では熔岩試料で僅かに  $\text{HCO}_3^-$  の減少が認められ、pH も低下を示している。粘土試料では  $\text{HCO}_3^-$  の減少が著しく、free  $\text{CO}_2$  の上昇、pH の低下を示す。これらの反応は先の実験で粘土のなかに蒸留水で溶出する遊離の鉱酸が存在するものがあつたが、このような酸によつて  $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$  の化学反応が僅

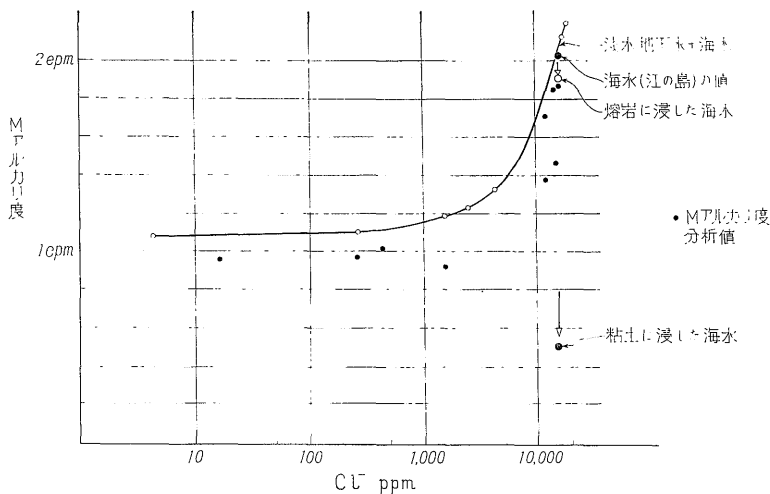
かながら行なわれることを示しているものと考えられる。

### 5. 考 察

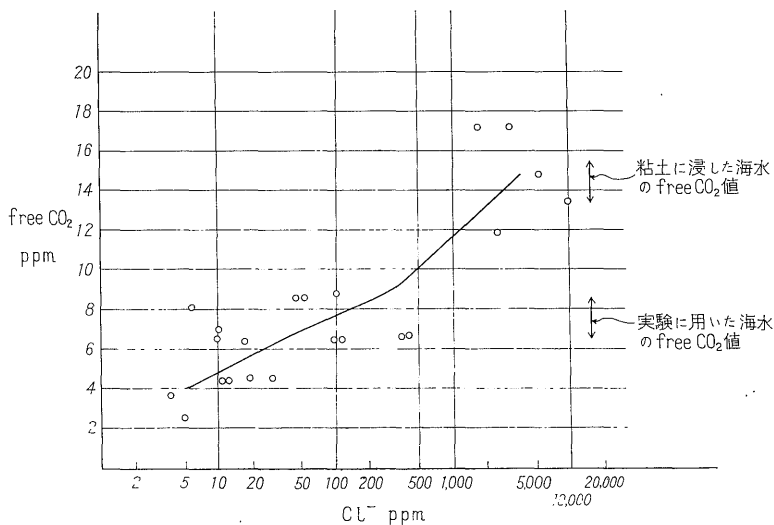
上述の塩水化地下水の化学成分組成の変化は、時間の経過とともに  $\text{CaCl}_2$  型の溶存化学成分組成から  $\text{NaCl}$  型に変化している。この変化はまた海水の組成に近づく変化である。

本地域の場合、海水以外のものが塩水の起源となる可能性があるとするれば、それは浮島原における第1層 (第1報前掲<sup>1)</sup> 参照) にある  $\text{Cl}^-$  の多い塩水以外にはない。この塩水の分布範囲および塩水の化学組成については、まだ不明であるが、地層が海成であるところから推察して、堆積当時の塩水がまだ残留しているものと考えられている。塩水化の経過によつて示される種々の現象、例えば、 $\text{Cl}^-$  の増加が周期性を示すこと、 $\text{Cl}^-$  濃度が最高 18,000ppm 程度で頭打ちになること、潮位の上昇と  $\text{Cl}^-$  濃度が相関すること、それに塩水化の発生した最初の場所には浮島原の塩水が分布していなかつたことなどから考察すると、浮島原の塩水が最初の塩水化の源となつた根拠はほとんどない。

塩水化の初期に塩水化地下水の pH が、本来の淡水地下水の pH より低下し、 $\text{HCO}_3^-$  の減少する現象があつた。この現象は海水の  $\text{HCO}_3^-$  値が淡水地下水の約2倍の値を示しているにもかかわらず起つている。そして  $\text{HCO}_3^-$  の分解は地層内で行なわれたものと考えられる。塩水化地下水の  $\text{Cl}^-$  と  $\text{HCO}_3^-$  の関係は、塩水化初期の頃には海水+淡水の計算値を下まわつているが (第14図)、このときの free  $\text{CO}_2$  が、 $\text{Cl}^-$  値の高い方に多い傾向を示す (第15図) のは、海水が侵入してくるに地層内で  $\text{HCO}_3^-$  の分解が起り、そのために free  $\text{CO}_2$  が増加したのであろう。柱状試料の熔岩と粘土が、海水との接触で、海水の pH が低下、 $\text{HCO}_3^-$  の減少、free  $\text{CO}_2$  の増加の実験結果を示したのは、このような考え



第 14 図 富士熔岩層の地下水の塩分増加期における  $\text{Cl}^-$  濃度と M アルカリ度値の関係を示す図



第 15 図 富士熔岩層の地下水中の  $\text{Cl}^-$  濃度と free  $\text{CO}_2$  の関係を示す図

方を裏付けるものと考察される (実験結果を上記の第 14, 15 図に比較のために示した)。

海水を塩水の起源とした場合、海水+淡水地下水の計算した化学成分組成と、塩水化地下水のそれを比較すると第 13 表に示すようになり、またこれらの化学成分組成を当量値に換算し、ダイアグラムに示したのが第 16 図である。塩水化初期にはいずれも化学組成が計算値と著しい差を生じているが、この差は年々しだいに小さくなっている。塩水化地下水と化学組成との相違が著しい成分は、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  などである。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ は

$\text{Cl}^-$ に対する割合がほぼ一定値を示し、 $\text{SO}_4/\text{Cl}$ 、 $\text{Mg}/\text{Cl}$ も海水のそれと近似値である。これらのことから、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ の相違は、帯水層に海水が侵入してくるときに、帯水層と海水との反応によつて、海水の組成に変化が起つたと考えねばならない。海水と帯水層の反応は、継続的な水質観察の結果えられた硬度(とくに  $\text{Ca}^{2+}$ )や、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ などの挙動から、帯水層中でイオン交換反応が行なわれたものと考えられる。イオン交換反応は主として帯水層中の粘土によつて行なわれることを実験結果は示している。このほか物理的な吸着あるいは溶出など

第13表 富士市臨海部のある井戸 (富士熔岩層地下水) の

	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			Cl <sup>-</sup>			SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>						
		ppm	epm	当量%	ppm	epm	当量%	ppm	epm	当量%				
S. 34. 9. 24 Cl <sup>-</sup> 増加以前の値	7.1	66.5	1.09	72.7	5.6	0.16	10.7	12.2	0.25	16.6				
S. 36. 2. 7 イ) 試料の分析値 ロ) 海水混入計算値 ハ) イ) - ロ)	7.1	58.0	0.95	50.0	21.4	0.64	33.7	15.1	0.31	16.3				
		66.5	1.09	53.7							31.5	14.4	0.30	14.8
			-0.14											
S. 36. 2. 10 イ) ロ) ハ)	6.91	58.0	0.95	10.7	254.	7.16	76.3	58.0	1.21	13.0				
		67.7	1.11	12.0							77.5	46.7	0.97	10.5
			-0.16											
S. 36. 3 イ) ロ) ハ)	6.52	54.3	0.89	2.0	1414.	39.87	87.5	229.6	4.78	10.5				
		72.6	1.19	2.6							88.1	201.9	4.20	9.3
			-0.30											
S. 40. 6 イ) ロ) ハ)	6.78	114.1	1.87	0.4	16741.	472.09	90.4	2315.	48.15	9.2				
		129.3	2.12	0.4							90.3	2337.	48.62	9.3
			-0.25											
S. 40. 10 イ) ロ) ハ)	6.80	101.3	1.66	1.4	3729.	105.17	89.6	508.7	10.58	9.0				
		80.5	1.32	1.1							89.5	529.7	11.02	9.4
			0.34											
S. 41. 2 イ) ロ) ハ)	7.00	108.6	1.78	0.4	14807.	417.56	90.2	2088.	43.43	9.4				
		123.8	2.03	0.4							90.3	2069.	43.04	9.3
			-0.25											
S. 41. 7 イ) ロ) ハ)	7.02	97.0	1.59	2.1	2344.	66.09	88.8	327.1	6.80	9.1				
		75.6	1.24	1.7							88.9	337.1	7.01	9.4
			+0.35											

反応が加味されて塩水化初期にみられるような CaCl<sub>2</sub> 飽和の水質を示す塩水に変質したと考察される。の塩水化初期の塩水化地下水の Ca<sup>2+</sup> が海水に比較して多く、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> が少ないのは、海水の侵入の際に帯水層中のイオン交換物質によつて海水中の Na<sup>+</sup> が Ca<sup>2+</sup> に置換したためではないかと推察される。Cl<sup>-</sup> 濃度が急速に、著しく増加すると Ca/Cl が低下する現象がよく認められるが、これは帯水層中でのイオン交換反応が平衡状態に達し、交換能力が小さくなつてしまつたためか、イオン交換物質そのものが洗い流されて少なくなつてしまつたためなどいくつかの理由が考えられる。また Cl<sup>-</sup> の周期的な増減の繰り返しのなかで、Ca/Cl、Na/Cl、K/Clなどが、Cl<sup>-</sup>の増加期と減少期で変化する現象があつた。これについては次のように考えられる。すなわち海水中の Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> と地層中の Ca<sup>2+</sup> とのイオン交換は、海水の侵入時には飽和状態になるまで行なわれる。しかし海水が淡水によつて押し戻される頃にはすでに飽和に

近い状態、あるいは飽和してしまつていて、交換能力が小さいか、もしくは逆に塩水中の Ca<sup>2+</sup> が地層中に飽和したNa<sup>+</sup>との間で置換が行なわれることも考えられる。第10表あるいは第12図で示した昭和40年と41年の Cl<sup>-</sup>の減少期の K/Cl、Na/Cl が、海水+淡水地下水の計算値よりも大きな値を示しているが、上記のようなことが行なわれていることを暗示するものではないかと考えられる。

塩水化初期における SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が、海水の侵入による計算値よりやや高い傾向を示すことは、硫酸塩の溶出を指示しており、これは帯水層からの海水による溶出の可能性を示すものと考えられる。実験の結果では、粘土に水で溶出される硫酸塩を主体としたものがあることから、これらの溶出の現象は、帯水層中の粘土と海水との接触によつて起つているものと考えられる。

筆者は熔岩層中で流水と上記のような反応をする物質の主体は粘土であると考えられる。すなわち実験の結果によ



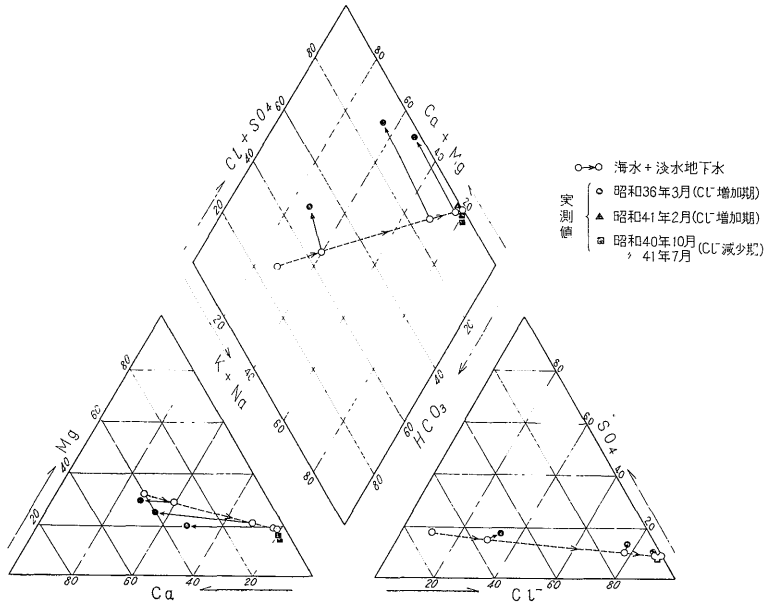
塩水化後の溶存化学成分の変化と海水+淡水地下水計算値との比較

anion total epm	Na <sup>+</sup>			K <sup>+</sup>			Ca <sup>2+</sup>			Mg <sup>2+</sup>			cation total epm
	ppm	epm	当量%	ppm	epm	当量%	ppm	epm	当量%	ppm	epm	当量%	
1.50	9.0	0.39	25.3	1.6	0.04	2.6	12.5	0.62	40.3	5.9	0.49	31.8	1.54
1.90	11.0	0.49	25.3	1.8	0.04	2.1	16.7	0.83	42.8	7.1	0.58	29.8	1.94
2.03	17.8	0.77	37.5	1.9	0.05	2.4	13.0	0.65	31.7	7.0	0.58	28.4	2.05
		-0.28			-0.01			+0.18			0.00		
9.32	72.1	3.13	33.3	5.0	0.13	1.4	76.8	3.84	40.8	28.0	2.30	24.5	9.40
9.24	147.	6.38	68.8	6.9	0.17	1.8	17.6	0.88	9.5	22.5	1.85	19.9	9.28
		-3.25			-0.04			+2.96			+0.45		
45.54	502.	21.79	47.9	19.7	0.50	1.1	280.7	14.04	30.9	110.8	9.12	20.1	45.45
45.26	791.	34.32	75.8	30.1	0.77	1.7	40.8	2.04	4.5	98.6	8.11	18.0	45.24
		-12.53			-0.22			+12.00			+1.01		
522.11	9150.	397.83	76.1	335.	8.58	1.6	435.3	21.76	4.2	1148.	94.48	18.1	522.65
522.83	9313.	404.18	77.3	335.	8.58	1.6	353.9	17.69	3.4	1122.	92.34	17.6	522.79
		-6.35			0.00			+4.07			+2.14		
117.41	2100.	91.14	77.8	96.6	2.47	2.1	104.6	5.23	4.5	223.0	18.35	15.6	117.34
117.51	2080.	90.27	76.7	75.8	1.94	1.7	88.5	4.42	3.8	254.3	20.93	17.8	117.56
		+0.87			+0.53			+0.81			-2.58		
462.77	8090.	351.11	60.9	301.	7.69	16.6	408.2	20.41	4.5	1009.	83.04	18.0	462.25
462.63	8239.	357.57	62.3	297.	7.68	16.6	314.7	15.73	3.4	993.8	81.79	17.7	462.77
		-6.46			+0.01			+4.68			+1.25		
74.48	1350.	58.48	78.8	62.5	1.60	2.2	59.9	2.99	4.0	135.4	11.16	15.0	74.23
74.34	1309.	56.81	76.3	48.2	1.23	1.8	60.2	3.01	4.0	161.9	13.32	17.9	74.37
		+1.67			0.37			-0.02			-2.18		

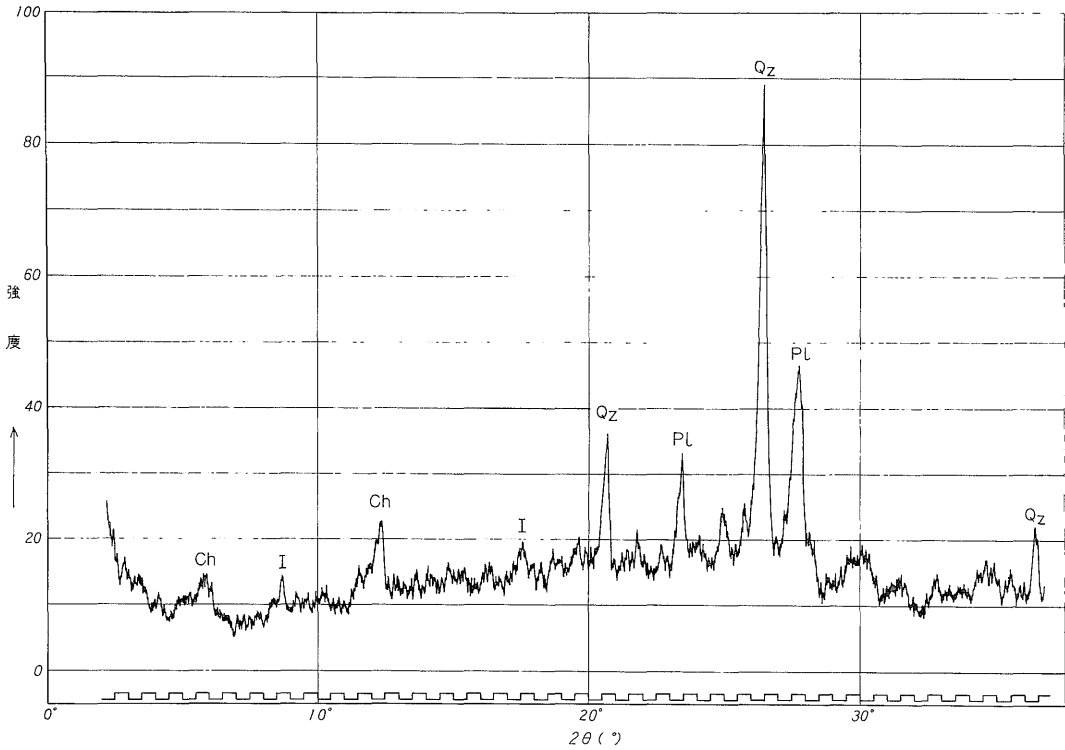
ると、海水とイオン交換反応をするのは主として粘土であり、また粘土の溶出化学成分の組成は硫酸塩を主成分とし、塩水化初期の塩水の SO<sub>4</sub>/Cl の海水組成よりも高くなつた要因となしたものと理解される。このほか pH 低下の因をなしたのは HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> の分解によるものであり、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> の分解は粘土に含まれている鉍酸によつて行なわれたと推察する。粘土のこのような働きは、塩水化地下水の化学組成の変質にもつとも大きな役割りを果しているように考えられる。この粘土、とくに熔岩層直上の粘土層は、地質学的には熔岩の流れた後で非常に細かい沈殿が沈降するような環境での堆積物と考えられる。第17図に粘土 No. 1-1, 2-2 についてのX線回折図を示したが、この図によるとこれらの粘土はいずれもまだ完全に粘土化していないで、石英と変質しかけている斜長石を含み、粘土鉍物としてイライト、緑泥石などを含んでいる。イオン交換をするのはこれらの粘土鉍物であろう。

## 6. 結 論

富士の臨海地帯で起つている塩水化は、塩水化地下水の化学的特徴と、室内実験の結果とから、海水の侵入によるものであることは間違いない。海水がいままで淡水の通路であつた帯水層に侵入してきたために、帯水層と海水の接触によつて海水の組成に変化が起り、塩水化地下水の化学成分を特徴づけたと考えられる。塩水化地下水と海水との相違は塩水化初期にもつとも著しく、海水の侵入が著しくなり、Cl<sup>-</sup>の増加・減少の周期を繰り返しているうちにその組成に近似するようになった。このように特徴ある水質変化をもたらした経緯について、2・3の室内実験を併用し考察を試みた結果、その最大の要因は、帯水層中の粘土鉍物であろうという結論を得た。これらの粘土鉍物は帯水層中に含まれるもののほかに、帯水層の上位にあつて地下水の被覆層の役目をしてる粘土層のものも含められる。



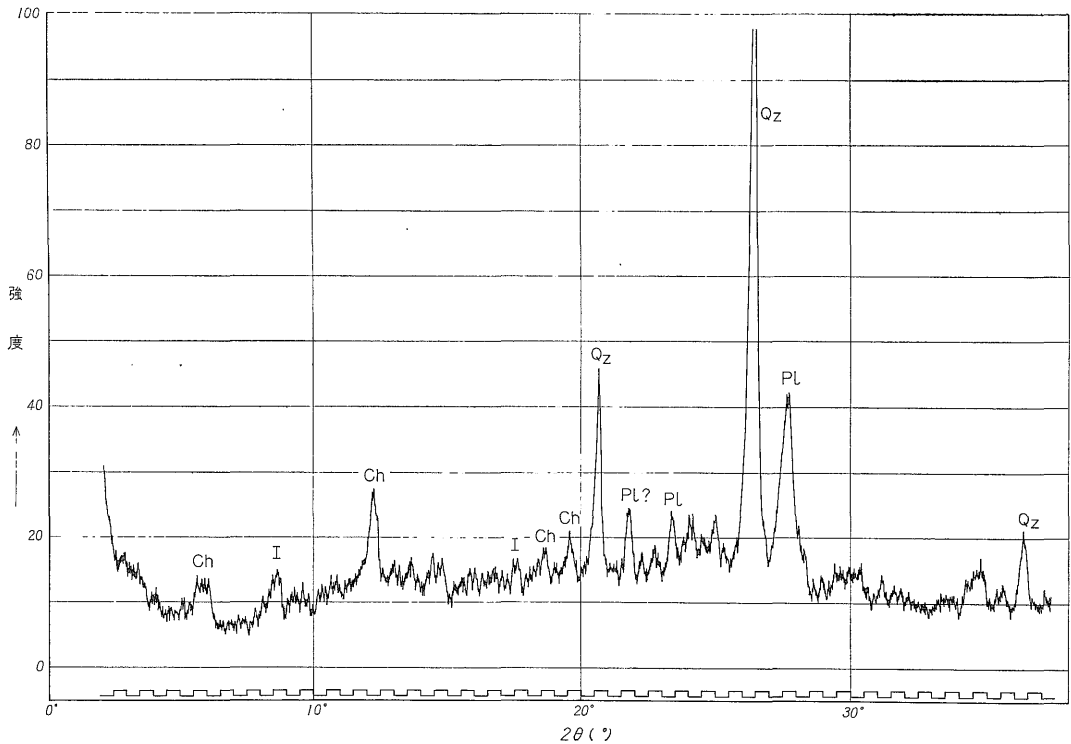
第16図 富士臨海部のA井戸における塩水化後の化学成分組成の変化を示す図



第17図a 柱状試料粘土 No.1-1 のX線回折図

Specimen Clay No.2-2  
 Target Cu, K $\alpha$   
 Filter Ni  
 Voltage 30KVp  
 Current 30mA  
 Scale Factor 4  
 Time Constant 4 sec  
 Multiplier 1  
 Scanning Speed 2°/min

Chart Speed 2 cm/min  
 Receiving Slit 0.2mm  
 Date 1966. 7  
 Operator M. Watanabe  
 I イライト  
 Ch 緑泥石  
 PL 斜長石  
 Qz 石英



第 17 図b 柱状試料粘土 No.2-2 のX線回折図

Specimen Clay No. 1-1  
 Target Cu, K $\alpha$   
 Filter Ni  
 Voltage 30KV  
 Current 30mA  
 Scale Factor 4  
 Time Constant 4 sec  
 Multiplier 1  
 Scanning Speed 2°/min

Chart Speed 2 cm/min  
 Receiving Slit 0.2mm  
 Date 1966.7  
 Operator M. Watanabe  
 I イライト  
 Ch 緑泥石  
 Pl 斜長石  
 Qz 石英

文 献

- 1) 村下敏夫・岸 和男 (1967) : 地下水の塩水化についての研究—第1報 熔岩帯水層の水理地質学的性質—地質調査所月報, vol.18, no. 6
- 2) JIS K0101—1960 工業用水試験方法
- 3) 地質調査所化学課資料 501 (2) 工業用水分析法 (昭和36年)
- 4) 半谷高久 (1960) : 水質調査法, 丸善
- 5) 酒井邦男 (1965) : 岳南地下水塩水化の実態について, 紙バルブの技術, vol.16, no.2
- 6) 比留川貴・後藤隼次・池田喜代治 (1957) : 静岡県岳南地域工業用水源報告, 地質調査所月報, vol. 8, no. 4
- 7) 安藤 厚・池田喜代治 (1966) : 岩石, 鉱物分析用直読式分光分析装置, 地質ニュース, no. 145
- 8) 渡辺 裕 (1961) : 粘土の塩基置換容量の測定法, 粘土科学, vol. 1, no. 1