

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——

村下 敏夫* 岸 和 男*

Study on Salt Water Intrusion into Ground Water
Part 1. Geohydrologic Conditions of Lava Aquifer

By

Toshio MURASHITA & Kazuo KISHI

Abstract

In many coastal areas of Japan, the aquifers have been contaminated with salt water, because the seaward flow of ground water has decreased.

The salt-water contamination at the coastal area along Suruga bay is the biggest one. The contamination first began in the vicinity of Tago-no-ura in 1960, and next on the reaches of Numa river in 1965. The contaminated area in 1966 is ten square kilo-meters in total.

The first contaminated zone has rapidly enlarged forward the foot of Mt. Fuji. The chlorine (Cl) content of artesian water increased largely year by year, for example the peak of Cl⁻ was 500 ppm in 1961, 6800 in 1962 and 18,000 in 1963. And its content has excessive seasonal fluctuations due to rainfall, for example 7,000 ppm in dry season and 500 ppm in wet season.

The pumping artesian aquifer is the Fuji lava beds having the many fissures and caves, and very permeable. Accordingly that is able to transmit easily the salt water.

The next contaminated zone gradually enlarges and has no seasonal fluctuations. The pumping artesian aquifer is volcanic sand beds with gravel and lower than lava in permeability.

The salt-water contamination was mainly induced by non-water-balance. The annual amount of rainfall decreased and the pumpage of the industrial wells increased on large-scale, during from 1960 to 1964.

Evidence of the industrial well field indicates that the interface between the fresh water and salt water receded and chlorine content became poor, because rainfall was heavy and new wells were no longer developed in 1966.

But the contamination continues on the reaches of Numa river, because the pumpage becomes up year by year.

* 応用地質部

要 旨

富士山の南麓に広がる海岸平野では、昭和35年から被圧地下水の塩水化が始まり、海岸に近い深井戸の一例では36年にCl⁻量が500ppm、37年6,800、38年18,000というように急速に増加した。そして塩水化の範囲は、内陸の吉原市街地にまで及び、また最近では浮島原の沼川沿岸にも拡大して、10km²の面積に達している。

ここで発生している塩水化には、二つの型がある。一つは大きな季節の変動を繰り返して急増する型で、帯水層は熔岩である。一つは季節の変動をほとんどすることなしに漸増する型で、帯水層は火山砂礫である。

塩水化の原因は、地下水の源となる降水量と地下水汲み上げ量との水収支がここ数年にわたって不均衡であることにある。

なお海岸平野における塩水化のこの二つの特徴は、裂か水と地層水との本質的な相違を示すものとして興味深い。

1. 緒 論

わが国における主要な工業地帯は、海岸平野に立地している。海岸平野は、港湾の建設が可能な地形であり、工場用地の確保や造成が比較的容易にできる地形であるからである。ここでは、多量の水が使用される。地下水は、海岸平野ではきわめて低廉に開発できる水源であり、工業用水として最適の性格を備えているから、多量に消費されている。

しかし、海岸平野では、近年地下水が過剰に汲み上げられる傾向にあり、地盤の沈下や地下水の塩水化が発生している。なかでも、地下水の塩水化は、緩慢でしかも増加しはじめると多少の変動があつても減少しないものである。この現象は、地下水利用者にとってはまことに致命的であつて、最悪の事態に陥ると、設備の改善や使用水源の転換に、莫大な経費を必要とする。

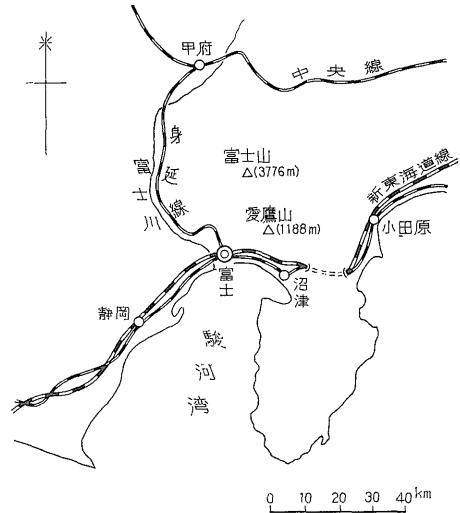
わが国で発生している地下水の塩水化のなかでも、静岡県富士市の海岸平野で発生したものは、もつとも規模が大きく、かつ顕著なものである。また塩分増加の傾向は、他の海岸平野におけるような緩慢なものとは異なり、きわめて急激でしかも降水量が多い季節には急減するという特異的なものである。

われわれは、海岸地帯で発生している塩水による地下水汚染の原因・機構・対策を明らかにする目的で、とくに社会的問題が大きい富士市について、昭和36年度から経常研究費をもつて、研究を行なつてきた。この報文

注1) 昭和41年11月1日、富士市・吉原市・鷹岡町の2市1町が合併して富士市となつた。

は、こんにちまでの研究成果を中間報告として、とりまとめたものである。塩水化の化学的研究については、別報で池田喜代治技官が発表する。なお、この報文には、通商産業省昭和40年度地下水利用適正化調査による成果がおりこまれている。

研究にあつては、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^{注1)}ならびに製紙企業から、多大の御協力をいただいた。ここに厚く謝意を表する次第である。

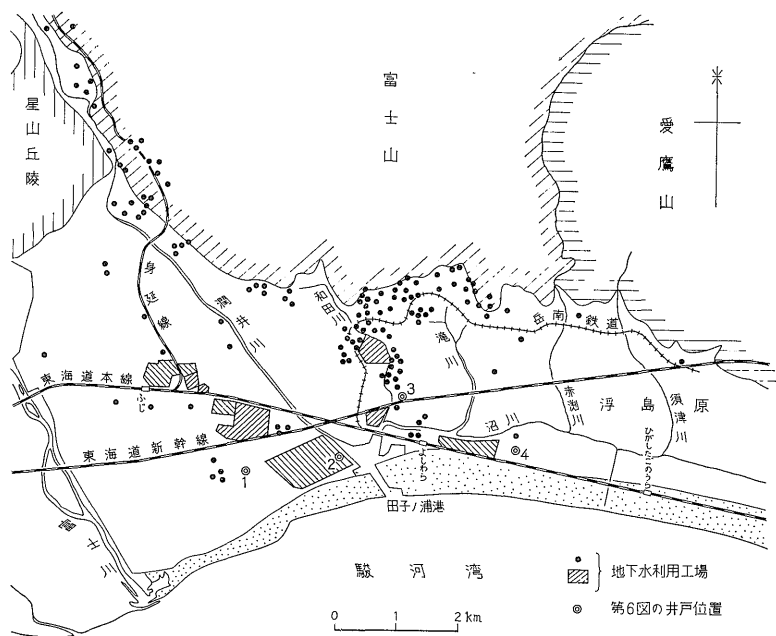


第1図 位置図

2. 地 形

静岡県富士市の海岸平野は、富士山の南麓に広がる低地で、別に岳南地区と呼ばれている。

低地は、地形的に大別すると、扇状地・海岸砂丘・湿地とに区分される。扇状地ないし三角扇状地は、低地の西縁を南流する富士川と富士山体の西南麓から流れる潤井川とによつて形成されたものである。扇状地は1/500程度の比較的ゆるい勾配で、北西から南東の方向に傾斜し、その東端は吉原市街地から南流する和田川付近で終る。海岸砂丘ないし砂礫州は、富士川河口から沼津千本松原に及ぶ延長約20km、幅200~800m、平均標高10m(最高は国鉄吉原駅の南方天ノ香久山24m)の大規模なものである。その南側は、汀線から水深50mまでの間の海底勾配が1/5という急深な駿河湾である。湿地は和田川の東側にあり、南を海岸砂丘、北を愛鷹山で囲まれた標高0.5~2.5mのきわめて低平な湿地帯で浮島原と呼ばれている。湿地は沼津まで延びており、その間愛鷹山体に源を発する小流域の河川が天井川となつ



第2図 地下水利用工場位置図

て、沿岸に微高地形ないしは小規模な扇状地を形成している。

岳南地区の西を南流する富士川は、山地を脱してから河口までの流路がわずか7.5kmにすぎず、1/250の河川勾配で駿河湾に注いでいる。古文書によると、富士川は岩本地先から流路を東へ変え伝法・今泉を経て、浮島原のほぼ中央を横切り、国鉄原駅付近で駿河湾に注いでいたようである。その後次第に流路を西へ変え、和田川・下堀などが一時富士川の流路であつたようで、現在の河道は徳川時代以降のものである。

潤井川は、河川勾配1/600で、低湿地の排水河川である沼川と合流して海岸砂丘を横切り、駿河湾に流入している。吉原市街地を南流する和田川は、沼川の支川であり、富士山体と愛鷹山体とを分ける赤淵川も沼川の支川である。

田子ノ浦港は、潤井川と沼川との河口を開き、築造されたものである。これは、岳南工業地帯の急速な発展に呼応して計画されたもので、昭和32年調査にかかり、翌年から建設が始められた。この港は、掘込式港湾としては北海道の苫小牧港に次ぐもので、港の水深は最大で約10mである。

3. 塩水とその侵入の経過

塩水とは、Cl⁻を多量に含有する水という意味であ

るが、その限界量についての明確な定義はないようである。水は利用面の相違によつて、その価値判断が異なるから、淡水・塩水の区別も利用者によつて画一的ではない。水道の飲料水判定基準では、Cl⁻の限界量は200ppmと決められているが、これは衛生学上の限界である。

地下水の種類の一つに「かん水」がある。これは、固形物総量を基準にして1,000ppmを超えるものである。電気伝導度は1,400 μ v/cm (25°C)であるから、これをCl⁻に換算すると約330ppmとなる。厳密な定義はとうてい困難であるから、本文ではCl⁻300ppm以上を含有する水を塩水とし、それ以下の水を淡水として取り扱うことにする。

3.1 塩水化の範囲

岳南地区は、1本の深井戸で良質(Cl⁻数ppm)の地下水が大量に揚水できる所として、また自噴状態でも利用できる所としてはわが国随一の地下水賦存地区であつた。

この地区で塩分の多い井戸が発見されたのは、昭和35年7月¹⁾であつた。その井戸は、国鉄吉原駅のすぐ北側にある深度約100mの深井戸で、Cl⁻は500ppmであつた。その直後、隣接工場でもCl⁻300ppmの深井戸が発見された。最初に発見された井戸のCl⁻は、35年末には1,000ppmを超え、翌年1月には3,300ppmにも達し

て、ついに廃止された。

35年暮には、田子ノ浦港の西側海岸砂丘内にある田子ノ浦簡易水道井の塩分が増加して給水不可能となった。そして36年春には、田子ノ浦港周辺の深井戸——揚水停止時には自噴状態となる井戸——に、1,000ppm程度のCl⁻が検出されるものがあらわれた。しかしその当時でも、この近くには自噴井が存在していた。

塩水化した井戸は、36年夏にはごく一部を除いては本来のCl⁻含有量に近い値にまで減少した。したがって、塩分の増加は、35年後半から36年前半にかけての一時的な現象と考えられた。ところが36年秋になると、ふたたび塩分が増加し、かつその範囲が拡がって内陸に及んできた。塩水は37年春には、吉原市街地の南端にある和田川沿いの深度60mの深井戸にあらわれ、38年春にはさらに上流に溯して同市街地に「くさび状」に侵入した。そして39年秋の塩水化は、もつとも急激なもので、市街地の大半をおかし、40年春の湧水時にはごく浅い20m程度の家庭用井戸のCl⁻が平常の10倍近くの値を示したことがあった。

塩水化の範囲は、37年春は前年よりも600~700m内陸へ、38年春にはさらに400~500m、39年春にはさらに300~400mと年を追うて進み、40年春には吉原市街地をとり囲むような形をなしてきた。そして41年春には、同市街地の東側にある「今泉」という湧泉が多かつた地先でも、塩分の増加がめだつてきた。

塩水化の範囲は、第3図に示されている。Cl⁻ 500ppmの値は、高級紙の水質基準限界とされている。吉原市街地では、300ppmの範囲も1,000ppmも500ppmのそれとほぼ同じであり、東海道本線付近から南側では10,000ppmの範囲もまた同じである。なお後述のように、岳南地区における塩分量は、季節によつて大きく変動する。したがって塩水化の範囲は、豊水期にあたる夏と湧水期にあたる冬とでは、第3図のA・Bの比較でわかるように、かなり相違している。しかし両者とも、塩水化の範囲は、年々内陸に拡大しつつある。ただ昭和41年4月の観測によると、その範囲は前年よりも若干減少したようである。そして塩分の減少は、吉原市街地では前年の同時期の $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{4}$ に、東海道線から海岸寄りの低地ではほとんど変わらないが、なかには $\frac{1}{2}$ 程度にまで低下したものもみいだされた。

3.2 塩分の季節変動

水質の観測によると、塩分の最大と最小は、1年のうち4月と9月にそれぞれあらわれ、塩水化の範囲が拡がっても、その傾向は変わらない。海岸線から1.2km内陸にある深井戸のCl⁻は、37年4月に6,800ppm、同年8

月には500ppm、38年4月には18,000ppmと短年の間に海水の量(標準海水で19,000)にまで近付いたが、8月には7,000ppmにまで減少した。また2.2km内陸にある深井戸のCl⁻は、36年4月には6.3ppmと本来の値であつたが、1年後には125に増加し、8月には本来の量に戻り、39年4月には8,900にまで達した。これらの事例は、第4、5図に示されている。

塩分の増加・減少がきわめて急激であることが、岳南地区における塩水化の特徴のようである。季節的な塩分変動は、最低が最高の $\frac{1}{10}$ もしくはそれ以下となり、経年的な変動は最高が急速に伸び、最低も徐々ではあるが増加している傾向にある。ただ41年には、6月28日の4号台風以来塩分量が急減し、9月25日の26号台風の際には吉原市街地では停電で深井戸の揚水が中止したために、自噴が一斉におこり、かつ従来涸渇していた湧泉口からも地下水が湧出した。そして海岸寄りの深井戸の塩分量は、4月の最高時の $\frac{1}{30}$ に減少した。

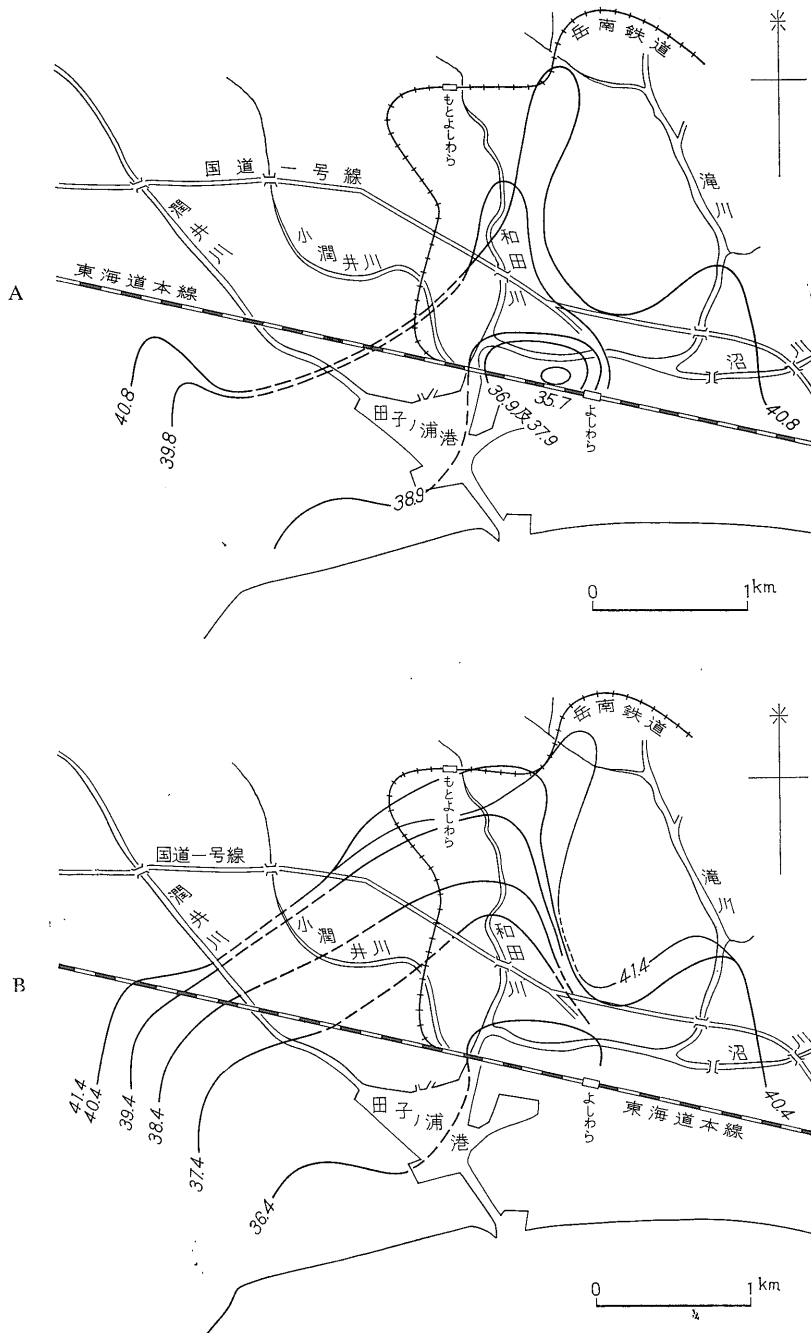
3.3 井戸と塩分増加

塩分増加は、他の海岸平野でみられる地下水の塩水化とは、かなり相違した特徴をもっている。塩水化の範囲が広範囲に及んだこんにちにおいては、深井戸の塩分増加の予想をある程度たてることができ、しかも深井戸には一様にあらわれるようになったが、塩水化初期においては井戸の深さ・構造などによつて興味ある現象がみられた。それらを列記すると、次のようである。

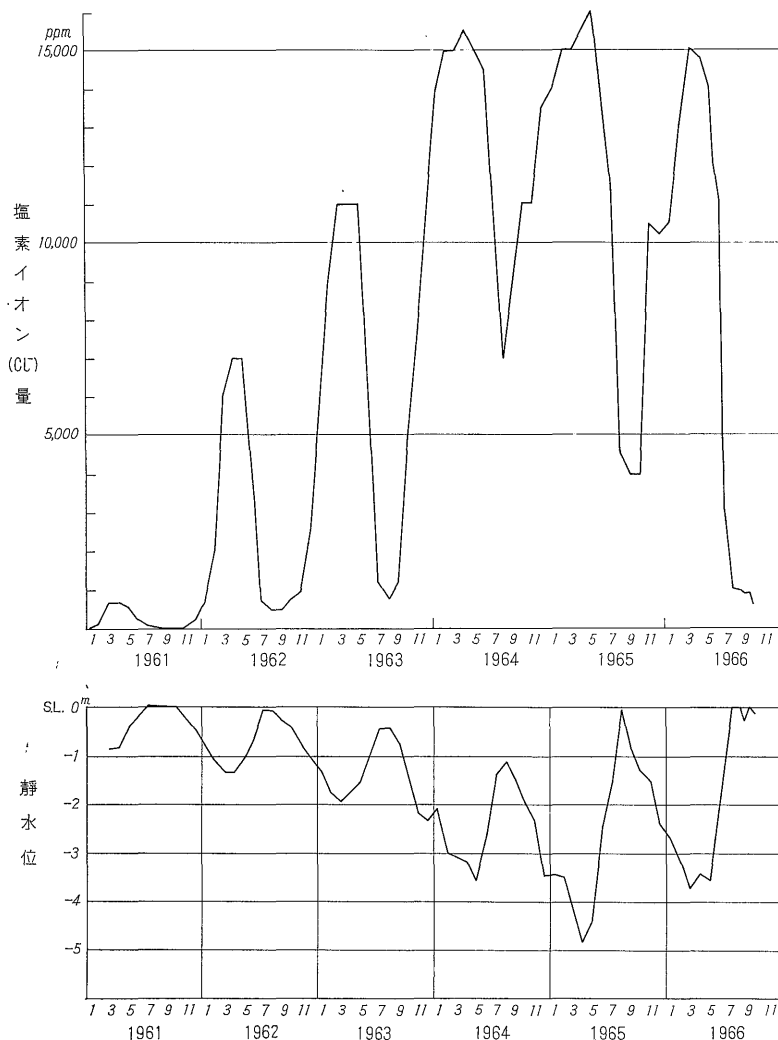
- 1) 自噴井(水頭圧海拔標高+4m程度)を揚水すると塩分が増加した。しかし50m離れた他の自噴井のCl⁻は本来の数ppmで変動しなかつた。
- 2) 塩分増加が顕著だつた井戸は、熔岩に達していないか、達していても井戸のケーシングが径違い(多くの場合熔岩の上まで大きなケーシングで、熔岩中はそれよりも小さいケーシングもしくは素掘りのままである)の井戸であつた。
- 3) 深井戸の塩分増加は、海岸寄りから順々に生じたものではなく、飛火するように拡がつた。
- 4) 隣接する井戸で、Cl⁻量の差が著しいもの(たとえば14,600ppmと1,890ppm)があつた。
- 5) 一日におけるCl⁻量の増減がはげしく、2,000ppmもの差を示す井戸があつた。

広範囲にわたつて塩水化した現在では、下記のような塩分変動がみられる。

- 1) 揚水量が多い井戸ほど、塩分が多い。
- 2) 潮汐の干満による、塩分変動が、若干認められる。
- 3) 降雨の影響で水位が上昇すると、塩分は逆に多くなる傾向を示し、若干日数がたつてから減少しはじめ



第3図 Cl⁻ 500ppm 以上の範囲の経年変動を示す図
 A: 豊水期における範囲 B: 渇水期における範囲



第4図 海岸線から1.2km内陸にある深井戸のCl⁻量と静水位の経年変動を示す図

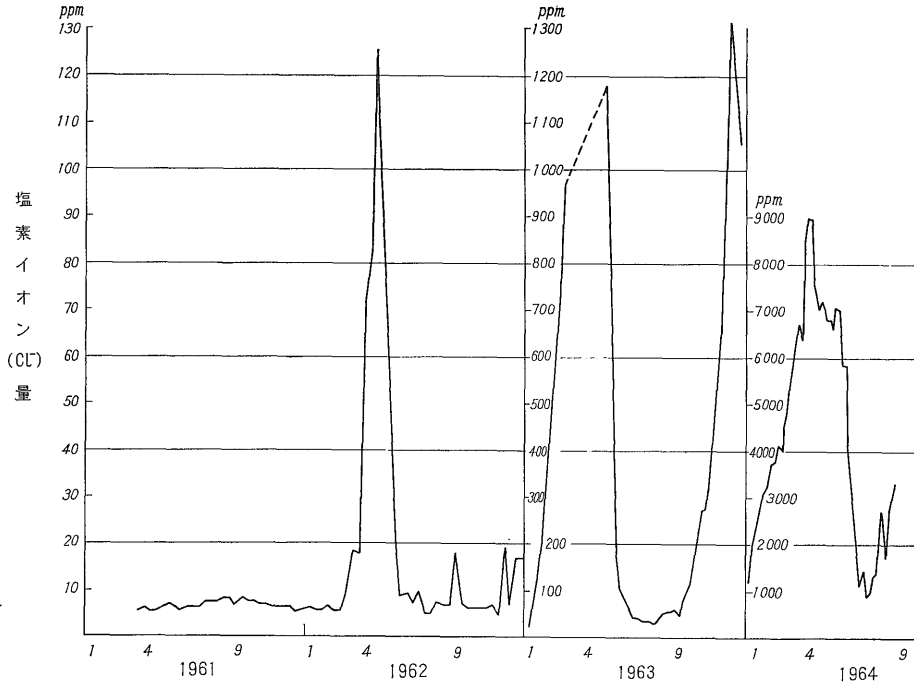
る。

- 4) 梅雨・台風など降水量が多い時の影響は、1.5～2カ月後に明瞭に塩分減少となつてあらわれる。渇水期の影響もほぼ同程度の時間の遅れである。
- 5) 豊水期における塩分減少は、揚水量が多い井戸ほど顕著である。
- 6) 塩分が多い井戸を休止させると、塩分の少ない井戸が汚染される。この傾向は、日曜日・休日あるいは休電日の翌日にあらわれている。とくに隣接井戸が塩分増加のために廃止されると、てき面に影響があらわれて塩水井戸になる。したがつて工場のなかには、塩水井戸を連続揚水して、他の良質の井戸への悪影響を

極力防止する自衛手段を講じているものがある注2)。

なお以上に述べた岳南地区における被圧地下水塩水化の経過・特徴は、熔岩が分布する和田川以西の地帯におけるものである。しかし昭和40年春頃から、熔岩が分布していない和田川以東の澗川沿岸にある深井戸にも、塩水化の徴候があらわれている。この沿岸にある深井戸は、西部での塩水化によつて良質の地下水が得られなくなつた工場が用水確保のために掘さくしたもので、揚水開始後短日数で塩分増加に見舞われている。後述のよう

注2) Cl⁻が100ppm以下の場合には、数時間の連続揚水で休転前の量にまで減少するが、Cl⁻が多くなるとわずかに減少する程度となる。



第5図 海岸線から2.2km 内陸にある深井戸のCl⁻量の経年変動を示す図

に浮島原には浅い所に塩水を含有する地層があつて、深井戸の多くはこの層に近接してストレーナを設けている。

この地帯での塩分量は、第3図のA・Bでみられるように、季節的な変動を示さず、水質観測によると徐々に増加していることが知られている。この傾向は、多くの海岸地帯で発生している一般的な地下水塩水化の型である。したがつて岳南地区の塩水化には、塩分が急激な変動を繰り返しながら増加する型と漸増する型とがある。なお岳南地区における塩水化の面積は10km²、塩分変動の顕著な地帯はその70%を占めている。

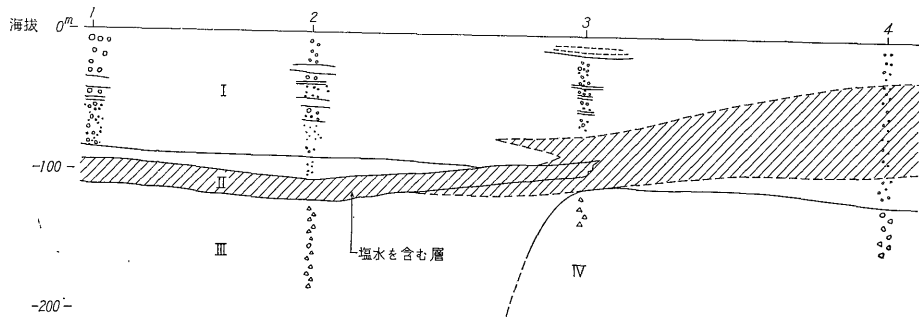
4. 帯水層

4.1 地下の地質

海岸平野における帯水層は、通商産業省が実施した4本の深井戸掘さくに基づく、次の4層に区分される。いま最上部の地層から順に第1層、第2層、第3層、第4層とすると、各層の特徴は次のとおりである。

第1層 この層は、砂礫と粘土を主体とする。

礫は、富士市街地では富士川系の古生層礫を主体とした玉石混りの粗いものである。礫は、富士川から同市街地までの間では層全体にわたつて発達し、僅かに粘土を挟むにすぎない。しかし扇状地の末端に近い田子ノ浦港の方に寄るにつれて、礫は砂と粘土に移行し、とくにこの層の下部は粘土質のものになってしまう。



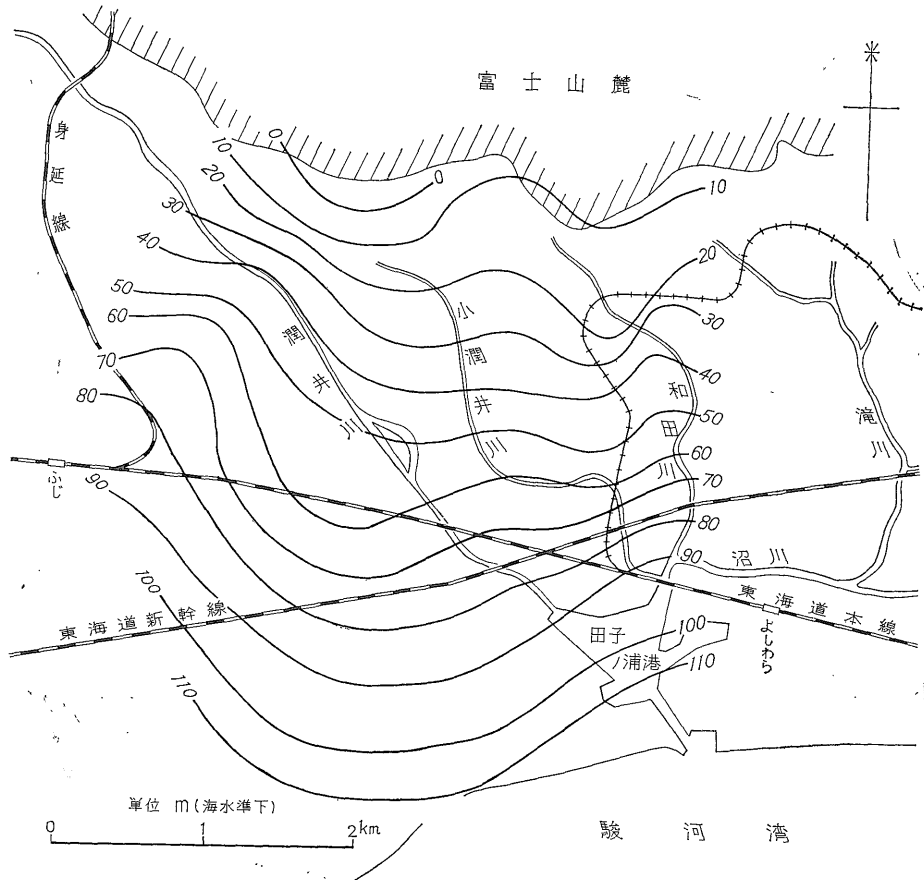
第6図 田子ノ浦港付近の地下地質断面図(番号は第2図を参照)

潤井川沿岸およびその東側では、上部は富士川系の円礫、下部は火山砂礫を多く含む。そして和田川から東になると、全体として礫が薄くなり、最上部には軟弱な泥質土が分布し、下部は砂と粘土もしくはシルトとの互層となり、下部ほど粘土を多く混じえる。そして腐植土混じりの粘土が挟まれ、東に向かうほどその枚数が多く、かつ厚くなる。

第2層 この層は熔岩である。熔岩は、全体としてきわめて堅硬であるが、所によっては割れ目や多孔質

の部分が多く、また熔岩の下半部は井戸掘さく用のビットの重さで簡単に破壊されてしまうほどにルーズなものようである。したがって掘さく中、熔岩中に空洞があるとみられたり、採取された試料は火山砂礫に類似していて、下位の第3層と見違うほどである。

平野における熔岩の表面は、第7図に示されているように、ほぼ北から南に向かつて深くなり、海岸では110mを超える。熔岩の厚さは、おおむね吉原市街地から田子ノ浦港の西側に向う線で厚くなっている20~



第7図 富士熔岩表面の等高線図

40m^{注3)}である。しかし熔岩はその両側に向かつて薄くなって、富士市街地では10~15mもしくはそれ以下の厚さとなり、和田川沿いでも同程度の厚さで、富士川寄りおよび和田川以東^{注4)}では欠除する。

上述の熔岩は、富士火山の熔岩であるが、このほかに愛鷹火山の熔岩があつて、これらは和田川沿いで複雑に重なり合っている。愛鷹熔岩^{注5)}は、赤淵川以西の澗川沿岸のごく限られたところに分布し、和田川を越えた西側ではあまり遠くまでは延びていないよう

である。また厚さは不規則であつて、欠除していること

注3) 熔岩は中間に黄褐色の粘土もしくは火山砂を厚くて10m程度挟んで上・下に分かれる。一般に下部は多孔質で割れ目に富むが、上部は緻密である。

注4) 和田川と沼川との合流点と今泉を結ぶ線から東側を便宜上さす。

注5) 依田橋地先で深度75~88mに位置する熔岩は、沢村孝之助技官によつて輝石含有橄欖石玄武岩と鑑定された。

もしばしばある。この熔岩は、山麓から田子ノ浦港の方向に向かって深くなり、富士熔岩が欠除した和田川の東側では第1層の下位に位置して、その熔岩とはほぼ同深度にあるが、和田川を越えた西側ではその下方に分布することがある。

第3層 この層は、火山砂礫からなる。同層は、和田川沿いで薄くてせいぜい10~20mであるが、東および西に向かって次第に厚さを増す。浮島原におけるこの層は愛鷹火山噴出物で、その下限は深くて170~180mである。和田川以西の火山砂礫は、沢村孝之助技官の鑑定によれば富士火山噴出物である。この層までの到達深度は、田子ノ浦港の西端で約110mであるが、層厚は不明で深度180mでも下位層には達していない。

第4層 この層は、大きな角礫を混じえる火山砂礫である。この層は、吉原市街地の東側では地表面下30~50m付近にあつて、愛鷹山体に近づくほど浅くなる。なおこの層は、浮島原のほぼ中央部を中心として東西方向と南北方向とについて実施された弾性波探査の結果によると、愛鷹山体を構成する凝灰質角礫岩に相当するという。そしてその表面は、緩やかな起伏で南北方向では山体から海岸の方向に向かって深く沈み、原町の柏原新田付近では海面下約170mの深さとなる。また東西方向でも起伏しながら和田川寄りでは浅くなり、これを越えた西側ではふたたび深くなるような形をなしている。また同探査によると、この層は600~700mの深部までつづいている。

第4層の表面の形は、その上位にある他の3層の堆積に大きな影響を及ぼしているように考えられる。富士熔岩は、第4層が馬の背のようにもり上つている和田川沿いの所まで分布し、吉原市街地と田子ノ浦港の西側とをほぼ結ぶ線の付近で厚くなつている。これは、岳南地区における地下水のあり方を知るうえで、きわめて重要なことである。その理由は、次に述べるように4層のうちもつとも大きな透水能力をもつ層が富士熔岩であるからである。

なお海岸平野の周縁部における地下浅所の第三系は、吉原市街地と富士川町で確認されている。吉原市街地の第三系は、吉原公園の西側にある水道水源井で海水準下36mで富士山の基盤である御坂統の緑色安山岩に達している⁹⁾。富士川町では岩淵安山岩が潜在し、東海道線富士川鉄橋付近では地表面下約10mで同岩に達し、岩淵駅付近では約40mで達するが本層は富士川寄りでは急に深くなるようである。また富士熔岩は、国道1号線道路橋の下で富士川河床に露出しているが、新東海道線

鉄橋近くの右岸では、深度70m前後に存在する。熔岩の上・下位層は、富士川系の砂礫であつて、この付近の富士火山噴出物は熔岩だけである。富士川から富士市街地までの間では、熔岩は確認されていないが、火山砂礫が地表面下80m以深に存在する。

4.2 帯水層の透水性

岳南地区における帯水層の透水係数は、掘さくした井戸および既設井での帯水層試験から求められた。地質区分にしたがって透水係数を示すと、次のようになる。

第1層	富士市街地の南	2×10^{-2} m/min
	愛鷹山体寄り	1×10^{-2}
	沼川沿い	1×10^{-2}
第2層	富士市街地の南	2×10^{-1}
	吉原市街地	6×10^{-2}
第3層	富士市街地の南	4×10^{-2}
	吉原市街地	2×10^{-2}
第4層	吉原市街地	1×10^{-2}
	沼川沿い	8×10^{-3}

これから明らかなように、第2層の富士熔岩の透水性がもつともよく、第1層・第3層が同程度、そして第4層がもつとも劣つている。

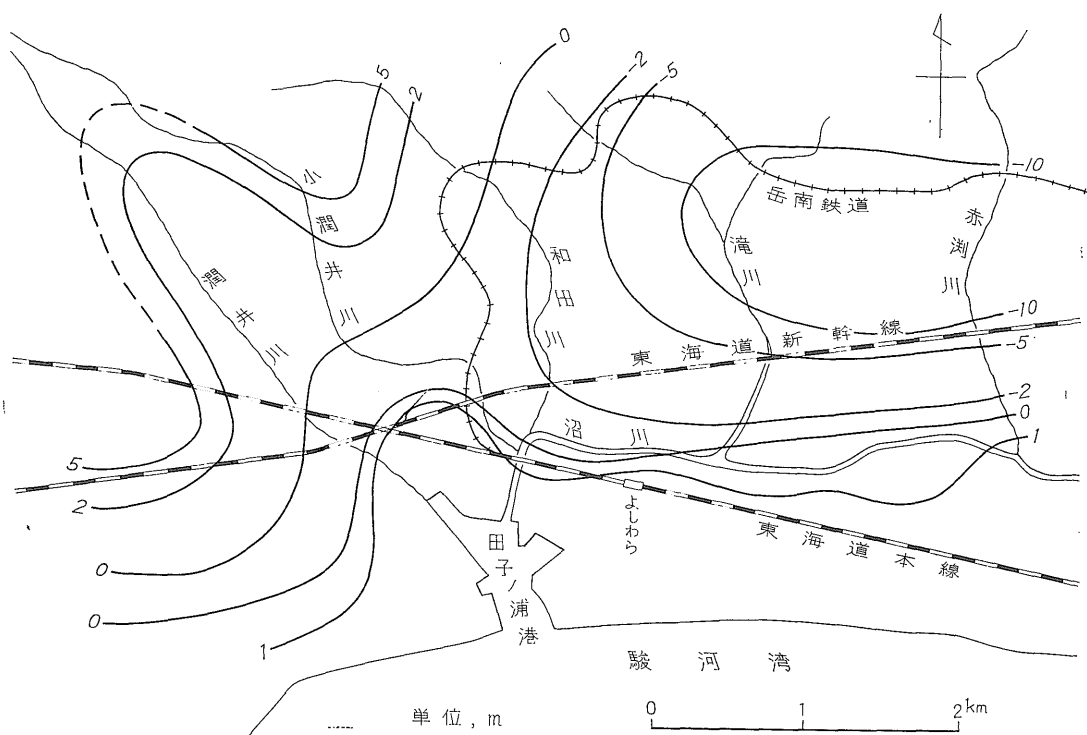
このことは、同じ揚水量に対して、第4層の水位降下がもつとも大きく、第2層がもつとも小さいことを表わしている。透水係数の地域的な分布は、総括的にみると、吉原市街地と田子ノ浦港とを結ぶ線の西側で大きく、東側では小さく、とくに和田川の東側ではさらに小さくなつている。

5. 地下水

5.1 被圧地下水の水位

岳南地区の深井戸は、少なくとも昭和35年頃までは自噴状態にあつて、いたる所で自噴井をみる事ができた。その後水位は地表面すれすれになり、次第に地表面下に低下して、いままでの記録では40年8月中旬の盆休み時に2~3日自噴したのと、41年6月末から台風4号の影響で廃井が塩水を自噴し、さらに同年9月下旬に台風26号のための停電による揚水の一斉中止時に、湧泉および井戸の自噴がみられたにすぎない。第4図の下図は、海岸近くにある深井戸の静水位の経年変動を示したもので、水位低下の経過をうかがうことができる。そして水位は、夏季に上昇し冬季に低下する季節的変動を繰り返しながら、年々低下する傾向にあつたが、41年に入つて幾分水位上昇の兆がみられた。

岳南地区の被圧地下水位は、概括的にみると、第8図のようにほぼ新東海道線に沿つて低くなつていて、その



第8図 被圧地下水の水位等高線図

北側すなわち富士・愛鷹山体寄りとその南側すなわち海岸寄りで高くなっている。海岸寄りが高いのは、砂丘地帯における自由面地下水の影響を受けているとも考えられ、新東海道線沿いでもつとも低いのは、この付近で地下水の汲み上げ量が多いことと深井戸の揚水に伴う相互干渉による結果とも考えられる。このような地下水位の状態は、海岸の方から内陸側に向かって海水が侵入しやすい条件にあることを暗示している。揚水状態では内陸の水位がさらに低下するので、この傾向はより一層明瞭に示されると考えられる。

なお地質区分による地下水位は、第3層でもつとも高く、つづいて第2層である。とくに第3層は、ほとんど開発されていないので、自噴状態にある。地下水位がもつとも低いのは、第4層であり、この層が地表近く存在する和田川沿いの吉原市街地では、水位が地表面下数mの位置にある。この地帯では、第4層の水圧よりもその上位にある熔岩層（現在では塩水を含有する）の水圧の方が高いので、水圧の差だけで塩水が淡水の第4層に入りやすい状態にある。

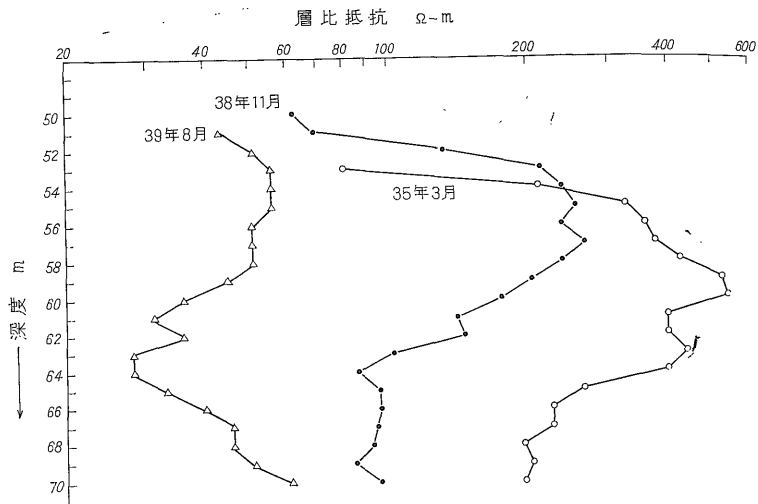
なお、地下水位は、精密観測によると、潮汐の影響を受けて規則正しい変動をしており、依田橋にある深度180mの井戸では約0.5mの水位差が記録されている。

5.2 塩水化した地下水

岳南地区の深井戸は、塩水によつて汚染されているので、深井戸掘さく時の電気検層によつて塩水層のある位置を正確に知ることができる。電気検層は、地層の固有抵抗を測定する方法で、塩水は電解質物質を多く含有しているから、塩水層の固有抵抗は淡水層に比較してきわめて低い値を示すものである。

電気検層によつて検出される塩水層の位置は、第6図のように和田川以东では第1層にあり、和田川沿いでは第1層の下部と第2層および第3層に、潤井川以西では第2層のみにある。浮島原における塩水層は、沼の中心でもつとも厚くなっている。砂丘に近い柏原新田では深度20~100mの間、大野新田では30~70m、原新田では80~90mで塩分量が多い。しかし愛鷹山麓寄りでは塩水層が確認されていない。これは、山体ないし小規模の扇状地を通して天水が浸透するために、山麓近くでは塩水が残留しうる状態にないからであろう。

熔岩に塩水が侵入し始めたのは、昭和35年頃からで、それまで熔岩中の塩水は少なくとも平野には存在しなかったものである。吉原市街地にある深井戸で、塩水侵入の初期から3回にわたつて行なわれた電気検層によると、第9図のように年々塩分が多くなつた傾向を知ることが



第9図 電気検層による富士熔岩の層比抵抗の経年変動を示す図(井戸の間隔はそれぞれ100m程度であるから、熔岩の位置は若干違っている。)

できる。

5.3 地下水系

帯水層およびその透水性・地下水位・水質などの調査結果から、岳南地区における地下水は、次の4系統に区分することができる。

- 1) 富士川から供給される地下水。
- 2) 潤井川から供給される地下水。
- 3) 北部の富士山体から供給される地下水。
- 4) 愛鷹山体寄りから供給される地下水。

1) および2)の地下水は、富士市街地ではおもに地質区分における第1層および第2層の地下水に、3)の地下水は大部分吉原市街地の地下水となり、4)の地下水は同市街地の東部比奈・富士岡付近の地下水となっている。

5.4 安全揚水量

安全揚水量は、一つの地下水系統もしくは地下水盆において、地下水を汲み上げたときに、一時的には地下水位の低下が生じてみれば全体としてみれば水位低下が生じない、ひいては揚水による塩水侵入・地盤沈下などを生じない状態で揚水できる水量をいう。したがって地下水開発の基本となる水量で、基底流動量ともいうべきものである。この算定方法には種々あるが、本文ではもつとも基本的なダルシーの法則に基づいた算定方法を試みた。

公式は、 $Q = A \cdot k \cdot i$

Q : 流量

A : 帯水層の断面積

k : 透水係数

i : 動水勾配

これから算定された第2層以浅の地下水流動量は、地下水系ごとに示すと次のとおりである。

- 1) の地下水系統で、約 195,000m³/day
- 2) " 約 121,000
- 3) " 約 735,000
- 4) " 約 92,000

すなわち地下水流動量は、日量約1,140,000m³で、そのうち30%弱が富士川・潤井川の河川表流水によって養われ、残りはほとんど富士山体からの供給である。なお第3層を流動する地下水量は、かりに富士山体から供給されるものとするれば、約130,000m³/dayである。

安全揚水量は、地下水流動量全量とみることはできない。家庭用水・都市水道用・かんがい用などの使用量をも考慮に入れて、いまその70%とかりに見積ると、岳南地区における熔岩層以浅の安全揚水量は、約800,000m³/dayとなる。またほとんど未開発の少なくとも200m以浅の第3層における安全揚水量は、同様にして算定すると約90,000m³/dayと見積られる。

6. 考 察

昭和35年、田子ノ浦港の北東で発見された深井戸の塩水化は、その年末には港の周辺に及び、年ごとに異常な速度で内陸に向かって拡大して、ついに富士山麓までにせまつた。またこの被害にあつた工場が用水対策として開発した浮島原の深井戸にも、昭和40年から塩水化が認められるに至つた。

岳南地区における塩水化には、二つの型がある。一つは田子ノ浦港周辺から始まつた塩水化で、これは地下水

中の Cl⁻ 量が季節的に大きく変動しながら急増する型である。一つは浮島原に発生した塩水化で、これは Cl⁻ 量が季節的な変動をほとんどしないで年々漸増する型である。塩分増加が徐々に進行する型は、わが国の海岸地帯で発生している一般的な塩水化であるが、季節的な変動が大きい型はこの地区特有のものである。

局所的な塩水化にすぎなかつたのが、わずか数年の間に大規模な範囲にまで拡大した原因には、地質学的な要因と水文学的な要因の2つがあると考えられる。

6.1 地質学的要因

従来岳南地区でもつともよく利用されていた帯水層は、富士熔岩である。熔岩は、本質的には堅硬、かつ緻密で、不透水性の岩石である。しかし熔岩が流動・冷却・固結の過程において生じた割れ目・裂け目・空洞などは、透水にはきわめて有効な間隙ないし通路である。透水性のよい部分は、熔岩の下部に発達しているが、なかにはまったく湧水しないところも存在するから、割れ目などの分布はきわめて不規則のようである。

このような熔岩の透水性が、塩水の通過を容易にし、また隣接する井戸の Cl⁻ 量が極端に相違する結果を招いたものと考えられる。

軟弱な泥質土で構成されている浮島原では、第1層の大部分が Cl⁻ に富むことは、立地地盤のためのボーリング²⁾ならびに静岡県調査によつて明らかである。この Cl⁻ は、地層が海成であることから推察すると、堆積当時の塩水が淡水によつて洗浄されきれずに残留しているものと考えられる。

代替水源として掘さくされた深井戸は、この塩水層の下位にある淡水 (Cl⁻ 数 ppm) を含む火山砂礫から採水している。火山砂礫の透水性は、熔岩に比較して低いにもかかわらず、揚水量は熔岩地帯と同じであるから、揚水は必然的に過剰の状態となる。したがつて、揚水中の水の補給は、上位の塩水層からも起こる。塩水層は砂もしくはシルトないし粘土であつて、透水性が悪いから揚水による同層からの漏水はきわめて少ない。そのために、塩水化は徐々に進んで行われているものと考えられる。

なおこのほかの原因としては、和田川に隣接する深井戸の揚水によつて、塩水が熔岩層から火山砂礫層に誘導され、塩水化した井戸の廃止によつて揚水地帯がさらに汚染されたことも充分考えられる。

6.2 水文学的要因

岳南地帯における塩水化の原因の一つは、水の収支である。ここでいう水収支とは、地下水の補給量と揚水量との収支をさす。

富士熔岩分布地帯における塩水化の範囲は、大部分富

士山体から補給される地下水系統のところである。ここに立地する業種は、大半紙・パルプ工業で、年間通じての地下水使用量は、ほぼ一定である。したがつて Cl⁻ 量の大きな季節的な変動は、おもに降水量によつて支配されると考えられる。

静岡県富士土木事務所の測候記録によると、降水量は年平均 1,800mm で、4月から9月までの間の雨量は梅雨・台風などがあるので全体の 70% を占めている。このために渇水期に侵入していた塩水は、海岸の方へ押し出されると同時に稀釈されるのであろう。

小町太郎⁴⁾ は、静岡県石坂茶業試験場における昭和30年から39年までの10年間の降水量測候記録 (下表) を検討して、昭和35年を塩水化した年と仮定すれば、35年～39年の降水量合計は30年～34年の同合計よりも約 1,700mm だけ少ないと報告している。この数字は、この地区における1年間の降水量分に相当する。また地下水涵養の一大要素となつている富士山頂の積雪深も、測候記録によると、前半と後半とでは約 6 : 4 の割合になつている。

年次	昭30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
降水量	1796	1908	2264	1824	2482	1843	1440	2002	1756	1537

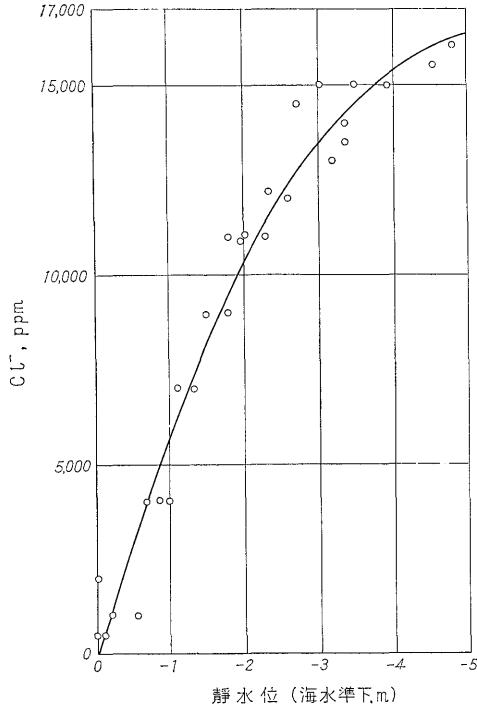
一方地下水の汲み上げ量は、昭和30年以降概略次のように増加している。

年次	旧富士市	旧吉原市	計
昭和30年	220,000	340,000	560,000
35年	230,000	540,000	770,000
39年	300,000	870,000	1,170,000

(単位: m³/day)

これによると、全体としては10年間に2倍の増加となり、旧吉原市が高い伸び率を示して、39年の汲み上げ量は富士山系地下水の補給量 (流動量) を超えている。

地下水位は、その水収支の状態をよく表現するものである。現在内陸で水位がもつとも低下している理由は、富士山系の地下水が吉原市街地に集中している工場群によつてほとんど消費されていることと、東海道線以南にある塩水化した井戸が早くから休止ないし廃井となつているために塩水の侵入が容易であることにある。熔岩の透水性は他の砂礫よりもすぐれていて、水の通過が安易であるから、現在のような地下水位の状態は、あたかも海岸線が市街地の南端にまで入りこんでいることを暗示している。



第10図 深井戸の静水位とCl⁻量との相関関係を示す図

なお、第4図の記録に基づいて、静水位とCl⁻量との関係を示したのが、第10図である。静水位が海面下1mになると、Cl⁻量が約6,000ppmとなることは、すでに繰り返し説明したように帯水層としての熔岩の特徴を示すものである。

昭和41年における塩水化の状態が、富士熔岩を帯水層とする和田川以西では顕著に好転し、火山砂礫を帯水層とする和田川以东では依然として悪化している理由には、1) 昭和41年の降水量が例年よりも多い。2) 新設井戸が以西にはほとんどなく以东に多い、ことが挙げられる。

富士土木事務所の測候記録によると、降水量は、昭和39年には年平均より300mmも少ない1,500mmであったが、40年には38年と同じくほぼ年平均雨量、41年には9月末までですでに2,000mmを超えており、6月と9月は台風の影響で2カ月間の合計雨量が年平均降水量の1/2を占めている。

一方富士市内および吉原市街地では工業用水道水への転換によって井戸の新設は、ほとんどないが、工業用水道の給水が遅れている富士山麓の原田・比奈地区と南部の鈴川地区にある工場群には井戸の新設が多い。井戸の新設は、塩水化した井戸の代替もしくは増設に伴うもの

である。

6.3 塩水化防止

岳南地区における塩水化防止対策は、富士熔岩の性質および塩水化の過程を検討した結果、次の二つの方法に示ぼられる。一つは水の注入もしくは揚水によって防止する方法、一つは地下水汲み上げを安全揚水量以下にまで制限する方法である。

はじめの水注入による方法は、地下水位を上昇させる方法で、海岸付近に深井戸を海岸線に平行して設置し、それに水を注入して水位を高め、海側からの塩水侵入を防止しようとするものである。この方法は、地下水が飲料用として使用されており、また良質の水を必要とする企業が多だけに、注入する水の量と質とに多くの問題が含まれている。

次の揚水による方法は、注入とは逆に海岸近くにある深井戸を常時揚水して、水位を極力低下させ、そこから内陸へ塩水が侵入することを防止しようとするものである。すでに述べたように、塩水化した井戸が運転を停止するとその隣接井戸の塩分が急増するので、工場は自己防衛の手段として塩水化した井戸を揚水している。富士熔岩分布地帯で、塩水が急速に内陸へ侵入しているのは、熔岩の透水性がきわめてよいだけでなく、田子ノ浦港周辺にあつた塩水化井戸を使用しなくなつたことにも大いに原因するものである。したがって揚水による地下水位低下方法は、先の注入式よりもはるかに効果的であると考えられる。

揚水量を安全揚水量までに制限する方法は、その代替として工業用水道による供給と未開発地下水の利用とを考慮しなければならない。岳南地区では、すでに富士川の支川芝川の表流水を水源とする県営工業用水道によって約181,000 m³/day (旧富士市に125,000, 旧吉原市に56,000)の水が供給されている。また日本軽金属KK蒲原工場の発電後の流水を水源とする県営東駿河湾工業用水道が計画され、昭和45年度に300,000m³/dayの給水を開始する予定である。

地下水の汲み上げは、全量を安全揚水量以内に制限しても、深井戸の揚水水位を海水準より下げてはならない。このことは、海岸寄りの井戸にとくに注意深く要求される。また吉原市街地に集中している深井戸群の揚水は、揚水中の水位が自然状態における地下水位の形に近い形をなすように、加減しなければならない。

7. 結 論

昭和35年に田子ノ浦港の周辺から始まつた被圧地下水の塩水化は、数年の間に急速に吉原市街地にまで拡大

し、40年からは浮島原の沼川沿岸にも及んで、その面積は10km²に達した。

田子ノ浦から吉原市街地にまでに拡大した塩水化は、大きな季節的変動を繰り返して急増し、沼川沿岸の塩水化は季節的変動をほとんどしないで漸増するという、それぞれに異なつた特徴をもっている。

この特徴は、帯水層が地質学的には富士熔岩と火山砂礫との相違、地下水学的には裂か水と地層水との相違、水理学的には透水性の差異に起因する。また塩水化の発生は、水文学的な原因によるもので、ここ数年にわたつて、地下水の起源である降水量の減少と被圧地下水の揚水量の増大による水収支の不均衡によるものである。

しかし昭和40年と41年の降水量は比較的によく、そのために塩水化の範囲と塩分量は縮小、かつ減少の傾向にある。もしこれが相当の期間継続すれば、塩水化の機構をより一層明らかにすることが可能であり、その防止法についても高度の成果がえられるものと考えられる。

また塩水侵入の原因が、田子ノ浦港の掘込式工事にあ

るとする考え方⁹⁾も一部にある。これは、今後に残された研究課題である。(昭和41年11月稿)

引用文献

- 1) 蔵田延男他2名(1960)：岳南地域工業用水源調査報告書、静岡県
- 2) 尾原信彦他6名(1965)：東駿河湾地区地下構造調査報告書、地質調査所
- 3) 落合敏郎(1962)：富士南ろくの地質と地下水、吉原市役所
- 4) 小町太郎(1965)：吉原市街に於ける地下水のクロール化に対する所見、吉原市役所
- 5) 三井嘉都夫(1965)：岳南地域における工場の発展ならびに田子浦港建設に伴う河川水の水質汚濁化と地下水位の低下ならびに地下水塩水化問題、富士山および岳南地域の防災上の諸問題、1964年度静岡県防災地学調査報告書