

本邦における地下水の塩水化

村下敏夫*

MURASHITA, Toshio (1982) Salt-water intrusion into aquifers in Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 33 (10), p. 479-530.

Abstract: Japanese major cities and industries are located in the coastal regions, and the development of ground-water resources has contributed to their growth and development.

The ground water is a renewable resource, but the amount of its demand and that of its replenishment are not always balanced in every district. The amount of ground water pumped from fresh-water aquifer in order to meet the demand in certain district exceeds frequently that of natural recharge. Then this causes the salt-water intrusion into the aquifer and in consequence the deterioration of water quality (salinity problem).

The large-scale intrusion of salt water in Japan occurs in the coastal regions, as a result of heavy withdrawal from the aquifer for the purpose of water-supply for the municipal, industrial and fresh-water-fish-raising usage. On the other hand, the salt-water intrusion is also caused by the decrease of recharge due to the lowering of the river-bed near river-mouth and to the construction of ports and waterways. Furthermore, the imprudent development of the fresh-water aquifer lying adjacent to the salt-water aquifer causes the salt-water intrusion not only in coastal regions but also even in inland regions.

The ground-water users are making efforts to prevent the salt-water intrusion in many regions. The most effective counter-measure against the intrusion is to keep the fresh-water level higher than the sea-water level in coastal regions, by means of (a) decreasing the amount of pumpage and (b) executing the large-scale diversion works of water resources from the ground water to the surface water. This counter-measure, however, needs a tremendous amount of budget.

In general, the salt-water intrusion occurs as a result of exceeded improvement in the natural environment by man. So if, in maintaining the equilibrium of nature within its threshold, the development and management of ground-water resources are carried out, then it will be possible, even in the future, to continue the utilization of ground water, practically avoiding the intrusion.

要 旨

地下水の塩水化とは、ここでは都市・産業・淡水魚(主に鮎)養殖の用途に開発されてきた淡水帯水層に塩水が侵入し、その結果、地下水の水質が悪化して利用価値が低下することをいう。我が国で地下水の塩水化が顕在化し、経済的・社会的に大きな関心事となったのは、1960年頃からである。

この論文は、地下水の塩水化の機構を明らかにするとともに、塩水化の防止対策の指針を立てる目的で、地質調査所が1953年以降継続実施してきた代表的な臨海工業地帯の地下水位、地下水の水質(塩化物イオン)の観測記録を解析するとともに、塩水化域の経年変化状況の現地

調査を行った結果をまとめたものである。

筆者は、経済的見地から塩水及び塩水化現象を定義・解説し、次いで淡水帯水層中に塩水が侵入する機構を、既に公表された研究報告から解析し、その中で人為的現象による地下水の塩水化機構として、1)動水勾配の減少・逆転、2)不透水層の破壊、3)淡水と塩水の置換、4)廃井処置の欠陥の四つの型を挙げている。

この論文で、筆者が検討の対象としたのは、釧路・八戸・富士・磐田・浜松・徳島の6地区である。各々の地区について、筆者は地形、地下地質、帯水層の分布及び規模、水位・水質の長期観測や現地調査によって得られた資料をもとに、上述の塩水化機構の型の何れに該当するかを考察している。

さらに、筆者は、日本全国の中から既往の文献にあら

* 環境地質部

われた地域について、塩水化の概況、原因、対策を総覧している。

塩水化の防止対策と効果について、筆者は富士地区を例として、塩水化現象が発生して以来地元で講じられた対策、その結果、塩水化域が減少あるいは消滅するに至ったまでの経過を、経済的・社会的背景をも加えて記述している。

全般を通じて、我が国における大規模な地下水の塩水化は、海岸地帯で地下水を大量に汲上げた結果発生した塩水侵入に起因している。このほか、海岸では河床の低下による地下水補給量の減少、港湾や掘込水路の建設に伴う塩水の侵入、また淡水層に隣接する塩水層を不用意に開発した結果発生した塩水の侵入が、海岸地帯のみでなく、内陸にも存在する。

現在、もっとも効果のある対策は、海岸での地下水位を海面よりも高い状態に保つために、汲上げ量の削減、地表水を代替水源として利用するため水源転換工事があげられる。しかし、その実施には莫大な経費が必要となり、ひいては水価の上昇につながる。

地下水の塩水化は、一般に自然環境を人為的に変えることによって発生するから、自然の均衡が保たれるように地下水の開発と管理が行われると、塩水侵入の危険にさらされることなく、地下水の有効利用が将来とも可能である。

1. 緒 論

地下水の塩水化は、元来、海岸地下水特有の現象で、地下水の汲上げによる水位低下に起因して発生する地下水障害の一つとされている。

我が国の多くの海岸平野には淡水地下水があるので、その開発がここに立地する都市・産業の発展に大きく貢献してきた。しかし、生活水準の向上、経済の成長に伴って水の需要量が增大するにつれて、地下水の汲上げ量が補給量を上回る過剰汲上げの状態となった地区では、透水性のよい淡水層に塩水が侵入して、水質が悪化するという好ましくない塩水化現象が発生している。そして、地下水開発が内陸で行われるようになってから、この現象は海岸地帯のみでなく内陸でもみられるようになった。

地下水の塩水化は、一般にきわめて緩慢に進行するから、塩化物イオンが多くなって用途の面に重大な支障が起こらないかぎり、地下水利用者はその発生に気付かない。この現象が経済的に、社会的に大きな関心事となり始めたのは、1960年頃からである。なかでも、1960年末に静岡県富士市の田子の浦港周辺に突然発生した深井戸

の塩水化は、発生当初はごく局地的な障害と考えられていたが、塩水化する井戸が年を追って数を増して、ついには我が国でもっとも規模の大きいものになった(村下・岸, 1967)。

地質調査所は、1953年以降特別研究費による工業用地下水源調査によって、地下水障害が皆無または発生初期の地下水状態を調査し、その後の開発に起因する地下水障害の発生を予測する目的で、地下水位及び塩化物イオンの観測井を設置し、観測を開始した。前述の富士市における塩水化発生後(1961年以降)は、経常研究費によって塩水化の機構とその防止対策を立てるための基礎研究を、同市で始めた。

地下水の塩水化は、1960年頃は富士市などごく限られた海岸地帯での地下水障害とみなされていたが、1965年を過ぎると多くの臨海工業地帯にこの現象が起り、かつその面積が拡大して地域全体の産業活動に重大な支障を来す恐れが生ずるに至った。

このため、塩水化に関する上記の研究は、富士市に加えて地下水のあり方や利用状態が異なる地区(静岡県下・愛媛県下・徳島県下)を対象に進められた。

一方、年々進行する塩水化を防止するために、通商産業省をはじめ地方公共団体及び地下水利用者は、地域ごとに地下水利用対策協議会を結成して、地下水の汲上げ削減・節水を行うとともに、地下水よりも水価が高い工業用水道水の使用を図ってきた。特に富士市は、地質調査所の基礎研究の結果に基づいて塩水化対策を積極的に進めた結果、協議会結成3年後の1970年に15年間停止していた富士山麓の泉が夏に復活して湧出するとともに、塩化物イオンが減少し始め、現在では田子の浦港西側の海岸まで淡水化することに成功した(村下, 1977)。

この報告は、我が国における塩水の一般的なあり方、塩水侵入の機構と事例、代表例と考えられる地域における塩水侵入の概況、現在進められている塩水化防止対策と効果についての情報を提供するものである。これらの基礎資料は、研究を通じて得たもので、塩水化した地下水を本来の淡水の性質に戻すには多大の経費と多くの歳月を必要とするために地下水源の管理が重要であることを示唆している。この研究の一部である地球化学的研究の成果は、池田喜代治技官によって報告される予定であるが、その一部はこの報告に含まれている。

地下水の塩水化は、この報告に挙げた地区以外でも発生しているが、それらを網羅することができなかった。また、内陸への工場進出に伴って、食料品製造工場から排出される塩水によって発生している地下水の塩水化(平田, 1969; 早船, 1976)、淡水層が下位の高・低塩

水層からの漏水によって受けている汚染(通商産業省・東京通商産業局, 1975)は、この報告でいう地下水の塩水化ではないので省いた。

なお、本研究を進めるにあたって、貴重な観測資料を快く提供して頂いた、地域地下水の対策に献身的な努力をされている関係各位に深甚なる感謝と敬意を表する。

2. 塩水と塩水化

2.1 塩水の定義

天然水は、水中の溶解固形物の総量に基づいて淡水とかん水とに区分され、淡水は固形物総量が1 000 mg/l 未満、かん水はそれを超える水である(U. S. Public Health Survice, 1946)。水質資料の多くは溶解固形物の総量でなく電気伝導(導電)率で示されているので、1 000 mg/l の水を電気伝導率(25°C)で表わすと、1 400 μ S/cm である(ROBINOVE *et al.*, 1958; 村下, 1975)。

塩水とは、塩化物イオン(Cl^-)を多量に含有する水という意味であるが、明確な定義はまだないようである。もし、上記の淡水とかん水の区分基準とされる電気伝導率1 400 μ S/cm を示す天然水の塩化物イオンを我が国の多くの水質試験結果から求めると、塩化物イオンは平均値で330 mg/l である(村下, 1964)。

しかし、水は用途によって水質の評価が異なるから、かんがい、飲料、工業で用水としての塩化物イオンの許容量がまちまちである。例えば、水稻栽培では Cl^- 1 000 mg/l 程度の水は使用できる(蔵田, 1960)が、飲料用水では水道法で厚生省令により現在 Cl^- 200 mg/l 以下と定められている。この値はあくまで衛生学上の観点からの限界値であるが、工業用水道事業法でも供給淡水の塩化物イオンの限界値を水道法の基準に合わせている。ただ、この限界値に近い工業用水は、ボイラー・原料などの純度の高い水質を要求される用途には、原水のままで使用は困難な淡水であろう。

以上の理由で、塩水についての厳密な定義はできないので、従来は Cl^- 300 mg/l を超える水として便宜上取扱ってきた(村下・岸, 1967)が、地域地下水の管理を実行している地方公共団体は、水道水源を保護する立場から、厚生省令にない200 mg/l を基準としている。したがって、本報告でもこの値を基準として、この値を超える塩化物イオンを含有する水を塩水とした。この値を電気伝導率で表わすと、おおよそ850 μ S/cm (25°C)になる(村下, 1975)。

地下水に対して化石水という用語があり、我が国では被圧塩水を化石水とみなすことが多い。化石水は過去に循環地下水(開いた系)であったが、現在では自然の涵養

をまったく受けなくなった状態(閉じた系)の水(U. N., 1960)であるから、淡水・塩水のどちらが存在してもよい。化石水が存在する条件としては、それを封じ込めておく貯蔵岩と、外部との接触を遮断する帽岩の存在が必要となる。

本島(1962 a, b)は、地下水が $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$, $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$ (または不定)の化学組成で表わされるときには化石水として認める従来の考え方に対して、化石水の最終の水質型が $\text{Ca}-\text{Cl}$ 型で、 $\text{Na}-\text{SO}_4$ 型は循環地下水¹⁾、 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型は大気との流通が認められる地下水である、という考え方を提唱している。

2.2 地下水塩水化の定義

海岸地帯の帯水層は、自然状態では海岸線またはそれより海寄りで海洋と接している。多くの海岸地帯では、地下水汲上げ量の増加が原因となって、海洋へ向かう地下水の流量が減少し、あるいは流れの方向が逆になって海水が帯水層内に内陸へ向かって入り込む。この現象が塩水の侵入である(第4図-(a)参照)。もし侵入した塩水が内陸へ進んで揚水地帯に達すると、地下水の水質が悪化して、その利用価値が低下する。

一方、内陸においても地下水の需要が増して、浅い地下水層から深い地下水層の開発が進む場合、浅部の地下水が淡水であっても深部に塩水を帯びる帯水層(以下、塩水層という)があれば、この塩水層の採水に起因して、上位の淡水を帯びる帯水層(以下、淡水層という)が塩水によって汚染(水質の悪化)されることがある。

このように、人為的現象—淡水層が地下水の汲上げによる塩水の侵入に起因して、または淡水層に隣接して存在する塩水層の開発によって、地下水の塩化物イオンが増加する現象を地下水の塩水化と定義する。この場合、塩水の起源が現在の海水であるか、地質時代の海水であるかを実証するには、地球化学の知識を導入しなければならない。

地下水塩水化の情報は時系列資料によって得られ、塩化物イオンの観測が一定の短かい間隔で連続して行われていれば、塩水化の過程がかなり明らかにされる。しかし、単一事例の資料や観測回数が少ないと、塩水化の動向を詳細に知ることは困難であり、塩水化と断定することも容易ではない。

ここで取扱い上問題となるのは、塩化物イオンがきわめて少ない地下水、例えば Cl^- 10 mg/l 未満の地下水がある原因で塩水による汚染を受けて2~3倍の濃度とな

1) 本島(1962a, b)は炭田の地下水について論じているので、 $\text{Na}-\text{SO}_4$ 型の地下水を循環地下水としているが、地表水と関連の深い地下水は通常 $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 型である。

ったとき、前記の定義による塩水ではないので塩水化とはいえないということが現実にかかる。

もし、その水を食料品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業、化学工業、精密機械器具製造業などで、ボイラー用、原料用、製品処理用及び洗じょう用の水として使用しているときには、わずかな水質の変化が製品の品質に莫大な損失を与えるから、地下水使用者の側からいえば、正しく「塩水化」である。したがって、現状ではCl⁻200 mg/l 未満の地下水であっても、塩化物イオンの継続観測によってその増加が進行しているときには、本報告では地下水塩水化の現象とみなした。

2.3 Ghyben-Herzberg の関係

海岸地帯の地下水においては、淡水と塩水との接触境界面は海面以下にあり、その深度は淡水(自由面地下水)の海面上高度の約40倍にあたることを、GHYBEN (1888, 1889) と HERZBERG (1901) が別々の調査で発見した。この関係は、密度を異にする二つの液体が静水力学的平衡の状態にあるという仮定条件で成立するもので、Ghyben-Herzberg の関係と呼ばれ、次式によって示される(第1図参照)。すなわち、

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

h_s : 海面から淡水と塩水との接触境界面までの深さ。

ρ_f : 淡水の密度。

ρ_s : 塩(海)水の密度。

h_f : 海面から地下水面までの高さ。

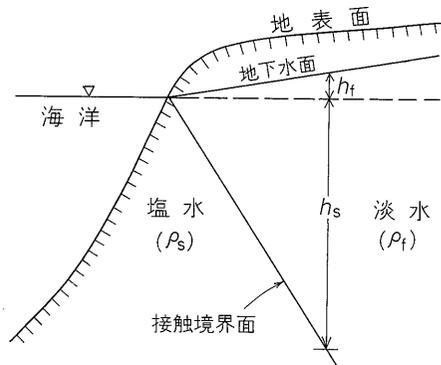
いま、 $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$ とすると、

$$h_s = 40 h_f$$

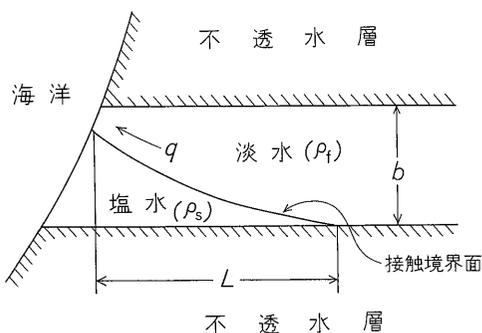
この関係は、塩水の侵入には一定の限界があり、帯水層の広がりや地下水面の高さによって制約を受けることを示している。

また、Ghyben-Herzberg の関係式は、淡水が海洋へ流出しない非流出を前提としているが、二人の研究で指摘されていたように、現実には海岸で地下水流出があるので、上式による接触境界面までの深さは実際値よりも浅い(HUBBERT, 1940)。

さらに、上記の関係では淡水と塩水の接触境界面は明瞭であるが、多くの観測ではその境界は幅の広い混合層から成っている。この混合層は、①間隙流に起因する分散、②潮汐による塩水体の往復運動に起因する接触境界面の変動、③地下水面の季節変動、④分子拡散等の結果によって生ずるものである。淡水補給が旺盛な期間中は、海岸地下水の水位が高いので、淡水はもちろん塩水及び両者の混合層は海城へ押し出され、地下水面が低下している期間中は、逆に塩水が帯水層の下部から陸城へ



第1図 Ghyben-Herzberg の関係に基づく自由水面を有する海岸帯水層への塩水侵入



第2図 被圧帯水層における塩水くさび

侵入する。したがって、海岸線における h_f は豊水時と渇水時とは異なるから、 h_s もそれに応じて変動する。

被圧地下水に対しては、上式は地下水面を圧力面に置き換えることによって関係式が誘導できる。ただし、淡塩水が平衡状態にある Ghyben-Herzberg の関係が成立するには地下水面または圧力面が、①つねに海面上にあり、②海洋に向かって傾斜していることが必要であって、この条件が満たされなければ塩水は直接内陸へ向かって侵入する。

海岸地帯の被圧帯水層には、Ghyben-Herzberg の関係から「塩水くさび」が存在する。被圧帯水層の単位断面積を海洋へ向かって単位時間に通過する淡水の流量 q は、ダルシーの法則を展開することによって、次の一般式で表される(第2図参照)。

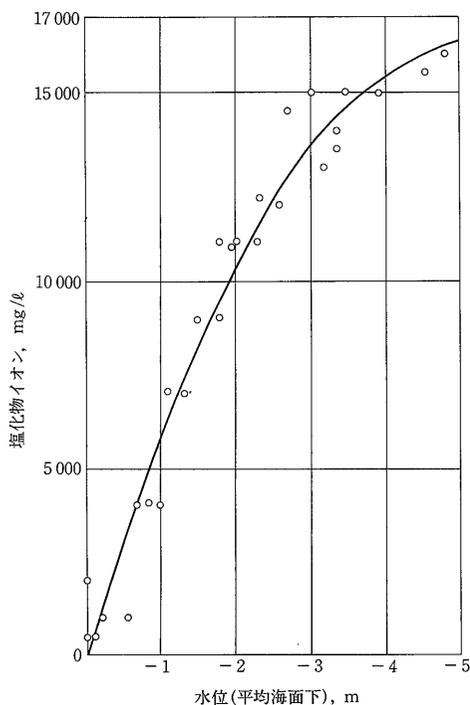
$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{kb^2}{L}$$

k : 透水係数。

b : 帯水層の厚さ。

L : 帯水層中の塩水くさびの長さ。

この式は、均一な帯水層と流動に対しては塩水くさび



第3図 被圧地下水位と塩化物イオンとの関係

の長さが淡水流量と負の関係にあることを示している。

地下水位低下に起因する被圧帯水層への塩水侵入の事例を、第3図に示す。この井戸は富士火山溶岩層を採水層とし、海岸線から1.2 km 内陸にある。地下水位と水質の観測結果によると、静水位が海面下に下がるにしたがって塩化物イオンが増加している。これは、水位低下に伴って、淡水と塩水の接触境界面が内陸へ向かって侵入することによるものである。

なお、塩水化の原因と直接の関係はないが、被圧地下水の水位低下に伴って、従来まったく現れていなかった潮汐の影響が水位の日変動に現れることがある。その影響が大きくなってあたかも潮位の変動を示す状態になると、地下水中の塩化物イオンが増加することが、富士(村下・岸, 1967)・磐田・福田・徳島・阿南で観測されている。潮汐による地下水位の変動は水位低下によって接触境界面が内陸へ侵入したことを示唆し、被圧地下水塩水化の前兆として注目される現象の一つである。

3. 従来の研究

海岸地下水に関する研究は古くから行われていたが、地下水の塩水化に関する研究は新しく、その発端は大別すると二つある。一つは南海大地震に伴う地盤の沈下

による塩害と、一つは地下水の汲上げによる塩水化である。そして、後者の研究が本格的に進められたのは1965年以降であろう。

3.1 海岸地下水

Ghyben-Herzberg の関係は、海岸地下水を利用するに際してきわめて重要な尺度であるが、淡水と塩水の接触境界面の形を決定するには、数多くの観測点が必要となる。これについて野満隆治は、純理論的見解—地下の塩水層の状態は淡水層と異なり、淡水層が流体力学的平衡状態にあるのに対して塩水層は静水力学の平衡状態にある—から、淡水と塩水の接触境界面の形を誘導し、この境界面は任意の2点における地下水面の測定を行うことによって決定され、砂粒の大きさ、その他土質に無関係である、との結論を得た(豊原, 1936)。豊原(1936)は、野満の理論を模型実験と野外実験とによって証明することを試み、野外実験地には、潮汐作用が少ない鳥取県の弓ヶ浜が選ばれた。この研究は、我が国における海岸地下水の理論的考察の初めであると考えられる。Ghyben-Herzberg の関係から、一定の深さにおける地下水中の塩化物イオンは海岸線に平行して分布する。このことについて、吉村(1942)は、1935年に行った伊豆下田町(稲生沢川河口)における地下水研究の例で説明している。

被圧地下水の塩水については、山本(1939)の報告がある。これは、東京衛生研究所の深井戸(深度 30-120 m で、60m前後が圧倒的に多い)の化学成分に関する報告に基づいて考察したものである。同研究所が調査した当時、東京の海岸沿いには $Cl^{-} 1000 \text{ mg/l}$ を超える被圧塩水があった。山本(1939)によれば、 $Cl^{-} 100 \text{ mg/l}$ の等量線は永代橋から浅草橋・錦糸町・亀戸町に至っており、その等量線の屈曲の形が沖積層下の化石侵蝕谷の平面形と類似していること、及び低地でも海から離れた荒川区・足立区での塩化物イオンは非常に少ないことが指摘されている。

3.2 南海大地震による塩害²⁾

地震に伴う地盤沈下に起因する海岸地下水の塩害に関する研究は、南海大地震(1946年12月21日)による被害が甚大であった四国地方や山陽道で行われた。

同地震による被害の一例として、蔵田(未公表)が1954年に行った地下水調査の結果を紹介すると、重信川の河口では約30 cm の地盤沈下に伴い、約2年のおくれで一般民家の水源になっている自由面地下水が塩水によって汚染され、その後一時減少したが再び増加した。

被圧地下水に関する研究では、速水ら(1950)が同地震

2) 本文でいう塩害とは、地震などの自然現象に起因して発生した塩水化である。

に伴って吉野川河口地帯(川内町)で発生した地盤沈下による水田の塩害についての理論的考察を行い、観測値と計算値とが一致することを確かめ、塩害が地盤沈下より遅れて起こる理由などを明らかにした。

この研究のほかに、前川(1952)、松原(1959)が同地震に伴う地盤沈下と海岸地下水の変動について研究を行い、地盤沈下後海岸地下水が塩水侵入によって受ける塩害現象に対する定量的考え方を発表している。

3.3 地下水汲上げによる塩水化

海岸地下水の汲上げに起因する塩水化について、最初に指摘したのは片岡・松岡(1952)であろう。この報告書は未公表であるために多くの研究者に知られていないが、塩水化井戸の放棄、地下水汲上げ域の拡大によって塩水化域が大きく変化することを紹介している(第34図参照)。この報告が現在の地下水塩水化の機構及びその防止対策に重要な示唆を与えたことは特筆すべきことである。

1960年の夏、地質調査所は、静岡県県の依頼によって富士市の地下水調査を行った際に、国鉄吉原駅北方の深井戸群の中に Cl^- 500 mg/l の揚水井—1955年調査時には 6.0 mg/l であった(比留川ら, 1957)—を発見した(静岡県, 1960)。その年末には、この井戸を含めて田子の浦港周辺の工業・水道の深井戸(揚水を停止すると自噴した)が塩水化した。これが富士市における被圧地下水塩水化の発端であった(村下・岸, 1967)。1961年以降、地質調査所は当地における塩水化の機構とその防止対策に関する研究を継続し、淡水化できる目処がついた1978年に現地調査を終了した。なお、1960年に開始された水質(塩化物イオン)の観測記録の一部は尾崎(1967b, 1978)によって報告されている。

福尾(1972)は、徳島県那賀川下流地帯における被圧地下水の塩水化に関する研究で、揚水分布の変化と塩水化域との関係を室内実験と現地調査とで確かめた。理論と実験結果については川端(1973b, 1974)、川端・福尾(1973a)、揚水分布と淡水・塩水の接触境界面の移動との関係については出井(1975)が報告している。

3.4 塩水の地球化学的性質

塩水の地球化学的性質については、本島(1962a, b)の報告があるが、これは炭田地帯の地下水に関するものである。

塩水化地下水の地球化学的考察は、1954年に蔵田ら(未公表)によって行われ、被圧地下水が塩水化するとその水質が淡水・海水とはまったく異質になる—pH が酸性側になり、 HCO_3^- が減少し、硬度がきわめて高くなる—ことを注目した。その後、比留川(尾崎ら, 1959)

は、紀ノ川下流の和歌山市における塩水化地下水の水質型が Cl^- 1500 mg/l を境として明らかに相違することに注目して、他の塩水化地下水と合せて考察を行った。それによると、 Cl^- 100-150 mg/l の被圧地下水は Ca-HCO_3 型であるが、 Cl^- が 1500 mg/l にも及ぶ和歌山市内の被圧地下水は上述の愛媛県下の例、静岡県清水ガス田高部17号井の塩水と同様に Ca-Cl 型、 Cl^- が 3900-11250 mg/l の被圧地下水は名古屋市南部の深井戸(ただし50 m 以浅)、三原市の深井戸、静岡県焼津ガス田39号井とともに Na-Cl 型を示している。そして、採取水試料の Br^- と I^- の含有量は標準海水とよく類似しているが、pH は海水の 8.3-8.4 に比べて、 Cl^- 1500 mg/l 以上の水は 6.6-6.7 を示し、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ も海水より多い。塩水化によって硬度が高い水質に変化するの、海水侵入の過程で接触する地層と反応して起こるイオン交換に起因すると考察した。TSURUMAKI (1962a) も西大阪の塩水化地下水の水質について、比留川と同様の説明を行っている。

池田(1967, 1968)は、富士市における地下水の塩水化に関する地球化学的研究で、海水が淡水層—開いた系の中を侵入する過程で上述の水質変化が起こることを室内実験で確かめ、置換反応は平衡状態になるまで継続することを明らかにした。また、帯水層が富士火山溶岩層の場合には、 Cl^- が約 1500 mg/l を超えると硬度が急減し、[海水+淡水]の混合値に近づくことも確かめた。この研究成果は、塩化物イオンの増加が海水侵入に起因する場合には硬度が高くなるので、ごく少量の増加でも水質試験によってその原因を容易に知ることができることから、高く評価されている。

比留川・池田の研究から、キー(3線)ダイアグラムによって分類される水質型に、新しく説明を加えることが必要となった。その説明は、次のとおりである(村下, 1975)。

$\text{Ca} \cdot \text{Mg-HCO}_3$ 型 (I型) は淡水のもっとも一般的な水質の型、 $\text{Na} \cdot \text{K-HCO}_3$ 型 (II型) は I型地下水が化学的進化(杉崎・柴田, 1961)によって軟水化した水の水質型であるという説明は、従来と同じである。しかし、 $\text{Ca} \cdot \text{Mg-Cl} \cdot \text{SO}_4$ 型 (III型) は鉱山の酸性廃水・火山性水で永久硬度を示す水の水質型、 $\text{Na} \cdot \text{K-Cl} \cdot \text{SO}_4$ 型 (IV型) は海水もしくはそれと同じ性質の水(例えば火山性水)という従来の説明に新しく、海水侵入によって変質した塩水を加える必要が生じた。その理由は、海岸地下水の塩水化に関する地球化学的研究から、帯水層への海水侵入の初期段階では I型の地下水が III型に変質し、さらに塩化物イオンが増加すると III型の水質が IV型

に変質することが明らかとなったからである。

4. 塩水侵入の機構

海岸地帯における自由面地下水は、海水の比重が淡水の約1.025倍であることから、海面上の淡水柱の約40倍の水柱で海水と平衡状態を保つことが、Ghyben-Herzbergの関係から明らかである。

この関係が乱れて淡水層に塩水侵入が発生する機構には、次の二つが考えられる。

一つは、動水勾配の減少または逆転によって、淡水帯水層に淡水より比重が大きい塩水が侵入する機構である。他の一つは、かつて塩水の移動を防ぎ、あるいは淡水体と塩水体とを隔離していた不透水層が破壊された結果、塩水が淡水層に侵入する機構である。

4.1 動水勾配の減少・逆転

地下水域の自然状態のもとでは、地下水の補給・流動そして貯水能の変化は、その水域の物理的特性に関係した平衡を保っており、地下水の汲上げ時においても同様である。海洋と水理学的に連続している帯水層の場合、自然状態のもとでは淡水の水圧が十分であるから、動水勾配は内陸から海洋へ向かって傾いているので、海水の内陸への流動は起こらない。

地下水域の淡水が開発・利用され、水位が汲上げ状態に順応して低下して海面下になると、動水勾配が逆転して海洋から内陸(揚水域)へ向かって傾き、それに応じて海水が内陸へ侵入する(第4図-(a)参照)。このような経過で発生するのが、動水勾配の低下・逆転に起因する塩水化である(Task Committee on Saltwater Intrusion, 1969)。

この事例には、次章で説明する八戸・富士・徳島などがある。

4.2 不透水層の破壊

淡水と海水とを隔離する不透水層が破壊される事例の一つに、海岸における水路または港湾の建設時におけるものがある(第4図-(b)参照)。自然の水路が深くかつ幅広い場合には、海水と淡水層との間には不透水性の隔離層(例えば粘土層)が形成されているが、新しく水路や港を建設するとき、その隔離層を浚渫して、淡水層を海底に露出させることがある(村下, 1964)。また、掘込水路の建設は、結果的には地表面を掘さくして海水を内陸へ導入することになるので、水路沿いの淡水層が塩水化する。この事例については、第6章に紹介してある。

別の事例に、淡水層とその上位の塩水層との間に介入する不透水層を井戸掘さく時に破壊して、塩水化が発生することがある。この場合、塩水は井戸ケーシングに沿

って垂直に移動し、ケーシングの腐食箇所・不完全な継目から井戸内へ流入する(村下, 1964)。

このような経過で発生するのが、不透水層の破壊に起因する塩水化である。

4.3 淡水と塩水との置換

特殊な塩水侵入に、自然の平衡が人為的に乱されて、淡水が塩水と置換する例がある。

一つの帯水層の中で淡水と塩水とが相接しているとき、比重が高い塩水は淡水の下一帯水層の底にくさび状に侵入し、淡水と塩水の接触境界面の前面は動水勾配の大きさに従って移動する。この事例は河口でみられ、例えば①河川改修等により以前の河川流路が廃川敷となって淡水流量が減少し、②治水のために砂利採取によって河床を著しく低下させて河川水位が下がり、その結果河口堤内地の淡水層が塩水層に変わる現象が起こる(第4図-(c)参照)。そして、淡水中における塩分の拡散は、淡水・塩水の接触境界面に沿って発生する(村下, 1964)。

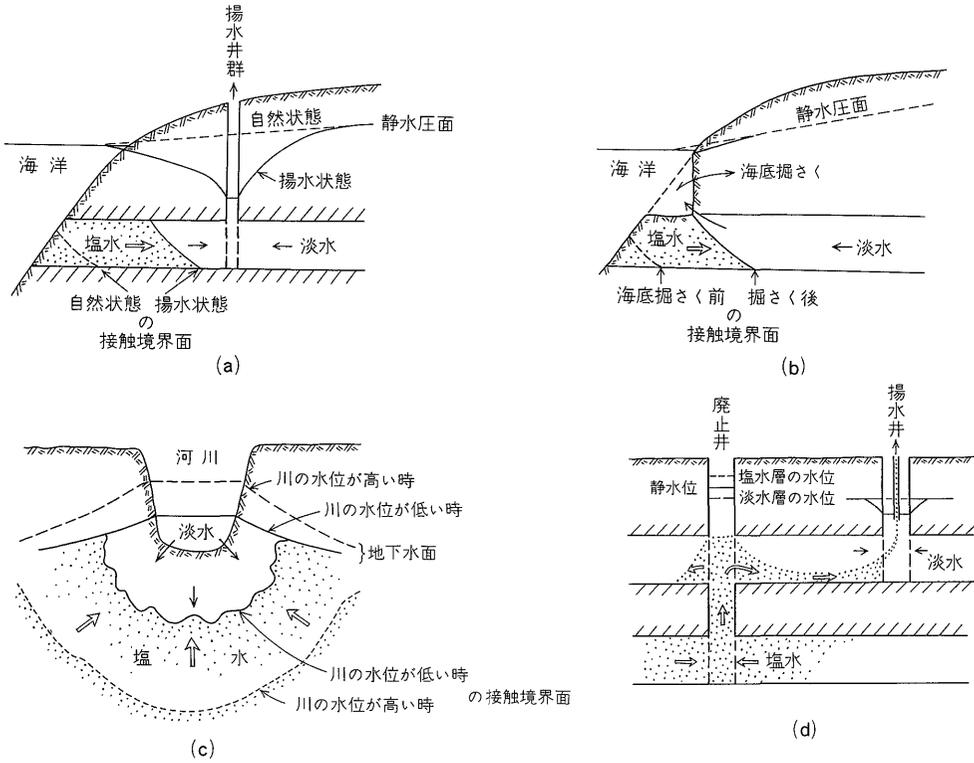
帯水層(砂・礫)の透水性は自然界では多様であるから、塩水の動きは一様でない。したがって、上記の接触境界面が潮汐あるいは河川流量の影響のもとで変化すると、淡水・塩水の移動の状態は複雑なものになる。

この一例に、玉島市の旧玉島水道組合水源井群(深度14-18 m, 口径50 mm, 自噴井11本)があり、1951年の調査時に $Cl^{-2} 400 \text{ mg/l}$ であった(蔵田ら, 1953a)。井戸群は、高梁川河口から約3.5 km 内陸の右岸にあって、第5図は2号井と11号井の塩化物イオンの観測記録で、塩化物イオン観測としてはもっとも古い記録の一つであろう。塩水化によって水道水としての供給ができなくなったためにこの水源を放棄した直接の原因は、第1室戸台風(1934)時の洪水によって河床が洗掘されて生じた河川水位の低下が地下水位に影響を及ぼした結果だといわれている。しかし、それまでの間に、塩化物イオンが漸増した理由は、河床の低下(吉岡, 1977)に起因する河川水位の低下によって、高梁川の感潮部が逐年遡上したところにある(蔵田ら, 1953a)。

4.4 廃井処置の欠陥

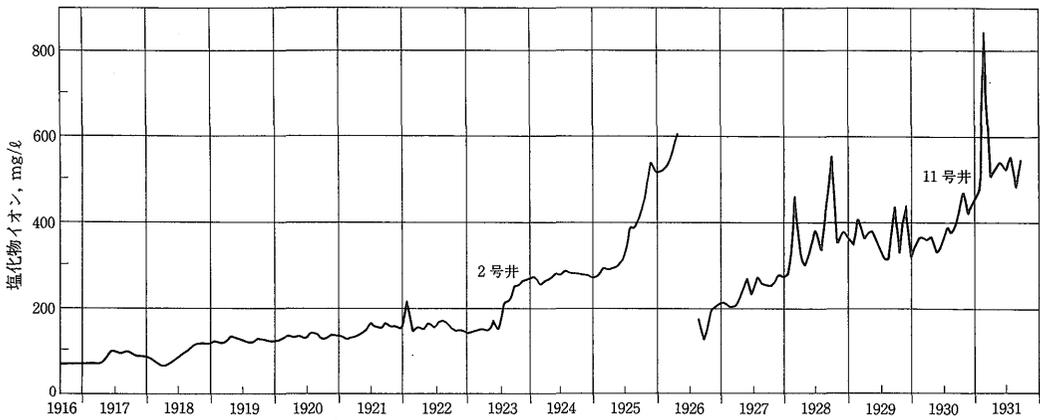
きわめて稀な事例に、井戸建設時に塩水層を採水層として出来た塩水井戸、あるいは塩水侵入によって塩水化した井戸を廃止したために、隣接の揚水井が廃井からの塩水によって汚染されること(第4図-(d)参照)、石油・天然ガス井の廃坑処理が不十分であったために、塩水がケーシングを通して漏水し、淡水層が汚染されることがある(村下, 1964)。

塩水侵入の機構は、おおよそ上記のとおりで、塩水侵入は新しい平衡状態が発生するまで継続するが、地下水



第4図 塩水侵入機構の模式図

- (a) 揚水に伴う動水勾配の逆転による塩水侵入
- (b) 築港工事により不透水層が破壊されて起こる塩水侵入
- (c) 河川水位の低下に伴う堤内地での淡水と塩水の置換
- (d) 塩水井戸の廃止に伴う隣接揚水井の塩水化



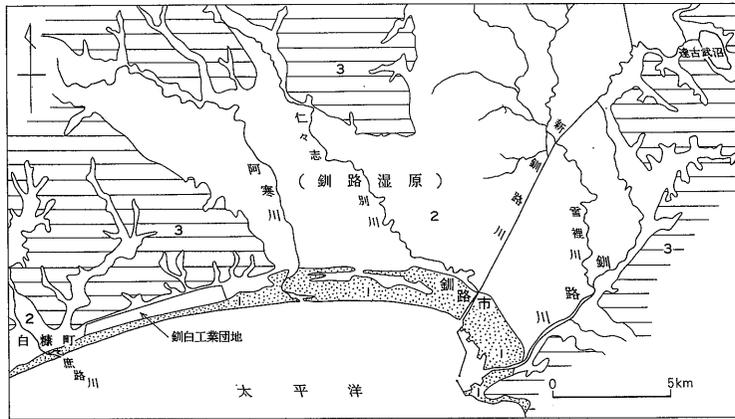
第5図 岡山県旧玉島水道組合水源(自噴)井の塩化物イオンの経年変化(水道組合の資料に基づいて作図)

の汲上げ量を減少させて動水勾配を自然の状態に戻す措置をとると、塩水侵入の状態は淡水化の方向へ転換する。したがって、地下水への依存がきわめて高い地区では、塩水侵入後新しい自然の平衡状態が発生する前に、地下水汲上げに人為的の制約を加えると淡水化する可能性

がある。

5. 塩水侵入の代表例

地下水の開発に伴う塩水化は、海岸地帯のみでなく内陸でも発生しているが、大規模な塩水化は海岸地帯の動



第6図 釧路地区の地形 (札幌通商産業局, 1977による。一部修正)

1: 砂丘地, 2: 低地, 3: 段丘・丘陵地

水勾配が逆転して発生する塩水侵入に起因しており、将来も起こる可能性が大きい。

この章においては、釧路・八戸・富士・磐田・浜松及び徳島の6地区を代表的な海水侵入例としてとりあげ、その経過と原因について考察する。

5.1 釧路地区

本地区は、釧路川から庶路川までの間の釧路市及び白糠町の海岸地帯である。

5.1.1 地形と地質

本地区の地形は、海岸砂丘とその背後に連なる釧路湿原及び段丘・丘陵地に分けられる(第6図)。

海岸砂丘は海拔5m未満で、海岸に沿って幅1.5km以内で分布し、釧路市街地及び釧白工業団地の一部はここに立地する。

釧路湿原は阿寒川以東にあって、沖積世に海湾が陸化したものといわれ、湿原面は海拔10m以下で、北西から東の方向にごく緩やかに傾斜している。湿原の東縁には、達古武沼などが点在している。

釧白工業団地の背後にある段丘は、海岸の斜面が比高約40mの急崖を成している。

本地区の第三系の上位層は下部更新統の釧路層群で、粘土・砂・礫の各層より成るが、粘土層よりも砂層・砂礫層が卓越している。同層群を覆う沖積層の最上部は、海岸地帯では砂層、湿原では厚さ1-5mの泥炭層である。

5.1.2 地下水質と帯水層

当地区の地下水質は、札幌通商産業局が設置した地下水位観測井の資料(1977)によると、概略次のとおりである。

1号井 (砂丘地, 深度143 m, 静水位13.23 m)

- 0-5 m 黄褐色細砂。
- 5-11m 中-粗砂を主とし礫混じる。下部に貝殻混じる。
- 11-29m 青灰色砂質粘土。
- 29-39m 青灰色粘土と砂礫の互層、砂礫層卓越。
- 39-54m 細-中砂。
- 54-101m 暗青灰色砂質粘土、小礫混じる。
- 101- 粗砂、礫混じる。

(ストレーナー115.5-132.0m, Cl⁻13.8 mg/l)

2号井 (砂丘地, 深度80m, 静水位10.32 m)

- 0-10m 褐色中-細砂。
- 10-20m 砂礫、貝殻混じる。
- 20-40m 淘汰のよい粗砂、貝殻混じる。
- 40-45m 暗灰色粘土。
- 45-57m 砂礫、貝殻混じる。
- 57- 粗砂、75m以深に粘土・貝殻混じる。

(ストレーナー45-61.5 m, Cl⁻396 mg/l)

3号井 (埋立地, 深度59m, 静水位5.13m)

- 0-4 m 上部は埋立土(細-中砂)。
- 4-27m 粗砂、礫多く貝殻混じる。
- 27-47m 29mまで中砂。以深は細-中砂、粘土少し混じる。43mより中-粗砂、暗灰色粘土混じる。
- 47-54.5 m 粗砂。
- 54.5-57m 暗灰色粘土。
- 57- 細砂、粘土少量混じる。

(ストレーナー43.5-54.5 m, Cl⁻15 830 mg/l)

釧路川と庶路川との間の海岸地帯の沖積層下には、釧路層群が広く分布し、その上面には古釧路川と古阿寒川とによって刻まれた埋積谷があって、二つの谷は新釧路

川の河口付近で合流し(岡崎, 1958; 山口ら, 1961; 鳥居ら, 1964), 現陸上での最深部は古阿寒川で平均海面下80-90mと推定されている。2号井と3号井は古釧路川の谷にあって, 2号井は谷の縁に, 3号井は谷のほぼ直上に位置する。

沖積層は, 白糠丘陵に近い1号井では11mの層厚で砂-礫層であるが, 二つの埋積谷が合流する付近では, 下部と上部に分かれる。下部層は埋積谷の基底礫層で, 層厚は最大で15m, 透水係数(k)は釧路港近くで 7×10^{-2} cm/s, 新釧路川河口から市街地で 1×10^{-2} cm/s程度である。上部層は貝殻を混じえる砂礫層で, 層厚は釧路川と新釧路川の両河口の間でもっとも厚くて50m程度, k はおおよそ 2×10^{-2} cm/sで東寄り小さく, 西寄り大きい。また上部層は, 西方及び内陸側で薄くなり, 海岸線から4km付近で尖滅する。

帯水層は, 沖積層の上部砂礫層と基底礫層及び釧路層群の砂-礫層である。釧路港及び釧路西港の背後地に立地する工場の多くは沖積層を採水層とし, 上部と基底の二つの砂礫層から採水する2層採水井が多い。

釧路市と白糠町にまたがる釧路・白糠工業団地(通称釧白工業団地)における地下地質は, ここに計画的に掘さくされた水井戸の資料によると, 概略次のとおりである。

厚さ10m程度の沖積層に覆われた釧路層群は, 釧白工業団地のほぼ中央部で盆状を成している。もっとも深い400mの試掘及び電気検層の資料に基づいて判断すると, 同層群は上・中・下の3層に大別できる。上部層は層厚60-90mの砂礫層($k \div 6 \times 10^{-2}$ cm/s), 中部層は上層部と下層部に厚さ20-30m(西に向かって急に薄くなる)の粘土層とその間にある厚さ約100mの砂層($k \div 2 \times 10^{-2}$ cm/s)とから成り, 下部層はもっとも深いところで290m以深にあって主として砂層($k \div 1.2 \times 10^{-2}$ cm/s)である。下部層の層厚は100mまたはそれを超える。

静水位は, 上部層・中部層ともに海拔2m程度, 下部層は海拔6-18mで, かつ自噴量は200-1500 m³/dもある。

帯水層は釧路層群の砂礫層で, 工業団地の工場の多くは, 上部層または中部層から採水している。

5.1.3 塩水化の概況

札幌通商産業局が1975年に行った地下水調査(同局, 1977)によると, 当地区の塩水化域は1975年には釧路川と新釧路川との間及び釧白工業団地であった。1979年秋に釧路地域地下水利用対策協議会が行った塩化物イオンの調査によると, 塩水井戸が上記のほか釧路西港の北西方と白糠町の庶路川河口地帯で新しく発見された。

塩水化域がもっとも大きいのは釧路川と新釧路川との

間で, 海岸線沿いに幅約4km, 内陸へ約6kmの範囲である。塩水井戸の深度はおおよそ100m以浅である。特に塩化物イオンが多いのは沖積層の上部層から採水する井戸であって, 海岸近くで10000 mg/lを超え, 最高値は17200 mg/l(札幌通商産業局, 1975年測定), 水質の型はNa-Cl型である。海岸から離れると塩化物イオンが減少し, 市街地にある同深度の井戸水は100-400 mg/l, 水質型はCa-Cl型である。しかし, その背後地の釧路湿原では, 同深度の自噴井で500 mg/l, 揚水井で最高5600 mg/l, 水質型はともにNa-Cl型である。

当地区における塩化物イオンの記録が断片的であるので, これから正確な塩水化の過程を知ることは困難であるが, 少なくとも次のことは明らかである。

1) 釧路川河口から約2.6km内陸の湿原内にある深度94mの井戸の塩化物イオンは, 1960年に699 mg/l(山口ら, 1961), 1968年に645 mg/l(小原ら, 1973), また, 市街地では1960年に105-310 mg/lであった。したがって, 湿原及び市街地における塩化物イオンは, ほとんど変化していないといえる。

2) 釧路川河口に近い100m以浅の井戸水は, 1960年10月に1910-6610 mg/l(山口ら, 1961)であったから, 札幌通商産業局の調査時(1975年)と比較すると, 海岸近くでは15年間に塩水化が著しく進んだことになる。

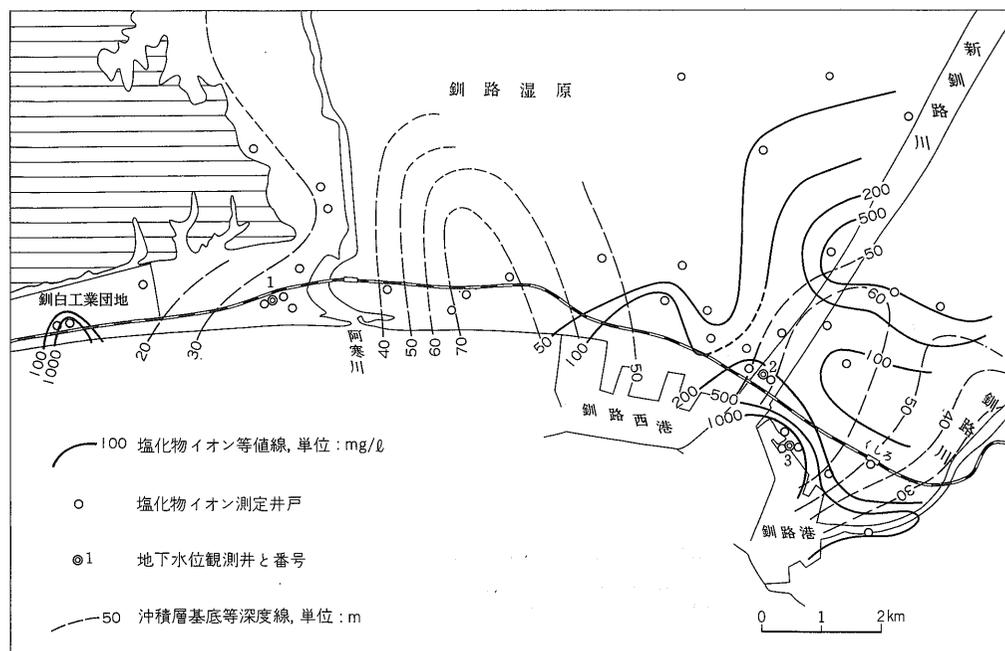
3) 釧路西港の北西方で1979年に新しく発見された塩水井戸は旧阿寒川の埋積谷上に位置し, 1975年に34.1 mg/lであったが4年後には10倍に増加している。この井戸の近くには, 5320 mg/lの井戸があることも同時に発見された。

4) 釧白工業団地の東部にある海岸にもっとも近い井戸水は, 揚水開始直後から塩水で, 揚水時間に比例して塩化物イオンが増加した。例えば, 釧路層群上部層を採水する井戸は, 揚水開始時に33 mg/l, 1年後に880 mg/l, 同層群中部層を採水する井戸は揚水開始直後に460 mg/l, 1年後に858 mg/l, 1年6カ月後に6330 mg/lとなった。なお, 2井とも水質の型はNa-Cl型である。しかし, その背後にある海岸より遠い位置の井戸水は6.4-9.2 mg/lで, 水質の型は阿寒川・庶路川の表流水と同じCa-HCO₃型を示している。

5) 白糠町の庶路川河口の井戸水は560-1740 mg/lで, 1979年に測定された1回だけの値であるが, 近くにある二つの井戸(深度60-80m)は1969年に11.6と291 mg/lであった(小原ら, 1973)ことから推測すると, この地区で塩水化が進行していることに疑いはない。

5.1.4 考察

本地区における地下水塩水化の原因を素因と誘因とに



第7図 釧路地区における塩水侵入 (札幌通商産業局, 1977による)

分けて考察する。

本地区の塩水体は釧路湿原の南東部と海岸地帯とにあり、塩水層は沖積砂礫層である。

湿原西域(主として阿寒川流域)の沖積層の塩化物イオンは、下位の釧路層群と同じく10 mg/l以下である(小原ら, 1973)が、湿原南東部では同層は天然ガスを含む Cl^- 1600-12000 mg/l の塩水を含有する(三谷ら, 1968)。この塩水の静水圧は海面より高く、 Cl^- 400 mg/l, 7100 mg/l の自噴井があり、硫酸イオンが少ないことから山口ら(1961)は、この塩水は直接の海水侵入に起因するものではなく、釧路層群堆積後の海進期の海水を起源とする、それが現存する理由としては沖積世の海退に加えて局地的な地殻の傾動運動等によって湿原北西部では陸水の水頭圧が相対的に高まって地層水の淡水化が進んだが、南東部では遅れているために塩水が残留している、と説明している。

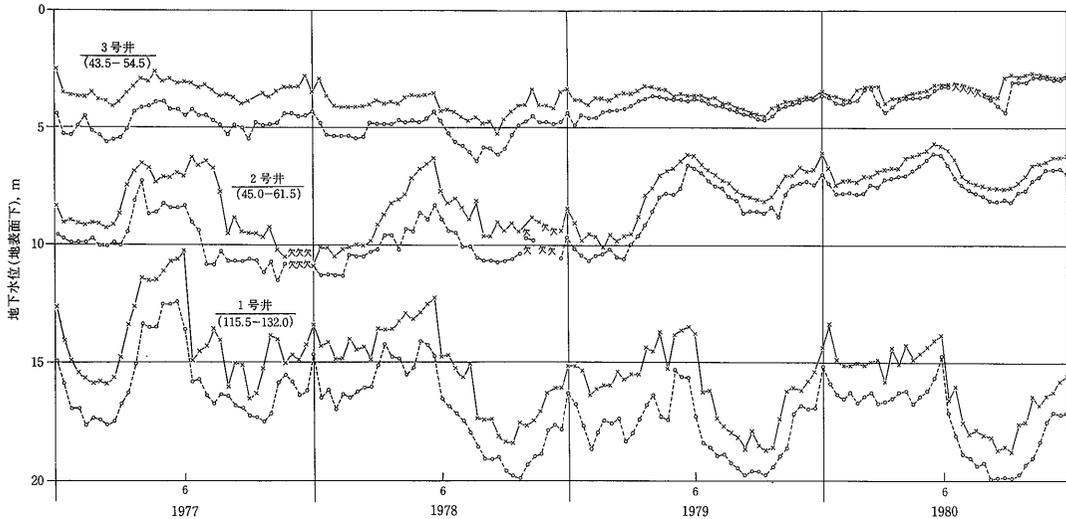
また、湿原南東部に、釧路川及び新釧路川の近くに硫酸イオンがきわめて多い(釧路川と雪裡川の合流点に近い井戸水の SO_4^{2-} 117 mg/l)、上記の残留塩水とは異質の塩水を産する井戸がある。これについて小原ら(1973)は、釧路川では河口から11 km 上流まで Cl^- 3000 mg/l の遡上塩水があるので、両河川の近くで揚水するとこの塩水が浸透して塩水化した、と考察している。

水産食料品製造業が立地する新釧路川河口や釧路港内の埋立地における塩水井戸の静水位は、1960年にはすでに-2 m(山口ら, 1961)、1975年には-3 mに低下している(札幌通商産業局, 1977)。静水位が0 mを示すのは海岸線から1.2 km 付近の市街地で、ここにある60 m以浅の地下水は Cl^- 200 mg/l未滿である(札幌通商産業局, 1977)。したがって、海岸地帯における塩水の起源は、地下水位が平均海面下に低下して侵入した海水である。

釧路西港北西方の新しい塩水化は、最近この付近に工場が進出し、1975年の地下水位が海面以下であったから(札幌通商産業局, 1977)、釧路港周辺の例と同様に地下水位低下に起因する海水侵入の結果であろう。

釧白工業団地の東部海岸近くで塩水化した井戸のうち、釧路層群上部層採水井戸(ストレーナー53-86 m)の揚水位は平均海面下5 m、中部層採水井戸(同, 129-200 m)は同じく10 m であって、揚水試験時の記録によると揚水量の増減に対応して塩化物イオンが変動している。この試験結果から、ここにおける塩水化の原因は、揚水時の水位が海面下に保たれている結果、動水勾配が海高陸低の状態となって海水の侵入を促したことにあり、と考えられる。

庶路川河口地帯の塩水化も、資料が乏しいが釧白工業団地東部海岸付近と同様の原因による海水侵入に起因するのであろう。



第8図 釧路地区における地下水位の経年変化

注 1) 上段は旬間の最高値, 下段は最低値をとって示している (単位 m)
 2) 観測井名の下のカッコ内はストレーナーの深度を示している (単位 m)

海水侵入の誘因である海岸被圧地下水の水位が海高陸低の状態となった理由は、海岸地帯における地下水の汲上げが安全揚水量³⁾を超えた過剰汲上げの状態に陥ったからである。札幌通商産業局(1977)によると、本地区の海岸地帯における安全揚水量と汲上げ量(1974年実績)との水収支は、

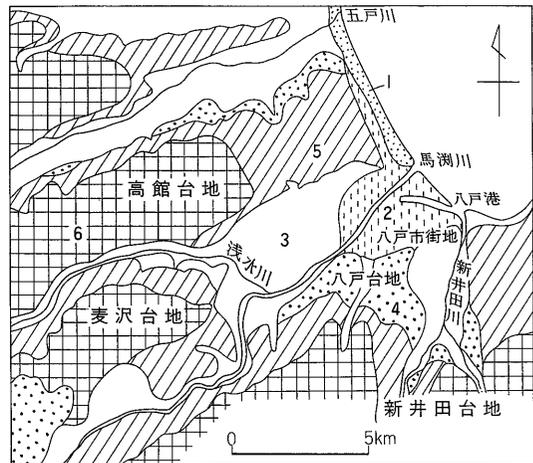
- 釧路川-新釧路川, 約6 600 m³/d の汲上げ過剰
- 新釧路川-阿寒川, 約6 900 "
- 阿寒川-庶路川, 約1 700 "

であって、阿寒川以東での汲上げ過剰が目立つ。

本地区に立地する工場のほとんどが水産食品品製造業であって、工業用地下水の汲上げ量の84.2%を占め、またその汲上げ方は魚の水揚げと関係が深い。すなわち、釧路港には夏期(7月-9月)に「さば」・「いわし」、10月に「さんま」、冬期(11月-3月)に「すけそうだら」が一斉に水揚げされ、加工されるから、水産加工場の揚水はこの時期に集中して行われる。

この操業状態を反映して、被圧地下水の水位は、例えば第8図が示すとおり、水産加工場が多い地区に近い観測1号井と2号井が、春期の非操業時(4月-6月)と秋期に上昇し、夏期の操業時に著しく低下している。この

3) 安全揚水量 (Safe yield) は MEINZER (1920) によって提唱された地下水用語で、「水供給の水源として支障なく連続して汲上げられる地下水域の水量」と定義された。また、TODD (1959) は「好ましくない結果」を引き起こさないで年々地下水域から汲上げられる地下水量と定義した。「好ましくない結果」とは、地下水位の経年低下、水質の悪化(塩水侵入)等を指している。



第9図 八戸地区の地形(経済企画庁総合開発局, 1970 土地分類図, 青森県による)

1: 砂丘地・砂礫台地, 2: 三角州性低地, 3: 扇状地性低地, 4: ローム台地(下位), 5: ローム台地(中位), 6: ローム台地(高位)

ような水位変動に対応して、釧路工業団地の中部層採水井戸の塩化物イオンは夏期に3 000 mg/l, 秋期に1 150 mg/lと変動している。

「すけそうだら」の加工時の地下水位は、北洋海域における漁獲高が多かった1976年以前は海面下20mを超えていた。しかし、北洋海域の各国が200カイリ漁業専管区域を1977年に相次いで設定して以来、漁獲高が著しく減少した。この経済情勢の変化は地下水位に現れ、観測

本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)

第1表 八戸地区における地層の区分と地下水の特徴 (青森県, 1980による, 一部修正)

地質時代	層区分	層相, 他	地下水の特徴と利用状況
第 四 紀	完 新 世	A 砂・粘土・火山灰(浮石)で構成。 主に河川流域の低地部に分布し、河川に向か って層厚を増す。 最大層厚20-30m	自由面地下水。大正年間から浅井戸で取水さ れていた記録はあるが、一般に水質が悪い。 鮫港一帯以外はあまり利用されていない。
	更 新 世	B 砂・シルト・砂礫・粘土で構成。 臨海地区では、深度40-50m付近に、高比抵 抗帯(砂礫層)があり、これがB層の最下部。 最大層厚約50m	かつて利用が盛んだった帯水層。上部砂層か ら下部砂礫層へと開発が進んだ。もとの水質 はNa-HCO ₃ 型であったが現在は塩水化が進 んでいる。
		C 砂。 高位段丘のみに分布	自由面地下水。高位段丘の限られた地区で、 浅井戸としてわずかに利用されている
		D 主に砂、他に粘土及び礫混じる。五戸川流域 では粘土卓越、D層下部には含砂鉄砂層あ り。 最大層厚約100m	被圧地下水。馬淵川右岸地区で最も開発され た層。もとの水質は良好だったが、塩水化の 進んだ地区もある
第 三 紀	鮮 新 世	E 砂を主とするが、シルト・粘土と互層を成 す。 最下部に高比抵抗帯(砂礫層)あり。 最大層厚約300m	被圧地下水。馬淵川左岸臨海部で開発が盛 ん。掘さく直後は自噴する井戸が多い。最下 部の砂礫層は温泉性の水を含むことがある。
	中 新 世	F 安山岩・凝灰岩・凝灰角礫岩等の火山岩類を 主とする。 砂岩・泥岩も介在	裂か水。馬淵川中流部でよく現れる。水質は よくなく浴場用などに用いられる。最大揚水 量でも500m ³ /d程度
古 生 代	G	石灰岩・粘板岩・輝緑凝灰岩・砂岩等	裂か水。八戸南部の丘陵に露出する。Ca- HCO ₃ 型の水質で、それほど悪くない。

1号井は1980年2月に前年同月より平均で1.03m回復し、同2号井は同じく2.42m、同3号井は0.74mの回復を示している。

5.2 八戸地区

本地区は、馬淵川と新井田川の下流低地で、塩水化域は八戸港の背後地である。

5.2.1 地形と地質

本地区を含む八戸平野は、北を高館台地、西を麦沢台地、南を八戸台地、南と東を新井田台地で囲まれ、低地は扇状地性低地と三角州低地(氾濫原・堤間湿地・三角州)から成る。

馬淵川は西の台地を脱すると、浅水川と合流して八戸湾に注ぐが、最下流部は1939年の河川改修工事によってそれまで合流していた新井田川河口と分離され、開削された放水路である。河口から2.6km上流地点に馬淵川潮止堰が建設され、1980年に完成した。

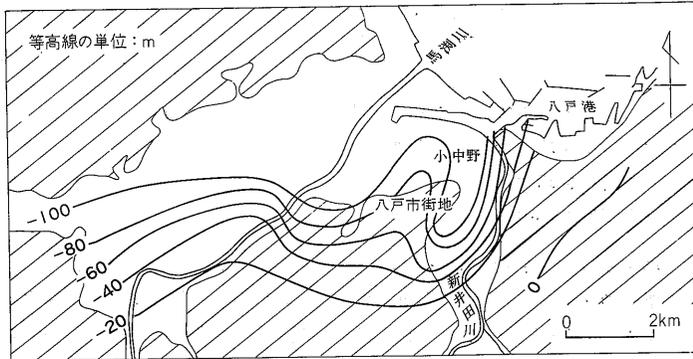
本地区の台地を構成する地層は鮮新統-更新統で、基盤岩は古生層と中新統下部層である。低地は沖積層で、後背湿地には泥炭層がある。

5.2.2 地下地質と帯水層

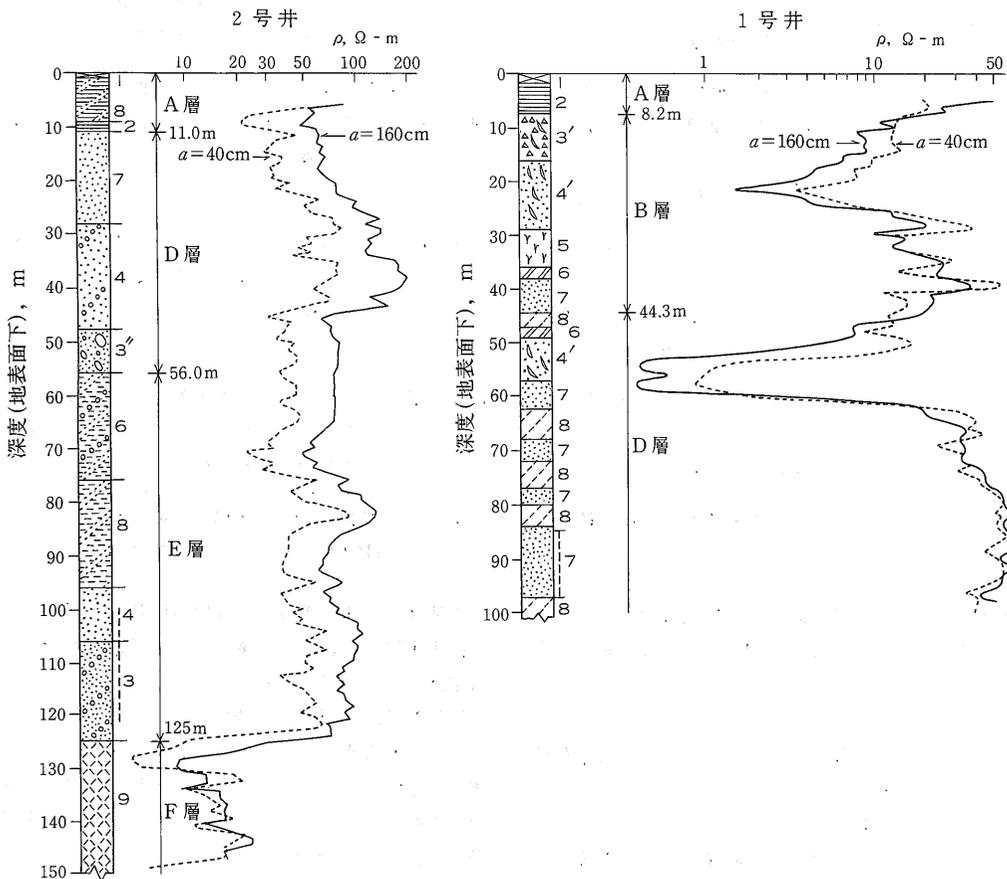
仙台通商産業局が1976年に設置した3本の地下水位観測井及び既存井戸の資料に基づいて行った層区分と地下水の特徴は、第1表のとおりである(仙台通商産業局, 1978; 青森県, 1980)。

古生層(G)は、本地区の近くでは新井田川の東方丘陵地に露出しているが、八戸市街地(海拔約20m)では約100mの深部に石灰岩が存在し、ここから約1.5km北方の低地では深度145.5mで同岩を確認している。

中新統(F)は、馬淵川と新井田川とに挟まれた丘陵地を構成する地層で、丘陵地から八戸港へ向かって深く潜り、小中野付近まで追跡できる。また、本層は、新井田川下流及び八戸市街地では古生層に直接のっている。



第10図 八戸地区における不透水性基盤岩(古生層・中新統)上面等高線(青森県, 1980による)



第11図 八戸地下水観測1・2号井の地質柱状図と電気検層図(仙台通商産業局, 1978による)

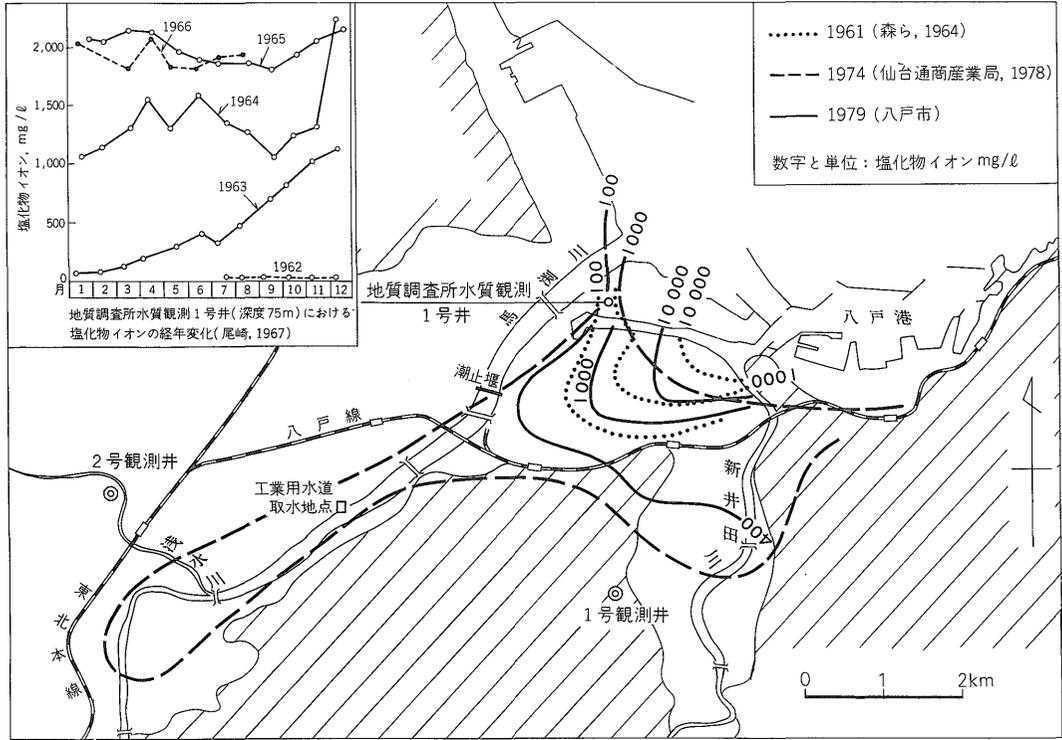
1: 表土, 2: 粘土, 3: 砂礫 (3': 浮石質, 貝殻混じり, 3'': 玉石混じり), 4: 粗砂 (4': 貝殻混じり), 5: 腐植土, 6: シルト, 7: 中砂, 8: 砂質粘土, 9: 凝灰岩, !: ストレーナー

なお、古生層・中新統の上面(第10図)は、八戸市街地から北方へ細長く尾根状に張出し、その東側の新井田川沿いの低地に深い谷を形成している。

鮮新統(E)から沖積層(A)までの未固結層の区分は、

地下水観測井の資・試料によると次のとおりである。

1号井は、新井田川河口から約3.6 km 上流の左岸にあり、掘さく深度 100 m までの地層は、A層 0-8.2 m, B層 8.2-44.3 m, D層 44.3 m 以深である(第11図)。



第12図 八戸地区における塩水侵入

B層上部の暗青灰色貝殻混じり粗砂 (16.3-29.0 m) と D層上部の暗褐色小礫混じり中-粗砂 (49.2-62.3 m) は、本地区の主要帯水層であるが、比抵抗は10 Ω-m未満で、特にD層上部砂層で著しく低い。ストレーナーはD層下部と考えられる85.3-97.1 mの茶褐色小礫混じり中砂層 ($k=1.1 \times 10^{-3}$ cm/s) にあり、Cl⁻ 486.2 mg/l、水質型はNa-Cl型を示す。同層の比抵抗は60 Ω-mであるから、この値から推定すると、D層上部砂層の塩化物イオンは相当に多い。

2号井は国鉄八戸駅の西方にあり、B層が欠除して、A層0-11m、D層11-56m、E層56-125m、F層125m以深と区分される。各層の比抵抗は50-200 Ω-mで、E層基底礫層 (106-125 m, $k=7.8 \times 10^{-3}$ cm/s) の水は、Cl⁻ 13.9 mg/l、水質の型はNa-HCO₃型である。

5.2.3 塩水化の概況

本地区の塩水化については、森・池田 (1964) によって最初に報告された。すなわち、1961-1962年の調査時には、八戸港から約2 km以内の区域に深井戸が集中し、揚水に起因して掘込水路を中心に面積2.5 km²の塩水域があった。そして、60 m以浅にCl⁻ 12,500 mg/lの塩水層があること、調査の初めに淡水だった井戸に1年後塩水化の徴候があらわれたこと、過剰汲上げの状態が継続

すると将来塩水体の前線が内陸へ向かって移動する恐れがあることが、指摘された。

この調査結果に基づいて、地質調査所は1962年7月から工場の協力を得て2井の塩化物イオンの観測を開始し、つづいて3井を追加した。主要採水層はB層で、 $k=0.01-0.03$ cm/sである。これらの観測記録の一部は、尾崎 (1967b) によって報告されている。その報告によると、海岸線から約800 m、切込埠頭から約200 mの位置にある観測井の一つ (採水層41-72 m、現在は廃井) は、さく井当初 (1956年) Cl⁻ 20 mg/l以下であったが、1963年から急増して、1966年には2,100 mg/lに達した。他の3観測井 (採水深度40-100 m) の塩化物イオンも1962-1963年から急増して1966年に10,000 mg/lを記録したものがある。

1976年の仙台通商産業局の調査によると、1961年頃に海岸線から約1.4 km内陸にあったCl⁻ 100 mg/l等値線は馬淵川沿いに河口から8.5 kmの上流まで、新井田川沿いで2.4 kmから3.4 km内陸へ移動した。その後、八戸市が引継いで行っている観測でも、塩水化域は依然として内陸へ向かって拡大している (仙台通商産業局, 1978)。

馬淵川右岸の沼館地区にある深度160 mの工業用井戸に、70 m以浅の塩水層とは別に水温が高い (31.8°C) 塩水

層(E層, 1976年 Cl^- 772 mg/l, $k=6.5 \times 10^{-8}$ cm/s)がある。この一帯には高温塩水層の存在が以前から知られていて、一部で温泉として利用されている。某温泉は Cl^- 509 mg/l (仙台通商産業局, 1976年測定)で、八戸市の調査では掘さく後10年を経過しても、測定ごとに多少の増減はあるものの全体として値に大きな変化は認められていない(青森県, 1980)。

5.2.4 考察

本地区における塩水化は、八戸港の掘込水路の周辺から始まって内陸へ拡大したものと、地下深部における局所的な塩水化の二つに大別できる。

掘込水路の周辺における塩水化の経済的背景は、次のように考えられる。

八戸市は近くに石灰岩・砂鉄・硫化鉄鉱石が賦存することから、1921年にセメント工場、1937年に化学工場と原料型工業が立地した。一方、八戸の漁業は1932年の鮫漁港改修以来、遠洋漁業の発達、三陸沖合の漁場開発と相まって毎年全国1-2位の漁獲高を保持しながら着実に発展した。これに伴い、八戸港の周辺には水産資源を中心とした食料品製造業が立地した。そして、港湾整備・交通施設の充実により工業の集積が続き、1964年に新産業都市の指定を受け、東北地方屈指の臨海工業地帯として発達してきている。

産業の発展に伴って、工業用地下水の汲上げ量は、

1956年, 28本の深井戸で約20 000 m³/d

1961年, 37本 " 約60 000 m³/d

(塩水化域で約46 400 m³/d)

と伸び、1965年以降工業用水の需要はさらに増大したが、その汲上げは安全揚水量21 800 m³/dを大きく上回る過剰汲上げの状態にあった(仙台通商産業局, 1978)。このため、掘込水路周辺の塩水化が激しくなり、揚水を中止または廃止する井戸があらわれ、その代替として1966年に完成した県営工業用水道への水源転換が積極的に進められた。その結果、塩水化域の汲上げ量は1975年には9 600 m³/d (井戸数131本)に減少した。

この塩水化域において、従業員30名以上の事業所が所有する井戸114本のうち、100m以浅(B・D層採水)の井戸は89.5%を占め(仙台通商産業局, 1978)、動水位は最大で平均海面下25.45 mに及び、近傍の稼動していない井戸の静水位でも海面下2-3 mである(青森県, 1980)。

地下水位の観測は1977年4月から開始されている。塩水化域にある1号井の水位は、地表面下2.5-4.0 mの間を7月と2-3月に低下する変動を繰返し、全体として若干上昇の傾向にある。2号井の水位は地表面すれすれにあって、8-9月と12-1月にわずかに高くなり、全体と

して上昇の傾向にある。

地下水位が夏期に上昇するのは、この時期に地下水の補給量が年間通じてもっとも多くなるからで、この水位変動は我が国における典型的な自然変動型である(村下, 1975)。しかし、夏と冬の限られた期間に水位が低下するのは、釧路地区と同様に八戸港に水揚げされる魚の加工と深い関係があると考えられる。

以上の説明から、海岸地帯の塩水化は八戸港の掘込水路の完成に伴って海水が内陸へ侵入し、水路周辺に立地する工場の地下水汲上げによって発生したもので、塩水化の機構は地下水位が海高陸低の状態となって生じた海水侵入の型である。そして、内陸へ向かって塩水域が拡大するのは、海岸寄りの塩水化井戸は休・廃井となって水位が上昇しているが、内陸では依然として汲上げの継続によって水位が低下した状態一動水勾配の逆転の状態が存続しているからである。

馬淵川に沿って8.5 kmもの上流まで Cl^- 100 mg/lの等値線が入った原因は、馬淵川河口から10 kmの地点にある水道取水口まで塩水が遡上していたことから推測して、遡上塩水による汚染とみられる。しかし、馬淵川潮止堰が完成したので、この堰から上流では遡上塩水に起因する新しい地下水汚染は、今後発生しないであろう。

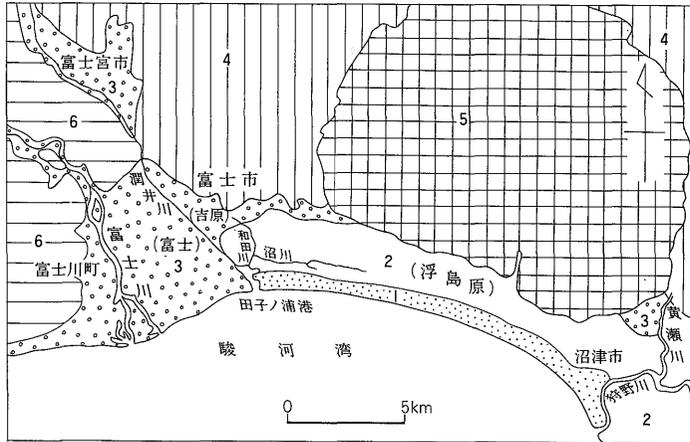
馬淵川下流右岸低地の一部にある、深度160 m前後の高温塩水(E層)はF層の温泉水に由来すると考えられている。その塩水化の機構は、F層の水圧が静止状態で海拔1.40 m (仙台通商産業局, 1976年測定)と上位のE層より高いから、下位の塩水がE層下部層に浸透し、汚染していると考えられる(青森県, 1980)が、これについてはさらに検討する必要がある。なお、2号井付近にも同質の地下水がF層に存在する。

5.3 富士地区

本地区は、富士山体南部の海岸平野をいう。

5.3.1 地形

平野は扇状地・海岸砂丘ないし砂礫州・湿地から成る。扇状地は、富士川と富士山の沢崩れから流れる潤井川によって形成されたもので、1/500程度の勾配で北西から南東方向に傾斜し、吉原市街地から南流する和田川付近で終わる。海岸砂丘ないし砂礫州は、富士川河口から狩野川河口まで及ぶ延長20 km、幅200-800 m、平均海拔10 mの大規模なものである。その南側は、汀線から水深-50 m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って、北を愛鷹山、南を海岸砂丘で囲まれた海拔0.5-2.5 mの湿地帯で、黄瀬川扇状地まで続いている。その間に、愛鷹山体に源を発する小河川が天井川となって、沿岸に微高地形ないし小



第13図 富士地区の地形 (地質調査所 (1981) 1/20万静岡と御前崎に基づいて作図)
1: 砂丘地, 2: 後背低地, 3: 扇状地, 4: 富士火山, 5: 愛鷹火山, 6: 段丘・丘陵地

規模の扇状地を形成している。この湿地は浮島原と呼ばれる。

5.3.2 地下地質と帯水層

本地区において地下水利用と関係が深い地層は、弾性波探査の結果や水井戸資料等に基づいて区分すると、6層ある。各層の特徴は、次のとおりである。

A層 本層は砂礫と粘土を主体とする。

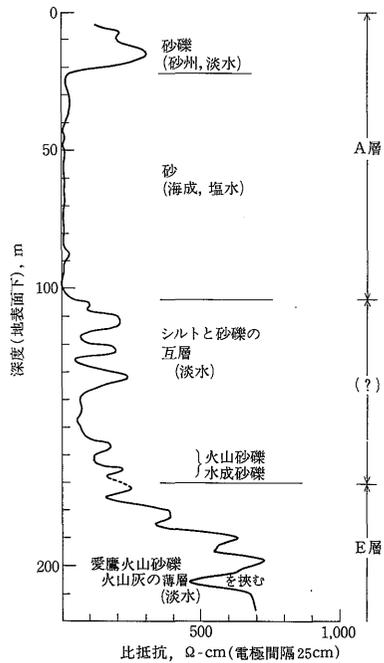
富士川扇状地の本層は、富士川がもたらした古生層礫を主とした玉石混じりの粗い礫で、扇端部に近づくとも下部に薄い粘土層を多く挟む。

潤井川左岸低地では、本層は上流では礫が卓越し、河口に近付くと上部は砂礫、下部は砂と粘土が厚くなる。上部層の礫は富士川の礫で、深度10m前後に厚さ2m程度の腐植物を含む粘土層を挟み、層厚は最大35m位である。下部層は三角州堆積物の様相を示し、礫には火山礫が多くなり、基底に火山砂礫、火山灰の薄層がある。

浮島原の本層は第14図に一例を示すように、砂礫層の下位に厚い海成砂層があり、さらにシルトと砂礫の互層、そして愛鷹火山砂礫層と続く。本層の上部は砂丘近くでは同図のとおり砂礫層、愛鷹山寄りでも同じであるが、浮島原の中央部は泥質土層で、いわゆる軟弱地盤である。

本層には二枚の粘土層があり、上部の粘土層は上部砂礫層の下位に、下部の粘土層は海成砂層の直下にある。浮島原内の花守(第15図参照)で掘さくした井戸の試料(柱状図は第14図とほぼ同じ)から、粘土層に含まれる花粉の分析(パリーノ・サーヴェイ株式会社、以下同じ)結果は、次のとおりである。

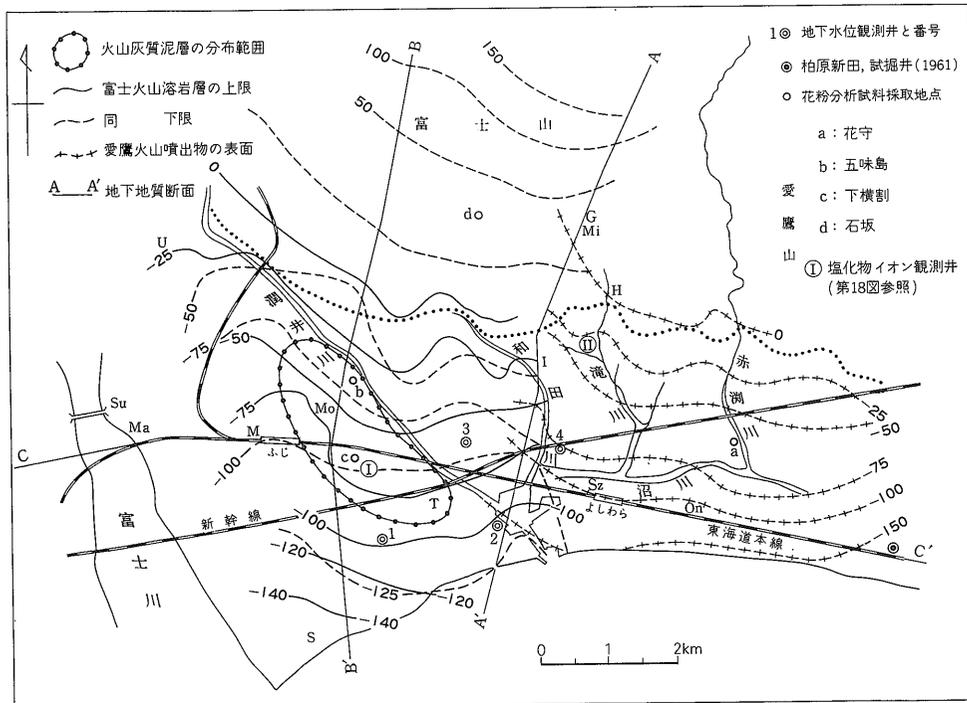
上部粘土層、深度9-18 m.



第14図 浮島原・柏原新田における試掘井 (1961) の地下地質と地下水

針葉樹花粉 (*Taxodiaceae*, *Cryptomeria*, *Pinus*) が全体の33.3%, 広葉樹花粉 (*Juglans*, *Lepidobalanus*, *Salix*, *Carpinus*, *Castanea*, *Castanopsis*, *Fagus*, *Cyclobalanopsis*, *Celtis*) が14.1%, 草本花粉 (*Cyperaceae*, *Gramineae*) が33.3%, 羊歯類孢子 (*Trilete spore*, *Monolete spore*, *Lycopodiaceae*) が10.3% 検出された。

下部粘土層, 77.5-87.0 m.



第15図 富士火山溶岩層と愛鷹火山噴出物の分布

On: 大野新田, U: 柚木, M: 水戸島, S: 三四軒屋, I: 今泉, Mi: 三ツ沢, Su: 水神, G: 神戸, Mo: 本市場, T: 蓼原, H: 原田, Ma: 松岡, Sz: 鈴川

針葉樹花粉 (*Cryptomeria*, *Taxodiaceae*, *Pinus*, *Tsuga sieboldii*, *T.C.T.*—イチイ科・ヒノキ科・スギ科のいずれに属するか不明) が全体の63.7%, 広葉樹花粉 (*Castanopsis*, *Zelkova*) は少なく, 草本花粉 (*Gramineae*, *Cichorioideae*) が11.0%, 羊歯類孢子 (*Monolete spore*) が22.0% 検出された。

この分析結果から, 本層は沖積世の堆積物と考えられている。なお, 海成砂層の下位層(第14図, 深度100-170 mのシルトと砂礫の互層)が本報告の地質区分でいうどの層に相当するのか, 決め手となる資料がまだ得られていない。

また, 浮島原の地下水は, 20-100 mの海成砂層(第14図)が塩水である。浮島原の西, 大野新田でも36-66 mに塩水を帯びる砂層が存在し, 原では80-100 mに塩水層があるが今沢以東及び愛鷹山体寄りではその存在を確認していない。これは, 山体及び小規模の扇状地を通して天水・流水が浸透するので, 山麓の近くでは塩水が残留する状態にないのであろう。

B層 本層は富士火山溶岩層である。

低地における本層の分布範囲は第15図に示すとおり, 西は富士市街地の西はずれ, 柚木—水戸島—三四軒屋を

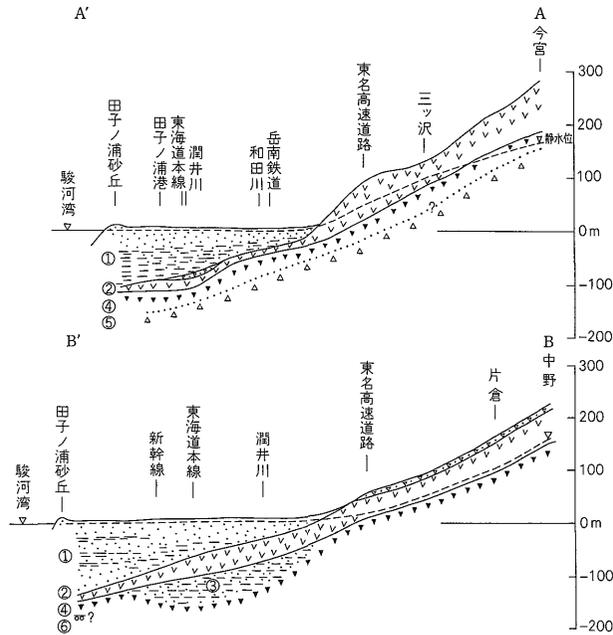
結ぶ線から, 東は今泉小学校を通過して和田川に沿う南北の線までの間である。本層が厚いのは分布域の中央部で, 厚さ20-40 m, 火山灰層または火山砂礫層を挟んで2層位に分かれ, 上部は堅硬, 下部は多孔質で割れ目に富む($k \div 1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$ cm/s)。分布域の東部, 西部及び海岸に向かって厚さが薄くなり, 東部では多孔質, 西部では堅硬な岩質に変わる。

富士山麓の本層は幾層にも分かれ, 層間に火山灰・火山砂礫を挟むことが多い。層厚はまちまちで, 西部の穴原・大久保で15-40 m, 中央部の大淵-石坂で40-60 m, 東部の神戸で25-40 m, 最大は三ツ沢の約150 mである。

なお, 富士川左岸, 国道1号線富士川橋のたもとにある水神と, この下流国鉄東海道本線間の富士川河床に富士火山溶岩が露出し, 右岸の新幹線近くにある水井戸にも同岩(深度68-69 m, 70-74 m)の記載がある。したがって, 富士地区で本溶岩層が分布していないのは, 富士川左岸から数百 mの間と考えられる。

C層 本層は火山灰質泥層を主体とし, 低地に分布する。色調は黒色で, 炭質物を混じえることがある。本層の分布域は第15図に示すとおり, 富士市街地の東部本市場から蓼原にかけての範囲で, 厚さは最大30 mにも及ぶ。

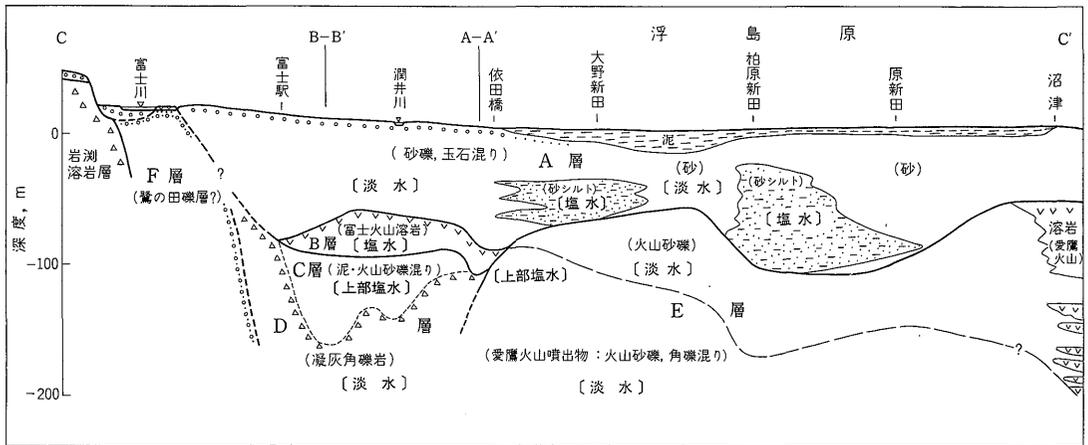
本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)



第16図a 富士地区における地下地質断面

ほぼ南北方向の地下地質断面 (断面位置は第15図に示す)

①A層, ②B層, ③C層, ④D層, ⑤E層, ⑥F層



第16図b 富士地区における地下地質断面

ほぼ東海道本線に沿う地下地質断面と淡・塩水の区分 (浮島原以外の塩水は侵入塩水)

多くの地表地質の文献(津屋, 1948; 沢村, 1950等)によれば, B層の富士火山溶岩層の下位層は古富士泥流(D層)である。泥流は地表に露出しているが, 水井戸の試・資料では十分に判断できないので, 溶岩層下位層を泥流と考えることが多い。しかし, ここでいうC層は, 試料の観察のほかに本層の分布範囲では地下水の pH・M-アルカリ度が他に比べて高いという特徴ある水質を示していることから(池田, 未発表), 特に区分した。

なお, 五味島において採取した本層(深度 99.5-103.0 m)の花粉分析の結果,

針葉樹花粉 (*Pinus, Taxodiaceae*) が全体の18.7%, 広葉樹花粉 (*Cyclobalanopsis, Corylus, Alnus*) が8.2%, 草本花粉 (*Cichorioideae, Gramineae, Carduoideae, Artemisia*) が64.2%, 羊歯類胞子が4.5% 検出され, また下横割の本層(深度 109.5-123.0 m)は化石の含有量が非常に少なく, 検出された花粉胞子化石のうち主なものとしては *Pinus*,

Artemisia, *Gramineae*, *Monolote spore*などがあげられる。花粉分析の結果、本層は更新世の堆積物と考えられている。

D層 本層は、富士火山体では火山砂礫・火山灰等から成り、転石を混じえる($k=10^{-2}-10^{-5}$ cm/s)。低地では主に凝灰角礫岩で、地下水位観測2号井の掘さく試料についての沢村孝之助博士の鑑定によれば、約110 m以深に本層があり、その分布範囲は富士火山溶岩の分布範囲とほぼ同じであるが、低地での本層が古富士泥流であるか、さらに古い富士火山噴出物であるかは、上記の試料鑑定だけでは判断しにくい、という。

なお、石坂水源井(海拔約55 m)の掘さく試料(深度54.5-55.5 m)の花粉分析結果は、次のとおりである(富士火山体ではC層が欠除しているため、本層はB層の下位にある)。

針葉樹花粉(*Taxodiaceae*, *Pinus*, *Tsuga sieboldii*)が全体の21.0%、広葉樹花粉(*Alnus*, *Coccoloba*, *Moraceae*)が12.3%、草本花粉(*Gramineae*, *Cyperaceae*, *Artemisia*, *Cichorioideae*, *Carduoideae*, *Umbelliferae*)が56.8%、羊歯類孢子(*Monolote spore*)が8.6%検出された。花粉分析の結果、本層は更新統と考えられている。

E層 本層は愛鷹火山噴出物である。本層は和田川一赤沢川間の浮島原北部では上部層と下部層に分かれる。上部層は堅く、下部層は軟かく、その間に層厚1-2 mの紫蘇輝石安山岩質火山灰(沢村博士鑑定)がある。この火山灰層は、水井戸の電気検層で特徴ある低比抵抗の形を示す(第14図参照)ので、比較的容易に識別できる。

本層が、和田川沿いや富士山体の東南端では富士火山溶岩層に近接して浅く分布することは、地質(沢村, 1950; 落合, 1962)及び水質(池田, 未公表)によっても明らかである。なお、本層は中富士本(海拔700 m)では、深度420-480 m付近にある(津屋, 1940)。

F層 本層は砂礫より成る。礫はよく水磨された円礫で未固結で、A層とほとんど区別できない。礫層間には褐色を呈する砂層があり、厚いもので50 mにも及ぶ。

本層は富士川寄りでは浅く分布していて、松岡ではA層下位、海岸近くではB層またはD層下位にある。また、富士川町では富士火山溶岩層の下位にあるが、西の丘陵に近づくと欠除し、代って岩溶溶岩層が下位にくる(第16図b参照)。なお、本層については十分な検討がなされていないので、現段階では岩溶丘陵や富士宮丘陵に分布する鷲の田礫層(沢村, 1950)に相当する、と考える。

5.3.3 塩水化の概況

本地区は、かつて1本の深井戸でCl⁻数mg/l(比留川ら, 1957)の地下水を自噴状態で大量に使用できると

ころとして、我が国随一の地下水資源の賦存地域であった。

本地区で塩水井戸が発見されたのは、1960年7月であった(静岡県, 1960)。その井戸は、国鉄吉原駅のすぐ北側にある深度約100 mの深井戸で、Cl⁻ 500 mg/lであった。その後、隣接工場でもCl⁻ 300 mg/lの深井戸が発見された。

最初に発見された塩水井戸は、同年末にはCl⁻ 1000 mg/lを超え、翌年1月には3300 mg/lに達して、ついに廃止された。

1960年末、田子の浦港の西側海岸砂丘内にある簡易水道の水源井が塩水化して給水不可能となり、正月の給水対策に苦慮した。そして、翌年春には、港周辺の深井戸群(揚水停止時には自噴)に、Cl⁻ 1000 mg/l程度が検出されるものが現れた。しかし、その当時でも、この近くには、淡水の自噴井が存在していた(村下・岸, 1967)。

塩水井戸は、1961年夏にごく一部を除いて、本来の塩化物イオンに近い値にまで減少した。第17図は、沼川河口近くの深井戸群の塩化物イオンの1961年における月変動を示している。最高値を示すのは4月、最低値は8・9月で、この変動は、地下水の汲上げ状態が年間を通じてほとんど変化しないにもかかわらず、富士火山溶岩層の地下水が毎年繰返す塩水化の独特の型である。なお、同図の3井の間隔は、それぞれ数十mと離れていない。この近くには、同間隔程度の井戸がさらに10本程あり、塩化物イオン増加の時期やその値は各井戸ともまちまちであったが、傾向としては海岸に近い井戸ほど塩分が多く、また塩水井戸を揚水しているかぎり内陸側の井戸の塩分は少なかった。

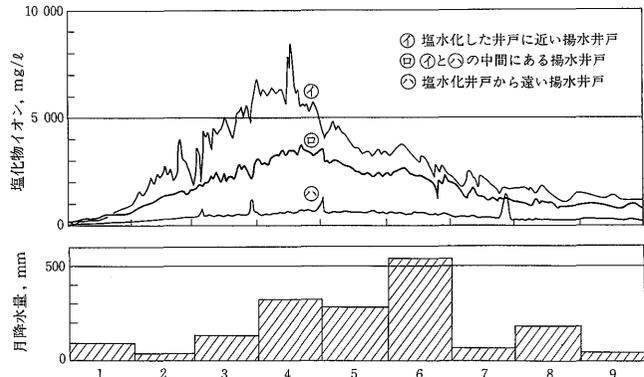
1961年春に塩水化した井戸は、第17図のように夏にはほとんど淡水状態に回復したので、塩水化はごく局地的でかつ一時的現象と考えられた。しかし、同年秋になると再び塩分が増加し、塩水化域がさらに拡大して内陸へ及んだ。

1962年春、塩水は吉原市街地の東南端にある和田川沿いの深度60 mの深井戸に現れ、1963年春にはさらにその上流に遡上して市街地に「くさび」状に侵入した。1964年秋の塩水化は最も顕著で、同市街地の大半を侵し、翌年春の渇水時にはごく浅い20 m程度の家庭用井戸の塩化物イオンは平常の10倍近くの値を示した。

塩水化域の拡大は、観測結果から推定すると、1962年の春には前年よりも600-700 m内陸へ、翌年春にはさらに400-500 m内陸へと進出した(村下・岸, 1967)。

一方、1965年春からは富士火山溶岩層が分布しない和田川以東の浮島原で塩水化が発生し、初めは滝川が沼川

本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)



第17図 富士火山溶岩層における塩水侵入初期 (1961年1月-9月) の塩化物イオンの変化

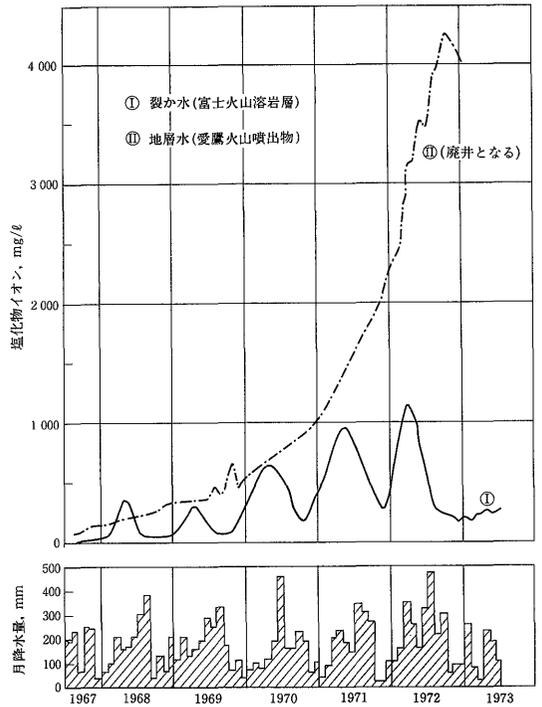
に合流する国道一号線の近くに限られていたが、翌年春には今泉から原田の方向へ細長く侵入し、やがて滝川沿岸一帯が塩水化して、塩水体の前線は愛鷹山麓に迫った。

滝川沿岸の塩水化は、おおよそ100 m 以浅の愛鷹火山噴出物を採水層とする井戸で発生した。しかし、塩化物イオンは、富士火山溶岩層の場合とは著しく異なり、季節変動をほとんど示さないで増加している(第18図)。

地下水位の塩水化は、水位の低下に伴って水平方向のみでなく、垂直方向にも進行した。地下水位観測2号井(ストレーナー位置、153-177 m)はD層に達し、溶岩層(B層)の静水圧より約2 mほど水圧が高く、塩化物イオンは設置時(1965年)に数 mg/l であったが、1970年10月から2けたとなった。E層に達する4号井(ストレーナー位置、156-177 m)は1971年1月以降300 mg/l を超え、最高値は約4 600 mg/l を記録した。以上二つの観測井の塩化物イオンは静止状態での値であるから、付近の揚水井の値はこれらよりも高い値であったと推測される。なお、第16図bのC-C'断面に示した淡・塩水の区分(村下, 1974)は、現在も変わっていない。

激しかった地下水塩水化は、1968年を境に鈍化し、以後は塩水域が縮少の方向に向かった。この傾向は浮島原では小さいが、富士火山溶岩層が分布する和田川以西ですこぶる顕著で、1973年春の塩水域の面積は、1968年の約2/3に縮少した。

第19図は、塩水化が始まった1961年、塩水域が最大となった1968年、そして縮少した1979年末の塩水域を示している。Cl⁻ 500 mg/l は高級紙の水質限界といわれた値で、塩水侵入時には200 mg/l の等値線も、1 000 mg/l も500 mg/l の等値線とほぼ同じ位置にあったが、塩水後退時には図に表れているとおり、200 mg/l と500 mg/l の等値線が別々に図示できる。

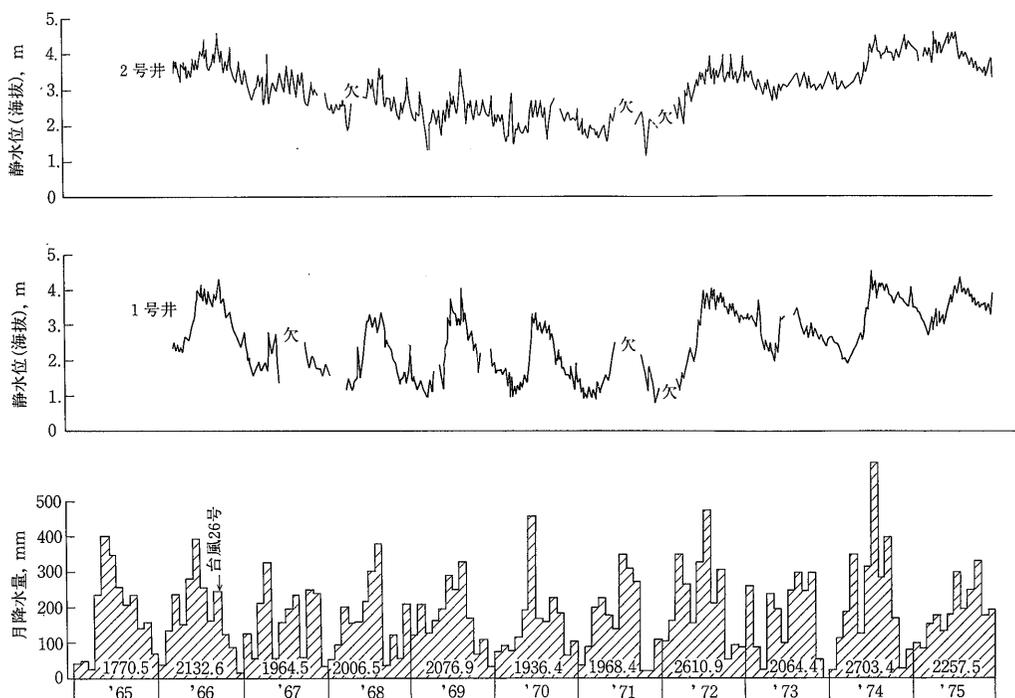


第18図 富士地区における裂か水と地層水の相違による塩化物イオン経年変化の特徴

5.3.4 考察

本地区における塩水化は我が国で発生している塩水化の中でもっとも規模が大きく、かつ塩化物イオンの変動には、第18図に示したように二つの型がある。一つは夏低春高の季節変動(その比は1:10もしくはそれ以上になる)が著しい型で、富士火山溶岩層地下水が示し、他の一つは季節変動がほとんどない我が国の海岸地帯で発生している塩水化の一般的な型で、愛鷹火山噴出物地下水が示している。その原因には、水文地質学的要因と水文

本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)



第20図 富士地区における静水位の経年変化

塩水化が発生・進行した1960-1964年だけである。

また、年降水量は、地下水対策の県条例(1971)が制定されてからは1973年の異常渇水年を除いては平均値以上で、最高は1974年の2703.4 mmであった。

年降水量と塩水化との関係は以上のとおりであるが、月降水量との間には次の関係がある。

本地区における10年を超える地下水位と月降水量との関係(第20図)から、水位が降水量に対して1-2カ月遅れて変動することが明らかとなった。そこで、第21図のように月降水量に対する静水位に同じ月、1カ月遅れ、2カ月遅れの値をとって図示したが、結果としては同図のとおり1カ月遅れがよくまとまった。さらに細かく作業を進めると一層精度の高い関係が求められると考えられるが、同図から読みとれる両者の関係は、最少自乗法によって求めると、次のとおりである。

(i) 溶岩層に達している1号井では $y=0.87+0.0076x$ 、3号井では $y=1.04+0.0047x$ である。また、前々月に雨量が多いと前月に少なくとも水位が高い。月降水量が多くても水位の上昇には効果が少なく、その限界は約350 mmと推定される(村下, 1977)。

(ii) 凝灰角礫岩層(2号井)では $y=2.06+0.0029x$ の関係式が得られた。降水量が地下水位に及ぼす影響は、溶岩層よりも小さい(第20・21図)。

(iii) 愛鷹火山噴出物層(4号井)では、地下水位が海面下にあった1968-1971年に $y=-0.5$ 、水位が回復した1972-1973年には $y=1.5$ という関係が得られた。したがって、同観測井では降水の影響は見られず、水位は年間を通して平衡状態を保っていると考えられる。

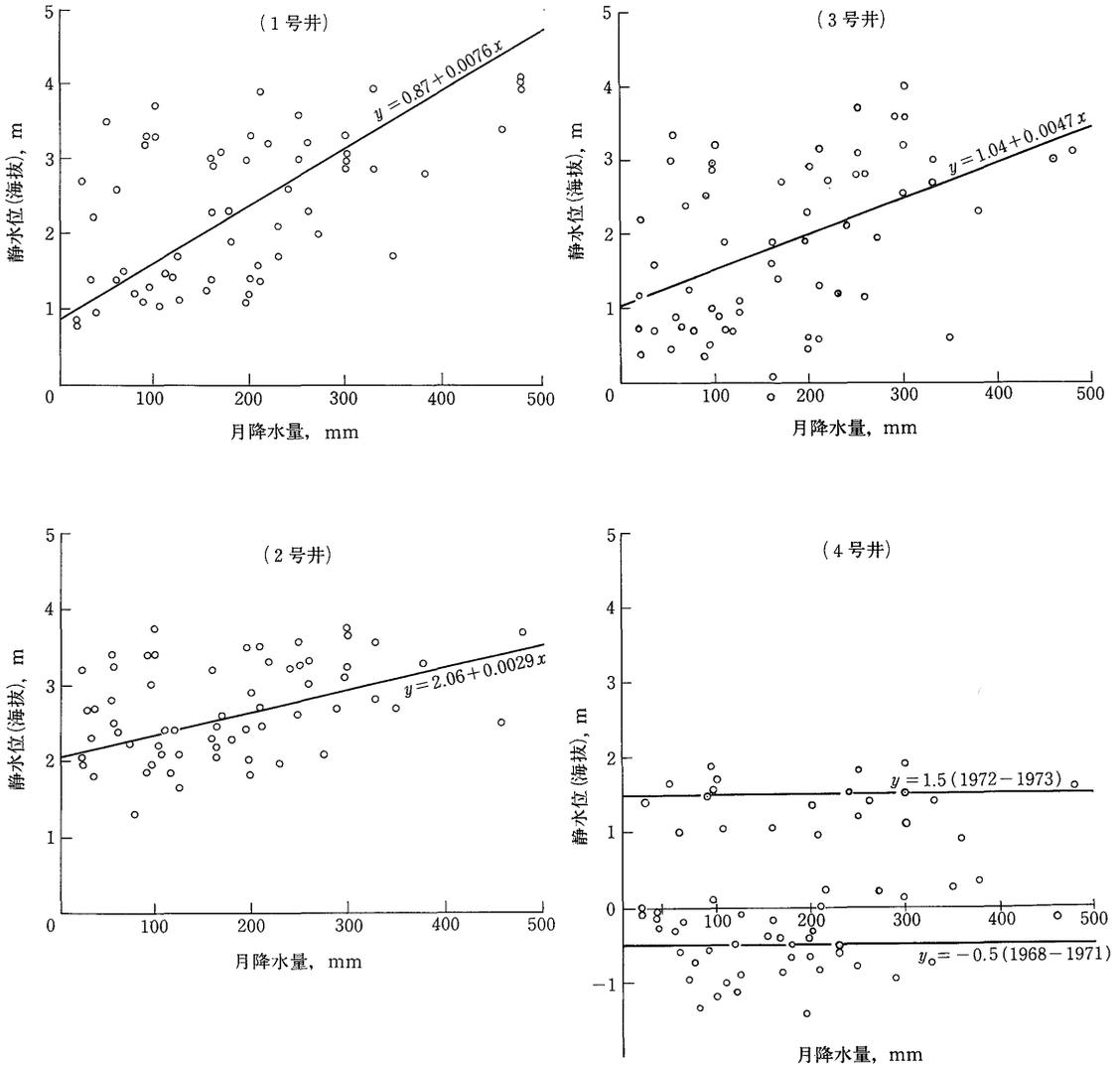
富士火山溶岩層の地下水位が富士山体の降水量と深い関係にあることは、以上の説明のとおりである。本地区の地下水使用量は紙・パルプ製造業という業種の性質から年間を通じて一定であるから、地下水位・塩化物イオンの季節変動は降水量に支配されている。

これに対して、浮島原での塩水化が緩慢なのは低透水性の地層という素因だけでなく、愛鷹火山噴出物層の地下水位が降水量の影響をほとんど受けないこと一さらに検討の余地が残っているが一にも原因があると考えられる。

なお、富士火山溶岩層の水位に降水量の影響が約1カ月遅れで現れることは先に説明したが、塩化物イオンは水位変動からさらに半月ないし1カ月後に変化することが観測されている。したがって、降水量の影響が塩水化の消長に明瞭に現れるのは、1カ月半から2カ月後である(第17・18図参照)。

(2) 地下水汲上げ量

地下水の汲上げ量は、筆者らが最初に地下水調査を行



第21図 富士地区における1968-1973年間の静水位と月降水量との関係

って以来概略第2表のように増加した。

本地区における地下水の平均採取量は、静岡県条例「地下水の採取の適正化に関する条例(昭和46年,以下県条例という)の届出に基づく集計では、同年9月に日量1570492m³, 井戸本数848本であった。用途別採取量は第2表のとおりで、多い順にあげると、工業用水(632本), 生活用水(水道・簡易水道, 81本), 養魚用水(10本), 農業用水(42本), 建築物用水(55本), その他用水(28本)で、工業用水(紙・パルプ製造業)が断然多い。

工業用と生活用の井戸分布は第22図のとおりで、富士山麓の密度が高い。

第23図は、吉原市街地における水井戸分布で、(a)は

1955年に当時の吉原市から提供された資料で、井戸の口径は75-150mmが大半(80%)で、深度は富士火山溶岩層に達するまでのせいぜい60m以浅であった。これに対して、(b)は250-400mmの口径で、深度も100mを超すものが多い。(b)のように大口径の深井戸が多くなったのは、掘さく技術が経済成長に伴う地下水需要量の増加によって向上したからであって、少なくとも1965年以前の技術では割れ目・空洞が発達する溶岩層に逢着すると起こる逸水という危険な事故、水頭圧がきわめて高い帯水層への対応措置が十分にとれなかった。

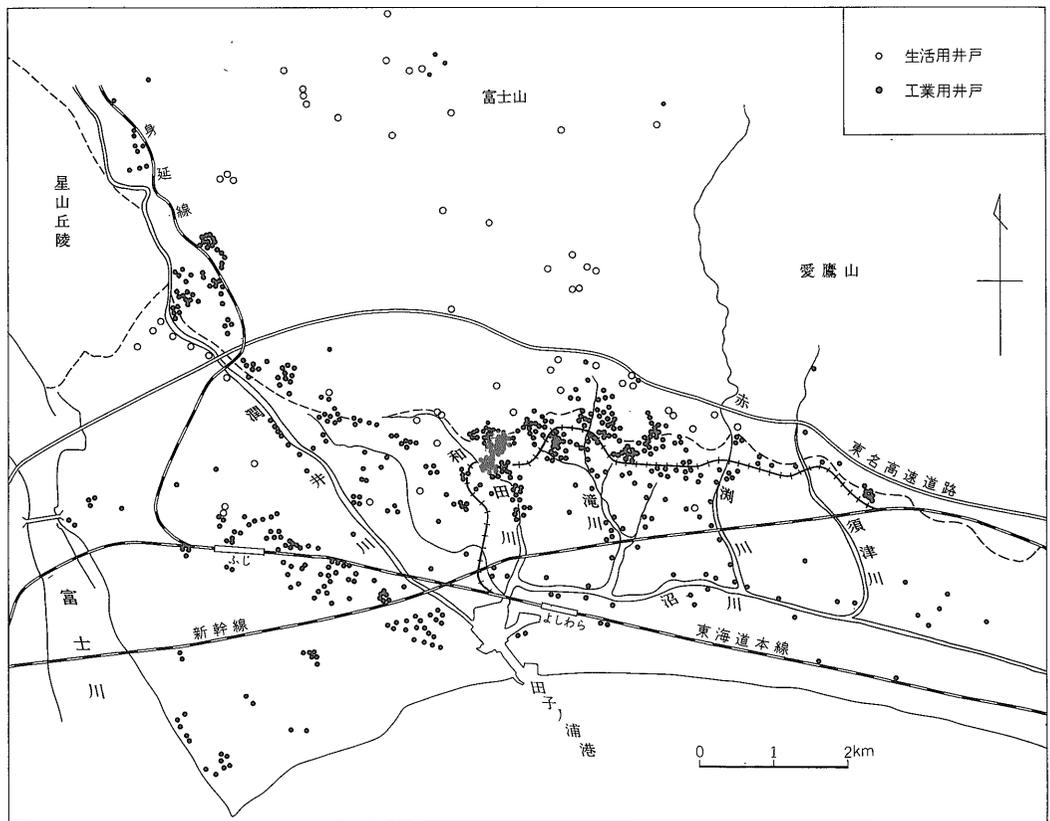
第24図は、県条例に基づく届出の井戸台帳によって、区域別に1971年における地下水の汲上げ量, 単位面積(1

本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)

第2表 富士市における地下水汲上げ量の変遷

調査年	計	工業用水	建築物	水道	農水産	その他	備考	
							旧富士市	旧吉原市
1955	560 000	ほぼ全量					220 000	340 000
1960	770 000	同					230 000	540 000
1964	1 170 000	同					300 000	870 000
1971	1 571 000	1 406 000	15 000	88 000	52 000	10 000	411 000	1 020 000

(単位: m³/d)



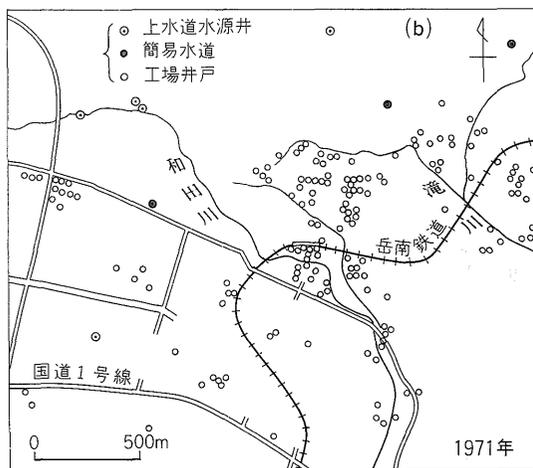
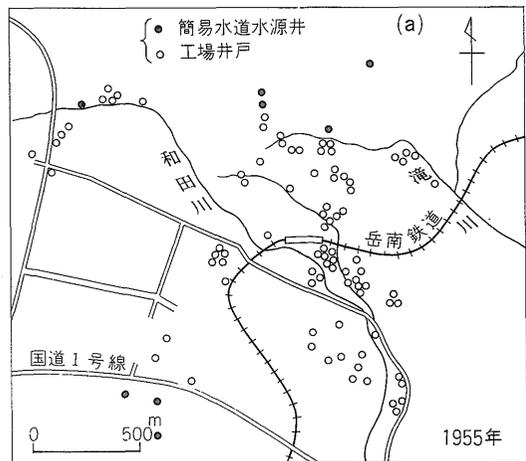
第22図 富士地区における生活及び工業用井戸の分布 (1971年調べ)

km²)あたりの汲上げ量と井戸本数を示したものである。この図から、汲上げ量は海岸地帯よりも富士山麓で多く、また、塩水化は汲上げが著しい地域で進行したことが分かる。

第2表によると、汲上げ量は全体として10年間に約2倍に増加し、1960年には本地区の安全揚水量 80万 m³/d (山崎・村下, 1966)とほぼ等しくなった。地域別にみると、旧吉原市での汲上げ量が高い伸び率を示して、1964年にはここだけで上記の安全揚水量を超える汲上げ過剰

の状態となった。地下水位観測井の水位が内陸の3号井(富士火山溶岩層)と4号井(愛鷹火山噴出物層)で特に低かったのは、汲上げ過剰の状態を示したものであろう(村下・岸, 1967)。

海岸地帯では、溶岩層に達した塩水化井戸の揚水を早くから停止したので、地下水の動水勾配が内陸へ向かう海高陸低の形となり、かつ過剰汲上げ地帯が海岸から離れた富士山麓であったことが、海水の侵入を容易にし、塩水化域が拡大となった原因の一つである。



第23図 吉原市街地における工業用井戸の変遷

5.4 磐田地区

本地区は、天竜川と太田川の下流域である。

5.4.1 地形と地質

天竜川下流域は、磐田原台地と扇状地とに大別される(第25図)。磐田原台地は、北部の海拔125 mから南へ次第に低くなり、国鉄東海道線の付近で沖積面下に入る。台地西側の低地は、南流する天竜川によって形成された扇状地の一部で、扇状地は海岸まで続いている。

太田川下流域は、海岸に沿って東西に延びる数列の海岸砂丘とその背後に広がる広大な低地で、かつて存在していた瀉が細粒質の河川堆積物によって埋立てられた低湿な三角州性平野である。

本地区における第四系の基盤岩は第三系と考えられるが、これに達した水井戸はまだない。

第三系に不整合に重なる小笠層群は、礫を主とする粗粒堆積物で青色粘土層を挟み、岩相の変化に富む。

磐田礫層は、礫の密集した砂や粘土の少ない礫層で、台地に扇状に分布している。

沖積層は砂・礫から成り、海岸平野で磐田礫層を覆い、太田川下流域では南北方向の断層によって形成されたと考えられる溺れ谷を埋め、ここでは腐植土を挟む粘土層・シルト層が厚い。

5.4.2 地下地質と帯水層

沖積層(第26図A層)は全体として礫($k \approx 0.1-2.0 \text{ cm/s}$)が卓越しているが、太田川の海岸地帯では貝殻混じり砂層や腐植物混じり粘土層を挟む(東京通商産業局, 1972; 村下, 1974)。層厚は、磐田原台地の前面では薄いが天竜川河口付近では100 m内外と急に厚くなる。太田川沿いでは、次の花粉分析の結果から、層厚は82 mを超えることも考えられる。すなわち、松袋井にある静岡県の地下水位観測井の深度80-82 mの粘土層から、針葉樹花粉(*Taxodiaceae*, *Pinus*)が全体の18.3%、広葉樹花粉(*Lepidobalanus*, *Castanea*, *Alnus*, *Corylus*, *Fagus*)が20.3%、草本花粉(*Gramineae*, *Cyperaceae*, *Artemisia*, *Cichorioideae*)が55.1%、羊歯類胞子(*Monolete spore*)が4.3%検出された。地質時代は沖積世と推定されている。

磐田原礫層(第26図B'層)は黄色-褐色を呈する礫層($k \approx 0.1-0.5 \text{ cm/s}$)で、磐田原台地と南方の沖積低地下にのみ分布する。その厚さは海岸砂丘地下で約130 mである。台地前面の沖積地での本層は、1953年当時自噴水圧を有していた(森・米谷, 1955)。

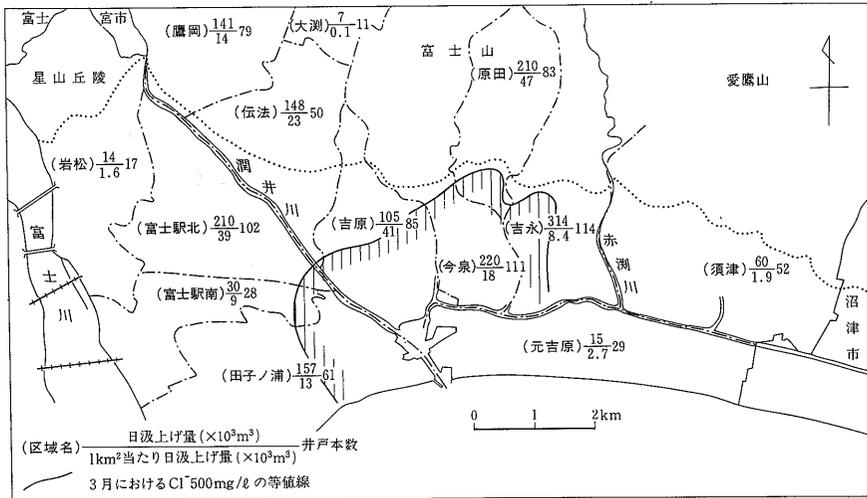
小笠層群(第26図E層)は、小笠丘陵及び磐田原台地北部で露出し、北西-南東の走向で南西に約5°の傾斜で傾いている。そして、太田川沿いでは大きく落ち込み、福田町では深度130 m、竜洋町では約105 mで本層に達する(第26図参照)。当地区には第三系に到達した水井戸がないので、本層群の層厚は明らかでない。本層群の礫層($k \approx 10^{-8}-10^{-2} \text{ cm/s}$)は自噴水圧を有し、浅羽町の低地では50 m以深の帯水層を掘抜くと1970年当時自噴井となった(東京通商産業局, 1972)。

5.4.3 塩水化の概況

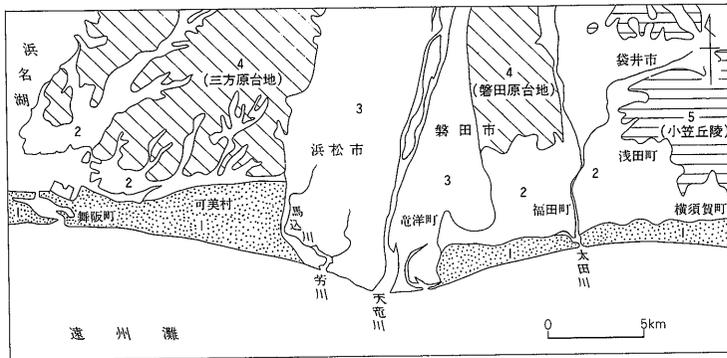
本地区における被圧塩水には、福田町から太田川の右岸沿いに磐田原台地下へ「くさび」状に入り込むものと、海岸地帯に分布するものとの二つがある(第27図)。太田川沿いの被圧塩水は古くから存在し(森・米谷, 1955)、海岸地帯の被圧塩水はごく最近発生したものである(東京通商産業局, 1972)。

磐田原台地は南側で東西二つの台地に分かれる。西側の天竜川寄りの台地下の地下水は Cl^- 数 mg/l の淡水で

本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)

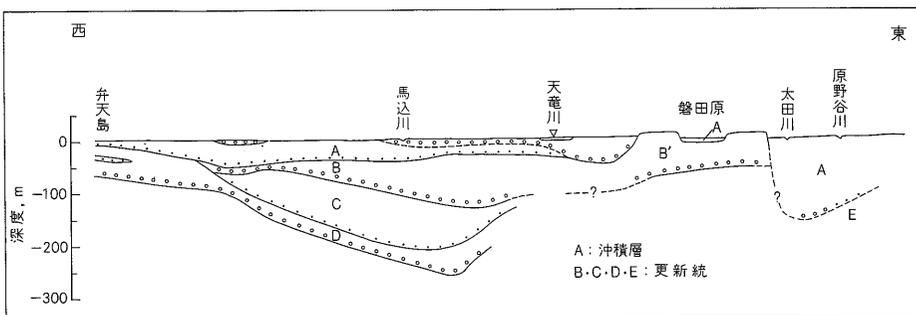


第24図 1971年における富士地区の区域別地下水汲上げ量, 井戸本数及び塩水化域



第25図 磐田・浜松地区の地形 (静岡県地図(1973)により作図)

1: 砂丘地, 2: 低地(背後地・埋立地), 3: 扇状地, 4: 台地, 5: 丘陵地

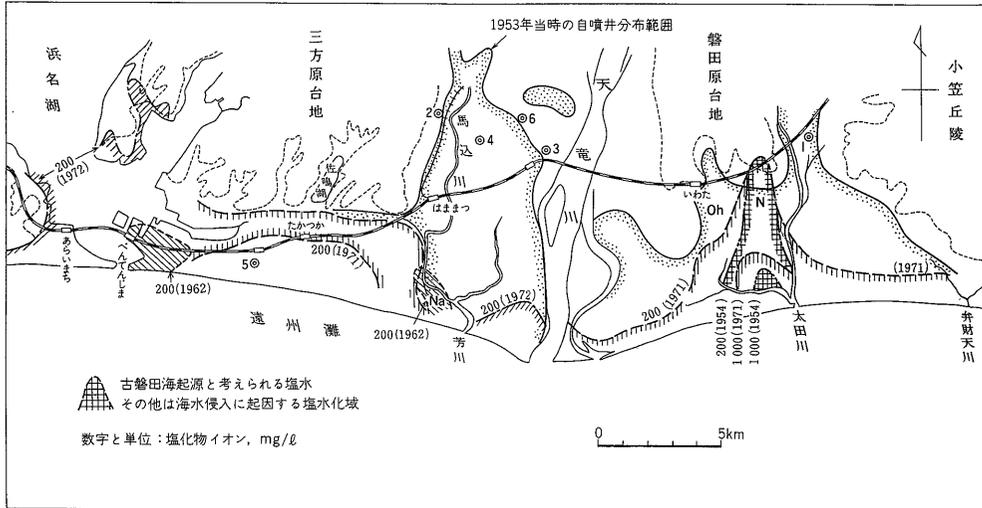


第26図 磐田・浜松地区における東海道本線に沿う地下地質断面

あるが, 東側の太田川寄りでは海岸から約 6 km 離れた東海道本線の北側の台地下 60m 以深に $\text{Cl}^- 1070 \text{mg/l}$ の塩水層の存在がさく井によって確認された(村下, 1974). しかし, その北限は明らかでない. この東側台地の南方, 海岸から 5.4 km の西之島(第27図参照)には, 深度約

27m の自噴塩水井がある. 自噴水は 1953 年の調査時(森・米谷, 1955)から 1979 年までの間, $\text{Cl}^- 420-605 \text{mg/l}$ の範囲で変動し, 塩化物イオンの経年的増減の傾向はこの間ではみられない.

これから南, 福田町の被圧地下水は Na-Cl 型の塩水



第27図 磐田・浜松地区における塩水侵入

◎地下水位観測井 1:松袋井, 2:上島, 3:天竜, 4:丸塚, 5:篠原, 6:市野, N:西之島, Na:中田島, Oh:大池

で、海岸寄りほど塩分が多く、例えば海岸から2 km 内陸の深度110-129 m 層は Cl^- 10 200 mg/l、海岸砂丘では110 m 以深に高濃度の塩水層の存在を水井戸の電気検層図が示唆している。なお、台地南縁での塩水くさびは、約1/60の勾配で淡水層下に入り込んでいる。

天竜川河口から東へ約16 km、幅1 km と細長く分布する Cl^- 200 mg/l 以上 Ca-Cl 型の塩水の存在は、1970年に確認された(東京通商産業局, 1972)。被圧塩水層の深度は太田川の東西で異なり、東側では50 m 以浅、西側では50 m 以深である。

塩化物イオンの分布を、1954年と1971年の資料に基づいて照合すると、福田町にあった Cl^- 1 000 mg/l の塩水化域は第27図のとおり17年後には内陸へ向かって拡大している。このため、福田にあった別珍・コールテンの工場は、淡水を求めて磐田市・浜松市へ移転した。また、200 mg/l の等値線は磐田市の方向へ拡大しようとする「ふくらみ」を示している。この部分の塩水化域は、夏期に拡大、冬期に縮小する季節変動を毎年繰返している。例えば大池の近くにある深度80 m の水井戸は、1980年2月に Cl^- 74 mg/l、同年6月に100 mg/l、11月に83 mg/l と変動している(静岡県, 1981)。

5.4.4 考察

本地区の被圧塩水に、福田町から太田川右岸沿いに磐田原台地下に「くさび」状に潜入する塩水と、海岸線に沿う塩水の二つが存在することは、前述のとおりである。

楨山ら(1957)によると、見付(磐田原台地南縁)南方か

ら小笠丘陵西方にかけての太田川下流低地に、有史時代を含めて沖積世後半に一つの入海—古磐田海が存在していた、という。これに基づいて考察すると、磐田原台地下に潜入する形をなす被圧塩水は、この古磐田海と関係があり、太田川以東の海岸地帯に古くから分布する飲料不適の沖積層の塩水も、同じく古磐田海との関係が考えられる。なお、鎌倉時代まで残っていた磐田市街地南方の大地を中心とする付近の地下水は、現在淡水である。

したがって、かつて磐田原台地を含めて広大な範囲に存在していたと推定される古磐田海起源の塩水は、台地及び丘陵の降水、天竜川及び太田川起源の地下水によって洗われ、稀釈されて、現存の範囲にまで縮小したと解釈される。そして、台地南方の自噴塩水井の存在は、塩水の稀釈・淡水化の状態が現在も継続していることを立証している。

海岸地帯—太田川以西と大須賀町西部で発生している塩水化は、養魚用水の汲上げと関係が深い。養殖池は天竜川の河口付近に多くて、被圧地下水の汲上げ量は1969年実績で約89 000 m^3/d であった。この地帯の地下水は、汲上げ開始とともに塩水化した。その結果、河口から太田川の方へと淡水を求めて養殖池を移したが、ここでも淡水の期間はきわめて短かった。また、大須賀町西部の塩水化は、ここに養殖池が進出(1970年頃)してから発生し、隣接する浅羽町の水道水源にその影響が及んで問題となった。

太田川以東の海岸地帯に残存する古磐田海と関係があると考えられる塩水(深度13-15 m で Cl^- 約250 mg/l) と

は別に、太田川の河口地帯では、明らかに地下水汲上げに起因する塩水化が認められている。塩水化井戸は貝殻混じり砂層から採水する深さ10m程度の井戸で、ハウス園芸用に集中して汲上げた結果、1969年夏から塩分が増加した。

海岸地帯における塩水化は、地下水の汲上げがこの地帯で集中して行われるので、動水勾配が逆転して塩水が侵入して発生したと考えられる(第4図-(a)参照)。そして、現在も大量汲上げが継続しているので、この地帯での地下水位が最も深くなり、富士地区におけるような内陸深くまで塩水の侵入を促す水理状態にはない。

内陸の磐田市と福田町との境界付近で塩水化域が季節変動するのは、工業・生活・農業の用水(被圧地下水)の汲上げと関係がある。これら3用途の汲上げ量は、1969年実績で上記の順に平均で56000 m³/d, 19000 m³/d, 38000 m³/dの計113000 m³/d(安全揚水量136000 m³/d, 東京通商産業局, 1972)で、夏期に(平均より20%ほど)多く、かつ揚水域は磐田市である。そのため、汲上げ量が安全揚水量を超える夏期に、揚水域に向かって塩水域が拡大するのである。なお、この付近には、1961年当時淡水の自噴井があったから、塩水侵入はその後である。

以上のとおり、磐田地区には古い塩水と新しい侵入塩水とがあつて、地下水の汲上げが現在と同じ状態で続かざり塩水化域に大きな変動はないと考えられる。

5.5 浜松地区

本地区は、天竜川から浜名湖までの海岸平野である。

5.5.1 地形

本地区の地形は、三方原台地と天竜川低地とに大別される(第25図)。

三方原台地は前述の磐田原台地と同時代の開析扇状地であつて、その南縁は海岸線とほぼ平行な急崖を成している。

天竜川低地は、沖積扇状地と三方原台地の南に連なる海岸低地とに区分される。扇状地は、全体として南へ1/600の勾配で傾斜しているが、ほぼ海拔10mを境として、これより下流では勾配が緩やかとなる。

扇状地の南西縁はほぼ馬込川で、その西は浜名湖まで続く海岸低地である。低地の幅は東方で約4km, 西方へ向かって狭くなる。砂丘は低地の大半を占めて発達している。砂丘列の間には低湿地があつて、砂丘列に平行して延びている。

5.5.2 地下地質と帯水層

当地区の地下地質は、水井戸の資料(最深330m)によると次の4層に大別される(村下, 1974; 第26図)。

A層 主として礫・砂・粘土から成る最上位層で、層

厚は浜松市街地で30-40m, 天竜川下流及び海岸砂丘近くで60-70mである。礫層の厚さは、天竜川下流で約20m, 砂丘近くで10-20mであるが、砂丘内では天竜川から遠ざかると礫層よりも砂層が厚くなる。

B層 茶褐色を呈する砂礫層または粘土混り礫層から成る。層厚は、台地上で40-50m($k \approx 8 \times 10^{-2}$ cm/s), 浜松市街地で90-100m($k \approx 6 \times 10^{-2}$ cm/s), 砂丘近くでは約10mである。天竜川近くでは層厚が80mと厚く、上流から下流へ向かって約1/200の勾配で深くなっている。本層の粘土は赤粘土と呼ばれるほど色に特徴がある。

C層 主として砂から成る層で、層厚は市街地で70-90mであるが、天竜川寄りでは薄く、また馬込川から天竜川にかけての海岸地帯には分布しない。篠原の地下水位観測井の資・試料によると、本層は青灰色を呈し厚さ20m程度で、比較的細粒かつ均質である(東京通商産業局, 1968)。

D層 茶褐色を呈する砂礫層で、市街地では約200m以深に、天竜川寄りでは約100m以深(天竜観測井, $k \approx 1.5 \times 10^{-1}$ cm/s)に、砂丘近くでは約80m以深(篠原観測井, $k \approx 4.0 \times 10^{-1}$ cm/s)に発達する。市街地では、層厚60m以上(丸塚観測井, $k \approx 2.0 \times 10^{-1}$ cm/s)と厚い。

これらの地層の分布から、本地区には市街地の東部を中心とした盆状構造の存在が推定される(第26図)。

5.5.3 塩水化の概況

本地区における塩水化の報告は、経年観測が開始された1968年以前については断片的である。

本地区の地下水が塩水化の傾向にあることが指摘されたのは、1953年であつた(蔵田ら, 1954)。その当時、天竜川の低地には自噴井が広範囲にわたって多数存在し、海岸近くでも塩化物イオンは数mg/lであつた。しかし、馬込川河口に近い中田島の自噴井は135mg/lを示していた。

1960年、本地区再調査時には塩水化がかなり明瞭になっていた(村下ら, 1962)。まず、馬込川沿いから芳川沿いに海岸線から1-2.5kmの範囲にある深度90m前後の簡易水道の水源井がCl⁻50mg/l以上を示し(当時、飲料水の水質基準は塩化物イオンの限度を30mg/lとしていた)、なかには200mg/lを超えるものもあつた。また、本地区の西部舞阪町には、深度45mの井戸に10660mg/l(水質はNa-Cl型)を示すのがあつた。

浜松保健所の水質試験資料を整理すると、1962年、深度60-80mの帯水層は第27図のとおり馬込川沿岸と舞阪町で塩水汚染を受けた。そして、馬込川沿いでは、塩水(水質はCa-Cl型)が浜松市街地へ向かって侵入する形を成していた(村下, 1974)。

1967年、塩水化域は内陸へさらに拡大して、芳川沿いと馬込川沿いに奥深く侵入した。とくに馬込川沿いでは市街地の中央部まで塩水が侵入し、馬込川と浜名湖との間一ほぼ国道1号線と三方原台地南縁との間の幅2kmの低地が全域にわたって塩水化した(東京通商産業局, 1968)。

しかし、1969年には、芳川沿いと馬込川沿いの塩水は海岸へ向かって後退した。その年の塩水化域は、第27図の1971年の塩水化域とほぼ同じであった(村下, 1974)。

1972年、一時芳川沿いで消滅していた塩水化域が再び出現し、かつ天竜川寄りの海岸地帯に拡大した(村下, 1974)。

本地区における塩水化域は、筆者の現地調査によると、芳川以東の海岸地帯では夏期に拡大、冬期に縮小する傾向にある。また、上述のとおり馬込川沿いの塩水は年によって内陸へ侵入、または海岸へ向かって後退する不規則な繰返し、三方原台地南方の低地帯では侵入した塩水がほとんど動かない状態を示している。

第27図には、本地区外の浜名湖西岸新居町・湖西町の塩水化域が示されている。湖西町では、1955年に Cl^- 20 mg/l と 90 mg/l を示した井戸水が1960年にそれぞれ 501 mg/l と 395 mg/l (村下ら, 1962) であったことから推測して、本地区の場合と同じく塩水化は以前から進行していたと考えられる。

5.5.4 考察

本地区(浜松市・可美村)における地下水の平均採取量は、県条例の届出に基づく集計では、1971年9月現在で日量 751 574 m³、井戸本数 3 109本であった。使用別に採取量の多い順にあげると、

工業用水	368 258 m ³ (875本)
養魚用水	160 460 m ³ (454本)
生活用水	90 622 m ³ (303本)
農業用水	62 919 m ³ (206本)
建物用水	34 606 m ³ (134本)
その他用水	34 709 m ³ (1137本)

であった。地下水汲上げ量の約50%を占める工場は、馬込川沿いの浜松市街地と、馬込川以西の国道1号線の南北に立地している。養魚池は、国道と三方原台地との間の低地に集中している。

本地区で塩水化している帯水層は、深度60-80mの砂礫層である。砂礫層は上下二つに区分できる。上部はいわゆる青砂利層(第26図のA層下部)、下部は赤砂利層(同図B層上部)である。筆者が塩水化の実態を調査した結果では、赤砂利層を単独採水する井戸は塩水化しにくく、青砂利層は塩水化しやすい。1960年に芳川河口から

馬込川下流で発見された被圧塩水井戸は、青砂利層採水の井戸であった(村下ら, 1962)。しかし、塩水化井戸の多くは上記の深度で、二つの砂礫層を同時に採水しているので、赤砂利層にも塩水が侵入していると誤解されやすいが、正確には上述のとおり画然とした差がある。

1960年以降、塩水体が馬込川沿いに遡り、1967年に市街地の工場地帯にまで拡大した主原因は、筆者ら(1962)が調査結果に基づいて指摘したとおり、深井戸ポンプが低揚程のタービン・ポンプから高揚程の水中モータ・ポンプに切替えられて、地下水位低下の中心部が工業地帯に形成され、ここから南の海岸地帯の動水勾配が海高陸低の状態となって海水が侵入したことにある。

上記の地下水位低下-海水侵入について少し説明を加えると、次のとおりである。天竜川下流低地に一大自噴井分布地帯(第27図参照)があった1953年頃でも、市街地南方馬込川沿岸の自噴井は、工場の操業に応じて変動一週日の昼間には自噴停止または減量、夜間または日曜日には自噴復活または増量一していた(蔵田ら, 1954)。

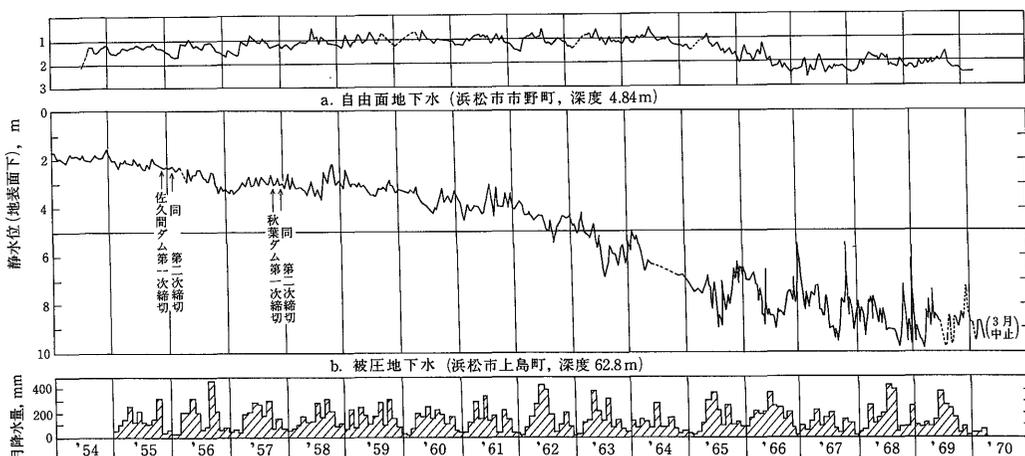
1960年調査時、この工場地帯では井戸の相互干渉によって水位低下が著しく、午後になるとタービン・ポンプでの揚水が困難になる井戸が多かった。高揚程の水中モータ・ポンプはその頃から一般に普及し始めた。そして、このポンプを使用した井戸では塩分が急激に増加し、揚水量を減少させると塩分も急減した(村下ら, 1962)。

このように、塩水化井戸は揚水量の減少または運転中止によって、きわめて短時間に淡水化するの、廃止井戸の続出によって市街地では塩水が消滅した。

一方、1972年に芳川以東の天竜川河口地帯で一旦淡水化した地下水が再び塩水化したのは、この地帯に簡易水道・温室栽培・工場の井戸が増加したことに直接起因する。ここでの汲上げ量は夏期に多く冬に少ないから、その変動に応じて侵入海水が増減するのであろう。天竜川沿岸における塩水化を容易にした間接的原因がもう一つある。それは沿岸の地下水位低下であって、その誘因は次のとおりである。

天竜川沿岸の地下水位が低下し、自噴井が涸渇し始めたのは、1955年12月の佐久間ダム第1次締切と翌年2月の第2次締切の直後であった(第28図参照)。1957年11月及び12月の秋葉ダム締切によって、自噴井は上流側から消滅したが、1960年の調査時に自噴井は海岸近くにわずかに存在した(村下ら, 1962)。両ダムの建設に伴って下流への砂利の供給が減少し、一方下流では砂利採取による河床の低下、河口では海岸侵食が発生して、天竜川沿岸の地下水位低下を誘発した。

馬込川以東における塩水化の原因には、地下水の汲上



第28図 浜松地区における地下水位の経年変化 (浜松市の資料による)

げ過剰(被圧地下水の安全揚水量 221 000 m³/d, 東京通商産業局, 1968)という直接原因のほか、天竜川の河状変化などに起因する水位低下があることに、間違いはないであろう。地下水の汲上げが過剰の状態にあったことは、当地区にある地下水位観測記録からも次のとおり説明できる。

第28図 b は、地質調査所が1953年の地下水調査後に掘さくした深度62.8mの観測井の水位記録である。位置(第27図参照)は浜松市街地の上流にあり、帯水層はB層である。観測は浜松市に依頼して約15年間継続したが、校舎の改築に伴い1970年3月に廃井となった。被圧地下水の水位は1962年からの低下がとくに顕著で、夏に高く冬に低いという我が国における自然の変動とは全く逆の夏低冬高の水位変動型は1958年から現れ、また、1965年以降月変動が激しいのが特徴である。そして、15年間に約7mの水位低下を示している。これに対して、自由面地下水の水位(第28図 a) は、同じ15年間に約1mの低下であった(村下, 1974)。

馬込川以西の低地で地下水の塩水化が顕著となった1967年は、国道1号線沿いにある工場の増産・増設、工業団地の造成、企業の進出が盛んであった時期であり、浜名湖畔の養殖池が東へ向かって増設され始めた時期でもあった。そして、1968年には細長い低地の地下水が全域に亘って塩水化した。その機構は馬込川沿いの塩水化と同じで、塩水の起源は東側では直接海水、西側では浜名湖またはその周辺の被圧塩水と考えられるが、それ以上の詳細については分からない。

しかし、馬込川以西の地区でも、地下水の汲上げ量が少ない砂丘地の地下水は、現在でも Cl⁻200 mg/l未満で

ある。

5.6 徳島地区

本地区は、吉野川下流の徳島平野である。

5.6.1 地形

徳島平野の北側には和泉層群から成る讃岐山脈、南側には三波川変成岩類から成る四国山地があり、その間をほぼ中央構造線に沿って吉野川が東流する。吉野町・鴨島町以東の平野は、扇状地・氾濫原・三角州から成り、その幅は東へ向かって徐々に広がる。

扇状地は、讃岐山脈に源を発する宮川内谷川・泉谷川・盗人谷川、四国山地に源を発する鮎喰川によって形成されている。吉野川の氾濫原には自然堤防が河道沿いに分布し、右岸によく発達する。国鉄高德本線以東の三角州でも、自然堤防は旧河道沿いに複雑に交錯し、また旧吉野川・今切川などの派川はここで大きく蛇行している。

現吉野川は、1928年に改名されるまでは別宮川と呼ばれ、藩政時代に徳島城の防衛と舟運の便を図る目的で1672年以降に開さくされた掘抜水道である。

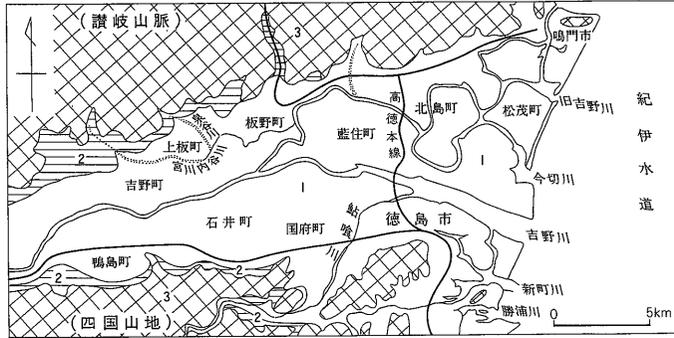
5.6.2 地下地質と帯水層

海岸地帯の地下地質は、水井戸の資・試料から概略次のとおり説明できる。

A層 上部層が礫、下部層が砂に富み、高德本線以西で厚さ10m前後の砂礫層、以東では細砂ないしシルト層で、貝殻を混じえ、厚さは15m位である。

B層 薄い砂・礫の層を挟み、貝殻を混じえる青灰色粘土層で、厚さは10-20m、海岸で厚い。

C層 和泉砂岩と結晶片岩の砂礫から成る層で、上部は礫、下部は砂が卓越する。礫の径は2-3cmである



第29図 徳島地区の地形 (地質調査所(1961)1/20万徳島より作図)

1: 低地(扇状地・沼澤原・三角州), 2: 段丘, 3: 山地

が、なかには拳大のものがある。層厚は30m程度で、筆者ら(1963)は本層を30m礫層と呼んだ。

C層の下位層は、地質調査所が1962年北島町に掘さくした深度204.5mの試掘井の記録によると、黄褐色を呈する粘土混じり砂礫層で、最下部まで連続している(地質調査所, 1962)。

吉野町・上板町・鴨島町・石井町に四国通商産業局(1973b)が設置した地下水位観測井(深度150m)の地質資料・試料によると、B層は吉野町で尖滅し、C層下位層は細分されて、黄褐色砂礫混じり粘土層(D層)、薄い粘土層を挟む砂礫層(E層)、砂礫を混じえる黄色ないし灰青色粘土層(F層)、粘土混じり砂ないし砂礫層(G層)、粘土混じり砂層ないし青色粘土層(H層, I層)、鴨島町の100m以深に分布)となる。

A層は沖積層、B層は沖積-更新層、C層以下は更新層である。なお、H・I層とみられる鴨島町南部の露頭から採取した炭質物について花粉を分析した結果、

針葉樹花粉 (*Taxodiaceae*, *Pinus*, *Tsuga sieboldii*, *Tsuga diversifolia*, *Abies*, *Picea*) が全体の35.1%, 広葉樹花粉 (*Alnus*, *Cyclobalanopsis*, *Salix*, *Ilex*, *Pterocarya*, *Castanea*) が32.6%, 草本花粉 (*Cyperaceae*, *Typha*, *Potamogeton*, *Pericaria*, *Carduodeae*) が28.3%, 羊歯類孢子が1.1%検出され、地質時代は更新世である。

水井戸の電気検層及び水質試験(池田, 1979)の結果によると、高德本線以東における淡水層はC層だけ(水質はCa-HCO₃型)で、A層及びC層下位層は塩水層である。本線以西では全層が淡水層で、A・C層の水質はCa-HCO₃型、E層以深はNa-HCO₃型であって、水質を異にする。

本地区においてもっとも利用度が高い透水性のよいC層($k=0.4-0.8\text{cm/s}$)の基底の形は、第30図のとおり東西に細長い地下谷を成している。地下谷は海に向かって開

いているが、上流に追跡すると旧吉野川の右岸沿いに讃岐山脈に偏して西へ向かい、上板町で向きを南西へ変えて西分・瀬部を通って吉野川に入る。この谷の形成は、中央構造線の影響を受けていると推測される。今切川が旧吉野川から分流する付近から、吉野川を横断して鮎喰川にほぼ沿って遡る小さな地下谷が、同図からもう一つ読みとれる。この二つの谷に挟まれた現吉野川の沿岸には、地下谷に向かって緩やかに傾斜する台地状の地形が認められる。

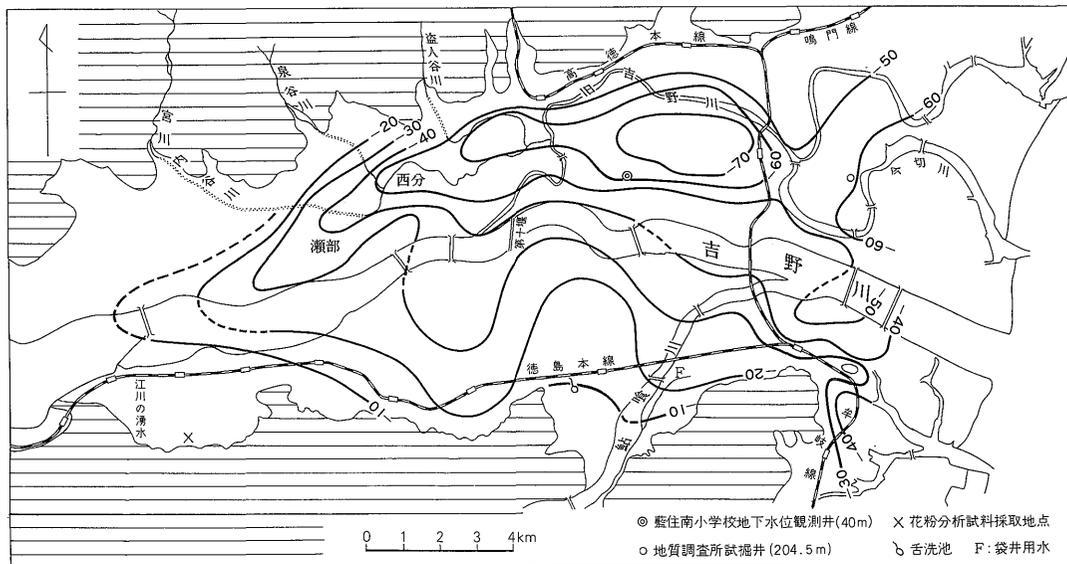
5.6.3 塩水化の概況

吉野川河口左岸地帯における被圧地下水が南海大地震によって塩害を受けたことは、速水ら(1950)によって報告されているが、当地区の地下水開発がほとんど行われていなかった1953-1955年の地下水調査によると、海岸地帯にはすでに塩水が存在していた(工業用水調査グループ, 1956)。すなわち、勝浦川河口から新町川河口にかけての海岸地帯の被圧地下水は、一部を除いて塩水であり(徳島大学工学部構内の試験井は28.80-44.24m(C層), 54.84-59.00m(E層)を採水層とし、1956年の揚水試験時のCl⁻977-1200mg/l)、旧吉野川河口地帯の被圧地下水はCl⁻1000mg/lを超えていた。

また、地質調査所の前記試掘井(採水深度180-195m)は、Cl⁻約5000mg/l、その近くにある90-105mの地下水はCl⁻約700mg/lであった(村下ら, 1963)。

揚水井戸が塩水化した事例の一つに、鳴門市北島水源井がある。井戸は今切川が分流する地点より少し上流側の旧吉野川左岸にあって、C層を採水層とした。水道課の記録によると、Cl⁻は1957年4月から1年の間は30-45mg/lであったが、1958年5月に75mg/l、6月には100mg/lを超えて9月に140mg/lとなり、翌年3月まで同じ値が連続している。

第31図は、本地区の地下水調査開始時から1979年まで



第30図 徳島平野における地下谷の存在を示すC層下限等高線

のC層への塩水侵入の傾向を継続的に示したものである。

塩水侵入が顕著となり、地下水利用者が水質の悪化に気付いたのは1964年頃であった。塩水は、図に明らかのように、地下水の汲上げが集中している今切川の中流部へ向かって「くさび」状に侵入している。そして、1974年までは、今切川下流部で塩分が増加するのに対して、上流部での増加はそれほど大きくなかった。しかし、1970年まで図示できた $Cl^- 10 \text{ mg/l}$ の等値線は、1974年には図からは消え、1979年には塩水が吉野川沿いに遡上する傾向を示し、従来とは異なった塩化物イオンの分布を示している。なお、 $Cl^- 10 \text{ mg/l}$ の等値線が旧吉野川沿いにあるのは吉野川系地下水、吉野川寄りにあるのは結喰川系地下水の分布範囲を示していて、前者は1963年以降図に現れないが、後者は1970年まで吉野川・今切川を横切って揚水域に延びていた。

5.6.4 考察

塩水化地下水の水質と塩水の起源について、池田(1979)は次のとおり考察している。すなわち、

(1) C層の塩水は $Ca \cdot Mg > Na$ 、E層の塩水は逆に $Na > Ca \cdot Mg$ で、この特徴は帯水層の粘土鉱物と海水とのイオン交換によって生じたもので、侵入塩水の起源は海水か海水に類似した塩水である。

(2) 地下水中のトリチウム濃度は第3表のとおりで、藍住町一帯ではC層・E層の淡水が同年代でかつごく最近涵養された地下水であること、海岸近くでは $Cl^- 1500\text{--}5000 \text{ mg/l}$ の塩水の年代が古いこと、 $Cl^- 1000\text{--}$

1500 mg/l の地下水は上記淡水と塩水の間中値を示している。

3) これらの結果から、本地区における塩水化は、内陸部での地下水位低下によって、元来海岸地帯に存在していた古い塩水が内陸部へ侵入した結果である。

本地区の塩水化の原因に、水質の考察であげた地下水の汲上げに起因する水位低下と、井戸の構造に起因する塩水汚染との二つがある(村下, 1964)。水位低下は本地区全体の問題であり、水井戸の欠陥は揚水井自体の問題であるがこれは塩水化発生初期にみられた現象であった。

なお、説明の都合上、吉野川左岸を北岸地区、右岸を南岸地区と仮称する。両地区の主要採水層はC層で、井戸密度が高いのは北岸地区では今切川沿岸、南岸地区では徳島市街地の西部である。

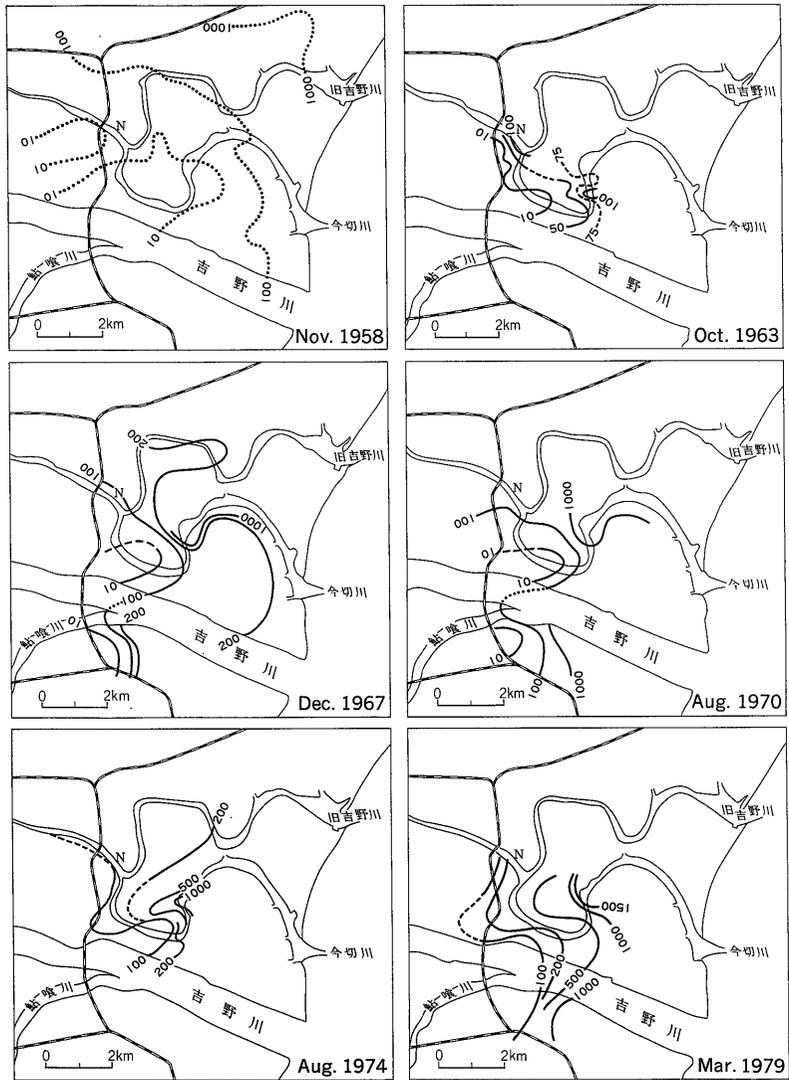
1) 汲上げ量

工業用地下水の汲上げ量は、概略第4表のとおり変動している。

これに水道水源を加えると、1975年と1979年の汲上げ量は $283700 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $187800 \text{ m}^3/\text{d}$ となる。

四国通商産業局(1969)によると、C層の安全揚水量は約 $87600 \text{ m}^3/\text{d}$ であるから、1966年当時の汲上げ量は安全揚水量の2.5倍強で、明らかに汲上げ過剰の状態であった。このことは、第31図のとおり揚水井が海岸寄りから塩水化し、北岸の徳島市川内町の淡水面積が年々縮小していることから裏付けられる。

1969年に設立された吉野川下流地域地下水利用対策協議会は、塩水化防止対策のために工業用地下水の汲上げ

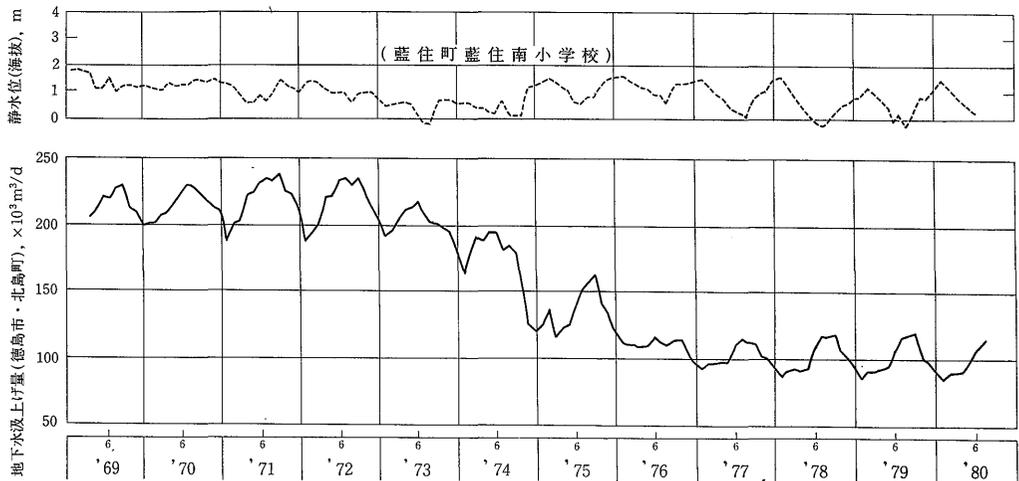


第31図 徳島平野における海水侵入 (図中のN: 鳴門市旧水源井; 数字と単位: 塩化物イオン, mg/l)

第3表 吉野川下流域における被圧地下水のトリチウム濃度 (測定: 学習院大学木越研究室)

水試料採取地点	採取年月日	Cl ⁻ , mg/l	トリチウム濃度 T.U.
藍住町のC層 (淡水)	Nov. 9, 1976	4.2	30.8 ± 3.9
同 E層 (〃)	同	5.4	36.4 ± 4.7
北島町のC層 (塩水)	Oct. 28, 1975	1670.4	10.9 ± 1.4
徳島市川内町 C層 (〃)	Feb. 21, 1978	3085.0	0.14 ± 0.09
松茂町 C層 (〃)	同	5010.0	< 0.06
徳島市前川町 C層 (〃)	同	1411.2	4.92 ± 0.66
同 北沖洲町 C層 (〃)	同	1517.4	0.04 ± 0.07

本邦における地下水の塩水化 (村下敏夫)



第32図 徳島地区における被圧地下水位と汲上げ量(工業用)の経年変化 (徳島県資料による)

第4表 徳島地区における工業用地下水汲上げ量

年次	北岸地区 (m ³ /d)	南岸地区 (m ³ /d)	合計 (m ³ /d)
1953年頃	約 50 000	約 15 000	約 65 000
1960年頃	約 150 000	—	約 150 000
1966年	200 000	23 000	223 000
1972年	177 100	40 800	217 900
1975年	123 600	49 400	173 000
1979年	77 200	44 900	122 100

削減を計画し、1976年を第一次目標として北岸地区で72 600 m³/d、南岸地区で26 000 m³/dとすることを申し合わせて、設備の改善、工業用水道の導入等による削減の努力がなされた。第32図は、本地区における工業用地下水汲上げ量の経年変化を示したもので、1976年以後の汲上げ量は1970-1972年頃の約1/2に減少した。しかし、経済不況のために地下水汲上げ量の削減は目標に到達しなかったが、後述のとおり地下水位の上昇と、それに伴い塩水侵入が一時鈍化し、淡水化の徴候があった。

2) 地下水位の低下

高德本線から東側の海岸地帯におけるC層は、1960年以前には自噴水圧を有し、特に川内町にかんがい用の自噴井が多かった(工業用水調査グループ、1956; 村下ら、1963)。

北岸の藍住町にある深度40mの地下水位観測井(第30図参照)の記録によると、吉野川系地下水のC層水位は1959-1966年の間夏高冬低の自然変動の型を示した(村下、1979)が、その後は夏低冬高の変動型に変わった(第32図)。水位は上記の期間で約1m低下し、1966年以降

さらに1mほど低下している。

この観測井の周辺には夏高冬低の自然変動型を乱すほどの大量の汲上げを行っている井戸群はないので、夏低冬高の型に転じたのは高德本線より下流における過剰汲上げの影響によるものと考えられる。

地下水位の低下はまた、河床の低下にも起因している。鴨島町の江川湧泉は、夏に最低(9℃程度)、冬期に最高(22℃程度)となる異常水温現象を示すことで県の天然記念物に指定されているが、最近では水温差が小さくなり(例えば筆者の測定では1958年8月に13.1℃、1974年8月に16.6℃)、指定解除の動きもある。この原因には、吉野川の砂利採取により堆砂礫が少なくなったことが指摘されている。

南岸の鮎喰川扇状地の自由地下水面は、1957-1979年の12年間に約2m低下した。これも川砂利の採取による河床低下で、水面が高かった当時に存在していた舌洗池などの扇端泉、右岸の袋井用水の源泉(第30図参照)は、現在涸渇の状態にある。

3) 揚水井の欠陥

北岸の海岸地帯で利用できる淡水層は60m以浅のC層だけであるから、地場産業は同層を採水層とする単層採水井戸を完成させたが、1960年前後に進出した工場はより多くの揚水量を求めて下位のE層も採水層とする多層採水井戸を新設した結果塩水の井戸とした。下位層が塩水層であるから、淡水井戸に改善する工事は比較的容易であったが、完全に遮水することは技術的に困難で、工事直後は一時塩化物イオンが減少したものの、再び塩水井戸と化した。

4) 塩水化防止の問題点

本地区における工業用地下水の汲上げ量は、1979年実績で夏期に日量最大143 500 m³、冬期に最小10 700 m³であった。第一次削減の努力によって、藍住町の観測井水位(第32図)は安定し、揚水域にある観測井の水位は最低を示した1973年に比べて1979年には約2 m(平均値)上昇した。その結果、今切川中流部において顕著であった塩水侵入が鈍化した。しかし、高德本線以西の吉野川沿いに淡水魚の養殖池が年々増設され、最近では工業用地下水の削減量に見合う水量をC層から汲上げている。

このため、地下水位が海寄りの塩水侵入域で高く、内陸の揚水域で低い状態になって、塩水は1979年から高德本線を越えて養殖池の方向へ侵入する傾向をみせている。

6. 塩水化域及び塩水層

前章で説明した地下水の塩水化地域のほかに、地下水調査に基づいて報告された塩水化地域、塩水層が存在する地域が数多くある。これらを一つの表にまとめ、簡単な説明を加えたのが、第5表である。

この表に掲げた地区は、

- 1) 最近の地下水調査によって、塩水化の実態が明らかになった地区、
 - 2) 既往の文献で紹介されている塩水化域、
- を主としているが、
- 3) 塩水層が、よく開発されている淡水層に隣接して存在し、地下水汲上げによって水位が低下すると塩水層からの塩水汚染によって淡水層の水質が悪化する恐れがある地区、
 - 4) 塩水層が大部分を占めるために、塩水化を起こさないで淡水層を開発することが困難な地区、
- も含まれている。ただし、石油・天然ガスに附随する塩水が分布する地区は原則として除いた。

表中の「塩水化の概況」の説明で、

1) 地下水の汲上げに起因する海水侵入は、集中的な汲上げによって内陸側の地下水位が海面より下がり、その結果動水勾配の逆転によって海水が淡水層へ侵入して水質が悪化していることをいう。そして、

2) 揚水による水位低下に起因して、上位または下位の塩水層から塩水が垂直移動して淡水層を汚染することは区別している。

次に、表中の「対策」の説明で、

1) 自主規制は、その地域の地下水利用者が塩水化等の地下水障害を防止する目的で、地下水利用対策協議会を結成して、水井戸の新設・廃止、揚水量の調整等によって地下水管理を行うとともに、地下水位・塩化物イオンの定期観測を継続していることをいう。

2) 工業用水道(への転換)は、地下水汲上げ量の削減に伴い、公営工業用水道水を使用していることを指す。

3) 地下水に関する法律には、工業用水法⁴⁾(昭和31年法律第146号、昭和37年5月法律第99号)と建築物用地下水の採取の規制に関する法律(昭和37年法律100号)とがある。本表では、工業用水法の指定地域だけを示し、同一地域を二つの法律が指定地域としている場合も工業用水法に係わる地域とした。また、指定地域は、法律の建て前から、工業用井戸を休・廃止して工業用水道への転換を行っているのを、表には「工業用水法」とのみ記載して指定地域を含ませた。

したがって第5表は、現在我が国で発生している地下水の塩水化、地下水開発への指標としての塩水層の存在、塩水化防止対策として実行されている条例・自主調整等の措置についての情報を提供している。

我が国における地下水塩水化の機構については第4章で記述した。第5表に基づいて、各地下水域を機構ごとにまとめると、次のとおりである。

1) 総括的にいえば、大規模な塩水化は、水理学的に、海洋と関係がある淡水層からの汲上げによる動水勾配逆転の型である。そして、海岸線の近くまたは海岸線からある距離隔ったところで、被圧地下水を大量に継続して汲上げた結果発生する海水侵入がもっとも一般的な型である。この型の海水侵入は、現在だけでなく将来でも地下水の汲上げが増大すれば発生する可能性が大きい。

2) 被圧地下水の大量汲上げは、高度に都市化した地帯での冷房用(豊橋)、工業地帯での工業用(釧路・函館・八戸・東京・富士・富山・高岡・姫路・徳島)、淡水魚の養殖用(吉田・竜洋・浜松・徳島・阿南・那賀川)のために行われている。これに加えて、地下水の補給源である天水・地表水の地下浸透量が減少しているために、塩水化が助長されている。例えば、都市においては下水道によって天水が排出され、背後地の水田地帯は都市化、水稻栽培の減反、かんがい水路のコンクリートによる三面張り等によって、かんがい用水による地下水涵養能力が以前に比べて衰弱している。これらのことが複合して、水理学的の不均衡が存続し、塩水化が増大する傾向にある。なお、この型の代表例は、前章で詳述した。

3) 新しく港・掘込水路を建設したために不透水層が破壊されて海水侵入が発生した事例は、八戸・鹿島・富山

4) 新法の目的(第1条)は「この法律は 特定の地域については工業用水の合理的供給を確保するとともに 地下水の水源の保全を図り もってその地域における工業の健全な発達と地盤の沈下の防止に資することを目的とする。」と定められ、塩水化防止対策を主目的としていないが、指定地域が塩水化域であるところでは工業用水道の建設によって、地下水の汲上げが制限されているので、間接的に塩水化防止に役立っている。

本邦における地下水の塩水化（村下敏夫）

第5表 塩水化域と防止対策

番号	地区名	塩水化の概況	対策	番号	地区名	塩水化の概況	対策
1	釧路・白糠	海岸地帯で集中的な地下水汲上げに起因する海水侵入（小原ほか，1973；札幌通商産業局，1977；山口ほか，1961） 釧路川等の遡上海（塩）水による地下水汚染（小原ほか，1973） 釧路湿原南東域に自噴圧を有する塩水層が存在（三谷ほか，1968；小原ほか，1973；鳥居ほか，1964；山口ほか，1961）	自主規制 工業用水道の計画	8	四ツ倉	在（森ほか，1966） 自噴圧を有する塩水層が存在（森ほか，1966）	
2	鶴川・千歳	鶴川地区（40m以浅），千歳・早来地区（30m以浅）に自噴圧を有する塩水層が存在（山口ほか，1963）		9	酒田	酒田港背面の砂丘，沖積低地に塩水層（仙台通商産業局，1980），または塩水に近い地下水が存在（森ほか，1962b）	
3	函館	市街地及びその周辺の海岸地帯で80m以浅の帯水層に地下水汲上げに起因する海水侵入（小原ほか，1966）		10	鹿島	鹿島港の掘込水路沿いの自由面地下水が塩水化，30-40m以深に被圧塩水層が存在（茨城県，1980；東京通商産業局，1974a）	工業用水道
4	八戸	馬淵川右岸の海岸地帯で集中的な地下水汲上げに起因する海水侵入が1961年から発生（森ほか，1964；仙台通商産業局，1978） この地帯の基盤岩は高温塩水層で，上位淡水層の揚水に伴い垂直浸透して塩水汚染（青森県，1980；仙台通商産業局，1978）	工業用水道への転換と自主規制	11	竜ヶ崎	新利根川沿いに被圧塩水層が存在（島田ほか，1952）	
5	小牛田	小牛田・田尻・鹿島台・南郷の深度60-170mに自噴圧を有する塩水層が存在（藤田，1966；森ほか，1962a）		12	佐原・銚子・九十九里	佐原・東庄（菅野ほか，1964）及び銚子・旭（安藤ほか，1963）に被圧塩水層が存在。九十九里の海岸地下水は塩水（安藤ほか，1961）	
6	塩釜・仙台	海岸地帯の沖積層地下水は塩水（奥津ほか，1961；Okutsu，1972） 沖積平野下の更新統蒲生層，中新統七北田層の一部と多賀城層は塩水層（藤田，1967；小西ほか，1962；奥津ほか，1961；Okutsu，1972；仙台通商産業局，1977）	仙台平野の一部に工業用水法	13	館山	被圧塩水層が存在（岸ほか，1966）	
7	岩沼	岩沼・角田・大河原・山元に自噴圧を有する塩水層が存		14	千葉	臨海部の埋立地で1965年頃から地下水汲上げに起因する海水侵入（高村ほか，1976） その北方の千葉中央地区で1979年頃から塩水混入の兆候	工業用水法 専用工業用水道
				15	東京江東	墨田区南部から江東区一帯は被圧地下水の汲上げに起因する塩水化（工業用水調査グループ，1957a；蔵田ほか，1958b）	工業用水法
				16	東京城南	目黒川以南の臨海部に被圧塩水層が存在（蔵田ほか，1958c）	
				17	川崎	1933年頃 海岸地下水は塩水（日本鑿泉探鉱（株），1936）。その後古多摩川河道で被圧地下水の集中汲上げにより第2京浜国道以東の海岸地帯が塩水化（川崎市，1967；工業用水調査グループ，1957b；永井ほか，1976） 下位の三浦層群は溝ノ口以東で塩水。同層の揚水により	工業用水法 鹿島田地区の工業用井戸群の揚水停止により第2京浜国道周辺が1975年から淡水化

第5表 つづき

番号	地区名	塩水化の概況	対策	番号	地区名	塩水化の概況	対策
18	平塚・寒川	下層から高塩水が浸透して塩分増加(川崎市, 1967; 工業用水調査グループ, 1957b)		26	長野	化(国土庁, 1979)	り1974年頃から淡水化の兆候
19	佐渡	寒川では100m以深, 平塚では80m以深に塩水層が存在(小川ほか, 1965; 高橋ほか, 1961)		27	御代田	篠ノ井の80m以深に被圧塩水層(Cl ⁻ 550 mg/l)が存在(東京通商産業局, 1975)	
20	上越	小木の海岸に近い井戸に揚水に起因する海水侵入(新潟県, 1973)		28	富士	70mの井戸水にCl ⁻ 230.5 mg/l(高橋ほか, 1974)(浅間山麓の泉のCl ⁻ 7.0mg/l程度)	
21	黒部	直江津西海岸で水位低下に起因する海水侵入が1963年頃発生。漸次市街地へ移動, 現在消雪に使用している地下水(G ₂ ・G ₃ 層)と良質のG ₄ 層の一部が塩水化(水島ほか, 1978; 東京通商産業局, 1967)	自主規制 工業用水道への転換	29	富士川・蒲原	和田川以西の富士火山溶岩層に集中汲上げにより海水侵入が1960年から発生(三井, 1965; 村下ほか, 1967; 村下, 1974; 村下, 1977; 尾崎, 1978; 矢田, 1970; 山崎ほか, 1966)	自主規制 工業用水道への積極転換により一部海岸近くまで淡水化
22	富山	更新統基底礫層(G ₅)のCl ⁻ 100-150 mg/l(東京通商産業局, 1967)		30	清水	浮島原の100m以浅に被圧塩水層, 下位淡水層の揚水により垂直浸透して塩水汚染(村下ほか, 1967; 村下, 1974; 村下, 1977)	
23	高岡・新湊	天然ガス井廃坑処理が不十分なためにガス付随塩水が上位淡水層の一部を汚染		31	焼津	富士川右岸低地の集中汲上げに起因して1970年頃から海水侵入	自主規制 海上げ量の一部削減に伴い淡水化の兆候
24	七尾・羽咋	黒部川河口部の浅い地下水に海水侵入(名古屋通商産業局, 1978)		32	吉田	巴川沿いの被圧地下水が塩水(蔵田ほか, 1956; 村下, 1974; 東京通商産業局, 1974b)	工業用水道 自主規制
25	敦賀	富山港の近くで, 神通川の水遡上, 水位低下等により被圧地下水に海水侵入(名古屋通商産業局, 1976)	自主規制 工業用水道			興津川河口で食品加工場の地下水汲上げに起因する海水侵入が季節的に発生(村下, 1974; 東京通商産業局, 1974b)	
		小矢部川沿いでの集中汲上げにより被圧地下水に海水侵入(蔵田ほか, 1955; 名古屋通商産業局, 1972)	自主規制 工業用水道への転換により高岡では淡水化の兆候			三俣半島の砂丘地下水は農業用の汲上げにより塩水化(岡部, 1967; 東京通商産業局, 1974b)	
		高岡市街地南部の180m以深に被圧塩水層が存在(名古屋通商産業局, 1972)				瀬戸川河口地帯に自噴圧を有する塩水層が存在(村下, 1974)	自主規制
		射水平野に被圧塩水層, 新湊での地下水汲上げにより塩水移動(蔵田ほか, 1955; 名古屋通商産業局, 1972)				坂口谷川河口地帯に養鰻用被圧地下水の汲上げにより1975年頃から海水侵入, 塩	自主規制
		被圧塩水層が存在(野間ほか, 1970)					
		地下水汲上げによる自噴圧低下により1970年頃から塩水	被圧水頭の回復によ				

本邦における地下水の塩水化（村下敏夫）

第5表 つづき

番号	地区名	塩水化の概況	対策	番号	地区名	塩水化の概況	対策
33	大須賀	水化域は汲上げ量の変動によって消長（村下, 1974） 弁財天川河口地帯に養鰻用被圧地下水の汲上げにより1970年頃から海水侵入。塩水化域は内陸へ向かって拡大（村下, 1974）		39	木曾川河口	木曾三川合流地点付近以南の第1帯水層が海水侵入によって塩水化（杉崎ほか, 1961）	
34	磐田・福田	海岸地下水は1969年頃から塩水化（村下, 1974；東京通商産業局, 1972） 天竜川河口地帯に養鰻用被圧地下水の汲上げに起因する海水侵入（村下, 1974；東京通商産業局, 1972） 福田町から磐田台地にかけて被圧塩水層が楔状に分布（森ほか, 1955；村下, 1974；東京通商産業局, 1972）	自主規制 工業用水道の計画	40	桑名	海岸地帯に塩水層が存在（蔵田ほか, 1953b）	
35	浜松	被圧地下水の塩水化は馬込川の河口近くで1953年頃すでに発生（千野, 1964；蔵田ほか, 1954；村下ほか, 1962；村下, 1974；東京通商産業局, 1968） 天竜川河口地帯での被圧地下水塩水化は1969年頃から発生（村下, 1974） 三方ヶ原台地南方低地に養鰻用被圧地下水の集中汲上げに起因する塩水侵入（村下, 1974；東京通商産業局, 1968）	自主規制 工業用水道への転換	41	四日市	海岸地帯の100m以浅の地下水汲上げにより海水侵入（蔵田ほか, 1953b）	工業用水法
36	浜名湖岸	養鰻用被圧地下水の汲上げによる塩水侵入（村下, 1974）	自主規制	42	松阪	海岸地帯に塩水層が存在（蔵田ほか, 1953b）	工業用水道
37	豊橋	市街地の40-50mの地下水の集中汲上げにより海水侵入（小林, 1973；名古屋通商産業局, 1980） 180m以深に塩水層、上位淡水層の水位低下に伴い垂直浸透による塩水汚染（名古屋通商産業局, 1981）	工業用水道	43	京都	右京区・中京区に比較的塩分が多い被圧地下水、深くなると増加（小西ほか, 1960）	
38	名古屋	名古屋港の近くで70m以浅の被圧地下水へ1940年頃から海水侵入（工業用水調査グループ, 1958b）	工業用水法	44	奈良	葛城川流域に比較的塩分が多い被圧地下水が存在（高橋ほか, 1965）	
				45	大阪	西大阪・東大阪の寝屋川流域・神崎川流域の上部更新統は被圧塩水層（岩津ほか, 1960；工業用水調査グループ, 1958a；TSURUMAKI, 1962a；鶴巻, 1962b；鶴巻, 1967） 北摂の高槻市内の110-180mに被圧塩水層（長沢, 1971）。 枚方市の180m以深に被圧塩水層が存在（村下ほか, 1958） 泉州の海岸地帯に地下水汲上げに起因する海水侵入（村下ほか, 1958；大阪通商産業局, 1970）	工業用水法
				46	和歌山	紀ノ川河口地帯に被圧塩水層が存在。左岸河口の被圧地下水は和歌山港の建設に伴い1939年頃から塩水化。市街地の被圧淡水層は南海大地震、汲上げ量増加に起因して1953年頃から塩水化（尾崎ほか, 1959）	工業用水道
				47	尼崎	100m以浅の海岸地下水が塩水化（蔵田ほか, 1957）	工業用水法
				48	西宮	40m以浅の海岸地下水に南海大地震による地盤沈下、地下水汲上げに起因する海水侵入（蔵田ほか, 1963）	工業用水法
				49	神戸	海岸地下水に集中的な汲上げ	工業用水道

第5表 つづき

番号	地区名	塩水化の概況	対策	番号	地区名	塩水化の概況	対策
50	明石	に起因する海水侵入。兵庫港周辺の塩水化域が大きい(村下ほか, 1965) 工業用地下水の汲上げに起因する海水侵入。180m以深に被圧塩水層が存在(大阪通商産業局, 1968)	自主規制	59	広島	(Cl ⁻ 4 000-8 600mg/l) (渡辺ほか, 1957) 市街地の被圧地下水は塩水化(本間ほか, 1960) 瀬野川河口地帯の被圧地下水は1959年頃から汲上げによる塩水化(広島県, 1955)	水道
51	高砂	海岸地下水は塩水(兵庫県, 1963)	工業用水道	60	大竹・岩国	海岸地下水は塩水(山口県山陽道の海岸地下水はほとんど塩水)(蔵田ほか, 1959)	河口に防潮堤を築造して集水埋渠方式による公営・自家用工業用水道
52	姫路	山陽電鉄網干線以南の被圧地下水が築港, 汲上げ量増加に起因して塩水化(兵庫県ほか, 1965; 大阪通商産業局, 1981)	工業用水道	61	徳島・小松島	吉野川北岸の海岸地下水は南海大地震に伴う地盤沈下(速水ほか, 1950), 工業用・養魚用被圧地下水の汲上げにより塩水化(池田, 1979; 工業用水調査グループ, 1956; 村下ほか, 1963; 村下, 1979; 四国通商産業局, 1969) 吉野川南岸から勝浦川河口までの海岸地下水は塩水, 小松島港近くの基盤岩に自噴圧を有する塩水(工業用水調査グループ, 1956)	自主規制 工業用水道
53	赤穂	海岸平野の被圧地下水は, 揚水により海水侵入と下位塩水層からの垂直浸透により塩水化(兵庫県ほか, 1965)		54	津名(淡路島)	地下水の過剰汲上げにより断層を通じて基底礫層に塩水が侵入して1968年海岸より1.8km内陸の水道水源を汚染(清水ほか, 1975)	基底礫層を埋戻して淡水化 現在揚水位を海面上に保って淡水汲上げ
55	鳥取	千代川下流の被圧地下水が塩水, 温泉水による汚染も考えられる(鳥取市, 1960)		56	岡山	西大寺の海岸地下水は南海大地震による地盤沈下と河道沿いの塩水遡上に起因して塩水化(蔵田, 1960) 岡山平野の地下水は塩水(蔵田ほか, 1953a)	工業用水道
56	岡山	西大寺の海岸地下水は南海大地震による地盤沈下と河道沿いの塩水遡上に起因して塩水化(蔵田, 1960)		62	阿南・那賀川	阿南市では国鉄牟岐線以東, 那賀川町では海岸の被圧地下水に養魚用汲上げに起因する海水侵入が1970年頃から発生(工業用水調査グループ, 1956; 村下, 1979; 尾崎, 1979)	阿南に工業用水道
57	倉敷	高梁川河口地帯の被圧地下水は塩水。本川の河床低下(吉岡, 1977)。被圧地下水の汲上げにより塩水が内陸へ移動。旧玉島水道組合(1914)の水源井(自噴)は1923年頃から塩水化, 1935年に使用停止	工業用水道	63	日和佐	水道水源井が日和佐川の河川改修の補償として上流に新設した農業用井戸の揚水によって夏期に塩水化(村下, 1979)	水源井を塩水化の恐れがない上流に移設する計画
58	福山・三原	海岸地下水に被圧塩水層	福山に工業	64	高松	香東川・本津川と詰田川・春日川・新川の河口地帯に地下水汲上げに起因する海水	自主規制

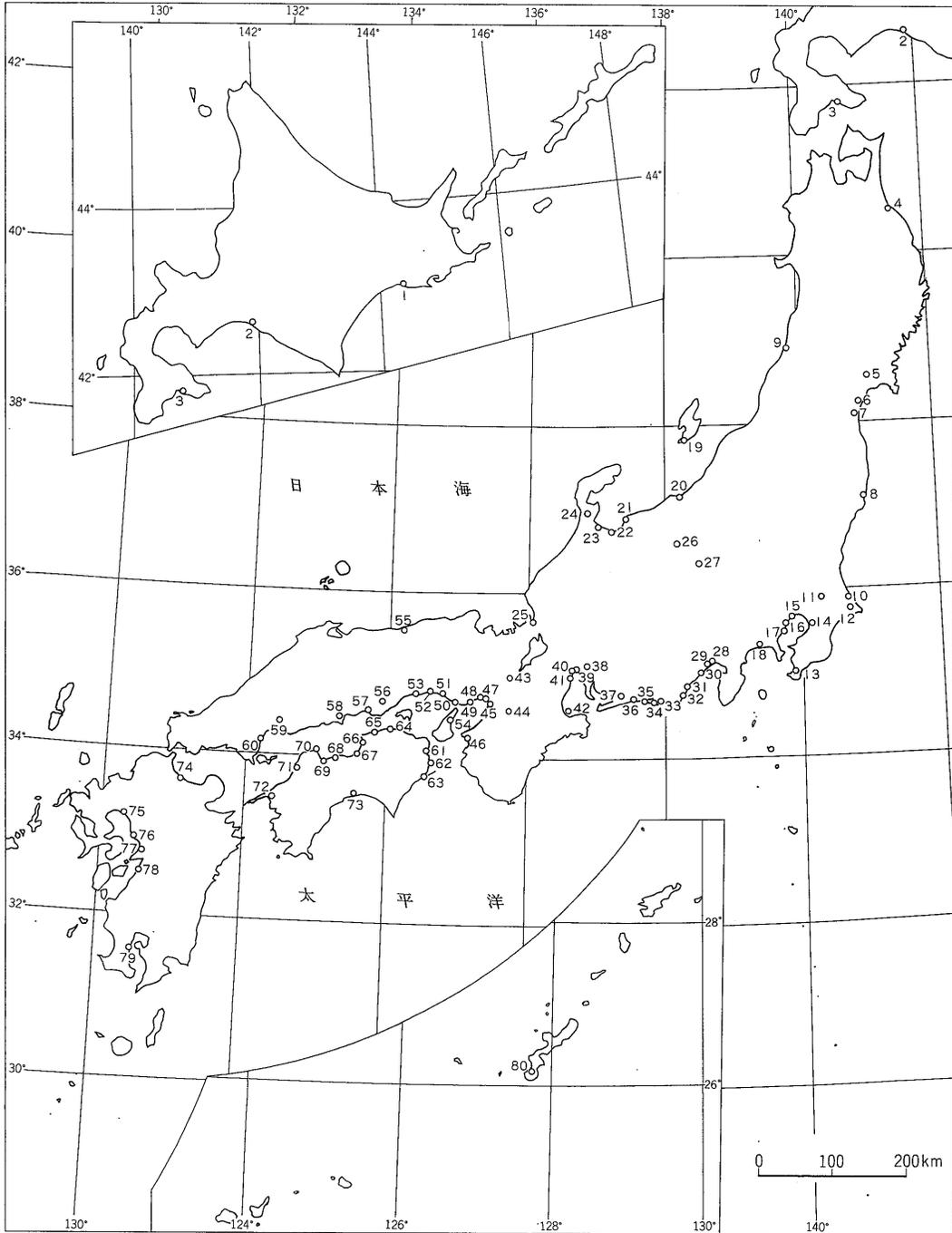
本邦における地下水の塩水化（村下敏夫）

第5表つき

番号	地区名	塩水化の概況	対策	番号	地区名	塩水化の概況	対策
65	坂出・丸亀	侵入（村下ほか、1961b；四国通商産業局、1976） 臨海部に被圧塩水層が存在（村下ほか、1961b；四国通商産業局、1973a）	自主規制 工業用水道			上に起因して沿岸の地下水が塩水化 浦戸湾東側の海岸砂丘で畑地かんがい用地下水の汲上げにより塩水化（清水、1965a）	
66	観音寺	海岸平野の基盤または基底礫層に1951年以降海水侵入（向井ほか、1969；村下ほか、1961b；四国通商産業局、1979；清水ほか、1965b）		74	豊前・吉富	海岸被圧地下水に汲上げにより1961年頃から海水侵入（高橋ほか、1964）	
67	川之江	金生川放水路の完成により1950年頃から川之江市内へ海水侵入（片岡ほか、1952；村下ほか、1956）	工業用水道	75	佐賀	筑後川下流部には100m以浅に被圧塩水層、同層を採水層として塩水井戸となった例が多い（福岡通商産業局、1974；村下ほか、1961a）	県東部に工業用水道
68	新居浜	国領川河口地帯の被圧地下水に集中的な汲上げによる海水侵入が1950年頃から発生（蔵田、1960）、1970年に海岸線から500-700mの範囲が塩水化	工業用水道	76	長州	臨海部の農業用井戸の一部に塩水化の兆候（尾崎、1967a）	
69	西条・壬生川	加茂川河口地帯では45m以深、中山川河口地帯では90m以深に被圧塩水層。工業用井戸の一部に塩水化の兆候（村下ほか、1956；四国通商産業局、1970）	工業用水道の計画	77	熊本	海岸平野に被圧塩水層が存在（尾崎ほか、1964）	
70	今治	海岸地下水は汲上げ量増加と蒼社川の砂利採取に伴う河床低下に起因して川からの補給量が大幅に減少して1951年から塩水化（村下ほか、1956）	工業用水道	78	八代	海岸平野で100m以深に被圧塩水層。被圧淡水層は水位低下に伴い海水侵入と塩水層からの垂直浸透に起因する塩水化（福岡通商産業局、1980；蔵田ほか、1958a）。琢磨川の河川改修により河口では地下水塩水化	工業用水道
71	松山	重信川以北の海岸地下水は塩水。以南の海岸被圧地下水は汲上げに起因する塩水化（蔵田、1960）	工業用水道井戸を上流に移設	79	鹿児島	甲突川河口地帯の被圧地下水は自噴圧低下に伴い1958年頃から海水侵入に起因する塩水化（鹿児島県、1963）	
72	保内	地下水汲上げ過剰による海水侵入（愛媛大学環境グループ、1973）		80	那覇・豊見城・西原・中城	深井戸の水は概して塩水（小西城ほか、1970）	
73	高知	鏡川及び久万川河口の被圧地下水は水位低下により1961年頃すでに塩水化（高橋ほか、1968） 鏡川の河川改修により塩水遡	工業用水道				

注) 文献の中には、塩水を化石水と表現しているものもあるが、「塩水」の項で説明したとおり、その塩水が「化石水」の定義に入るものか、地質時代の海（塩）水が現在に引継いで陸水によって稀釈されているものか、という本質的考察がなされていないのが多い。したがって、本表では単に塩水層という表現で取扱った。

- ・和歌山・姫路・新居浜等である。
- 4) 井戸新設の際に、不透水層への措置を誤って塩水井戸となった事例は、海岸埋立地に多い（千葉・豊橋）が、上位層が塩水層であるところ（富士・佐賀）でもみられる。しかし、塩水井戸を揚水しているかぎりでは隣接井戸へ塩水が移動することはない。
- 5) 川砂利採取・ダムの築造・河川改修等により河床が



第33図 本邦における塩水(化)域

低下した結果、河口地帯で塩水が河道に沿って遡上して、沿岸の地下水が塩水化した事例は、釧路・八戸・浜松・富山・倉敷・海田市・徳島・阿南・日和佐・今治・高知等にある。

6) 淡水層に隣接して塩水層が存在する地区で、塩水層を淡水層と誤認した結果塩水井戸が出来た事例のうち、上位が塩水層の例は豊橋・上越・佐賀、下位が塩水層の例は千葉・平塚・磐田・明石・高松・徳島・八代にあ

る。また、塩水層を採水層とはしなかったが、強力な揚水によって塩水層からの漏水を誘発し、結果として塩水化した例は富士にある。天然ガスの廃坑処置を誤って塩水汚染を起こしたと考えられる例は上越にある。

次に塩水を利用している事例には、二つの場合がある。

1) 地質時代の塩水層を、特に水質を問題としない魚加工などの洗じょうの用途、水温が恒温かつ低温であることを必要条件とする冷却用途などに、あるいは他に淡水源を求めることがきわめて困難な場合に利用している地区に釧路・仙台・焼津・福田・浜名湖沿岸がある。塩水層に自噴状態のものが、釧路・小牛田・岩沼・四ツ倉・磐田がその例で、それらの塩水層は淡水によって長年月にわたって洗い出されている状態にあると考えられる。

2) かつての淡水層が完全に塩水化した後も塩水層を利用している地区は、養鱈池が多い遠州灘沿岸（大須賀町・舞阪町）、浜名湖西岸、那賀川下流地帯である。

7. 塩水化の防止対策と効果

7.1 一般的対策

我が国の海岸地帯には都市・工業が立地し、その発展・成長を支えてきた被圧地下水へ海（塩）水が侵入するという好ましくない地下水障害が発生して以来、その防止対策が多くの地区で立てられ、実行されていることは、第5表に示したとおりである。

一般に、塩水侵入の防止対策を講ずる場合には、その原因と侵入機構を事前に十分に研究しておかなければならない。しかし、塩水化は、(1)地下水の流動が緩慢であるから徐々に進行し、(2)広範囲にわたって塩水化した後ではその原因・機構を知ることがきわめて困難である、という厄介な障害である。したがって、所期の目的を達成するには、塩水化に関係ある地下水を一元化し、地下水利用者間の利害・思わくを越えて対策にあたることが原則であるが、現実には、地下水利用者間の利害、高額な設備改善費等が複雑に絡まり、対策の実行が消極的となり、その効果が薄い例が多い。

塩水化防止対策の基本は、もっとも多い地下水位の海高陸低という塩水化の状態を矯正することによって方策としては、

1) 内陸側の動水勾配を自然状態に戻す。そのためには、海岸線での地下水位が海面よりつねに高い状態に保たれるように、汲上げ量を削減する。

2) 海岸線の地下水位を海面より高めて、塩水が内陸へ侵入することを防ぐ。そのためには、人工地下水涵養の手法を用いて、海岸線に地下水嶺を作る。

3) 海岸寄りで常時揚水して極端な地下水位の低下帯を作り、そこまでの塩水侵入は許すが、内陸への侵入を阻止する、

等が考えられる。そして、現実に行われている内容は、

1)の方法では、汲上げ量削減のために代替水源としての工業用水道の建設、削減に協力するために地下水利用者による地域地下水の利用対策協議会の結成と活動、それを公的・政策的に支援する県条例の制定等によって効果があがりつつある。その好例は富士地区であって、後に紹介する。

2)の方法では、カリフォルニア州・マンハッタン海岸(LAVERYら、1955)の例がよく紹介されるが、我が国では注入水源と注水地帯の選択という初歩的段階で行政的・経済的制約をきびしく受ける。

3)の方法は特筆されていないが、天竜川・那賀川の左岸の海岸砂丘地で行われている淡水魚(主に鮎)養殖用地下水の汲上げの例である。ここでは、過剰ともいえる地下水汲上げによって塩水侵入を誘発しているが、その上流側は淡水の状態が保たれている。もし、ここでの汲上げ量が減少または皆無になると、塩水が上流の揚水地帯へ移動することは、実験によって証明されている(福尾、1972; 出井、1975)。先述の八戸・富士・浜松・徳島はその代表例である。

片岡・松岡(1952)が最初に報告した例は、川之江市の金生川放水路左岸で、深度数mの自由面地下水を汲上げたときに発生した塩水侵入である(第34図)。1949年に水がくさび状に侵入した地帯は井戸が集中したところであり、塩水化井戸を放棄して井戸の分散を図って揚水した結果塩水化域が拡大(1952)したことを表わしている。3)の方法は、その地域の地下水利用者が十分に理解し合った上で実行することが重要で、もし塩水侵入域での汲上げ量が減少あるいは井戸の位置に変更がある場合には、塩水の動向を注意深く監視しなければならない(村下・岸、1967)。

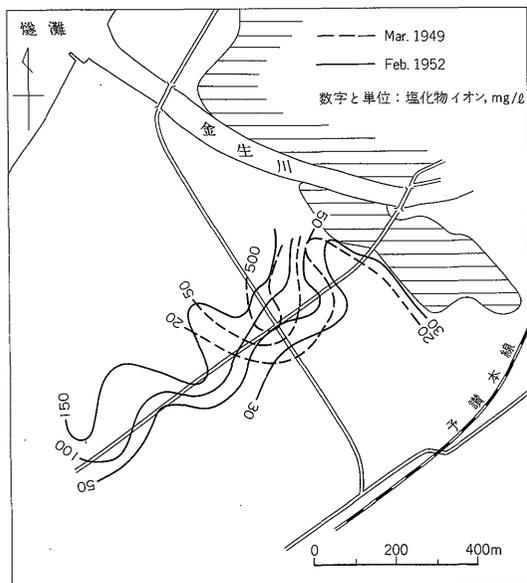
しかし、上記のいずれの方法を実施するにしても、効果を高めるには、既設井戸の汲上げに何らかの制約を加えて減少させる必要がある。

なお、井戸自体の欠陥によって塩水化した井戸を淡水化する措置は重要な塩水化防止対策の一つである。しかし、これは井戸自体の問題であって本報告の趣旨とは少し異なると考えられるので省略するが、技術的手法については報告がある(村下、1964)。

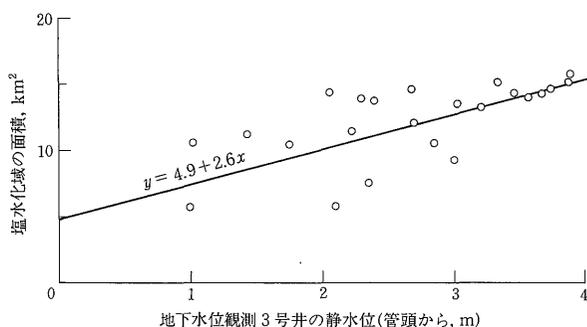
7.2 富士地区における対策と効果

7.2.1 対策の経過

富士地区における塩水化は、前述のとおり1972年以降



第34図 愛媛県川之江市金生川河口付近における塩水侵入(片岡・松岡, 1952. 一部修正)



第35図 富士火山溶岩層の静水位と塩水化域(Cl^- 500 mg/l 以上)の面積との関係(1966-1968)

ると塩水化域の面積が 2.6 km^2 増加し、水位が 1 m 回復すると面積が 2.6 km^2 減少することを示唆している。

また、地下水の汲上げ量は年を通してほぼ一定であるにもかかわらず、塩水化は夏(豊水)期に鈍化し、冬(渴水)期に進行するという観測結果(第18図参照)から、地下水補給量を安全揚水量とみなして、これに見合った汲上げ量に制限すれば塩水化の防止が可能であると判断されたことも、その背景にあった。

塩水化防止対策の経過を列記すると、次のとおりである。

1965年：通商産業省の地下水利用適正化調査が全国に先駆けて実施され、未開発帯水層の確認、一井あたり揚水量等の調査を兼ねた地下水位観測井が4本設置された。また、本地区における地下水の安全揚水量はA層とB層で約80万 m^3/d (塩水化が始まった1960年当時の汲上げ量に等しい)、D層とE層(ただし180m以浅)で約9万 m^3/d と試算された(山崎・村下, 1966)。

1967年：2月に岳南地域地下水利用対策協議会が設立された。協議会の事業の主目的は、地下水の塩水化を防止し、企業が一体となって地下水資源の保全を図り、認識を強化する一方、適正な利用に努め、善隣関係を積極的に推進することであった。組織は富士市全市を対象として日量500 m^3 以上の地下水使用者及び国・県・市・商工団体で構成された。主な活動は、地下水位観測、塩化物イオンの定期測定(毎月70本、ほかに不定期測定十数本)を行うとともにその結果を全会員に周知させ、新增設井戸については地下水取水基準によって審査し承認する手続きをとった。

新・増設井戸の基準は、ストレーナーの位置は150m以深とし、揚水量は井戸間隔300m以上のとき2500 m^3/d 、150-300m未満のとき2000 m^3/d 、100m以上150m未満のとき1500 m^3/d 、100m未満は禁止⁵⁾と定められた。

の地下水位回復によってようやく鈍化の傾向を示し始め、現在では海岸近くでも淡水化した深井戸が見られるまでに至った。その主対策は、地下水汲上げ量の削減と工業用水道の整備であり、事業所における水使用の合理化であった。また、市の財政を支えている製紙工場の懸命な塩水化防止対策に市民の積極的な協力があつたことも否めない。

しかし、塩水化が始まった当初から対策が講じられた、というものではなかった。塩水井戸が発見された1960年から翌年にかけての塩水侵入は田子の浦港のごく周辺に限られ、また夏期にはほとんどの井戸が淡水となったので、塩水化はごく一時的な、局所的な現象として受け止められた。しかし、冬期に再び塩水化と、その区域が驚くほどの速さで内陸へ拡大したので、その原因と防止対策がにわかに議論されるようになった。

そして、考えられる前記の対策方法とそれを実行する際の問題点を整理した結果、1)の方法すなわち、内陸側の動水勾配を自然の状態に戻すことが最善の策であるとの結論に達した。幸い、地下水位と塩化物イオンの定期観測結果から、地下水利用者の努力によって塩水化の防止が可能であるという判断材料がいくつかあつた。その一つに、静水位の変動と塩水化域面積との関係がある(第35図)。

この井戸は、海岸線から1.9 km 内陸にある、富士火山溶岩層を貫通する地下水位観測3号井戸(第15図参照)で、管頭は海拔4.2mである。同図は、水位が1 m低下す

5) 揚水機の吐出口断面の合計が21 cm^2 未満の井戸は、協議会の規約では「井戸」と定義されていないので、実質は揚水が可能である。

1971年：3月に静岡県地下水の採取の適正化に関する条例が制定され、7月から条例の適用を受け、既設井戸の届出が行われた。条例の指定地域は富士市の区域（国有林を除く）で、地下水の採取の基準は新設井戸に適用し、細分された区域内で井戸間隔は原則として300m以上とし、揚水機の吐出口断面積は52cm²以下（揚水量平均900m³/d）で、特に塩水化が著しい区域では19cm²（同300m³/d）以下と厳しく、軟弱地盤の浮島原では地盤沈下防止のためストレーナーの位置を150m以深と定めている。

1972年：6-10月に地下水を大量採取している事業所への立入調査が実施され、現有井戸の諸元及び揚水の実態が明らかになった。

1973年：4月に通商産業省より工業用水法の適用について県並びに市に意向を打診した。6月に水源転換計画の基本が確認され、7月に事業所別に工業用水道の給水の可否が調査された。

1974年：4月に水源転換基本計画、10月に実施計画が決定された。

1975年：2月に第一次水源転換が完了し、57事業所が日量25.4万m³の地下水を工業用水道に転換した。

富士市には工業用水道が二つある。一つは富士川工業用水道で、富士川の支川である芝川の表流水を水源として、取水量約18万m³/d（富士地区に約12.5万m³、吉原地区に約5.6万m³）で、1964年4月（吉原地区は1年遅れ）に給水を開始した。1976年12月の使用状況は給水先19事業所、使用水量日平均17.14万m³であった。

他の一つは東駿河湾工業用水道で、日本軽金属㈱・蒲原工場富士川第二発電所の発電放水（約500万m³/日）を水源とし、静清庵地区にも給水するが、富士地区172事業所に108.1万m³/dを給水する能力がある。完成は1975年4月であったが、1961年から一部給水を開始した。1976年12月の使用状況は、給水先72事業所、使用水量は日平均47.17万m³であった。

7.2.2 効果

1960年夏の塩水井戸発見以来、塩水化の実態調査が筆者らによって毎年行われ、塩水化が予測される事業所に対してはその都度塩化物イオンの定期測定の必要性和水井戸の管理を促した。これらのことを全事業所に周知させることができたのは、静岡県の要請に基づいて行った地下水利用適正化調査であった。同調査の結果は、岳南地域地下水利用対策協議会結成の原動力となった。このほかに得られた技術的成果は、次のとおりである。

1) 主力帯水層である富士火山溶岩層の下位に、水頭圧が高く、良質の帯水層の存在が確認され、工業用水道

が通水するまでの間、新・増設分の水源として活用された。

2) 多孔質溶岩層を掘抜くことがきわめて困難であったさく井技術が改善された。

3) 大口径の揚水機で日当り数千m³-1万m³近い揚水を行っていた井戸があったが、井戸の限界揚水量⁶⁾・安全揚水量の試算値は協議会の地下水取水基準の作成、工業用水道導入の基礎資料となった。

4) 地下水位観測井の口径を既設井と同じく300mmとしたのは、調査予算の面でさく井費の占める比率が大きくなったが、事業所の井戸管理を進める上で有力な説得材料となった。

協議会は静岡県条例が制定されるまでの間は任意団体であったから、団体への加盟や地下水取水基準の遵守を怠った事業所があったが、ほとんどが紙・パルプという同一業種であること、地下水塩水化は企業の死命を制する程深刻であったことから、その活動は活発であった。

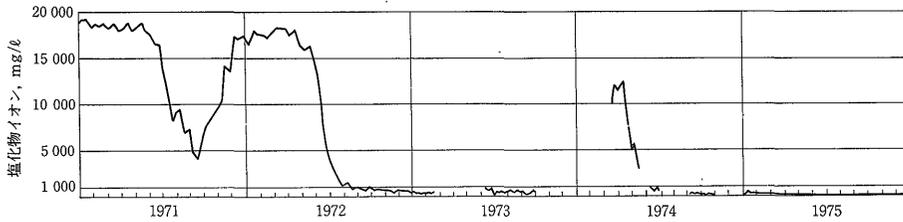
協議会が1967年2月14日から1970年8月末日までの間に承認した新設井戸の総数は67本（揚水量18.24万m³/d）であった。井戸新設の理由は、多い順から、塩水化による代替（32本）、新・増設（23本）、老朽化（10本）、河川水から地下水への転換（2本）であった。地区別では、今泉と田子、吉永、富士と鷹岡、原田、伝法、吉原、元吉原と須津の順（第24図参照）であった。深度別では、150m未満（19本）、150-200m未満（33本）、200m以上（15本）であった。このほかに、工業用水道が通水したときに転換する条件で承認された井戸が11本（揚水量2.21万m³/d）であった。

一方、廃止井戸が43本（揚水量11.04万m³/d）あり、その理由は大半塩水化によって使用不可能となったからである。

協議会の私的活動期間は約5年であった。その間に、新・増設井戸の届出・承認が公にされ、市民も広報活動を通じて塩水化対策に関心を持つにつれて、無届のさく井がなくなったことは、きわめて画期的なことであったといえよう。

県条例に基づいて新設が認められた井戸は1971年から1976年末までの間に総計28本であった。内訳は、工業用13本、生活用13本、清掃・かんがい用が4本で、大半が東名高速道路より高い富士山麓で掘さくされた。深度は101-150mが11本、40-100mと151-200mがそれぞれ8本、201m以上が1本であった。このように、井戸の新

6) 限界揚水量 (Critical discharge) は RORABOUGH (1953) が提唱した用語で、実用上井戸損失が無視されてもよいほど小さいときの揚水量の最大値という。この揚水量は、段階揚水試験によって求められる。



第36図 富士火山溶岩層の塩化物イオンの経年変化

設は条例施行前に比べて極端に減少した。

工業統計によると、従業員30以上の事業所において地下水使用量が工業用水に占める比率は、1971年に54%であったが、1973年には46%、1975年には38%と大幅に低下した。これに対して回収水は、1971年を100とすると、それぞれ185%、174%と伸び、工業用水道も同じく112%、150%と伸びた。

1976年3-4月における工業用地下水の汲上げ量は、岳南排水路の流量、工業用水道の使用量から推算すると日量約96-99万 m^3 であった。この数字は1973年の126万 m^3 に比べて27-39万 m^3 の減少で、2月に実施した地下水削減量に相当する。

地下水の汲上げ量が減少した結果、水位の回復(第20図)に伴って、塩化物イオンが減少した。第36図は、海岸線から1.2 km内陸にある富士火山溶岩層の塩水の動向を示したもので、塩化物イオンは1972年6-8月に急減し、以後漸減して、1976年にはほぼ淡水化した。

また、第19図に示したとおり、塩水化対策の効果が如実に現れたのは、富士火山溶岩分布地帯と滝川上流の原田で、かつての塩水はほぼ完全に淡水となった。しかし、潤井川の河口から沼川に沿う地帯では、 Cl^- 数千 mg/l が自噴状態で残存している。

淡水化を早めるには、自然湧出させた方がよいが、塩水がかんがい水路に流入する恐れがあるので、井戸は密閉されている(村下, 1976)。したがって、この地帯に残存する塩水が淡水化するまでには、相当の時間を要すると考えられる。

7.2.3 考察

地下水の塩水化防止対策として進められた工業用水道の完成に伴い、第一次の地下水汲上げ削減の実施計画立案にあたっては、内陸の地下水位を高めて海岸に向かって低くなる本来の動水勾配の形になるように転換を行うことが原則であった。そして、工業用水道の通水はほぼ計画どおりに終わり、予期した効果がえられたことは、すでに説明した。

工業用地下水の汲上げ量が削減できた理由としては、第一には代替水源の確保があげられるが、水位が工業用

水道への転換以前に回復している事実から、効果があらわれた背景には、次の社会的・経済的要因があったことも考えられる。

1) 田子の浦港のヘドロ問題に端を発した環境保全に関する種々の規制が行われた。特に産業廃棄物の投棄が困難となり、工場排水の水質基準に対する規制が厳しくなった。

2) 工場の専用排水路である岳南排水路の能力に限度があり、また、その使用料金は原水の取水量を基準としている。

3) 1973年以降の経済不況が長引いている。

4) 工業用水道の使用料金が値上げされた。

富士川工業用水道の料金は当初1 m^3 あたり3.3円であったが、4.3円となり、1976年には7.3円、また東駿河湾工業用水道の料金は4.5円、7円そして1975年には9円となり、1977年には14円と当初の3倍に値上げされた。その結果、事業所は余儀なく水使用の合理化を進め、設備の改善を行って、原水使用量の節減に努めてきた。

なお、塩水化防止対策の水源転換実施計画は、地下水の安全揚水量と生活用水等の需要量との見合で、転換量を日量56.1万 m^3 とし、東駿河湾工業用水道からの給水が可能な工場を第1次水源転換計画対象工場と定めて26.4万 m^3 を、水道の拡張工事に伴い給水可能となる時点で第2次として残りの29.7万 m^3 を転換することとした。この間、料金の高い工業用水を使用する工場と、低料金の地下水を使用する工場との格差を無くするために「共同賦課金」を地下水使用者に負担させている。この効果等については科学技術の対象分野ではないので、紹介に止める。

1977年、静岡県条例が全面改正され、本地区は「規制地域」に指定され、揚水井に水量測定器の設置が義務づけられた。これによって揚水量がより正確に報告されるので、地下水位観測・塩化物イオンの測定の資料、測候資料等に加えて解析すれば、本地区の水文地質条件に調和した地下水管理が可能になると考えられる。

8. 結 論

我が国における大規模かつ一般的な地下水の塩水化は海水の侵入に起因し、その主誘因は海岸地帯における被圧地下水の過剰汲上げである。このほかの誘因に、河口近くでの河床低下、海岸での港・掘込水路の建設、淡水層に隣接する塩水層の開発等があるが、いずれも自然環境を不用意に変えたところに本質的な原因がある。

塩水化防止対策にはいくつかの手法があるが、塩水侵入の機構を精細に検討した結果では、現在、地下水利用者が実行している揚水量の削減、工業用水道の積極的使用がもっとも効果ある対策法で、一部で満足すべき成果がえられているが、その実行には莫大な経費が必要である。

本報告で紹介した塩水侵入の事例は、その防止対策の検討のみでなく、将来にわたる地下水の積極的利用の基礎資料として役立つと考える。

なお、侵入塩水の根源である海岸地帯・内陸に存在する塩水の成因、現在進行しつつあるその淡水化の要因・機構等に関する検討など重要な事項が数多くあるが、これらは関連科学分野の協力によって注意深く行われなければならない。

文 献

- 安藤 武・森 和雄(1961) 茂原・東金地区工業用水源調査報告書. 千葉県, 20 p.
- ・菅野敏夫(1963) 九十九里地区地下水水源調査報告書. 千葉県, 23 p.
- 青森県(1980) 八戸地区地下水利用等基礎調査(解析編)報告書. 113 p.
- BADON GHYBEN, W. (1888, 1889) Nota in Verband met de Voorgenomen Putboring Nabij Amsterdam. *Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs*, The Hague, 21 p.
- 千野光芳(1964) 地表水・地下水. 浜松市地質調査報告書, p. 297-381.
- 地質調査所(1962) 徳島地区地下構造調査報告書. 79 p.
- 出井 紘(1975) 海岸地下水の塩水化について一揚水量分布と淡水境界面移動との関係一. 日本地下水学会誌, vol. 17, p. 30-46.
- 愛媛大学環境グループ(1973) 保内町の地下水について. 応用地質, vol. 14, p. 145-151.
- 藤田博志(1966) 地下水におけるストラクチャー・コントロールについて. 日本地下水学会誌, no. 10, p. 13-14.
- 藤田博志(1967) 仙台市街地における地下水位の低下と水質・水温の関連について. 日本地下水学会誌, no. 13, p. 24-26.
- 福尾義昭(1972) 被圧地下水の塩水化について. 一揚水分布変化と塩水化域との関係一. 日本地下水学会誌, vol. 14, p. 33-44.
- 福岡通商産業局(1974) 佐賀地区地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 185, p. 26-40.
- (1980) 八代平野南部地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 259, p. 34-56.
- 早船 元(1976) 群馬県敷塚台地における自由面地下水の塩水化について. 駒沢地理, no. 12, 別冊 p. 25-31.
- 速水頌一郎・国司秀明・田中要三(1950) 地盤沈下による海岸地下水の変動と塩害について. 防災研究所報告, no. 3, p. 36-46.
- HERZBERG, B. (1901) Die Wasserversorgung Eini-ger Nordseebäder, Munich. *Jour. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, vol. 44, p. 815-819, 842-844.
- 平田茂子(1969) 大間々扇状地の地下水. 地理学評論, vol. 42, p. 435.
- 広島県(1955) 安芸郡海田市町付近工業用水調査. 6 p.
- 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調査報告. 地調月報, vol. 8, p. 187-198.
- 本間一郎・比留川 貴・岸 和男・野間泰二(1960) 広島県太田川水系工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 11, p. 117-134.
- HUBBERT, M. K. (1940) The Theory of Ground-water Motion. *Jour. Geol.*, vol. 48, p. 785-944.
- 兵庫県・姫路市・赤穂市(1965) 西播地区各水系地下水調査報告書. 71 p.
- (1963) 加古川水系地下水調査報告書(その1). 98 p.
- 茨城県(1980) 茨城県地下水資源精査概要報告書(水文地質編). (未公表) 42 p.
- 池田喜代治(1967) 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. 地調月報, vol. 18, p. 393-411.
- (1968) 地下水の塩水化の実態と問題点.

- 水利科学研究所 水経済年報1969年版, p. 99-114.
- 池田喜代治(1979) 徳島県吉野川下流域における地下水塩水化の地球化学的考察. 日本地下水学会昭和54年度秋季講演会講演要旨, p. 10-13.
- 岩津 潤・鶴巻道二・市原優子(1960) 大阪市西部の地下水の水質とそれに関連する諸問題. 日本地下水学会会誌, no. 2, p. 23-36.
- 鹿児島県(1963) 鹿児島・谷山地区および出水・阿久根地区工業用水調査報告書. 77 p.
- 菅野敏夫・岸 和男(1964) 佐原周辺地区地下水水源調査報告書. 千葉県, 10 p.
- 片岡 恒・松岡文一(1952) 愛媛県宇摩郡川之江町井地付近地下水電気探査報告. 7 p.
- 川端 博・福尾義昭(1973 a) 海岸地下水の塩水化に関する研究. 昭和47年文部省科学研究費補助金による特定研究“水資源”. p. 1-5.
- (1973 b) 揚水による塩水侵入についての模型実験. 日本地下水学会会誌, vol. 15, p. 1-18.
- (1974) 海岸地下水中への揚水による塩水侵入に関する模型実験. 日本地下水学会会誌, vol. 16, p. 19-25.
- 川崎市(1967) 川崎市における地下水塩水化についての調査報告書. 55 p.
- 岸 和男・安藤 武・菅野敏夫(1966) 館山地区の地下水. 千葉県, 10 p.
- 小林猪三夫(1973) 井戸管理における2・3の問題点とその事例(講演要旨). 日本地下水学会会誌, vol. 15, p. 38-39.
- 工業用水調査グループ(1956) 徳島県吉野川および那賀川水系工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 7, p. 383-398.
- (1957 a) 東京都江東および都北工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 8, p. 551-576.
- (1957 b) 川崎・横浜両市工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 8, p. 619-648.
- (1958 a) 大阪市工業用地下水源調査報告. 地調月報, vol. 9, p. 211-234.
- (1958 b) 名古屋市南部工業用深井戸群水理地質調査報告. 地調月報, vol. 9, p. 315-334.
- 国土庁(1979) 福井県敦賀地区地下水調査報告書. 342 p.
- 小西泰次郎・村下敏夫・武居由之・後藤隼次(1960) 京都市工業用地下水源調査報告. 地調月報, vol. 11, p. 383-396.
- ・木野義人・森 和雄・後藤隼次(1962) 仙台・塩釜地区工業用水源調査報告. 地調月報, vol. 13, p. 101-116.
- ・————・野間泰二・井上正文(1970) 沖縄水資源開発調査報告. 地質調査所, 77 p.
- 蔵田延男・渡辺和衛・村下敏夫(1953 a) 岡山県南工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 4, p. 383-404.
- ・村下敏夫・森 和雄・米谷 宏(1953 b) 三重県工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 4, p. 507-522.
- ・————・————・小池正八(1954) 静岡県西遠地域工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 5, p. 259-270.
- ・————・————(1955) 富山湾岸工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 6, p. 241-264.
- ・本間一郎・尾崎次男(1956) 静岡県安倍川水系工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 7, p. 529-554.
- ・村下敏夫・後藤隼次・阿部喜久男(1957) 尼崎市工業用水源小規模地域調査報告. 地調月報, vol. 8, p. 281-300.
- ・茅山芳夫・米谷 宏・岸 和男(1958 a) 八代市工業用地下水調査報告書. 熊本県, 36 p.
- ・森 和雄・池田喜代治(1958 b) 荒川および江戸川下流工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 9, p. 407-430.
- ・安藤 武・森 和雄(1958 c) 東京都城南工業用水源小規模地域調査報告. 地調月報, vol. 9, p. 531-544.
- ・高橋 稔(1959) 山口県山陽線沿線工業用水源予察調査報告. 地調月報, vol. 10, p. 685-695.
- (1960) 地盤沈下と地下水開発. 理工図書, 183 p.
- ・高橋 稔(1963) 兵庫県西宮市工業用地下水調査報告. 地調月報, vol. 14, p. 509-529.

- LAVERTY, F. B. and van der GOOT, H. A. (1955) Development of a Fresh-Water Barrier in Southern California for the Prevention of Sea Water Intrusion. *Jour. Amer. Water Works Assoc.*, vol. 47, p. 886-908.
- 前川 章(1952) 地盤沈下および潮汐の現象による海岸地下水の変動に関する解析. 農業土木研究, vol. 20, p. 236-260.
- 槇山次郎・坂本 亨(1957) 5万分の1地質図幅「見付・掛塚」及び同説明書. 地質調査所, 43 p.
- 松原 茂(1959) 地盤沈下の海岸地下水に及ぼす影響について. 農業土木研究, vol. 27, p. 12-16, p. 72-77.
- 三谷勝利・斎藤尚志・鈴木豊重・高橋功二(1968) 釧路平原下の可燃性天然ガス. 北海道立地下資源調査所報告, no. 36, p. 25-47.
- 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, p. 29-66.
- 水島好夫・小林 正・三屋 彰(1978) 上越地区における地下水の塩水化調査. 新潟県公害研究所報告, no. 3, p. 64-69.
- 森 和雄・米谷 宏(1955) 磐田市およびその周辺地区工業用水源地点調査報告. 地調月報, vol. 6, p. 189-196.
- ・池田喜代治(1962 a) 宮城県大崎平野工業用水源調査報告. 地調月報, vol. 13, p. 397-407.
- ・後藤隼次(1962 b) 山形県庄内平野の工業用水源調査報告. 地調月報, vol. 13, p. 845-859.
- ・池田喜代治(1964) 青森県八戸市および上北・下北一円地下水について. 地調月報, vol. 15, p. 267-296.
- ・———(1966) 仙台市南東部から福島県太平洋一帯の地域地下水について. 地調月報, vol. 17, p. 551-574.
- 本島公司(1962 a) 地下水について. 中国炭鉱技術協会, vol. 14, p. 4872-4876.
- (1962 b) 化石水の産状と地球化学. 日本鉱業会誌, vol. 78, p. 205-210.
- 向井久夫・西嶋輝之・中山 康・松岡 功(1969) 農林省における地下水障害対策調査について. 応用地質, vol. 10, p. 152-179.
- 村下敏夫・安藤 武・比留川 貴(1956) 愛媛県燧灘沿岸工業用水源調査報告. 地調月報, vol. 7, p. 349-366.
- ・森 和雄・後藤隼次(1958) 大阪府工業用水源地域調査報告. 地調月報, vol. 9, p. 865-884.
- ・高橋 稔・武居由之・後藤隼次(1961 a) 筑後川下流平野の地下水. 地調月報, vol. 12, p. 687-696.
- ・野間泰二(1961 b) 香川県の工業用地下水源について. 地調月報, vol. 12, p. 875-884.
- ・———・岸 和男・池田喜代治(1962) 浜松市およびその周辺の被圧地下水. 地調月報, vol. 13, p. 147-164.
- ・———・比留川 貴・小林竹雄(1963) 徳島県吉野川下流平野の地質と地下水. 地調月報, vol. 14, p. 530-542.
- (1964) 地下水の塩水汚染. 水と廃水, vol. 6, p. 686-692.
- ・高橋 稔(1965) 神戸市の工業用地下水(未公表).
- ・岸 和男(1967) 地下水の塩水化について, 第1報 熔岩帯水層の水理地質学的性質. 地調月報, vol. 18, p. 379-392.
- (1974) 静岡県における地下水の塩水化. 工業用水, no. 190, p. 26-37.
- (1975) 改著地下水学要論. 昭晃堂, 211 p.
- (1976) 地下水の水位回復に伴う新しい地下水障害の発生. 日本地下水学会会誌, vol. 18, p. 60-70.
- (1977) 静岡県富士市における地下水の塩水化. 工業用水, no. 225, p. 30-42.
- (1979) 徳島県の地下水源. 日本地下水学会昭和54年度秋季講演会講演要旨, p. 2-5.
- 永井 茂・村下敏夫(1976) 川崎市における地盤の変動と地下水との関係. 工業用水, no. 215, p. 46-69.
- 長沢幹雄(1971) 大阪北摂地域の高塩分被圧地下水. 陸水学雑誌, vol. 32, p. 90-95.
- 名古屋通商産業局(1972) 富山県高岡・新湊地区

- 下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 165, p. 53-63.
- 名古屋通商産業局(1976) 富山市周辺地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 221, p. 47-78.
- (1978) 富山県黒部川下流域地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 238, p. 58-81.
- (1981) 豊川下流域地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 269, p. 30-55.
- 日本鑿泉探鉱株式会社(1936) 営業案内. 52 p.
- 新潟県(1973) 新潟県佐渡地区地下水調査報告書. 34p.
- 野間泰二・後藤隼次(1970) 石川県邑知瀧平野の地下水. 地調月報, vol. 21, p. 513-522.
- 小原常弘・佐藤 巖・松下勝秀・早川福利・横山英二・山口久之助・二間瀬 洌・国府谷盛明(1966) 北海道水理地質図幅説明書, 第15号, 函館. 北海道立地下資源調査所, 41 p.
- ・松下勝秀・二間瀬 洌・早川福利・佐藤巖・横山英二・和気 徹・国府谷盛明(1973) 北海道水理地質図幅説明書, 第10号, 釧路. 北海道立地下資源調査所, 54 p.
- 落合敏郎(1962) 富士南ろくの地質と地下水. 吉原市役所, 58 p.
- 小川 浩・山吉勝利・安田 誠・高木信幸・堀川邦彦(1965) 神奈川県下の地下水源地域調査報告. 工業用水, no. 80, p. 50-57.
- 岡部史郎(1967) 三保半島における地下水の化学的研究. 工業用水, no. 105, p. 51-55.
- 岡崎由夫(1958) 釧路市及びその周辺の地質・補稿. 釧路工業地帯造成計画資料, 釧路市(未公表).
- 奥津春生・長谷弘太郎・武藤 章(1961) 仙塩臨海工業地帯の地質と地下水(英文). 日本地下水学会会誌, no. 3, p. 21-26.
- OKUTSU, H. (1972) On Some Aspects of Fossil Water on Hydrogeological Map. *I.A.H. MÉMOIRES*, vol. IX, p. 164-170.
- 大阪通商産業局(1968) 兵庫県東播地区地下水利用適正化調査の成果. 工業用水, no. 114, p. 83-93.
- (1970) 大阪府泉州地区地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 137, p. 66-67.
- (1981) 中播地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 270, p. 25-53.
- 尾崎次男・村下敏夫・森 和雄・岸 和男・比留川貴(1959) 和歌山市工業用水源小規模地域調査報告. 地調月報, vol. 10, p. 413-424.
- ・菅野敏夫・後藤隼次・村山 篁(1964) 熊本平野および周辺地域の工業用水源. 地調月報, vol. 15, p. 139-165.
- (1967 a) 玉名平野の地下水に関する調査研究. 地調月報, vol. 18, p. 317-329.
- (1967 b) 海岸地下水における塩素イオン量の変動, 地質調査所地下水観測成果. 工業用水, no. 107, p. 34-48.
- (1978) 塩化物イオンの濃度変化からみた被圧地下水の塩水化について. 地調月報, vol. 29, p. 645-666.
- (1979) 徳島県那賀川下流域における地下水の水位と Cl⁻. 日本地下水学会昭和54年度秋季講演会講演要旨, p. 6-9.
- ROBINOVE, C. J., LANGFORD, R. H. and BROOKHART, J. W. (1958) Saline-Water Resources of North Dakota. *U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper*, 1428, 72 p.
- 札幌通商産業局(1977) 釧路地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 231, p. 24-52.
- 沢村孝之助(1950) 7万5千分の1地質図幅「沼津」及び同説明書. 地質調査所, 49 p.
- 仙台通商産業局(1977) 仙台・名取市周辺地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 224, p. 47-76.
- (1978) 八戸市周辺地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 243, p. 35-65.
- (1980) 酒田市周辺地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 261, p. 24-57.
- 四国通商産業局(1969) 徳島県北部地区地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 127, p. 71-80.
- (1970) 愛媛県道前地区地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 138, p. 48-59.
- (1973 a) 香川県讃岐地区地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 172, p. 29-43.
- (1973 b) 徳島県上板・麻名地区地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 173, p. 44-57.
- (1976) 香川県高松地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 213, p. 34-78.

- 四国通商産業局(1979) 香川県西讃地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 246, p. 24-46.
- 島田忠夫・牧野登喜男・牧 真一(1952) 茨城県新利根川流域天然ガス調査報告. 地調月報, vol. 3, p. 267-280.
- 清水欣一(1965 a) 高知市三里の地下水. 日本地下水学会会誌, no. 8, p. 8-10.
- ・和田温之(1965 b) 香川県三豊平野の地下水. 日本地下水学会会誌, no. 9, p. 1-5.
- ・黒川陸生(1975) 兵庫県津名町の塩水侵入. 日本地下水学会会誌, vol. 17, p. 68-72.
- 静岡県(1960) 岳南地域工業用水源調査報告書. 44 p.
- (1981) 地下水調査報告書(55年1月-12月), 276 p.
- 杉崎隆一・柴田 賢(1961) 地下水の地球化学的研究(第2報), 濃尾平野における地下水と地質構造との関連性. 地質学雑誌, vol. 67, p. 427-439.
- 高橋 稔・安藤 武(1961) 神奈川県湘南工業地帯の地下水. 地調月報, vol. 12, p. 503-520.
- ・池田喜代治(1964) 大分・福岡県周防灘南岸地域における工業用地下水源. 地調月報, vol. 15, p. 683-700.
- ・———(1965) 奈良県大和盆地の地下水. 地調月報, vol. 16, p. 364-395.
- ・永井 茂(1968) 高知平野の地下水. 地調月報, vol. 19, p. 653-669.
- ・後藤隼次・菅野敏夫(1974) 長野・群馬県湯川および吾妻川上流域水理地質図. 日本水理地質図23, 地質調査所.
- 高村弘毅・森 和紀(1976) 千葉県臨海部における地下水の塩水化. 日本地下水学会会誌, vol. 18, p. 9-19.
- Task Committee on Saltwater Intrusion of the Committee on Ground-Water Hydrology of the Hydraulics Division (1969) Salt-water Intrusion in United States. *Jour. Hydraulic Division, Proceedings of the Amer. Soc. Civil Engineers*, vol. 95, no. HY5, p. 1651-1669.
- 東京通商産業局(1967) 新潟県上越地域地下水利用適正化調査の成果. 工業用水, no. 107, p. 88-96.
- 東京通商産業局(1968) 静岡県西遠地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 120, p. 83-90.
- (1972) 静岡県中遠地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 167, p. 50-62.
- (1974 a) 茨城県鹿島地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 190, p. 52-67.
- (1974 b) 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.
- (1975) 長野県善光寺平地域地下水利用適正化調査報告. 工業用水, no. 198, p. 43-66.
- 鳥居栄一郎・柴崎達雄・飯島 弘(1964) 釧路泥炭地とその周辺の水理地質について(下). 応用地質, vol. 5, p. 1-14.
- 鳥取市(1960) 鳥取市付近の地下水調査報告. 42 p.
- 豊原義一(1936) 海岸地下水の研究(鳥取県弓浜部に於ける調査実験). 地学雑誌, no. 569, p. 309-331.
- TSURUMAKI, M. (1962 a) Quality of Ground Water in Western Osaka, Japan, with Special Reference to the Genesis of High-Chloride Zone. *Journal of Geosciences, Osaka City University*, vol. 6, p. 145-186.
- 鶴巻道二(1962 b) 深井戸の管理について<その2>, 水温と水質. 水処理技術, vol. 3, no. 6, p. 1-13.
- (1967) 東大阪地域の地下水の水質(その2), 塩素イオンの分布. 日本地下水学会会誌, no. 13, p. 11-23.
- 通商産業省・東京通商産業省(1975) 首都圏地下水理総合大規模調査報告(その3). 工業用水, no. 204, p. 33-48.
- 津屋弘達(1940) 富士火山の地質学的並に岩石学的研究(Ⅲ). 地震研究所彙報, 18, p. 419-445.
- United Nations (1960) *Large-Scale Ground-Water Development*. 84 p.
- U.S. Public Health Service (1946) Public Health Service Drinking Water Standards. *U.S. Public Health Service Reports*, vol. 58, no. 3, p. 69-82.
- 渡辺和衛・森 和雄・比留川 貴(1957) 広島県三

- 原市沼田川水系工業用水源調査報告書. 広島県・三原市, 11 p.
- 矢田恒晴(1970) 静岡県岳南地域における地下水塩水化現象. 地理学評論, vol. 43, p. 567-571.
- 山口久之助・二間瀬 洌・早川福利(1961) 釧路原野臨海地帯の水理地質. 北海道立地下資源調査所報告, 第25号, p. 129-143.
- ・—————・小原常弘・国府谷盛明・早川福利(1963) 北海道水理地質図幅説明書, 第13号, 苫小牧・室蘭. 北海道立地下資源調査所, 47 p.
- 山本莊毅(1939) 東京市の鑿泉に含まれる化学成分に就て. 陸水学雑誌, vol. 9, p. 115-122.
- 山崎誠治・村下敏夫(1966) 静岡県岳南地区地下水利用適正化調査成果. 工業用水, no. 96, p. 60-70.
- 吉村信吉(1942) 地下水. 河出書房, 258 p.
- 吉岡金市(1977) 柳井原ダム計画と酒津堰改造を中心とする高梁川下流域の利水と治水に関する研究, 248 p.

(受付: 1981年12月25日; 受理: 1982年4月27日)