

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

—静岡県富士地区の例—

尾崎 次男*

Sea Water Intrusion into Confined Water Estimated from Long-term Observations of Chloride Ion Contents, Fuji City, Shizuoka Prefecture

Tsugio OZAKI

Abstract

Since 1960, long-term observations of chloride ion contents in confined water has been carried out at 30 artesian wells, located in the Fuji district, Shizuoka Prefecture. At the same time, fluctuation of water table has been observed at the adjacent artesian wells. Results of observation at each well are illustrated in the first part of this paper.

The patterns of fluctuation are different from each other. Although the fluctuation is related generally to climatological conditions such as precipitation tide, etc. unusual patterns are recognized in some observation wells located in the coastal regions of the area.

The author studied the cause of unusual fluctuation in relation with records of each or regional amount of pumped water at surrounding artesian wells, and also in relation with topographic conditions such as distance from shore-line, altitude of each observation well, and another artificial events.

As results, unusual fluctuation of chloride ion is regarded to increase or decrease of total amounts of discharged groundwater from pumping (working) wells. The larger the total amounts of pumping is, or the longer the discharge is successive, contents of chloride ion in observation well increased with a steep gradient. After pumping of considerable amounts of ground water stopped, chloride ion decreased gradually parallel to the recovery of water table.

The author concluded that the rapid increase of chloride ion contents indicates sea-water intrusion into aquiclude, composed of volcanic rocks and associated clastic sediments. The cause is considered as breaking of equilibrium between sea-water and fresh water at the coast of the district, not a squeezing out of pore water.

1. 緒 言

富士臨海地帯の総合開発事業として田子の浦港を建設工事中の1960年春頃に、突然、海岸付近にある工業用深井戸の地下水中に200 ppm以上のCl⁻が検出された。これが、それまで水質が良好で、しかも豊富な水量を誇ってきた岳南地域における地下水塩水化¹⁾問題の契機となったのである。

地質調査所では地下水源保全に関する研究の一環として、岳南地域の地下水塩水化の状況を把握し、かつその

機構解明の一助として、富士市臨海付近にある生活用および工業用などの深井戸を対象として、1960年以来被圧地下水中のCl⁻濃度の観測を実施してきた。観測結果の一部はすでに尾崎(1967)によって報告されている。

本報告は、被圧地下水中のCl⁻濃度の経年観測結果を具体的に記述するとともに、観測井の諸元・井戸の位置標高および観測結果から得られたCl⁻濃度の挙動と井戸の水位変化ならびに井戸の揚水状態などを検討し本地域における地下水塩水化について若干の考察を加えたものである。

本報告を執筆するに当たって深井戸の水位および地下水中のCl⁻濃度の測定ならびに水位観測を引受けていただいた旧静岡県富士臨海地区総合開発事務所・田子の浦

* 環境地質部

1) 飲料としての水質基準によると、Cl⁻濃度が200 ppm以上をこえる水は不適とされる。本文ではCl⁻濃度が200 ppm以上の地下水を塩水化地下水と呼ぶこととする。

第 1 表 観測井の諸元と観測

井戸の 記号	井戸の所在地	井戸の所有者	井戸名	口径 (mm)	深戸 (m)
a	静岡県富士市鈴川	石油加工K. K.			
b-1	富士市鈴川	大昭和製紙K. K.	no. 12		
b-2	"	鈴川工場	no. 13		
b-3	"		no. 14		
b-4	"		no. 16		
b-5	"		no. 18		
c-1			休 井		
c-2	富士市鈴川 2-151	旧富岳興業K. K.	no. 4	75	96
c-3	"	現矢部商店	no. 3	400	100
d	" 砂山 595-3		旧水源井	130	130
e	" 鮫島浜添 569-3	富士市	旧水源井	350~300	130
f	" 前田字新田 824-1			75	127
g-1	" 今泉 285	日清紡績K. K. 吉原	no. 4	200	100
g-2		製紙工場		500~400	100
h-1	" 蓼原 600	大昭和製紙K. K.	no. 37		
h-2		富士工場	no. 38		
h-3			no. 30		
h-4			no. 33		
i-1	" 比奈 450	興陽製紙K. K.	no. 1		
i-2	"	比奈工場	no. 2	350~300	136
j-1	" 東柏原 111	静岡県	A	50	170
j-2	"		B	50	136
k-1	" 平垣 300	本州製紙K. K.	no. 14	350	102
k-2		富士工場	no. 20	350	40
k-3			no. 22	350	71
k-4			no. 11		
l	" 荒田島92	富士市	水 源 井	400	80
m	" 今泉 148	富士フィルムK. K. 今泉工場		400	100
n-1	" 田島30	日本食品加工K. K.	A ₂	425	150
n-2	"	富士工場	A ₃	425	160

港管理事務所・富士市役所をはじめ工場関係各位に対し深く感謝の意を表する。

2. 観測井の選定経過と観測方法

工場などの深井戸群に地下水塩水化がみとめられた後に、地質調査所は、以前、比留川・ほか (1957) が水質分析を行った水道水源井および工場群の深井戸のうち田

子の浦港の付近にある深井戸をその観測井として選定した。観測は1960年9月から開始され1973年3月までの17年にわたって実施されている。途中、1961年4月からは海岸平野における地下水塩水化の平面的な拡がり把握するため、観測井の一部を臨海部から内陸部に変更している。また一部の井戸では観測の途中で井戸所有者の都合による観測井の変更および観測の一時中止が行われて

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 (尾崎 次男)

期 間 (付観測記録の索引)

ストレーナーの 位 置 (m)	Cl ⁻		水 位		備 考
	観測開始年月	観測終了年月	観測開始年月	観測終了年月	
	年 月 1960. 9	年 月 1961. 1	年 月	年 月	
	1960. 9	1961. 1			
	"	"			
	"	"			
	"	"			
	1961. 2	1962. 4			
	1967. 5	1970. 9			
			1962. 10		
106~130	1960. 9	1964. 11			
122~130	{1960. 9	{1961. 4	1962. 11	1968. 7	
	{1962. 10	{1969. 9			
	1962. 10	1963. 2	1962. 10	1962. 10	
	1961. 3	1964. 12			観測開始当時は自噴 1962.4.20 ・水位 -1.3m
53~70, 71~100	1965. 1	1969. 9			
	1962. 2	1965. 5			
	1962. 2	1965. 5			
	1966. 6	1970. 8			
	1966. 6	1970. 9			
	1962. 8	1967. 6			
66~136	1967. 7	1969. 9			
110~135	1962. 10	1972. 5	1962. 10	1972. 5	
110~135			1962. 10	1972. 5	
66~ 88	{1962. 10	{1968. 2	1961. 6	1971. 3	揚水量 1~3.0 m ³ /min
	{1969. 5	{1977. 3			
25~ 40	{1962. 10	{1968. 2	1966. 6	1971. 3	揚水量 1~3.2 m ³ /min
	{1969. 5	{1972. 3			
	{1964. 1	{1968. 2	1964. 3	1968. 2	揚水量 4~8 m ³ /min
	{1975. 4	{1977. 3			
40~ 75	1972. 4	1977. 3			
	1965. 6	1969. 9			
	1965. 7	1968. 9			
	{1970. 10	{1972. 3	{1971. 1	{1972. 3	揚水量 4m ³ /min のときの
	{1973. 4	{1975. 1	{1973. 4	{1975. 7	水位は海水面下 2.8 m
	1975. 4	1977. 3	1975. 4	1977. 3	

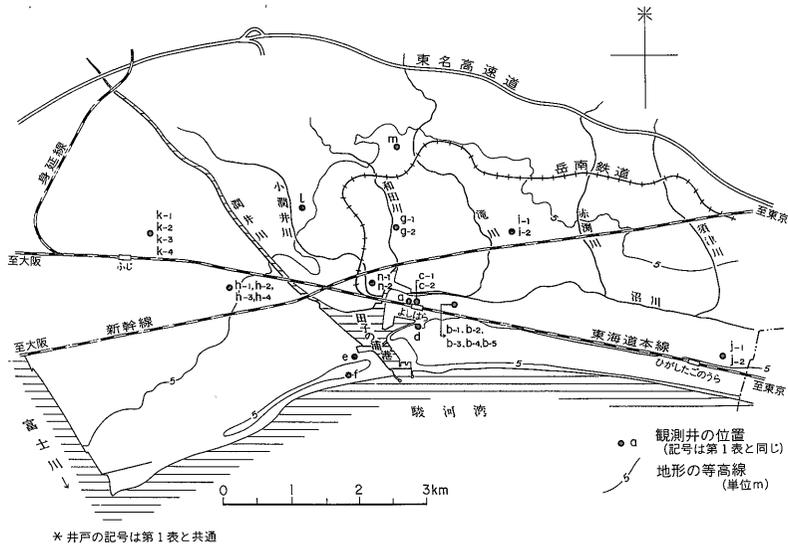
いる。さらに、Cl⁻の観測にあわせて若干の深井戸について水位観測が行われ、そのあるものについては現在なお継続されている。Cl⁻濃度の測定は硝酸銀滴定による方法であり、水試料は原則として毎月10日・20日および30日に採水する。水位観測は原則として毎月5日毎に実施している。

これらの観測井の位置は第1図に、その諸元および観

測期間は第1表(索引は35頁参照)に示す通りである。

3. 観測結果

本地域における地下水中のCl⁻濃度の変化の状態および観測井の位置変更などを考慮し、本文では観測期間を海岸地域に塩水化がみとめられるようになった1961年までを初期と呼び、塩水化が内陸部までに次第に進行した



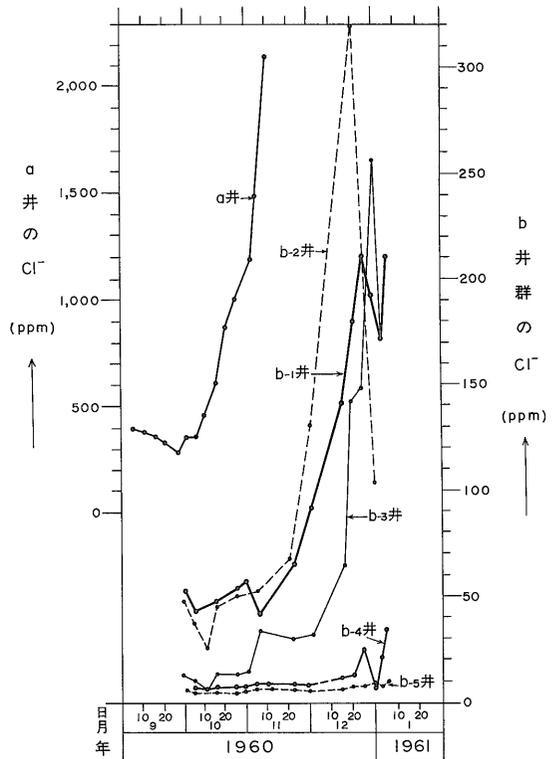
第1図 水位および Cl⁻ 観測井の位置

1962年から1965年までを中期と呼び、塩水化が活発化した後で一部地域に塩水化停止がみとめられた1965年以降現在までを後期と呼ぶことにする。

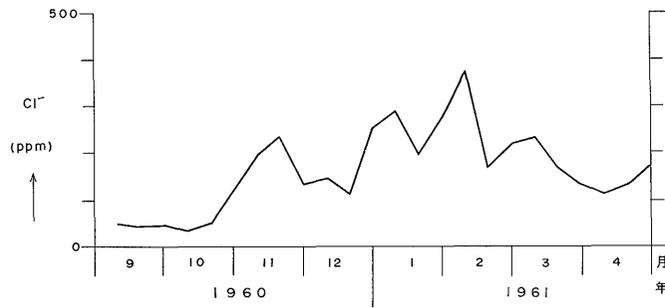
3.1 初期 (-1961) の Cl⁻ 濃度変化

田子の浦港の北側にある a 井では 1960 年 9 月 10 日に 390 ppm を示している。さらに翌年の 1 月 30 日には 3,200 ppm に達したため、井戸の使用が中止された。港の北北東側にあたる工場の敷地内にある深度 100m 前後の井戸のうち b-1 井および b-2 井で Cl⁻ 濃度は 1960 年 10 月に 50 ppm 程度を示すが、11 月下旬から 12 月上旬にかけて急速に増加する。しかしながら 12 月下旬になると減少する傾向がみとめられている。b-3 井でも Cl⁻ 濃度は上記 2 井のそれとほぼ同様な傾向を示して変動する。しかしながら同工場敷地内にある b-4 井および b-5 井では Cl⁻ 濃度は他の 3 井にくらべてほとんど増加を示さない (第 2 図)。一方、田子の浦港の西側にあたり、e 井を代表とする深井戸群にも、1960 年 10 月末以降に Cl⁻ 濃度の増加がみとめられる (第 3 図)。

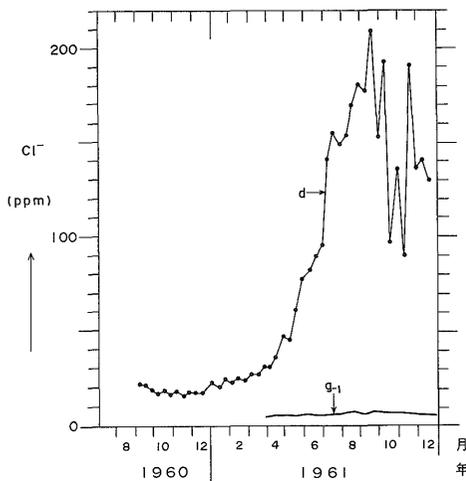
また、田子の浦港の東側にあたる d 井では Cl⁻ 濃度が 1960 年 9 月に 20 ppm 前後を示している。同井の Cl⁻ 濃度は翌年の 3 月頃から次第に増加して 9 月に 180 ppm を示している (第 4 図)。一方、海岸からやや内陸にある g-1 井では、Cl⁻ 濃度が 1961 年 4 月から同年 12 月まで 10 ppm 以下であって、地下水の塩水化は生じていない (第 4 図)。



第2図 a 井および b 井群における Cl⁻ の変化



第3図 e井における Cl⁻ の変化



第4図 d井および g₋₁井における Cl⁻ の変化

3.2 中期 (1962-1965) の Cl⁻濃度変化

3.2.1 田子の浦港付近

c-2井・f井およびd井では、Cl⁻濃度はある時期に増加し、またある時期には減少を示し年間を通じて不規則な変動を示す(第5図・第6図および第7図)。

3.2.2 内陸付近

g-1井、h-1井およびh-2井では、Cl⁻濃度はおおむね1月から4月にかけて増加し、5月頃から8月頃までに次第に減少する。そしてこれらの井戸のCl⁻濃度は、例年冬季に増加し夏季に減少するパターンを繰り返しながら逐年増加している(第7図・第8図)。

i-1井では、Cl⁻濃度は5ppm前後を示していたが、その後次第に増加し1965年12月には100ppmに達している。しかし、12月30日には著しく減少している(第9図)。また、k-1井・k-2井およびk-3井では、k-2井およびk-3井のCl⁻濃度が5ppm前後で変動しているのに対し、k-1井のそれは10ppm前後で変動している(第10図)。

j-1井およびj-2井はいずれも自噴井であって、鉄管頂に透明ビニール・パイプを取付けており、水位測定が可能である。さらにj-1井には水試料の採水装置がある(第11図)。j-1井では、Cl⁻濃度は5ppm前後を示していたが、1964年7月に増加して10ppm程度になっている。しかし、Cl⁻濃度は9月以降になると次第に減少して、5ppm前後を示している(第12図)。

3.3 後期 (1966-) の Cl⁻濃度

3.3.1 田子の浦港付近

c-2井では、従来にくらべ、1967年12月頃から急速に増加して1970年2月には10,000ppm以上を示している。しかしながら、Cl⁻濃度は一方的に増加を示すことなく、ある時期には急速な減少を示す(第13図)。

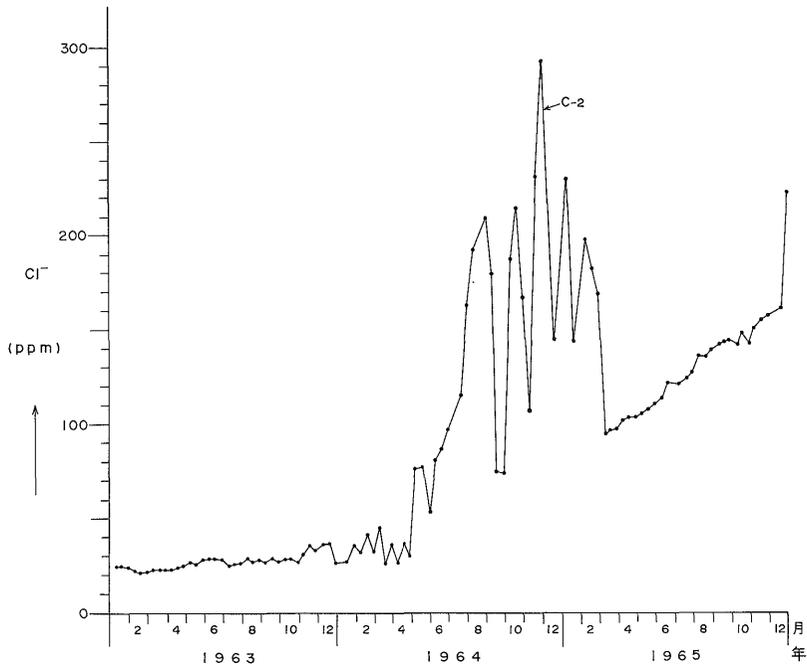
n-1井では、急速な増加および減少と不規則な変動を示していたが、1973年4月頃からは700-2,300ppmの範囲で変動している。また、n-2井では、次第に減少する傾向がみとめられ、ある時期には急速に減少する(第14図)。

3.3.2 内陸付近

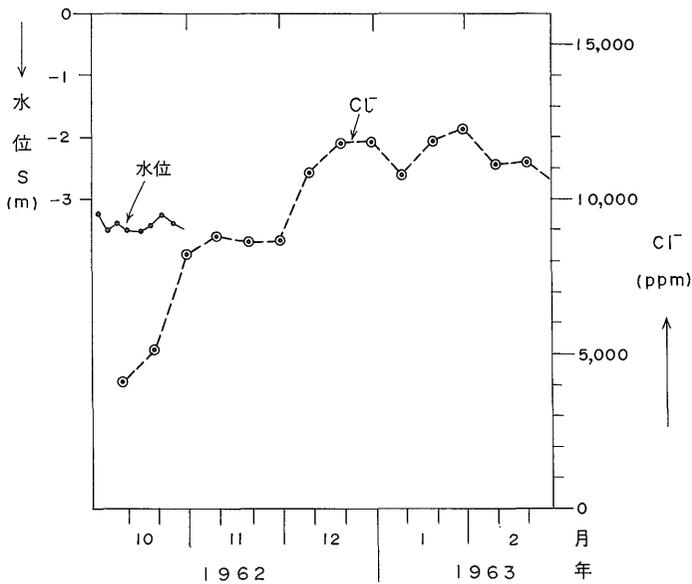
h-3井およびh-4井では、おおむね冬季に増加し夏季に減少するパターンを繰り返しながら、逐年増加している(第15図)。

g-1井では、これまで冬季に増加し夏季に減少するパターンを示していた(第7図参照)。g-2井では、g-1井のパターンと全く異なり、逐年次第に増加している(第16図)。

i-1井およびi-2井では、いずれも逐年次第に増加している(第17図)。m井では、1965年頃に5ppm前後を示していたが1967年頃から次第に増加して18ppm以上を示している(第18図)。l井では、1966年頃に10ppm前後を示していたが、1968年4月から急速な増加を示している。同井のCl⁻濃度は、その後急速に減少したり、あるいは急速に増加して不規則な変動を示している(第19図)。k-1・k-3およびk-4井では、いちじるしい変動はみ



第5図 C₂井における Cl⁻ の変化

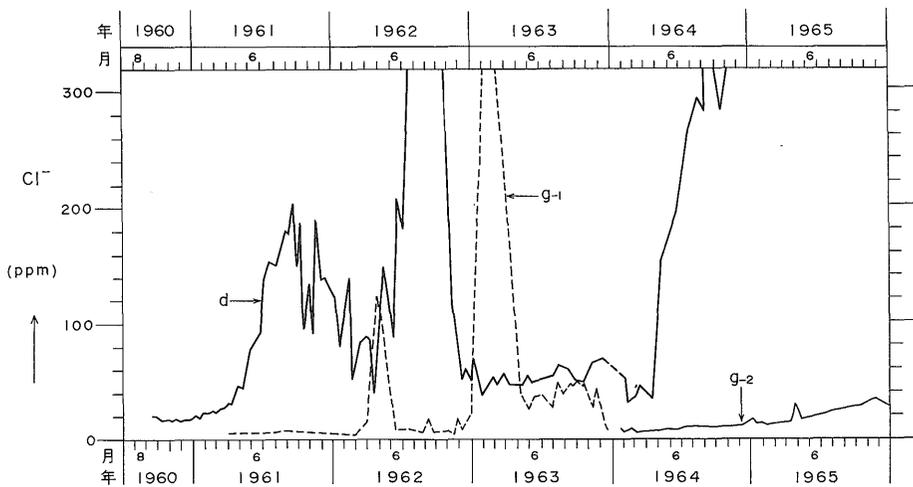


第6図 f井における水位と Cl⁻ の変化

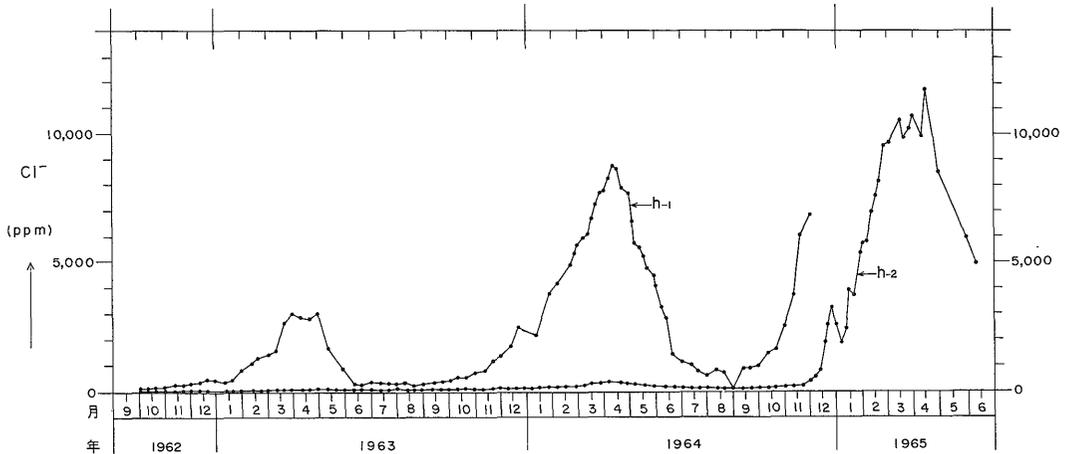
とめられない。しかしながら、k-2井では 1966年以降次第に増加する傾向が認められる。とくに、1969年以降の Cl⁻ 濃度は急速な増加および減少を繰り返す不規則な変動を示す (第10図)。j-1 井 (自噴井) では、これまで比較

的安定した Cl⁻濃度を示していたが、1967年5月以降は急速な増加および減少と不規則な変動を示している (第12図参照)。

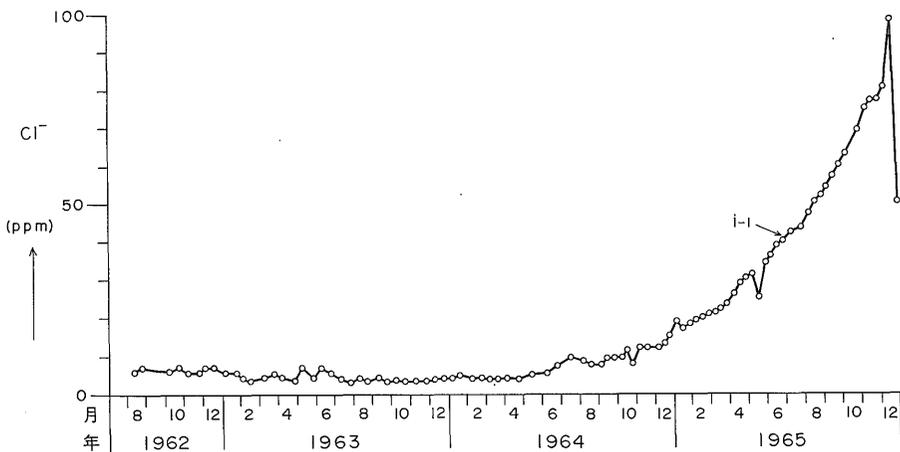
塩化物イオンの濃度変化からみた被圧地下水の塩水化について (尾崎 次男)



第7図 d井・g₁井およびg₂井におけるCl⁻の変化



第8図 h₁井およびh₂井におけるCl⁻の変化



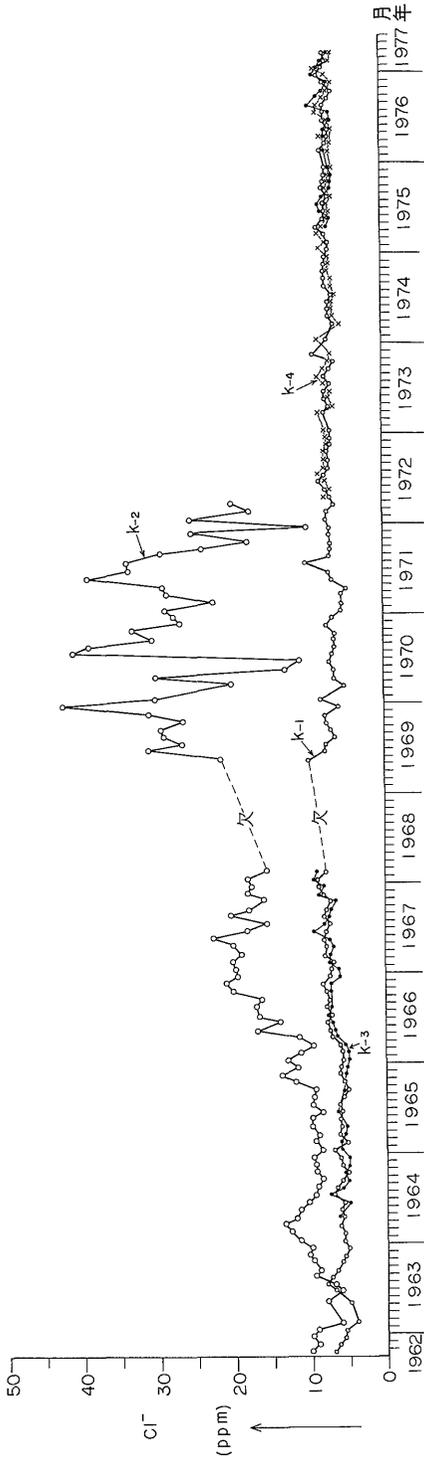
第9図 i₁井におけるCl⁻の変化

4. 被圧地下水のCl⁻濃度の変動パターン

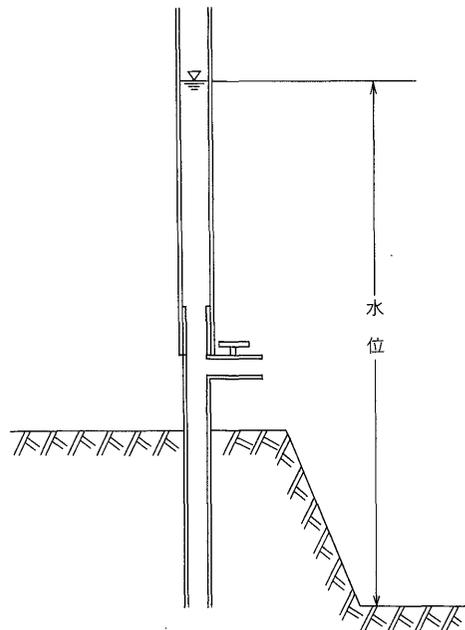
本地域における被圧地下水の Cl⁻濃度は、経年的に不規則な変動がみとめられる。そこで、この変動パターンを大別すると、

- (1) 長期的にわたって、いちじるしい変動が認められないもの— (例 k-1井, k-3井および k-4井).
- (2) 逐年次第に増加するもの— (例 c-1井, i-1井, i-2井, m 井).
- (3) 主として冬季に増加し、夏季に減少するもの— (例 h-1井, h-2井, h-3井, h-4井および g-1井).
- (4) 主として夏季に増加し、冬季に減少するもの— (例 d 井, l 井).
- (5) 季節に関係なく、増加および減少と不規則に変動するもの— (例 n-1井, n-2井).

尾崎 (1967) は、全国各地における観測結果から、海岸平野における被圧地下水中の Cl⁻濃度がそれぞれ異なった変動パターンを示すことは、主として井戸における地下水汲上量の多寡および揚水継続時間などを含む各井戸の揚水状態に関係するとの見解を発表した。さらに尾崎 (1974) は、限られた工場敷地内における群井の揚水による影響が、Cl⁻濃度の増加を促進させるとの見解を発表した。村下 (1977) は、今までの地下地質等の調査結果にもとづき、地下水の塩水化の型を、塩化物イオンに

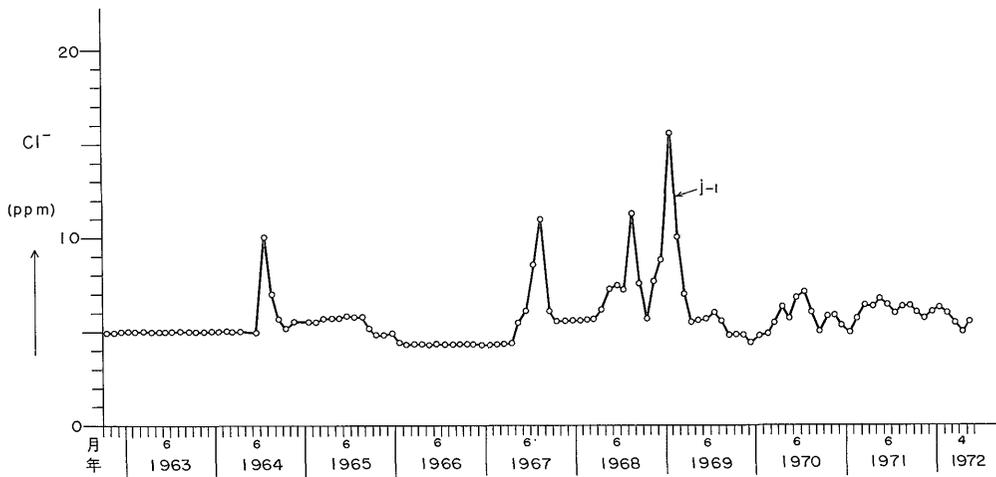


第10図 k₋₁井・k₋₂井・k₋₃井およびk₋₄井におけるCl⁻の変化

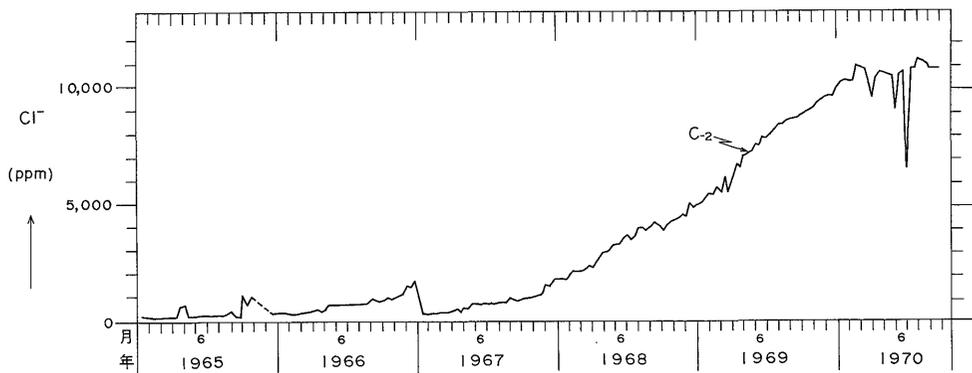


第11図 j₋₁井における水位測定および採水装置

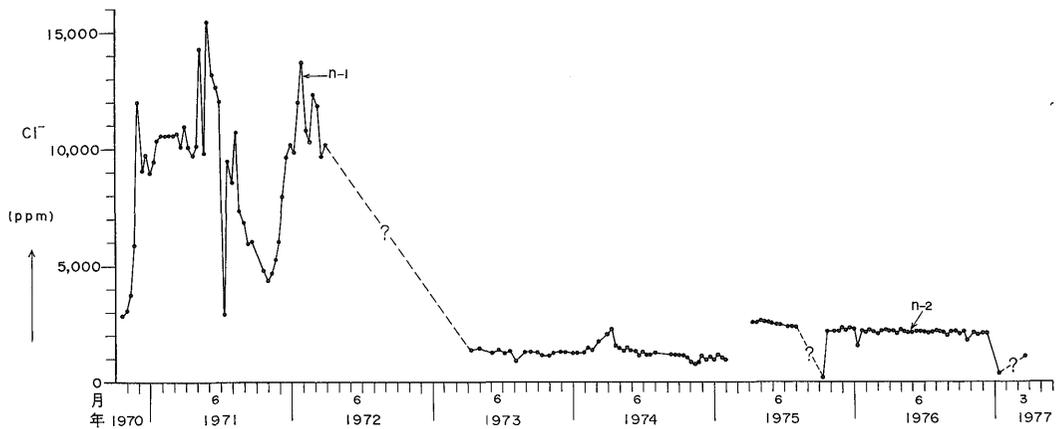
塩化物イオンの濃度変化からみた被圧地下水の塩水化について (尾崎 次男)



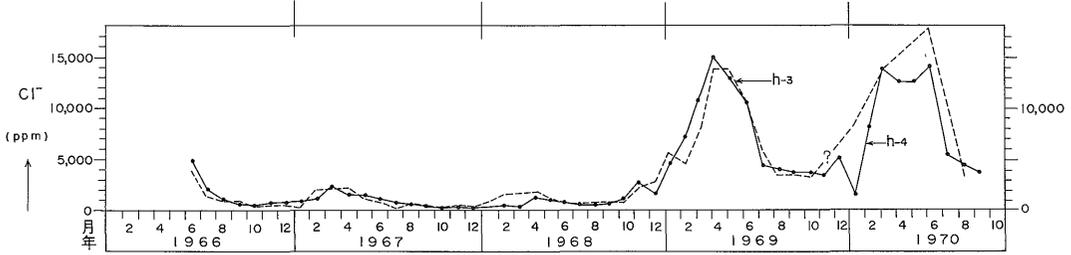
第12図 j-1 井における Cl⁻ の変化



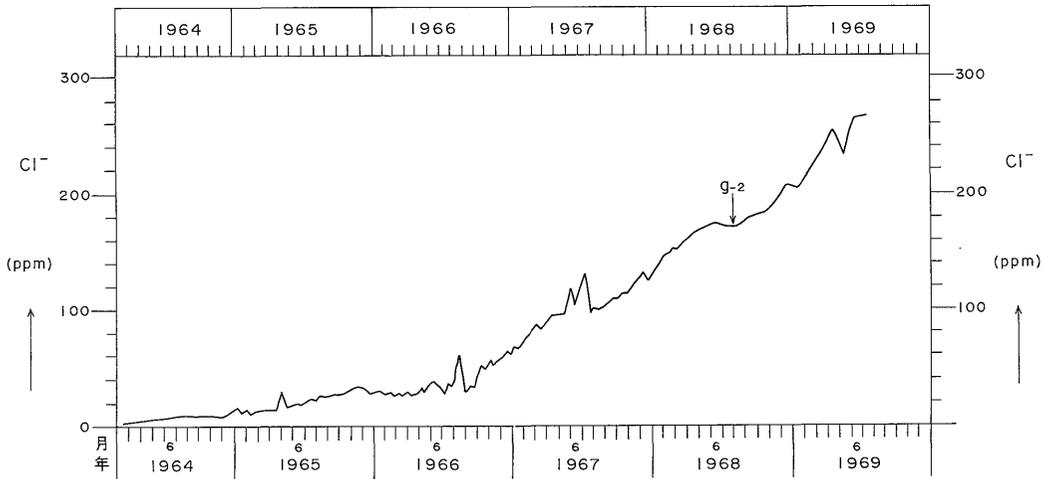
第13図 c-2 井における Cl⁻ の変化



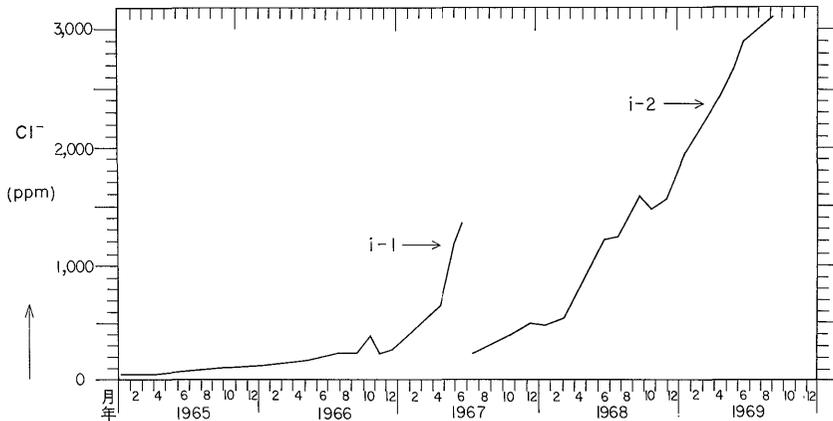
第14図 n-1 井および n-2 井における Cl⁻ の変化



第15図 h₋₃井および h₋₄井における Cl⁻ の変化



第16図 g₋₂井における Cl⁻ の変化



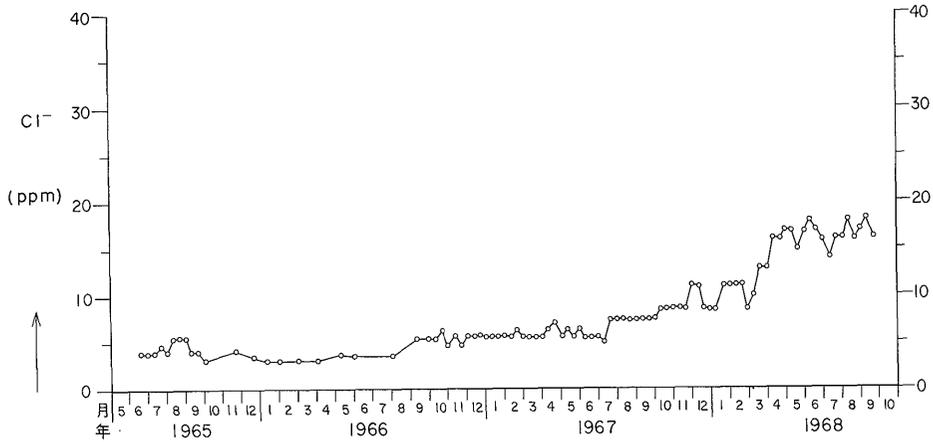
第17図 i₋₁井および i₋₂井における Cl⁻ の変化

季節的変動があることなどから、塩水化は裂か地下水型の特長であると記している。これらの見解を含めて、次章以下でさらに検討ならびに考察する。

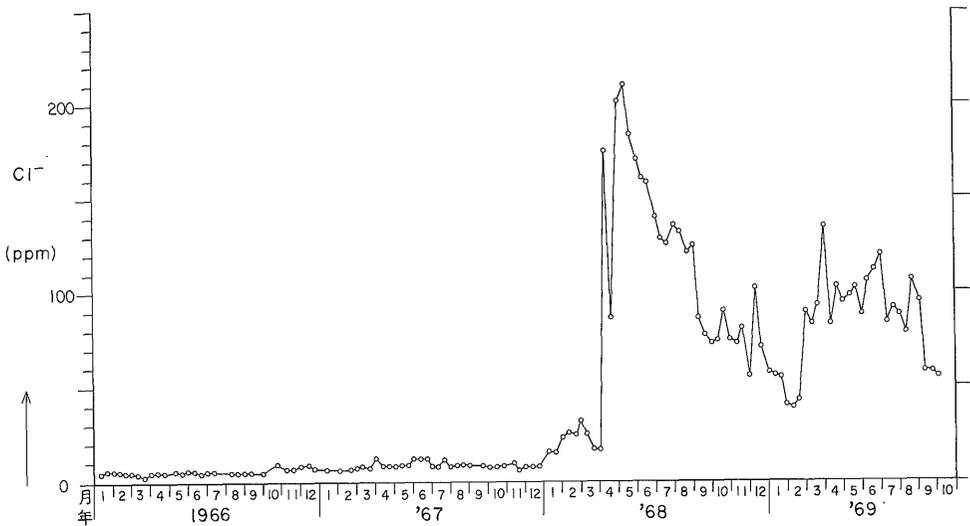
5. 観測結果の考察

5.1 帯水層の深度と Cl⁻ 濃度との関係

田子の浦港付近で、深井戸群の塩水化がけん着になったのは、1960年10月から12月頃であり、100m以深の井戸群では1960年12月頃から1961年7月頃である。したがって、全般的な塩水化の傾向をみると、浅い井戸に比べて深い井戸の方が、時間的にやや遅れて発生している。しかしながら、例えば100m以浅の c-2井に塩水化



第18図 m 井における Cl⁻ の変化



第19図 1 井における Cl⁻ の変化

の傾向がみとめられたのは、1964年7月頃である(第5図)。また、100m以深のd井に塩水化が発生したのは1961年7月頃であって、その発生時期はc-2井よりも早い。地下水塩水化の時間的遅れが生じた井戸群では、井戸の口径および揚水設備などが小規模な点が共通する。井戸群の揚水設備の大小および塩水化の遅速などの関係を検討すると、同一地域における地下水の塩水化は一様に行われたものではなく、揚水規模が大きい井戸ほど塩水化が早く、揚水規模が小さい井戸では塩水化が遅れて発生したものと思われる。

5.2 海岸から深井戸までの距離と Cl⁻濃度との関係
田子の浦港の沿岸から約 1.3 km 離れた g-1井に塩水

化の兆しが認められたのは1962年4月頃である(第7図)。さらに、同沿岸から約 1.8 km 離れた h-1井では1963年1月以降急速な増加を示している(第8図)。一方、同港付近にある c-2 井の塩水化の傾向がみとめられたのは1964年7月頃であるから、塩水化の発生時期は前2者に比べて遅れている(第5図)。

以上の結果をみると、被圧地下水の塩水化は、海岸から内陸に向かって次第に波及したものではなく、海岸からの距離の遠近に関係なく突如として発生している。この事実は、海水が帯水層中で流動しやすい状態にある通路を選択的に侵入した結果を暗示している。

5.3 降水量と地下水塩水化の関係

深井戸の被圧地下水中の Cl^- 濃度が渇水期にあたる2月・3月頃に増加し、豊水期の7月・8月頃に減少する例がみとめられている(第8図・第15図)。これらの現象は地下に浸透した降水からの地下水補給量の増加および減少に伴う効果と推定する考え方もある。被圧地下水の Cl^- 濃度の増加および減少が地下水流動量の多寡に支配されるとすれば、同一地域内にある深井戸群では、 Cl^- 濃度はいずれも冬季に増加し、夏季には減少すると思われる。しかしながら、本地域では深井戸の地下水の Cl^- 濃度が逐年増加する例(c-2井, i-2井, m井)がある。さらに、 Cl^- 濃度が冬季に増加し、夏季に減少する変動パターンを示していたのが、その後はこのような変動がみられず Cl^- 濃度が逐年増加をつづけた例(g-1井, g-2井)など変化に富んでいる。

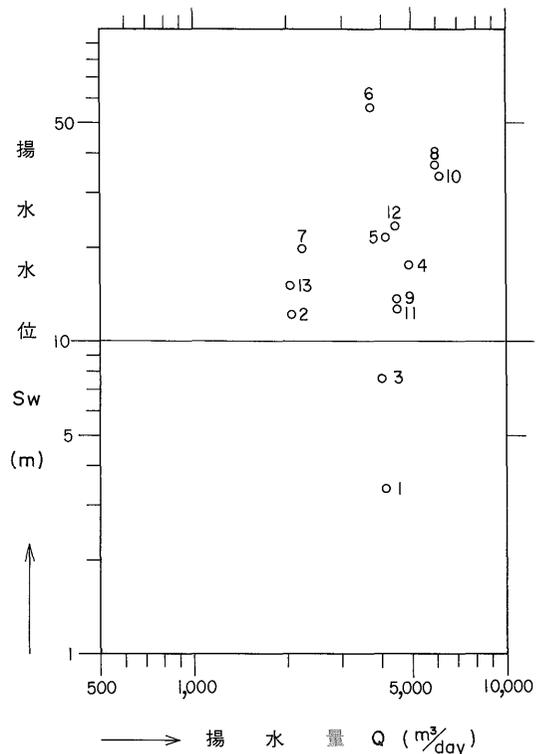
この原因として、各種産業の水需要は年間を通じて一定でないことが挙げられる。したがって Cl^- 濃度が冬季に増加し夏季に減少するという変動パターンは、井戸の地下水汲上量が冬季に増加し、夏季に減少したことを反映しているものと考えるのが妥当である。よって、本地域における地下水塩化の要因として、井戸群における地下水汲上の多寡が、地下水流動量のそれによる影響よりも、より大きく作用しているものと考えられる。

5.4 深井戸の標高と塩水化の関係

海岸平野でけん着な塩水化が認められた深井戸群の標高はおおよそ2-5mの範囲にある(第1図)。観測の後期に塩水化が認められた1井の標高は約8mである。さらに、塩水化の影響が比較的少ないk-1井, k-2井, k-3井およびk-4井などの標高は12m前後であり、j-1井(自噴井)の標高は約5mである。

5.5 深井戸の揚水量と水位との関係

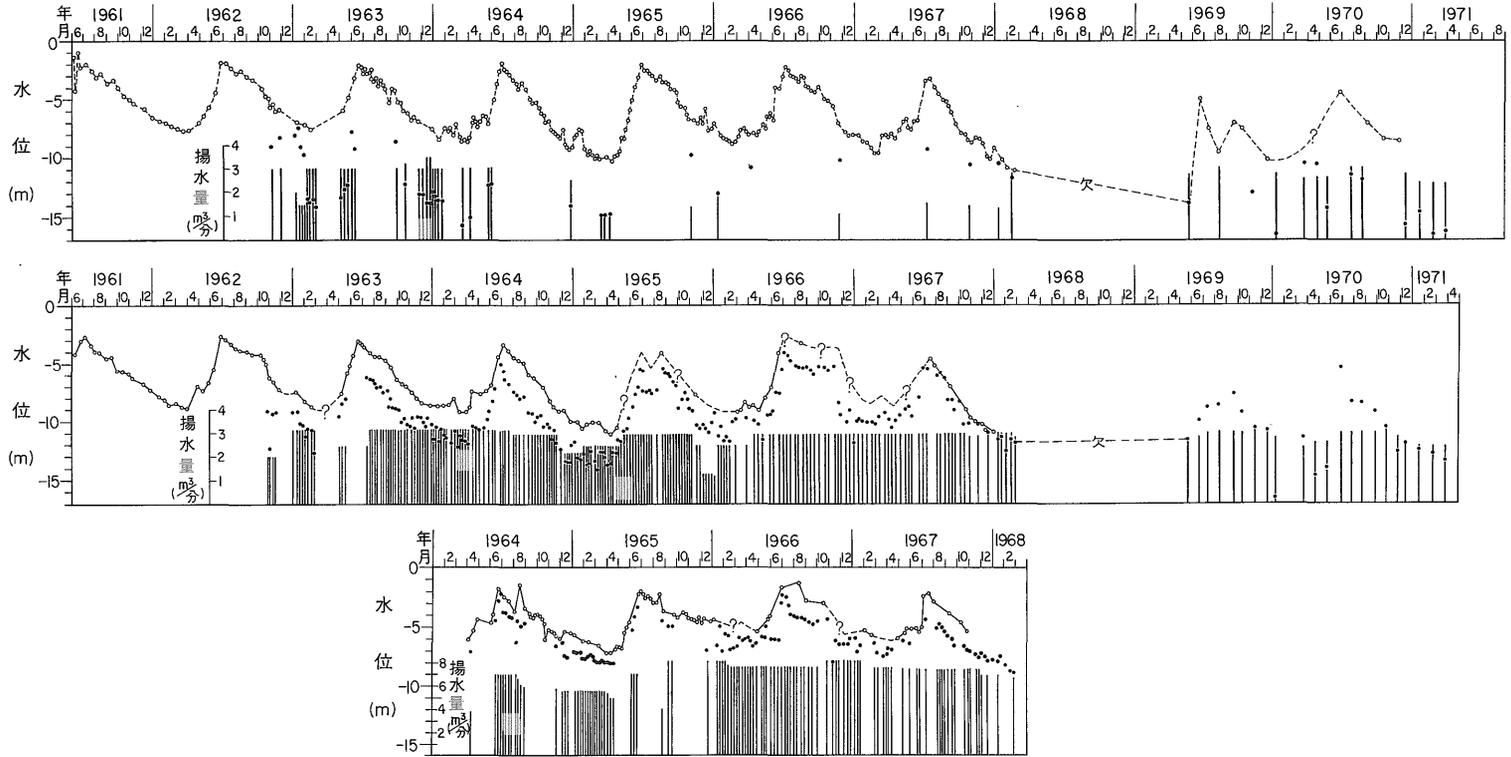
蔵田・ほか(1956, 258-259p.)は本地域にある深度150mまでの若干の井戸について、井戸構造およびその圧力面・揚水水位および揚水量などとの関係から地区別および深度別における帯水層の湧出能力の比較を行っている。また、揚水量の大きな井戸の例についての記載がある。これによると、一日の揚水量は、水位降下が18m前後で9,000m³前後である。ここでは、深井戸台帳中の記録を参考にして、主として内陸部にある深度、130から270mまでの井戸の揚水量と揚水水位との関係を示してみた(第20図)。図によると、例えば1日に4,000m³の地下水を取得するためには、若干の例外はあるが、大部分の井戸が、その揚水水位を10m以上に維持する必要がある。以上から、内陸部にある各種産業の水需要が大きい時期には、地下水汲上量の増大に伴っていちじるしい揚水水位の低下が予想される。



- 1 富士市宮島町 2 同市蓼原 3 同市鮫島
 - 4 同市今泉町和田 5 同市今泉 6 同市今泉
 - 7 同市原田町 8 同市比奈町 9 同市比奈町
 - 10 同市富士岡町 11 同市富士岡町 12 同市須津町
 - 13 同市川尻町
- (深井戸資料台帳P784~797による)

第20図 深井戸の揚水量と揚水水位

第21図は、同一工場の敷地内にあるk-1井, k-2井およびk-3井における揚水量と揚水水位および揚水停止後の水位などの関係を示している。各井戸の水位は、いずれも冬季に低下し、夏季に上昇するパターンを毎年くり返しながら変動している。揚水量と水位との関係をみると、冬季間は揚水量を減少しても水位はいちじるしく低下し、夏季には冬季にくらべて揚水量を増大しても水位低下が少ないという事実がみとめられる。この関係は、揚水量の増大に伴う水位低下の一般的な関係と相違する。この一因として、地下水の供給量の多寡が時期によって相違するとの考え方もある。しかし、他の一因としては、冬季に、当工場および周辺工場などの深井戸群が大量の地下水を一斉に汲みあげた場合、揚水に伴う水位低下の影響が各井戸の水位に波及する、いわゆる水位干渉が考えられる。



凡例 ●: 揚水中の水位 ○: 揚水停止後の水位

第21図 k₁井・k₂井およびk₃井における揚水量と揚水水位および揚水停止後の水位

5.6 深井戸の完成年次と塩水化との関係

100m以深の帯水層から取水する d 井は1955年に完成し、その口径は130 mm である。揚水量は不明であるが、井戸の口径を考慮すると大量の揚水は期待できないと思われる。同井に塩水化が生じたのは1961年7月であったから、井戸完成後6年7カ月で塩水化したことになる。また、e井は1956年3月に完成し、井戸の口径は350 mm である。同井に塩水化が生じたのは1960年11月である。したがって、同井は井戸完成後、4年8カ月で塩水化したことになる(第1表)。以上の関係は、5.3で述べたが、井戸群の揚水量の多寡によって、各井戸における塩水化の時期に遅速が生ずる可能性があることを間接的に示している。

5.7 深井戸の水位と Cl⁻ 濃度との関係

深井戸の水位と Cl⁻濃度との関係を検討するために、若干の観測井において揚水水位および揚水停止後における水位などの観測を併せて行った(第22図、第23図)。

これらの図から、深井戸群の Cl⁻濃度はいずれも揚水水位の低下に対応して次第に増加する関係が指摘できる。さらに低下した揚水水位が上昇すると、地下水中の Cl⁻濃度が次第に減少する事実がみとめられる。この事実は、5.6で述べた深井戸群の塩水化にそれぞれ時間的な遅速が生ずる原因は、深井戸群の揚水水位の状態すなわち揚水量の多寡に関係することを実証している。

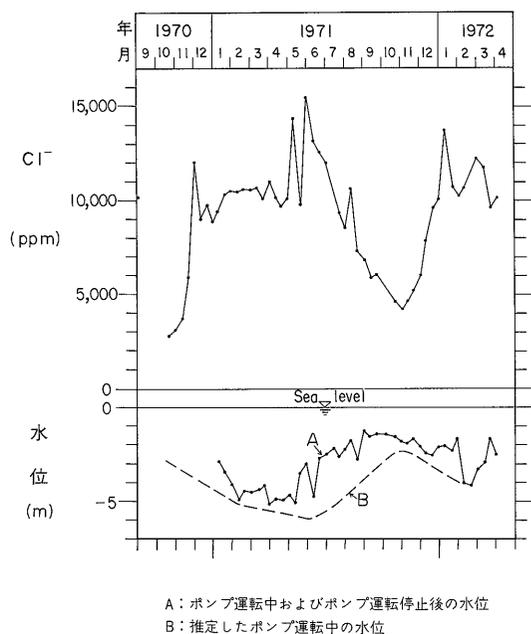
第24図は h-1井、h-2 井の Cl⁻濃度と隣接する水位観測井 k 井の記録を並べて相互関係を示している。Cl⁻濃度が水位の低下および上昇に対応して増加および減少を示していることから、これらの工場などの地下水使用量は夏季にくらべて冬季に増加するものと思われる。

j-1井およびj-2井はいずれも自噴井である。両井の間隔は10mであって、それぞれの静水位は井戸の管頂に取

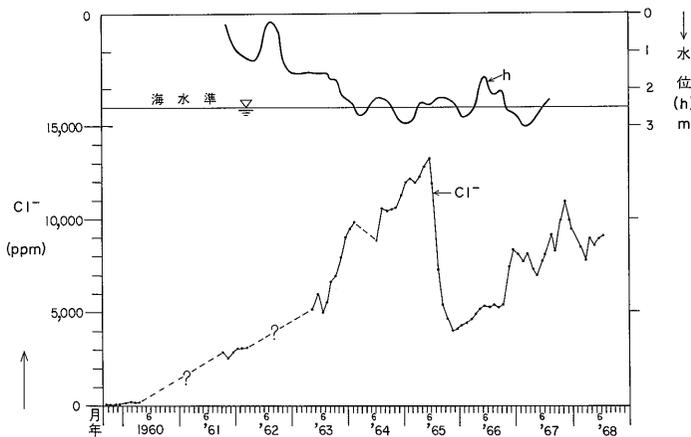
付けた透明ビニール管で観測できる。j-1 井に取付けた吐出管のバルブを開けて放水すると、その影響が j-2 井に及び j-2 井の水位は次第に低下する。さらに、j-1 井のバルブを全開にして長時間放水すると j-2 井の水位は地表面近くまで低下する。第12図中にみとめられる Cl⁻濃度の増加は、1964年7月頃は湯水の時期にかんがい用として放水したためであり、また、1969年1月頃は道路工事の用水として放水したためである。

第25図に水位と旬別降水量との関係を示してある。

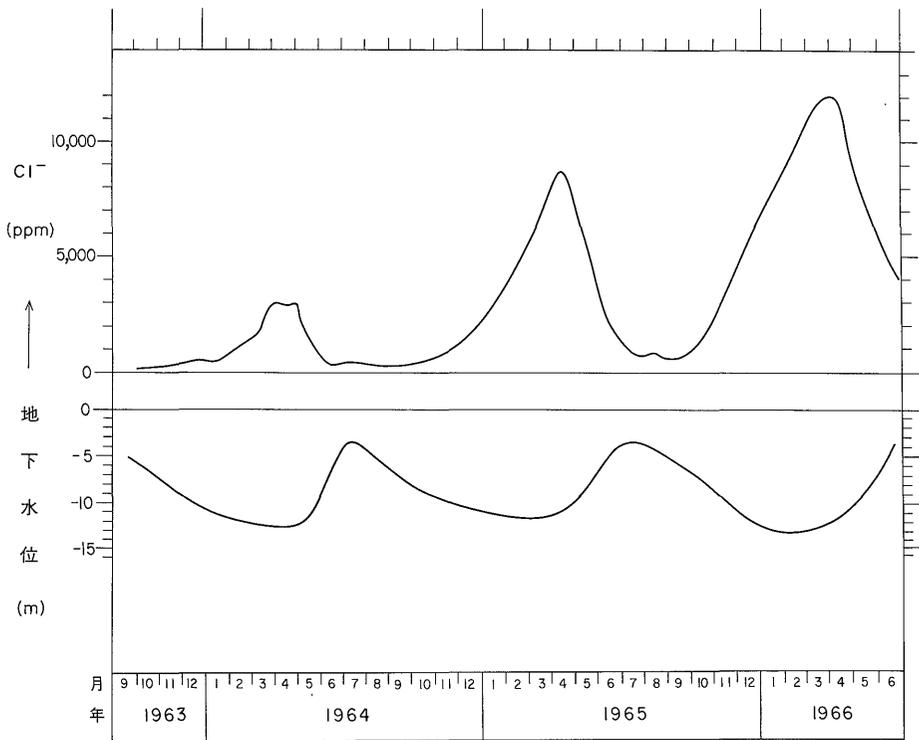
j-1 井では放水期間が含まれているため、降水量と水位



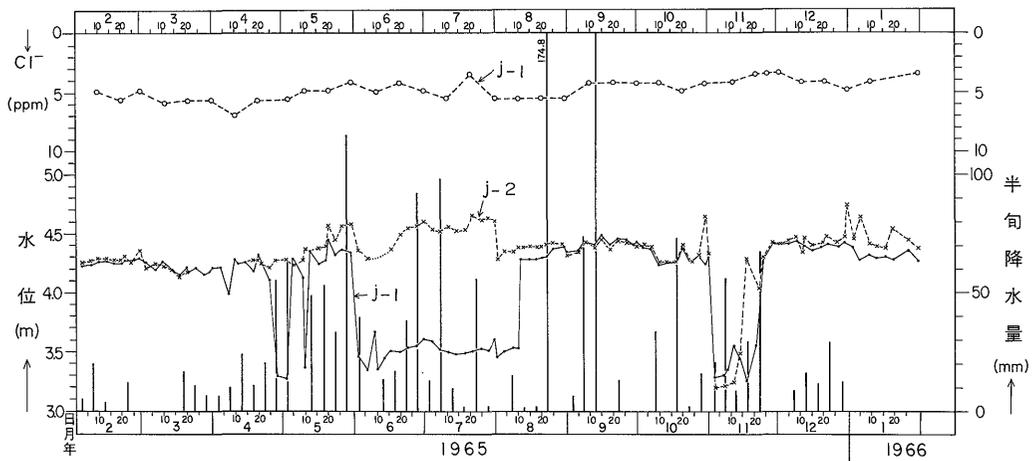
第23図 n₋₁ 井における水位と Cl⁻ の関係



第22図 e 井における水位と Cl⁻ の関係



第24図 揚水水位と Cl^- の関係



第25図 j-1 および j-2 井における水位と旬別降水量および j-1 井の Cl^-

との関係は明瞭でない。しかし巨視的にみると、降水量が多い時期には水位が上昇する傾向がある。

5.8 深井戸における水位の経年変化

j-1井、c-3井、k-1井について行った水位の観測結果は第26図に示す通りである。この図からも明らかなように深井戸の水位変動は各井戸によって異なる。これは、それらの井戸の設置された背景からみて、各種産業の年間

を通じた地下水取得量が時期によって相違することに起因すると考えてもよからう。

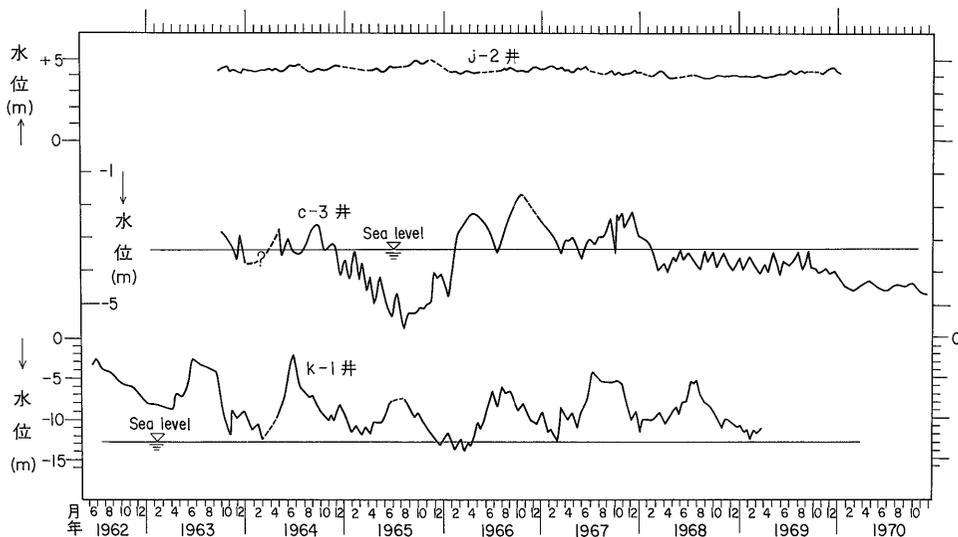
5.9 深井戸群の揚水による影響と Cl^- 濃度との関係

限られた工場敷地内に深井戸群があって、それぞれ多量の揚水を行った場合に、井戸の水位および地下水中の Cl^- 濃度がどのように変化するのであろうか。筆者は、これらの関係を明らかにするため、田子の浦港の付近に

ある工場井について調査を行った。工場敷地内には深度100m前後の井戸が5井ある(第27図)。これらの井戸のうち1号・2号・3号および6号から揚水した地下水は混合して高架水槽に送水される。単独井で水試料の採水が可能なのは4号井(c-2井と同じ、以下省略)に限られる。また、4号井(口径75mm)は、ポンプが井戸に直結されているため水位測定はできない。このため、水位

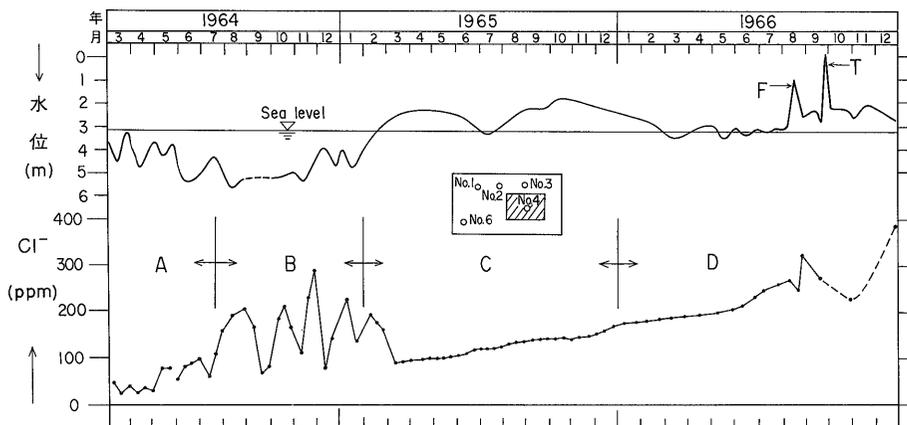
測定は4号井の近くにある3号井(c-3井と同じ、以下省略)を使用した。各井戸の揚水量は毎分0.8 m³から4 m³程度であるが、その詳細は不明である。深井戸群の揚水状態と水位およびCl⁻濃度との関係は第27図の通りである。

第27図から明らかなように、1号・2号・3号および6号など全井が揚水した期間は、水位は次第に低下す



j-2: 自噴井における静止水位, c-3, k-1: ポンプ運転停止時における水位

第26図 j₂井・c₃井およびk₁井における水位の経年変化



説明 { A: No.1井・No.2井・No.3井およびNo.4井を揚水した期間を示す
 B: No.1井・No.2井・No.3井・No.4井およびNo.6井を揚水した期間を示す
 C: No.4井を揚水した期間を示す
 D: No.2井・No.4井およびNo.6井を揚水した期間を示す
 F: 工場の電休日 T: 台風26号による停電

第27図 井戸群の揚水状態が被圧地下水の水位ならびにCl⁻におよぼす影響

る。そして4号井の Cl^- 濃度は、3号井の水位低下に対応して次第に増加する。また、深井戸群が揚水を停止した後、4号井が単独で揚水した期間には水位が上昇し、この水位上昇に対応して Cl^- 濃度は次第に減少する。

以上の結果は、深井戸群がそれぞれ異なった量を揚水する場合、各井戸の揚水に伴う水位低下の影響が、揚水井間の距離の遠近に応じて、井戸相互間により大きくあるいはより小さく作用する。このような揚水井相互間の水位干渉によって、各揚水井の水位がより以上の低下を強いられることになる。5.5で述べた k-1井、k-2井および k-3井などの冬季におけるいちじるしい水位低下は、揚水に伴う井戸相互間の水位干渉で説明できる。

深井戸群の揚水による水位干渉が揚水井相互間にいちじるしい水位低下をもたらす、その水位低下に伴って Cl^- 濃度が次第に増加することは明らかである。また、全井の揚水停止あるいは揚水量の減少に伴って、4号井の Cl^- 濃度が急速に減少する事実から、これまでの各観測井に認められた Cl^- 濃度の不規則な変動は、揚水量の多寡および揚水状態などが根本的な原因であることは、ほぼ間違いない。

5.10 水位低下と Cl^- 濃度との関係

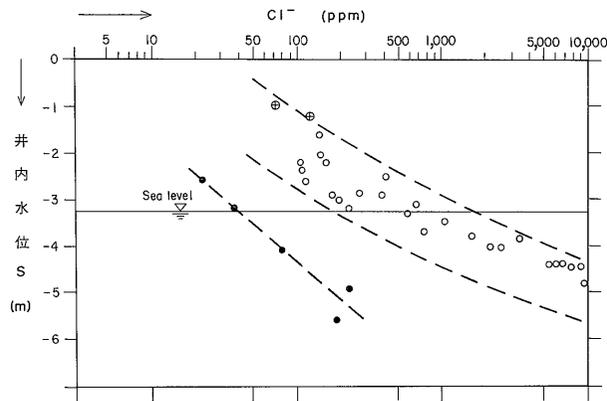
蔵田・ほか (1956, p. 249, p. 258) によれば、田子の浦港付近には、1日に8,300-13,000 m^3 の地下水を揚水する井戸群がある。井戸の深度は90-140mであり、揚水水位は地下16-18mに及んでいる。しかし、それから60-70m離れた所では同一帯水層から収水する灌漑用の自噴井が存在している。これらのことから、使用量の

増加によって地域全体の水位～圧力面が低下したのは事実と思われるが、元来、非常に湧出能力が大きな帯水層であるから、井戸相互の干渉は目立って現われていない場合が多いと述べている。また、比留川・ほか (1957, p. 192-193) によれば、 Cl^- 濃度は6.5 ppm程度に過ぎない。

上述の関係をみると、揚水水位を海水面下にいちじるしく低下させても Cl^- 濃度が増加しない一つの理由は、帯水層中の淡水エネルギーが海水のそれよりも優れている時期があると考えられる。

第28図は深井戸の水位と Cl^- 濃度との関係を示している。図によると、塩水化の初期には、揚水水位を海水面下に低下させても深井戸の地下水中の Cl^- 濃度の増加はいちじるしくない。しかしながら、塩水化の後期になると、揚水水位が海水面に近づくと、あるいは海水面より低下すると Cl^- 濃度が急速に増加する傾向がみとめられる。

以上の結果は、帯水層中の淡水および海水エネルギーの優劣による平衡状態を推定させるが、直接的には被圧地下水の静止水面の位置に関係すると思われる。すなわち、静止水面が海水面よりも高位置にある時期には、揚水水位を海水面より低下させても Cl^- 濃度はいちじるしく増加しない。しかしながら、深井戸群の大量揚水によって、累積された水位低下量が井戸相互間に作用して揚水井周辺の静止水面が次第に低下するとともに、低下範囲が次第に拡大する。海水は、帯水層中の低下水面の範囲に向かって侵入するし、さらに侵入した塩水塊は圧力面の低下部に向かって次第に拡大することが考えられ



注 ● ポンプ運転中の水位
○ ポンプ運転中および運転停止後の水位
⊙ 地下水の湧上中止後における水位

第28図 深井戸の水位と Cl^- の関係

る。塩水化の初期の第2図に示されている各井戸の塩水化の過程は、この考え方で説明できるであろう。

5.11 揚水を中止した深井戸の水位と Cl⁻ 濃度との関係

富岳興業 K. K. は1970年8月に操業を停止したため、同工場敷地内にある深井戸5井の地下水汲上げは中止された。しかし、3号井 (c-3井と同じ) の水位は現在も引きつづき観測を行っている (第29図および第26図)。

地下水汲上げ中止後における3号井の水位は次第に上昇を示し (第29図)、1977年1月には自噴状態に達している。また、自噴の時期は1号井が3号井よりも早く、1号井は1975年に自噴を停止した時期があったが、全体を通じた期間中自噴状態とみてよい。

水位の上昇あるいは回復、さらに水位上昇時期の相違などは、揚水停止の効果と同工場の周辺にある深井戸群の揚水量の多寡による水位干渉の効果などが考えられる。

筆者が測定した1号井および3号井における水位および Cl⁻ 濃度は第2表のとおりであり、水位が海水面より上位にある状態の地下水にも相当量の Cl⁻ が含まれることがわかる。Cl⁻ 濃度は水位の上昇に伴って減少する傾向がみとめられるが、1977年2月8日における Cl⁻ 濃度はいちじるしく増加している。さらに、Cl⁻ 濃度の増加の割合は1号井と3号井ではかなり相違する。

被圧地下水中の Cl⁻ 濃度のいちじるしい変動は、測定井戸の周辺にある揚水井群による水位干渉のためと思われる。すなわち、各揚水井の収水層の位置・揚水量の多寡・揚水継続時間および各揚水井から測定井戸までの距離の遠近による相違などが、それぞれ関係するものと考えられる。

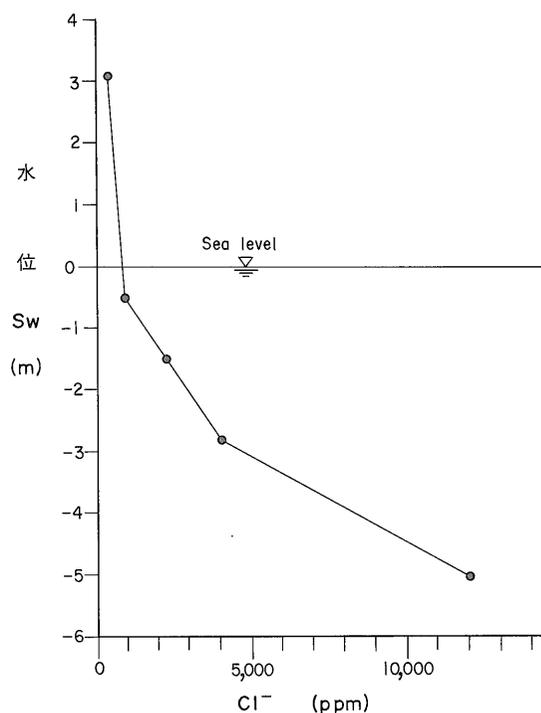
また、これらの結果は、地下水塩水化の後期になると、楔形をした塩水塊を海側に後退させるためには被圧地下水の静止水面をかなり高位置に維持する必要がある。反対に、僅少の水位低下が塩水塊をより進行させる

第2表 地下水汲上げ中止後における深井戸の水位と Cl⁻

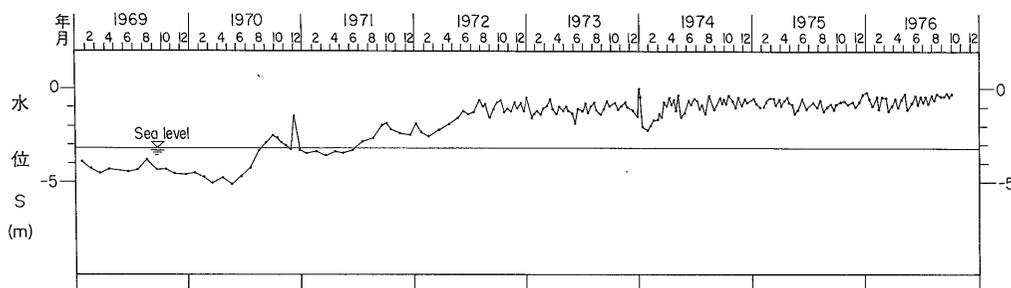
年月日	1号井			3号井		
	水位	Cl ⁻	電気伝導度	水位	Cl ⁻	電気伝導度
	m	p.p.m	μS/cm	m	p.p.m	μS/cm
1974.2.9	+2.50	3,598		+1.24	131.3	
1975.2.5	自噴	615		+2.13	76.7	
1976.2.18	自噴	362	1,300	+2.02	119.4	520
1977.2.8	自噴*	3,065	9,000		9,650	20,000以上
1977.3.30	自噴	3,951	11,500	+2.00	9,750	20,000以上

水位は海水面を基準とする

* 自噴量は推定 200/分



第30図 n₋₁ 井における水位と Cl⁻ の関係



第29図 c₋₃ 井における水位の経年変化

ことになる。すなわち、塩水化の後期には拡大した塩水塊が近い所に存在していることを反映している。

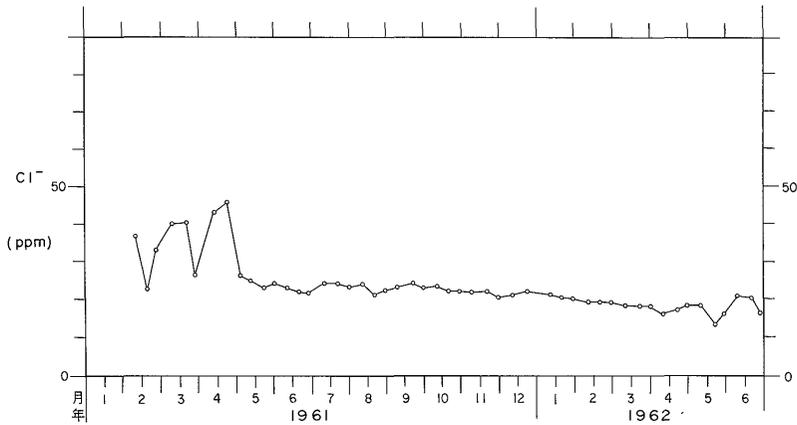
n-1井および n-2井では、工場の生産過程である一部の操業を停止すると水位が上昇する。さらに、一時的に操業を停止すると n-2井は自噴状態となる。Cl⁻濃度は水位上昇に伴って減少する傾向が認められ、自噴水の Cl⁻濃度はいちじるしく減少する。自噴現象は一時的であって、Cl⁻濃度は水位低下に応じて再び増加する (第30図および第23図)。

5.12 観測結果からみた被圧地下水の塩水化と塩水化モデル

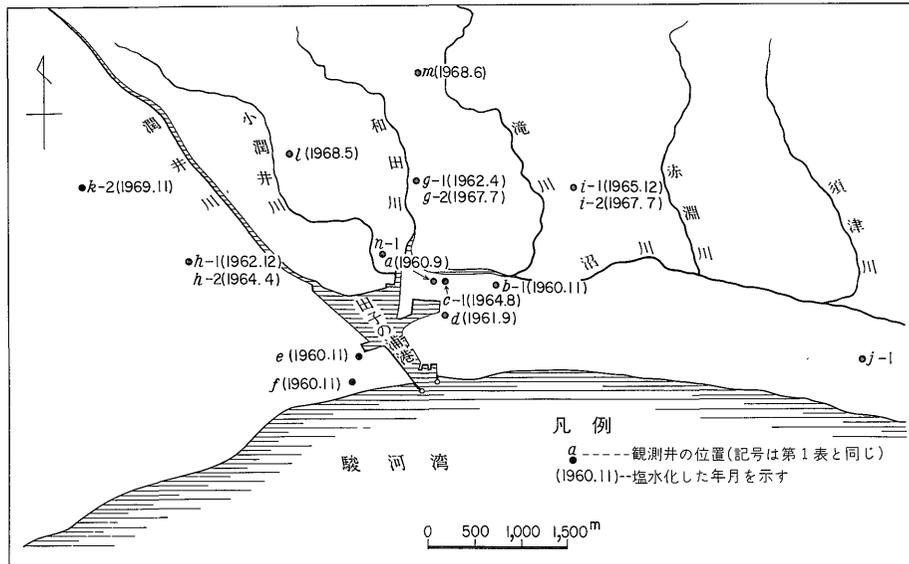
池田 (1967) は Cl⁻の高濃度をもたらした塩分の起源

が海水であることは、ほぼ確実であると述べている。一般に、自然現象として潮の干満による作用が、海岸近くの地下水中の Cl⁻に若干量の影響を与えることが知られている。尾崎 (1976) は大潮および小潮の満潮時にも Cl⁻濃度に変化が認められるが、その差は数 ppm に過ぎないと述べている。

観測初期に、田子の浦港の付近にある工場休止井について干潮・満潮を考慮した観測を行っている。第31図中に認められる Cl⁻濃度の変動は、潮の干満による影響とはいい難く、むしろ揚水井群の水位干渉による影響と思われる。仮りに、Cl⁻濃度の変動が潮の干満による影響であるとしても、その濃度の差は 20 ppm 程度に過ぎな



第31図 工場休止井における Cl⁻ の変化



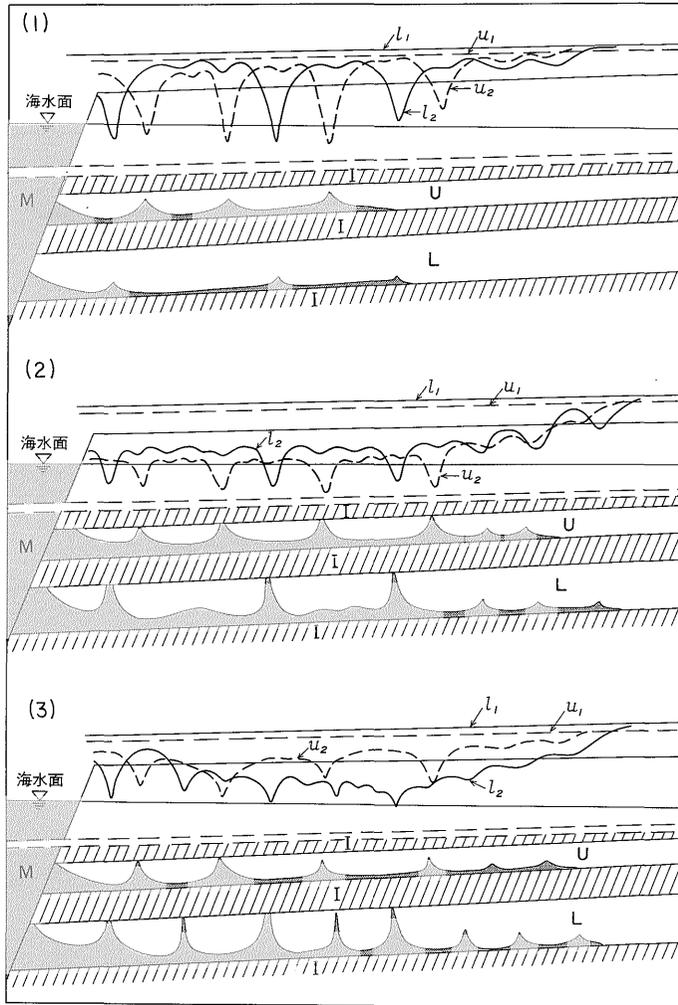
第32図 被圧地下水の塩水化の時期

い。したがって、観測初期に認められた被圧地下水中の Cl^- 濃度の急速な増加は、潮の干満による影響だけではないと考えてよい。

これまでの観測結果から、被圧地下水の塩水化した時期および塩水化の兆候が認められた時期を第32図に示している。巨視的にみると、塩水化は海岸から次第に内陸に及んでいるが、詳細をみると、塩水化の時期は海岸からの距離に無関係であり、さらに同一工場敷地内でも塩水化の時期がそれぞれ異なっていることがわかる。以上

は、 Cl^- 濃度の増加をもたらした塩分の起源が海水であることを示しており、さらに本地域の塩水化は塩水塊が海岸から次第に内陸に波及する拡散 (Encroachment) でなく、帯水層中の淡水の減圧部に突如として塩水化が発生する楔形をした塩水塊の侵入 (Intrusion) であることは、ほぼ確実である。

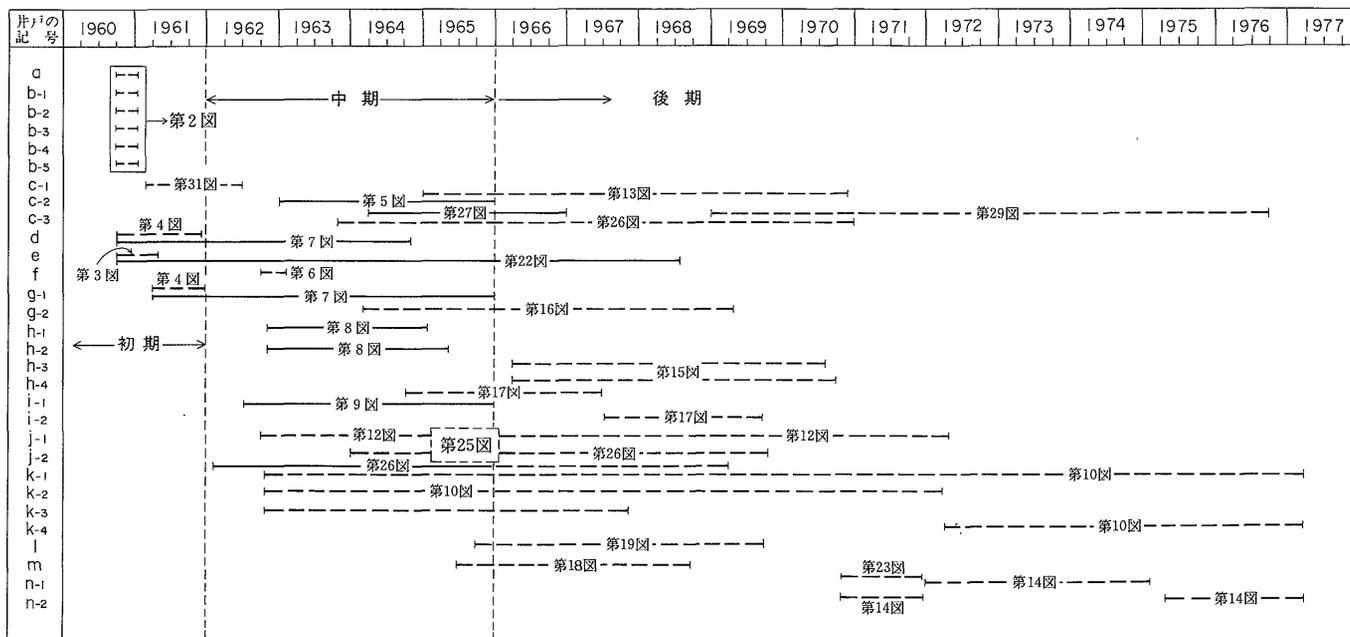
第33図は、初期・中期および後期における各井戸の揚水状態・揚水による水位低下および Cl^- の挙動などについての考察の結果推定された地下水塩水化モデルであ



U: 上部帯水層 L: 下部帯水層 I: 難透水層 M: 海水
 u_1 : U層の被圧地下水の静止水面 l_1 : L層の被圧地下水の静止水面
 u_2 : U層の被圧地下水の揚水による井戸の揚水水位、およびその影響をうけた水位
 l_2 : L層の被圧地下水の揚水による井戸の揚水水位、およびその影響をうけた水位

第33図 観測結果から推定される塩水化のモデル

観測記録の索引



る。以下、簡単に説明する。

(1) 揚水井の数が少なくU層中およびL層中の被圧地下水の静止水面(圧力面)が高位にある時期には、揚水水位を海面下で低下させても塩水化が生じない場合がある。仮に塩水化が生じて、それは局所的に過ぎない。揚水量を減少させると塩水塊は次第に後退する。

(2) 地下水の開発が進み、U層およびL層中の被圧地下水を対象とした揚水井群が多量の地下水汲上を行うと、揚水による揚水水位の低下および揚水井群による水位干渉によって圧力面は次第に低下する。侵入した楔形の塩水塊は帯水層中の圧力面低下部に向かって次第に拡大する。

(3) 侵入した塩水塊の拡大した後には地下水の汲上量をいじり減少させた状態を示している。U層中の地下水汲上量はL層中のそれにくらべていじり減少している。汲上量の減少に伴って圧力面が次第に上昇するため内陸部に侵入した塩水塊は次第に縮小し、海側に後退する。しかしながら、海側付近では圧力面が上昇しても、なお優勢な塩水塊が停滞しているため、海側付近にある揚水井では揚水による僅かな水位降下によって再び塩水化が生じる。

6. 結 論

岳南、海岸平野における被圧地下水塩水化の監視井および塩水化の研究に関する資料を得るために深井戸の水位および地下水中のCl⁻濃度の観測を実施してきた。この結果、興味あるいくつかの事実があきらかとなり、多くの知見がえられた。

1. 自然状態における帯水層中の被圧地下水は、水文学的水循環による地下水の供給・排出および海水の満潮・干潮などの状態に対応して、海水と静水圧的平衡状態に近い状態で平衡する。

2. 深井戸による多量の地下水汲み上げが行われると、帯水層中の水は動水圧状態となる。このような状態で淡水と海水はなお平衡状態を維持しようとするため、海水が帯水層中の減圧部に向かって移動する。さらに地下水汲上量の増加および減少に伴って塩水楔(楔形をした塩水塊)の縁端は容易に前進および後退する。とくに深井戸群の多量な地下水汲上げによる水位干渉は地下水の塩水化を促進させる。そして、この結果は、塩水楔の縁端を従来の局所的な地点から面的な拡がりとして増大させる。

3. 本地域における被圧地下水の塩水化は、海水が海

岸から次第に内陸に波及する拡散でなく、帯水層中の淡水の減圧部に突如として塩水化が発生する塩水楔の侵入であることはほぼ確実である。

4. 局所的な被圧地下水の塩水化は永久的なものではなく一時的な現象である。塩水化地域における深井戸群の地下水汲上量を可能なかぎり減少させるか、あるいはその汲上を中止すれば、塩水化地域が次第に縮小する可能性がある。このような場合、塩水楔が後退する時期は、内陸にくらべて海側が遅れる可能性がある。

5. 観測期間中を通じて、各観測井における正確な揚水量を把握することは困難であった。このため、本報告では主として深井戸の水位と地下水中のCl⁻濃度との関係を述べた。実際には、観測井およびその周辺にある深井戸群の揚水量および揚水継続時間などとの関係において検討されることが望ましい。

文 献

- 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 東海地域調査。第10報, 地調月報, vol. 8, p. 187-198.
- 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.
- 経済企画庁総合開発局国土調査課(1973) 中部圏地下水(深井戸)資料台帳。p. 784-797.
- 蔵田延男・森 和雄・尾崎次男(1956) 静岡県岳南地域工業用水源調査報告 東海地域調査。第8報, 地調月報, vol. 7, p. 236-260.
- 村下敏夫(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.
- 尾崎次男(1967) 海岸地下水における塩素イオン量の変動—地質調査所観測成果—。工業用水, no. 107, p. 34-48.
- (1974) 臨海付近における被圧地下水の塩水化について 観測結果の二・三の実例。日本地下水学会誌(演旨), vol. 16, no. 1, p. 28.
- (1976) 八代市の地下水保全に関する地下水調査の技術指導。地質調査所受託報告書。

(受付: 1978年5月15日; 受理: 1978年5月25日)