

徳島県那賀川下流流域における被圧地下水の塩水化

尾崎 次男

OZAKI, Tsugio (1984) Sea-water intrusion into the confined groundwater of the lower Nakagawa river basin, Tokushima prefecture. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 35(10), p. 445-475.

Abstract: Long-term observations have been carried out at the confined water wells in the alluvial plain of the lower Nakagawa river basin since 1967. Data of fluctuations of water levels and chloride concentration are obtained throughout the observations.

Also, the author measured the specific electrical conductance of groundwater at each pumping well, discharge from fish-aquicultural ponds which indicates the amount of pumpage and flow rate of streams and irrigation canals in summer of 1974, winter of 1975 and summer of 1976.

Principal confined aquifers are distributed at depths of 20-40 meters below the ground. Groundwater in the plain is recharged from rainfalls and irrigation canals and paddy fields, considering on the basis of observational results.

The area of sea-water intrusion coincides with the local heavy pumping places. At there, chloride concentration in the confined groundwater tends to increase in summer season and decrease in winter season.

The author estimated groundwater budget in the plain. In conclusion, the sea-water intrusion is caused by inland migration of interface between the sea water and the fresh water as the results of overdraft in summer season.

1. 緒言

1955年頃の、那須川河口付近の臨海部では深度30m前後の掘抜井から水質良好な被圧地下水を得て、一般家庭の飲料水のほか水田・畑地の灌漑に利用していた。工業用水源調査グループ(1956)によると、橘湾に臨む見能林村(現阿南市見能林町)の一部地区に水比抵抗値が2,000 Ωcm (導電率 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$)の自由面地下水及び被圧地下水の賦存が認められていた。加えて一部地区における地下水面の低下及び地下水塩水化の兆候が認められたことから、本地域における地下水保全の必要が提唱されるに至った。

地質調査所は本地域における将来の地下水開発によって予想される地下水障害を監視する意味で、主として被圧地下水を対象として1958年から地下水水位の通年観測を、続いて1960年から被圧地下水の塩化物イオンの通年観測を実施してきた。これらの観測結果の一部は尾崎(1967, 1974, 1978, 1979)により発表されている。筆者は那賀川下流流域における被圧地下水の塩水化について、

これらの地下水の水質及び地下水水位観測結果をもとに、主として鮎養殖場の地下水汲上量と地下水水位との関係から検討し、さらに地下水の水収支についても考察したので以下に述べる。なお、徳島県は1969年に本地域の地下水調査を行い、鮎養殖場における地下水使用量の調査ならびに地下地質の状態を把握するために深井戸を掘さくし、併せて揚水試験を行っている。これらの深井戸は水位観測井に仕上げられ、以後本地域の地下水水位観測網強化に活用されている。

現地調査に際しては、徳島県企画開発部、阿南市水道課、那賀川町水道課、羽の浦町水道課、鮎養殖場及び工場等から多大な御協力を賜わった。これらの関係各位に対し深く御礼を申上げる。なお、本研究では徳島県の水水位観測記録の一部を使用させて頂いた。重ねて深謝する次第である。

2. 調査の概要

調査研究地域是那賀川及び桑野川の下流にひろがる沖積低地であって、阿南市、羽の浦町及び那賀川町等の一部を含む。その面積は約 55 km^2 である(第1図)。

* 元環境地質部

第1表 調査実績

調査年月日	1974年	1975年	1976年
	7月31日 と 8月11日	11月27日 と 12月1日	7月29日 と 8月3日
測定項目	箇所	箇所	箇所
地表水の水温及び導電率	39	35	
地下水の水温及び導電率	114	68	107
井戸の水位	35	16	4
鮎養殖場の排水路の流量	37	20	48
河川・かんがい用水路等の流量	60	32	

第2表 地下水位観測井の諸元と観測期間

番号	井戸		観測方法	標高	開始年月		終了年月	
	口径	深度			年	月	年	月
25	mm	m	自記	m	年	月	年	月
25	150	57.0	自記	1.7	1969	4	1979	3
26	150	47.0	自記	約2.0	1971	11	1979	3
27	100	20.3	自記	約5.0	1958	6	1979	3
28	250	37.0	自記	約8.0	1958	6	1977	3
29	150	15.0	自記	約10.0	1958	6	1979	3
	150	40.0	自記	約2.0	1958	6	1969	3

番号は第2図と共通

第3表 被圧地下水の水質観測井の諸元と観測期間

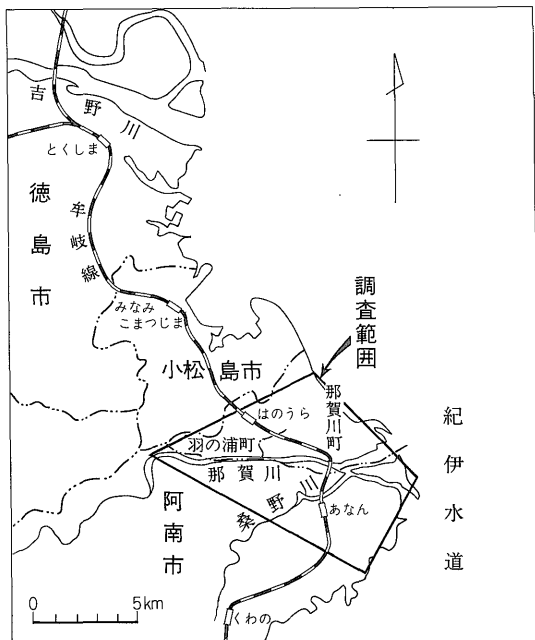
番号	井戸		標高	開始年月		終了年月	
	口径	深度		年	月	年	月
1	mm	m	m	年	月	年	月
1	100	46		1960	9	1969	9
2	300	60		1960	9	1966	4
3	300	35		1966	5	1967	7
4	300	36	2.0	1969	1	1975	9
5	200	33	2.0	1969	10	1969	11
6	200	30	2.0	1969	12	1973	9
7	200	25	2.0	1973	10	1976	10
8	200	25	3.5	1973	4		
9	200	25	6.5	1973	4		
10		28.5	約1.5	1970	10		

行い、硝酸銀の滴定法によって塩化物イオン濃度(CI⁻)を求めた。水質観測井の位置は第2図に、観測井の諸元及び観測期間は第3表に示す通りである。

3. 調査地域の概要

3.1 地形

本地域は那賀川及び桑野川沿いの沖積低地帯で那賀川



第1図 調査範囲

2.1 調査期間

第1次調査 1974年7月29日—8月13日

第2次調査 1975年11月25日—12月3日

第3次調査 1976年7月27日—8月5日

2.2 調査内容と実績

調査内容及びその実績は第1表に示す通りである。なお調査に平行して水道水源・工場・養殖場等を巡検し、井戸の柱状図及び帯水層の水理定数等の資料収集並びに井戸の揚水状況等の視察を行った。

本調査に使用した流速計は T. F 型電気式流速計で回転翼が20回転で1音を発するものである。

$V = 0.233N + 0.006$, V : 流速(m/sec), $N = n/T$: T 秒間に要した回転翼の回転数(n)すなわち単位時間当りの回転数。水の導電率の測定は TS-3 型電気伝導度計を、水温・気温等の測定は最小目盛が0.1°Cの棒状水銀温度計をそれぞれ使用した。

2.3 地下水位の観測

地下水位観測井の位置は第2図に、観測井の諸元及び観測期間は第2表にそれぞれ示す通りである。観測方法は自記記録計によるものである。また、第2図に徳島県が実施している地下水位観測井の位置を示した。観測方法は自記記録計と毎日1回の手観測によるものがある。

2.4 地下水の水質観測

観測方法は原則として毎月10日、20日、30日に採水を



第2図 地下水の水位及び水質観測井並びに地質柱状図等の位置

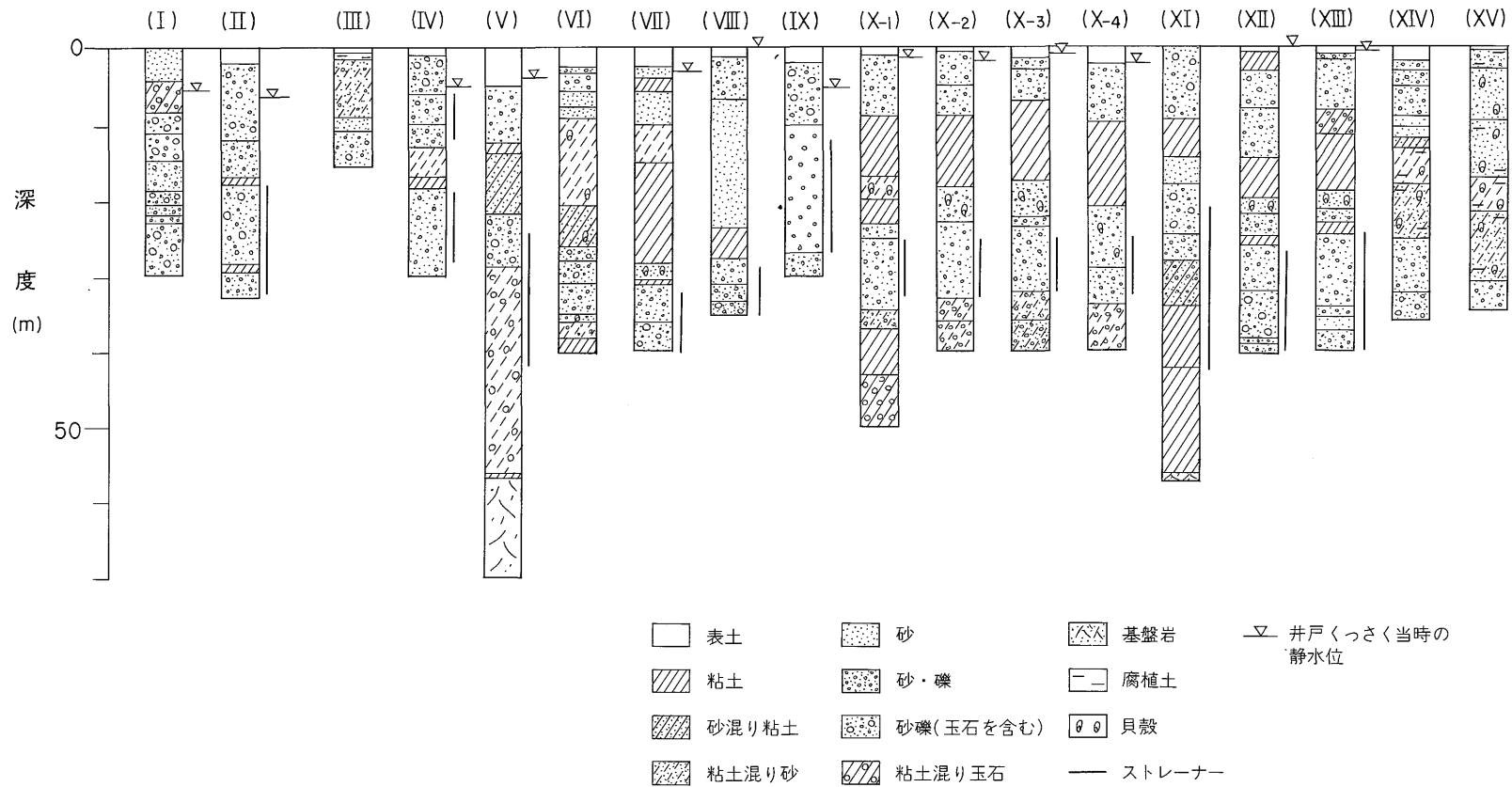
平野と呼ばれる。平野の北西から西部さらに南西にかけての周辺は古期岩類からなる丘陵及び山地が連なる。那賀川は山地を脱する付近から東流して紀伊水道に注ぐが、両岸低地の地形は概略、扇状地とその前縁部、後背湿地、海岸砂地、砂丘、三角州及び自然堤防に大別される。扇状地の標高は扇頂で15m、前縁部は2-3mであって、この部分では旧河道の分布が認められる。太田川及び岡川はその代表的なものとして示されている。後背湿地は

那賀川町江の島付近から中島に至る付近に認められ、阿南市では七見町・牛屋崎付近に認められる。砂丘・砂州は那賀川町出島、阿南市福村町付近に認められ、現三角州は阿南市辰巳町付近に分布している(第2図)。

3.2 地下地質と帯水層

得られた柱状図を第3図に、その位置は第2図にそれぞれ示す通りである。

本地域では、那賀川町今津小学校及び阿南市横見町の



第3図 那賀川下流域における地質柱状図

徳島県地下水水位観測井が深度 56m 前後で中—古生界の風化層に達している。第 2 図の那賀川町敷地・今津浦・上福井・阿南市横見町及び領家町を結ぶ地下地質は場所によって若干異なるが、巨視的には下位から上位に粗粒・細粒・粗粒の三角州性相を示す堆積物からなる。柱状資料から、この地域の地下地質は深度 10m 前後に分布する粘土—シルト層を境にして上部層と下部層に大別される。上部層は厚さ 10m 前後の砂・礫等の粗粒堆積物を主とし、所により薄層の粘土を含み自由面地下水の帯水層となっている。下部層は部分的に玉石を混える粘土質礫と礫・砂等の粗粒堆積物を主とし、一部に貝殻が含まれ、また薄い粘土層が挟まれる。下部層の砂層と砂礫層は所により 20m 以上におよび被圧地下水の帯水層となっており、その上位にある粘土層は被圧地下水の制限層となっている。厚い粘土層及びその下位にある貝殻を含む砂層或いは砂礫層は沖積地帯の海岸寄りに広く分布するようである(徳島県, 1969, 1974)。しかし、その上限の分布範囲については不明である。

3.3 帯水層及び井戸の水利

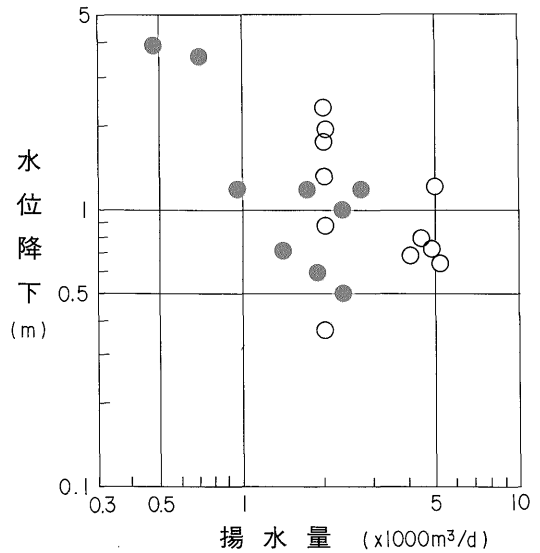
例えば、この地域に設けられた地下水水位観測井において、過去に行われた揚水試験結果から求められた透水係数(T)は $1,970-20,400 \text{ m}^2/\text{d}$ 、透水係数(k)は $1.09-1.58 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ と大きいことが知られている。

この地域では小口径の掘抜井を除いて、被圧地下水を取得する井戸の掘さく口径は 125-300 mm のものが多い。井戸の水位降下量(揚水水位—揚水開始前の水位)と揚水量との関係を第 4 図に示す。また、段階試験が行われている水源井があり、その例を第 5 図に示す。第 4 図及び第 5 図からも明らかなように、この地域の井戸では水位降下 0.4-2.0m で 1 日に $2,000 \text{ m}^3$ の揚水が可能である。

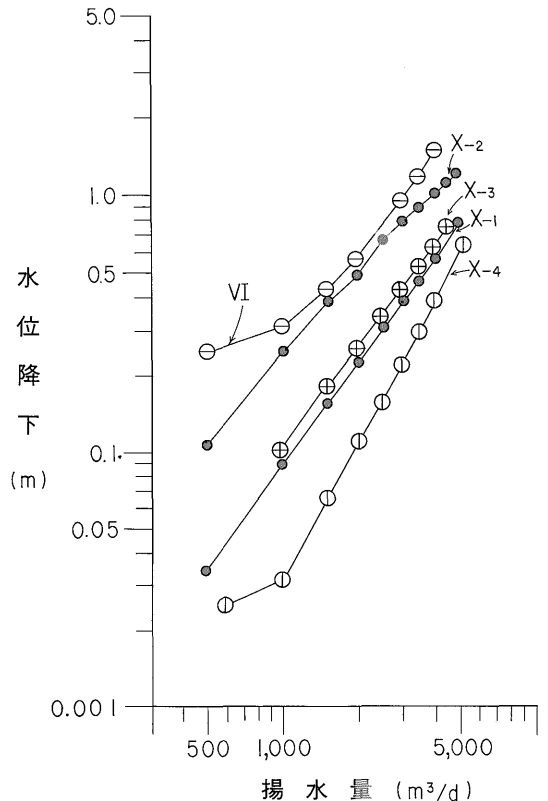
3.4 降水量及び那賀川の流量

日本国有鉄道富岡保線区の記録による阿南市の年降水量は 1974 年が $2,540 \text{ mm}$ 、1975 年が $2,590 \text{ mm}$ 、1976 年が $2,509 \text{ mm}$ となり、3 年平均では $2,546 \text{ mm}$ となる。月降水量は 6 月から 10 月までが多く、その合計は年降水量の 63% を占める(第 4 表)。年平均気温は 15.6°C 程度である。

那賀川は徳島県では吉野川に次ぐ河川であって、徳島県にとって水利用上重要な河川である。羽の浦町古毛地点上流の流域面積は 765.0 km^2 、累年平均濁水量は $7.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ (1956-1966)、累年平均流出高は $2,966 \text{ mm}$ である。また、最小流量と最大流量との比は $1:531$ ($16 \text{ m}^3/\text{sec} : 8,500 \text{ m}^3/\text{sec}$) を示す(福田, 1933)。



第 4 図 深井戸の水位降下と揚水量との関係 (白抜は井戸の口径が 250 mm 以上 黒抜は 200 mm 以下)



第 5 図 深井戸 VI (阿南市), X-1~X-4 (那賀川町) の段階試験

第4表 阿南市の月降水量

(単位 mm)

年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
昭和48 (1974)	86	76	50	185	141	256	479	360	685	122	57	43	2,540
昭和50 (1975)	117	139	197	303	91	257	125	458	116	462	278	47	2,590
昭和51 (1976)	20	289	71	190	208	233	353	82	604	220	221	18	2,509
3カ年平均	74	168	106	226	147	249	319	300	468	268	185	36	2,546
合計に対する比率%	2.8	6.6	4.2	8.9	5.8	9.8	12.5	11.8	18.4	10.5	7.3	1.4	

(国鉄、富岡保線区の記録による)

3.5 地表水及び伏流水の利用

本地域では水利用上、那賀川の左岸地区は北岸地区、右岸地区は南岸地区と呼称されるので本文でも以下この呼称にしたがう。那賀川の表流水は北岸農業用水及び南岸農業用水にそれぞれ利用され、堤外地では伏流水が工場等の水源として取得されている。第2図に取水地点を第5表に取水量を示す。

3.6 地下水の利用

地下水は主として上水道・簡易水道用、工場用、養魚用等に取得される。上水道水源井、工場等の位置及び取水量は第2図及び第6表・第7表にそれぞれ示す通りである。

3.7 鮎・鰻等の養殖用水

鮎の養殖場では、養殖用に地下水及び農業用水が使用されている。養殖場には多数の井戸があり、比較的規模が大きい養殖場では複数の井戸からの揚水量は配水塔に導かれ各養殖池に放水されることが多い。また、養殖用水の排水路に揚水管径200mmから300mmの斜流ポンプを設置して養殖用水の循環使用を行っている養殖場がある。養殖用の地下水汲上げ期間は養殖場によってそれぞれ異なると思われるが、聴取によると、例年2月頃から12月10日頃までのようである。現地における井戸諸元と使用量の調査結果を第8表その1、その2に示す。

鰻養殖場における地下水使用量は1箇所当たり1日に500m³前後が多く、その詳細は明らかでない。鰻養殖場における井戸及びポンプ等の諸元と地下水の導電率(25℃換算)・温度等の測定結果は第9表に示す通りである。調査対象の鮎及び鰻養殖場等の位置は第6図に示してある。

3.8 河川及び用水等の流量

本地域における地下水の供給源は降雨のほか灌漑用水路及び湛水田からの地下水補給が考えられる。そこで、本調査地区における水の浸透・流動機構を解明する一助として、主要道路を横切る水路を対象として流量・水の

温度及び導電率等の測定を行った。測定位置を第6図に、測定結果を第10表に示す。なお、1974年の北岸農業用水路及び南岸農業用水路における用水の流速は著しく大であったため、これらの用水路においては水面下で水深の2割に相当する位置の流速を測定し、その流速の80%を平均流速とみなして流量を推定した。また、岡川は藻の繁茂が著しく流速測定は不可能であった。

4. 那賀川下流域における被圧地下水の塩水化

4.1 塩水化被圧地下水の地理的分布

一般に、水の導電率($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25℃換算)はその溶存成分の総量と正の相関がある。1974年、1975年及び1976年の調査結果に基いて等値線で示した被圧地下水の分布は第7図、第8図及び第9図にそれぞれ示す通りである。被圧地下水の導電率の地理的及び季節的変化の特徴は大略以下に要約される。

(i) 導電率が10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上を示す被圧地下水は図に示す那賀川町出島付近から中島、阿南市住吉町、横見町、日開野町を経て見能林町を結ぶ海側の地域に分布する。この分布域の上限は夏季及び冬季において著しい変動はない。(ii) 前述の水質分布域(i)の内陸側に導電率が1,000-10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を示す被圧地下水が帯状に分布する。この塩水化地下水は夏季には、冬季に比して内陸側に若干移動する傾向があり、那賀川南岸の南大京原付近の井戸にも認められる。(iii) 導電率が300-1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を示す被圧地下水は前述の水質分布域(ii)の内陸側に帯状に分布するが、夏季には那賀川町^{たくらじ}工池、赤池を経て那賀川南岸の阿南市柳島町、宝田町等にまで広域に分布する。

冬季における導電率が300-10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を示す塩水化地下水の分布状態は、塩水域、塩水・淡水混合域及び淡水域等の領域を考察する上で興味深い。また、初期の地下水塩水化は、まず淡水で稀釈された低塩分濃度を示す塩水の侵入から始まるようである。この点については

徳島県那賀川下流域における被圧地下水の塩水化 (尾崎次男)

第5表 那賀川下流の表流水及び伏流水の利用

名 称	位 置	水 源	取水量又は水利権
北岸農業用水	羽の浦町古毛	表流水	平水時 12.11 m ³ /sec, 渇水時 8.3 m ³ /sec
南岸農業用水	阿 南 市	表流水	平水時 8.11 m ³ /sec, 渇水時 5.5 m ³ /sec
国策パルプK.K 小松島工場	羽の浦町靚石	伏流水	2.00 m ³ /sec 調査時 43,000 m ³ /day
神崎製紙K.K 富岡工場	阿南市大野原	伏流水	1.16 m ³ /sec, 0.46 m ³ /sec 計 1.62 m ³ /sec 調査時 140,000 m ³ /day
徳島県工業用水道	阿南市小田	伏流水	1.16 m ³ /sec 調査時 29,000 m ³ /day

註 取水位置は第2図参照 (徳島県資料による)

第6表 那賀川下流域における上水道及び簡易水道水源井の諸元

水 源 名	位 置	深度	井戸径	ポンプ	揚水管径	出力	揚水量	備 考
		m	mm		mm	kW	m ³ /day	
大野水源1号	阿南市下大野町渡上り	13.3	5,000	水中		30.0	} max 18,000	井戸底から下方に径 200 mm で深さ15m くっさく
2号	同	15.0	5,000	水中		30.0		
3号	同	16.0	5,000	水中		30.0		
大野簡易水道	阿南市中大野町	32	200	水中	100	1.5	max 470	地表面からの 静水位 -6.75m (1974.7.31)
柳島共同水道	同 柳島町	35	200	水中	100		max 330	静水位 -5.78m (1974.8.9)
上中簡易水道	同 上中町	30	150	水中	75	1.1	max 320	
羽の浦町水源1号	羽の浦町岩脇	25	300	水中	125	3.9	max 3,000	
2号								
那賀川町水源1号	那賀川町八幡	40	300	水中	150	7.5	} max 3,600	2井が運転して合計 で 3,600 m ³ /day
2号								
3号								
4号								

第7表 那賀川下流域における工場用水源井の諸元

記 号 (第2図 参照)	井 戸		揚 水 施 設			揚水量	水 温	導電率	備 考
	口 径	深 度	揚水管径	ポンプ	出 力				
	mm	m	mm		kW	m ³ /day	°C	μS/cm	
a	200	15	125	V.P	11.0	} max 1,200 400	18.0	130	11月から翌年3月まで使用 量が多い
	75	15	75	V.P	7.5				
b	150	22	75	V.P	2.0HP	30	19.0	90	鮎の冷凍用 Cl ⁻ 6.3 mg/l 1969.7.26
c	300	30				} max 500			pH 6.9 Cl ⁻ 8.4 mg/l
	300	30							
	200	11							
	200	11							
d		6.8	50				19.8	150	わらび, ふき等の缶詰加工

V.P 渦巻ポンプ

第8表その1 那賀川南岸地区における鮎養殖場の井戸の諸元と使用水量

番号	井戸の規模			ストレナーナの位置	揚水設備の規模				1974年	1975年	1976年	1974年		1975年		1976年		備考
	径	深度	本数		ポンプ	揚水管径	馬力	本数	使用水量	使用水量	使用水量	導電率	水温	導電率	水温	導電率	水温	
	mm	m	本	m		mm	HP kW	本	m ³ /day	m ³ /day	m ³ /day	μS/cm	°C	μS/cm	°C	μS/cm	°C	
1	200	20	2		V.P	150	7.5	2	4,300	2,000	3,400*	100	15.5	120	17.8	90	15.0	夏季はかんがい用水を汲み上げ使用
2	150	25	2	20-25	V.P	150	5.5	2	2,300	2,700*	3,000*	110	17.8	100	18.5			
3	200 200 150	23 23 23	2 1 1		V.P V.P V.P	125 100 100	10 7.5 7.5	2 1 1	9,600	13,900	12,300	130	17.0			120 85 85	17.0 16.0 15.5	循環使用
4		24 10	3 2		V.P V.P	150 150	10 15	4 1	7,000	—	7,000	95	14.3			80 80	14.8 16.8	
5			1								6,300					120	17.0	1976年5月営業
6			6		V.P V.P	150 150	10 15	4 2		—	14,300	180 210	17.0 16.0			70	16.6	循環使用
7		26-27	7		V.P V.P	150 150	10 7.5	6 1	9,300	13,000	13,000*	120	18.2	85	17.0	65	14.2	循環使用
8		14-15	7		S.P V.P V.P	100 150 150	10 10 10	3 3 1	10,600	8,900	13,400	140	16.3	90	16.8	110 80	15.9 16.1	
9					V.P	125	5	7	5,200	3,700	1,900*			120	18.3	130	17.4	
10		22 15 22 14 26	4 2 1 3 1		V.P V.P V.P V.P V.P	125 125 150 125 125	7.5 7.5 15 7.5 7.5	4 2 1 3 1	19,600	—	19,400	130	18.0			120	17.7	循環使用
11		25 10	3 3		V.P V.P V.P	150 150 125	15 10 7.5	1 2 3	15,800	—	15,800*	160	17.1					循環使用
12		10 12 25	1 1 3		V.P	150	10	5	18,600	—	18,600*	130 230 280	18.0 18.0 17.5					

第8表その1 つづき

番号	井戸の規模			ストレナー の位置	揚水設備の規模				1974年	1975年	1976年	1974年		1975年		1976年		備 考				
	径	深度	本数		ポンポ	揚水管径	馬力	本数	使用水量	使用水量	使用水量	導電率	水温	導電率	水温	導電率	水温					
13	200	24	1		S.P	150	kW 7.5	1	5,000	—	6,300	150	17.5					循環使用				
	200	26	1		S.P	150	kW 7.5	1														
14		25	9		S.P	100	10	9	16,400	11,400	24,700	180	17.0	140 140	16.8 16.5	100	16.8	循環使用				
15		11	1	15-27	S.P	150	kW 18.5	1			9,700					120	16.6					
		15	1		S.P	150	kW 22.5	1														
		27	1		S.P	150		1														
16		25	8		S.P	125	10	3	10,100	2,400	5,800	210	18.0	130	16.1			循環使用				
		10	2	V.P	125	10	5	160						16.2								
				V.P	150	10	2	185						17.1								
17		25	6		V.P	125	kW 11	3	4,000	4,700		240	17.4	240	17.2							
				V.P	100	kW 5.5	3															
18		25	6		V.P	100	7.5	2		—												
						100	7.5	3														
						75	7.5	1														
19		22-30	6		V.P	125	10	2	3,000	1,300	4,800	260	18.0			140	18.4					
		10-12	3	V.P	125	7.5	1	100											10	2	100	17.9
				S.P	100	10	2															
				S.P	100	7.5	2															
				S.P	100	5	2															
20		25	1		S.P	100	7.5	1		—	2,000											
21		22-25	4		V.P	150	10	1		—	10,200					140	17.0	循環使用				
				V.P	125	10	1	100											10	1		
				V.P	125	7.5	1															
				V.P	100	7.5	1															
		16	1	V.P	100	7.5	1															
		5.5	1	V.P	100	5	1															
22	250	30	8		V.P	150	10	8	13,500	13,000	21,400	180	17.0			70	16.6	循環使用				
	200	30	1	V.P	125	10	1	16.0														
23	300	25	5		V.P	150	10	1	8,600*	—	10,000	250	20.0			75	16.9	循環使用				
					V.P	125	10	4														

徳島県那賀川下流域における被圧地下水の塩水化 (尾崎次男)

第8表その1 つづき

番号	井戸の規模			ストレナー の位置	揚水設備の規模				1974年	1975年	1976年	1974年		1975年		1976年		備 考	
	径	深度	本数		ポンプ	揚水管径	馬力	本数	使用水量	使用水量	使用水量	導電率	水温	導電率	水温	導電率	水温		
	mm	m	本	m		mm	HP	本	m ³ /day	m ³ /day	m ³ /day	μS/cm	°C	μS/cm	°C	μS/cm	°C		
24		25	3		V.P V.P V.P	200 150 125	10 10 7.5	1 1 1	5,600			470	17.5						
25		25	6		V.P V.P	150 125	10 10	3 3	4,800			250	18.5						循環使用
26		25	5		V.P	150	10	5	11,700	2,700	14,000	200	16.0	100 85	16.0 15.7	120	16.1		
27	200	25	3		S.P S.P	150 125	7.5 kW 5	- 1	7,300		7,100	260	17.0			150	16.3		循環使用
28	200	26 10	4 1		V.P V.P	125 100	7.5 5	4 1	7,700	—	9,600	270 460	16.0 17.0			360 130	17.5 19.2		
29	200	25	4		V.P V.P	200 150	7.5 5	3 1	8,300	—	4,000								
30	200	25 10	5 1		V.P V.P	125 75	7.5 3	5 1	5,300	2,700	4,900	240	17.0	190 170	20.5 16.4	340 360	17.0 20.4		循環使用
31		25	20		V.P	150	10	20	21,000	7,700	37,300								
32		33	1		V.P	150	10	1											
33		27	1		S.P	150	10	1		—		1,800	17.6			1,300	19.5		
計			176						234,600	90,100	300,200								

注 V.P: 渦巻ポンプ S.P: 水中ポンプ 鮎養殖場の使用水量は養殖場からの測定可能な排水路における実測流量値 *は他に未測定の水排水路がある

第8表その2 那賀川北岸地区における鮎養殖場の井戸の諸元と使用水量

番号	井戸の規模			ストレーナーの位置 m	揚水設備の規模				1974年	1975年	1976年	1974年		1975年		1976年		備 考			
	径 mm	深度 m	本数 本		ポンプ	揚水管径 mm	馬力 kW	本数 本	使用水量 m ³ /day	使用水量 m ³ /day	使用水量 m ³ /day	導電率 μS/cm	水温 ℃	導電率 μS/cm	水温 ℃	導電率 μS/cm	水温 ℃				
34	m 1.2 300	7	1 1	m	V.P	150	IP	1	7,700	—								夏季はかんがい用水を汲上げ使用			
					V.P		kW 5.5 7.5														
35		6-7			V.P	150	kW 7.5		13,000	6,700	10,000					60	19.8	同 上			
36					V.P	150	kW 7.5		5,100	—				70	16.5	75	21.0	循環使用			
37	300 300	18 20	3 1		V.P	150	10	3	12,800	16,800	17,300			90	20.0	95	11.5	地下水位、地表面から-8.0m(1975年)			
					V.P		15							1	75	20.0	95		14.5		
38		32 25 7	1 1 1		V.P	150	kW 7.5	1		5,000		240	11.8	80	19.5			循環使用			
					V.P		125												7.5	1	
					V.P		125												7.5	1	
39		8 6	2 1		V.P	150	kW 7.5	2	12,600	3,600	7,300	400	14.0	95	17.5	85	12.9	夏季はかんがい用水を汲上げ使用			
					V.P		125												7.5	7	
40	200 200	15 15	1 7		V.P	150	10	1	28,300		21,500	120	18.8			150	18.5	循環使用			
					V.P		125												7.5	7	
41		20 10 15	1 1 1		V.P	150	10	1			8,900						85	17.8	循環使用		
					V.P		150													10	1
					V.P		100													5	1
42	200 200	22 22	1 1		V.P	150	kW 5.5	1	9,900		2,900	450	17.5			110	16.1	循環使用			
					V.P		150												3.7	1	
43	200	14 7	2 1		V.P	150	5	2			5,200	400	18.3			170	17.6				
			V.P	75	3																
44		17	2		V.P	150	5	2			6,600					160	19.8				
45		20 25 6	1 1 1		V.P	125	kW 3.7	1			3,200						170	18.3			
					V.P		125													5.5	1
					V.P		75													5.5	1
46		25 6	1 1		V.P	150	kW 7.5	1			6,000*					380	17.2				
					V.P		150												7.5	1	
計			35*						89,400	32,100	88,900										

注 V.Pは渦巻ポンプ 鮎養殖場の使用水量は養殖場からの測定可能な排水路における実測流量値 *は他に未測定排水路がある

徳島県那賀川下流域域における被圧地下水の塩水化(尾崎次男)

第9表 那賀川下流域における鰻養殖用井戸の諸元と地下水の温度・導電率

番号	井戸の規模			揚水設備の規模				1974年		1975年		1976年		備 考
	口径	深度	本数	ポンプ	揚水管径	馬 力	本 数	水 温	導電率	水 温	導電率	水 温	導電率	
	mm	m	本		mm	HP	本	℃	μS/cm	℃	μS/cm	℃	μS/cm	
47	100	36	1	S.P	75	2	1	18.4	12,000	18.3	18,000	18.0	18,000	
	100	34	1	S.P	75	2	1	18.4	12,000	18.0	12,000			
	100	34	1	S.P	75	5	1	17.8	12,000	17.3	13,000			
	100	6	1	S.P	75	2	1	18.6	9,000	18.5	2,500	18.0	2,700	
48	200	25	4	S.P	125	5.5 kW	4	18.0	18,000	18.0	40,000			1号井
	200	25	3	S.P	150	5.5 kW	3	18.0	12,000					5号井
49		5	1								6,800	21.0	295	
	200	28-31 31 70	1* 1* 1*	V.P	100	3.7 kW	1	18.2	9,000	18.1	12,000	18.5	15,000	採水のため運転
50	150	5	1	V.P	100	5	1	21.8	1,050	17.8	170		2,500	水位、地表面下1.85m(1974)
		18.7	18,000					18.0	18,000					
51		5	2	V.P		2	1	19.7	500			22.8	600	
												22.4	630	
52		6	1	V.P		5	1	19.5	950	19.3	500	18.6	320	水位、地表面下0.35m(1975)
		30	1											
53	150	5	3	V.P	38	3	3		180	19.5	420	26.5	550	
		26	2*		125	3	2					18.0	390	
54		4	3	V.P	75	2	2		620	19.5	420	19.0	500	
												19.0	1,700	
55		25	1	V.P	100	5.5	1	18.3	10,000					
56		25	1	V.P	75	2	1	17.5	12,000					
57		6	1	V.P	75	3	1					19.3	170	
58		7	1		100	2	1					18.1	280	
		75	1		1									
		100	2		1									
59	1,000	7	1		100	5	1					19.5	160	

第9表 つづき

番号	井戸の規模			揚水設備の規模				1974年		1975年		1976年		備 考
	口径	深度	本数	ポンプ	揚水管径	馬 力	本 数	水 温	導電率	水 温	導電率	水 温	導電率	
60	1,000	5	1		100 75		1 1					22.3	160	水位, 地表面下2.12m(1976)
61	1,000	4	1	V.P	100	2	1					20.3	160	水位, 地表面下2.40m
62	1,000 100	4 25	1 1	V.P S.P	75 100	2.2 3	1 1					19.8	1,100	
63	75	36	1*	S.P		2.2	1							
64		8 30	1 1					21.0 17.5	1,300 1,180	15.3 17.0	230 190			水位, 地表面下1.06m(1974), 1.05m(1975) 自噴(1975)
65	75 75 100	30 30 30	1 1 1	V.P V.P V.P	75 75 100	3 3 5	1 1 1	21.8 17.5	1,400 430	17.0	190	17.5	270	
66	100	6.5 30	1 1							18.8 16.6	2,900 12,000	18.4	7,000	
67	75	4 30	1 1							17.3	6,500	22.1 18.4	2,900 7,000	
68		7	1							20.2	1,700			
69	75	6 32	1 1							20.9 17.3	7,500 22,000	19.3	9,000	
70	75	30	1		75	3.7	1			17.8	20,000	17.8	22,000	
71		10 10	1 1							16.4 17.3	6,200 4,500			
72		6 30			75	3	1					18.4	140	
73	100				100	5	1					17.4	270	
74		28 30	1 1									17.2	2,300	

註 V.P: 渦巻ポンプ S.P: 水中ポンプ * は揚水中止

徳島県那賀川下流域における被圧地下水の塩水化(尾崎次男)

第10表 那賀川下流域における河川及び用水の流量・水温・導電率等の測定結果

番号	水路名	測定場所	1974年 測定時						1975年 測定時						備考		
			測定月日	天候	気温 ℃	水温 ℃	流量 m ³ /sec	導電率 μS/cm	測定月日	天候	気温 ℃	水温 ℃	流量 m ³ /sec	導電率 μS/cm			
1	畑田川 南岸用水	阿南市中大野町畑田	7. 31	はれ	30.6	32.2	0.002	170	11. 27	あめ	15.0	12.3	0.045	75	南岸用水 南岸用水の北側		
2		同	"	"	29.0	24.0	0.608	80	"	"		12.3	0.233	80			
3		同 中大野町三条	"	"		25.4	0.352	85	"	"		11.9	0.044	100			
4		同 坪野	"	"			4.100*		"	"	11.8	12.6	0.500	65			
5		同	"	"		25.4	0.760	80	"	"	12.4	17.0	0.283	100			
6		同	"	"		24.5	0.031	90									
7		北岸用水	羽の浦町明見	"	"		26.8	(6.900)*	80	11. 27	あめ	12.9	19.0	0.194		100	北岸用水は水なし
8		畑田川	阿南市下大野町	"	"		25.2	0.615		"	"		11.8	0.032		75	
9		同	大野原	8. 1	はれ	36.0	23.8	1.940		11. 27	あめ	11.9	15.0	0.300*		90	
10		同	同	"	"	35.0	25.0	0.346	80	"	"	11.5	12.6	0.205		72	
11		同	"	"			0.877		"	"	12.6	12.8	0.038	65	畑田川 古庄用水 古庄用水		
12		同	"	"		25.0	1.762		"	"	11.5	12.3	0.346	1.50			
13		羽の浦町古庄	"	"		25.5	1.661	85	11. 28	はれ	13.2	14.0	0.085	90			
14		同	"	"		25.2	2.316	80	"	"	12.5	13.2	0.038	90			
15		同 傍示	8. 2	"		25.5	0.150	85	"	"	12.7	11.0	0.006	150			
16		同 野神	8. 1	"		26.6	1.191	80	11. 28	"	15.4	12.1	0.028	170			
17		同	8. 2	"			0.053		"	"			—				
18		同 中庄	8. 1	"		25.2	0.075	85	"	"			—				
19		同	"	"		25.4	0.297	80	11. 28	"	12.5	13.0	0.004	140			
20		同	"	"		27.2	0.077	80	"	"			—				
21		同 那東	"	"		25.3	0.130	85	"	"			—				
22		同 那東原	"	"		25.6	0.491	85	11. 28	"	14.2	17.0	0.031	165			
23		同	"	"			0.527						—				
24		那賀川町原	"	"		25.8	0.082	11	11. 28	はれ	15.3	11.8	0.005	140			
25		同 西原	"	"			0.666		11. 28	"	12.4	15.0	0.093	130			
26		同	"	"			0.383		"	"	14.6	14.5	0.010	130			
27		同 大京原	"	"			0.546		"	"	15.0	13.9	0.041	85			
28		同	8. 1	"			0.157						—				
29		阿南市柳島町高川原	8. 2	はれ		25.9	0.034	140	11. 27	あめ		12.0	0.006	75			
30		同	"	"		25.7	0.017	85					—				

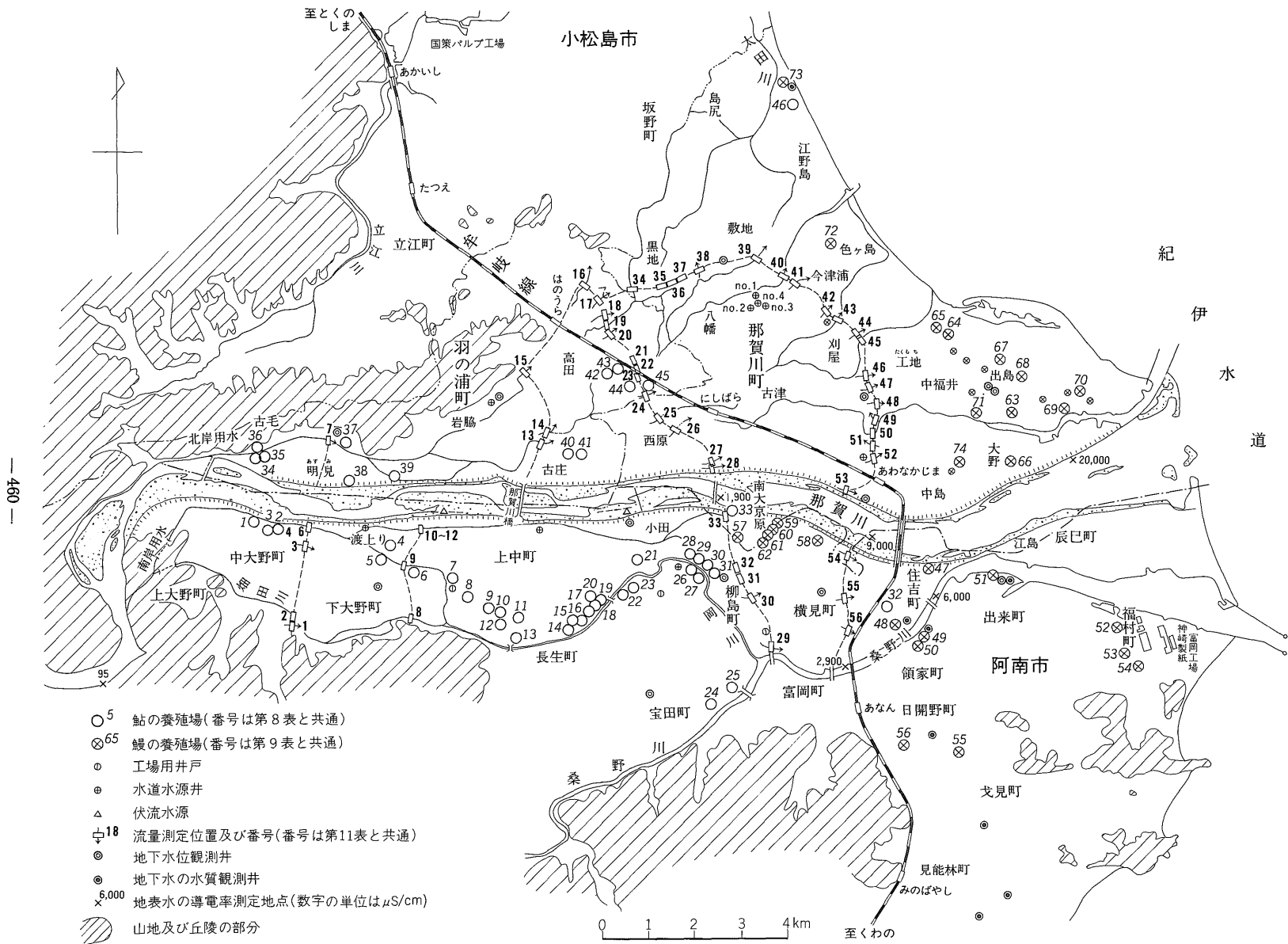
地質調査所月報(第35巻 第10号)

第10表 つづき

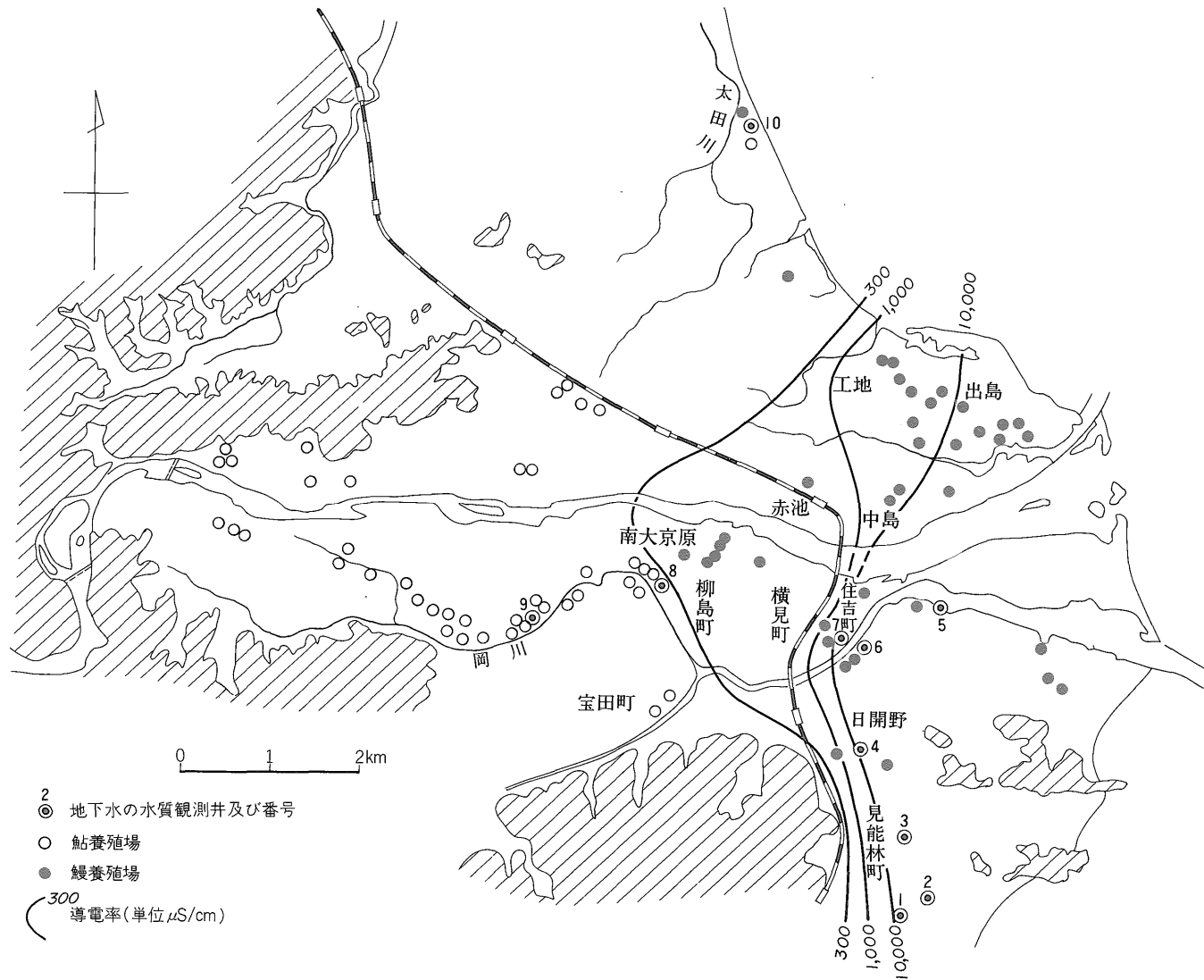
番号	水路名	測定場所	1974年 測定時					1975年 測定時					備考		
			測定月日	天候	気温 ℃	水温 ℃	流量 m ³ /sec	導電率 μS/cm	測定月日	天候	気温 ℃	水温 ℃		流量 m ³ /sec	導電率 μS/cm
31	横見用水	同	8.2	はれ		25.5	0.030	80	11.27	あめ	12.3	12.5	0.013	72	
32		同	"	"		24.5	0.955	78	11.27	"	11.7	12.5	0.142	72	
33		那賀川町南大京原	"	"		25.5	0.020	78							
34		同 黒地	"	"		26.4	0.022	85	11.28	はれ	15.6	18.8	0.008	180	
35		同	"	"		26.1	0.046	85	"	"	15.8	17.0	—	170	
36		同	"	"		26.0	0.057						—		
37		同	"	"		26.0	0.020						—		
38		同	"	"		26.5	0.199	85							
39		同 敷地	"	"		26.5	0.290	120	11.28	はれ	16.0	16.7	0.035	170	
40		同 今津浦	"	"		26.0	0.150	100	11.28	"	16.0	15.2	0.021	170	
41		同	"	"		26.5	0.080	85	11.28	"	14.5	14.9	0.003		
42		同 刈屋	"	"			0.044								
43		同	"	"			0.102		11.28	はれ	14.8	15.5	0.049	170	
44		同	"	"		27.1	0.094	100					—		
45		同	"	"		27.2	0.262	100	11.28	はれ	14.1	16.3	—	150	
46		同 たくむじ 工地	"	"		26.0	0.174	90							
47		同	"	"			0.089		11.28	はれ	13.0	14.0	—	130	
48		同	"	"			0.167						—		
49		同 上福井	"	"			0.012						—		
50		同	"	"		27.5	0.569	100	11.28	はれ	13.7	14.8	—	170	
51		同 赤池在所	"	"			0.027								
52		同	"	"		27.5	0.309	90	11.28	はれ	12.5	13.2	0.014	130	
53		同 赤池	"	"			0.172								
54		同 南中島	"	"			0.093		11.28	はれ		11.8	0.004	245	
55		同 阿南市横見町長岡	"	"		29.3	0.013	85							
56		同 西分	"	"		27.5	0.195	85							

徳島県那賀川下流域における被田地下水の塩水化(尾崎次男)

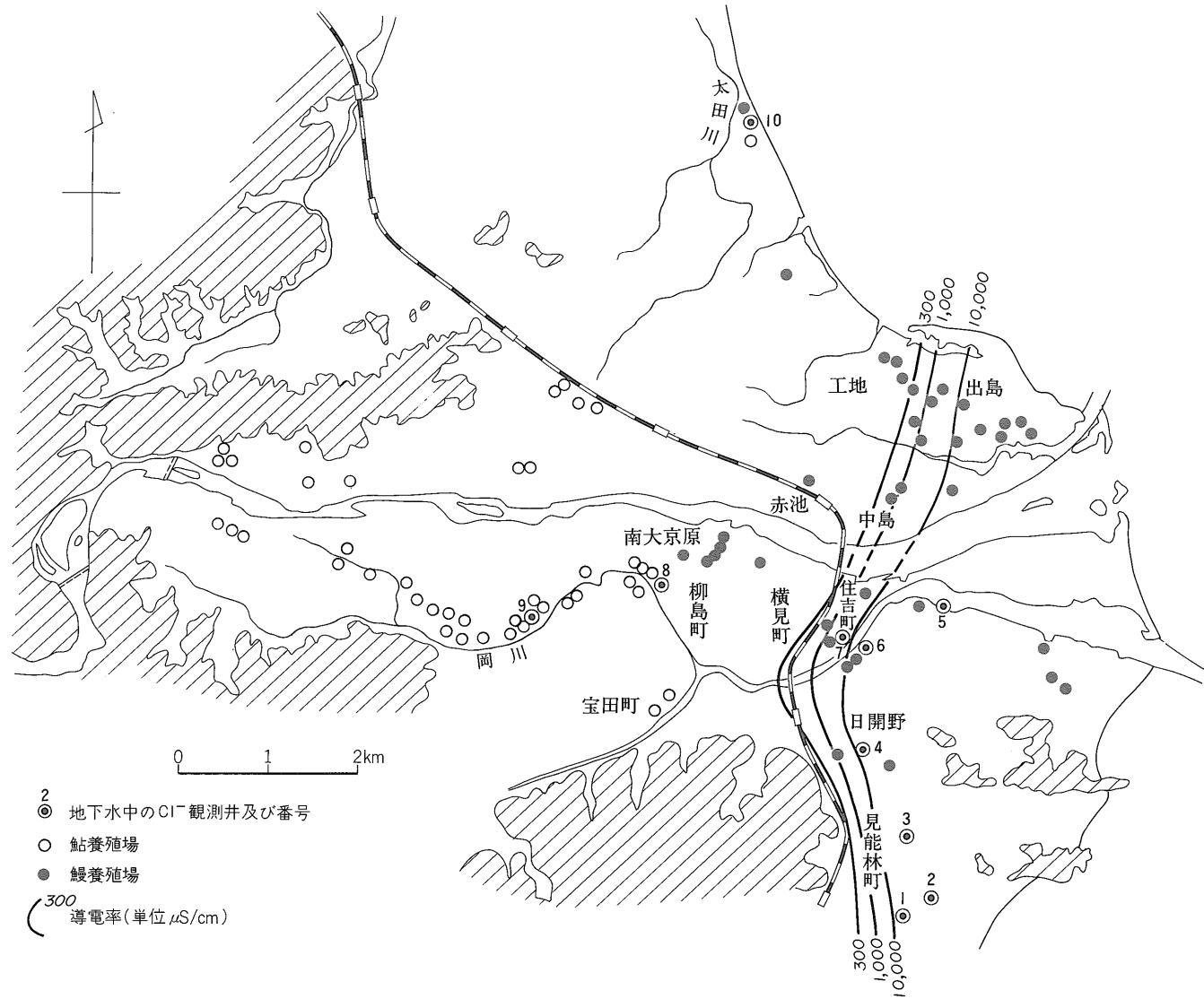
註 流量値は小数点以下3位まで示した。これは10²/sec以下の小水路の流量を求めたためであって、測定精度が高いという意味でない。* は一部実測による推定値。



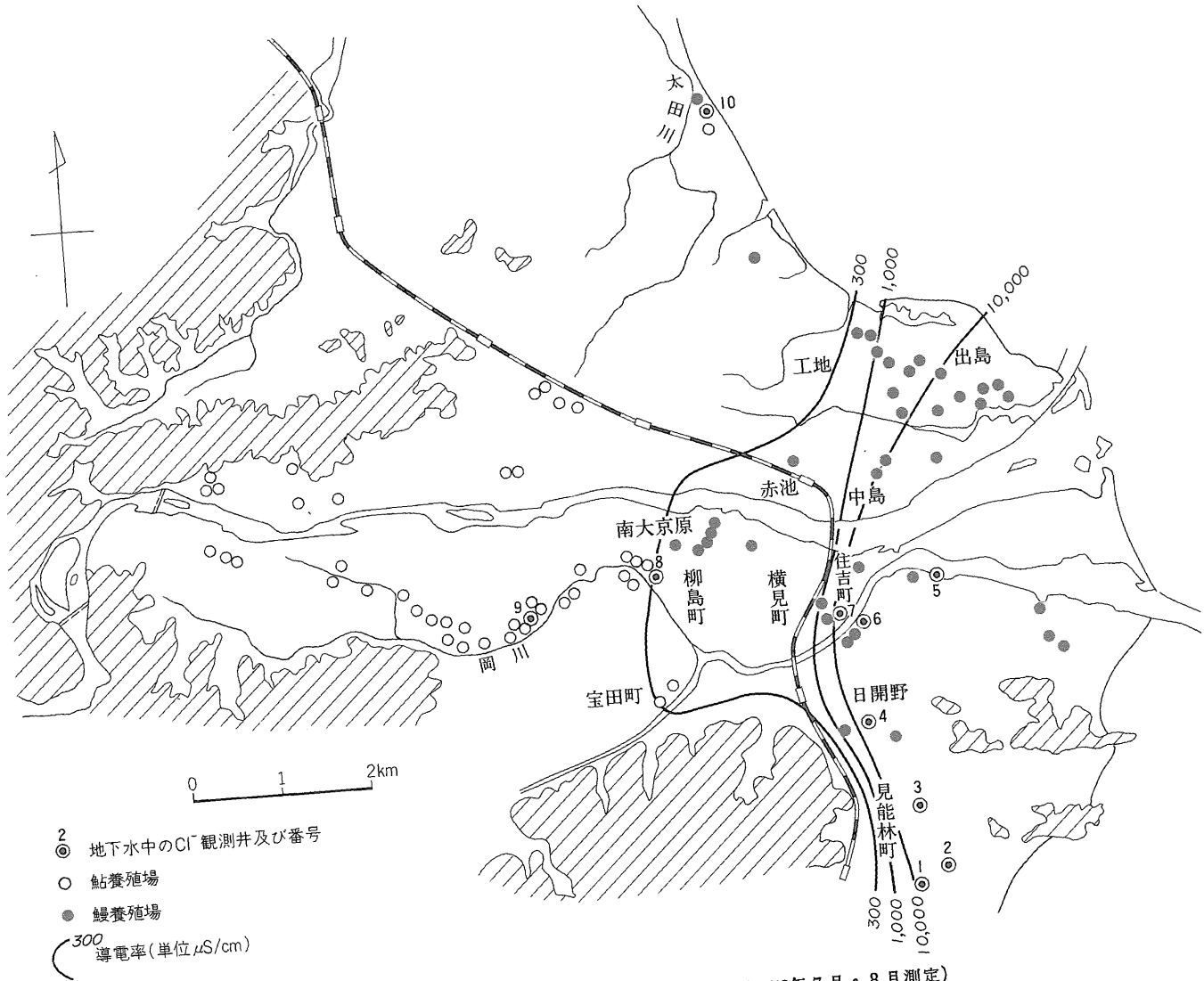
第6図 地下水及び地表水調査要図



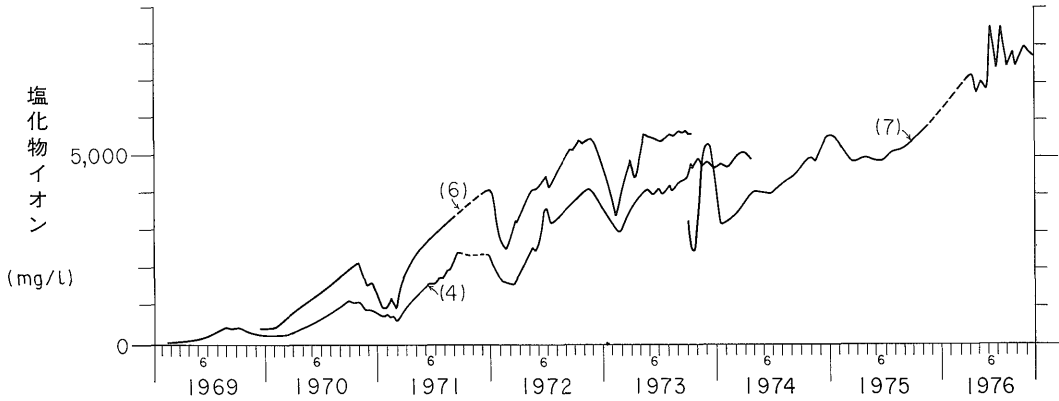
第7図 被圧地下水の導電率からみた塩水化地下水の分布(1974年7月・8月測定)



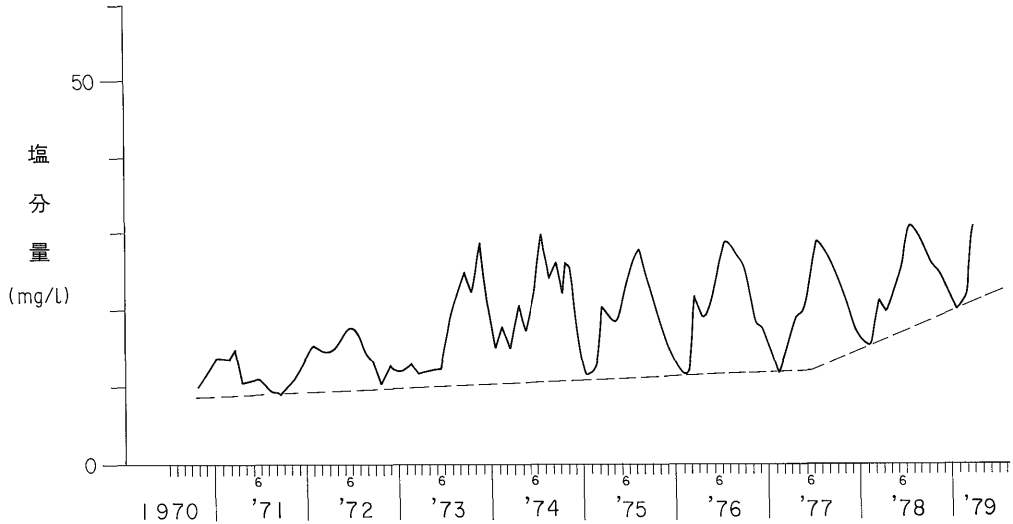
第8図 被圧地下水の導電率からみた塩水化地下水の分布(1976年11月・12月測定)



第9図 被圧地下水の導電率からみた塩水化地下水の分布(1976年7月・8月測定)



第10図 深井戸(4), (6), (7)における塩化物イオンの経年変化



第11図 深井戸(10)における塩分量の経年変化

あとで述べる。

4.2 被圧地下水の塩化物イオンの経年変化

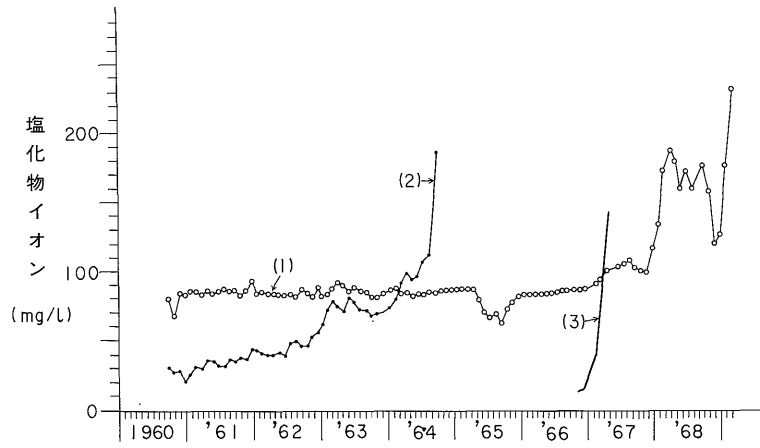
ここでは、水質観測井における被圧地下水の塩化物イオンの時間的変化を述べる。

阿南市日開野町(第2図の4以下同図の番号)、領家(6)及び横見町(7)等における被圧地下水の Cl^- の経年変化は第10図にそれぞれ示す通りである。観測当初の Cl^- は4が28.4 mg/l, 6が425.5 mg/l, 7が3,310 mg/lであった。その後、被圧地下水の Cl^- は冬季における減少、夏季における漸増という、季節変化を示しながら次第に増加する。しかし、1974年以降はこの変動が認められず、 Cl^- は次第に増加している。6は1973年6月に取水を中止したため、その後、付近の深井戸を代用し水質観測を

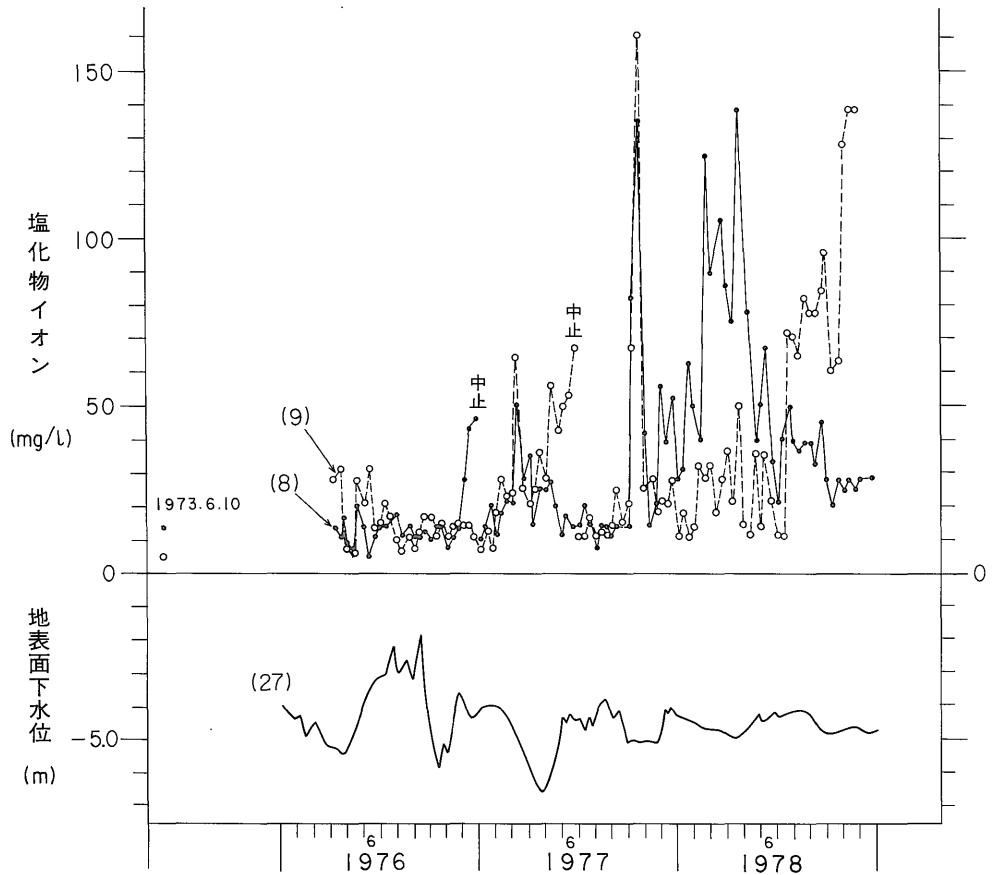
行った。被圧地下水の Cl^- は5,500 mg/l 以上であった。また、出来町にある深度33m, (5)の Cl^- (mg/l) は1969年10月8日に1,178, 15日1,064, 25日に1,300, 11月8日に837, 17日に812, 26日に797を示していた。

第11図は那賀川町江の島に所在する水源井(10)の導電率をNaClに換算した塩分量の経年変化を示したものである。被圧地下水の塩分量は40 mg/l 以下を示すが、塩分量は夏季増加冬季減少の型を繰り返し、経年的に次第に増加する傾向がみられる。本井は海岸から約75mの距離にあり、その被圧地下水は家庭用の飲料に供されている。

第12図は見能方水源井(1)・見能林水源井(2)及び才見町水源井(3)における被圧地下水の Cl^- の経年変化を示し



第12図 深井戸(1), (2), (3)における塩化物イオンの経年変化



第13図井戸(8), (9)の塩化物イオンと(27)の水位の経年変化

たものである。第12図の Cl^- は経年的に増加或は減少と不規則に変化するが、全体としては次第に増加し、そしてある時点で急激に増加する共通的な特徴がみられる。

第13図は比較的内陸部に位置する水源井(8, 9)における Cl^- 変化を示したものである。ここには深度25m前後の水源井が多数あり(第9表その1の17及び31)、観測当初(1973年6月10日)の Cl^- は5mg/l前後を示し、この状態が1975年まで続いた。1976年以降、 Cl^- の急激な増加に伴って、採水及び観測を中止した。その後は、隣接の水源井で水質観測を行った。これらの水源井における観測当初の Cl^- は5mg/l前後である。第13図によると、8における Cl^- は、1976年には5-60mg/lの範囲で変化するが、1977年10月以降は10-150mg/lの範囲で不規則に変化する。とくに、1978年1月から6月まで増加、7月以降は減少する傾向が認められる。これに対し、9の Cl^- は1976年には5-30mg/lの範囲で変化するが、1977年以降は10-150mg/lの範囲で変化する。とくに、1978年1月から8月まで増加及び減少と複雑に変化し、9月以降は次第に増加する傾向がある。

5. 被圧地下水の塩水化に対する考察

5.1 地下水揚水量と塩水化の関係

本地域における伏流水、地下水等の利用量は夏季には1日当たり、伏流水が212,000 m^3 (第5表より)、地下水は上水道等の飲料用水が26,000 m^3 弱(第6表より)、工場用水が2,000 m^3 弱(第7表より)、鮎の養殖用水が390,000 m^3 強(第8表より)、鰻の養殖用水が14,000 m^3 *で、合計664,000 m^3 を超えると推定される。このうち、鮎及び鰻の養殖用水は404,000 m^3 となり合計量の61%弱を占めている。

鰻の養殖場の多くは1956年当時の被圧地下水の自噴地帯及びその付近に立地しており、鮎養殖場の大部分は那賀川旧河道の岡川及び太田川沿いに立地している(第6図)。これら養殖場における個々の井戸の揚水量は明らかにできない。第8表その1及び第8表その2に示す、1974年夏及び1976年夏の使用水量は、一部に表流水及び循環水を含むが、使用水量の大部分は地下水の揚水量である。使用水量は鮎養殖場の排水路で行った実測流量から求めているが、このほか、未測定排水路がある。したがって、第8表その1及び第8表その2に示す使用水量は実際よりも過少に見積られている。ここでは、鮎養殖場における使用水量を地下水揚水量とみなして、揚水

量と被圧地下水の塩水化との関係を述べる。

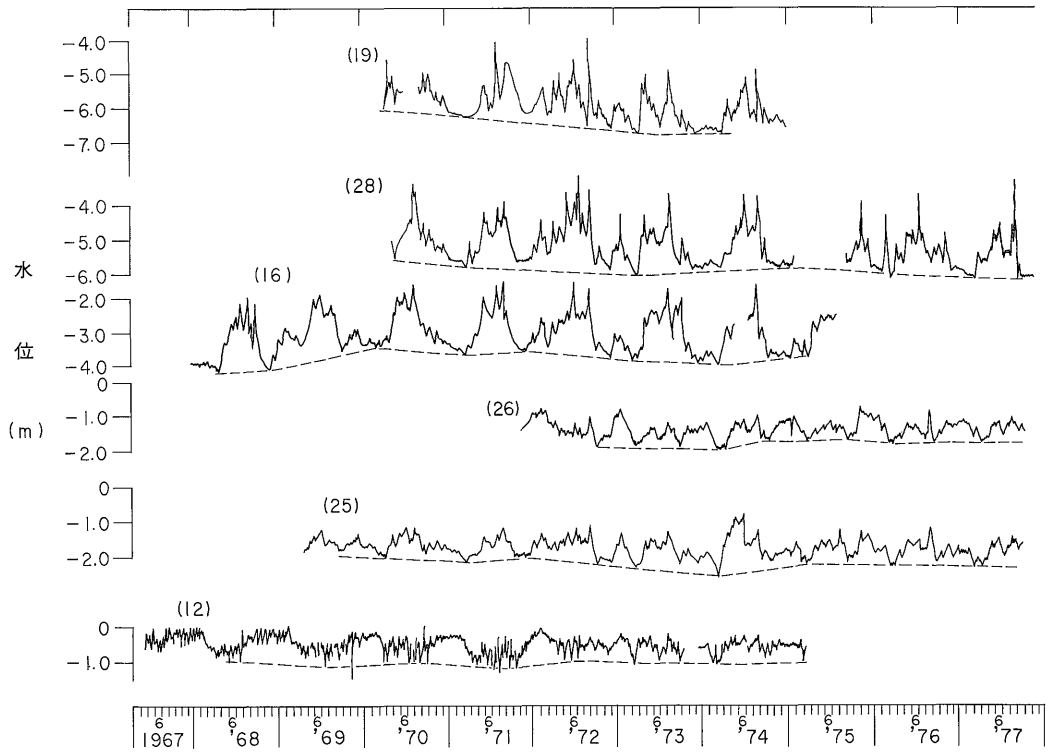
鮎養殖場の夏季における1日の地下水揚水量は那賀川南岸地区は1974年に226,900 m^3 、1976年に300,200 m^3 であり、同時期の那賀川北岸地区における1日の地下水揚水量は89,400 m^3 、88,900 m^3 である。また、1975年の冬季には那賀川南岸地区が90,100 m^3 、那賀川北岸地区が32,000 m^3 強であって、夏季及び冬季においても那賀川南岸地区の地下水揚水量が那賀川北岸地区のそれよりも多い。地下水の揚水量が多い夏季には被圧地下水の塩水化は内陸側までにおよび、逆に地下水揚水量が少ない冬季には海側に後退する。被圧地下水の導電率が1,000 $\mu S/cm$ 以上を示す面積は那賀川南岸地区で約6.5 km^2 、那賀川北岸地区が約2.3 km^2 を示し、その比は2.8倍である。那賀川南岸地区の地下水揚水量は那賀川北岸地区のその3-3.4倍にあたるから、被圧地下水の塩水化はその地区における地下水揚水量の多寡に関係することはほぼ間違いないようである。

例えば、深井戸4(第2図)は口径が300mm、深度30mで、揚水管径125mm、10HPの水中モーターポンプで60 m^3/h の揚水能力であった。同水源井の Cl^- は観測当初の1969年1月には28.4mg/lであったのが、同年5月下旬には100mg/l以上となった(第10図)。また、見能方水源井(1)は口径が100mm、深度46mで1957年に掘きくされ、その当時は自噴していた。揚水状態は、給水タンクの水位が一定に達すると自動的にポンプが始動し揚水する仕組であった。したがって、揚水時間は1日のうち数時間であり、揚水量は僅少であった。この水源井における水質観測は1960年9月に開始され、 Cl^- は1967年3月に100mg/l以上となった(第12図)。以上の例は単独の井戸であっても揚水量が大きい井戸ほど、或は当初に比べて揚水量を増加させている井戸ほど、地下水の塩水化を生じ易いことを物語っているといえる。

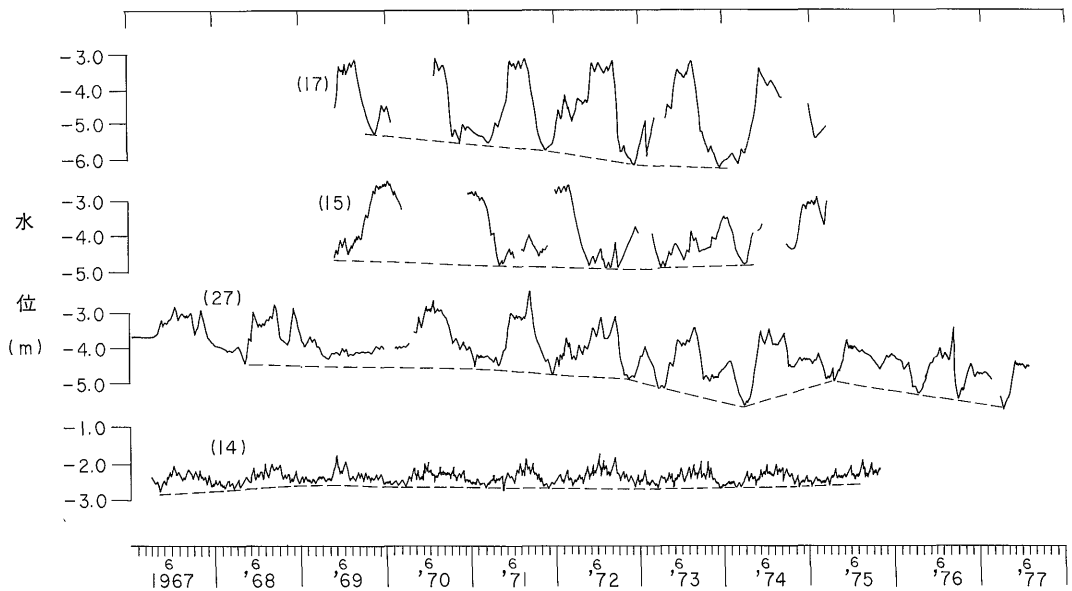
江の島の水源地(4)は深度28.5mで、小口径の掘抜井であって、水質観測当初の1970年10月頃は自噴していた。その後、水位が低下したため自噴が停止したので、家庭用ポンプを取付け主として飲用に供していた。本水源井の塩化物イオンは経年的に不規則に変動するが、1975年以降は夏季へ増加、冬季減少の型を示しながら、経年的に次第に増加している。本水源井は家庭用のため揚水量は極めて少ない。したがって、被圧地下水の塩化物イオンが季節的・経年的に示す変動の理由は、本水源井の揚水量が夏季に増加し、冬季に減少するという単に井戸揚水量の多寡の相違による結果とは考えにくい。本水源井の南方約200mのところには鮎養殖場があって、ここでは多量の地下水を揚水している(第6図の46及び第8表そ

* 第9表の1箇所当りの鰻養殖場の地下水揚水量を1日当たり500 m^3 として計算。

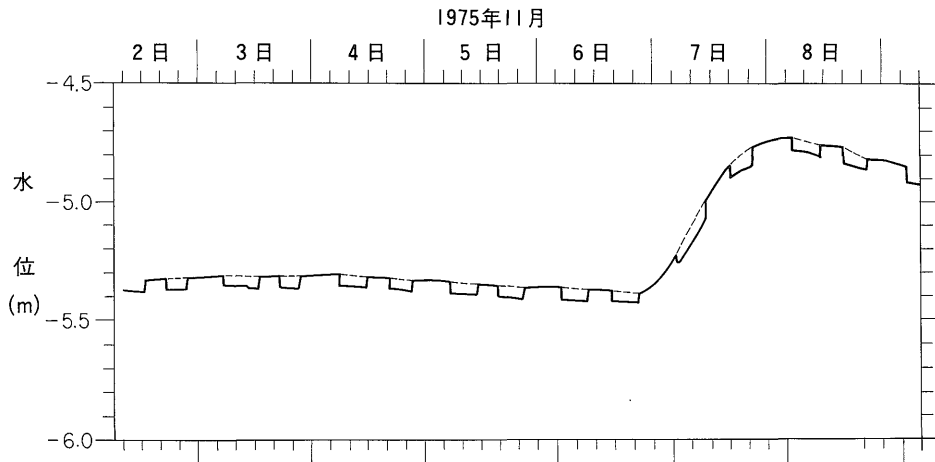
徳島県那賀川下流域における被圧地下水の塩水化 (尾崎次男)



第14図 那賀川北岸地区における地下水位観測井の水位変化



第15図 那賀川南岸地区における地下水位観測井の水位変化



第16図 地下水位観測井の水位変化

の2の46). 一般に鮎養殖場における井戸群の揚水は1日に24時間の継続揚水であって、この状態が数か月に及ぶ。さらに、井戸における多量の継続揚水は井戸の揚水水位が低下するばかりでなく、その影響をうけて付近の地下水位も低下する。したがって、江の島における被圧地下水の塩分量の経年変動は、水源井の付近にある鮎及び鰻養殖場の深井戸群による揚水量の多寡を反映しているのかもしれない。阿南市の8, 9の井戸水の Cl^- の複雑な変化は水源井自身の揚水量と、その周辺にある深井戸群の揚水による地下水位低下の影響が加味された結果と思われる(第13図)。

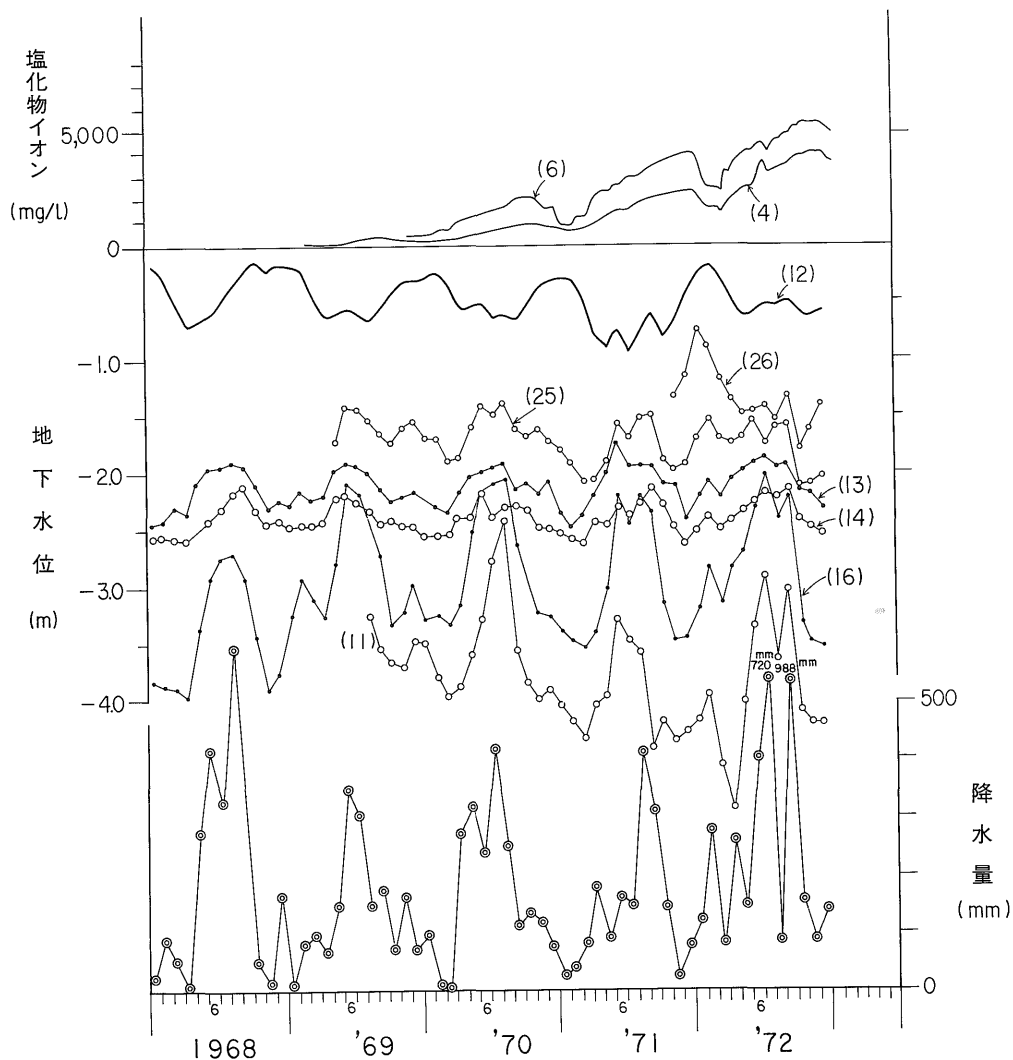
5.2 被圧地下水の塩水化と地下水位との関係

海岸付近における自由面地下水の帯水層中の淡水と塩水との境界面は、静水圧平衡の関係から求めたガイベン・ヘルツブルグの法則が知られている。那賀川北岸地区及び那賀川南岸地区における被圧地下水及び自由面地下水(明見, 大京原, 原ヶ崎)の水位変化は第14図及び第15図にそれぞれ示す通りである。観測井の地盤標高を1/25,000地形図に示される標高から推定すると、地下水面の海拔標高はいずれも海面上にある。第14図及び第15図の結果及び本調査時に行った若干の水位測定結果によると、本地域における地下水位及び水位変化は地理的位置で異なり、以下に述べる特徴がある。1)自由面地下水及び被圧地下水の地表面からの水位(以下単に地下水位という)は扇状地の扇央付近から前縁部に至るに従って浅くなり、前縁部から後背湿地に至る間がもっとも浅い。2)年間における水位の変動幅も扇央付近が大きく、後背湿地に至るに従って小さくなる傾向がある。3)通年的な

地下水位は夏季に上昇し、冬季に低下するものが多い。

しかし、阿南市横見町にある地下水位観測井(第2図の15)の地下水位は夏季に低下し、冬季には上昇して前述とは逆の現象を示す(第15図)。また、那賀川町上福井にある地下水位観測井(第2図の12)の被圧地下水の水位は潮汐の影響をうけるが、通年的な地下水位は夏季に低下し、冬季に上昇を示して前述の横見町観測井の地下水位変化に類似する(第14図)。地下水位は経年的に次第に低下するものと、例えば大京原地下水位観測井のように顕著な低下を示さないものがある。地下水位の経年的な低下は那賀川北岸地区に比して、那賀川南岸地区が著るしい。阿南市宝田町にある地下水位観測井(第2図の17)における各年間の最低水位を結んだ直線から推定される年平均水位低下量は、約18cmを示し、もっとも大きい(第15図)。本地域の、とくに海岸沿いでは、通年的な地下水面は自然状態では夏季に上昇し、冬季に低下して年間における水位変動幅が小さい。このことは、地下水塩水化を招来しやすい一因をなしていると考えられる。

第16図は羽の浦町岩脇にある地下水位観測井(第2図の28)における自記記録の一部を示す。地下水位は観測井の付近にある単独の揚水井の影響をうけ、揚水ポンプの運転開始及び停止にしたがって低下及び上昇の変化を示している。多数の揚水井の揚水が観測井の水位に及ぼす影響は五泉市の例(尾崎・後藤, 1974)でも明らかである。一般に、揚水井の干渉による井戸の水位低下量は、揚水井の揚水量が大きくなると低下し、揚水井と観測井との距離が大きくなると、それに従い小さくなる。したがって、限られた敷地内で多数の深井戸が連続して揚水



第17図 地下水位観測井の月平均水位と水質観測井の塩化物イオン及び月降水量等の関係

を行っている鮎養殖場では、揚水井の揚水水位は勿論、付近の地下水位も著しく低下することが考えられる。先に述べた横見町にある地下水位観測井(14)及び上福井にある地下水位観測井(12)などの夏季低下、冬季上昇の水位変化や、さらに、中の島にある地下水位観測井(11)における複雑な水位変化は、観測井の周辺にある深井戸群の揚水による水位干渉の結果として説明できる。

水質観測による被圧地下水の塩分量と地下水位の月平均値及び月降水量などとの関係を第17図に示す。第17図によると、被圧地下水の塩分量は上福井にある地下水位観測井(12)の水位低下期間中に増加し、逆に水位が上昇する期間に減少する。しかも、月降水量が多い期間に塩分

量が増加する事実は、地下水揚水量と地下水(淡水)供給量との不均衡を示唆するものと思われる。

本地域における塩水化地下水の初期的兆候は、地下水の塩分量(水質分析及び水の導電率或は比抵抗等の測定による)の増加として示される。被圧地下水の塩水化は、まず、海岸沿いの地区に発生し、それが次第に内陸側に波及したことは、既に述べた塩水化地下水の分布および水質観測井における塩分量の経年観測結果からも明らかである。一方、被圧地下水の帯水層は海底下に連続しており、それは海底下で開放している可能性が考えられる。したがって、塩水化地下水の塩分は海水起源と考えられ、被圧地下水の塩分量が夏季に増加し、冬季に減少するの

は、海水侵入による塩水楔の先端部分が前進及び後退する地理的位置の変化を示すものと思われる。

6. 地下水の収支

6.1 地下水の供給源

地下水の供給源は基本的には降水である(第18図)。顕著な地下水塩水化が及んでいない地区面積とその地区の主として鮎養殖場の使用水量との関係を見ると、那賀川北岸地区では面積約15.4 km²に対し1976年夏の使用水量は1日に90,000 m³弱(第8表その2)となり、水深換算では1日に5.8 mmとなる。これに対し、那賀川南岸地区は面積約15.0 km²に対し、1976年夏の使用水量は1日に300,000 m³強(第8表その1)であって、水深換算では1日に20 mmとなる。那賀川南岸地区における平均1 km²当り、1日20 mm(水量換算、20,000 m³/day)の地下水揚水量は著しく多い。このことは、夏季には降水量が多くなるためかもしれないが、或は降水以外の地下水供給源(例えば河川・灌漑水路・水田等の地表水)があるのかもしれない。扇状地には粗粒褐色低地土壌が分布しており(徳島県, 1979)、扇状地上では水田の減水深が大きいから、灌漑水路や水田から多量の地下水供給が行われる可能性が考えられる。

ここでは、灌漑水路及び水田等からの伏没量を把握するため、調査地区の流出量と流入量の差を求めてみた。その差が負号を示す場合はその地区からの伏没量とし、正号を示す場合は増加量とする(第11表)。那賀川南岸地区における1974年夏季の伏没量は13 mm、1975年11月の伏没量は12 mm弱となる。II地区における伏没量は1974年が44 mm弱、1975年が9.3 mmとなる。1974年夏の伏没量は極めて大きい。この理由は灌漑用の流出水路が主要道路を横切ることなく、その途中で岡川に流入したことが考えられ、その水路の流量を欠測したためと思われる。那賀川北岸のIV地区では1974年夏季に2 mmの伏没量が、1975年11月には逆に2.7 mmの増加量が認められる。また、V地区では夏季に2.9 mm、11月に0.6 mmの伏没量が認められる。那賀川南岸地区では鮎養殖場の揚水量は岡川に排水されることが多い。しかし、なかには那賀川北岸地区のように直接灌漑水路に排水されるものがある。調査地区の伏没量は11月に比して7月及び8月が多い。伏没量は那賀川北岸地区で1日2-3 mm、南岸地区のそれは1日に13 mmを示し、北岸地区に比して南岸地区が顕著である。那賀川南岸地区では鮎養殖用として夏季に多量の地下水揚水が行われる結果、地下水位の著しい低下に伴って、水田・灌漑水路等の地表水から多量の浸透・補給が行われるのかもしれない。

ない。

6.2 地下水収支の計算

自由面地下水の一定期間における水収支式は次の通りである。

$$G_0 = G_1 \pm \Delta H \cdot S_y \quad (1)$$

G_0 : 地下水の流出量, G_1 : 地下水の流入量

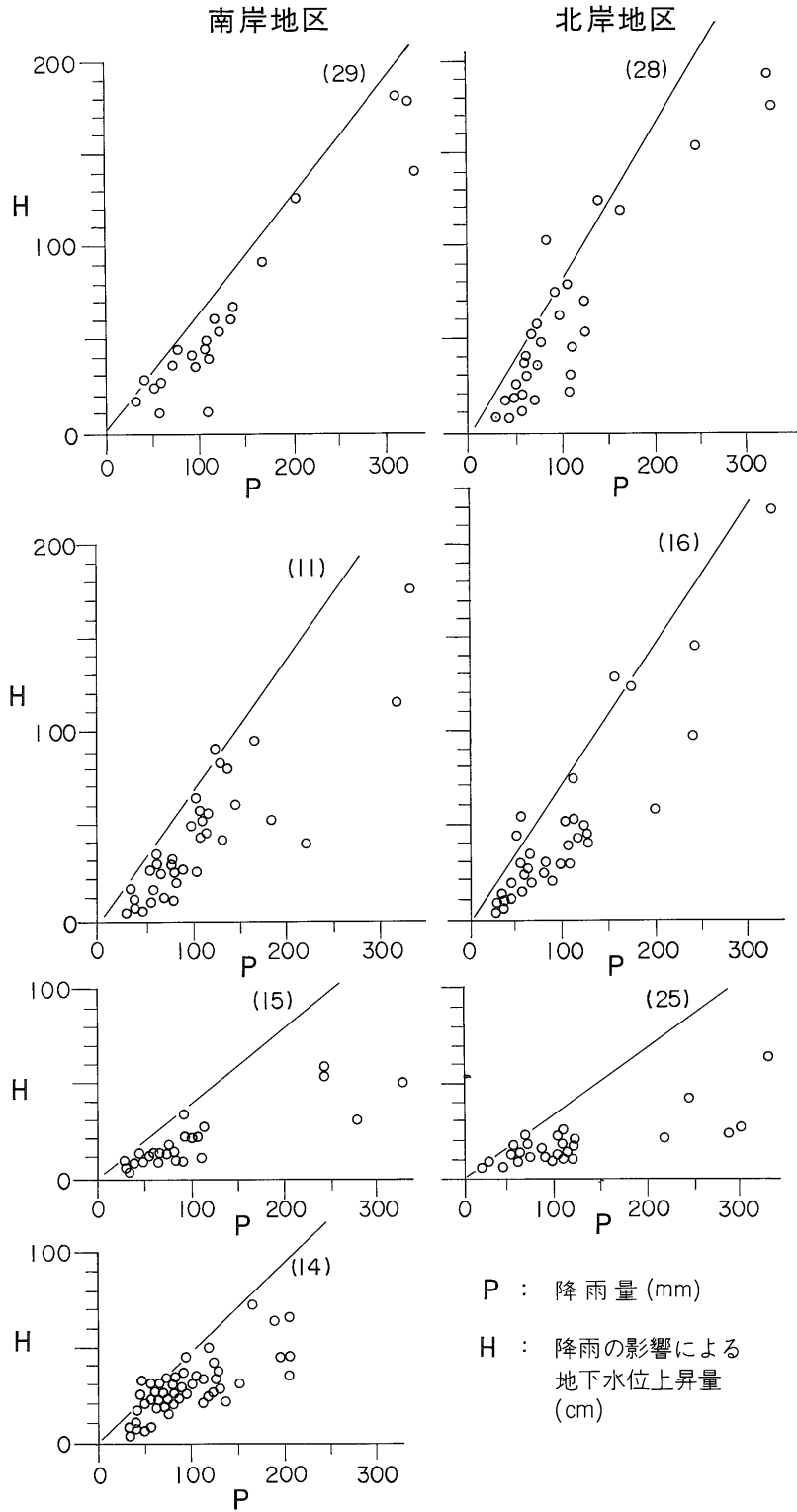
ΔH : 地下水位の変化, S_y : 比産水量

(1)式で、単位面積例えば1 km²について考えると、 $G_1 = A \cdot k \cdot i = W \cdot T \cdot i$ 、ここに A : 幅1,000 mの帯水層の断面積(m²), k : 透水係数(m/day), i : 地下水面の勾配, W : 単位幅, 1,000 m, T : 透水量係数(m²/d), (1)式から G_0 は右辺項を既知として求められる。しかし、本地域における S_y は求められていない。ここでは、地下水揚水の影響が比較的少ないと思われる地下水位観測井において観測初期のデータを採用し、一雨の降雨量とその影響による水位上昇量(雨の影響による最高水位一降雨前の水位)との関係を求めてみた(第18図)。第18図によると降雨量と水位上昇量とは正の相関があるように見える。一般に、晴天が続いた後の少量の雨は不飽和帯の土壌に吸収されるため水位上昇は認められない。一方では、雨量強度が大きければ地表流出による損失があるため、その降雨に対して一定以上の上昇傾向は示さない。土壌が湿じゅん状態で適当な降雨(ここでは25-150 mm)の場合には降雨量と地下水位上昇量とは比較的良好な正の相関を示すことが考えられる。上述の点を考慮すると、第18図に示す上限を結んだ直線が両者の関係を示す妥当な線と思われる。一雨の降雨による水位上昇量(H)と降雨量(P)との関係式を第18図にしたがって、 $H = \alpha P$ (単位、mm)、であらわすと、定数 α の値は6.8-7.2となる。これは、例えば帯水層の単位体積において1 mmの浸透量に対して水位が6.8 mm上昇することは、逆に水位を6.8 mm低下させると1 mmに相当する水量が浸出することを意味する。したがって、単位体積からの浸出水量を単位体積で割った商(0.15弱)は比産水量(S_y)を意味する。計算した比産水量(S_y)は0.15-0.14となり、この値は他の扇状地、例えば田中(1978)による今市扇状地の比産出率が16%、18%の値、横山(1978)の水無川扇状地における貯留係数が0.15-0.20の値に比して過小に見積られる。

ここでは、地下水の使用量が多い那賀川南岸地区において、地下水揚水の影響をうける下大野地区及び中の島地区の単位面積(1 km²)について、1974年から1976年まで3年間の水収支計算を試みる。

単位面積における一定期間の水収支式は

$$G_0 = G_1 \pm \Delta h \cdot S_y \quad (2)$$



第18図 雨量(P)とその影響による水位上昇量(H)との関係

第11表 調査地区の流入水量及び流出水量とその差引量

流入・流出 区分	地区面積 A	1974年7月31日～8月2日測定					1975年11月27日～11月28日測定						
		流入水量測定地点番号 no.	流入水量 D ₁	流出水量測定地点番号 no.	流出水量 D ₂	流出・流入 水量の差 D ₂ -D ₁	平均 水深・換算 h	流入水量測定地点番号 no.	流入水量 D ₁	流出水量測定地点番号 no.	流出水量 D ₂	流出・流入 水量の差 D ₂ -D ₁	平均 水深・換算 h
那賀川 南岸地区 I	1.40	no1-no6	5.75	no8-no12	5.54	-0.21	-13.0	no1-no5	1.11	no8-no11 no12	0.92	-0.19	-11.7
	1.50	no29-no33	1.06	no54-no56	0.30	-0.76	-43.8	no29, no31- no33	0.17	no54	0.004	-0.166	-9.6
那賀川 北岸地区 II IV	2.56	no13-no15	4.13	no16-no28	4.07	-0.06	-2.0	no13-no15	0.13	no16, no19 no20, no24 no27	0.21	+0.08	+2.7
	5.30	no18-no28 no49, no50	2.98	no34-no48 no50, no52, no53	2.85	-0.13	-2.9	no19, no22 no24-no27	0.18	no34, no35 no43, no39 no44, no53	0.14	-0.04	-0.6

測定番号は第3図と共通 水深換算 h (mm) = $\frac{(D_2 - D_1) \times 86,400}{A \times 1,000} \times 1,000$ mm

$$G_0 - G_i = \pm \Delta h \cdot S_y \quad (3)$$

G₀: 地下水流出量, G_i: 帯水層の下限から地下水面までの高さHのときの地下水流入量, Δh: 地下水流入量の増加及び減少, 地表からの地下水補給量, 地表及び地下水からの蒸発散量(E_i), 地下水揚水(W_p)等による月平均の水位変化, S_y: 比産水量, Δh・S_y: 月貯留量変化(水量の単位は mm で示す). この場合, 観測井の水位は単位面積の地下水位を代表するものとする. (3)式で一定水位の地下水流入量(G_i)と地下水流出量(G₀)の差として求められる単位面積当りの地下水収支は貯留量変化で示される.

下大野地区及び中の島地区における単位面積(1 km²)当りの水収支計算結果は第12表の通りである. この計算に際し, 下大野地区では地下水流入量(G_i)は地表面下8 m(帯水層の下限から地下水面までの高さ H=22m)とし, S_y=0.14を使用した. また, 中の島地区では地下水流入量(G_i)は地表面下4.5 m(H=15m)とし, S_y=0.15を使用した.

下大野地区では年単位の貯留量は1974年が425.6 mm(16.8%), 1975年が448.0 mm(17.3%), 1976年が458.5 mm(18.3%)となる. 括弧内は年降水量に対する比率である. 月単位の貯留量変化は例年3月から5月まで負号を示すが, 年によっては他の月にも負号を示すことがある. 正号・負号を示す貯留量変化の積算結果を年単位の水収支とすると, 6月・7月に行われる多量の補給は累積した赤字を補てんする形となっている. 貯留量が漸増するのは, おおよそ8月以降である. 年貯留量は425-458 mmの範囲にあり, 平均444 mmとなつて, 各年貯留量の間には大差はない. ちなみに, 下大野地区の西方には, 第6図に示す3・4及び5の鮎養殖場があり, 第8表その1によると, これら鮎養殖場では1日に合計22,600 m³(1974年), 27,600 m³(1976年)の地下水揚水を行っている.

中の島地区では年単位の貯留量は, 1974年が241.5mm(9.5%), 1975年が394.5 mm(15.2%), 1976年に3.0mm(0.1%)を示し, 各年における貯留量の差が著しい. 月単位の貯留量変化は例年3月から5月までに負号を示す傾向があるが, 1976年の10月, 11月及び12月にも負号を示す. 正号・負号を示す月貯留量の積算結果の傾向は, 前述の下大野地区に類似する. 本地区の西方向にあたる岡川沿いには, 第6図に示す26から32までの鮎養殖場があり, これら鮎養殖場では多量の地下水を揚水している. (第8表とその1によると平均1 km²当り1日で1974年が61,000 m³, 1976年が76,700 m³の揚水が行われている). 中の島地区の年貯留量が下大野地区に比して少な

第12表 下大野地区及び中の島地区における水収支の試算

下 大 野 地 区														
年	項目	月												合 計
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1974	P	86	76	50	185	141	256	479	360	685	122	57	43	2,540
	Δh	-120	-200	-550	-220	-120	500	1,000	600	700	1,700	100	200	+3,590
	$\Delta h \cdot S_y$	-16.8	-28.0	-77.0	-30.8	-16.8	70.0	140.0	84.0	238.0	14.0	21.0	28.0	425.6
	$\Sigma \Delta h \cdot S_y$	-16.8	-44.8	-121.8	-152.6	-169.4	-99.4	40.6	124.6	362.6	376.6	397.6	425.6	(16.8%)
1975	P	117	139	197	303	91	257	125	458	116	462	278	47	2,590
	Δh	200	400	-70	-20	-100	-350	-200	600	520	350	1,200	670	
	$\Delta h \cdot S_y$	28.0	56.0	-9.8	-2.8	-14.0	-49.0	-28.0	84.0	72.8	49.0	168.0	93.8	
	$\Sigma \Delta h \cdot S_y$	28.0	74.0	74.2	71.4	57.4	8.4	-19.6	64.4	137.2	186.2	354.2	448.0	(17.3%)
1976	P	20	289	71	190	208	233	353	82	604	220	221	18	2,509
	Δh	550	400	-100	-300	-300	420	450	-40	1,600	540	35	-60	
	$\Delta h \cdot S_y$	77.0	56.0	-14.0	-42.0	-42.0	58.8	63.0	5.6	224.0	75.6	4.9	-8.4	
	$\Sigma \Delta h \cdot S_y$	77.0	133.0	119.0	77.0	35.0	93.8	156.8	162.4	386.4	462.0	466.9	458.5	(18.3%)

中 の 島 地 区														
年	項目	月												合 計
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1974	P	86	76	50	185	141	256	479	360	685	122	57	43	2,540
	Δh	0	150	-900	-1,000	-200	800	900	750	800	0	110	200	
	$\Delta h \cdot S_y$	0	22.5	-135.0	-150.0	-30.0	120.0	135.0	112.5	120.0	0	16.5	30.0	
	$\Sigma \Delta h \cdot S_y$	0	22.5	-112.5	-262.5	-292.5	-172.5	-37.5	75.0	195.0	195.0	211.5	241.5	(9.5%)
1975	P	117	139	197	303	91	257	125	458	116	462	278	47	2,590
	Δh	150	180	-200	-400	0	630	500*	450*	430*	180*	520	450	
	$\Delta h \cdot S_y$	22.5	27.0	-30.0	-60.0	0	94.5	75.0	67.5	64.5	27.0	78.0	67.5	
	$\Sigma \Delta h \cdot S_y$	22.5	49.5	-19.5	-79.5	-79.5	15.0	90.0	157.5	222.0	249.0	327.0	394.5	
1976	P	20	289	71	190	208	233	353	82	604	220	221	18	2,509
	Δh	250	100	60	-400	-400	250	450	420	320	-600	-350	-80	
	$\Delta h \cdot S_y$	37.5	15.0	9.0	-60.0	-60.0	37.5	67.5	63.0	48.0	-90.0	-52.5	-12.0	
	$\Sigma \Delta h \cdot S_y$	37.5	52.5	61.5	1.5	-58.5	-21.0	46.5	109.5	157.5	67.5	15.0	3.0	(0.1%)

単位は mm * は推定値

く、かつ、1976年における貯留量の著しい減少は、主として鮎養殖場における多量な地下水揚水に伴う地下水位の低下にしたがって、本地区の地下水が流出したためと思われる。

6.3 被圧地下水の水収支

一定地域における地下水補給量と揚水量及び地下水位（或は水頭）の変化と見掛けの貯留係数から被圧地下水の水収支が行われた例がある（柴崎・熊井，1968）。柴崎等の水収支式は基本的には、先にふれた自由面地下水の水収支式(3)に類似する。すなわち、地下水補給量と揚水量との差が水位変化として求められている。そして、通年

の水位計算結果は観測井における地下水位の経年変化に類似するようである。したがって、見掛けの貯留係数を既知として、逆に観測井の水位変化から補給量と揚水量との差（貯留量）が求められると思われる。ここでは見掛けの貯留係数は求めていないが、見掛けの貯留係数を一定とすると、第14図及び第15図に示す上福井地下水位観測井(4)及び横見町地下水位観測井(5)における水位の経年変化から推定できる。すなわち、月単位の貯留量変化は平均水位に対応して負号を示すことが多く、月貯留量の積算結果は負号であらわされる年もある。海岸沿いの地

区では、柴崎・熊井(1968)の水収支式の適用によって、被圧地下水の貯留量変化と塩水化との関係がうまく説明できると思われる。しかしながら、被圧地下水の地下水位(或は水頭)の変化には圧縮率が含まれており、単なる見掛けの貯留係数の使用については若干の疑問がある。井戸の揚水による被圧地下水の水位低下及びその影響半径については貯留係数が関与することが知られている(例えば、尾崎・後藤, 1974)。井戸の継続揚水に伴う収水層内貯留量の逐年減少については、酒井(1973)による解があるが、本地域では井戸群の揚水時間及び揚水量が不明なため応用できない。

被圧地下水の水収支は明らかにできない。しかしながら、1974年に行われた徳島県の調査資料によると、那賀川河口部付近における被圧地下水の海側への自然流動量は、流動幅が5,000 mで1日に20,700 m³と計算されている。これは、流動幅が1,000 m当り、1日に4,140 m³の自然流動量となる。地下水の水質を観測している阿南市横見町の養殖場には深度20m以上で、口径250 mm、ポンプ能力が7.5 kWの井戸が4本と、口径200 mm、ポンプ能力が5.5 kWの井戸が4本あり、1966年から揚水を開始している。揚水期間は例年2月から9月までの期間である。揚水量は明らかでないが、聴取によると最盛時には1日に15,000 m³程度という。この付近の井戸の揚水量は水位降下1mで1日2,000 m³前後が多い(第4図)。いま仮りに、1井当りの揚水量を1日に2,000 m³とすると、8井の合計揚水井量は1日に16,000 m³となり、前述の聴取による揚水量15,000 m³は概ね妥当な量と思われる。したがって、同養殖場の揚水量は単位幅(1,000m)当り、自然流動量1日に、4,140 m³の3.6倍に相当する。このことから、井戸群の多量な継続揚水による地下水面低下の影響は養殖場周辺の広範囲に及ぶことが推定される。また、1井当りの平均揚水量は1日に1,900 m³程度であって、この揚水量に対する水位降下量は第4図から推定すると、0.9 m前後となる。このほか、他の井戸群の継続揚水による水位干渉が累積され水位降下量は次第に増大する。一方、水源井7のCl⁻は1973年10月に3,310 mg/lを示し、1976年には7,712 mg/lと増加したため、操業を停止するに至った(第10図)。限られた敷地内で井戸群の継続揚水によって被圧地下水の塩分量が次第に増加し、井戸群の揚水停止に伴って、塩分量が次第に減少する事例は既に明らかにされている(尾崎, 1978)。

7. 結 論

1. 那賀川下流流域では、深度20mから40mまでに

認められる砂層及び砂礫層が、それぞれ良好な帯水層を形成している。被圧地下水を取得する井戸の比湧水量(水位降下1 m当りの揚水量)は1日当り1,000-4,000 m³の範囲にある。

2. 那賀川下流流域の被圧地下水について、塩水化地下水の地理的分布及び観測井の塩化物イオン濃度の長期間にわたる変化状態を調査し、これらの結果を地下水揚水量・地下水位及び地下水の収支関係等で考察した。

3. 海岸付近において、被圧地下水を取得する井戸の塩分濃度の増加及び減少は、井戸の揚水量及び揚水時間に関係がある。さらに、井戸群の継続揚水による水位低下の影響範囲内では、少量の継続揚水でも塩水化の時期が早まる。

4. 海岸沿いの地区では、自然状態における被圧地下水の地下水面は、夏季に上昇し冬季に低下する。また、通年的な水位変動幅は、上流側のそれに比して小さい特徴がある。そして、このことが被圧地下水の塩水化を生じやすい自然的要因となっている。

5. 井戸群の継続揚水に伴って、動水勾配が生ず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が、なお平衡状態を維持しようとするために、海水が帯水層の減圧部に向かって移動する。さらに、地下水汲上げ量の増加及び減少に伴って、塩水楔の先端は前進及び後退する。

6. 本地域における被圧地下水の塩水化は局所的なものであって、一時的な現象である。塩水化地域における井戸群の揚水量を可能な限り減少させるか、或はその揚水を中止すれば、塩水化地域が次第に縮小する可能性がある。この場合、塩水楔が後退する時期は、年間における地下水位の変動幅が大きい内陸側に比して、その変動幅が小さい海側が遅れる可能性がある。

被圧地下水の流動については不明な点が多い。地下水盆地では、被圧地下水は揚水または排水しないかぎり流動しないとする意見もある(柴崎・熊井, 1968, p. 173)。本地域では、夏季に多量の被圧地下水が揚水され、さらに、自然状態における被圧地下水の流動量が計算されている。本地域の、海水侵入による塩水化の影響が少ない地下水位観測井(第2図の25, 26, 17)等における水位の経年変化をみると、水位は例年夏季に上昇し、冬季に低下する共通的な特徴を示す。これらの変化は、単に気圧等による変化ではなく、被圧地下水の流動量が、例年夏季における降水・地表水等からの供給量の増大にしたがって増加し、冬季には供給量の減少にしたがって減少する関係を示すものと思われる(第14図、第15図及び第17図)。さらに、鮎養殖場における井戸群の揚水停止によ

り、井戸の塩分濃度が次第に減少する事実は、高濃度の塩分が被圧地下水によって次第に稀釈された結果を反映していると考えられる。しかしながら、本地域における被圧地下水の流速・補給量・貯留量或は賦存量等については、なお不明な点が多い。これらの定量的な課題は今後の研究に期待したい。

文 献

- 福田次吉(1933) 河川工学. 常盤書房(東京), p. 115-116.
- 建設省・徳島県(1964) 徳島臨海地帯の地盤. 都市地盤報告書. 第vol. 7, p. 28-36.
- 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. vol. 7, p. 383-398.
- 村下敏夫(1979) 徳島県の地下水資源(演旨). 日本地下水学会会誌, vol. 22, p. 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. 225, p. 30-42.
- (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—(演旨). 日本地下水学会会誌, vol. 16, p. 16.
- (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—静岡県富士地区の例—. 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^- (演旨). 日本地下水学会会誌, vol. 22, p. 42.
- ・後藤隼次(1974) 阿賀野川水系早出川扇状地の地下水. 地調月報, vol. 15, p. 632-662.
- 酒井軍治郎(1973) 井戸の継続揚水に伴う取水層内貯水留の逐年減少を求める図式解法. 日本地下水学会会誌, vol. 15, p. 76-82.
- 柴崎達雄・熊井久雄(1968) 被圧地下水盆の水収支—とくに佐賀白石平野を例として—. 地質学雑誌, vol. 74, no. 3, p. 165-175.
- 田中 正(1978) 今市扇状地における不飽和帯の水収支, 「日本の水収支」. 古今書院(東京), p. 114-133.
- 徳島県(1969) 那賀川下流域地下水報告書. p. 34-42.
- (1974) 地下水水源調査(那賀川下流域)水理解析報告書. 日さく大阪支店.
- (1979) 土地分類基本調査 阿波富岡. p. 1-18.
- 横山尚秀(1978) 秦野盆地, 水無川扇状地における地下水の水収支. 「日本の水収支」古今書院(東京), p. 152-155.

(受付: 1984年6月4日; 受理: 1984年7月26日)