

吉野川下流部自由地下水帯における塩分挙動に関する調査・解析

Field Observation and Investigation on Saline Intrusion into Unconfined Aquifer of the Yoshino River Basin

徳島大学工学部 正員 尾島 勝
徳島大学大学院 学生員 鐘ヶ江 敏 樹

1. まえがき

わが国における地下水利用量は年々増大する傾向にあり、揚水に伴う水位低下や海岸部地下水の塩水化、都市域における地盤沈下などの弊害が全国各地で顕在化してきており、その防止・改善策の確立が急務とされている。徳島県でも各河川の河口流域や海岸部低平地において、地下水は農業用、工業用、水道水源として昔から広く利用されてきたが、現在では農業用水、養魚用水としての比率がかなり高いことが特徴である。

吉野川下流河口流域における自由地下水の塩分濃度値は、ごく最近までは低く、ほとんど問題は無かった。しかし、昭和56年の異常渇水年には、かなりの範囲にわたって地下水位・水頭の低下、井戸枯れ、地下水塩分濃度値の上昇などの現象が問題となり、その実態把握と対策の提示が望まれることになった。本研究は、これに関連して、著者らが昭和57年以降続けてきた観測調査資料に基づき、当該地区の塩分挙動を^{1), 2), 3)}広域的に解析し、その変化予測を行うことを目的としている。すなわち、広域多測点における観測値から、その長期変動特性を等塩分濃度線や鉛直分布形状の変化として考察するとともに、降雨条件や揚水条件の相違に起因すると考えられる侵入塩分の短期変動特性を移流分散現象として考察する。

2. 対象域の概要と調査方法

2-1 観測調査域

本研究における観測調査域は、図-1に示したように吉野川橋(河口より4.6 Km)から名田橋(同10.6 Km)上流に至る吉野川本川沿いの面積約40 Km²に及ぶかなり広い地域である。

吉野川の北岸側(北島・応神地区)は、宅地化の進行や農業形態の変化が著しく、今後急速に地下水の塩水化が進むことが心配されている。とくに局所的に比較的高塩分濃度値を示している正宝寺川旧樋門付近については、その高濃度化の要因の究明と周辺地下水帯への塩分拡散現象の解析を目的として、図-2に示す小領域(面積約3 Km²)における短期間観測をも実施した。一方、吉野川の南岸側(不動地区)については、被圧地下水帯ではすでに明確な塩水化の進行が認められているが、自由地下水帯では全体的にみればまだ塩分濃度値は低い。しかし、水位低下ならびに塩分濃度値の上昇の傾向が若干現われ始めている不動地区と国鉄徳島本線より北側の徳島市北部域を対象域とした。

2-2 測定方法

観測調査井戸は、その位置を図-1および図-2に示しているが、長期観測用としては北岸側に18個、南岸側に14個、できるだけ等間隔正方形格子状に選定し、短期観測用としては長期観測と併用する5個の井戸の他に8個の井戸を増設選定し

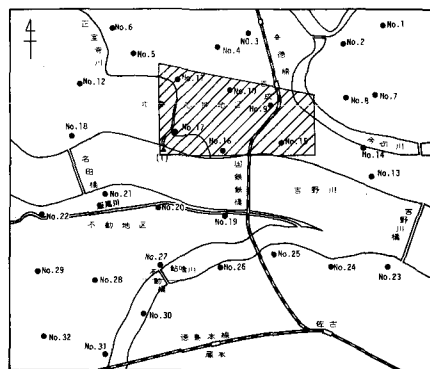


図-1 調査対象域(長期)と観測井戸

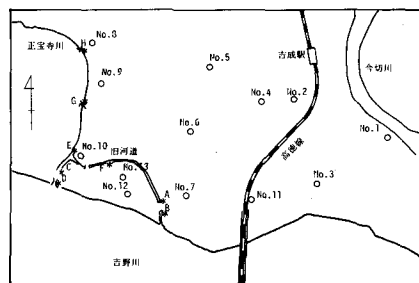


図-2 調査対象域(短期)と観測井戸

て井戸間隔を密にしている。各井戸とも浅井戸であり、その利用水深は3 m程度のものが多い。また、これらの井戸の水位変動は吉野川本川の水位変動（潮汐変動）とは無相関であり、自由地下水と河川水（平常時は海水）とは十分遮断されているとみなしてよい。

長期観測としては昭和58年4月以降約2年間、毎月1回大潮時に定期観測を行い、短期観測としては昭和59年、60年の8月の半月間にわたる日観測を行った。

計測量は、各井戸における水位・水深と水表面から0.5 m毎の深度における水温と電気伝導度である。計測器機はいずれも投入型直読式であり、測定された電気伝導度は常温（20℃）値に換算した後塩素イオン濃度値（ Cl^- , ppm）に変換した。したがって、塩分濃度の平面分布や鉛直分布の時間的変化を考察できる。

3. 観測調査結果の解析

3-1 長期観測

3-1-1 地下水位変動

観測水位記録から各年の8月（かんがい期）から11月（非かんがい期）までの水位低下量を求め、これらをランク分けしたものが表-1である。この表に示された結果から、調査対象域における地下水流況変化について、以下のように考察できる。

1) 北岸側の北島・応神地区では、この期間における水位低下量の大きな井戸が多く、したがって揚水量が地下水かん養量よりも多いといえる。とくに、直接揚水を行っていないNa 5井戸についてみれば、水位低下量は、昭和57年から順に0.89 m、1.53 m、1.34 mである。そこで各年の降雨量を比較すれば、総降雨量はそれぞれ、1,527 mm、1,333 mm、966.5 mmであり、8月の月間降雨量は、236 mm、84.5 mm、106.5 mm、11月は、227 mm、21.5 mm、32.5 mmである。すなわち、揚水量が各年で大きく変動するとは考えられないから降雨量の減少による地下水かん養量の減少が相対的な水位低下量の増大となって現われたものと解釈できる。

2) 南岸側の不動地区では、Na 28、29、30井戸では、地下水かん養量の多い7月～9月のかんがい期を除けば、ほとんど井戸枯れの状態となり、これらの井戸付近では、年間を通じてかなりの過剰揚水になっているものと判断できる。しかし、全体的にみれば北岸側に比べて水位低下量の小さい井戸が多い。とくに、昭和58年のNa 25、26、31、32井戸、昭和59年のNa 24、26、27、32井戸では、最大1.0 mもの水位上昇になっていることが特異である。これは、昭和58年、59年が先に示したとおりの渇水年であり、この両年の8月における地下水揚水量がかん養量をかなり大きく上まわり、地下水位が極端に低下していたものと推測できる。

3-1-2 地下水塩分挙動

計測された塩分濃度値より、各観測井戸における断面平均塩分濃度を求めた。それらの値を表示することは割愛する。南岸側の各井戸ではまだ低濃度であり、塩水化には至っていないと判断できる。しかし、Na 19井戸における昭和59年8月（220 ppm）とNa 24井戸における昭和59年7月（312 ppm）の値が200 ppmを越えていることは、その原因の究明をも含めて、塩水化の進行を監視していく必要があるといえよう。

一方、北岸側ではNa 1、7、9、13、15、16、17の各井戸で塩分濃度値が少なくとも数ヶ月以上にわたって200 ppmを越えており、これらの井戸はすでに弱塩水化の状態にあるといえる。

図-3に、Na 15、16、17およびNa 9の4つの既塩水化井戸を選び、昭和58年4月から約2年間にわたる塩分濃度値ならびに水位の経時変化の様相を、徳島気象台における降雨量（観測日前日までの1ヶ月雨量）とともに示した。その他の井戸についても同様の経時変化図を作成した。これらの図表から明らかとなる長期変動特性をまとめれば以下になる。

表-1 水位低下量によるランク分け

北岸・応神地区（左岸側）			
水位低下量	5.57	5.58	5.59
A 1.0m 以上	No. 5, 6, 2, 3, 11	No. 5, 2, 3	
B 1.0-0.6 以上	No. 13, 6, 1	No. 11, 4, 8, 10	
C 0.6-0.4 以上	No. 13	No. 7	No. 14, 7
D 0.4-0.2 以上	No. 11, 4, 17, 12, 9, 10, 1, 15	No. 17, 14, 16, 15	No. 7, 16, 15, 12, 17, 18
E 0.2-0.1 以上	No. 14, 16		No. 9
F 0.1-0.0 以上	No. 18	No. 10	No. 6
G 水位上昇		No. 9, 12, 4, 18	
不動地区（右岸側）			
水位低下量	5.57	5.58	5.59
A 1.0m 以上			No. 19
B 1.0-0.6 以上	No. 28, 29, 22		No. 21, 23
C 0.6-0.4 以上		No. 24, 21	No. 22, 31, 29
D 0.4-0.2 以上	No. 21, 32, 24, 20	No. 22, 20, 23	
E 0.2-0.1 以上	No. 31, 25, 26, 30	No. 29	No. 28
F 0.1-0.0 以上	No. 27, 23	No. 27, 19, 28	No. 20, 30
G 水位上昇	No. 19	No. 26, 30, 25, 31, 32	No. 27, 32, 24, 26

1) 現在は非塩水化域と判断できる南岸側でも、吉野川本川沿いのNo.19～No.25の各井戸では、塩分濃度値は季節的にみれば夏高冬低の様相を示しており、夏季の地下水揚水量の増大に伴って濃度上昇の傾向が認められる。

2) 北岸側では塩水化域はかなり広く、季節的にみれば塩分濃度値は6月～10月のかんがい期にやや増大する。

3) 図-3に示した井戸における塩分濃度値の経時変化の様相には、長期的な変動特性は認められず、また隣接井戸間の相互の関連も明確でない。しかも、連続的な塩分侵入に起因するような長期増加傾向も認められず、何らかの原因で一時的に侵入した塩分が地下水流動に伴ってごく限られた領域内で移動しているだけであると判断できる。

上記の塩分挙動を平面的に把握するために、等塩分濃度線図を作成した。図-4にその一部を示した。

図中の斜線を引いた領域の塩分濃度値が200ppmを越え、いわゆる塩水化域である。これらの図から明らかに、塩水化域はNo.16井戸を中心とする地区とNo.1, No.7, No.13井戸を結ぶ調査対象域の東部地区(海岸線寄り)とに分けられる。したがって、両地区の塩水化の原因は本質的に異なるものであるといえる。また、斜線を引いた領域の面積を北岸側対象域の全面積に対する割合で評価すると、昭和58年8月が22.6%, 11月が15.5%であり、ここには示していないが昭和58年5月が16.3%, 昭和59年2月が14.2%である。このような塩水化域面積の消長を大きく支配しているのはNo.16井戸を中心とする地区であることがわかる。

100ppmの等濃度線が今切川沿いに東方にわん曲し、突出しているが、これは、今切川河道水の浸透によって地下水がかん養され、河道が一つの塩分侵入阻止境界となっていることを示しているといえる。

図-5は、各井戸における塩分濃度の鉛直分布を描いたものの一部である。これらより、i) No.14井戸のような非塩水化井戸では、水深方向にはほぼ一様の濃度分布形状を示し、その濃度値も年間を通じてほとんど変化しないこと、ii) 図中のNo.15, 16, 17井戸のようにすでに塩水化している井戸では、その鉛直分布形状はそれぞれ異なり、各々の井戸における濃度値も季節的にかなり大きく変動していることがわかる。すなわち、既塩水化域内では地下水の流動に伴い塩分の移動が生じていることを明確に示すものであり、そ

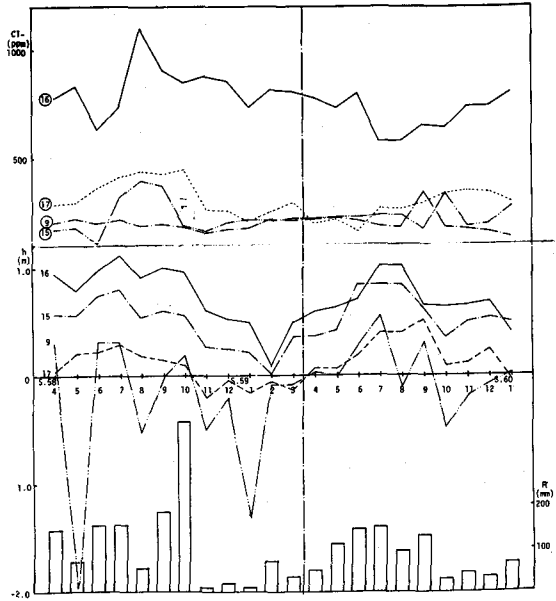


図-3 塩分濃度、水位の長期変動

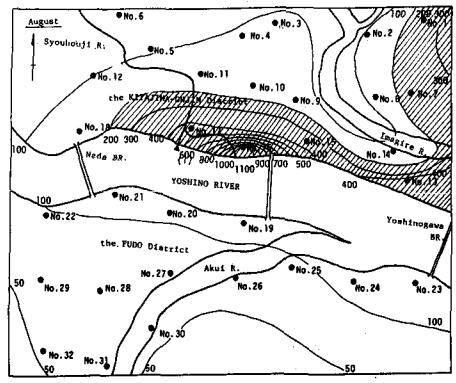


図-4 (a) 塩分の平面分布と塩水化域

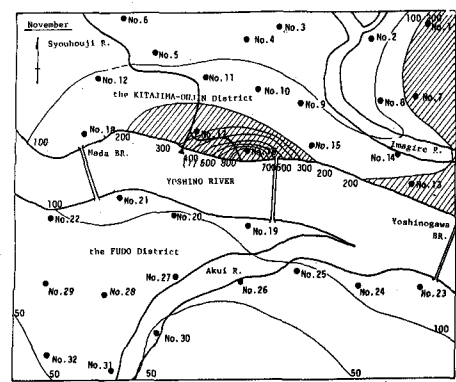


図-4 (b) 塩分の平面分布と塩水化域

の定量的解析が必要となる。

3-2 短期観測

図-2に示した東貞方地区を中心とする対象域において、昭和59年8月(2~17日;無降雨期間)と昭和60年8月(1~16日;降雨期間)の日観測記録に基づき、短期変動特性について考察する。

3-2-1 地下水位変動

図-6(a),(b)は、各観測井戸における観測水位の経時変化を示したものであり、日降雨量とともに示した。観測期間中の降雨量は、昭和59年は14日に2mm、15日に81mmのみであり、昭和60年は12日の150mmを最高に、図に示したとおり5月以降は連続12日間の降雨を記録している。したがって、地下水位変動の様相が明確に異なっている。これらの図から、次のように地下水位変動特性を把握できる。

1) 図の(b)に示されるように、地下水位は降雨期間には上昇しており、降雨の鉛直浸透にともなう短時間の直接かん養量がかなり大きい。また、両年の井戸水位から平面的な地下水面高さ

として比較すれば、無降雨期間である昭和59年よりも降雨期間である昭和60年の方が明らかに高い。

2) 図の(a)に示されるように、地下水揚水量が多いかんがい期において2週間にも及ぶ無降雨期間であるにもかかわらず各観測井戸の水位降

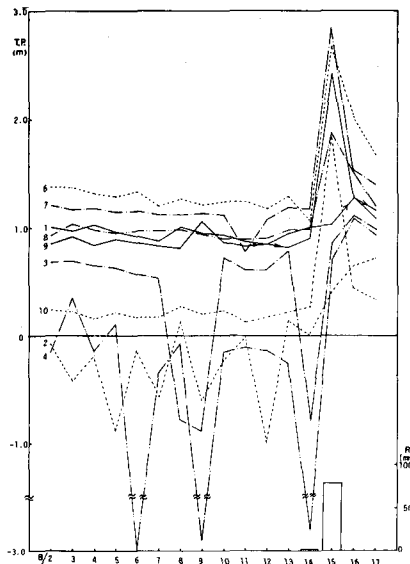


図-6 (a) 水位変動

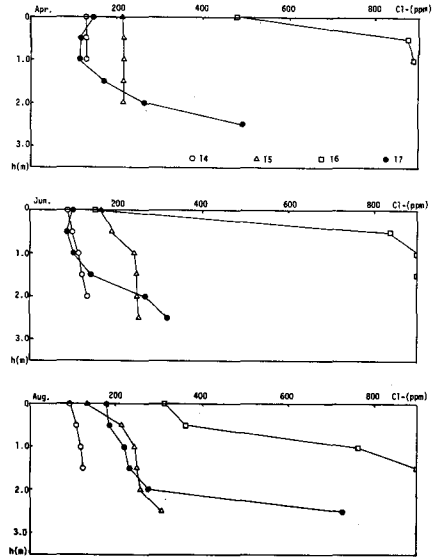


図-5 鉛直分布

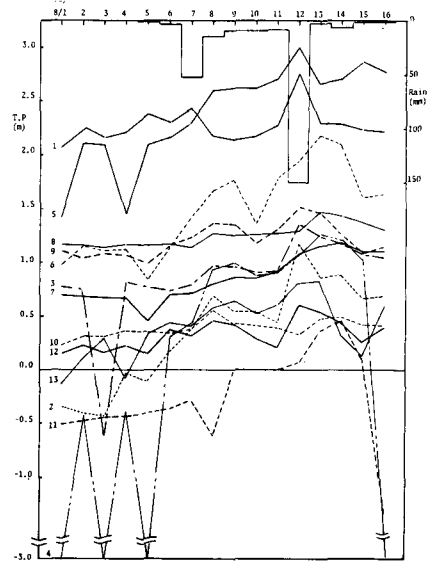


図-6 (b) 水位変動

下量はわずかであることから、当該地区への地下水かん養は十分なされていると判断できる。

3) 例えばNo.2, 3, 4井戸では、直接揚水されているために揚水日には極めて大きな水位低下を示しているが、揚水を停止すれば速やかにほぼ定常水位に復していることから、無降雨期間であっても地下水のかん養は十分になされていると判断できる。

3-2-2 地下水塩分挙動

ここで観測対象とした井戸のうち長期観測データをもつ6つの井戸の過去4年間にわたる各月毎の断面平均濃度値を参考のために表-2に示した。すでに、3-1-2で述べたとおり、塩分濃度値の長期的増加傾向は認められず、昭和57年8月にかなり高濃度値を示したNo.7, No.10井戸では経年的にはむしろ低下傾向に

あるといえる。

表-2 断面平均塩分濃度値の変化

ここでは、得られた観測値に基づき、当該地区の地質柱状図を参考に、して帯水層厚を

Month	S.57	S.58	C1 (ppm)										S.59	S.60									
No.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	81	123	200	218	198	213	188	193	184	153	171	173	218	226	214	183	179	340	186	172	182	135	187
3	21	104	169	176	180	318	395	368	185	160	199	213	216	221	227	236	236	177	341	349	342	297	340
5	54	46	51	75	85	108	104	92	104	55	49	19	15	22	52	67	70	86	43	32	49	13	66
7	1330	242	775	831	630	736	1101	904	844	874	854	732	775	728	798	579	579	651	641	734	738	800	530
9	29	51	118	115	134	131	125	126	121	112	113	115	112	122	116	105	108	117	113	114	135	104	108
10	388	346	284	292	360	411	438	424	446	261	256	205	197	213	160	273	272	293	336	184	197	278	101

T.P.-10m として断面平均塩分濃度値を求め、その経時変化特性について考察するとともに、観測日毎の等塩分濃度線図により塩分の平面的挙動を考察した。図-7 は、昭和60年8月1日（無降雨日）と8月12日（降雨日）の等塩分濃度線図である。No.7 と No.3 井戸が相対的に高濃度値を示しており、とくに No.7 井戸を頂とする同心円状の等濃度線図となっている。また、全体的にみれば正宝寺川筋の地域に比べて鉄道をはさむ今切川に近い東部地区の濃度値が高く、またその日変動幅も大きいことがわかる。

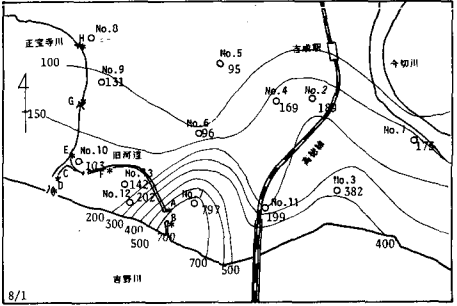


図-7 (a) 等塩分濃度線図

次に、最も高濃度値を示している No.7 井戸に注目して、その鉛直分布形状の変化を示したのが図-8 である。図から明らかなように、水深 1m 以下の塩分濃度値の変動が大きく、とくに 12 日の強降雨の影響が顕著である。仮に 500 ppm を一つの濃度界面と考えて、その界面深さと井水面高さの日変化の様相を図の右下に示している。濃度界面の変動は水位変動に比べて大きく、明らかにこの井戸周辺からの淡水流入とそれに伴う塩分移動が生じていることがわかる。

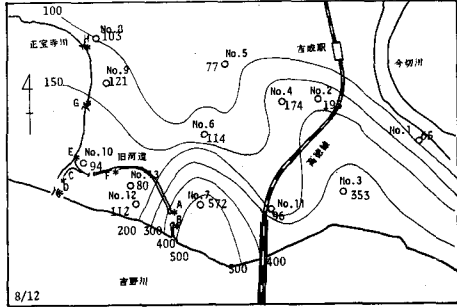


図-7 (b) 等塩分濃度線図

なお、正宝寺川河道内の 8 測点（図-2、A～H）においても塩分濃度と水位の測定を行っているが、その断面平均塩分濃度値の経時変化を示せば、図-9 のようになる。この河道内塩分の周辺地下水帯への侵入は、表-2 に示した長期観測結果からも無いと判断される。

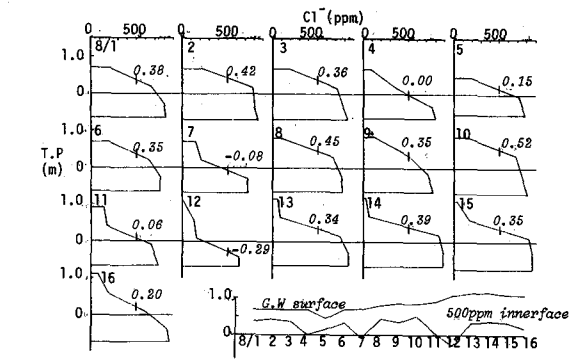


図-8 No.7 井戸における鉛直分布形状の変化

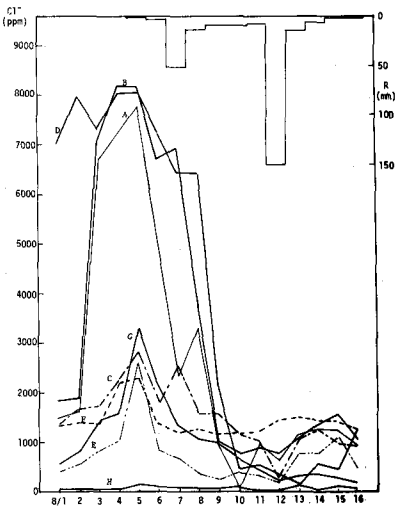


図-9 正宝寺川河道内塩分の経時変化

4. 移流分散現象としての解析

図-10に示すように対象域をTyson-Weberの多角形領域に分割し、No.7とNo.3を中心領域として隣接領域との間の物質収支式を立て、分散係数の算出を試みた。中心領域*o*から隣接する*n*個の*i*領域に δ_i 時間に流出する濃度フラックスと*o*領域における濃度低下量との間には次式が成り立つ。

$$-\left(\frac{\partial C_o}{\partial t}\right) A_o \delta_{zo} \cdot \lambda \delta_i = \sum_{i=1}^n \left\{ C_m k \frac{h_o - h_i}{L} + D_{Li} \frac{C_o - C_i}{L} \right\} \cdot J_{io} \delta_{zi} \delta_i \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 C_o 、 C_i は井戸*o*および*i*の断面平均塩分濃度、 h_o 、 h_i はそれぞれの井戸の水位、 A_o は領域*o*の面積、 L は井戸*o*と*i*の水平距離、 J は*L*の midpoint に直交する多角形の一辺の長さ、 δ_z は領域の帯水層厚さ、 k は透水係数、 λ は空隙率であり、 D_L は算出すべき分散係数である。 C_m は $h_o > h_i$ に対し C_o 、 $h_o < h_i$ に対し C_i をとる。

(1)式を差分近似して次式を得る。

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{J_{io}}{2L_{io}} \{ (C_o - C_i)^{(t+1)} + (C_o - C_i)^{(t)} \} D_{Li} = - \frac{C_o^{(t+1)} - C_o^{(t)}}{\Delta t} \cdot A_o \lambda - \sum_{i=1}^n \left[- \frac{J_{io}}{2L_{io}} C_m^{(t)} k \{ (h_o - h_i)^{(t+1)} + (h_o - h_i)^{(t)} \} \right] \right\} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここでは、既往の資料より、 $k = 0.20 \text{ cm/sec}$ 、 $\lambda = 0.1$ 、 $\delta_z = 10 \text{ m}$ (=一定)として計算を行った。得られた分散係数値を示せば表-3のようになる。なお表中の負の値は、分散の方向を中心領域から外向きを正としているために、塩分移動の経時変化の方向が内向きになっていること、すなわち中心領域の濃度が上昇することを意味する。したがって図-8と比較してみれば塩分挙動を定性的には説明しているといえよう。

しかしながら、玉井の提案式によれば、 $D_L = 5.1 U' d \cdots \cdots (3)$ (U' : 断面平均空隙流速、 d : 平均粒径)で与えられるようであり、これにしたがえば当該地区の分散係数値は $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ のオーダーになる。したがって、ここに示した値はこれに比べて極めて大きな値である。その原因としてはいくつか考えられるが、まず第1に、i) 低濃度の分散現象であり、その濃度変動幅に対して対象井戸間距離が長いこと、ii) 観測水位からダルシー則に従って平均流速を算出しているが、揚水井戸の水位低下を考慮していないことがあげられる。

5. あとがき

本研究では、面積約40km²のかなり広い吉野川下流部自由地下水帯を対象域として、約2年間にわたる観測調査を実施し、その基本データに基づき当該地区における地下水流動特性と塩水化の実態ならびに侵入塩分の挙動について考察した。今後は各区分領域における揚水量を考慮した移動分散モデルを用いて、より厳密な現象解析へと進めていきたい。

なお、本研究の遂行にあたり一部、昭和60年度文部省科学研究費、自然災害特別研究(1)「四国における海岸地下水の塩水化災害とその予測・制御に関する研究」(代表: 愛媛大学柿沼忠男)の補助を受けた。

参考文献

- 1) 尾島: 吉野川下流域における自由地下水の塩水化に関する調査・解析, 徳島大学工学部研究報告, No.30, 1985.
- 2) 尾島: 吉野川下流部低平地自由地下水中の塩分挙動に関する調査・解析(II), 徳島大学工学部研究報告, No.31, 1986.
- 3) 尾島・鐘ヶ江: 低平地自由地下水帯における低濃度塩分の挙動に関する調査・解析, 第41回土木学会年講, II-103 1986.

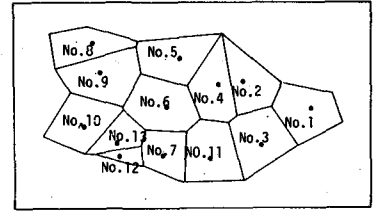


図-10 対象域の多角形分割

表-3 分散係数値

	No.7 DL (cm ² /sec)	No.3 DL (cm ² /sec)
3/1	-42.2	23.2
2	1.6	-25.6
3	53.6	12.3
4	-20.4	-86.9
5	18.0	-116.9
6	63.6	144.5
7	-78.2	-127.9
8	-16.7	133.1
9	-84.8	-36.4
10	132.3	-43.1
11	190.2	58.4
12	-330.4	-576.8
13	-57.0	678.4
14	-1.9	-126.2
15	-12.2	-30.2