

那賀川河口における被圧地下水の塩水化について

福尾 義昭*・柿沼 忠男**・岸 洋介***・伊 福 誠****

1. 緒 言

海に面した平野部における地下水の利用にあたっては、地下水中に海水が侵入してくる“地下水の塩水化”の現象がしばしば見られる。この現象に関する研究は古くは Badon Ghyben と Herzberg¹⁾ に始まるが、最近ではこの現象をモデル化して滞水層内に侵入した塩水層の変動状況を定量的に取扱った多くの研究がある^{2)~6)}。しかしいずれも地下水の流れが1つの鉛直断面に平行であるとする1次元モデルであり、滞水層の平面形状が種々さまざまな場合に適用することはできない。第1および第3の著者⁷⁾ は平面形状が扇形の被圧滞水層を考え、定常状態において侵入した塩水層の形状を簡単に算出できる方法を見出し、その解析的な解を得た。

この論文は、岸・福尾⁷⁾ の2次元モデルを滞水層が一般的な平面形状を有する被圧および不圧地下水に拡張した一つの新しい手法を提案し、徳島県那賀川河口の被圧地下水に適用して、その手法の妥当性を検討しようとしたものである。

2. 地下水塩水化の定常モデル

地下水塩水化に関するモデルを構成するために次のような仮定を行なった：

- i) 滞水層は一樣で等方的である。
- ii) 地下水は滞水層底面の基盤に沿って水平に流れる。
- iii) 滞水層内の淡水と塩水は明瞭に分離している。

図-1 (a) に滞水層の平面形状を、(b) および (c) にそれぞれ被圧滞水層および不圧滞水層の鉛直断面図を示す。地下水は境界線 DC を通って外部から流入し、AB から海へ流出する。他の境界線 AD および BC は不透壁とする。この滞水層内に AB を通して海水が侵入し、これが EF まで入り込んでいるとする。EF より海側の領域を“塩水化域”，それより上流側の領域を“淡水域”と呼ぶことにする。塩水化域での地下水の水位を η_1 ，淡水

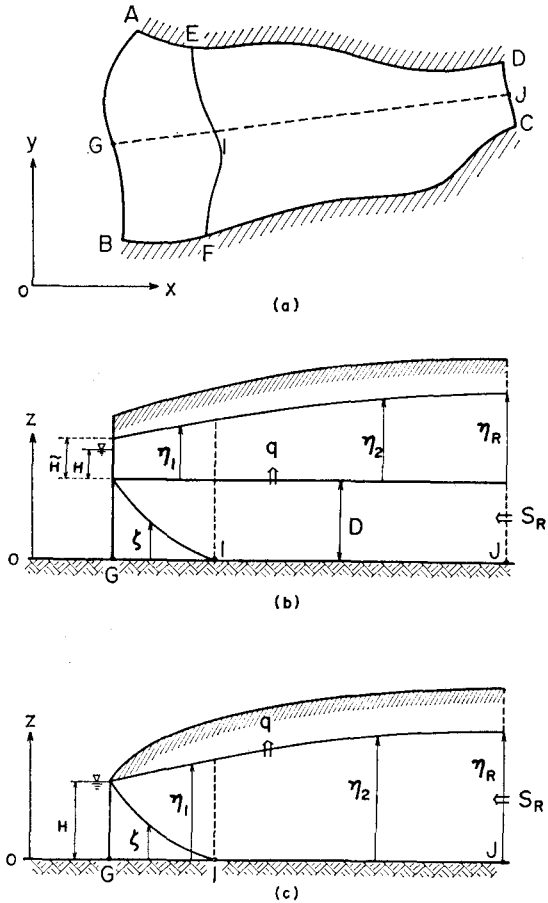


図-1 滞水層、(a) 平面図、(b) 断面図 (被圧)、(c) 断面図 (不圧)

域のそれを η_2 とし、また侵入した塩水層の厚さを ζ とする。 ζ は通常 AB 上で最も大きく、上流に行くと次第に小さくなり EF 上で 0 となる。簡単のため AB 上での ζ は被圧地下水では滞水層の厚さ D ，また不圧地下水では海面高 H に等しいものとする。地下水は滞水層の上面から単位面積、単位時間当たり q だけ揚水されるものとする。上流部から流入する地下水流入量は、単位時間、境界線 DC の単位長さ当たり S_R とし、またそこで水位を η_R とする。以後、水平方向に x 軸と y 軸を

* 理博 奈良教育大学教授 地学教室
** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学教室
*** 正会員 理博 愛媛大学助教授 工学部応用物理教室
**** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学教室

選ぶことにする。

仮定 ii) により地下水の水圧を静水圧で近似でき、Darcy 則から地下水の流速は水位勾配と滯水層の透水係数 k との積となる。定常状態においては、滯水層内に鉛直な細長い水柱を想定すればその内部の水の量は不変に保たなければならない。したがって被圧地下水については

$$k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (D - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right\} + k \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (D - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right\} = q \quad (\text{塩水化域}) \dots\dots\dots (1)$$

$$kD \left(\frac{\partial^2 \eta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta_2}{\partial y^2} \right) = q \quad (\text{淡水域}) \dots\dots\dots (2)$$

また不圧地下水については

$$k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\eta_1 - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right\} + k \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\eta_1 - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right\} = q \quad (\text{塩水化域}) \dots\dots\dots (3)$$

$$k \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right) + k \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial y} \right) = q \quad (\text{淡水域}) \dots\dots\dots (4)$$

を得る。淡水・塩水境界面上では淡水と塩水の圧力が等しいことから、被圧地下水の場合は

$$D - \zeta = \frac{\eta_1 - \tilde{H}}{\gamma} \dots\dots\dots (5)$$

また不圧地下水の場合は

$$\eta_1 - \zeta = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\eta_1 - H}{\gamma} \dots\dots\dots (6)$$

の関係式を得る。ここに

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \\ \tilde{H} &= \frac{\rho_2}{\rho_1} H \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

で、 ρ_1 : 淡水の密度、 ρ_2 : 塩水の密度である。

水位 η が 図—1 (a) に示した平面境界上で満たす境界条件は次のようになる。

a) 地下水流入口 (境界線 DC):

地下水流入量を与える場合は

$$kD \frac{\partial \eta_2}{\partial n} = S_R \quad (\text{被圧地下水}) \dots\dots\dots (8)$$

$$k\eta_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial n} = S_R \quad (\text{不圧地下水}) \dots\dots\dots (9)$$

地下水位を与える場合は

$$\eta_2 = \eta_R \quad (\text{被圧および不圧地下水}) \dots\dots\dots (10)$$

b) 海への流出口 (境界線 AB):

$$\eta_1 = \tilde{H} \quad (\text{被圧地下水}) \dots\dots\dots (11)$$

$$\eta_1 = H \quad (\text{不圧地下水}) \dots\dots\dots (12)$$

c) 側壁 (境界線 AD および BC):

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial n} = \frac{\partial \eta_2}{\partial n} = 0 \quad (\text{被圧および不圧地下水}) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 n に関する微分は境界線の外向き法線方向の微分である。

塩水化域と淡水域の式は、次のように結合して単一の式とすることができる⁷⁾。被圧地下水の場合は、関係式 (5) を用いれば

$$(D - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = \frac{(\eta_1 - \tilde{H})}{\gamma} \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{(\eta_1 - \tilde{H})^2}{2\gamma}$$

となる。 y に関する微分項についても同様だから、式 (1) は

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_1 - \tilde{H}}{\gamma D} \right)^2 \right\} = \frac{q}{\gamma k D^2}$$

と書き直せる。また式 (2) を書き直して

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left\{ \frac{\eta_2^2 - \tilde{H}}{\gamma D} - \frac{1}{2} \right\} = \frac{q}{\gamma k D^2}$$

従って、両式は同形の式

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \eta_1^* = q^* \quad (\text{塩水化域}) \dots\dots\dots (14)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \eta_2^* = q^* \quad (\text{淡水域}) \dots\dots\dots (15)$$

になる。ここに

$$\eta_1^* = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_1 - \tilde{H}}{\gamma D} \right)^2 \dots\dots\dots (16)$$

$$\eta_2^* = \frac{\eta_2 - \tilde{H}}{\gamma D} - \frac{1}{2} \dots\dots\dots (17)$$

$$q^* = \frac{q}{\gamma k D^2} \dots\dots\dots (18)$$

不圧地下水の場合も同様な操作を行なえば、式 (14) および (15) の形になる。ただし、

$$\eta_1^* = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_1 - H}{\gamma H} \right)^2 \dots\dots\dots (19)$$

$$\eta_2^* = \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} \eta_2^2 - H^2}{2\gamma H^2} \dots\dots\dots (20)$$

$$q^* = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{q}{\gamma k H^2} \dots\dots\dots (21)$$

である。簡単な考察により、 η_1^* と η_2^* は両領域の境界 (図—1 (a) で境界線 EF) で滑らかに接続し、かつそこでは $\eta_1^* = \eta_2^* = 1/2$ となることを示すことができる。従って、被圧および不圧地下水のいずれの場合も、式 (14) および (15) は全領域で共通な単一の Poisson の式

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \eta^*(x, y) = q^*(x, y) \dots\dots\dots (22)$$

に帰着する。境界条件 a), b), c) は η^* について書き改めれば

a') 地下水流入口:

地下水流入量を与える場合

$$\frac{\partial \eta^*}{\partial n} = S_R^* \dots\dots\dots (23)$$

ここに

$$S_R^* = \begin{cases} \frac{S_R}{\gamma k D^2} & (\text{被圧地下水}) \\ \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{S_R}{\gamma k H^2} & (\text{不圧地下水}) \end{cases} \quad \dots\dots(24)$$

地下水位を与える場合

$$\eta^* = V^* \quad \dots\dots(25)$$

ここに

$$V^* = \begin{cases} \frac{\eta_R - \bar{H}}{\gamma D} - \frac{1}{2} & (\text{被圧地下水}) \\ \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\eta_R^2 - H^2}{2\gamma H^2} & (\text{不圧地下水}) \end{cases} \quad \dots\dots(26)$$

b') 海への流出口:

$$\eta^* = 0 \quad \dots\dots(27)$$

c') 側壁:

$$\frac{\partial \eta^*}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots(28)$$

これらの境界条件を図-2に示す。

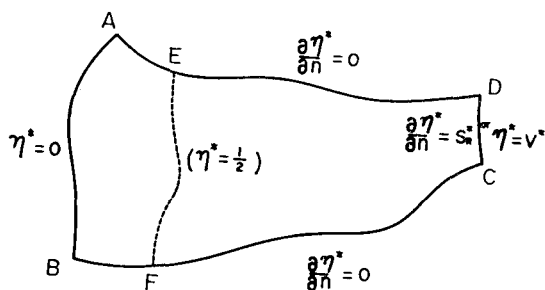


図-2 η^* の境界条件

3. 那賀川河口における被圧地下水塩水化の解析

徳島県那賀川下流域は、那賀川が紀伊水道に流れ出る河口付近に面積約 40 km² の扇状形をした平野部を有し、この平野部是那賀川町、羽ノ浦町および阿南市の北部にまたがっている(図-3)。平野部の地下水は工業用水や生活用水の他に、近年鮎養殖や鰻養殖のための用水と

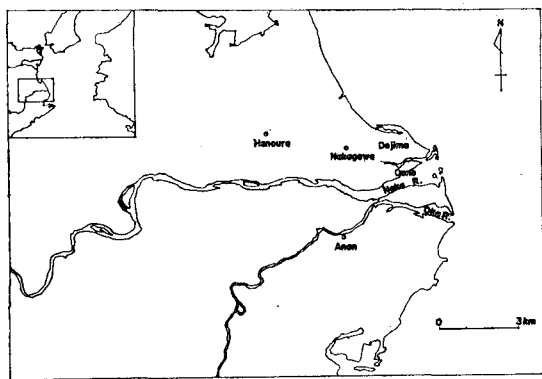
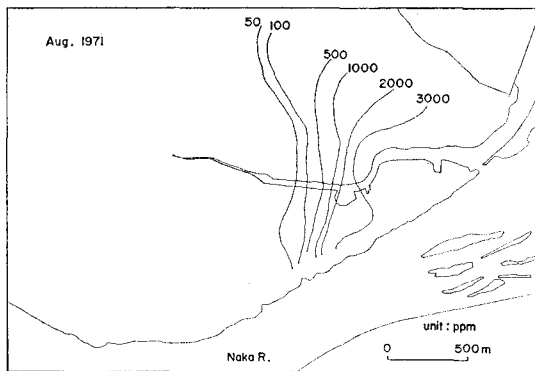
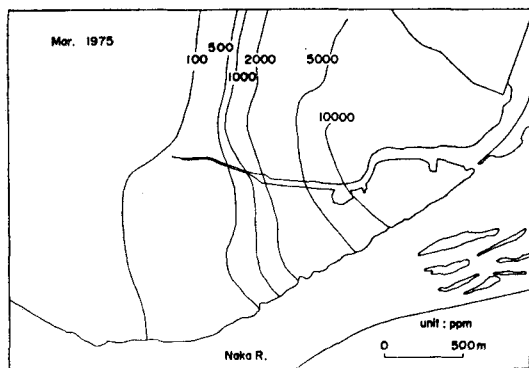


図-3 那賀川下流域



(a)



(b)

図-4 塩素イオン濃度の観測結果

して大規模に利用されるようになった。養殖のための井戸は深度 20~30 m の深井戸が多い⁸⁾。海岸部の那賀川町出島・大野地区では、昭和 42~43 年頃から地下水の塩水化が見られ、最近ではその領域が次第に内陸部へと拡大している状況である。図-4 (a), (b) に昭和 46 年 8 月および 50 年 3 月における深井戸の塩素イオン濃度の観測結果を示す。塩素イオン濃度 1 000 ppm の等濃度線は、昭和 46 年 8 月から約 3 年半の間に 400~500 m も内陸部に浸入している。地層構造図^{9), 10)}から判断すれば、この地区の深井戸の取水層は層厚 25 m 前後の下部砂礫層で、被圧滞水層と考えられる。以後、2. で述べた定常塩水化モデルを適用して、この地区の被圧地下水塩水化の解析を行なってみる。

那賀川下流域平野部における被圧滞水層の平面形状を図-5 のように定めた。那賀川が山地から平野部に流れ出る付近に地下水流入口 DC、平野部と山地の境界を側壁 AD および BC、被圧滞水層が海底に開口する付近に地下水流出口 AB を定めた。AB の線は地層構造図¹⁰⁾と海図からその位置を推定した。地下水の揚水は鮎養殖および鰻養殖によるものとし、その揚水量は簡単のため鮎養殖では 1 箇所につき 10 000 m³/day⁸⁾、鰻養殖では 1 箇

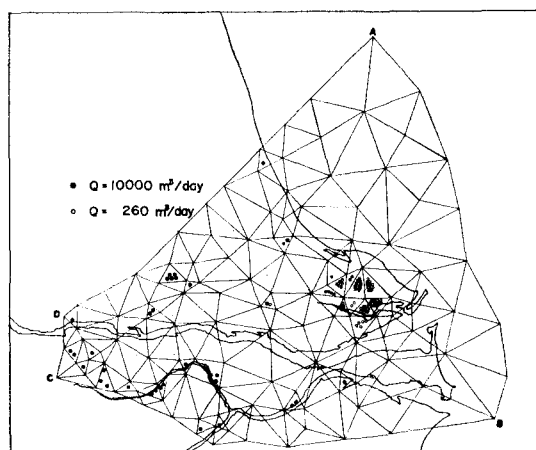
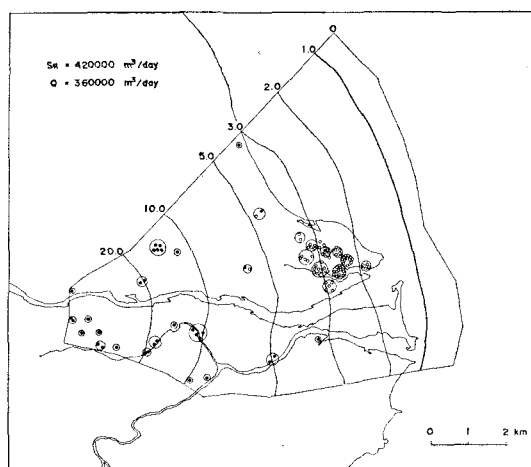


図-5 三角形要素

図-6 水位の等ポテンシャル線 ($S_R=420\,000\text{ m}^3/\text{day}$, $Q=360\,000\text{ m}^3/\text{day}$)

所につき $260\text{ m}^3/\text{day}^9$) とした。図-5 にその揚水位置が示してある。この見積りでは、地域全体の総揚水量 Q は $360\,000\text{ m}^3/\text{day}$ になる。被圧滞水層の厚さ D 、透水係数 k および γ の値を、それぞれ 25 m 、 1.1 cm/sec および 0.025 とした⁹⁾。最後に、上流部からの地下水流入量 S_R についてはその正確な算定は困難であり、この解析ではそれをパラメータとして種々の値について計算を行なった。

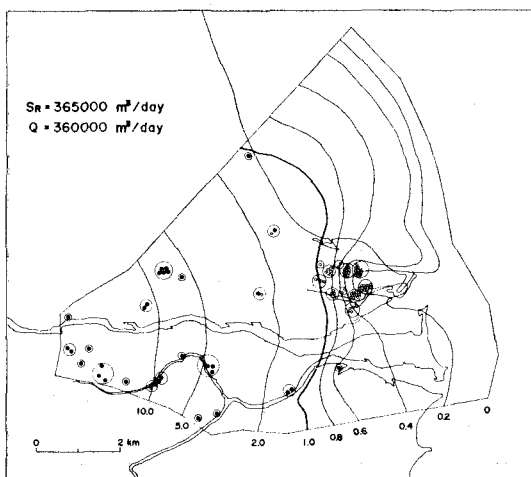
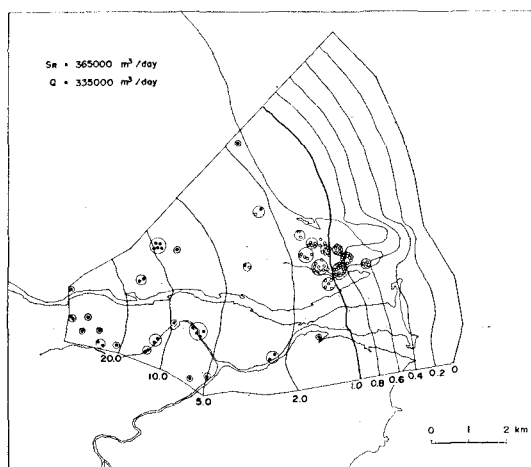
2. で述べた定常塩水化モデルでは領域 ABCD 内で Poisson の式 (22) を解くことに帰着した。そこで有限要素法を用い¹¹⁾、領域を図-5 に示したような多数の三角形要素に分割して数値解を求めた。得た解を無次元の水位 $\phi = (\eta - \bar{H})/\gamma D$ で表わすことにすれば、 $\phi \leq 1.0$ なる領域は塩水化域、 $\phi > 1.0$ なる領域は淡水域になる。塩水化域での塩水層の厚さは式 (5) から

$$\zeta = D(1 - \phi) \dots \dots \dots (29)$$

となる。以下、地下水流入量 S_R および総揚水量 Q の種々の値について計算を行ない、次のような結果を得た。

(1) 揚水量 $360\,000\text{ m}^3/\text{day}$ の場合

S_R を $420\,000\text{ m}^3/\text{day}$ から少しずつ減少させて計算を行なったところ、塩水化域は流入量が総揚水量に近づく急激に内陸部に向かって進行することがわかった。図-6 および 図-7 に $S_R=420\,000\text{ m}^3/\text{day}$ および $365\,000\text{ m}^3/\text{day}$ の場合を示す。 $S_R=365\,000\text{ m}^3/\text{day}$ の場合、那賀川町の出島・大野地区および阿南市の海岸線から $3\sim 4\text{ km}$ 入った海岸地帯が塩水化域になる。那賀川町海岸部のこの塩水化した領域は、昭和 50 年 3 月における塩素イオン高濃度地帯 (図-4 (b)) にほぼ一致する。従ってその当時の総揚水量を $360\,000\text{ m}^3/\text{day}$ とすれば、地下水流入量はそれよりわずかに $5\,000\text{ m}^3/\text{day}$ 程上回る量であったと推定できる。

図-7 水位の等ポテンシャル線 ($S_R=365\,000\text{ m}^3/\text{day}$, $Q=360\,000\text{ m}^3/\text{day}$)図-8 水位の等ポテンシャル線 ($S_R=365\,000\text{ m}^3/\text{day}$, $Q=335\,000\text{ m}^3/\text{day}$)

(2) 揚水量を少し減少させた場合

S_R を $365\,000\text{ m}^3/\text{day}$ に固定し, Q を $360\,000\text{ m}^3/\text{day}$ から少しずつ減少させて計算を行なった. 揚水量が減少すると塩水化の領域は次第に海側に後退する. 図-8 に $Q=335\,000\text{ m}^3/\text{day}$ の場合を示す. 塩水化域は, 図-7 と比べて海側に $500\sim700\text{ m}$ 後退している. この領域は昭和46年8月当時の塩素イオン高濃度地帯(図-4(a))にほぼ一致する. 従って, 仮に地下水流入量が同一であるならば, 総揚水量を $360\,000\text{ m}^3/\text{day}$ から $25\,000\text{ m}^3/\text{day}$ (約7%) 程減少させることにより, 昭和50年3月の塩水化地帯は昭和46年8月当時のそれに回復するといえる.

(3) 地下水中の塩素イオン濃度

このモデルでは滞水層内の塩水層と淡水層は明瞭に分離しているとしたが, 仮想的に両層を鉛直方向に混合したときの平均塩素イオン濃度 $\overline{Cl}$ は簡単に計算できる. 塩水(海水)の塩素イオン濃度を Cl_s , 淡水のそれを Cl_0 とすれば, 式(29)を用いて

$$\overline{Cl} = Cl_s - (Cl_s - Cl_0)\phi \dots\dots\dots(30)$$

となり, 水位 ϕ の分布図から $\overline{Cl}$ の分布図が作成できる. 図-9(a)は図-7の ϕ の分布から求めた那賀川町の出島・大野地区における $\overline{Cl}$ の分布図である. ここで $Cl_s=18\,000\text{ ppm}$, $Cl_0=20\text{ ppm}$ とした. $\overline{Cl}$ の分布は(b)に示した昭和50年3月における井戸水中の塩素イオン濃度の観測結果とよく対応している.

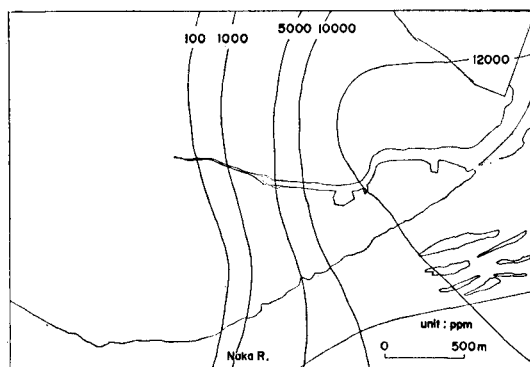
4. 結 語

以上, 著者らは, 定常状態における地下水の塩水化に関し, 一般的な平面形状を有する被圧および不圧滞水層内に侵入する塩水層の分布状態を簡単に算出できる一手法を提案し, 那賀川河口の被圧地下水に適用した. その結果, 地下水塩水化の解析を行なう場合著者らの手法がかなり有効であること, 那賀川河口においては上流部からの地下水流入量が総揚水量に近づくとも塩水化した領域は内陸部に向かって急激に拡大すること, 観測資料と比較すると塩水化が最も進んだ昭和50年の状態は地下水流入量がほぼ総揚水量に等しい場合に対応していること, などを得た.

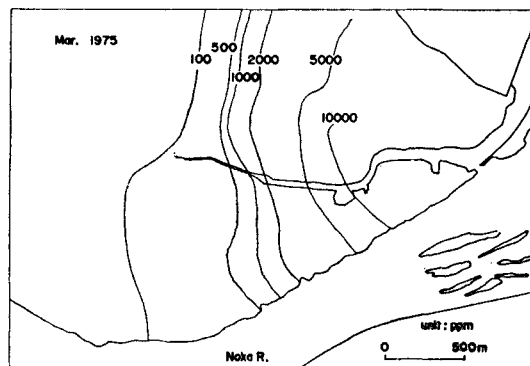
なお, この研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する.

参 考 文 献

- 1) De Wiest, R. J. M.: Geohydrology, John Wiley & Sons, Inc., New York · London · Sydney, p. 295, 1965.
- 2) Bear, J. and G. Dagan: Moving interface in coastal aquifers, Proc. ASCE, J. Hydraul. Div., pp. 193~216, 1964.
- 3) Tamai, N. and S. Shima: Salt-water wedge in confined coastal aquifers, Trans. of JSCE, No. 139, pp. 31~38, 1967.
- 4) Shamir, V. and G. Dagan: Motion of the seawater interface in coastal aquifers; a numerical solution, Water Resour. Res., Vol. 7, pp. 644~657, 1971.
- 5) 福尾義昭: 被圧地下水の塩水化について——揚水量分布変動と塩水化域との関係——, 日本地下水学会誌, 第14巻2号, pp. 33~44, 1972.
- 6) Kawatani, T.: Numerical analysis of ground water mound and fresh-salt water interface in a coastal aquifer, Proc. of JSCE, No. 238, pp. 89~98, 1975.
- 7) Kishi, Y. and Y. Fukuo: Studies on salinization of groundwater I, J. Hydrology, Vol. 35, pp. 1~29, 1977.
- 8) 徳島県: 那賀川下流域地下水調査報告書, pp. 1~67, 1969.
- 9) 防災研究協会: 那賀川下流域地下水調査報告書(水理解析), pp. 1~43, 1975.
- 10) 建設省計画局・徳島県: 徳島臨海地帯の地盤, 都市地盤調査報告書, 第7巻, pp. 1~192, 1964.
- 11) Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill Pub. Co. Ltd., London, pp. 16~72, 1971.



(a) 解析



(b) 観測

図-9 塩素イオン濃度