

海岸地下水の塩水化について

愛媛大学工学部 正員 柿沼忠男
愛媛大学工学部 正員 〇岸 洋介
愛媛大学工学部 正員 伊福 誠

1. まえがき 海岸地域における地下水利用にあたっては、地下水中に海水が浸入してくる、いわゆる“地下水の塩水化”が発生し、地下水利用に支障をきたす例がしばしば見られる。この地下水塩水化を解析するために、この現象をある程度単純化したモデルで表現して、対象地域の地下水揚水量と塩水化の進行状況との関連を量的に把握することが可能であると思われる。本研究では第1に、福尾・岸(1977年)による扇状地形における被圧地下水の定常塩水化モデルを不圧地下水にも適用でき、かつ一般的な平面的形状の帯水層にも適用できるように拡張を行い、第2にこのモデルを愛媛県喜多川河口の地下水に適用してこの地域の地下水塩水化の解析を行ったのでここに報告する。

2. 定常塩水化モデル 図-1(a)に帯水層の平面図形を示す。地下水は境界線DCから流入し、境界線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。境界線ABからは海水が浸入し、それがEFまで入り込んでいくとする。EFより海側の領域を“塩水化域”、EFより上流側を“淡水域”と呼ぶことにする。図-1(b)および(c)に被圧帯水層および不圧帯水層の鉛直断面図を示す。帯水層の基盤は水平であるとし、また淡水層と塩水層は明確に分離しているとした。塩水層の厚さを $\zeta(x, y)$ とし、また地下水位を塩水化域では $\eta_1(x, y)$ 、淡水域では $\eta_2(x, y)$ とした。定常状態を考えれば、図-1(b)あるいは(c)の断面を流動する地下水についての連続の式およびDarcy則を結合して、次のような被圧地下水および不圧地下水についての定常塩水化の方程式を得る：

$$\begin{aligned} \text{被圧地下水} \quad & \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \{ (D - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (D - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \} = Q/k & (\text{塩水化域}) & (1) \\ D (\partial^2 \eta_1 / \partial x^2 + \partial^2 \eta_1 / \partial y^2) = Q/k & (\text{淡水域}) & (2) \end{cases} \\ \text{不圧地下水} \quad & \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \{ (\eta_1 - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\eta_1 - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \} = Q/k & (\text{塩水化域}) & (3) \\ \frac{\partial}{\partial x} \{ \eta_2 (\partial \eta_2 / \partial x) \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \eta_2 (\partial \eta_2 / \partial y) \} = Q/k & (\text{淡水域}) & (4) \end{cases} \end{aligned}$$

ここに、 k は透水係数、 Q は単位面積単位時間あたりの揚水量である。淡塩水境界面 $z = \zeta$ 上では淡水の圧力と塩水の圧力が等しいことから次の関係式を得る：

$$(\eta_1 - \bar{H}) = r(D - \zeta) \quad (\text{被圧}) ; \quad (\eta_1 - H) = r'(\eta_1 - \zeta) \quad (\text{不圧}) \quad (5)$$

ただし $r = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ 、 $r' = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ 、 $\bar{H} = (\rho_2/\rho_1)H$ (ρ_1 : 淡水の密度、 ρ_2 : 塩水の密度、 H : 海面高)。関係式(5)を用いれば、被圧および不圧地下水のいずれの場合にも塩水化域と淡水域の方程式を結合して、全領域ABCDにおいて共通のPoisson方程式

$$(\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2) \eta^*(x, y) = Q^*(x, y) \quad (6)$$

に帰着せしめることができる。ここに Q^* は無次元化揚水量

$$Q^* = Q / r k D^2 \quad (\text{被圧}) ; \quad Q^* = (\rho_1 / \rho_2) Q / r k H^2 \quad (\text{不圧}) \quad (7)$$

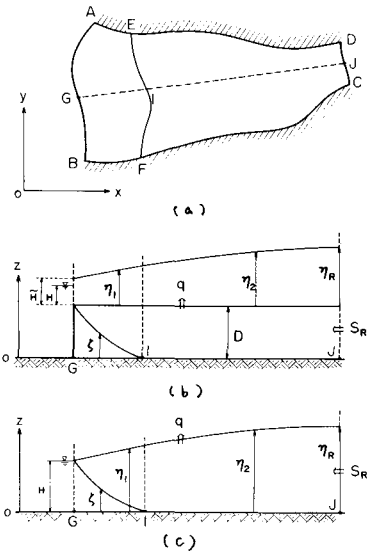


図-1. 帯水層 (a) 平面図 (b) 断面図(被圧) (c) 断面図(不圧)

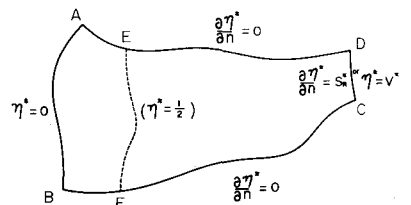


図-2. η^* の境界条件

であり、また η^* は

$$\text{被圧地下水 } \eta^* = \begin{cases} (1/2) \{ (\eta_1 - \bar{H}) / \bar{D} \}^2 & (\text{塩水化域}) \\ \{ (\eta_2 - \bar{H}) / \bar{D} \} - 1/2 & (\text{淡水域}) \end{cases}; \text{不圧地下水 } \eta^* = \begin{cases} (1/2) \{ (\eta_1 - H) / \bar{H} \}^2 & (\text{塩水化域}) \\ (1/2) (\eta_2^2 - \bar{H}^2) / (\bar{H})^2 & (\text{淡水域}) \end{cases} \quad (8)$$

である。塩水化域と淡水域の境界線 EF は、Poisson の方程式 (6) の解 η^* が得られた後、

$$\eta^*(x, y) = 1/2 \quad (9)$$

の条件から決定することができる。 η^* の満たす境界条件を図-2に示す。図の S^* および V^* は境界線 DC における無次元化した地下水流入量および水位であり、境界条件としてはそのどちらかを設定すればよい。

3. 喜木川河口における地下水塩水化の解析 上述の定常塩水化モデルを愛媛県喜木川河口の被圧地下水に適用し、その地区の地下水塩水化を解析してみる。喜木川河口平野部の地下水は昭和43年頃から塩水化が顕著になり、昭和51年頃までは海岸から数百m程入った地帯が塩水化されていた(図-4(a))。ところが52年頃から塩水化が急激に減少し、現在ではほとんど塩水化された地帯は無くなるという推移をたどっている。

河口平野部における帯水層の平面的境界を図-3のように定めた。地下水は山地から喜木川(流域面積 33.0 km²)および宮内川(流域面積 11.6 km²)に沿って主に流入すると考えられるので、山地から平野部へ出る2カ所に流入口を定めた。既存の資料から、透水係数を $k = 0.0374 \text{ cm/sec}$ 、被圧帯水層の厚さを $D = 20 \text{ m}$ と定め、また $\gamma = 0.025$ とした。地下水の揚水は、町上水道、工場、畑作かんがい、公共施設などを中心として行われており、その揚水量合計は昭和51年以前で $Q = 15,850 \text{ m}^3/\text{day}$ と見積った。定常塩水化モデルによる解

析を行なうためには、図-3に示した領域内で Poisson の方程式 (6) を解かねばならない。そのために、その領域を多数の三角形要素に分割して数値解を得る方法、いわゆる有限要素法を用いて解を求めた。上流部からの地下水流入量はこの解析ではパラメータとして種々の値について計算した。地下水流入量が多いときは塩水化した地帯は海岸部の狭い範囲に止まるが、流入量が減少しそれが全体の揚水量の大きさに近づくに従って塩水化された地帯は急激に内陸部へと拡大する。図-4(b)に流入量 $S_R = 16,000 \text{ m}^3/\text{day}$ のときの結果を示す。図には η^* の代わりに無次元の水位 $\phi = (\eta - \bar{H}) / \bar{D}$ の分布を示す。塩水化域は $\phi \leq 1.0$ なる領域で、これは海岸から600~800m入った地帯になっている。その領域は図-4(a)に示した昭和49年2月における井戸水中の塩素イオンの高濃度地帯にほぼ重なっている。ところで著者らの調査では、工場の排水などにより地域全体の揚水量は52年頃からほぼ $2,500 \text{ m}^3/\text{day}$ 程減少している。図-5に流入量はそのまま揚水量を減少させて $Q = 13,300 \text{ m}^3/\text{day}$ としたときの計算結果を示す。 $\phi \leq 1.0$ なる領域は急激に後退し塩水化はほとんどなくなってしまう。

4. あとがき 海岸地下水の塩水化に関する定常塩水化モデルにもとずいて喜木川河口被圧地下水の塩水化の解析を行ない、塩水化した地帯の拡大と縮小を地下水流入量や揚水量の増減に関係づけて論じた。今後、この現象の時間的変動についても検討を行ないたい。

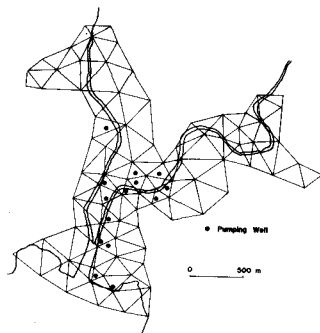


図-3. 帯水層平面と三角形要素

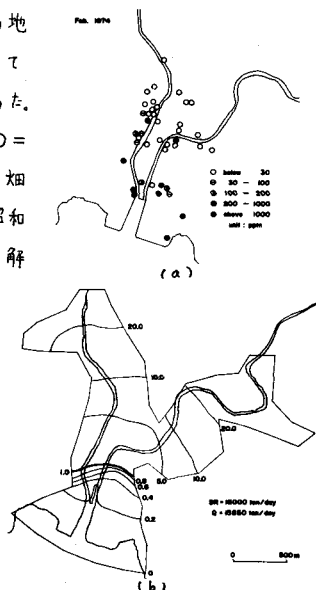


図-4. (a) 井戸水中の塩素イオン濃度 (b) 水位分布図 ($Q = 15,850 \text{ m}^3/\text{day}$)

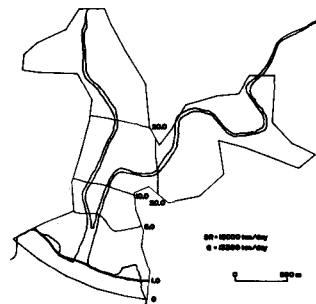


図-5. 水位分布図 ($Q = 13,300 \text{ m}^3/\text{day}$)