揚水を考慮した地下水の塩水侵入に関する研究

熊本大学大学院　学生会員　○山野　智
京都大学　正会員　濱　武秀
熊本大学　正会員　藤見　俊夫

1. 背景と目的

地下水は年間を通して水量も豊かで，水質も良好で水温もほぼ安定しているため，全地球的に見ても主要な水資源として利用されてきた．また，ポンプ等の揚水施設を設置すれば容易に確保できるので，あらゆる大陸で主要な帯水層から地下水が汲み上げられるようになった．一度地下水の塩水化が生じると，その回復には長期間かかる．地下水に関する研究は多岐にわたり行われており，人為的な揚水は潮汐よりも地下水位の増減に影響を与えることが報告されている(1)．

熊本県玉名市横島町は，国内でも最大の干満差を持つ有明海に面した営農地域で，古くから干拓が行われてきた．現在この地域では水田や畑が広がり，土地の約 6 割が農業地域である(2)．横島町では，6 月半ばから 10 月半ばまでは灌漑期で，水田からの淡水供給により塩水の侵入が抑制される．一方で，帯水層における地下水の揚水は灌漑期に限らず生活用水などにより年中使用されていると考えられ，特に非灌漑期では塩水の侵入が懸念される．

本研究では，沿岸部の低平地において営農が行われている地域を想定し，地下水の塩水侵入について数値解析を行う．その際，揚水などの外的要因がもたらす影響を踏まえ，帯水層における塩水挙動を考察する．

2. 数値解析

2-1. 数値モデル

解析では，以下の数式を用いた．

$$(C_s(\varphi)+\alpha S_s)\frac{\partial \varphi}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{sx}k_r(\theta)\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{sz}k_r(\theta)\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)+\frac{\rho}{\rho_f}k_{sz}\frac{\partial K_r(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{u}{\theta}\frac{\partial C}{\partial x}+\frac{w}{\theta}\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left\{D_{xx}\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{D_{zz}\left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)\right\} \quad (2)$$

(1)，(2)式はそれぞれ飽和・不飽和を考慮した浸透流式(Richards 式)と移流分散方程式である．ここで，t：時間，φ：吸引圧水頭（マトリックスポテンシャル），θ：体積含水率，k：透水係数，$k_r(\theta)$：不飽和透水係数，ρ：流体密度，ρ_f：淡水密度，n：間隙率，u，w：水平，鉛直方向の間隙内の平均流速を表す．式(1)の右辺の ρ/ρ_f は重力項を表し，不飽和・飽和領域における密度変化を考慮している．αは飽和・不飽和において決定されるパラメータで，α=1 で不飽和，α=1 で飽和状態である．S_s：比貯留係数は，$S_s=\rho g(\alpha_s+n\beta_w)$(α_s:：鉛直方向の土粒子の骨格の圧縮率，β_w： 水の圧縮率，g：重力加速度)で表される．D_{xx}，D_{zz}：x，z 方向の分散係数を表す．

2-2. 解析条件

解析領域の略図を図 1 に示す．x 方向は岸沖方向で，z 方向は鉛直方向を示す．A~J 点は境界条件を与えるときに置いた格子記号である．L：帯水層の距離，Hs：塩水の圧力水頭，Hf：淡水の圧力水頭，d：帯水層厚さである．初期条件として，時刻 t における圧力水頭分布と濃度勾配を既知として与えた．なお圧力水頭については，van Genuchten モデル(3)の土壌特性パラメータを参考にした．境界条件について，塩水侵入側では堤体を設置し，堤体（$\overline{\mathrm{EFGHIJ}}$）および下層（$\overline{\mathrm{AB}}$）の境界条件を不透水層条件とした．また，両端の圧力水頭（$\overline{\mathrm{BC}}$，$\overline{\mathrm{IA}}$）については，境界面上で水頭が一定，または時間の関数で与えられる境界条件を与えた．

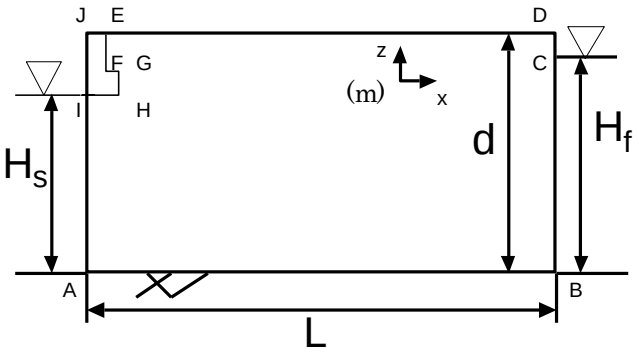

図-1　解析領域の略図

解析条件および土壌特性パラメータを表 1 にまとめる．不飽和における透水係数は，土中の圧力水頭と体積含水率の値から決定される．表中のθ_s，θ_rはそれぞれ飽和，不飽和体積含水率で，α，N，Mは van Genuchten 定数である．また揚水量と揚水地点は表 2 にまとめた．

表-1　解析条件と土壌パラメータ

計算条件							
Hs(m)	Hf(m)	d(m)	L(m)	D_L(m)	D_T(m)	r_s(g/cm^3)	r_f(g/cm3)
7.0	9.0	10.0	500.0	0.025	0.005	1.025	1.000
土壌特性パラメータ							
飽和	不飽和						
k(m/s)	θs	θr	a	N	M	ϕ=-1/α{(θ-θr/θs-θr)}-1/M-1)1/N	
1.331*10^{-4}	0.41	0.01	0.2	0.5	2.0		

表-2　解析領域の略図

沿岸方向からの距離(m)			揚水量(m^3/ s)
50	100	150	4.0*10^{-6}

揚水量の最大値の目安として，周辺の深度 10m 前後の浅井戸で 500~1000m^3/day を超えない程度で与えた(4)．揚水地点は境界上（$\overline{DE}$）の 1 点より与え，そのときの塩水侵入の変化を確認する．

3.　結果と考察

解析結果を図 2 に示す．本解析では，揚水量を固定とし，揚水地点の違いによる塩水の挙動の違いを考察する．上から，揚水地点を 150m，100m，50m で揚水条件を与えている．海岸から遠くなると，塩水の侵入に変化はなく塩水くさびが形成されていることが分かる．一方で，揚水地点が沖方向へ向かうにつれ，塩水くさびの形に変化が確認された．これは揚水の影響で塩水が上方向に吸い上げられ，塩水に侵入に影響を与えていると考えられる．また，50m 地点の揚水では先端部(C=0.4%)での塩水くさびが乱れて，C=20%以内ではその形に変化が見られることが分かった．

すべての場合において，C=20%異常の塩水は揚水の影響を受けないことが分かった．そのため，塩分濃度が小さいほど空間的に塩水が広がりやすく，長期間揚水を行うと僅かではあるが塩水化が進んでいくと思われる．

4.　まとめ

本解析では，沿岸部の低平地において地下水の塩水化を，揚水を与えた場合で解析を行った．揚水量を一定で，揚水地点を変化させたとき，沿岸部に近い方が塩水くさびに及ぼす影響が強くなっていることが分かった．また，塩水の濃度が大きい部分は，揚水の影響を受けにくいことが分かった．　地下水で揚水を行うときは，揚水量の調整と揚水位置に留意する必要がある．

なお，本解析で用いたパラメータについて，計算条件や土壌特性パラメータは文献より引用した．より詳細な考察を行うためには，現地調査や室内実験を行う必要がある．

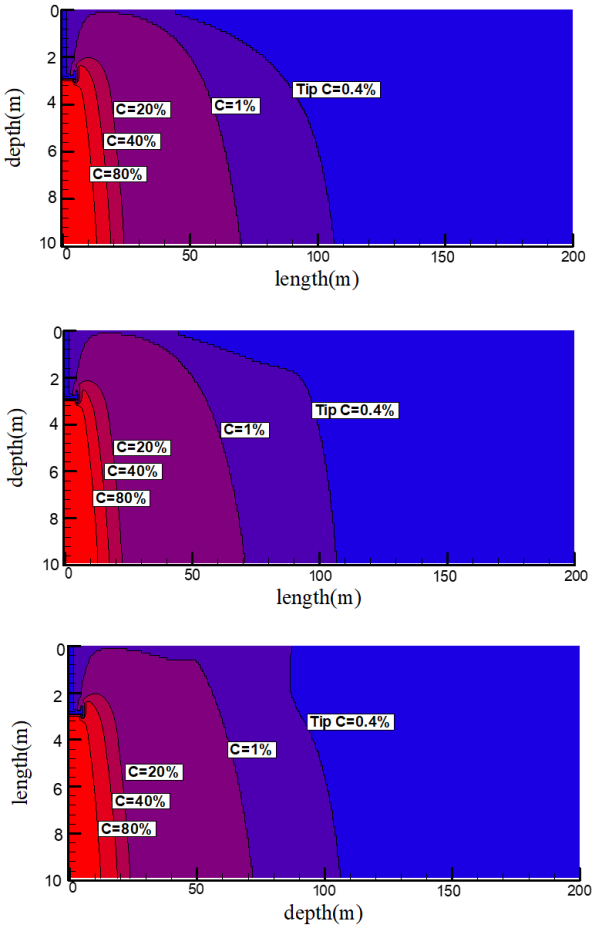

図-2　解析結果

上から揚水地点 150m，100m，50m 地点

【参考文献】

1)藤川　他　：「富士山南山麓地下水の水文学的研究，富士常葉大学研究紀要」7,l113-123.(2007)

2)玉名市：玉名市食料・農業・農村基本計画(H.29.3)

3) van Genuchten, M. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898

4)尾崎次男：「玉名平野の地下水に関する調査研究」，地質調査所月報. 18(5) (1967)