

海面変動に伴う海岸帯水層の塩水楔動態に関する基礎的研究

A Basic Study on Behaviour of Salt in Water Interface in Coastal Aquifer due to Sea Water Level changes

函館工業高等専門学校 ○学生員 小林 祐太 (Yuta Kobayashi)
 函館工業高等専門学校 正会員 宮武 誠 (Makoto miyatake)
 函館工業高等専門学校 正会員 越智 聖志 (Masashi Ochi)

1. はじめに

海岸帯水層内は汽水域として、密度の大きい海水が内陸側の淡水域へ入り込むように浸入し、塩水楔が形成されることが知られている。この塩水楔動態は、有機化合物の分解機構¹⁾や海域への栄養塩供給過程²⁾、海岸植生の生育環境³⁾、波打ち帯の浮遊砂挙動⁴⁾⁵⁾、海底基盤に設置された構造物の安定性⁶⁾、内陸部の塩水化問題⁷⁾など、海岸環境へ多大な影響を及ぼしており、これまで数多くの研究がなされてきた。例えば河野ら⁸⁾、井内ら⁹⁾は、浸透流式にRichards式¹⁰⁾を用いた数値解析を行っており、土屋ら¹¹⁾は不圧海岸帯水層の飽和浸透流を記述する全水頭に関するLaplace式を基礎式としたBEM(境界要素法)モデルを用いて、潮汐及び波浪に伴う地下水面の非定常過程を解析している。また内山ら¹²⁾¹³⁾は、潮位変動を考慮した海岸地下浸透流の挙動に関する検討を行っている。

一方、気候変動に伴う海面上昇問題は、海拔ゼロメートル地帯に浸水被害をもたらすほか、氾濫の危険性の増大、河川への塩水遡上、浸食による砂浜の喪失、河川河口部の塩水動態に伴う生態系の影響など様々な問題を引き起こすことが懸念されている。また、海面上昇がもたらす影響は、防災システムや交通施設などのインフラ、社会経済システム、地下水環境などの広範囲に及ぶ。IPCC(地球温暖化パネル)の最新の第5次報告¹⁴⁾によれば、2100年までに世界平均気温は最大で4.8°C上昇し、それに伴う極地域の氷床の融解や海水の膨張によって、海面が最大で0.8mほど上昇することや低気圧の巨大化に伴い来襲する高波が増大すること、海岸侵食が進行し海底勾配が変化するなどの影響が指摘され、その対策は急務な課題となっている。海岸帯水層内の塩水楔動態もまた、海面上昇に伴い帯水層内に海水の侵入が進めば、砂浜海岸の自然環境に大きな影響を及ぼすとともに、地下水を利用する沿岸域の農業にも大きな影響を及ぼすことが予想される。

本研究は、海面上昇に伴う海岸帯水層の塩水楔動態を将来予測する第一歩として、密度流を考慮した地下水流動モデル及びそれに伴う塩分輸送モデルを構築し、仮想的に設定した海岸帯水層内における数値計算を通じて、構築したモデルの感度分析を実施することで、今後の実海岸を対象とした計算の基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 数値計算モデル

(1) 密度流を考慮した不圧帯水層の地下水流動モデル

対象とする砂浜海岸は、飽和領域と不飽和領域が混

在する地下水位が絶えず変化する不圧帯水層とし、等方性多孔質媒体の砂粒子によって構成されるものとする。帯水層内の浸透流は以下に示すDarcy則及びRichardsの流動モデルに支配される。

$$\{S_w S_f + C'(\psi_f)\} \frac{\partial \psi_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\psi_f) \frac{\partial \psi_f}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi_f) \left(\frac{\partial \psi_f}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \right\} \quad (1)$$

$$[u, w] = -K(\psi_f) \left[\frac{\partial \psi_f}{\partial x}, \frac{\partial \psi_f}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_f} \right] \quad (2)$$

ここで、 $S_w (= \theta - \theta_r / \theta_s - \theta_r)$ は飽和度、 θ は水分量、 θ_s は飽和水分量、 θ_r は残留水分量、 S_f は比貯留係数、 $C'(\psi_f) (= \partial \theta / \partial \psi_f)$ は比水分容量、 $K(\psi_f)$ は透水係数、 ψ_f は飽和領域で圧力水頭(>0)、不飽和領域で毛管水頭(<0)、 u, w は浸透流速(見掛け流速)、 ρ は汽水域密度、 ρ_f は淡水密度を示す。不飽和領域の計算に必要な θ と ψ_f の関係式には、bubbling pressure付近の曲線に緩和部をもたせた、以下に示す谷¹⁵⁾の式を用いる。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_f}{\psi_b} + 1 \right) \exp\left(-\frac{\psi_f}{\psi_b}\right) \quad (3)$$

ここで、 ψ_b は毛管水縁高を示す。飽和帯において、透水係数の値は均質・等方性媒体であれば一定となるが、不飽和帯においては体積含水率の値によって変化することから、透水係数と体積含水率との関係を表す式には、以下に示すBrooks and Corey¹⁶⁾の式を用いる。

$$K(\psi_f) = K_s S_w^\beta = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (4)$$

ここで、 K_s は飽和透水係数、 β は定数であり、Irmay¹⁷⁾による理論値3.0を採用した。

(2) 不圧海岸帯水層内の塩分輸送モデル

前述した不圧海岸帯水層内の塩分濃度は、以下に示す質量濃度で表現する。

$$C = \frac{\rho - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \times 100(\%) \quad (5)$$

ここで、 ρ_s は塩水の密度を示す。これより不圧海岸帯水層内の塩分輸送に関する基本方程式は、以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C) = - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \theta u' C - \theta (D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z}) \right\} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \theta w' C - \theta (D_{xz} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z}) \right\} \quad (6)$$

ここで、 u', w' は前述の浸透流速(u, w)を空隙率 λ で除した実流速、 $D_{xx}, D_{xz} (= D_{zx}), D_{zz}$ は拡散係数を示し、以下のようなテンソルで表現される。

$$\begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xz} \\ D_{xz} & D_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_L \frac{u}{V} + \alpha_T \frac{w}{V} & (\alpha_T - \alpha_L) \frac{uw}{V^2} \\ (\alpha_T - \alpha_L) \frac{uw}{V^2} & \alpha_T \frac{w}{V} + \alpha_L \frac{u}{V} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 V は実流速の合成流速、 α_L 、 α_T は縦(主流)方向及び横(主流と垂直)方向の分散長をそれぞれ示す。この分散長の計算は、以下に示すHarleman and Rumer¹⁸⁾の式を用いて推定する。

$$0.066 \left(\frac{Vd_m}{v} \right)^{1.2} = \frac{\alpha_L V}{v} \quad (8)$$

$$0.036 \left(\frac{Vd_m}{v} \right)^{0.72} = \frac{\alpha_T V}{v} \quad (9)$$

ここに、 v は動粘性係数、 d_m は対象とする帯水層を構成する代表粒径を示す。

(3) 計算方法

計算は、海底勾配にアスペクト比を合致させた直交格子のもと、差分法によって計算する。(1)及び(2)式から帯水層内の水頭値及び浸透流速を計算したのち、その結果を(6)式に代入して塩分輸送計算を行い、塩分濃度を計算する。塩分濃度から(5)式により汽水域密度を計算し、(1)及び(2)式にフィードバックする方式で連成させる。なお、計算時間は最大1年間とし、定常解を得た時点で計算を終了させる。その際、計算収束は誤差の絶対値の総和が 1.0×10^{-6} に達した時点で収束したと判定する。

3. 解析条件

(1) 解析領域

計算は図-1に示すような仮想的に設定した海岸帯水層を対象とする。図中におけるA点を原点として、沖岸方向に x 軸、鉛直方向に z 軸を設定した。海岸不圧帯水層ならびに帯水層を構成する土壌パラメータの諸元は表-1のとおりである。海水面および陸からの涵養水面は、それぞれ同表中の通りであり、計算初期の状態帯水層内には海側から陸側に向かって1/500程度の地下水位勾配を持たせて水頭値を割り振った。一方、塩分濃度については図-1に示すように、海水面を境界として鉛直に楔を分布させ、計算を開始した。

(2) 境界条件

図-1において各境界に与えた条件を表-2に示す。海水位と接する沖側斜面境界ABは、海水位から位置水頭を差し引いた値を圧力水頭として表中のように与えた。斜面上の海水位と地下水位が不連続となる浸潤面BCは大気と触接するものとし、圧力水頭をゼロとした。なお、これらの領域は潮間帯であるため、潮位を以下の正弦式によって仮定し、海水位に潮位を付加した上で、移動境界として計算を行った。

$$\eta = \frac{a}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (10)$$

ここで、 a は潮位振幅、 T は周期であり、日本海における値を参考に表-1のとおり仮定した。一方、潮間帯ACの塩分濃度に関する境界条件は、主流流速方向に応じて直接塩分濃度を与える場合と、その勾配をゼロとして

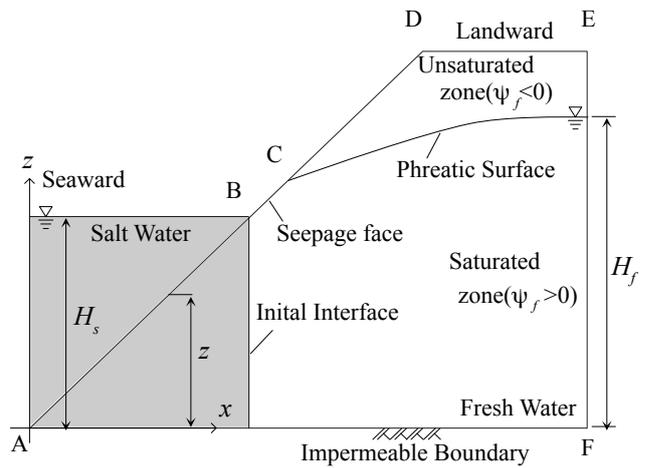


図-1 計算領域の定義

表-1 計算パラメータ

| | | |
|---------|------------------------------------|--------|
| 海岸帯水層 | AF(m) | 120 |
| | EF(m) | 7.0 |
| | DE(m) | 50 |
| | 海底勾配 | 1/10 |
| 土壌パラメータ | 平均粒径 d_m (mm) | 0.04 |
| | 飽和透水係数 K_s (cm/s) | 0.0388 |
| | 比貯留係数 S_f (1/cm) | 0.0217 |
| | 残留水分量 θ_r | 0.007 |
| | 飽和水分量 θ_s | 0.3 |
| | 毛管水頭 ψ_b (cm) | 50 |
| 水理条件 | 海水位 H_s (m) | 3.0 |
| | 涵養水位 H_f (m) | 3.2 |
| | 潮位振幅 a (m) | 0.3 |
| | 周期 T (hr) | 24 |
| | 淡水密度 ρ_f (g/cm ³) | 1.0 |
| | 海水密度 ρ_s (g/cm ³) | 1.025 |

表-2 境界条件

| 境界 | 水頭値 ψ_f (m) | 塩分濃度 C (%) |
|----------|--|--|
| AB | $\psi_f = (H_s - z) \frac{\rho_s}{\rho_f}$ | $C = 1.0 \dots u' \geq 0$ |
| BC | $\psi_f = 0$ | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \dots u' < 0$ |
| CD | $\frac{\partial \psi_f}{\partial x} = 0, \frac{\partial \psi_f}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_f} = 0$ | $\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial z} = 0$ |
| EF | $\psi_f = H_f - z$ | $C = 0.0$ |
| DE AF | $\frac{\partial \psi_f}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_f} = 0$ | $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$ |

取り扱う場合で分けるものとした。海水と接触しない斜面及び陸上境界CEは、境界からの涵養は一切ないもの

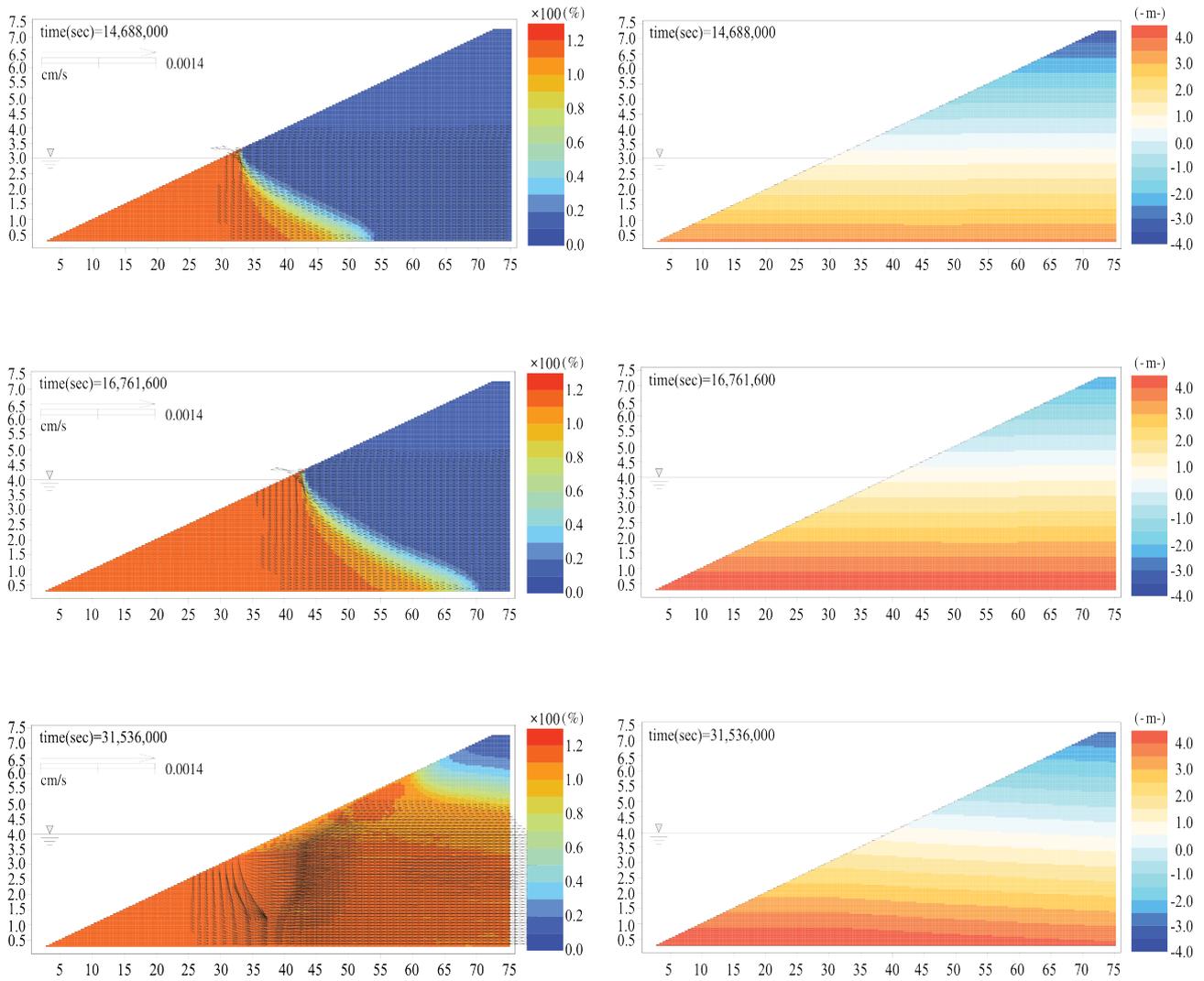


図-2 各ケースの濃度分布(左)と水頭分布(右) (上: Case1, 中: Case2, 下: Case3)

とし、同表中のように与えた。陸水側の帯水層と接する境界EFには陸水側の淡水による地下水位を圧力水頭として与え、塩分濃度もゼロとした。海岸帯水層底部の境界AFは、それと法線方向の流速及び塩分輸送はないものとした。

(3) 計算ケース

今後の将来予測計算の設定に資する基礎的知見を得るため、表-1で示す初期海水位3mを砂浜斜面に与え定常解を得るケース(Case1)に加えて、将来の海面上昇を想定して海水位を4mまで上昇させて定常解を得るケースについて計算を行った。後者のケースについては初期条件として、Case1と同様に水頭値および塩分濃度を前出の(1)のように与えた場合(Case2)と、Case1で得られた水頭値および塩分濃度の定常解を与えた場合(Case3)の2ケースについて行った。この2ケースでは、海岸帯水層の計算初期の状態が海面上昇に伴う浸透流や塩分輸送に及ぼす影響を検討した。

4. 解析結果

Case1~3の濃度分布と水頭分布の解析結果を図-2に

示す。Case1では、陸側に向かって1/500の水頭勾配で地下水位を与え、さらに振幅30cm、周期24時間の潮位を与えたにも関わらず、海水は密度差に強く影響されて淡水層に沈み込むような形で浸入し、明確な塩水楔となって現れる。この塩水楔の遡上長さも、与えた潮位や海岸帯水層内の地下水位勾配よりも密度差によって決まることが伺える。本計算条件では、塩水楔は初期の汀線位置から約20m程度岸側へ遡上し、約170日程度で定常解となった。Case2は、初期水頭勾配をCase1と同じように分布させ、海水位を4mまで上昇させた場合である。Case1と同様に、密度差の影響が主な要因となって塩水楔が現れ、初期の汀線位置から約30m程度岸側へ遡上し、約194日程度で定常解となった。両ケース共に、汀線近傍において湿潤面の形成が認められる。これは、塩水楔が岸側へ遡上したことで陸側から淡水が浸透し滲出流となって砂層外へ流出していると考えられる。次に、Case3は、Case1の計算結果を初期条件とし、海水位が4mまで上昇した場合を想定したものである。なお、こちらは一年経過した段階で定常状態にならなかったため、計算開始から一年後の結果を示した。Case1・2では飽和領域において下に凸状に塩水楔

が形成されていたが、本ケースではその塩水楔の形状は崩壊し、海水が不飽和領域まで及んでいることがわかる。Case1・2の水頭分布を見ると、陸側に向かって負の水頭勾配となっているが、Case3では逆に正の水頭勾配に転じていることがわかる。これによって、Case3はCase2と異なり、密度差よりも潮位や海岸帯水層内の地下水位の影響が大きくなり、塩分の拡散作用が顕著になったものと考えられる。

以上のことから、将来の海面上昇を想定した計算では、同じ上昇した海水位を与えた場合でも、計算を開始する時点での水頭値および塩分濃度の初期条件を正しく把握して与えることが重要であることがわかる。

5. 結論

本研究では、将来の海面上昇に伴う海岸帯水層の塩水楔動態を予測するため、密度流を考慮した地下水流動モデルとそれに伴う塩分輸送モデルを構築し、仮想的に作成した海岸帯水層内における数値計算を通じて、構築したモデルの感度分析を行った。その結果、将来の海面上昇を想定した計算を行う場合、境界条件として与える水頭値や塩分濃度を正確に把握して与える必要があることが明らかとなった。

今回は解析期間を一年間という短期間に設定し、仮想的に作成した海岸帯水層内で海面を上昇させて計算を行ったが、実際に海面が上昇する場合には数十年かけて少しずつ上昇していくこととなる。そのため、今後はより実海岸に近い条件かつ、計算期間を長期間に拡大して解析を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 坂本市太郎：砂浜の潮汐に伴う呼吸(有機物の好気分解代謝)機能, 用水と廃水, Vol.36, No.1, pp.44-52, 1994.
- Johannes, R.E. : The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.3, pp 365-373, 1980.
- 灘岡和夫, 内山雄介, 東川孝治：大気および土壌中の塩分からみた砂浜海岸植生環境について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1171-1175, 1996.
- 宮武誠, 阿部翔太, 木村克俊, 越智聖志：底質粒径による飽和・不飽和浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, I_076-I_080, 2013.
- 宮武誠, 成田郁史, 木村克俊, 越智聖志, 佐々真志, 白水 元：混合粒径下における波打ち帯の漂砂移動特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73 No.2, I_541-I_546, 2017.
- 善 功企, 山崎浩之, 森川嘉之, 小池二三勝：サクシオン基礎沈設時の必要排水量に関する考察, 港湾技研報告, Vol.37, No.4, pp.135-148, 1998.
- 村下敏夫：本邦における地下水の塩水化, 地調月報, Vol.33, No.10, pp.479-530, 1982.
- 河野伊一郎, 西垣 誠, 田中慎一：飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法解析, 土木学会論文報告集, No.331, pp.133-141, 1983.
- 井内国光, 柿沼忠男：海岸における自由地下水の流出, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.541-545, 1996.
- Richards, L.A. : Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, Vol.1, pp318-333, 1931.
- 土屋義人, 山本淳史, 山下隆男, 赤村重紀：砂浜海岸における海岸地下水の挙動, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.571-575, 1993.
- Uchiyama, Y., Nadaoka, K., Rolke, P., Adachi, K., and Yagi, H. : Submarine groundwater discharge into the sea and associated nutrient transport in a sandy beach, *water Resour. Res.*, Vol.36, No.6, pp.1467-1479, 2000.
- 内山雄介, Rolke, P, 足立久美子, 灘岡和夫, 八木宏：海岸地下浸透流およびそれに伴う沿岸域への栄養塩輸送過程, 土木学会論文集, No.635/II-49, pp.127-139, 1999.
- 環境省：気温変化と海面水位変化の将来予測, IPC C第5次評価報告書の概要-総合報告書-, pp.20(2015).
- 谷 誠：一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性, 日本林学会誌, Vol.64, pp.409-418, 1982.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. : Properties of porous media affecting fluid flow, *Proc.ASCE, IR*, Vol.92, pp.61-88, 1966.
- Irmay, S. : On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Trans.AGU*, Vol.35, pp.463-467, 1954.
- Harleman, D.R.F and Rumer, R.R. : Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media, *J. Fluid Mech.*, pp.385-394, 1963.