

汀線近傍の暗渠排水に伴う海岸帯水層中の淡水と塩水の混合挙動に関する研究

STUDY ON THE MIXING OF FRESH AND SALT GROUNDWATER IN A SANDY BEACH USING PIPE DRAINES TO EXTEND THE UNSATURATED ZONE

中川 啓¹・細川土佐男²・岩満公正³・広城吉成⁴・神野健二⁵

Kei NAKAGAWA, Tosao HOSOKAWA, Kousei IWAMITSU,
Yoshinari HIROSHIRO and Kenji JINNO

¹正会員 博(工) 九州大学助手 農学研究院植物資源科学部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科(〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

³正会員 九州産業大学副手 工学部土木工学科(〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

⁴正会員 博(工) 九州大学助教授 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵正会員 工博 九州大学教授 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

In order to protect sandy beaches from erosion caused by waves, a Beach Management System (BMS) is planned in some areas along the Japanese coast. In order to predict the flow in the extended unsaturated zone due to increased drainage, numerical simulations were carried out for a laboratory aquifer and the cross section at a test site in Chiba Prefecture, Japan. The numerical simulations revealed that the unsaturated zone extends below the sandy beach and that salt and fresh water mixed around the drainpipes.

Key Words: salt water intrusion, beach management system, and numerical simulation

1. はじめに

ビーチマネジメントシステム(BMS)は、1981年にデンマークで開発されたもので、海浜前方で砂の堆積を目的として暗渠排水を行うものである。海岸地下水を排水するため、集水暗渠を砂質海岸の地下に設置する場合、不飽和領域が増加し、結果として集水暗渠への鉛直流が発生する。BMS工法の原理は、不飽和領域の増加とそれに伴う鉛直流の発生を利用して、海側へ戻る海水の量を減少させ、結果として海水が戻る流れによる応力への砂粒子の抵抗力を増加させることである。このような暗渠により積極的に排水する方法のほかに、透水層を設置して自然排水を促す方法も検討されている。こうした海浜安定化に関する研究には、現地実験や水理模型実験による検討が必要となる^{1)~7)}。特に、適切な暗渠の設置深度、直径、位置、排水量を設計するために不飽和帯水層中の流れの挙動についての数値計算を実施することは有効であると考えられる。佐藤らは、透水層を埋設することで低下する地下水位に関して2次元および3次元解析を行っている⁴⁾⁹⁾。海岸帯水層では塩水と淡水が混合していることを考慮すべきである。また本研究の対象現場のように、BMSにより集水した水を、後背地の施設により利用しようとする場合

は、塩分濃度などの水質変化を十分検討しておく必要がある。佐藤らの研究は、以上のような点に着目して行われたものではない¹⁰⁾⁹⁾。

本論文では、暗渠排水に伴う淡水と塩水の混合挙動、排水される水への塩水の混入濃度、複数暗渠の運転方法による地下水位低下過程や不飽和領域の形成過程について、室内実験、現地観測、そして数値計算により検討する。

2. 地下水排水時の塩水侵入挙動に対する室内実験および数値計算

(1) 室内実験の概要

図-1は数値計算の対象とした実験装置の断面図を示す。実験水槽は左右にタンクを持つ長さ2.0 m、高さ0.7 m、幅0.125 mである。左右のタンクと金網で仕切られた帯水層部分には、粒径0.105~0.4 mmの標準砂を充填した。地表面の地形は、海岸に向かって傾斜するようにした。実験帯水層の右側と左側に設置したタンク内の水の密度は、 1.025 g L^{-1} とした。

実験は、まず左右のタンク内に水道水を満たし、水深を0.5 mに設定して、地表面より模擬降雨として地表面全体に水道水を一定流量 10 mm h^{-1} を供給して一昼夜

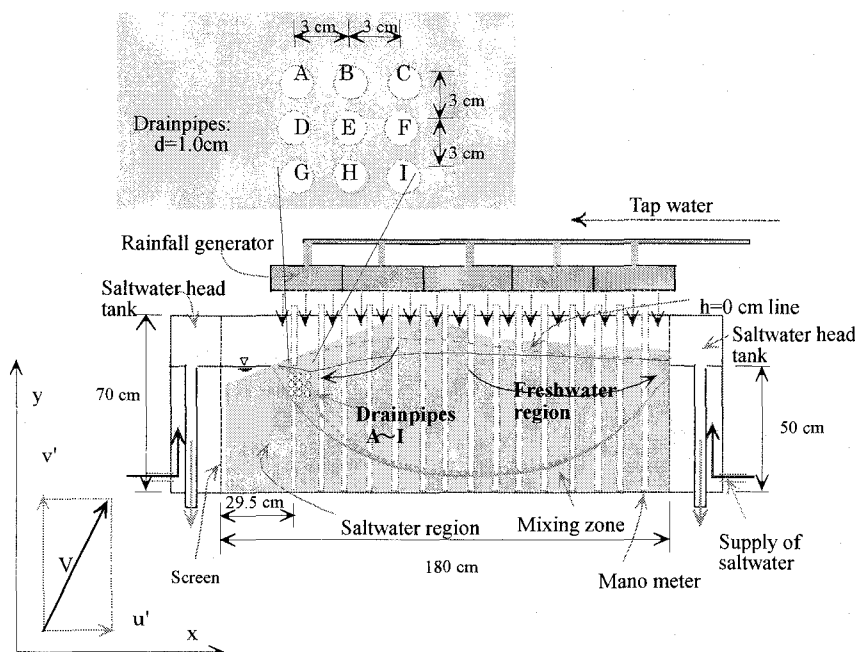


図-1 実験装置の概略図

放置した。その後、左右のタンク内の水道水を塩水に一気に置換して、帯水層への塩水侵入過程を観測した。

左右のタンクから帯水層へ侵入した塩水は、くさび状で帯水層中央部に向かって進行し、実験開始後2880 min.で連結して、いわゆる淡水レンズを形成した。ここでは、淡水レンズを形成した時点から複数の暗渠による排水を行い、塩水侵入状況の変化を室内実験と数値計算により検討している。設置した集水暗渠は図-1に示す9地点に配置し、最上段の暗渠から右側にA, B, Cをその下の中段および下段にもD, E, FとG, H, Iのアルファベットを付けた。排水実験は集水暗渠の位置と数および暗渠内の水頭を組み合わせた24ケースについて行った。塩水や地下水面の挙動はデジタルカメラ、8 mmビデオ等で撮影し、暗渠により排水される水について、一定時間毎に取水量と比重を測定した。測定した比重は後の数値計算結果との比較のため、塩分濃度に換算した。

(2) 数値計算による室内実験の再現

数値計算では、飽和—不飽和中の地下水流れの式として(1)式、輸送方程式として(2)式を用いた。

$$(C_w + \alpha_0 S) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right)$$

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} + \frac{\partial(u' \theta c)}{\partial x} + \frac{\partial(v' \theta c)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + \theta D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + \theta D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ここで、 θ は体積含水率、 D_{xx} , D_{yy} , D_{xy} , D_{yx} は分散係数、 t は時間、 $h(x, y, t)$ は (x, y) 座標における圧力水頭、 k は透水係数、 u と v はダルシーの法則により計算される x , y 方向の流速、 ρ は流体密度で、 ρ_f と ρ_s はそれぞれ淡水と塩水の密度、 $C_w = d\theta/dh$ は比水分容量、 S は比貯留係数、 α_0 はダミー一定数で0のとき不飽和状態、1のとき飽和状態を表す。 u' と v' は $u' = u/\theta$, $v' = v/\theta$ で計算される x , y 方向の実流速である。

実流速依存の分散係数は次のように表される⁹⁾。

$$\begin{aligned} \theta D_{xx} &= \frac{\alpha_L u'^2}{V} + \frac{\alpha_T v'^2}{V} + \theta D_M \\ \theta D_{yy} &= \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + \theta D_M \\ \theta D_{xy} &= \theta D_{yx} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) u' v'}{V} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$ であり、 α_L は縦方向分散長、 α_T は横方向分散長、 D_M は水の分子拡散係数である。

(2)式の塩分濃度 $c(x, y, t)$ は、密度から次式で換算する。

$$c(x, y, t) = \frac{100[\rho(x, y, t) - \rho_f]}{(\rho_s - \rho_f)} \quad (4)$$

不飽和領域も含めた数値計算を行うには、地盤の不飽和特性として負の圧力水頭 h に対する体積含水率 θ (h - θ 曲線)、飽和透水係数 k_s と、不飽和透水係数 k との比 $k_r = k/k_s$ (k_r - h 曲線)、および比水分容量 $C_w = d\theta/dh$ (C_w - h 曲線)を与える必要がある。van Genuchtenが提案した理論式(5)を利用して得られる不飽和特性値を用いる。

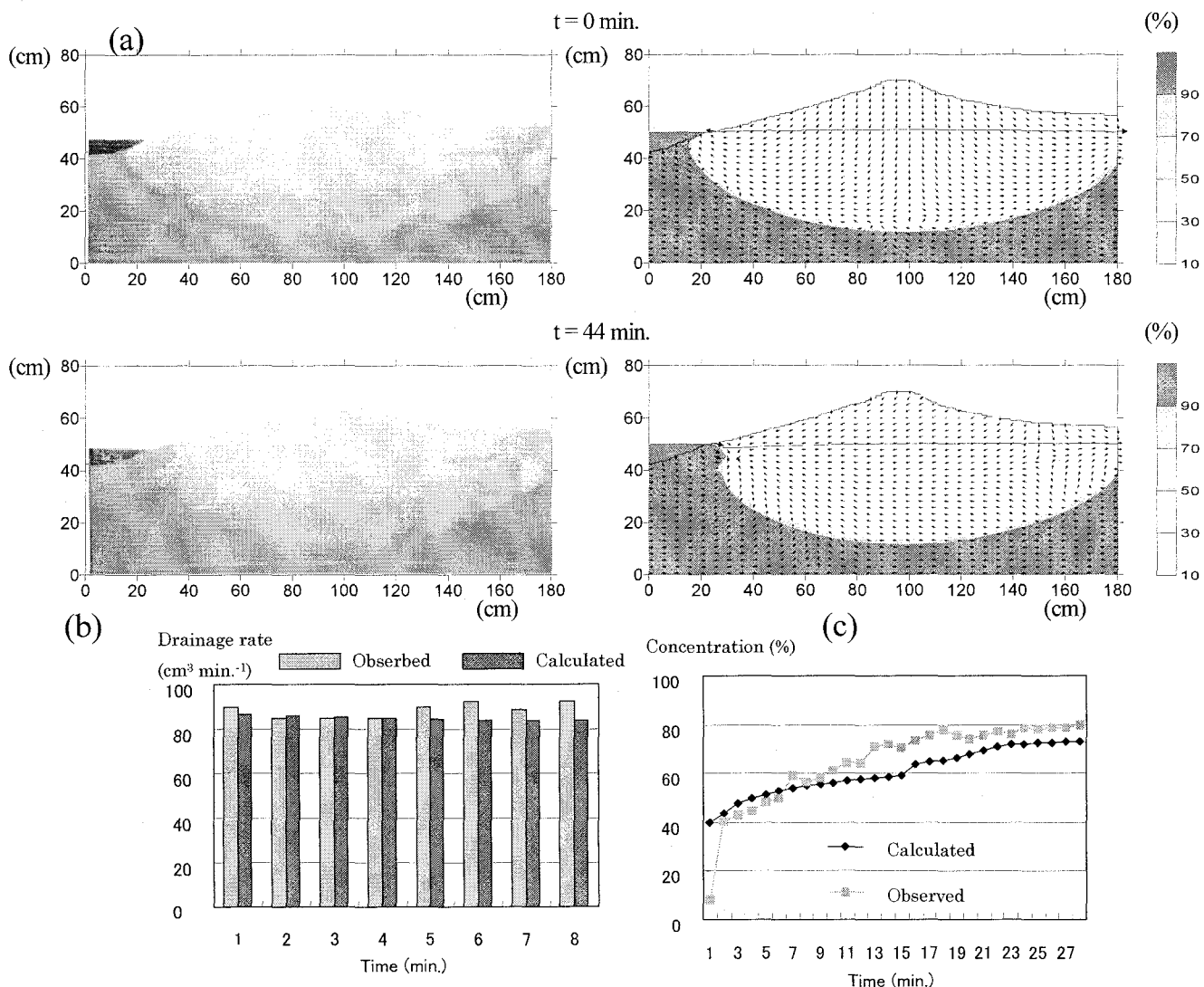


図-2 ABCの暗渠を運転して排水する場合の淡水と塩水の挙動 (a) 暗渠排水時の淡水レンズ挙動 (左：実験結果，右：数値計算結果)，(b) 暗渠からの排水量，(c) 暗渠から排水された水の塩分濃度

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha |h|)^n} \right]^m$$

$$k_r = S_e^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{2}} \right)^m \right\}^2$$

$$C_w = \frac{\alpha \cdot m (\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{2}} (1 - S_e^{\frac{1}{2}})^m}{1 - m}$$

(5)

ここで， θ_r ：残留含水率， θ_s ：飽和含水率， α ， m ， n ：定数である。

数値計算では，(1)式に加速緩和法を，(2)式には特性曲線法を用いた。数値計算方法については参考文献 9) を参照されたい。境界条件としては，下端は不透水性境界で濃度勾配無し，地表面には， 8 mm hour^{-1} の涵養量を与え，海側（左側），海底，感潮河川側（右側）では領域内向きの部分では塩水100 %の静水圧境界とし，領域外向きの部分では濃度勾配無しとした。計算条件は，室内実験と同じ条件になるように，飽和透水係数や不飽和パラメータは実験に用いた標準砂の値を採用した。

集水暗渠による排水についての数値計算は，室内実験

と同様に24ケース行った。数値計算と室内実験の結果はどのケースも良く一致した。主要なケースについてまとめると以下ようになる。

暗渠B(水頭：48.0 cm)からの排水では，塩水域は左の塩水タンク側から暗渠の上部に向かって拡がり，その後暗渠より下部の塩水域が暗渠に向かって拡がる。塩水流動については，左側の塩水境界のほぼ中央より上部から侵入した塩水は暗渠に向かい，下部から侵入した塩水は水平に侵入後に向きを逆転させて暗渠に向かう。右側の塩水境界から侵入した塩水は，暗渠に向かって帯水層の中央部まで水平に侵入し，その後徐々に向きを上向きに変えながら暗渠に向かった。淡水流動については，帯水層の左側の3/4の地表面から浸透した不飽和帯の淡水及び帯水層内の淡水はともに暗渠に向かい，残りの右側の1/4の地表面から浸透した不飽和帯の淡水と帯水層内の淡水は地下水面に沿って合流し，塩水境界に向かう。

暗渠AB(水頭：48.0 cm)からの排水では，塩水域の暗渠に向かう拡がり，B排水よりも暗渠が左の塩水タンク側に近づき排水量も大きい分だけ動水勾配が大きく

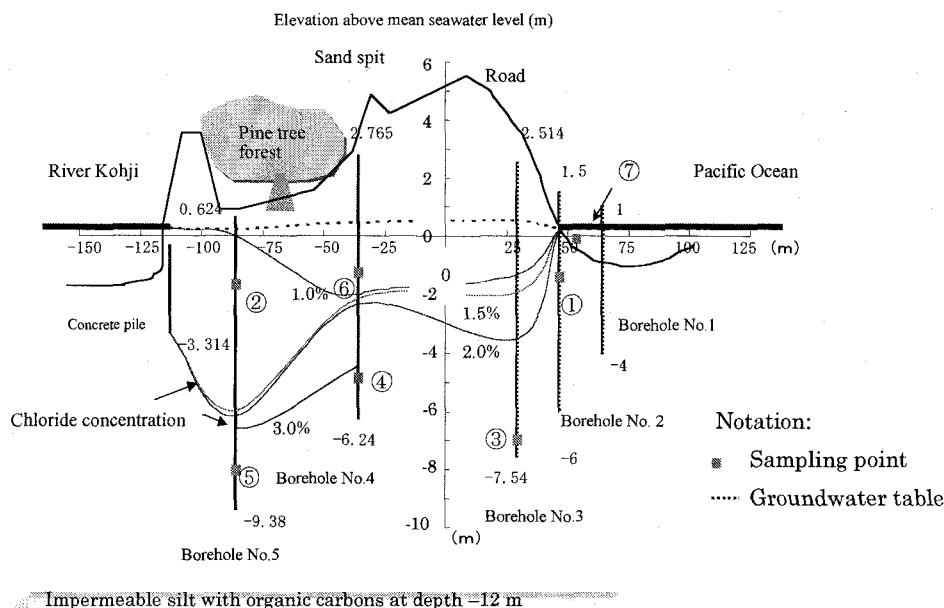


図-3 BMS試験サイトの海岸断面図

なるため、暗渠Bからの排水より速い。

暗渠BC(水頭：48.0 cm)からの排水では、塩水域の暗渠に向かう拡がり、暗渠が左の塩水タンク側より離れた分だけ動水勾配が小さいため、暗渠ABからの排水より遅い。

暗渠ABC(水頭：48.0 cm)からの排水では、上述の3種類の中で暗渠に向かう塩水域の拡がり、最も早い暗渠BCからの排水より、排水量、大きい分だけ動水勾配が大きくなり、拡がり、が速い。

暗渠DEF(水頭：47.0 cm)からの排水では、暗渠に向かう塩水域の拡がり、暗渠ABCからの排水よりも、暗渠内水頭が1 cm低下しているため、動水勾配が大きくなり、拡がり、幅および拡がり、の速度、大きい。暗渠下部の塩水侵入域の拡がり、暗渠の位置が低下したため特にABCの排水より速い。

暗渠GHI(水頭：46.0 cm)からの排水では、暗渠内水頭が最も低く、また暗渠の位置も最上段にあるため、塩水域の暗渠に向かう拡がり、幅および速度とも大きい。以上のケースでは最終的な塩水域の広がり形状および淡塩水流動はすべてB排水の場合と同様であった。

次に排水量と濃度変化については、以下になった。暗渠の設置高さ、と暗渠内水頭、が同じで、取水暗渠の個数が異なる場合は、暗渠数が多いABC、AB、BC、Bの順に排水量が増加し、濃度上昇時間が早い。暗渠数が1個の場合よりも2、3個のケースの濃度が高い。暗渠数が同じ3個で、設置高さ、と暗渠内水頭、が異なる場合は、水頭が低下するGHI、DEF、ABCの順に多い。濃度上限値もほぼ同じ順序で高い。以上の室内実験と数値計算の排水量は良く一致し、塩分濃度についても概ね一致した。

図-2は淡水レンズを形成した時点からABCより排水を実施した場合の室内実験と数値計算の結果を示す。両者は良好な一致を示している。

数値計算及び室内実験により得られた結果をまとめると、(1) 室内実験については数値計算による再現は十分可能である、(2) 排水による塩水域の拡がり方は、集水暗渠の配置によって決まる、(3) 排水された水の濃度は集水暗渠の配置数や暗渠内水頭に依存する。

3. 研究対象地域の地形・地質状況

数値計算モデルの精度は、室内実験結果との比較により確認できたので、実際のスケールでの数値計算モデルを適用した。なお、波の遡上による集水暗渠への海水の浸透、特に打ち上げ波領域における波の影響は本論文では考慮していない。図-3にBMSの試験が行われた海岸の断面図を示す。砂嘴は、多くの溶存態有機炭素を含む沖積堆積層上で形成されたものである。この堆積層は不透水層として機能している。現地では、不圧地下水面、電気伝導度、塩化物イオン濃度、潮位変動、その他の気象項目が観測されているが、No.3とNo.5では地下水位の変動が、明らかに潮位変動の影響を受けていること、No.4ではそのような影響が出ていないこと。また降雨時の地下水位の応答はいずれの観測孔においても速いことが分っている。BMS運転時の地下水位の低下は明瞭には現れていないが、現地では養浜効果と見られる砂浜の延長が確認された。

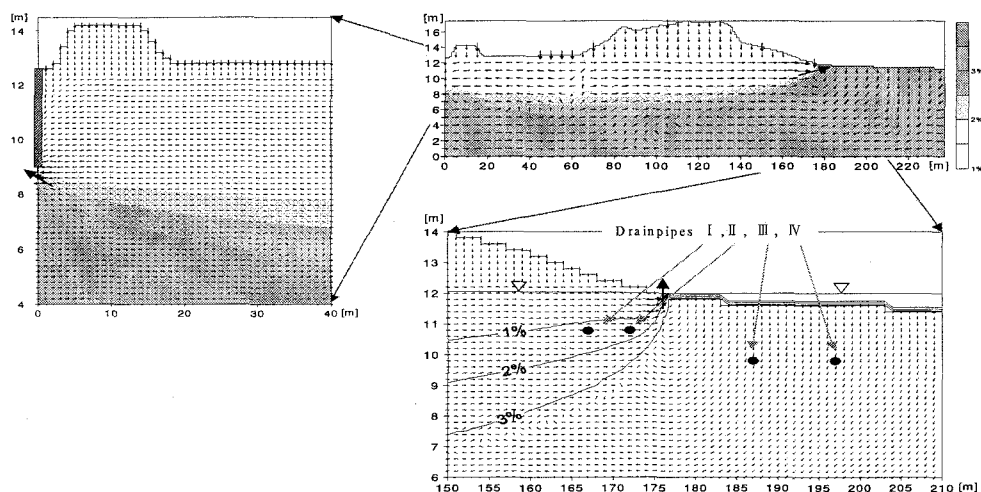


図-4 暗渠による排水前の淡塩水の定常状態

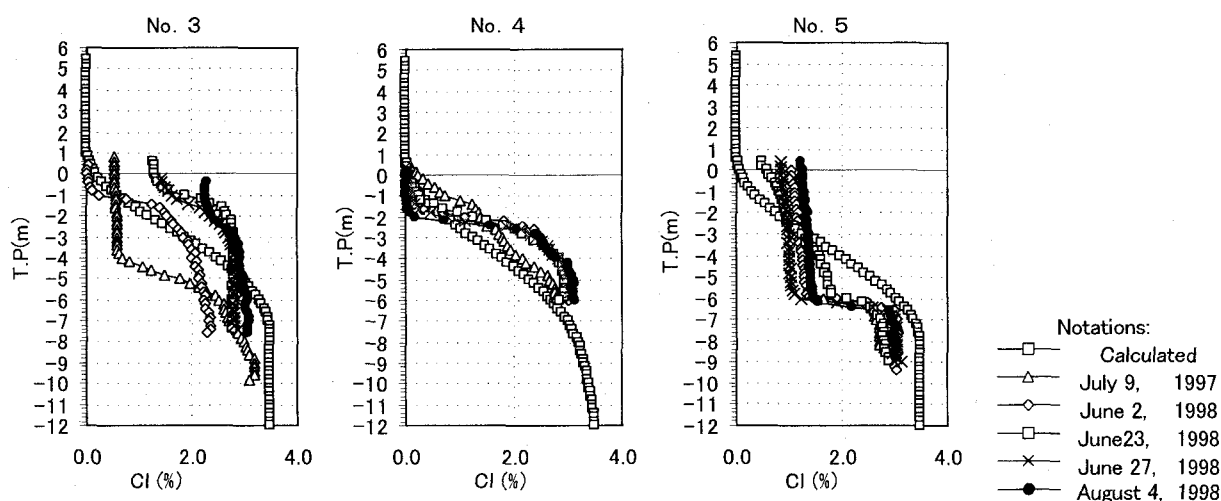


図-5 塩分濃度分布の実測値と計算値

表-1 計算条件

Permeability k (cm s ⁻¹)	3.7×10^{-2}
Longitudinal dispersivity α_L (cm)	0.36
Transversal dispersivity α_T (cm)	0.036
Grid size in x direction Δx (cm)	100
Grid size in y direction Δy (cm)	20
Unsaturated flow property for van Genuchten model	
θ_s	0.342
θ_r	0.075
α (cm ⁻¹)	0.0491
n	7.137

4. 研究対象地域に対する数値計算

表-1に計算条件を示す。飽和透水係数は、現地の砂を用いた室内透水試験により得られた値を与えた。式(5)で用いる不飽和パラメータについては、現時点ではこれに関するデータを得られていないため、一般的な砂質土に

関する不飽和パラメータを用いた。地表面における境界条件としては、現地における実際の降雨量と蒸発量を考慮し、 2 mm day^{-1} を一定値として与えた。潮位に関しては平均海水面を与えた。BMS運転時の集水暗渠中の水頭は、4つの暗渠からの排水量が実測値に一致するように定めた。図-4は暗渠による排水を開始する前の定常状態における流れの様子と濃度分布を示している。図の左側の感潮河川側(左側)も塩水境界としているので、矢板の下部を迂回して帯水層への塩水の侵入が起こり、淡水レンズが形成されている。また地表面への涵養により、不飽和帯での鉛直方向の移動が見られる。図-5は観測井戸における塩分濃度の鉛直分布を示している。混合域中の鉛直変動を除けば、計算結果は概ね一致している。No.3とNo.5で観測された地下水面における塩化物イオン濃度は、No.4における実測値と計算値と比較して高い。これは、強風時にはNo.3とNo.5の観測井戸は波しぶきの影響を受けており、海水が直接地下に浸透するためと考えられる。一方、現地の地形のため前者に比べて波しぶ

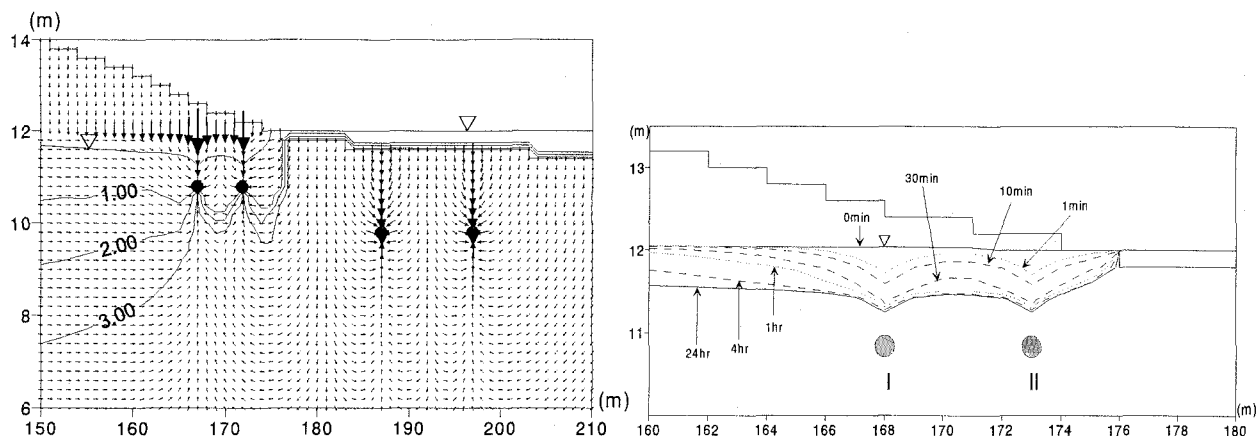


図-6 BMS運転時の塩分濃度分布と不飽和領域の形成過程 (左: 取水開始24時間後, 右: 海底取水管近傍の地下水位変動)

きの影響をあまり受けないと考えられるNo.4の観測井戸においては、計算値は実測値に概ね一致している。ここでの計算の目的は、淡水レンズの形成されることの確認を行うことであり、図-5の結果の一致度を上げるためには、現地における蒸発散や水収支評価を行うことや、地層の詳細な水理地質特性を把握しなければならないと考えている。図-6は数値計算によって得られたBMSの運転開始から24時間後の濃度分布と流れの様子、および地下水位の変動を示したものである。塩分濃度分布からは、海側の暗渠には海水のみが、陸側の2本の暗渠には淡水と塩水の混合水が流入している様子が分る。地下水位の変動過程を見ると、ほぼ24時間程度で波打ち際から15 m程度の範囲で、地下水面が50 cm程度低下していること、不飽和領域の形成域が拡大していく様子が分る。

5. おわりに

室内実験および現地に対する数値解析結果により、汀線近傍での排水による帯水層中の流れと濃度分布の予測が可能であることが示された。より現実的な状況を再現するには、境界条件や水理地質条件を詳細に考慮する必要があるが、本論文で示す計算モデルはこれに十分に対応可能である。一方、集水暗渠により排水された水を近接水域へ排水する場合の環境上の問題、後背地において排水を熱源や他用途に利用する場合に、排水の水質に関して検討しておくことが重要となるため、対象地域で排水される水の地球化学的検討を行っている。帯水層中での塩水の化学的組成は地域の地質環境によって大きく異なることが想定されるので、塩水侵入の解析のためには、水理学的な解析のみならず地球化学的な検討が重要であると考えられ¹⁰⁾、本件については別途報告する予定である。

謝辞: 現場データ引用の許可をいただいた、財団法人土木研究センターおよび同センター主催の「南九十九里浜海岸検討委員会」委員各位に謝意を表します。本研究に対し有益な助言を頂いたスウェーデンLund大学のMagnus Larson博士に謝意を表します。本研究の実験・

解析の遂行にあたり、当時九州大学大学院生 大串昌宏君と当時九州産業大学大学院生 西原純平君の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤道朗, 福島正寛, 西隆一郎, 福永雅彦: Coastal Drainによる漂砂帯の流況変化と断面変化について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.716-720, 1995.
- 2) 塩見雅樹, 戸引勲, 松川文彦, 津川昭博, 長谷川巖: 透水層埋設による海浜安定化効果の定量的評価, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.721-725, 1995.
- 3) 柳嶋慎一, 加藤一正, 天坂勇治, 名城整, 望月徳雄: 現地海岸に埋設した透水層の排水流量と前浜地形変化, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.726-730, 1995.
- 4) 佐藤勝弘, Pena-Santana, P.G., 金圭漢, 竹内聖一: 透水層埋設による前浜付近の波浪, 浸透流予測計算, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.731-735, 1995.
- 5) 佐藤勝弘, 妻夫木一秀, 野口雄二, 岩佐直人: 透水層埋設による地下水位低下に関する3次元予測計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.656-660, 1996.
- 6) 柳嶋慎一, 金澤寛, 平井宣典, 加藤一正, 望月徳雄: ストライプ状透水層の前浜地形変化に及ぼす三次元的効果, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.661-665, 1996.
- 7) 柳嶋慎一, 加藤一正, 中官利之, 金澤寛, 原田久志: 現地海岸に埋設した透水層の海水浄化効果, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1171-1175, 1997.
- 8) Huyakorn, P. S. and Pinder, G. F.: *Computation method in subsurface flow*, Academic Press, New York, 1983.
- 9) 神野健二編著: 地下水中の物質輸送数値解析, 九州大学出版会, 2001.
- 10) Hiroshiro, Y., Jinno, K., Wada, S-I, Yokoyama, T, and Kubota, M.: Multicomponent solute transport model with cation exchange in a redox subsurface environment, *Calibration and reliability in Groundwater Modeling*, IAHS Publ. No. 265, pp.474-480, 2000.

(2001. 10. 1受付)