

潮汐による干潟の地下浸透流および塩分応答の解析

名古屋工業大学 学生員○永田 誠一

名古屋工業大学 正会員 喜岡 渉

カリフォルニア大学 Rodney J. Sobey

1. はじめに

干潟が有する水質および生態系に対する環境保全機能に着目して、干潟の保全や人工干潟の造成が行われるようになった。そのためには干潟生物の生息環境、生態系を含む物質循環等に関する基礎的知見の取得をはかるほか、干潟の水環境を定量的に検討しておく必要がある。特に、潟土中の浸透流や塩分濃度特性は、生物の生息環境やヨシなどのリビングフィルターの植栽にも直接影響を与えるので、干潟の環境特性を検討する上で重要な要素である。現地観測により、干潟の地下水面は平均海面より高く、また局所的に塩分の高濃度域が存在することが明らかにされているが、これらの応答特性には潮汐のほか降雨、蒸発等が密接に係っていることから、十分な精度で水環境の変動を予測するためには現地データの蓄積に加えて理論モデルによる検討が不可欠である。本研究は、干潟の水理環境に対する新たなモデル方程式を提案し、その数値シミュレーションを通じて浸透流や塩分濃度に及ぼす干潟、降雨、蒸発、拡散等の影響を調べようとするものである。

2. モデル方程式

均質な土壌における飽和・不飽和浸透流に対しては、不飽和領域に拡張されたダルシー則の式と連続式を組み合わせたリチャーズの式が適用できる（谷, 1982）。しかし、リチャーズ式では塩分による浸透ポテンシャルの変化は考慮されるが、塩分濃度と圧力ポテンシャル変動に伴う圧縮性の影響は考慮されていないため、ここでは次の密度変化を含めた（拡張された）リチャーズ式(1)と塩分に関する移流分散方程式(2)を用いた（Greenblatt・Sobey, 1999）。

$$\left(\theta \frac{\partial \rho}{\partial h} + \rho c \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$\rho \theta \frac{\partial s}{\partial t} - \rho K_x \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial s}{\partial x} - \rho K_y \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial s}{\partial y} - \rho K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta E \frac{\partial (\rho s)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\theta E \frac{\partial (\rho s)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta E \frac{\partial (\rho s)}{\partial z} \right] \quad (2)$$

ここに、 θ は含水率、 ρ は流体密度、 s は塩分濃度(psu)、 h は圧力水頭、 K_x, K_y, K_z はそれぞれx, y, z方向の透水係数、 E は拡散係数を表し、 $c(h) = \partial \theta / \partial h$ である。密度 $\rho(h, s)$ は国際海水状態方程式より求め、不飽和状態における含水率および透水係数と圧力水頭の関係式としては、van Genuchten (1980)による次の式を用いた。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (-ah)^n \right]^m + \theta_r, \quad h < 0 \quad (3)$$

$$K(h) = K_s \left[1 - (-ah)^{n-1} \left(1 + (-ah)^n \right)^m \right]^2, \quad h < 0 \quad (4)$$

ただし、 $m = 1 - 1/n$ で、 θ_s, K_s はそれぞれ $h \geq 0$ の飽和含水率、飽和透水係数を示す。なお、含水率と圧力水頭の関係におけるヒストリシスの影響は小さいとして無視した。

リチャード方程式には、式(1)左辺の圧縮性 $\partial \rho / \partial h$ 、 $\partial \rho / \partial s$ がかかる項が省略されているが、干潟の浸透流を解析する上ではこれらの項は無視できない。干潟を粘土（平均的な含水率 $\theta_0 = 0.50$ ）～砂質（ $\theta_0 = 0.38$ ）とみなし、水頭と塩分の変動幅をそれぞれ100cm、60psuと仮定すると、このときの $\partial \rho / \partial s$ の項は1オーダー、 $\partial \rho / \partial h$ の項は2オーダーそれぞれ $\rho c (\partial h / \partial t)$ より大きく、非圧縮性の項は含水変動の影響に対して2次的ではない。

3. 計算結果と考察

潮汐等による圧力水頭と塩分濃度の変動特性を調べるため、図-1に示すような断面

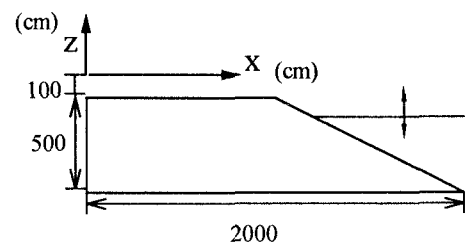


図-1 干潟の断面図

地形に対しモデル方程式(1), (2)を適用して, 数値シミュレーションを実施した. 数値計算は差分法によった. 土質パラメーターは, 現地データを参考に $n=2$, $\alpha=0.02\text{cm}^{-1}$, $\theta_s=0.45$, $\theta_r=0.2$, $K_s=0.4\text{cm/hr}$ とし, $E=5\times10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$ を採用した. 透水係数は実際の干潟の流動特性を考慮し, $K_x=1.5K_s$, $K_z=0.5K_s$ とした. 境界条件については, 陸上部境界 ($x=0$) で流入流量 $q=5.8\times10^{-9}\text{cm/s}$, 塩分 $s=35\text{psu}$, 底面で $q=0$, $s=35\text{psu}$, 大気に接する上面では流出 (蒸発) 流量 $q=4.6\times10^6\text{cm/s}$, 斜面部分では振幅 50cm , 周期 12.5hr の潮位変動を与えた. 上面と斜面部境界における塩分濃度 s は移流拡散方程式により求める. 初期条件としては, 全領域で静水圧と一様な塩分濃度 $s=35\text{psu}$ を与えた. 計算開始後 3, 6, 12hr における飽和水面 ($h=0$) と塩分分布の変動をそれぞれ図-2, 図-3に示す. 地下水面の位置は潮汐変動の影響を受ける斜面近傍を除いて高潮面ではほぼ安定しており, また塩分濃度は蒸発の影響を受ける上面と斜面上部で高くなっている. 塩分濃度分布についても潮汐変動の影響を受ける斜面近傍を除くとほぼ一様で変動幅は小さい.

4. おわりに 計算条件を変化させて圧力と塩分の変動特性を調べた結果, 潮汐変動の影響は非常に局所的で, 陸上側の潟土での変動は蒸発と浸透の鉛直 1 次元応答により支配されることがわかった. また, 蒸発は塩分濃度を上昇させ飽和面を下げるように働くが, 潮汐による浸透の影響の方が大きく, このバランスが水面を平均海面より高い位置に維持していること, 拡散は塩分分布にあまり大きく影響しないこと等が明らかになった.

参考文献

谷 試(1982): 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.
Greenblatt, M. S. and R. J. Sobey (1999): Subsurface flow and Salinity response patters in a tidal wetland marsh plain, *J. Coastal Research* (in printing).
van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, Vol.44, pp.892-898.

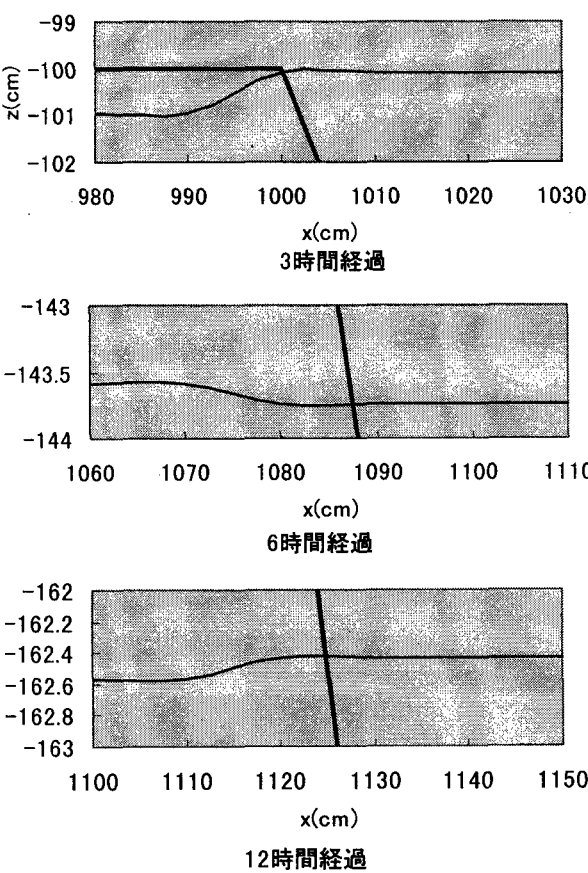


図-2 地下水位の分布

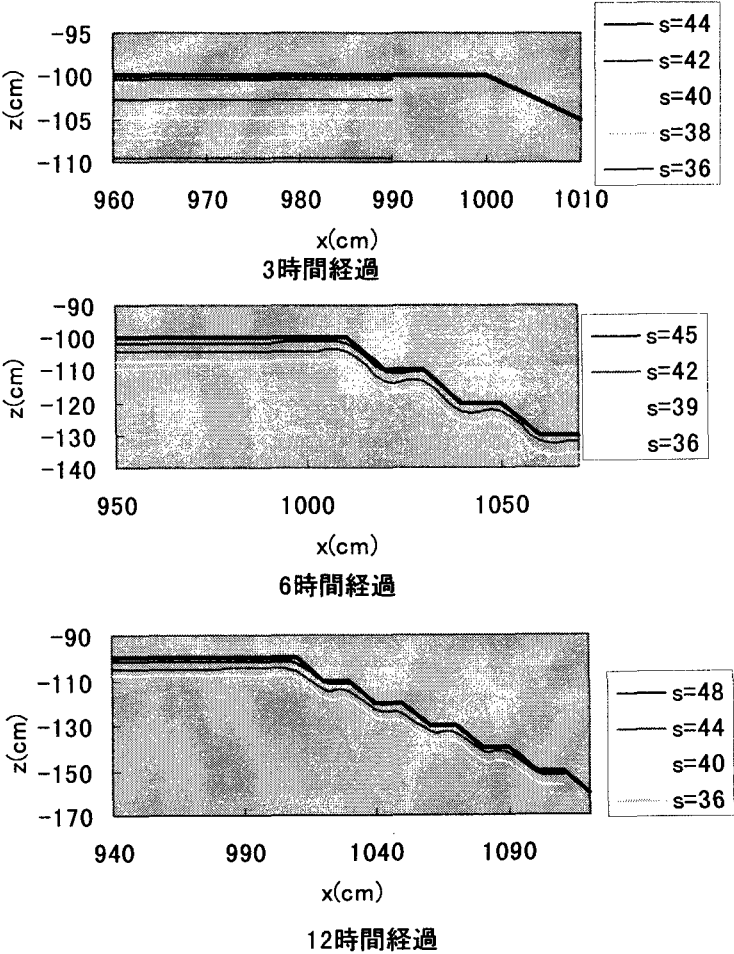


図-3 塩分濃度分布