

沿岸域帯水層における淡水と塩水の 滞留時間の推定とその特性

ESTIMATION OF RESIDENCE TIME OF FRESH WATER AND SALT WATER IN COASTAL AQUIFERS AND THEIR CHARACTERISTICS

中村陽介¹・細川土佐男²・神野健二³・岩満公正⁴

Yousuke NAKAMURA, Tosao HOSOKAWA, Kenji JINNO, Kousei IWAMITU

¹ 学生員 九州産業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 修士課程 (〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1)

² 正会員 工博 九州産業大学教授 都市基盤デザイン工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1)

³ 正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁴ 正会員 九州産業大学副手 都市基盤デザイン工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1)

The seawater intrusion in coastal aquifers has long been attracting attention of researchers for the management of coastal water resource and environmental protection. As the saltwater intrudes into the freshwater aquifers, the quality of salt groundwater will depend on the length of its residence time in aquifers and the geo-chemical composition of the aquifer material. This paper presents the estimation of residence time of freshwater and saltwater in the coastal aquifers and their characteristics. This study utilized the data from the borehole taken from Saitozaki, Fukuoka City. The method of stream function was applied in evaluating the residence time both in the saltwater and freshwater. It was found out that the residence time at saltwater region is longer than that in the freshwater region.

Key Words: field experiment, castal aquifer, salt water intrusion, residence time
numerical calculation

1. はじめに

沿岸域の帯水層においては陸側から海側に向かって淡水が流動し、その下に海側から陸側に向かって非常に遅い速度で塩水が侵入している。このような帯水層に有機物が含まれている場合には、千葉県長生村での実測、あるいは米国ジョージア州の Spelo 島での報告にも見られるように、比較的流動速度が速く溶存酸素濃度が高い淡水域に比べて、淡塩境界面より下の塩水域ではその長い滞留時間のために塩水は還元状態になっている^{1), 2)}。この還元状態にある海水を井戸から取水し海水淡水化プラントの水源とする場合には還元状態の水が酸化され処理膜で目詰まりを、あるいは、酸化・還元状態の異なる淡水と海水が淡塩境界近傍で混合される場合には、2価鉄イオン Fe^{2+} が酸化されて水和酸化物として沈殿することが予測される。このような系の数値解析モデルを構築するためには、2価鉄イオン Fe^{2+} と溶存酸素の輸送過程を考慮するとともに地

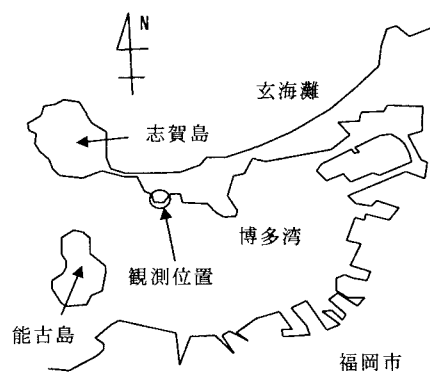


図-1 現地の観測位置

下水の滞留時間の特性を把握しておくことが必要になる。

本研究では、沿岸域の帯水層における淡水と塩水の滞留時間を推定する方法を提案し、本推定方法より求めた現地の沿岸域帯水層の淡水と塩水の滞留時間とその特性について検討を行った。

2. 現地観測の概要

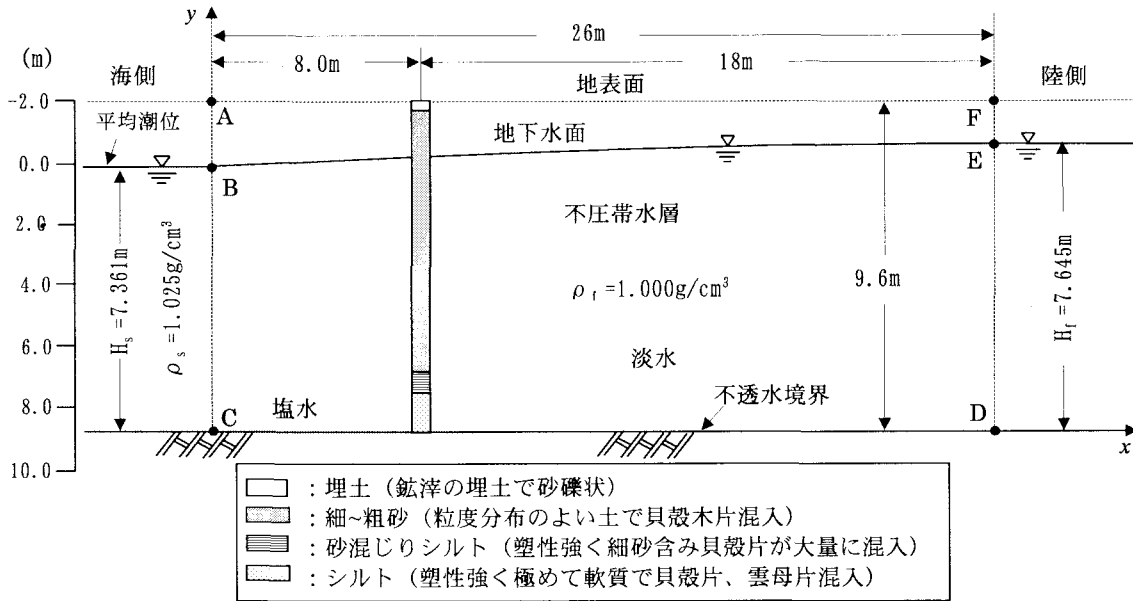


図-2 現地帯水層の概略

観測位置は、図-1 に示す福岡市の中心部より博多湾を隔てた北側の福岡市西戸崎海岸である。図-2 には、現地の沿岸不圧帯水層の概略を示している。濃度分布の観測は平均潮位の汀線から $x=8.0\text{m}$ 、水位の観測は $x=26.0\text{m}$ の位置に掘削されたボーリング孔により行なった。地盤は地表面より深さ 9.6m までは貝殻木片等が混入しているが一般的な砂層地盤と考えられ、地表面から約 9.6m 以深では、シルト層となり透水性が極めて小さい難透水層と考えられ、この位置を後の数値計算では不透水境界としている。

3. 滞留時間の推定式

(1) 淡塩二層流の混合計算の基礎式^{(3), (4)}

a) 圧力水頭

2次元不飽和-飽和領域における圧力水頭に関する基礎式は、図-3 のように水平に x 軸、鉛直上向きに y 軸をとると次式で示される。

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

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

$$v = -k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \quad (3)$$

ここに、 c_w : 比水分容量、 S_s : 比貯留係数、 h : 圧力水頭、 t : 時間、 k : 透水係数、 u 、 v : x 、 y 方向の Darcy 流速、 ρ : 流体密度、 ρ_f : 淡水密度、 α_0 はダミー変数

で不飽和領域では $\alpha_0=0$ 、飽和領域では $\alpha_0=1$ である。

b) 塩分濃度

塩分濃度に関する基礎式は、次式に示す 2 次元移流分散方程式である。

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u' \frac{\partial C}{\partial x} + v' \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right. \\ \left. + \theta D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 θ : 体積含水率、 C : 塩分濃度、 u' 、 v' は x 、 y 方向の実流速で、式(2)、(3)の Darcy 流速 u 、 v との間には、 $u'=u/\theta$ 、 $v'=v/\theta$ の関係がある。

D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yx} 、 D_{yy} は分散係数で、次式のように流速依存型の分散と分子拡散係数の和で表される。

$$D_{xx} = \frac{\alpha_L u'^2}{V} + \frac{\alpha_T v'^2}{V} + D_M \quad (5)$$

$$D_{yy} = \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + D_M \quad (6)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) u' v'}{V} \quad (7)$$

ここに、 α_L : 縦方向分散長、 α_T : 横方向分散長、 $V=(u'^2 + v'^2)$ 、 D_M : 浸透層内での分子拡散係数である。式(4)の塩分濃度 C と式(3)の流体密度 ρ との間には次の関係がある。

$$C = \frac{100(\rho - \rho_f)}{(\rho_s - \rho_f)} \quad (8)$$

ここに, ρ_s : 塩水密度, 濃度 C は%表示である.

(2) 流れ関数 Ψ の算定式⁵⁾

2次元の浸透流においては,

$$\Phi = k(h + y) \quad (9)$$

で与えられる速度ポテンシャル Φ と共役な流れ関数 Ψ を導入することにより,

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (10)$$

$$v = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (11)$$

からなる Cauchy-Riemann の条件が成り立つ. いま, Ψ の全微分は,

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy \quad (12)$$

で示されるから, 式(10), (11)を式(12)に適用すると,

$$d\Psi = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} dx + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dy \quad (13)$$

が得られる. これに対応する Ψ は,

x 一定にそって

$$\Psi = \Psi_L + \int_{y_L}^y \frac{\partial \Phi}{\partial x} dy \quad (14)$$

y 一定にそって

$$\Psi = \Psi_L - \int_{x_L}^x \frac{\partial \Phi}{\partial y} dx \quad (15)$$

によって求めることができる. ここに, x_L , y_L はそれぞれの積分の下限, Ψ_L はそれぞれの積分の下限における Ψ の値である.

4. 滞留時間の推定

(1) 圧力水頭と塩分濃度の数値計算

式(1)の圧力水頭 h の数値計算は, 陰形式の差分スキームに反復法を用いて行なった. 式(4)の塩分濃度の数値計算は, 移流項の離散化誤差がなく, 数値解の精度がよいことが確認されている特性曲線法を適用して行なった. なお, 本研究では沿岸域帯水層における塩水侵入の定常状態の算定を行なうものであり, ある初期条件の下で非定常過程を数値計算して塩分濃度と流速分布の両者に時間的な変化が認められない状態を定常状態とした.

表-1 には, 数値計算に適用した図-2 に示す計算領域 ABCDEF の各境界における圧力水頭と塩分濃度に関する境界条件を具体的に示している. なお, 定常状態の塩分濃度と流速分布を求めるため地表面上の境界 AF は, 降水量を考慮せず不透水境界として取り扱った. また不飽和浸透特性式には, Van Genuchten が提案した式(16)~(18)⁶⁾を適用した. 表-2 には, これらの特性式中のパラメータ α , m , n と他の計算条件を示している.

表-1 境界条件

境界	圧力水頭	塩分濃度
AB EF	不透水境界 $\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0$	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$
BC	静水圧境界 $h_b = (H_s - y) \frac{\rho_s}{\rho_f}$	$u' \geq 0$ $C_b = 100 \%$ $u' < 0$ $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$
DE	静水圧境界 $h_b = H_f - y$	淡水境界 $C_b = 0\%$
CD	不透水境界 $-k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) = 0$	$\frac{\partial C}{\partial y} = 0$
AF	不透水境界 $-k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) = 0$	$\frac{\partial C}{\partial y} = 0$

表-2 計算条件

残留含水率 θ_r	0.075
飽和含水率 θ_s	0.342
不飽和パラメータ α (cm ⁻¹)	0.0491
不飽和パラメータ m	0.860
不飽和パラメータ n	7.138
縦方向分散係数 α_L (cm)	3.6
横方向分散係数 α_T (cm)	0.36
飽和透水係数 K_S (cm/s)	0.02
x 方向の格子間隔 Δx (cm)	13.0
y 方向の格子間隔 Δy (cm)	7.5
反復法の収束判定基準値 (cm)	10^{-5}
分子拡散係数 D_M (cm ² /s)	10^{-5}

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad \Theta = \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right\}^m \quad (16)$$

$$k_r = \Theta^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{m}})^m \right\}^2 \quad (17)$$

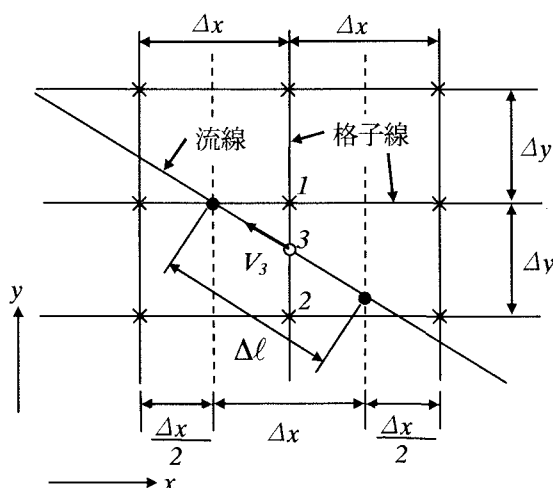


図-3 滞留時間の計算

$$c_w = \frac{\alpha m (\theta_s - \theta_r) \theta^m (1 - \theta^m)^m}{1 - m} \quad (18)$$

(2) 滞留時間の推定方法

流線は、ある瞬間におけるその点の水粒子の速度方向を示すだけで、水粒子の動いた経過を示すものではない。しかし本研究では流れの状態が式(10)を満たす時間的に変化しない定常状態としているため、流線と水粒子が通った軌跡を示す流跡線とは一致する。そこで、水粒子が流線上を通過するに要する時間を滞留時間とし、次の手順により求めた。なお、塩分濃度が $C=100\%$ の領域を塩水域、塩分濃度が $C=0\%$ の領域を淡水域および塩分濃度が $0 < C < 100\%$ の領域を混合域とし、混合域では、任意の等濃度線上を通過するに要する時間を滞留時間とした。

- 淡水二相流の混合計算により式(1)～(8)を満たす圧力水頭 h 、塩分濃度 C を求める。
- 得られた格子点上の圧力水頭を用いて式(14)、(15)から淡水域と塩水域における流れ関数 ψ を算定する。
- 算定された流れ関数 ψ に基づいて、淡水域と塩水域のそれぞれの領域の流線を描く。
- 図-3 に示しているように、 y 方向の格子線と流線が交差する点3の合成流速 V_3 を上下の格子点1、2の合成流速から内挿し、この合成流速 V_3 で流線の区間 $\Delta \ell$ を水粒子が移動するとして時間を算定する。順次、区間 $\Delta \ell$ の滞留時間を算定して累計し、出発点から任意点までの滞留時間を求める。
- 塩水域では帯水層の左側の塩水境界を出発した塩水粒子が混合域に達するまでの流線上の滞留時間を求める。
- 淡水域では、帯水層の右側の淡水境界を出発した淡水粒子が混合域の手前で向きを変えて帯水層の左側の塩水境界に達するまでの流線上の滞留時間を求める。
- 混合域では、水粒子が帯水層の下部の不透水境界上

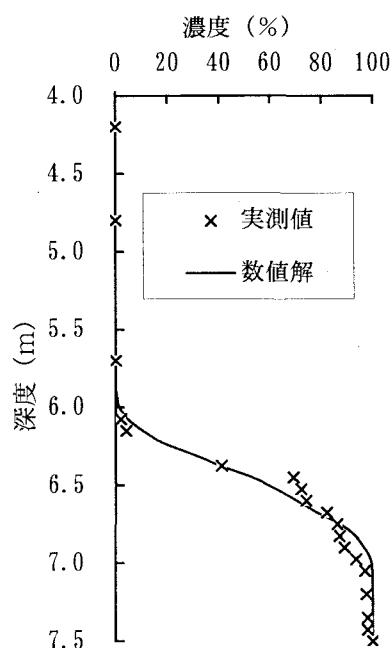


図-4 鉛直濃度分布

から任意の等濃度線上を通過して帯水層の海側境界に達するまでの滞留時間を求めた。

5. 推定結果および考察

(1) 淡塩二層流の混合計算の結果

図-4 には、流れの場が定常になった場合の鉛直塩分濃度分布の実測値を×印で、数値解を実線で示している。数値解は実測値をよく表しているといえよう。

図-5 には、塩分濃度が 10%、50%および 90%の等濃度線の数値解を実線で示し、数値解による流況を矢印で示している。図から 90%等濃度線より下の塩水域では、塩水がほぼ水平に海側から淡水側に向かって非常に遅い速度で輸送され、濃度が 10%～90%の領域においては輸送された塩水が淡水流に乗って流れの向きをかえ再び海側にもどっている。なお、淡水域では、淡水は陸側から海側にほぼ水平に流動した後、流れの向きを変え濃度が 10%～90%の領域にそって海側に流出している。

(2) 滞留時間の推定結果

図-6 には、淡水域の流線上の滞留時間の算定位置を×印で、塩水域のそれを■で、塩分濃度が 10%と 90%の等濃度線に沿ったそれを◎印で示している。また、これらの算定位置の近傍には、推定した滞留時間の日数を示している。

淡水域では、不透水境界上の右端の淡水境界を出発した淡水粒子が不透水境界上を海側に向かって移動し、約 1440cm 先の混合域の手前に達するのに 116 日要している。さらに不透水境界上から 10%等濃度線にほぼ平行な流線上を約 1400cm 先の塩水境界に達するのに要

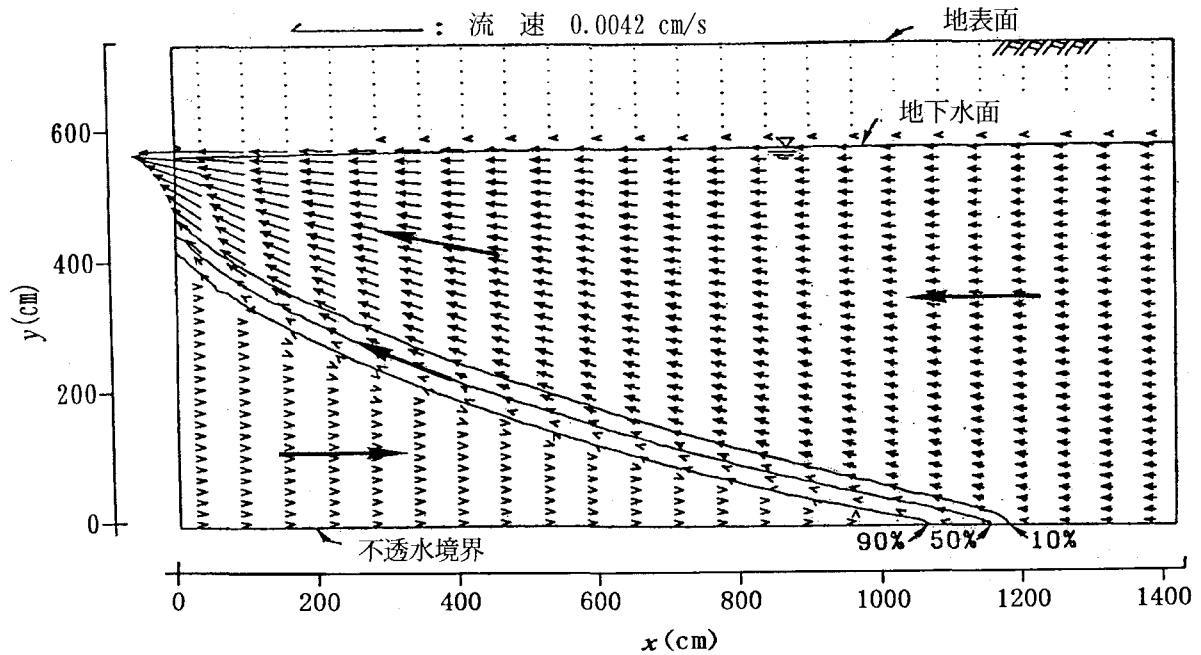


図-5 流速ベクトル分布と濃度分布

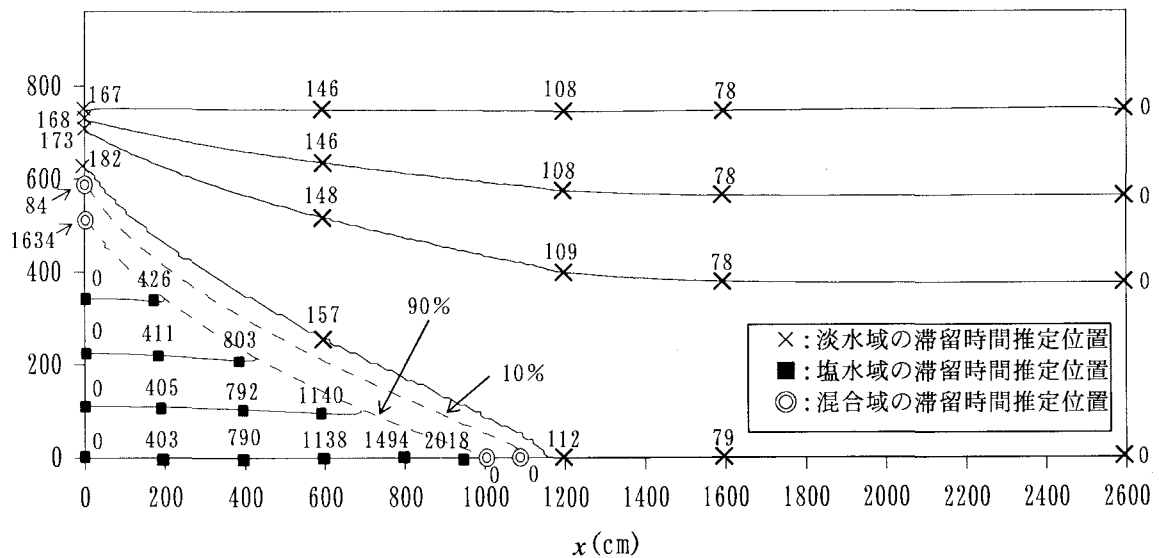


図-6 滞留時間の推定結果

する日数は66日で、累計すると淡水境界から塩水境界までの約2840cmを移動するのに182日要している。また、淡水境界の淡水位あたりを出発した淡水粒子が海側に向かって地下水面近傍を移動し、約2600cm先の塩水境界に達するのに167日要している。

塩水域では、塩水境界を出発した塩水粒子が淡水域に向かってほぼ水平に移動している。塩水境界から不透水境界上を約958cm先の混合域の手前まで移動するのに2018日要している。塩水域の滞留時間は、深度が深くなるほど、あるいは混合域に近づくにつれて短くなっている。

混合域では、水粒子が不透水境界上から塩水境界まで、90%等濃度線上を約1200cm移動する場合には1634

日、10%等濃度線上を約1322cm移動する場合には84日要している。

淡水域の100cm当たりの滞留時間は、混合域から陸側では約7.8日、混合域より上では約4.9日である。塩水域の100cm当たりの滞留時間は、下部で約211日、上部で約213日である。また、淡水域の下部の淡水境界から塩水境界までの滞留時間は約182日、塩水域の下部の塩水境界から混合域の90%等濃度線を経由し塩水境界に戻る滞留時間は約3652日である。これらを比較すると塩水域が淡水域の約20倍になっている。このことから塩水域の流動時間が淡水域よりも非常に長くなっているといえる。

6. 結論

本報では、沿岸域の帯水層における淡水と塩水の滞留時間の推定方法を提案し、現地の沿岸域帯水層に適用し推定した滞留時間とその特性について検討を行った。その結果、以下に示すことが得られた。

- (1) 著者らが検討を行ってきた淡塩二層流の混合計算モデルを利用し、滞留時間を推定する方法を示した。
- (2) 淡水域の淡水境界から塩水境界までの最上部の滞留時間は167日、最下部のそれは182日となった。
- (3) 塩水域の塩水境界から約958cm先の混合域の手前までの最下部の滞留時間は2018日となった。また塩水域の滞留時間は、深度が深くなるほど、あるいは混合域に近づくほど短くなった。
- (4) 混合域の90%等濃度線上における滞留時間は1634日、10%等濃度線上のそれは84日となった。
- (5) 淡水域の100cm当たりの滞留時間は、混合域から陸側では約7.8日、混合域より上では約4.9日となった。塩水域の100cm当たりの滞留時間は、下部で約211日、上部で約213日となった。
- (6) 淡水域の下部の淡水境界から塩水境界までの滞留時間は約182日、塩水域の下部の塩水境界から混合域の90%等濃度線を経由し塩水境界に戻る滞留時間は約3652日で、両者を比較すると塩水域が淡水域の約20倍となった。

以上のように、塩水域の滞留時間は淡水域の滞留時間に比べ20倍程度も長いことから同じ帯水層にあっても塩水域と淡水域の水質は、塩分濃度のみならず酸化還元状態などかなり異なることが予想された。このような酸化還元状態の相違が前掲の参考文型1)および2)の報告に見られる現象に関連するものと考えられ、今後は種々の化学種の輸送過程のモデル化を目指したい。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、フジコンサルタント(株)の堤敦氏、九州大学大学院環境システム工学専攻博士課程のゲラギンギン氏にご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 広城吉成、神野健二、佐伯和利、池見洋明、呉潤根、松岡信明、岡村正紀、田籠久也：塩水化地下水の地球化学的水質特性-韓国・済州島、千葉県長生村、福岡県津屋崎町、福岡市西区元岡-、地下水学会誌、第44巻第3号、pp.227-238, 2002.
- 2) Snyder, M., Taillefert, M.T., Ruppel, C.: Redox zonation at the saline-influenced boundaries of a permeable surficial aquifer: effects of physical forcing on the biogeochemical cycling of iron and manganese, *Journal of Hydrology*, 296, pp.164-178, 2004.
- 3) 細川土佐男、神野健二、粕井和郎：現地ボーリング孔内の塩分濃度実測値に基づく横方向分散定数の推定と数値シミュレーション、水工学論文集第36巻、pp.423-428, 1992.
- 4) 神野健二、粕井和郎、藤野和徳、中川啓、細川土佐男、江

種伸之、広城吉成：地下水中の物質輸送数値解析、九州大学出版会、2001.

- 5) 崎山正常、青柳茂敏、阿部孝行、細川土佐男：河口貯水池下部地層への淡水注入による塩水排除について、土木学会論文報告集、第268号、pp.75-90, 1977.
- 6) Van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.382-384, 1985.

(2004.9.30 受付)