

被圧帯水層における塩水混合域の分散特性に関する実験及び数値解析による検討
Experimental and Numerical Study on Dispersion Properties of
Salt Water Mixing Zone in a Confined Aquifer

九州産業大学工学部	細 川 土 佐 男	Tosao	HOSOKAWA
九州大学工学部	舩 井 和 朗	Kazuro	MOMII
九州大学工学部	神 野 健 二	Kenji	JINNO
九州大学工学部	上 田 年 比 古	Toshihiko	UEDA
九州大学大学院	伊 藤 敏 朗	Toshiaki	ITOH

This study presents the experimental and numerical results on the dispersion properties at the salt water mixing zone in a confined aquifer. The method of shifting particles and the implicit finite difference method are applied to the numerical computations of the convective-dispersion and the seepage flow equations. The salt concentration distribution and the seaward flow rate of fresh water obtained by the present numerical method are in good agreement with those by the laboratory experiment. It is shown that the mixing zone spreads wider towards the fresh water effluence at the steady state. At the unsteady state of salt water intrusion, it is also shown that the stagnation point of flow appears in the fresh water region and that the large dispersion takes place at the tip of the salt water wedge when the salt water advances.

Keywords: salt water intrusion, dispersion, laboratory experiment, numerical calculation, subsurface dam

1. はじめに

近年、離島や沿岸地域における水不足を補うために、各地で地下ダムが検討・実施されている。海岸帯水層に築造される場合、地下ダムの維持管理を行う上で、地下水の塩水化は十分考慮されねばならない問題である。ところで塩水化をシミュレーションする方法として、従来から分散を考慮した数多くの地下密度流解析が行われているが¹⁾、計算精度の妥当性を室内実験結果により比較検討したものはほとんどない。極端な場合には分散長は、水理学的意義とは無関係に計算の安定性を確保するために適当に仮定され、得られた濃度分布の数値解には、物理的には考え難い分散が見られることもある。本論文では、被圧帯水層における塩水域の定常および非定常侵入・分散に関する室内実験を行い、塩水混合域の混合のメカニズム特性について詳細に検討し、併せて、著者らが従来より用いている地下密度流の数値解析法の精度についても検討を加えている。

2. 室内実験

(1) 実験装置

図-1に実験に用いた装置の概略を示している。実験水槽は長さ120cm、幅8cm、高さ60cmの透明塩

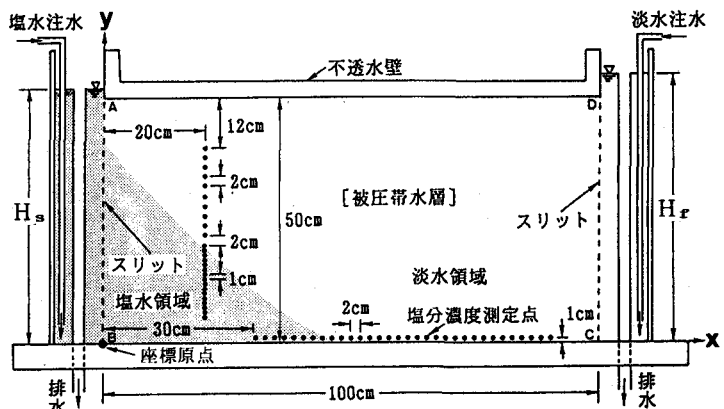


図-1 鉛直断面被圧帯水層の実験装置と解析領域

化ビニール樹脂製の水槽である。水槽の両端部に、水位調節用の昇降式の排水管をとりつけたヘッドタンクを設け、それぞれに塩水と淡水を満している。被圧帯水層は、以下のような手順で作った。水槽内に適量の水道水を入れておき、相馬砂あるいはガラス球を落とし入れながらよくかき混ぜ、軽つき固め浸透層内に気泡が残らないようにした。高さ50cmまで充填した後、不透水蓋を浸透層の上部に載せた。また水槽背面には、図中の●印の位置に塩分濃度測定用のセンサー

を取り付けるため直径6mmのネジ孔をあけている。

塩分濃度測定センサーは、図-2のような直径2mmの塩化ビニール棒に直径0.35mmのステンレス線

をつめて4巻、2巻、2巻、4巻の順に約0.5mm

間隔で巻き付けた長さ6.5mmの検出部からなっていて、ネジ切りした真鍮管に埋め込んだ。図-3にはセンサーの検定結果を示している。塩分濃度と出力電圧が、ほぼ線形関係を示している。

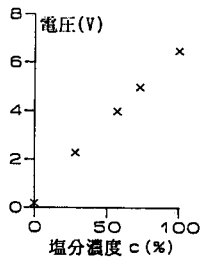
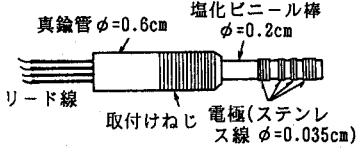


図-3 検定結果

(2)実験方法及び実験のケース

実験では、図-1の左側の塩水水深を $H_s=53.0\text{cm}$ 、右側の淡水水深を $H_f=54.9\text{cm}$ に設定し、境界ABより目視観測が可能のように食用色素赤色2号で赤紫色に着色した塩水を被圧帯水層に侵入させ、塩水領域が変化しなくなった状態を定常状態とした。次に、定常状態から淡水水深を $H_f=53.0\text{cm}$ まで一気に低下させ、塩水の非定常侵入過程の実験を行った。実験は、定常状態に対しては、相馬砂を用いた場合(Expt. 1)およびガラス球を用いた場合(Expt. 2)の2ケース、非定常塩水侵入過程に対しては、ガラス球のみを用いた場合(Expt. 3)の合計3ケースについて行った。表-1には、それぞれの実験の実験条件を示している。定常状態の鉛直方向の塩分濃度は、 $x=4\text{cm}$, 20cm および 34cm の位置に設けた直径1cmの観測孔を使って、直径0.4cmの市販のセンサーを徐々に降下させて測定し、非定常時では、図-1の●印の位置に取り付けたセンサーによって測定している。なお、センサーから検出された塩分濃度は、パーソナルコンピュータを使って一定時間間隔で自動測定されるようになっている。

表-1 実験条件および計算条件

	定常実験		非定常実験
	Expt. 1 [相馬砂]	Expt. 2 [ガラス球]	Expt. 3 [ガラス球]
帯水層厚 $D(\text{cm})$	50.0	50.0	50.0
帯水層長 $L(\text{cm})$	100.0	100.0	100.0
淡水深 $H_f(\text{cm})$	54.9	54.9	53.0
塩水深 $H_s(\text{cm})$	53.0	53.0	53.0
淡水密度 $\rho_f(\text{g/cm}^3)$	1.000	1.000	1.000
塩水密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	1.025	1.025	1.025
平均粒径 $d_m(\text{cm})$	0.054	0.235	0.235
空隙率 n	0.370	0.406	0.406
透水係数 $k(\text{cm/s})$	0.46	3.50	3.50
定常時の淡水流入量 $q(\text{cm}^3/\text{s})$	0.275	2.200	—
水温 $(^\circ\text{C})$	25	27	27
定常時のReynolds数 $Re=[d_m q/(nD)]/\nu$	0.089	2.968	—

3. 数値解析

(1)基礎式

地下水流れの基礎式および2次元移流分散方程式は、次式で与えられる。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \dots (1) \quad u = -k \frac{\partial h}{\partial x} \dots (2) \quad v = -k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \dots (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u' C)}{\partial x} + \frac{\partial (v' C)}{\partial y} = \frac{\partial (D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial x} + \frac{\partial (D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial y} \dots (4)$$

ここに、 S ：比貯留係数、 h ：圧力水頭、 t ：時間、 u, v ： x, y 方向のDarcy流速、 k ：透水係数、 ρ ：流体密度、 ρ_f ：淡水密度、 C ：塩分濃度、 u', v' ： x, y 方向の実質流速、 $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$ ：分散係数は、帯水層の分散に関する等方性を仮定すると、分散係数は流速依存型で与えられる。

$$D_{xx} = \alpha_L u'^2 / V + \alpha_T v'^2 / V + D_m, \quad D_{yy} = \alpha_L v'^2 / V + \alpha_T u'^2 / V + D_m, \quad D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) u' v' / V \dots (5)$$

ここに、 $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$ 、 α_L ：縦分散長、 α_T ：横分散長、 D_m ：浸透層内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。

$$C=100(\rho-\rho_r)/(\rho_s-\rho_r) \quad \dots (6)$$

ここに、 ρ_s ：塩水密度、塩分濃度Cは%表示である。

(2)数値計算法

まず、式(1)の圧力水頭hに関しては、次に示す陰形式の差分法を用いて数値計算を行う。

$$h_{i,j}^{n+1}=(Sh_{i,j}^n+A\Delta t)/(S+B\Delta t) \quad \dots (7)$$

ここに、 Δt ：差分時間間隔、 $\Delta x, \Delta y$ ：x, y方向の差分格子間隔、n：時間ステップ、i, j：x, y方向の差分格子点であり、また

$A=(k_{i+1/2,j}h_{i+1,j}^{n+1}+k_{i-1/2,j}h_{i-1,j}^{n+1})\Delta x^2+[k_{i,j+1/2}(h_{i,j+1}^{n+1}/\Delta y+\rho_{i,j+1/2}^{n+1}/\rho_r)-k_{i,j-1/2}(-h_{i,j-1}^{n+1}/\Delta y+\rho_{i,j-1/2}^{n+1}/\rho_r)]/\Delta y$ 、 $B=(K_{i+1/2,j}+k_{i-1/2,j})/\Delta x^2+(K_{i,j+1/2}+k_{i,j-1/2})/\Delta y^2$ $\dots (8)$ である。格子点i+1/2あるいはj+1/2における物理量は、格子点iとi+1あるいはjとj+1の物理量の平均値としている。差分式(7)は陰形式であるため、反復計算が必要になる。ここでは、次式に示す加速緩和法(S.O.R法)により反復計算を行う。なお、反復計算の収束判定は、式(11)により行っている。

$$h_{i,j}^{n+1,m} = h_{i,j}^{n+1} + \omega(h_{i,j}^{n+1,m} - h_{i,j}^{n+1}) \quad \dots (9) \quad |h_{i,j}^{n+1,m} - h_{i,j}^{n+1}| < \epsilon \quad \dots (10)$$

ここに、m：反復回数、 ω ：加速緩和係数、 ϵ ：収束判定値である。

次に、式(4)の移流分散方程式の数値解は次の方法によっている。本研究での地下水流れでは、非定常塩水侵入過程において分散項よりも移流項が卓越し、また塩水混合域における流速分布の局所的な変化が予想され、移流による濃度フラックスを精度よく算定できる数値解析が必要になってくる。著者らが従来より検討してきた粒子移動法による数値計算は、移流分散項の離散化誤差の発生がなく、数値計算精度のよいことが確認されている²⁾。このことから、ここでは粒子移動法を適用している。詳細なアルゴリズム、安定条件等は文献2), 3)を参照されたい。

(3)解析領域と計算条件

図-1には、数値計算で対象とする鉛直断面被圧帯水層の解析領域を示している。この領域内での圧力水頭hと塩分濃度Cについての境界条件を具体的に次のように与えている。

AB境界： $h=(H_s-y)\rho_s/\rho_r$ 、 $u \geq 0$ ： $C=100\%$ ； $u < 0$ ： $\partial c/\partial x=0$ 、CD境界： $h=H_r-y$ 、 $C=0\%$
BC境界： $-k(\partial h/\partial y + \rho/\rho_r)=0$ 、 $\partial c/\partial y=0$ 、AD境界： $-k(\partial h/\partial y + \rho/\rho_r)=0$ 、 $\partial c/\partial y=0$

式(4)の右辺の分散項には、縦と横の分散長 α_L, α_T を与える必要がある。ここでは、Harleman-Rumerの分散係数に関する球径粒子の多孔性媒質に対する次式の実験公式⁴⁾により与えている。

$$\alpha_L q' / \nu = 0.036(q' d_n / \nu)^{0.7} \quad \dots (11) \quad \alpha_T q' / \nu = 0.66(q' d_n / \nu)^{1.2} \quad \dots (12)$$

ここに、 q' ：浸透層内の断面平均実流速、 ν ：動粘性係数、 d_n ：平均粒径である。断面平均実流速を、淡水側からの単位奥行き当りの淡水流入量の実測値qにより求め、式(11)、(12)に代入して算定した縦と横の分散長を表-2に示している。

表-2 数値計算で与えた縦・横分散長

	Expt.1 [相馬砂]	Expt.2, Expt.3 [カラス球]
縦分散長 α_L (cm)	0.0221	0.2196
横分散長 α_T (cm)	0.0040	0.0050

数値解析を進めるにあたって厳密に塩分濃度を求めるには、浸透流速が既知量であること、逆に圧力水頭を求めるには塩分濃度が既知量でなければならない。しかし、ここでは差分時間間隔を微小時間に取り替えているために、差分時間間隔内の塩分濃度の変化が浸透流に与える影響は小さいと考えて、圧力水頭の計算には時間ステップが1ステップ前の塩分濃度を用いている。すなわち、塩分濃度を既知量として、式(1)より圧力水頭を求め、この値を用いて式(2)、(3)より流速、式(5)より分散係数を求め、これらの値を用いて式(4)より

表-3 計算条件

x軸方向の差分間隔 ΔX (cm)	0.5
y軸方向の差分間隔 ΔY (cm)	0.5
S.O.Rの緩和係数 ω	1.6
S.O.Rの収束判定値 ϵ (cm)	10^{-4}
分子拡散係数 D_m (cm ² /s)	10^{-5}

塩分濃度を求める計算手順を採用している。数値計算の条件を表-3に示している。また、比貯留係数には $S=10^{-6}(\text{cm}^{-1})$ を与えている。なお、数値計算は、FACOM vp-200により行っており、粒子移動法で使用する流体粒子を計算領域内に約8万個配置した場合、計算時間は、1ステップ当り約1.4秒であった。

4. 結果と考察

(1) 定常状態 (Expt. 1, Expt. 2) について

図-4には、室内実験で目視観測により得た淡塩水境界面形状を○印で、流出口で鉛直方向の流速を考慮した準一様流の仮定の下で非混合淡塩水境界面⁴⁾を×印で、さらに20%間隔の等濃度線の数値解を実線で示している。Expt. 1の実験による淡塩水境界面は数値解の50%等濃度線と比較的よく一致し、Expt. 2のそれは90%等濃度線にはば一致している。また、Expt. 1およびExpt. 2に対する数値解の等濃度線は、非混合淡塩水境界面にはば平行になっている。Expt. 2の数値解塩水混合域は、Expt. 1のそれに比べて拡がっている。これは、Expt. 2で用いたガラス球の粒子径がExpt. 1のそれに比べて大きいため、分散長や流速が大きくなり、その結果分散係数が大きくなっているためである。

図-5には、流速ベクトル分布の数値解を示している。この図から、以下のようなことが考察される。淡水領域では、陸側から塩水混合域に沿っての淡水の流れが特徴的である。塩水領域では、非常に遅い速度で塩水が陸側に流れている。塩水混合域では、流入した塩水が混合域で流れの方向を変え海側に流れる。このよ

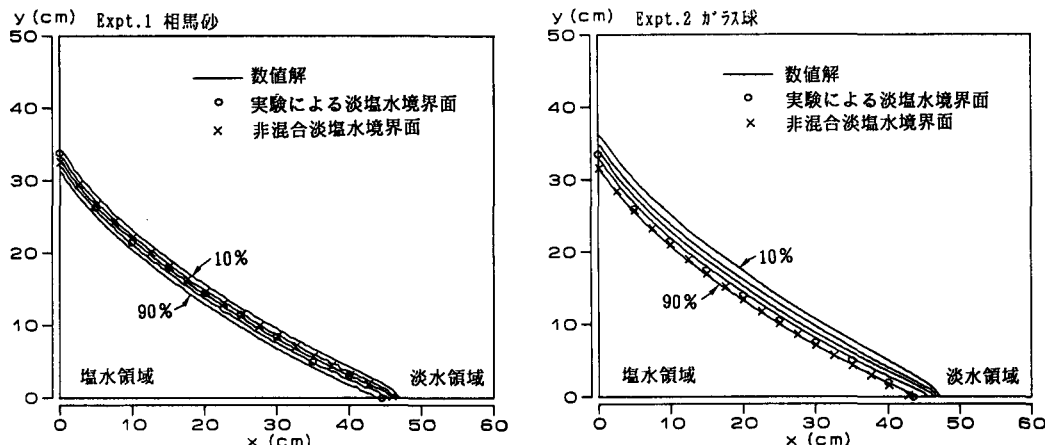


図-4 定常状態での濃度分布(数値解の等濃度線は20%間隔)

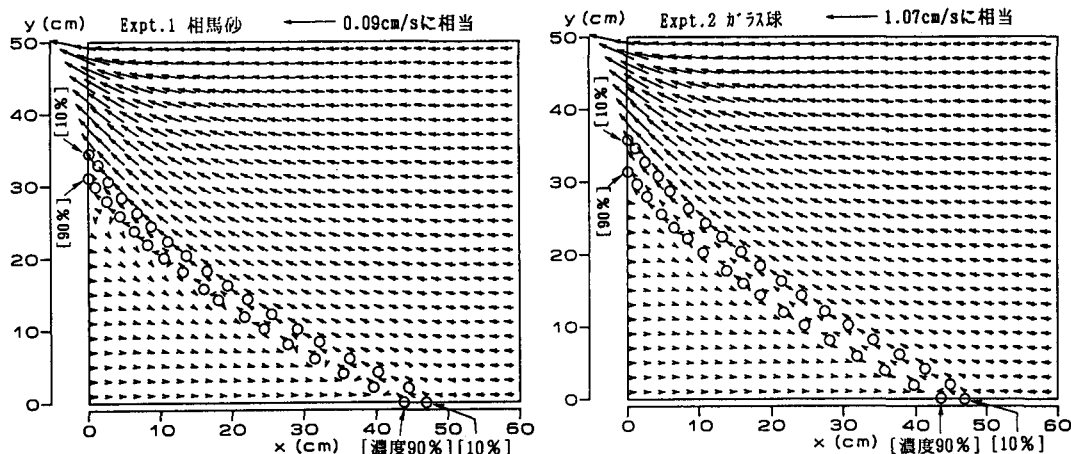


図-5 定常状態での流速ベクトル分布

うに塩水領域では、全領域に循環流が形成されている。従って、定常状態ではこのような塩水の循環流によって塩分の補給と流出に平衡が保たれていると考えられる。地下水流れの運動方程式と塩分濃度に関する移流分散方

表-4 定常時の淡水流量

	Expt.1 [相馬砂]	Expt.2 [ガラ球]
実測値 q (cm ³ /s)	0.27	2.20
数値解 q (cm ³ /s)	0.28	2.31

程式を連立して数値計算することに
より、実験では得ることが困難な淡塩水混合域における塩分輸送のメカニズムを再現でき、現象の把握に有効な知見を得ることが可能である。単位奥行き当りの淡水流入量は、表-4に示しているように、Expt. 1およびExpt. 2とも実測値と数値解はよく一致している。

図-6には、鉛直濃度分布の実測値と数値解の比較を示している。Expt. 1およびExpt. 2とも実測値と数値解の鉛直濃度分布の傾向は、よく一致しているといえよう。また、内陸部に比べて海側の鉛直濃度分布のひろがり幅が大きくなっている。これは、図-5に示した流速ベクトル分布の数値解からわかるように、内陸部に比べて海側へ向かう淡水の流速が大きくなり、その結果、式(5)に示した流速依存型の分散係数が大きくなる事に起因していると考えられる。

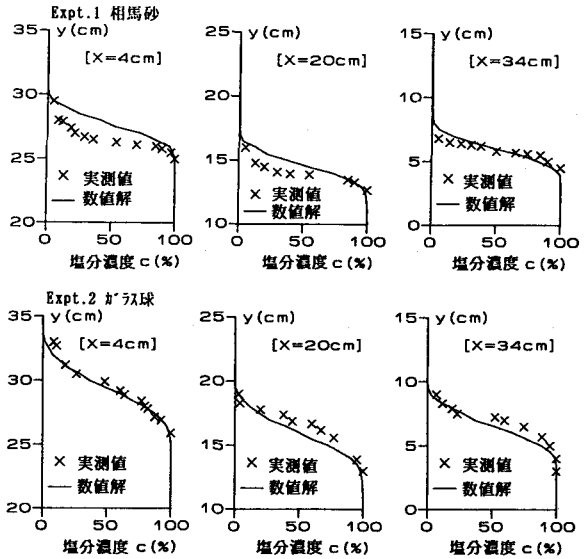


図-6 定常状態での鉛直濃度分布の実測値と数値解の比較

(2) 非定常塩水侵入過程 (Expt. 3) について

図-7には陸側の淡水水深を54.9cmから53.0cmに低下させてから1分、3分および5分経過後の等濃度線を20%間隔で実線で、また、目視観測による淡塩水境界面を×印で示している。侵入開始1分経過後の目視による淡塩水境界面は、数値解の30%から50%の等濃度線にほぼ一致しているが、塩水の侵入にともない塩水混合域中央部付近の目視による境界面は、10%から30%の等濃度線に近い位置になっている。また、数値解による10%から90%の等濃度線で囲まれた塩水混合域は、塩水の侵入とともに拡がっているが、海側における淡水流出部での混合域の拡がり幅は、塩水楔先端に比べて狭くなっている。

図-8には侵入開始3分経過後の数値解の流速ベクトル分布を示している。この図から、次のような事が考察できる。淡水領域においては、帯水層上部に淀み点が現れ、淀み点を通る淡水側の垂直直線を境に塩水側の淡水は塩水側に流れ、陸側の淡水は陸側に戻っている。塩水領域では、下部に近に近いほど陸側への流速が大きい。塩水混合域では、淀み点より塩水側の塩水は還流している。また淀み点より陸側では、水平流速成分が卓越して塩水も淡水も陸側に流れている。なお、淀み点は、侵入開始5分経過後までの計算においてもほぼ図-8と同じ位置にあることを確認している。

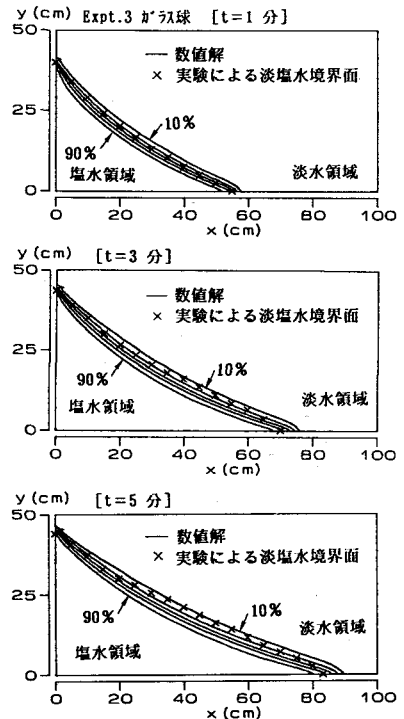


図-7 非定常塩水侵入過程での濃度分布の時間変化(数値解の等濃度線は20%間隔)

図-9は、 $x=20\text{cm}$ の位置での各侵入時刻における実測値と数値解の鉛直濃度分布の比較である。時間の経過に伴って数値解の方が若干分散幅が広がっているが分布の傾向は、概ね一致しているといえよう。また、定常状態に比べて非定常塩水侵入過程の鉛直濃度分布のひろがり幅がおおきくなっている。

図-10には、 $y=1\text{cm}$ の高さでの水平濃度分布の経時変化を示して数値解は、概ね実測値と一致しているといえよう。また、定常状態に比べて非定常塩水過程の水平濃度分布のひろがり幅がおおきくなっている。

図-11には、 $y=1\text{cm}$ での50%の塩分濃度水平距離の時間変化を示している。数値解は実測値によく一致しており、 $y=1\text{cm}$ での50%の塩分濃度は、ほぼ一定の割合で侵入していることがわかる。

5. むすび

本報では、被圧帯水層における地下密度流の定常状態と非定常塩水侵入過程について室内実験と数値計算を行い、塩水混合域のメカニズム特性が明らかになった。また、計算の精度については、室内実験で妥当性を確かめた。今後、ここで得た知見と本数値解析法を用いて海岸帯水層に築造される地下ダムの効果評価や運転・維持管理に役立てたい。

謝 辞

本研究を行うに当たり、九州産業大学工学部 奥園英明助教授、加納正道助教授に有益な御助言、御協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 柿沼忠男・岸洋介・井内国光：海岸地下水における淡塩水境界面モデルと分散モデル，日本地下水学会誌，第27巻，第4号，pp. 141-155，1985。
- 2) 神野健二・上田年比古：粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討，土木学会論文集，第271号，pp. 45-53，1978。
- 3) 初井和朗・神野健二・上田年比古・伊藤敏朗・細川土佐男・平野文昭：不飽和領域を考慮した海岸自由地下水の塩水の侵入・分散の数値解析，日本地下水学会誌，第28巻，第3号，pp. 103-112，1986。
- 4) 土木学会水理委員会編：水理公式集，pp. 384-390，土木学会，1985。

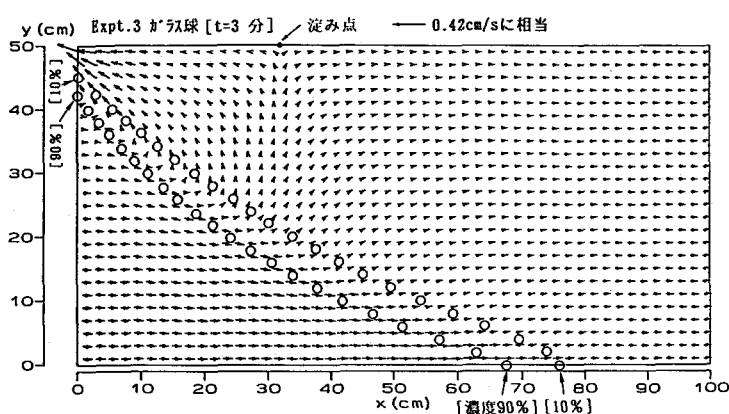


図-8 非定常塩水侵入過程での流速ベクトル分布

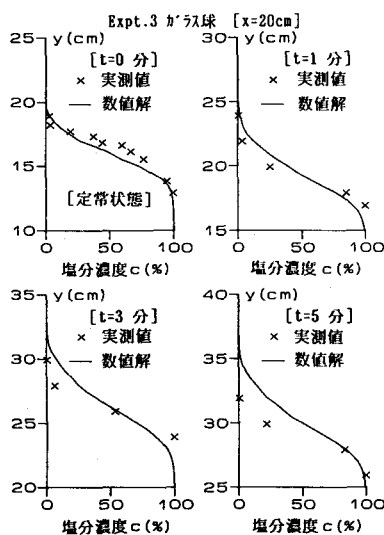


図-9 鉛直濃度分布の時間変化の実測値と数値解の比較

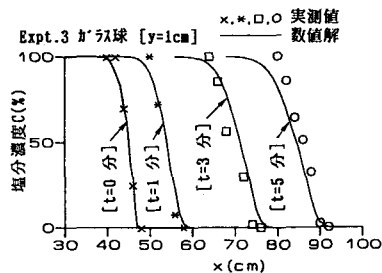


図-10 $y=1\text{cm}$ での水平濃度分布の時間変化の実測値と数値解の比較

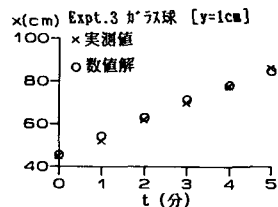


図-11 $y=1\text{cm}$ での50%の塩分濃度水平距離の時間変化の実測値と数値解の比較