

塩水侵入阻止型地下ダム貯留域内の 残留塩分の挙動

MOVEMENT OF RESIDUAL SALTWATER IN SUBSURFACE DAM TO PREVENT SALTWATER INTRUSION

中川 啓¹・舩井和朗²・内田一平³

Kei NAKAGAWA, Kazuro MOMII and Ippei UCHIDA

¹正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

²正会員 農博 鹿児島大学教授 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

³鹿児島大学大学院 農学研究科生物環境学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

In coastal areas, a subsurface dam has been planned to ensure a constant extraction of water without causing saltwater intrusion into fresh groundwater. The movement and removal of residual saltwater in the storage area of the subsurface dam have not been investigated because of difficulties in monitoring and predicting saltwater dynamics under ground. Experimental and numerical studies were performed to understand the fundamental mechanism of saltwater movement after the dam construction. Experimental results indicate that the residual saltwater in the storage area is gradually flushed out under the conditions of freshwater overflow above the cut-off wall. Numerical results show that the circulation flow is appeared in the residual saltwater region immediately after the installation of the cut-off wall, and then the diluted saltwater in the freshwater-saltwater mixing zone is transported with freshwater flow into the sea side. The results obtained in this study will be a useful guideline to manage groundwater in subsurface dam.

Key Words : saltwater intrusion, subsurface dam, laboratory experiment, numerical simulation

1. はじめに

離島や島嶼部といった表流水の開発が困難な地域では、地下ダムによる地下水開発が進められる¹⁾。地下ダムとは、帯水層の地下水の流れをせき止めて貯留することや、塩水の侵入を阻止する目的で地中に設置した止水壁や、地下水を安定的に利用可能とし、管理する施設である^{2), 3)}。

海岸帯水層に地下ダムを建設する場合には、地下水を取水して陸側の地下水位が低下した場合にも、海からの塩水の侵入を抑えることができるように、海岸線の地下に止水壁を建設する塩水侵入阻止型の地下ダムを考えなければならない。

地下ダムを建設する場合は、数値計算により現地の塩水侵入の状況を精度よく再現し、淡水と塩水の流動特性を把握しておくことが重要であるが、止水壁を設けた後に貯留域に残留した塩分の動態を事前に検討しておくことも大切である。特に残留する塩分の除去については、量的問題について検討するこ

と併せてその必要性を検討し、除去措置を講じない場合の取水された水の質的問題に関しても検討する必要がある。

塩水侵入に関してはこれまで多くの実験および解析などに基づく成果が得られているが⁴⁾、残留塩分の挙動に関して、著者らの他はあまり検討されていないようである⁵⁾。

本研究では、塩水侵入阻止型地下ダム建設後に、帯水層内に残留した塩分の動態に関する基礎的知見を得るため、まず室内実験による検討を加え、続いて帯水層内の淡水と塩水の移流分散挙動を明らかにするために、実験と同様の条件で数値計算を実施し、考察を加えた。

2. 塩水侵入と止水壁挿入後の塩水挙動についての室内実験

(1) 実験装置と実験方法

図-1に実験装置の概略図を示す。高さ64 cm, 幅90

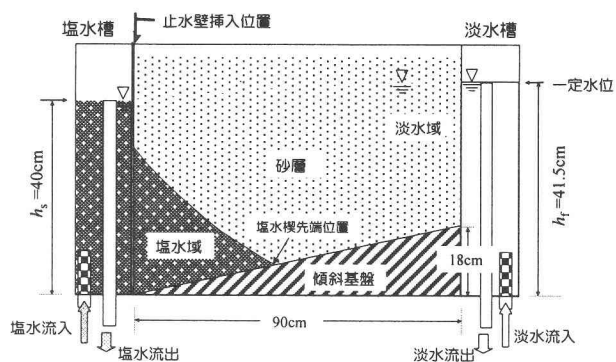


図-1 実験装置概略図

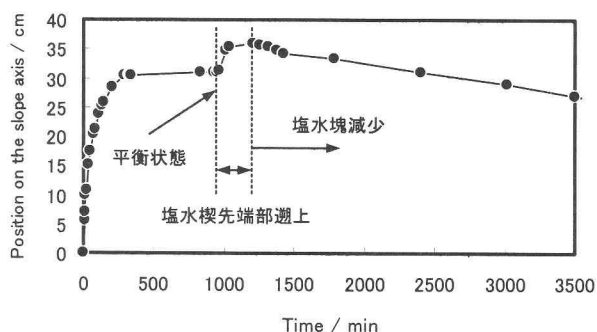


図-2 傾斜軸上の塩水楔先端位置の時間変化

cm, 奥行き 10 cm の矩形水槽にケイ砂 (平均粒径 0.05 cm) をほぼ均一に充填した。下層は傾斜角約 11° の不透水性基盤条件である。図の左側の塩水槽に, 比重 1.025 (電気伝導度 54.3 mS/cm) の塩水を下端より流入させ, 一定水位 $h_s = 40$ cm に保つ。塩水は食用色素 (New Coccin, Acid Red 18, キリヤ化学) により赤色に着色している。右側の淡水槽に, 比重 1.002 (電気伝導度 0.28 mS/cm) の水道水を下端より流入させ, 一定水位 $h_f = 41.5$ cm とする。塩水槽と砂層との間に予め設置した遮水板を取り除き, 塩水の侵入実験を開始する。平衡状態に達した時点で, 地下ダムに相当する止水壁 (高さ $h_0 = 40.3$ cm) を, 塩水槽と砂層の間に静かに挿入し, 砂層内に侵入した塩水塊の動態をデジタルカメラにより所定の時間間隔で記録した。なお, 平衡状態の判断のため, 傾斜基盤上での塩水楔先端位置 (図の矢印参照) を観測した。

(2) 実験結果と考察

図-2 には, 傾斜基盤上における塩水楔先端位置 (図-1 参照) の時間変化を示す。約 15 時間後には先端位置は変化しないと考えられ, この状態を平衡状態とする。

図-3(a) に平衡状態にある塩水侵入の鉛直断面を示す。図中の濃い部分が着色した塩水の領域, および

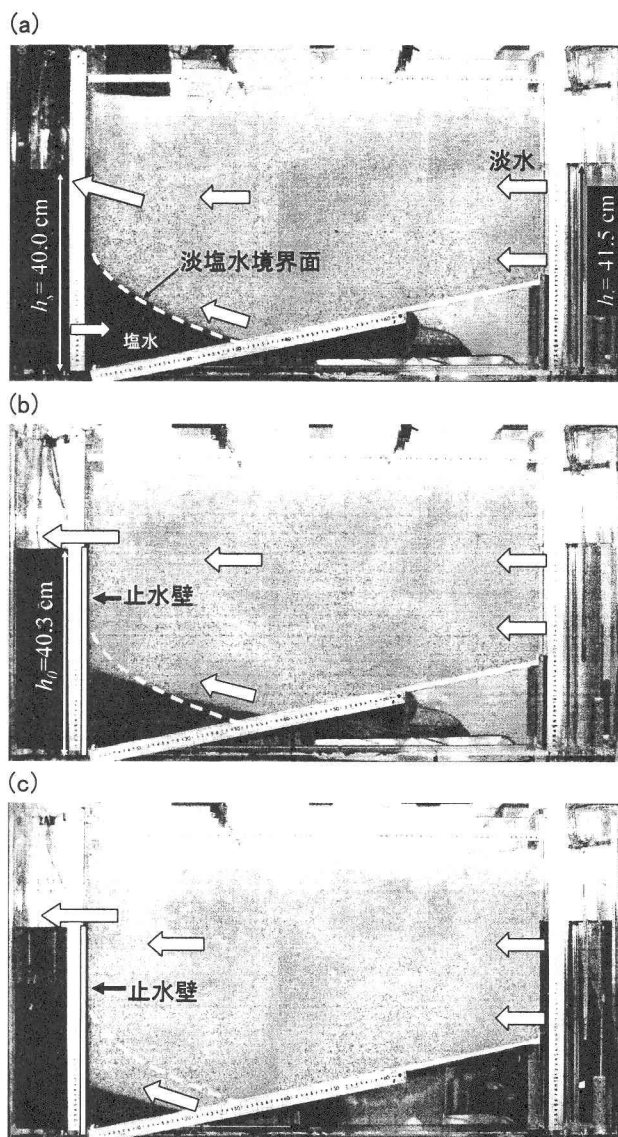


図-3 塩水侵入および越流型止水壁挿入後の塩水塊の挙動, (a) 平衡状態 (侵入開始 950 分後), (b) 止水壁挿入 4 時間後, (c) 止水壁挿入 3 日後

図中の点線は目視による淡塩水境界である。平衡状態では, 図中の矢印に示すように, 淡水領域では淡水槽 (図の右) 側から塩水槽 (図の左) 側に向かって淡水は流れ, 一方, 塩水領域では淡水に比べて遅い速度で塩水が淡水側に輸送される。次に砂層内での分散効果により希釈された塩分は, 淡水槽側からの淡水の流れにより, 淡塩水混合域で流れの方向を変え, 塩水槽側に向かっていくものと考えられる。この循環する流れによって塩水領域内の塩分の補給と流出に平衡が保たれ, 図-3(a) の状態が達成されていると考える。

図-3(b), (c) は, 止水壁挿入 4 時間後および 3 日後を示す。本実験での止水壁挿入高さ h_0 は, 右端の淡水深 h_f より低く, 左端の塩水深 h_s より高い, すなわち $h_s < h_0 < h_f$ のため, 止水壁上端を淡水が越流する状態

となる。したがって、止水壁挿入直後は、左端における淡水水位の上昇に伴い、平衡状態では保たれていた圧力バランスが崩れ、塩水塊の変形が生じる。この変形に伴い、塩水楔先端は傾斜基盤上を遡上するが、図-3(b)では、遡上が止まった状態である。以後は、淡水の流れにより混合域の塩分が塩水槽側に運ばれるが、止水壁の存在により塩水槽側からの塩分の補給がないため、塩水塊は徐々に小さくなり、本実験では、3日後に図-3(c)の状態となる。

図-3で観察された平衡状態と判断された後の止水壁挿入直後からの塩水楔の傾斜基盤遡上と、その後の塩水塊減少に伴う塩水楔先端位置の後退は、図-2からも明らかである。

以上のことから、淡水越流型止水壁を設置した場合には、止水壁よりも内側の帯水層内に残留した塩分は、塩水側へ流出する淡水の流れにより塩水側へと徐々に流出し、平衡状態における帯水層内への塩水の供給が遮断されているため、塩水塊は減衰していくと考えられる。

3. 数値計算による塩水侵入と止水壁挿入後の塩水塊挙動の検討

(1) 数値計算モデル

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、物質輸送の式として(2)式を用いた²⁾。

$$\begin{aligned} (C_w + \alpha_0 S) \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \\ u &= -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

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

ここで、 θ は体積含水率、 D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} 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。流速依存型の分散係数は次のように表される⁶⁾。

表-1 数値計算に用いた諸定数

Hydraulic conductivity k (cm s ⁻¹)	1.55×10^{-1}
Longitudinal dispersivity α_L (cm)	0.07
Transversal dispersivity α_T (cm)	0.007
Grid size in x direction Δx (cm)	0.5
Grid size in y direction Δy (cm)	0.5
Unsaturated flow property for van Genuchten model	
θ_s	0.474
θ_r	0.0492
α (cm ⁻¹)	0.0829
n	5.74

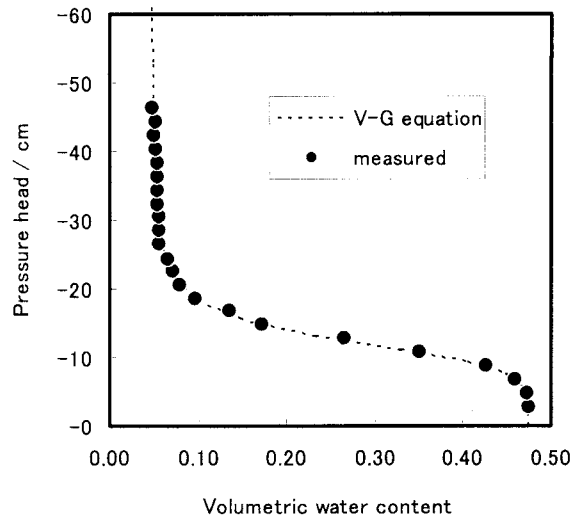


図-4 土柱法により得られた水分特性曲線

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

ここに $V = \sqrt{u'^2 + v'^2}$ で、 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 $\theta(h - \theta$ 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)、比水分容量 $C_w = d\theta/dh$ ($C_w - h$ 曲線)を与える必要がある。本研究では、

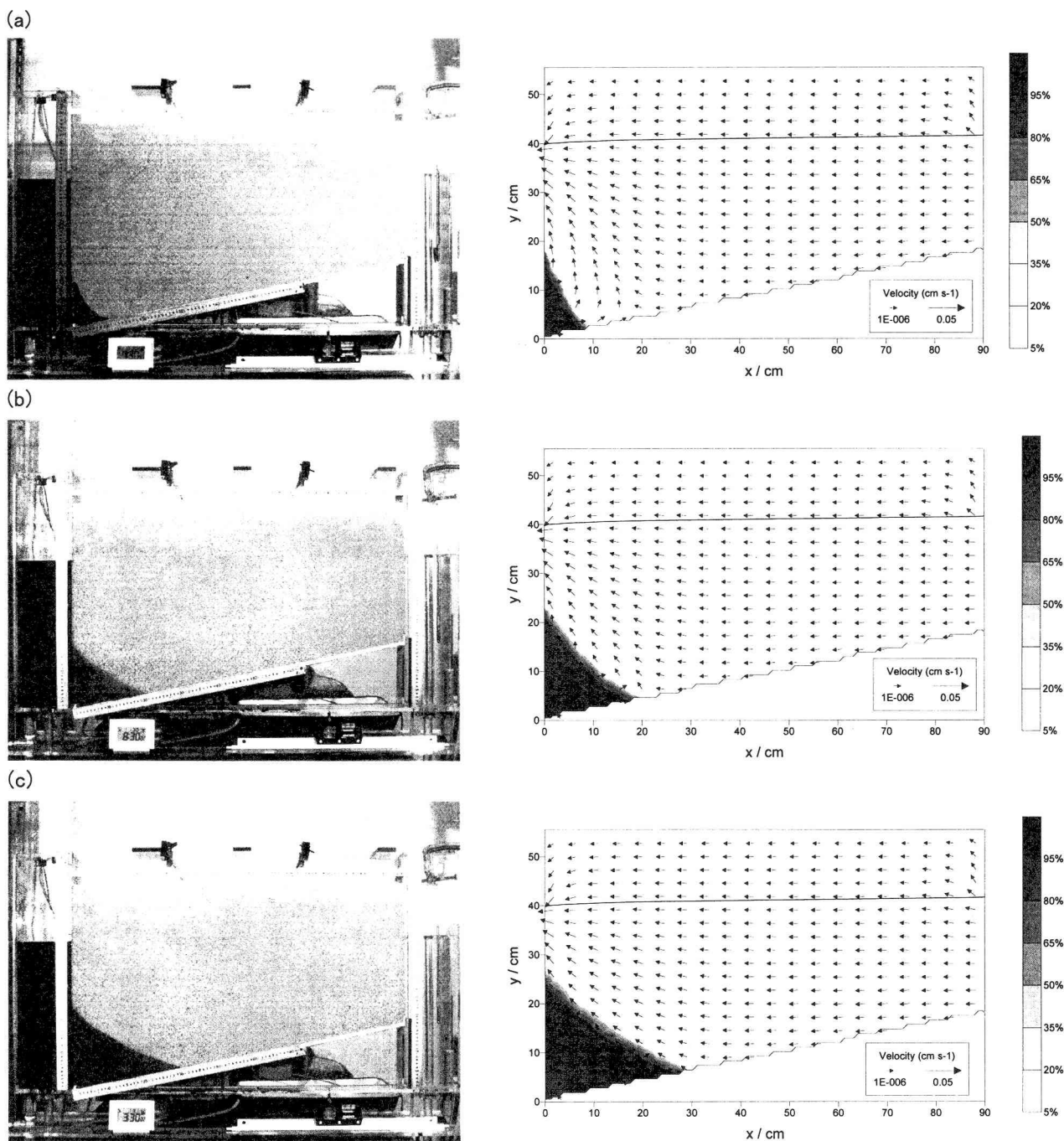


図-5 室内実験結果と数値計算結果における塩水侵入過程 (a)20 min, (b)80 min, (c)500 min

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⁷⁾。

$$S_0 = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha |h|)^n} \right]^m$$

$$k_r = S_0^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2$$

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

(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。

(2) 計算方法および計算条件

地下水流れの式(1)については、陰形式の差分法で加速緩和法による繰り返し計算を行い、物質輸送の式(2)については、特性曲線法を用いる。数値計算方法は、参考文献4)を参照されたい。

計算領域はx方向に90 cm, y方向に55 cm, 差分格子間隔はx, y両方向ともに0.5 cmとした。

境界条件としては、傾斜基盤は不透水性境界で濃度勾配無し、地表面はゼロフラックス境界(流速 $v=0$)とし、塩水槽側では流速ベクトルが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。止水壁挿入後は、基盤から止水壁の高さ近傍の格子点までを不透水性境界へ切り替えた。淡水槽側では塩水0%の静水圧境界とした。止水壁挿入後の塩水槽側と淡水槽側の不飽和領域に対する境界は地表面と同じゼロフラックス境界(流速 $u=0$)として計算を開始したが、止水壁部分是不透水性境界とし、止水壁より上の部分は、前の時間ステップの圧力水頭に関する計算結果に応じて浸出面を設定するようにした。

計算条件のうち、不飽和パラメータについては土柱法により水分特性曲線を作成し、van Genuchtenが提案した理論式⁷⁾をあてはめ、最小二乗法により求めた⁸⁾。ここで得られた水分特性曲線を図-4に、決定された不飽和パラメータを飽和透水係数、縦方向分散長と併せて表-1に示す。飽和透水係数と縦方向分散長は、別途室内実験に用いたケイ砂によるカラム試験を実施して求めた⁹⁾。なお、横方向分散長は縦方向分散長の1/10とした。

(3) 計算結果と考察

図-5に塩水侵入過程における数値計算結果と実験結果を示す。数値計算結果は塩分濃度分布に流速ベクトル分布と地下水面を併せて示している。これによると、塩水侵入過程の数値計算結果は、これまでの研究成果^{4), 10), 11)}と同様に、実験結果をよく再現できたことが分かる。塩水槽側から侵入する塩水の輸送は、始めは大きな流速であるが、平衡状態に近づくとき非常に小さい流速となる。侵入した塩水は、塩水槽側へ流出する淡水の影響を受け淡塩混合域で流れの方向を変え、再び塩水槽側へ戻されるという流況が確認できる。見かけ上塩水の侵入が止まる平衡状態では、このような塩分の補給と流出に平衡が保たれていると考えられる。

図-6に図-3に対応する数値計算結果を示す。すなわち、(a)が侵入開始950分後の平衡状態、(b)、(c)は止水壁挿入4時間後と3日後である。塩水塊の変化は、実験結果と概ね良く一致している。

図-7に止水壁挿入後4時間後の流速ベクトルおよび塩分濃度分布について塩水塊近傍(40×30 cm)を拡大した図を示す。数値計算結果によると、止水壁挿入後には直ちに塩水塊の部分で循環流を生じた。これは塩水侵入過程が定常状態で力学的平衡状態を保っているときの、塩水槽からの恒常的な塩水供給が、止水壁により絶たれたことと、塩水槽側への淡水流出に伴い流出していた塩水の一部が止水壁に沿って下方へ戻される流れが生じたからである。この塩分輸送の流れが、淡水に伴い流出するものと循環流になるものに分岐する淀み点が止水壁のおよそ $y=19$ cmの点に表れている(図-6(b), 7)。

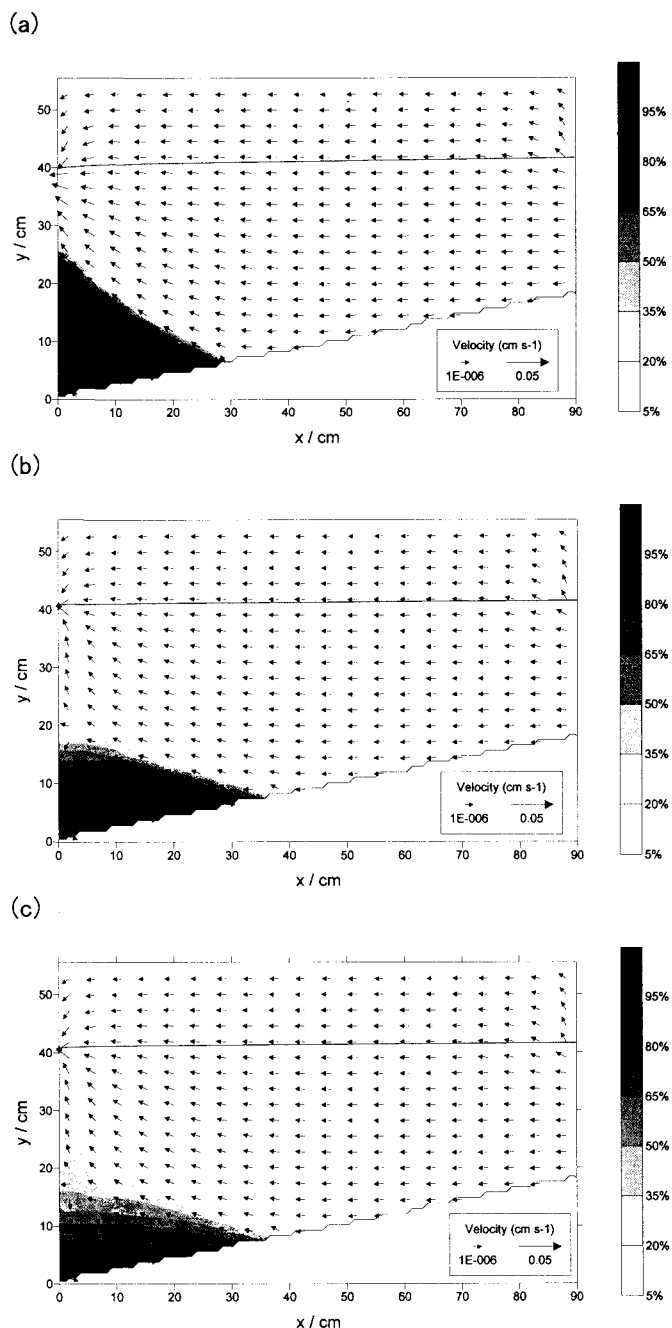


図-6 塩水侵入および越流型止水壁挿入後の塩水塊の挙動の数値計算結果、(a)平衡状態(侵入開始950分後)、(b)止水壁挿入4時間後、(c)止水壁挿入3日後(それぞれは図-3に対応している)

また循環流の外側にある塩分を流出する淡水が輸送し、塩水塊を徐々に減少させていることが数値計算結果から分かる。実験結果からははっきりと読み取ることが出来なかったが、計算結果より止水壁近傍では、大きなフラックスで流出する淡水の希釈を受けて淡塩混合域が大きく広がっている様子が分かる(図-6(c))。

数値計算を実行する過程で、初期の地下水面を塩水槽側へ延長した高さは、止水壁の高さよりも低い。このときの塩水槽側の地下水流れの計算に対する境界条件は、止水壁部のみならず、それより上の部分においても流速 $u=0$ の条件となる。その後、

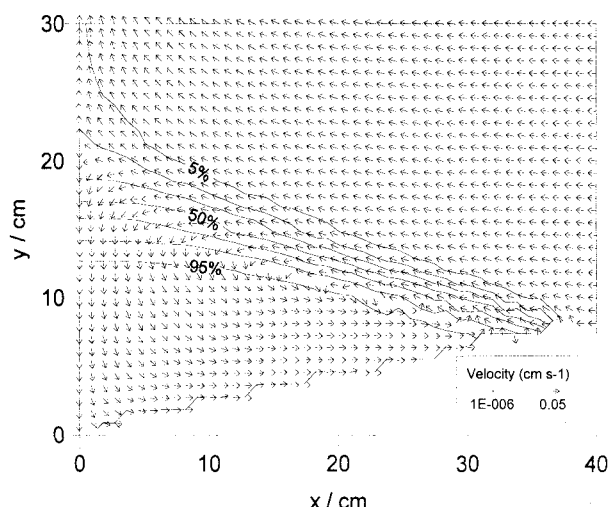


図-7 止水壁挿入4時間後の塩水塊近傍の流速ベクトルおよび塩分濃度分布

地下水面が盛上ることにより止水壁上部を越流できるようになる。このとき数値計算上は、止水壁より上部に浸出面が設けられ、そこから塩水槽側へ淡水が流出する境界条件となる。流出する淡水のフラックスは計算が進むにしたがって大きくなり、連続の条件を満たすために、淡水槽側からの流入流量に相当するまで大きくなる。

塩水塊減衰が、実験結果と数値計算結果で異なる理由の一つとして、実際の止水壁の高さが40.3 cmであるのに対して、数値計算では鉛直方向の差分格子間隔が $\Delta y=0.5$ cmのため、計算上の止水壁高さが40.0 cmとなること、また淡水の塩水槽側へ流出するための浸出位置は前の時間ステップの圧力水頭の計算結果に応じて設定しているが、実質的に計算格子上の止水壁上部唯1点のみとなることなどが、塩水槽側への淡水流出量に影響し、その結果塩分の洗出し効果が小さくなったことが考えられる。

止水壁挿入後の塩水塊の減衰過程は、止水後の塩水塊の若干の遡上とその後の減少の様子について、前述のように概ね良く再現できているが、実験結果との一致度を上げることは、分散長や透水係数などのパラメータや計算上の実験条件を十分に検討することで対応できると考えている。

4. おわりに

本研究では、地下ダム建設後の貯留域に残留する塩水の挙動について基礎的な知見を得るため、室内実験と数値計算により検討を加えた。

その結果、淡水流出が可能な塩水侵入阻止型地下ダム建設を想定した止水壁の場合、止水後の塩水塊は、密度効果のため、若干淡水槽側（陸側を想定している）へ遡上した後、徐々に減少することが明らかになった。このことから、地下ダムを運用・管理する場合に、淡水が流出できるようにコントロールすることができれば、地下ダム建設後に残留塩分の

除去を講ずる必要が無くなると考えることもできる。なおここでの実験と計算は、実際の地下ダムをスケールダウンしたものではないが、止水前後の基礎的な塩水挙動を観察する為に実施したものである。ただし実験における流れは層流状態であり、力学的相似則は満たしている。また、塩水塊が完全に減衰するまでに要する時間は求めていないが、淡水越流を保ちながら取水を同時に行うなどの措置を検討する必要があると考えられる。

数値計算結果の流速ベクトル分布によれば、止水壁挿入後に貯留域に残存した塩水塊部分で循環流が形成され、その外側部分が淡水の流れにより徐々に塩水槽側（海側を想定している）へ輸送され流出することが分かった。

数値計算は、塩水侵入過程については、既往の研究^{4), 10), 11)}と同様に高い精度で再現できた。止水壁挿入後の塩水塊の遡上と減衰に関しても、概ね良好に再現できた。より実験結果との一致度を上げるためには、分散長や透水係数などのパラメータや計算上の実験条件について十分検討することが必要である。

謝辞：本研究に対し有益な助言を頂いた九州産業大学工学部教授細川土佐男先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 土地・水資源局水資源部編：平成13年版日本の水資源，p.166, 2001.
- 2) 菅原利夫：地下水を創る話，土と基礎，Vol.41, No.1, pp.19-24, 1993.
- 3) 長谷川高士：地下ダム，土と基礎，Vol.42, No.3, pp.67-68, 1994.
- 4) 神野健二編著：地下水中の物質輸送数値解析(第4章沿岸帯水層における塩水侵入解析)，九州大学出版会，pp.73-99, 2001.
- 5) 中川 啓，細川土佐男，神野健二，田尻 要：地下ダム建設後のダム内塩水の淡水置換について，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第2部，pp.320-321, 1996.
- 6) Huyakorn, P. S. and Pinder, G. F.: *Computational method in subsurface flow*, Academic Press, New York, 1983.
- 7) van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 8) 西垣誠，竹下祐二：室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究，岡山大学工学部土木工学科，1993.
- 9) 佐藤邦明，岩佐義朗 編著：地下水理学，丸善，107p, 2002.
- 10) 中川 啓，細川土佐男，岩満公正，広城吉成，神野健二：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，水工学論文集，第46巻，pp.181-186, 2002.
- 11) Nakagawa, K., Jinno, K., Hosokawa, T. and Iwamitsu, K.: Numerical study on saltwater intrusion in a heterogeneous stratified aquifer, *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, Vol. 45, No.1, pp.317-323, 2000.

(2003. 9. 30受付)