

地下ダム貯水域における残留塩水
の挙動に関する研究

高橋 昌弘

2016

目 次

1. 諸 言	1
2. 既往研究と本研究の位置づけ	5
3. 被圧地下水における止水壁設置後の淡塩水の挙動	7
3. 1 諸 言	7
3. 2 被圧帯水層での止水壁による塩水制御実験	7
3. 3 数値計算による止水壁設置後の淡塩水挙動の検討	11
3.3.1 SEAWAT2000 による数値計算の概要	11
3.3.2 数値計算による室内実験の再現	12
3.3.3 止水壁高さの塩水排除に及ぼす影響	15
3.3.4 縦横分散長比が塩水排除に及ぼす影響	17
3. 4 結 論	22
4. 不圧地下水における塩水の侵入・排除過程に及ぼす分散長の影響	23
4. 1 諸 言	23
4. 2 室内実験方法	24
4.2.1 キャリブレーション実験	25
4.2.2 パルス・連続注入実験	25
4.2.3 塩水侵入・排除実験	26
4. 3 解析方法	27
4.3.1 画像解析による濃度変換	27
4.3.2 パルス・連続注入実験による縦・横分散長の算定	28
4.3.3 数値解析	30
4. 4 結果と考察	33
4.4.1 室内試験と画像解析による縦・横分散長の検討	33
(1) キャリブレーション結果	33
(2) パルス・連続注入実験による縦・横分散長の算定	34
4.4.2 塩水侵入・排除実験と数値解析による塩水排除機構	38
(1) 塩水侵入・排除時の実験画像	38
(2) 電気伝導度と画像解析	40
(3) 数値解析による塩水侵入・排除の再現	43
4.4.3 横分散長が塩水侵入・排除に及ぼす効果	44
(1) 濃度の時間変化	44
(2) 濃度の断面分布	46
4.4.4 排除過程での淡塩混合域の塩分輸送	52
4.4.5 排除時間の予測	55

4. 5 結 論	57
5. 現地スケールでの沿岸域地下ダム構築時における残留塩水の挙動	59
5. 1 諸 言	59
5. 2 対象地域の概況	59
5. 3 水理地質モデルの構築	60
5.3.1 水理地質	60
5.3.2 地下水位観測結果	61
5. 4 数値解析	62
5.4.1 数値モデルと検定	62
5.4.2 結果と考察	64
5. 5 結 論	70
6. 総 括	71
謝辞	75
参考文献	76
要 旨	81
Summary	83

1. 諸 言

我国は四方を海に囲まれ、大小を含め約 6800 あまりの島で成り立っている。このうち面積の大きい本州、北海道、九州、四国を除くと、その大半が面積の小さい島として存在している。このなかで、表層を石灰岩で覆われた南西諸島の小さい島では降水の大半が地下浸透するなど、河川が発達していないことが多く、表流水による通常の水供給システムの建設を困難にしている。このため、人々の生活を支えている水道用水や農業用水といった淡水資源は、ほぼ地下水のみに依存しているのが現状である。

周囲を淡水よりも密度の高い海水で囲まれている小さな島では、淡水と海水の密度差により塩水侵入が発生している。塩水侵入が発生した分、淡水の量は減少するため、利用可能な淡水資源は塩水侵入がない内陸部に比べ少なくなる。さらに面積が小さい島においては、いわゆる淡水レンズと呼ばれる薄いレンズ状の賦存形態を呈し、淡水が極めて少ない。塩水侵入の侵入形態は淡水の地下水位および海水面と密接に関係しており、一般的には淡水域の地下水位が高いほど塩水侵入が生じにくいのに対し、海面の上昇は塩水侵入を助長することになる。

塩水侵入の程度を規制する地下水位の変動は、一般に降水量の多少によって支配され、豊水期は上昇、渇水期には低下する。この年間降水量が、最近の気候変動により経年的に少なくなり、さらに降雨パターンが地下水涵養にとってマイナスとなる集中豪雨的なパターンに変化しつつある。一方、もうひとつの塩水侵入を規制する海水面の変動は、地球温暖化の影響もあり年間 4mm 程度で継続的に上昇を続けている。これらの気象条件の変化は、地下水資源の面からみると、より塩水侵入が生じ易い、すなわち淡水資源が減少していく環境に変化しつつあると言える。このため、小さな島に暮らしている人々にとって貴

重な淡水資源である地下水の保全・確保が、これからますます重要になると考える。

我国では南西諸島の地下水資源を確保する対応策の一つとして、農林水産省や沖縄開発局では塩水侵入を阻止することも含めた地下ダムを建設し、淡水資源の確保に努めている。地下ダム建設過程でダム軸、すなわち止水壁の設置位置は、淡水貯留域をより確保するため既に塩水侵入が進んでいる領域に設けられることがあり、止水壁の上流側には利水に不要な塩水が残留することになる。地下ダムの残留塩水については、揚水等による利水を何時から開始できるのかという地下ダムの運用面から、その挙動予測が極めて重要となる。すなわち、止水壁設置直後に自然に排除されるのか、数年経過すると自然に排除されるのか、あるいは残留塩水を井戸等によって強制的に排除しないといけないのかなど、残留塩水の問題は淡水利用を開始する上で極めて大きな課題である。ところが、これまで地下ダムについては淡水を貯留する機能に関する部分については多くの研究があるが、この止水壁建設により残留する塩水の排除機構についてはあまり研究されていない。

そこで今回の研究では、まず被圧地下水を対象に塩水侵入、排除実験を行い止水壁設置後の残留塩水の定性的評価を行う。次に不圧地下水を対象とした塩水侵入・排除実験ならびにこの実験結果を再現した密度依存型移流分散解析に基づいて、止水壁を設置した際の残留塩水の挙動を定量的に検討する。この中で残留塩水を支配する縦・横分散長の重要性を再確認し、これらを算定する方法を確立するとともに、縦・横分散長を変化させたときの残留塩水の挙動について予測解析を行う。最終的には、これら室内スケールでの検討を現地スケールへ展開したとき、止水壁設置時の残留塩水の挙動について室内実験結果と同じような結論が得られるのか数値解析を用いて検討を加えている。

以上の検討により、地球温暖化により減少が懸念される淡水資源の保全を目的とした地下ダム建設時の運用にあたり、止水壁構築によって淡水貯留が有効に行われるための解決

法を提供する。さらに、既に塩水侵入により生活用水や農業用水の利用ができない、あるいは温暖化により塩水侵入が予想される地域についても、止水壁を設置することにより、塩水が淡水に置き換えられ、淡水利用が可能になることを明らかにする。

本論文の内容の概略を次に述べる。

第一章は諸言、第二章は既存の研究と本研究の位置づけを示している。

第三章は被圧地下水を対象とした塩水侵入・排除実験を実施した結果、さらにこの実験結果を再現した数値モデルに基づいて、止水壁の高さを変化させたときの淡水貯留状況および止水壁設置に伴う残留塩水の排除について考察を行う。特に後者の止水壁検討では、縦・横分散長を把握することの重要性について論述している。なお、実験結果の検討は定性的評価までにとどまり、モデルによる予測検討に用いる主要なパラメーターである縦・横分散長については一般値を用いて検討を行っている。

そこで、第四章では、まず止水壁構築に伴う残留塩水の挙動を把握する上で重要な縦・横分散長の算定方法の検討を行い、色素トレーサーを用いた実験方法を確立している。次に、算定された縦・横分散長を用いて数値解析を行い、ほぼ実験結果を再現できることを検証している。さらに、止水壁構築による残留塩水の排除について予測解析を行い、縦・横分散長比を変化させたときの排除時間へ影響について言及している。あわせて、止水壁設置による塩水排除のメカニズムの考察および塩水排除時間の予測の可能性について言及している。

第五章では、三章、四章において実験スケールで実施してきた止水壁建設による残留塩水の検討を現地スケールでの検討に展開し、実験スケールの予測結果がどのように適用されるか考察している。具体的には鹿児島県の南端に位置する与論島を対象として現地観測

結果を数値モデルで再現した後、モデル上に止水壁を設け、現地スケールでの縦・横分散長比や止水壁の高さを変化させたときの残留塩水の挙動について検討する。

第六章では各章で得られた成果を要約し、論文の総括としている。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

第5次IPCCの報告書によると、地球温暖化により2100年には現在の海水面が最大82cm程度上昇すると予測されており、これに伴い沿岸部においては塩水侵入が進行すると推定される。塩水侵入は、地下水質の低下を招き、海岸帯水層における地下水利用に対して大きな制約となる。さらに近年の異常気象による年降水量の経年的な減少さらには豪雨的な雨の降り方による地下水涵養量の減少などにより地下水位の低下により塩水侵入が助長され、海岸帯水層はより深刻な危機に瀕している。

一般に沿岸部では、地下水利用が多く塩水侵入による水質悪化、それによる揚水可能量の減少は、沿岸で暮らす人々の生活・生産活動に重大な支障をもたらすことが懸念される。この地下水障害を克服していくことは重要な課題である (Bear et al., 1999)。これまで塩水侵入に対する対策としては、(1) 地下水揚水量・揚水時間の削減や揚水地点配置の見直し、(2) 涵養域から浸透や涵養井からの人工涵養、(3) 塩水の揚水除去、(4) 淡水注入による淡水領域拡大、(5) 止水壁の構築、(6) 埋め立てによる陸域の拡大などが提案されている (Oude Essink, 2001)。

この中で浸透性の高い地質条件をもつ日本の南西諸島では、地下水資源を確保するため、貯留機能をもち、一部塩水侵入の抑制も可能である地下ダムがすでに8か所構築されている (実施中の地下ダムを含めると11か所となる)。これまでの地下ダムに関する研究は、持続的な飲料水の確保、作物生産のための持続した水の供給、および止水壁建設による塩水侵入防止といった地下止水壁設置の利点について言及してきた (Hanson and Nilsson, 1986 ; Nishigaki et al., 2004 ; Nagata et al., 1994) 。さらに、海岸帯水層における塩水の挙動を理解するために、多くの調査で室内実験と数値計算が行われている

(Ataie-Ashtiani et al., 1999 ; Momii et al., 2005 ; Nakagawa et al., 2005 ; Illangasekare et al., 2006) . しかしこれらの研究は，地下ダムの淡水貯留に関する検討が多く，止水壁設置後の貯水域に残留する塩水の挙動について直接言及しているものはほとんどない．また，止水壁設置後の貯水域に取り残された塩水楔の一部は停滞したままであると仮定されてきたが，いくつかの実験と数値計算により，塩水が閉鎖された止水壁から流出することが示された(Goswami and Clement, 2007 ; Oswald et al., 2002 ; 中川ほか, 2004) . さらに，Luyun et al. (2009)によって不圧帯水層における止水壁設置による残留塩水の挙動について検討が行われ，分散係数の評価が重要であることが指摘されている．ただしここでは塩水排除過程の定量的な評価までには至っていない．

これらを踏まえて，本研究では，まず被圧地下水を対象として止水壁設置による残留塩水の挙動について定性的な検討を行い，縦・横分散長評価の重要性を確認する．次に，縦・横分散長を把握するための実験・解析手法の確立する．また，その結果に基づいて塩水侵入・排除過程の検証・予測を行うとともに，塩水排除メカニズムについて考察を加える．最後に，現地スケールでの止水壁の建設による残留塩水の挙動について予測を行い，現地への適用について考察する．

3. 被圧地下水における止水壁設置後の淡塩水の挙動

3. 1 諸 言

本研究では、止水壁による塩水制御を検討するにあたって重要である被圧帯水層における止水壁設置による残留塩水の挙動について検討する。不圧帯水層における止水壁設置による残留塩水の挙動については、Luyun et al. (2009)によって検討が行われているが、沿岸域の被圧帯水層における残留塩水の挙動についてはまだ検討が行われていない。さらに、我が国の海岸帯水層は、一般に沖積層と洪積層の間に粘土層などの難透水層を挟む構造をしており、下部の帯水層は被圧帯水層であることが多く、検討の必要性が認められるためである。

本研究では被圧帯水層を対象として、止水壁を設置した際の貯留域に残留した塩水の挙動を検討する。被圧帯水層を模擬した室内実験により、目視により残留塩水の挙動を確認する。続いて数値計算による検討の妥当性を確認するため、実験を再現し、また淡塩水の挙動について考察を加える。さらに止水壁の高さの塩水除去に及ぼす影響と、数値計算において、分散長の設定が塩水除去の評価に及ぼす影響について、それぞれ数値実験的な検討を加える。

3. 2 被圧帯水層での止水壁による塩水制御実験

図 3-1 に実験装置の概要を示す。浸透層部分は、長さ 60 cm、高さ 40 cm、幅 4 cm とした。浸透層の両サイドには淡水(右)および塩水(左)タンクを設けた。浸透層部分は、被圧帯水層を模擬するため、直径が平均 1.2 mm のガラスビーズを充填し、上部に加圧層を模擬したアクリル製の蓋を用意した。塩水位および淡水位を所定の高さに固定するために排

水パイプを淡塩水のタンクに設けている。供給する塩水は赤色の食用色素で着色し、密度が 1.025 g/cm^3 になるように調整した。

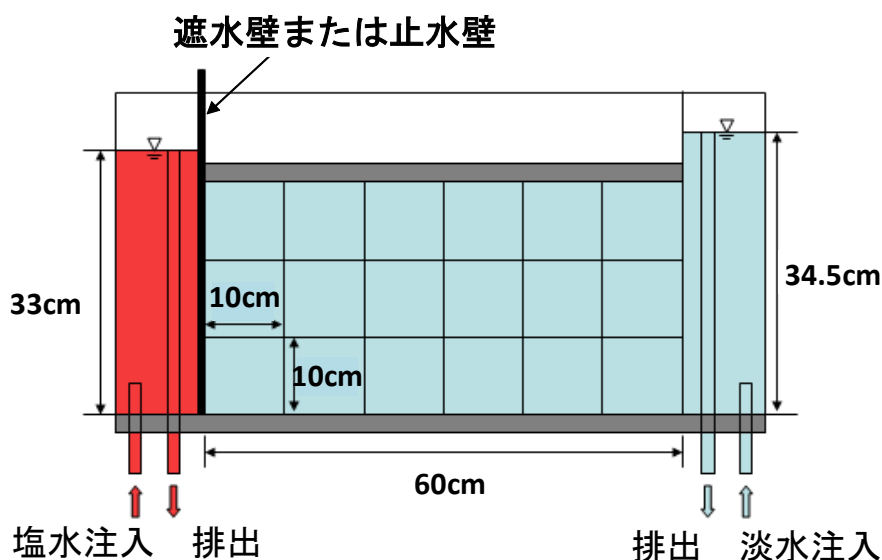


図 3-1 実験装置の概要

実験の手順は次のようである。まず実験浸透層をイオン交換水で満たした。続いて両サイドの淡塩水タンク内の排水パイプを調整し、それぞれの水位を 34.5 cm および 33.0 cm に固定した。淡水の流れが十分安定した後、実験浸透層の飽和透水係数を決定した。その後、遮水壁を塩水タンクと浸透層の間に挿入し、左側タンクのイオン交換水を塩水と置き換えた。遮水壁を取り除くことによって塩水が浸透層内に侵入し始める。塩水侵入が平衡状態に到達し、塩水くさびを形成するまでを「塩水侵入実験」とする。この後、塩水タンクと浸透層の間に所定の高さ (25 cm および 27 cm の 2 ケース) の止水壁を挿入した。この止水壁挿入後を「止水壁挿入実験」とする。「塩水侵入実験」および「止水壁挿入実験」の両方において、塩水の挙動を所定の時間間隔でデジタルカメラにより撮影し、塩水楔の先端位置を記録した。

図 3-2 に止水壁が 25 cm の実験結果を示す。浸透層全体が淡水で満たされた初期状態から、遮水壁を外すことにより塩水が徐々に侵入し、塩水楔の形状および先端位置は実験開始 1 時間で定常状態に達した。続いて浸透層と塩水タンクの間には止水壁を設置した。塩水楔の先端位置は徐々に後退し、最終的には全ての塩水が排出されることを確認した。塩水楔の後退時間は止水壁挿入後 20 時間程度を要し、塩水侵入に要した時間の 10 倍以上であった。これ以降の 3 章における「濃度」は相対濃度を表す。相対濃度 100 %は、塩分濃度 35000 mg/L であり、本研究での密度 1.025 g/cm³ の塩水に相当し、相対濃度 0 %は、塩分濃度 0 mg/L に相当する。

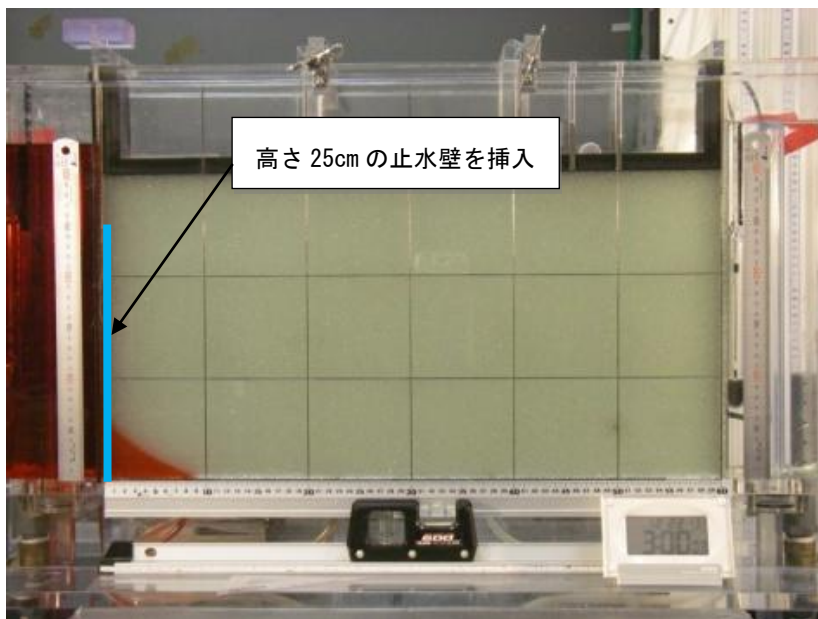
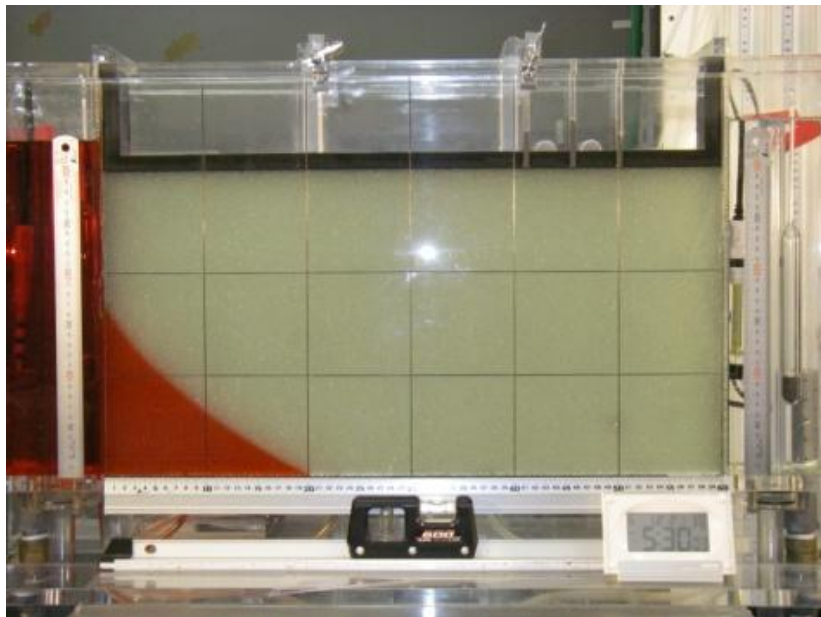


図 3-2 室内実験結果

<上段：塩水侵入実験（実験開始 2 時間後）、下段：止水壁挿入実験（挿入 8 時間後）>

3. 3 数値計算による止水壁設置後の淡塩水挙動の検討

3. 3. 1 SEAWAT2000 による数値計算の概要

室内実験で観測された塩水の挙動を再現すること、および詳細な淡塩水の流動メカニズムを明らかにすること、さらに被圧帯水層における止水壁の挿入効果についての数値実験を実施するため、米国地質調査所で開発された SEAWAT2000 Ver4.0 を用いて数値計算を行った。本研究では、地下水流れについては PCG 法（前処理付き共役勾配法²¹⁾）によって、移流分散方程式は移流項を TVD 法（全変動量逓減法）分散項を GCG 法（一般化共役勾配法）によって解いた。

計算領域は、実験結果にあわせて長さ 60 cm × 高さ 30 cm とした。計算条件をまとめたものを表 3-1 に示す。差分格子間隔については 0.25 cm とした。格子ペクレ数は、1 次元の一樣流れを仮定したとき、人工的な振動を生じないための格子間隔 Δx を示している。

表 3-1 数値計算に用いた諸条件

淡水位	cm	34.5
塩水位	cm	33
淡水密度	g cm^{-3}	1
塩水密度	g cm^{-3}	1.025
透水係数	cm s^{-1}	1
縦方向分散長	cm	0.12
横方向分散長	cm	0.012
X方向格子点間隔	cm	0.25
Y方向格子点間隔	cm	0.25
地下水流動方程式の解法		
行列の解法		PCG
収束条件	cm	1.0×10^{-3}
差分時間間隔	s	1.73×10^{-2}
移流分散方程式の解法		
移流項の解法		TVD
クーラン数		0.1
収束条件	kg m^{-3}	1.0×10^{-5}
分散項の解法		GCG

本解析の格子ペクレ数は 2.08 であり，安定条件とされる $Pe (= \Delta x / \alpha_L) < 2$ をわずかながら超過している．ここで α_L は縦方向の分散長である．数値計算では実験装置を用いた透水試験の結果や事前に検討した結果に基づいて設定している．なお縦横分散長比については，既往の文献に倣い，横方向分散長 α_T : 縦方向分散長 $\alpha_L = 1:10$ と設定した．地下水流れの境界条件については，両端を静水圧，上下端を不透水境界とした．

移流分散の境界条件については，淡水側の濃度は 0 %，上下端は濃度勾配無し，塩水側は計算領域の外側に流れが向う場合に分散フラックス=0，計算領域の内側に流れが向う場合を濃度 100 %とした．初期条件については，地下水流れでは静水圧分布，濃度は領域全体 0 %とした．

3. 3. 2 数値計算による室内実験の再現

図 3-2 の実験結果に対応する計算結果を図 3-3 に示す．塩水侵入開始後 2 時間の結果をみると，塩水の先端位置が 20cm に達しておらず実験に比べ遅れている．止水壁挿入後 5 時間の結果では，塩水楔の形状がやや異なるものの，全体として概ね良好に実験結果を再現していると判断できる．止水壁挿入後，塩水が淡水の流出に伴い，徐々に洗い出されることが分かるが，この時の塩水内の流向分布を図 3-4 に示す．「塩水侵入実験」では，塩水は水平からやや下向きに進んだ後，淡水の流向に沿って斜め左上に向かって移動し領域外に流出している．このときの左端における塩水の流速は淡水に比べて 1/10 以下と小さい．「止水壁挿入実験」では，止水壁により閉じ込められた塩水は，水平方向に進んだ後，斜め左上に向かって移動し，最終的には遮水壁に沿って上向きに移動する．また斜め左上に向かって移動した塩水の一部は止水壁近傍において下向きに移動していることが確認できる．

塩水はこの現象を繰り返しながら徐々に排除されていると考えられる。なお排水過程における塩水濃度は、経時的に低下しているが、その塩水塊の形状はほぼ三角形を示しており、この形状は排水終了まで維持されていることが分かる。

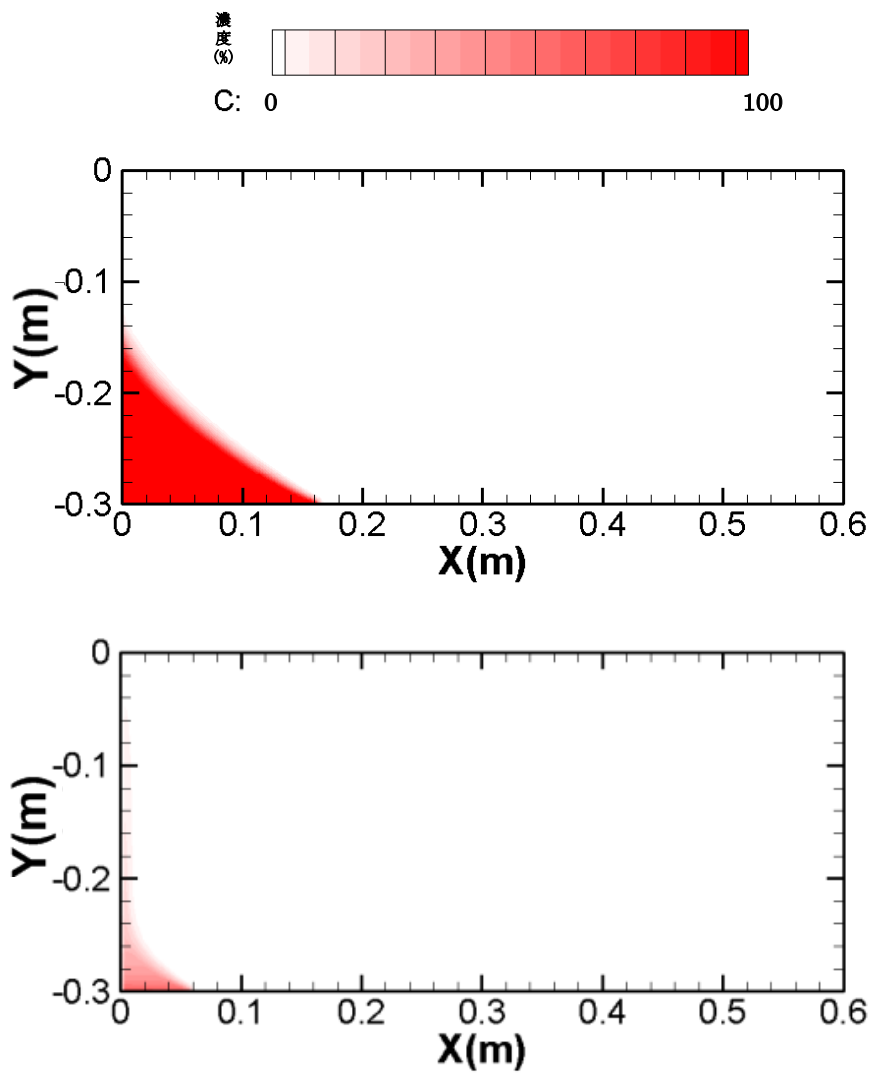


図 3-3 数値計算結果

上段：塩水侵入実験(実験開始 2 時間後)，下段：止水壁挿入実験(挿入 8 時間後)

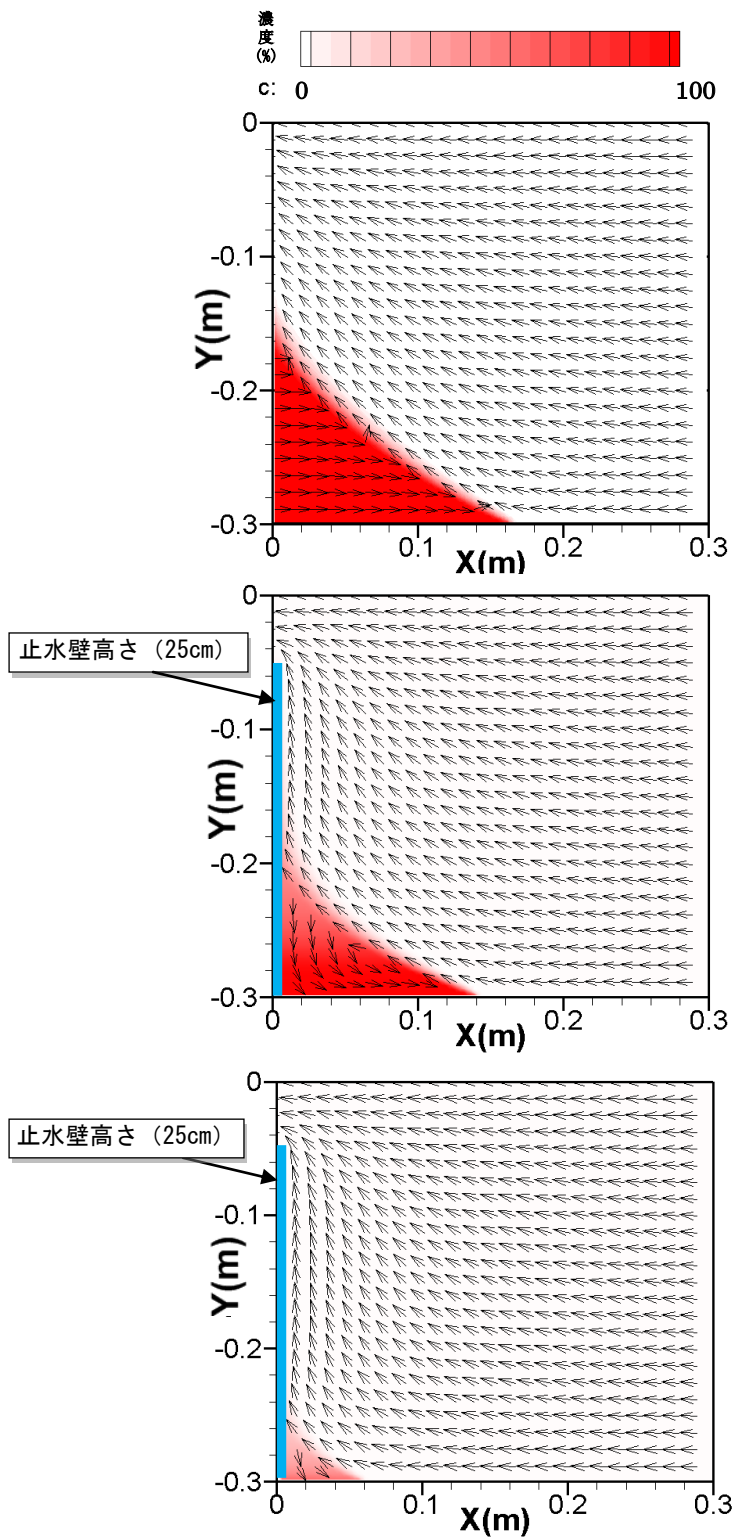


図 3-4 数値計算結果の流向と塩分濃度分布 <上段：塩水侵入実験(実験開始 3 時間後), 中段：止水壁挿入実験 (挿入 29 分後), 下段：止水壁挿入実験 (挿入 576 分後)>

3. 3. 3 止水壁高さの塩水排除に及ぼす影響

止水壁の高さが塩水排除に及ぼす影響を検討するため、止水壁の高さを、25 cm, 20 cm, 15 cm とした場合の3 ケースについて数値実験を行った。図 3-5 にそれぞれのケースについて、止水壁挿入後、144 分の塩水濃度分布を示している。明らかに 15 cm のケースの塩水塊が他よりも小さくなっており、塩水の洗い出しも早いことが分かる。この 15 cm は、塩水侵入実験の定常状態における止水壁挿入位置の塩水楔の高さに相当する。

図 3-6 にそれぞれのケースの塩水楔の先端位置の変化を示す。この先端位置は、塩水侵入実験における定常状態の先端位置を基準とした割合で示している。すなわち、先端位置 (%) = 止水壁挿入実験の先端位置 ÷ 定常状態の先端位置 × 100 とした。なお先端位置は濃度 0.28% が基盤と交差する点とした。

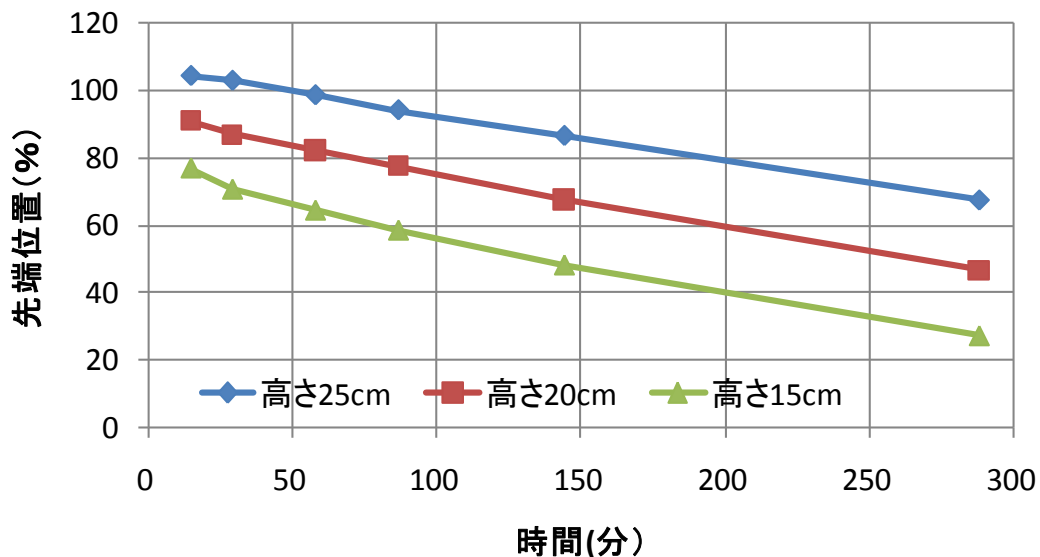


図 3-6 塩水楔先端位置の変化

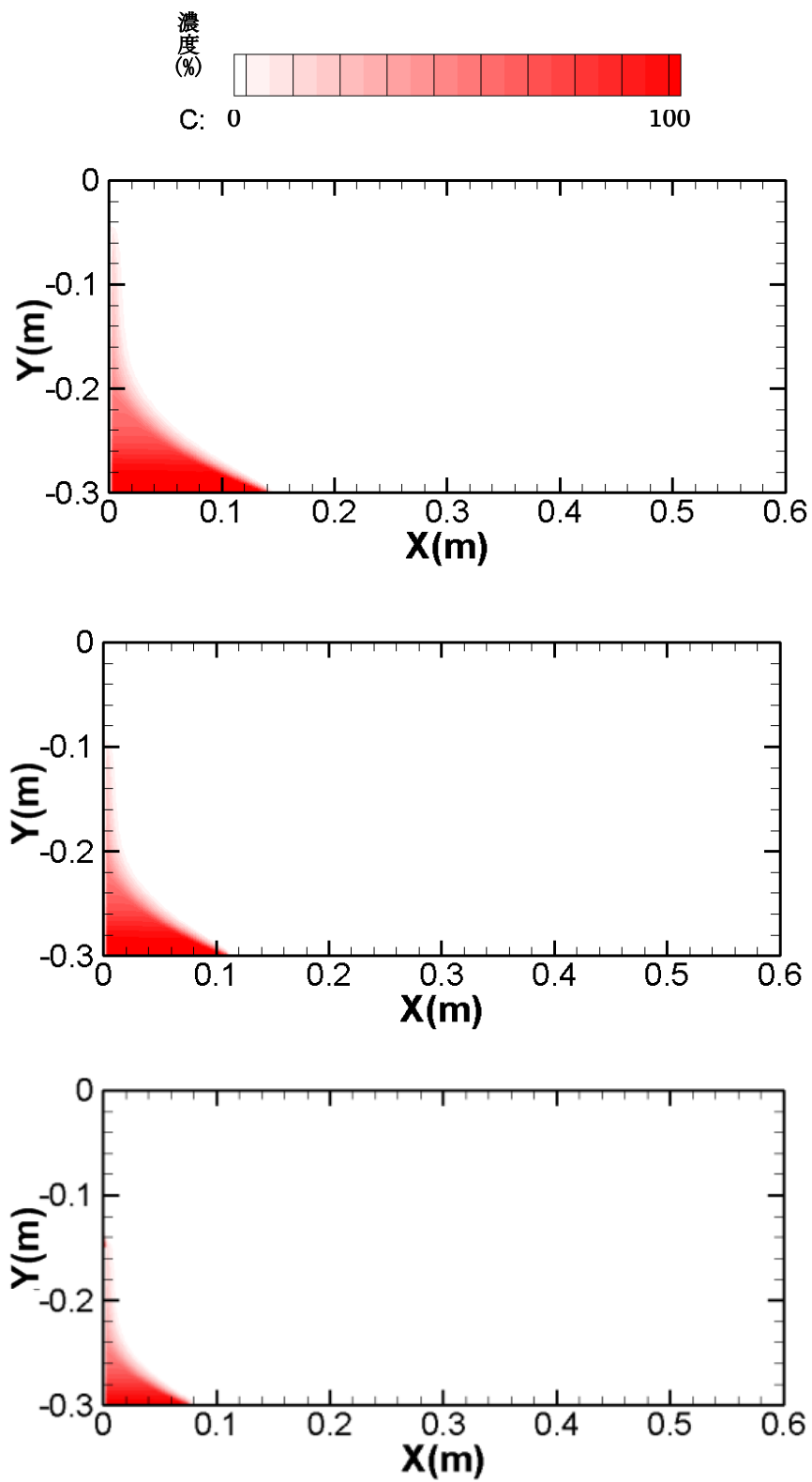


図 3-5 止水壁挿入 144 分後の塩水塊 <上段：止水壁高さ 25cm, 中段：止水壁高さ 20 cm, 下段：止水壁高さ 15 cm>

図より、止水壁の高さが低いほど先端位置の移動時間が早くなる傾向がみられる。これは止水壁の高さが低い場合、すなわち塩水塊が排出される開口部（止水壁の上端から上）が広いほど、塩水が洗い出される幅が大きくなり、塩水楔先端部の後退が早くなったと考えられる。ただし、塩水楔の高さより低い止水壁の高さ 10cm のケースでは塩水の洗い出しはなくなる。したがって、塩水排除という観点でみると、止水壁の高さは塩水楔の高さとほぼ等しいかそれ以上が必要と考える。なお移動時間が早い傾向（勾配が大きい）は 100 分以下で見られ、100 分以上経過すると先端位置の変化割合はどの高さでも一定になっている（勾配はほぼ同じになる）。また止水壁の高さが低いほど塩水楔の先端部分はより後退していることが分かる。

以上の結果より、今回実施した実験と解析において止水壁を挿入して残留塩分の洗い出しが効果的であるのは、止水壁挿入位置における塩水楔の高さにほぼ等しい高さであることが分かった。

3. 3. 4 縦横分散長比が塩水排除に及ぼす影響

残留塩水が洗い出される過程を詳細に調べた際に、残留塩水塊の内部で循環流が生じ、その外側に流れている淡水が塩分を輸送し、徐々に領域外へ排除されることが分かった。したがって、塩水楔に対し、垂直方向である横方向の分散長を正確に把握することが、止水壁の塩水排除を評価する上で重要であると考えられる。よって、ここでは縦横分散長比が塩水排除に及ぼす影響を検討した。止水壁の高さが、25 cm の場合を対象として、縦横分散長比が、横方向:縦方向=1:2, 1:10, 1:20 の 3 ケースについて、それぞれ「塩水侵入実験」と「止水壁挿入実験」に対応する数値計算を実施した。なお縦方向分散長は表 3-1 に示した一定の値を用いている。図 3-7 にそれぞれのケースについて、止水壁挿入 144 分後

の濃度分布と流速ベクトル分布について、塩水楔周辺 ($X=0.03\sim 0.10$ m, $Y=-0.23\sim -0.30$ m)を拡大したもの示す.

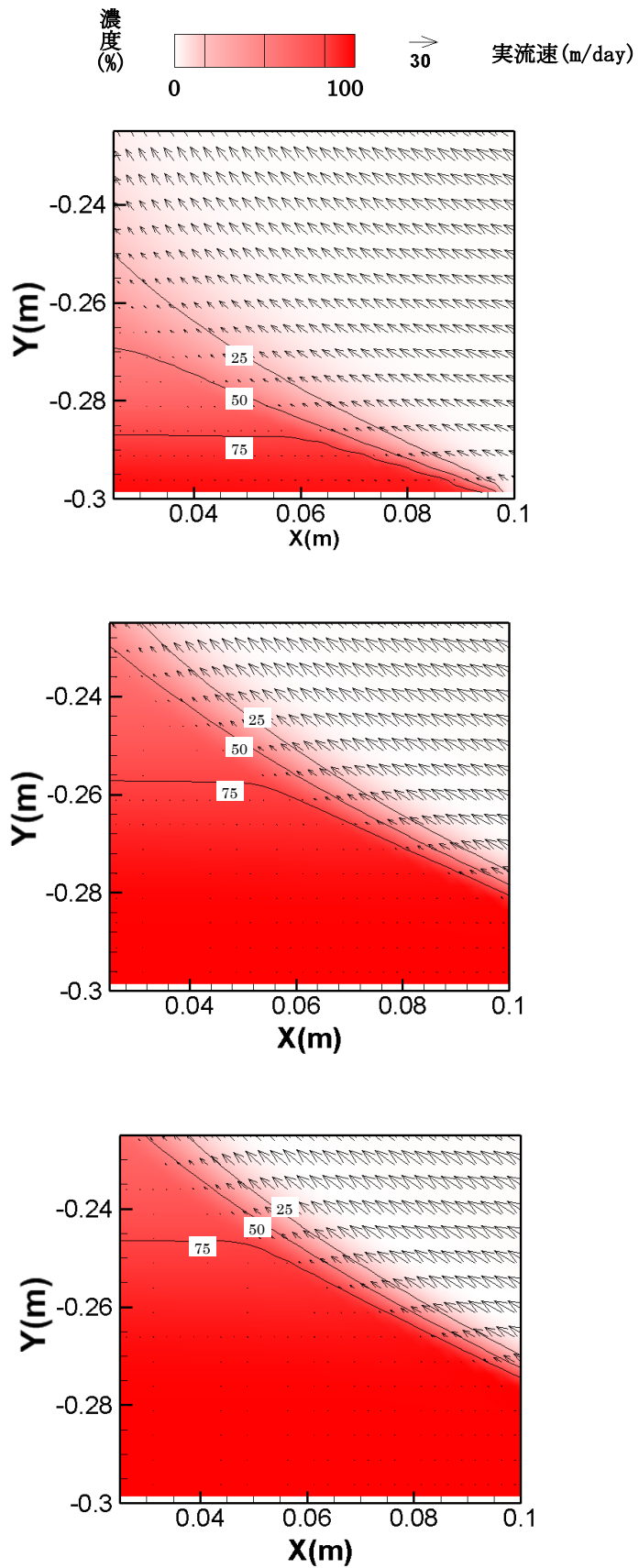


図 3-7 分散長比を変化させたときの濃度分布および流速ベクトル分布 (図中の数値は相対濃度%), 上段: 横方向: 縦方向=1:2, 中段: 横方向: 縦方向=1:10, 下段: 横方向: 縦方向=1:20

1:2 のケースの洗い出しが進行していること、1:20 のケースの洗い出しの進行が遅れていることが分かる。また塩水塊からの濃度拡散（濃度 25～50 %）の幅が、1:2 に比べて 1:20 のケースが狭いこと、およびこの幅の中で流速が変化していることが分かる。この拡散幅内に淡水流出による洗い出し方向のベクトルが位置するので、この拡がり大きいほど塩分の排除に効くことが想定される。この濃度拡散の幅の大きさは、流動方向と直交する方向の濃度拡がりを支配する縦横分散長比の違いに起因していると考えられる。

図 3-8 に「塩水侵入実験」の、図 3-9 に「止水壁挿入実験」の数値計算結果から得られた塩水楔の先端位置をプロットした。

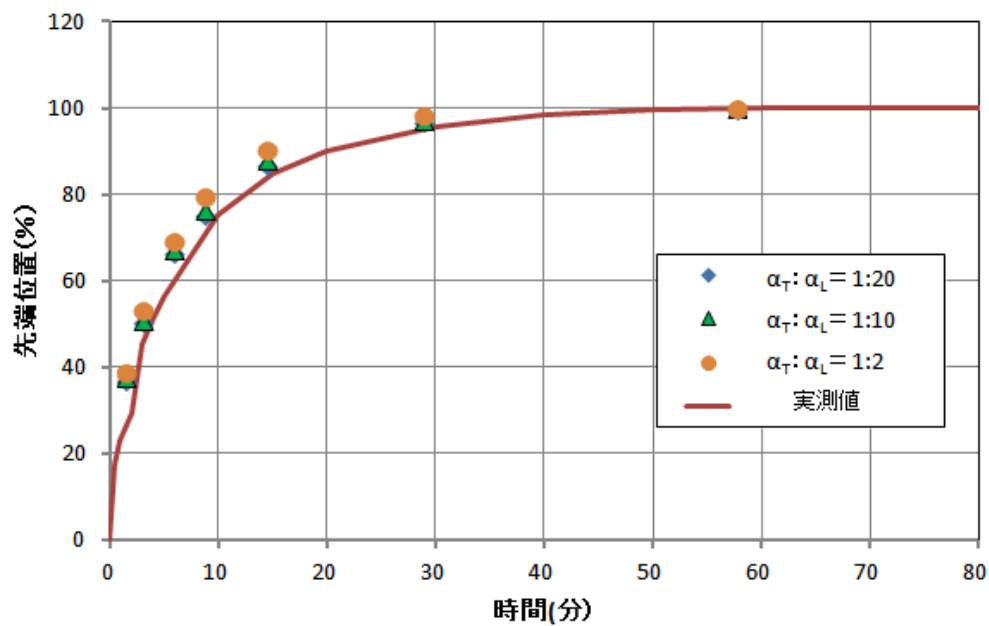


図 3-8 塩水侵入過程における分散長比の影響

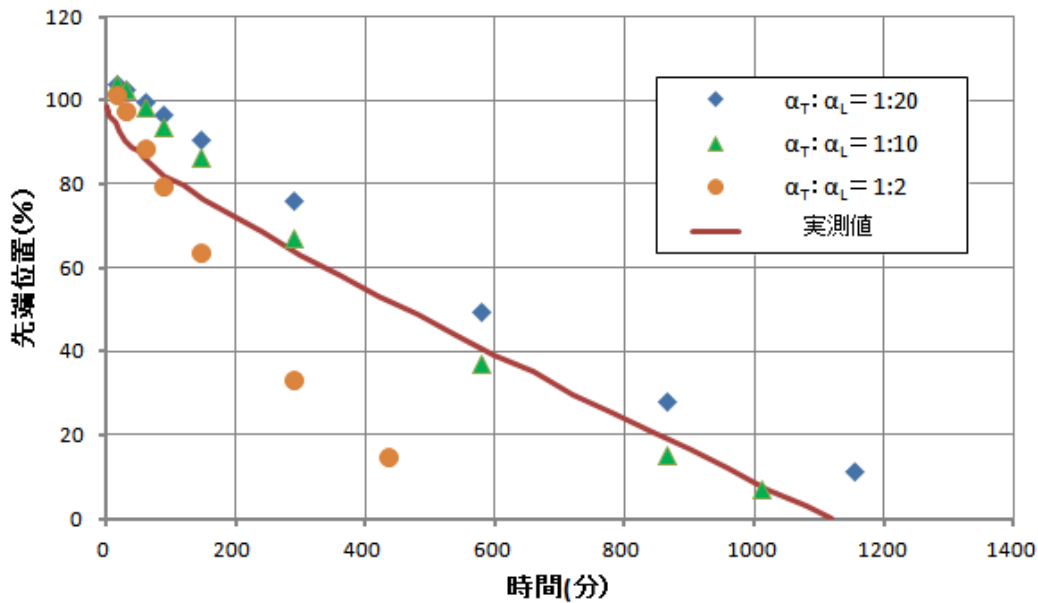


図 3-9 塩水排除過程における分散長比の影響

塩水侵入実験においては、ケース間で大きな差が見られないが、1:20 のケースが最もよく一致しているようである。止水壁挿入実験においては、初期の急激な後退は、1:2 のケースが良く一致しているが、300 分後以降における塩水楔先端部分の後退の傾向は、1:10 のケースが最も良く再現していると言える。

塩水侵入過程では、塩水が浸透層内部へ向かって侵入していく水平方向が主流方向であるので、横方向分散長の違いは塩水楔先端部の位置にあまり影響しないと考えられる。一方、止水壁挿入後の塩水排除過程では、淡水の流出に伴う塩水の洗い出し方向が主流方向になり、塩水塊からの拡がり、横方向分散長で評価されることになるので、その値の違いが塩水楔の縮小と先端部の後退に大きく影響したと考えられる。このように止水壁を挿入して、止水壁内部に残留した塩水の排除を、数値計算によって評価する場合は、縦横分散長比の与え方が極めて重要と言える。

3. 4 結 論

本研究では、まず被圧帯水層を模擬した室内実験により、不圧帯水層の場合と同様に止水壁を挿入すると塩水楔の先端位置は徐々に塩水タンク側へ後退し、最終的には全ての塩水が排除されることを確認し、止水壁設置の塩水侵入を防ぐための有効性を確認した。続いて、格子ペクレ数に関する安定条件をほぼ満足する精緻な数値計算を実施し、今回の実験を再現した。この数値モデルを用いた予測解析によると、止水壁を挿入して残留塩分の洗い出しが効果的であるのは、止水壁挿入位置における塩水楔の高さにほぼ等しい高さであれば良いということが分かった。この止水壁の高さに関する結論を普遍化するためには、室内実験も含め境界条件等を変化させた複数の応答解析を行う必要がある。また残留塩水が洗い出される過程を詳細に調べた際に、残留塩水塊の内部で循環流が生じ、その外側を流れ塩水タンク側へ流出している淡水が塩分を輸送し、領域外へ塩水を排除していることが分かった。この塩水排除過程における主流方向である縦方向は、淡水流出に伴う洗い出し方向であり、塩水塊からの拡がりは、横方向である。したがって横方向の分散長がこの過程を支配していると考えられる。被圧帯水層において、止水壁挿入による残留塩分の洗い出しを数値計算によって検討する場合、正確な横方向分散長を与える必要があることを示唆している。

本研究は、被圧帯水層における止水壁構築によって淡水貯留が有効に行われるための解決法を提供し、塩水侵入により生活用水や農業用水の利用ができなくなっても、止水壁により塩水が淡水に置き換えられることにより利用できる可能性を示した。

4. 不圧地下水における塩水の侵入・排除過程に及ぼす分散長の影響

4. 1 諸 言

本研究では、縦・横分散長を把握するための実験・解析手法の確立、その結果に基づく塩水侵入・排除過程の検証・予測、さらに塩水排除メカニズムについて考察を加える。これらの結果により、不圧地下水を対象とする止水壁を設置した時の貯水域に残留した塩水の挙動を定量的に検討する。まず、不圧地下水の流動場を模擬した室内実験装置に、着色したトレーサーをパルスおよび連続的に注入し、この状況をデジタルカメラで撮影する。撮影画像はRGB（赤（Red）、緑（Green）、青（Blue）の三原色）に分解し、数値化する。次に、ノイズを除去したデータから、経験式・解析解を用いて縦・横分散長を算定する。また、移流分散解析コードMT3DMS (Zheng and Wang, 1999) を用いて数値解析により縦・横分散長の妥当性を検証する。

次に、着色した塩水を用いて淡水中に塩水侵入を生じさせ定常状態を設置した後、止水壁を挿入して塩水排除実験を行う。ここでは画像解析のほか、電気伝導度センサーにより電気伝導度を測定し、残留塩水の挙動を確認する。また、パルス・連続注入実験で検証された縦・横分散長を用いて、密度依存型移流分散解析コードSEAWAT (Langevin and Guo, 2006; Langevin et al., 2012) による数値解析を行い、塩水侵入・排除実験結果の再現を試みる。さらに、縦・横分散長の設定が塩水除去に及ぼす影響を把握するため感度分析を行い、塩水の排除のメカニズムを考察する。

4. 2 室内実験方法

室内実験装置は、図 4-1 に示すように長さ 100 cm、高さ 40 cm、幅 1.5 cm のアクリル製である。浸透層部分は、直径が平均 1.3 mm のガラスビーズで構成され、装置には水浸状態で自然落下させ充填した。また浸透層の両側には淡水あるいは塩水を定水位で供給できる貯留タンクを設置した。

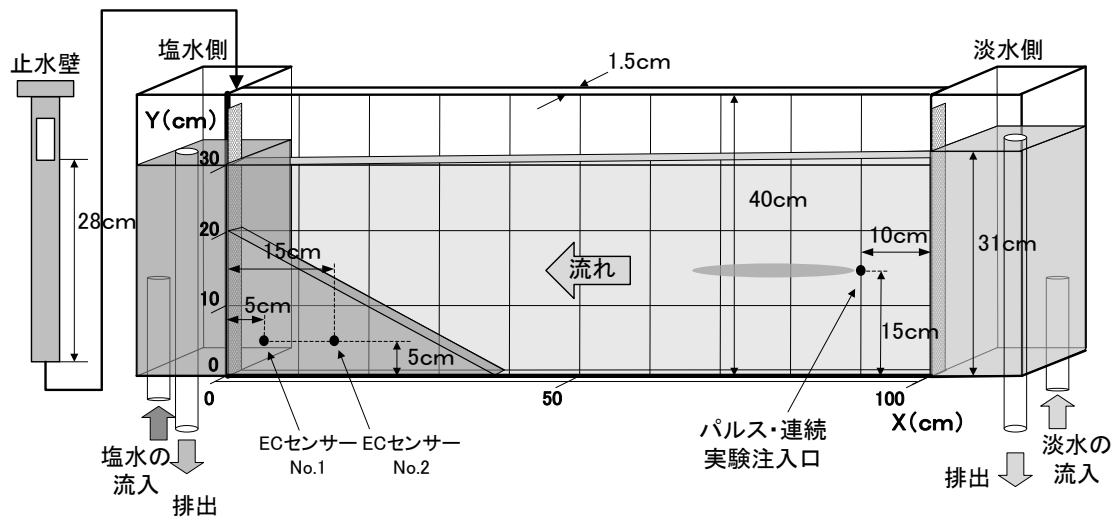


図 4-1 実験装置の概要

パルス・連続注入実験では、装置に淡水の流れを生成した後、幅 1mm のスリットを設けた円筒型の注入口より食用色素（赤色 102 号）もしくは蛍光色素（フルオレセイン）で着色したトレーサーを流し、その動態をデジタルカメラで撮影した。

塩水侵入・排除実験では、装置に淡水の流れを生成した後、左側の貯留タンクより海水の密度に調整し、色素で着色した塩水を流した。塩水侵入が始まり定常状態に達した後、止水壁を挿入し塩水排除を行った。これら一連の動態をデジタルカメラで撮影した。デジタ

ルカメラは SIGMA 製 F1.4 レンズを装着した Nikon 製 D5100 (3269×2448 ピクセル) を用いた。デジタルカメラの設定は、食用色素では絞り値 F1.6, 露出時間 1 秒, 蛍光色素では絞り値 F16, 露出時間 1 秒とし、撮影時間間隔は 0.5~30 分とした。撮影時にはデジタルカメラを三脚で固定し、暗室にて実験を行った。食用色素の光源は写真用レフランプ (500W × 2 台), 蛍光色素の光源は紫外線 (40W × 2 本) を用いた。

室内実験は、①容器全体に一定濃度の色素を流下させ、濃度と色 (RGB 値) との関係を把握するキャリブレーション実験、②実験装置の注入口にパルスあるいは連続でトレーサーを注入するパルス・連続注入実験、③淡水に塩水を侵入させ、止水壁を設置して残留塩水を排除させる塩水侵入・排除実験の 3 種類から構成され、今回はこの順序で実験を実施した。

4. 2. 1 キャリブレーション実験

淡水を実験装置に満たした後、蛍光色素では 0.0, 0.2, 2.0, 5.0, 10.0, 15.0 mg/L, 食用色素では、0.0, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, 50.0 mg/L に調整した濃度のトレーサー溶液を左側タンクに注水した。1/100 程度の動水勾配を保持しつつ、実験装置全体にトレーサー溶液を左から右側に流下させた。実験は、装置全体の淡水が着色したトレーサー溶液ですべて置換されるまで続け、その最終画像を撮影した。この手順を二つの色素について、濃度毎に繰り返した。

4. 2. 2 パルス・連続注入実験

淡水を実験装置に満たした後、表 4-1 に示す水位条件を満たすように左右の貯留タンク

内の排水パイプを調整し、淡水の流れを生成した。流れが定常状態になったのち、実験装置の右下端から上 15cm、左 10cm に設けた注入孔から、トレーサー溶液をパルスあるいは連続で注入し、そのときの画像を経時的にデジタルカメラで撮影した。なお連続注入実験には定量注入ができるシリンジポンプ(LMSKDS270)を用い、5 ml/min で注入を行った。

表 4-1 パルス・連続注入実験の設定条件

		パルス注入実験		連続注入実験		
項目	単位	設定値		設定値		
水位条件	上流側水位	cm	31.0	30.5	30.5	30.5
	下流側水位	cm	30.0	30.0	30.0	30.0
	動水勾配		0.01	0.005	0.005	0.005
注入条件	注入色素		食用色素	蛍光色素	食用色素	蛍光色素
	注入濃度	mg/L	50.0	20.0	50.0	20.0
	注入量	ml/min	5.00	5.00	0.33	0.33
	注入位置		装置下から15cm、右端から10cm			
撮影条件	レフランプ		○		○	
	紫外線			○		○

4. 2. 3 塩水侵入・排除実験

実験装置を淡水で満たした後、両端の貯留タンク内の排水パイプを調整し、それぞれのタンク水位を所定の水位（淡水側 31.0 cm および塩水側 30.0 cm）に固定した。淡水の流れがほぼ定常状態になった後、仕切り板を塩水タンクと浸透層の間に挿入し、左側タンクの淡水をトレーサーで着色した塩水（密度 1.025g/cm³）と置き換えた。次に仕切り板を取り除き、塩水侵入を開始した。塩水侵入が平衡状態に到達し、塩水楔を形成するまでを「塩水侵入過程」とした。この後、左端の塩水タンクと浸透層の間に高さ 28cm の止水壁（28cm

から上部は開口)を挿入し、残留塩水の排除実験を行った。この止水壁設置後を「塩水排除過程」とした。

「塩水侵入過程」および「塩水排除過程」における塩水の挙動については、0.5~30分の時間間隔でデジタルカメラにより撮影した。また塩水侵入部には電気伝導度(EC)センサーを図-1に示す2ヶ所に設置し、塩水侵入時と排除時のEC変化を計測した。

4. 3 解析方法

4. 3. 1 画像解析による濃度変換

全ての室内実験で得られた画像は、画像解析コード「IMAGEJ」(Rasband et al., 1997-2012)を用いて、ピクセルごとに赤色(R値)・緑色(G値)・青色(B値)に分離した。

撮影画像にノイズが少ない蛍光色素トレーサーでは、分離したG値の単色を利用し、キャリブレーション実験から得られた各濃度に対するG値から校正式を求めた。この校正式をもとに、パルス・連続注入実験及び塩水侵入・排除実験の画像を濃度に変換した。

蛍光トレーサーに比べ撮影画像にノイズがやや多い食用色素トレーサーでは、分離したR値とB値が濃度に対して逆感度になることが予備実験から見いだせ、二つの比(R/B)を取るとノイズを低減することができた。この特性を利用し、食用色素では、R/B値とキャリブレーション実験の各濃度から校正式を算定した。この校正式をもとにパルス・連続注入実験及び塩水侵入・排除実験の画像を濃度に変換した。

4. 3. 2 パルス・連続注入実験による縦・横分散長の算定

Bear (1972) によると、一様な流れの場にトレーサーをパルス（瞬間）注入した時の濃度の平面的な拡がりとは図 4-2 に示すように正規分布となる。このトレーサー濃度の中心点から x cm 離れた点の注入濃度で正規化した濃度分布 $f(x,t)$ は、次のように表すことができる。

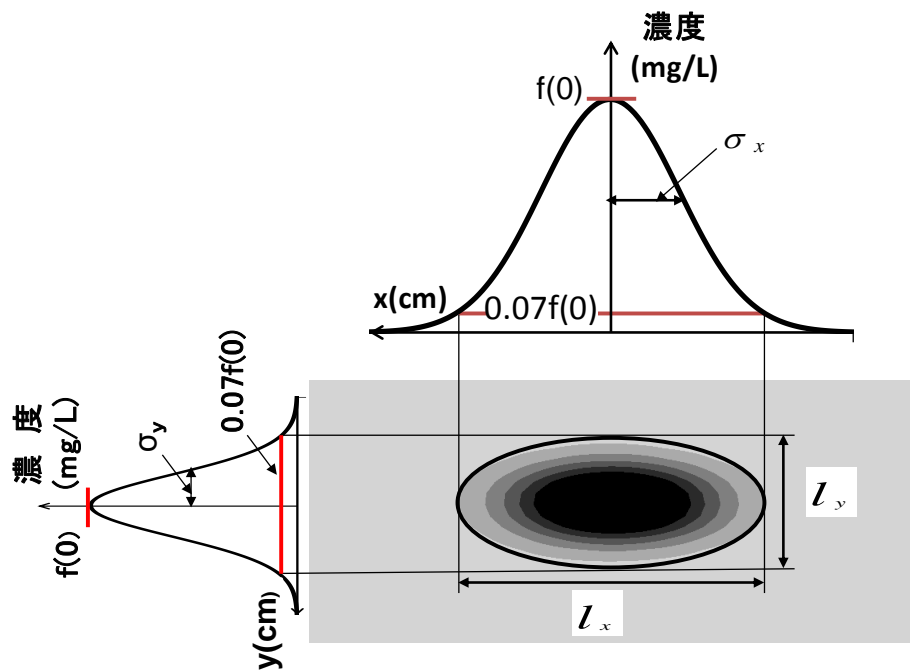


図 4-2 パルス注入実験における濃度と分散の関係

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (1)$$

ここで $\sigma_x^2 = 2D_x t$ である

今回実施したパルス注入実験の画像解析結果によると、初期状態よりも濃度が低下する 30

分後において、画像判読ができる最低濃度は7%であった。これを踏まえ、中心濃度 $f(0,t)$ の7%を示す縦方向の長さ l_x 、横方向の長さ l_y を画像解析結果から読み取り、その値から縦および横方向の標準偏差 σ_x, σ_y を求めた。いま縦方向の場合を考え、(1)式に画像から読み取った l_x を代入すると

$$f\left(\frac{l_x}{2}, t\right) = 0.07 f(0, t) \quad (2)$$

となる。(2)式を整理すると、

$$\exp\left[-\frac{l_x^2}{8\sigma_x^2}\right] = 0.07 \quad (3)$$

となる。(3)式を整理した次式により標準偏差 σ_x, σ_y を算定できる。

$$\sigma_x \cong \frac{1}{5} l_x, \quad \sigma_y \cong \frac{1}{5} l_y \quad (4)$$

一方、Dagan(1982)によると、分散 σ_x^2, σ_y^2 と分散係数 D_x, D_y の関係は次式で表される。

$$D_x = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2}{dt}, \quad D_y = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dt} \quad (5)$$

(5)式によれば、縦軸に分散、横軸に時間として、経時的に得られる実験画像の l_x と l_y から σ_x^2, σ_y^2 をプロットすると、その勾配から分散係数を求めることができる。さらに実験結果より実流速(v)が既知の場合、一様流中の縦と横分散係数は次式により与えられる。

$$D_x = \alpha_L |v| + D_M \quad (6)$$

$$D_y = \alpha_T |v| + D_M \quad (7)$$

ここに、 D_x, D_y は縦と横の分散係数、 α_L, α_T は縦と横の分散長である。上式により縦・横分散長 α_L, α_T を求めることができる。なお浸透層中の分子拡散係数 D_M については十分

に小さく無視できるものとした。

連続注入実験については，(8)式に示す解析解 (Huang et al., 2002) が得られている。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\left(y + \frac{Y}{2} \right)}{2 \sqrt{\frac{x D_y}{v}}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{\left(y - \frac{Y}{2} \right)}{2 \sqrt{\frac{x D_y}{v}}} \right] \right\} \quad (8)$$

ここに， C_0 ：注入濃度， Y ：トレーサーの注入幅， x, y ：空間座標である。ここでは，パルス注入実験の結果から算定された横分散長 α_T を(7)式に代入し横分散係数 D_y を求め，(8)式より x, y 方向の濃度分布を求めた。この濃度分布と実験画像から得られるトレーサー濃度分布とを対比し，得られた結果の妥当性を確認する。

4. 3. 3 数値解析

パルス・連続注入実験で得られた縦・横分散長の妥当性を検証するため，移流分散解析コードMT3DMS (Zheng and Wang, 1999) を用いて数値解析を行う。また，実験と数値解析で検証された縦・横分散長を入力して密度依存型移流分散解析コードSEAWAT (Langevin and Guo, 2006 ; Langevin et al., 2012) を実行し，塩水侵入・排除実験の再現解析を行う。さらに，縦・横分散長比の設定を変えて感度分析を行い，止水壁設置による塩水排除に及ぼす影響について考察した。なお，本研究では，縦・横分散長比は，縦分散長/横分散長= α_L / α_T とする。

数値解析を行った二つのモデルの設定条件は表4-2, 3に示す。また今回の排除実験においては，止水壁とガラスビーズの間に，スムーズな止水壁設置と装置の強度を補うため，厚さは3mmであるが，直径4mm程度の穴をランダムに無数に開けたアクリル板を

挿入している。数値解析において実測値を再現するには、これを考慮する必要があり、
 アクリル板に相当する左端メッシュに数値解析上、仮想的な高い透水係数を与え、再
 現解析を行っている。

表 4-2 パルス注入解析における設定条件

項 目	単 位	設 定
モデルの基本条件		
間隙率		0.4
透水係数	cm/s	1.62
X方向格子点間隔	cm	0.5
Y方向格子点間隔	cm	0.5
地下水流動方程式の解法		
行列の解法		PCG
収束条件	cm	1×10^{-3}
時間間隔	s	0.1
移流分散方程式の解法		
移流項の解法		TVD
収束条件	mg/L	1
分散項の解法		GCG

表 4-3 塩水侵入・排除解析における設定条件

項 目	単 位	設 定
モデルの基本条件		
淡水水位	cm	31.0
塩水水位	cm	30.0
淡水密度	g/cm ³	1.000
塩水密度	g/cm ³	1.025
縦方向分散長	cm	0.190
横方向分散長	cm	0.007
X方向格子点間隔	cm	0.5
Y方向格子点間隔	cm	0.5
地下水流動方程式の解法		
行列の解法		PCG
収束条件	cm	1X10 ⁻³
時間間隔	s	0.1
移流分散方程式の解法		
移流項の解法		TVD
収束条件	mg/L	1
分散項の解法		GCG
	PCG	前処理付き共役勾配法
	TVD	全変動量逓減法
	GCG	一般共役勾配法

4. 4 結果と考察

4. 4. 1 室内試験と画像解析による縦・横分散長の検討

(1) キャリブレーション結果

食用色素と蛍光色素のキャリブレーション試験の結果を図4-3に示す。図中の C はトレーサー濃度である。蛍光色素において、 G 値とトレーサー濃度の関係をみると、濃度 20mg/L まではばらつきの少ない結果が得られた。一方、食用色素における R/B 値と濃度の関係は、濃度 50mg/L 付近でややばらつくが、 30mg/L 以下ではばらつきの少ない結果が得られた。このため食用色素では 30mg/L 以下の濃度に設定してパルス・連続注入実験および塩水侵入、排除実験を行った。これらの室内実験の検討においては、図-3に示す校正式をもとに、画像から実験時の濃度をピクセル単位(0.024cm/pixel)で決定した。

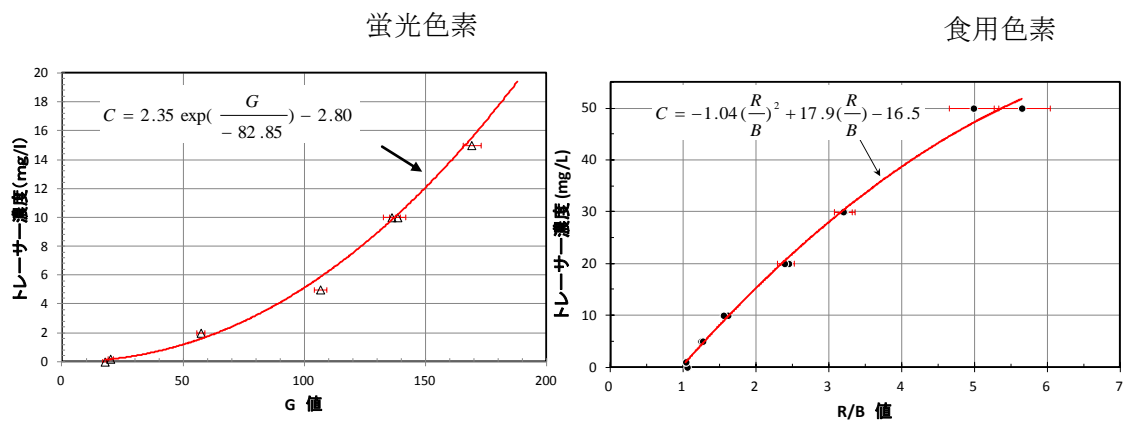


図 4-3 キャリブレーション試験結果

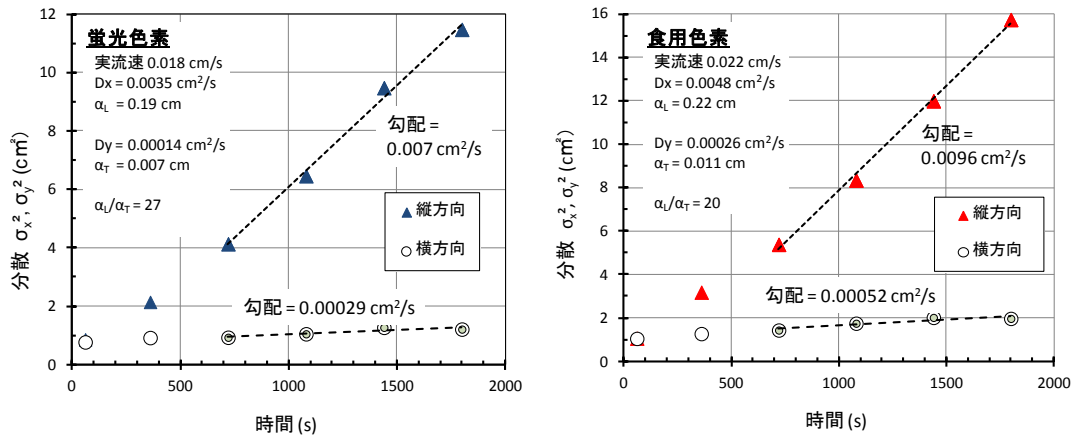


図 4-4 パルス注入実験による縦横分散長の算定

(2) パルス・連続注入実験による縦・横分散長の算定

パルス注入実験における時系列で撮影した画像の解析結果から、それぞれの時間における l_x と l_y を求め、縦・横分散長を算定した(図 4-4)。パルス注入から推定された分散 (σ_x^2 , σ_y^2) の勾配は、縦・横分散長ともにばらつきなく求められ、縦分散長が 0.19, 0.22cm, 横分散長が 0.011, 0.007cm となった。このとき縦・横分散長比は $\alpha_L / \alpha_T = 20, 27$ を示した。

一般に横分散長は縦分散長に比べ小さいオーダーを示し、室内実験においては Spitz (1985)により $\alpha_L / \alpha_T = 10$ が得られている(岡山地下水研究会, 2003)。また、小橋ほか(2004)は 30cm のカラム試験で $\alpha_L / \alpha_T = 10$, 7m の土槽実験で 25 と報告している。一方、現地スケールでは、図 4-5 に示すように Gelhar et al. (1992)は $\alpha_L / \alpha_T = 3 \sim 60$, Pickens et al. (1980)は $\alpha_L / \alpha_T = 3 \sim 100$ と報告し、同じ観測スケールでもある程度の幅をもって縦・横分散長比が得られている。また数値解析では、 $\alpha_L / \alpha_T = 10$ がよく用いられている

(Chang and Clement (2013), Todd and Mays (2004), 稲積ほか(2011), 小田ほか(2010)).

なお、今回の実験結果は、Spitz(1985)による既往室内実験の結果 $\alpha_L / \alpha_T = 10$ よりもやや高い値を示している。

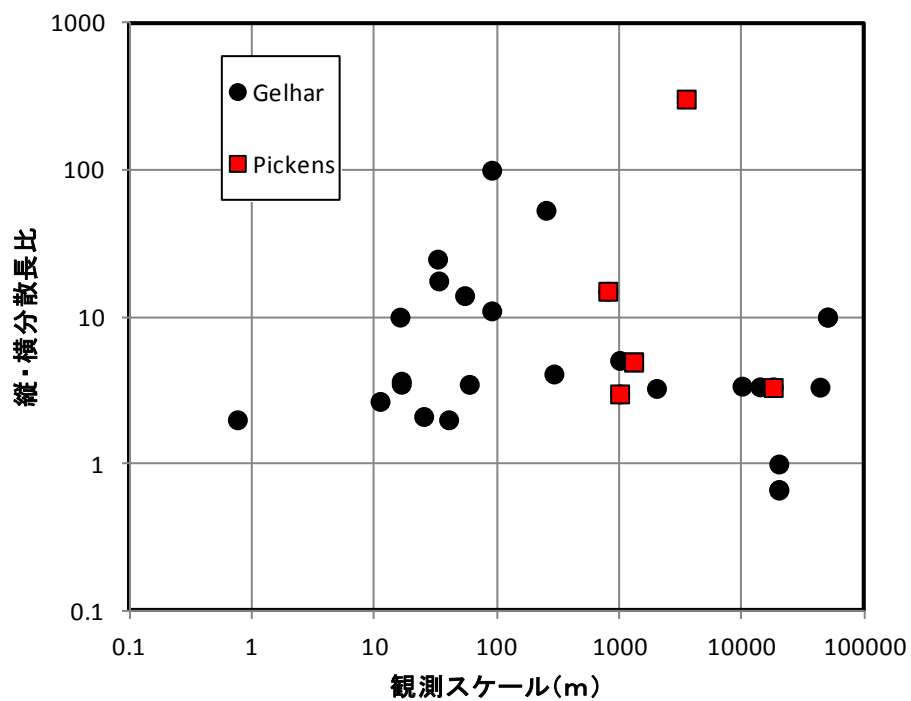


図 4-5 既往資料による観測スケールと縦横分散長の関係

次に、パルス注入実験から算定された縦・横分散長を用いて連続注入実験の解析解から濃度を求めた。これによると、連続注入実験結果をほぼ再現することができ、算定された値の妥当性が確認できた(図 4-6)。幅 0.1cm のスリットをそのまま注入幅として表現することが困難だったため、試行錯誤的に求めた。本実験下では注入幅 0.3cm にすると、最も再現性の高い結果が得られた。また、図 4-6 によると食用色素に比べ蛍光色素の方が低濃度域においてもノイズの少ない安定した濃度を示す画像が得られており、本実験への適応性が高いことが明らかとなった。

さらに、この実験結果から得られた縦・横分散長を密度依存のない移流分散解析コード MT3DMS に入力してパルス注入実験結果の検証を行った。移流分散解析においても実験画像をほぼ再現でき、算定された値の妥当性が確認できた(図 4-7)。

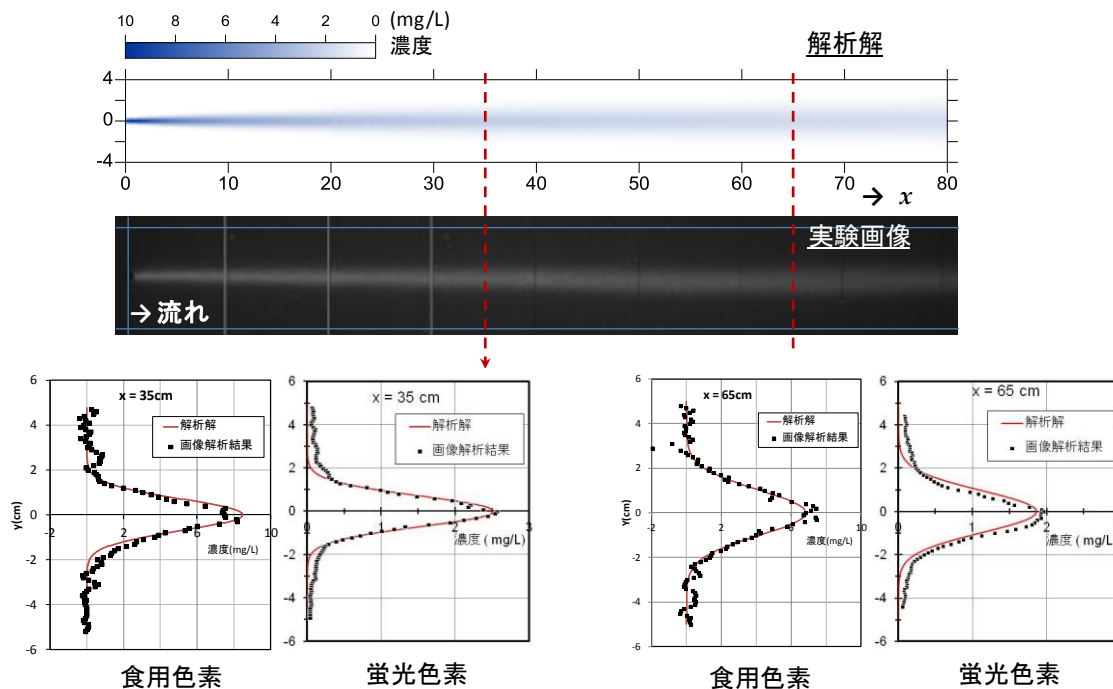


図 4-6 連続注入実験（蛍光色素）に対する実験結果（写真），解析解に基づく濃度分布および x=35cm, 65cm の断面での濃度分布

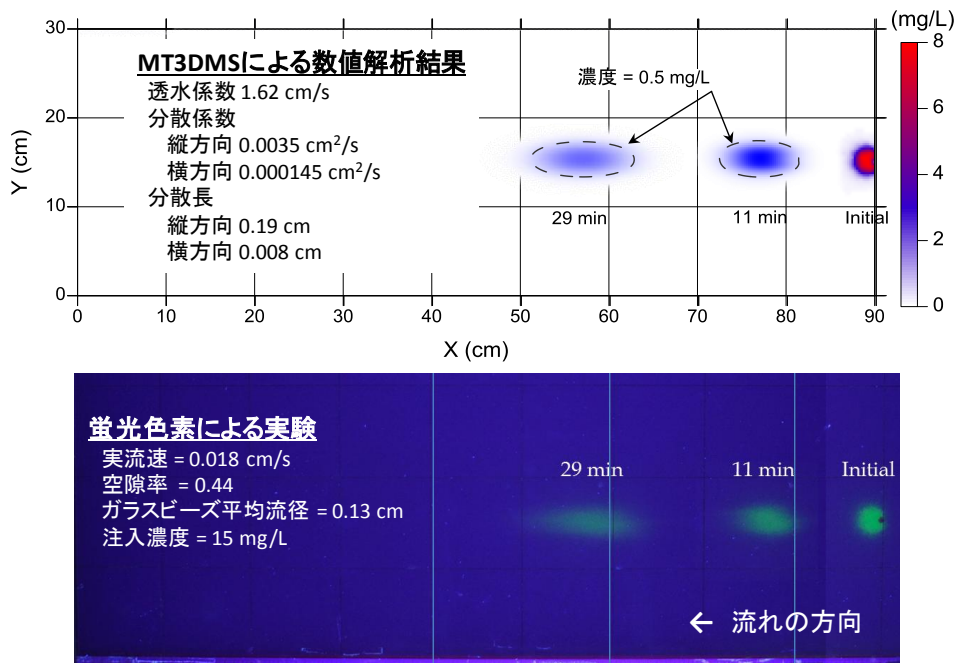


図 4-7 移流分散解析によるパルス注入実験の再現

この移流分散解析においては、初期水位をパルス注入実験の境界条件の水位差(0.5cm)に設定し、初期濃度分布についてはパルス注入開始後 1 分における画像解析結果を与えている。これにより、実験時の複雑な注入形状・瞬間注入という条件を設定することなしにモデル解析を行うことができる。この手法は今回実施したような複雑な注入形状を有したパルス注入実験において、有効なモデル設定方法のひとつと考える。

以上のように縦・横分散長を算定するためには、色素トレーサーを用いたパルス注入実験と連続注入実験、およびこの実験画像のデジタル処理による解析が有効である。本研究で適用したパルス注入実験における分散係数の推定方法は、Elfeki et al.(1997)の方法を参考にしている。本推定方法と Elfeki et al.(1997)の方法は両者ともに、トレーサーの濃度

分布を正規分布と仮定しているが、Elfeki et al.(1997)では、写真撮影したトレーサーの濃度の値は、画像解析により確定していない。つまりトレーサーの広がり形状(プリューム)を楕円とみなし、その形状を肉眼で識別し、プリューム端の濃度の値をプリューム中心濃度の1%と仮定し、(3)式と類似の式を導き、解析している。一方、本研究では、画像解析によりトレーサーの濃度の値を既知にして解析している点が異なり、より定量的な評価が可能と考える。

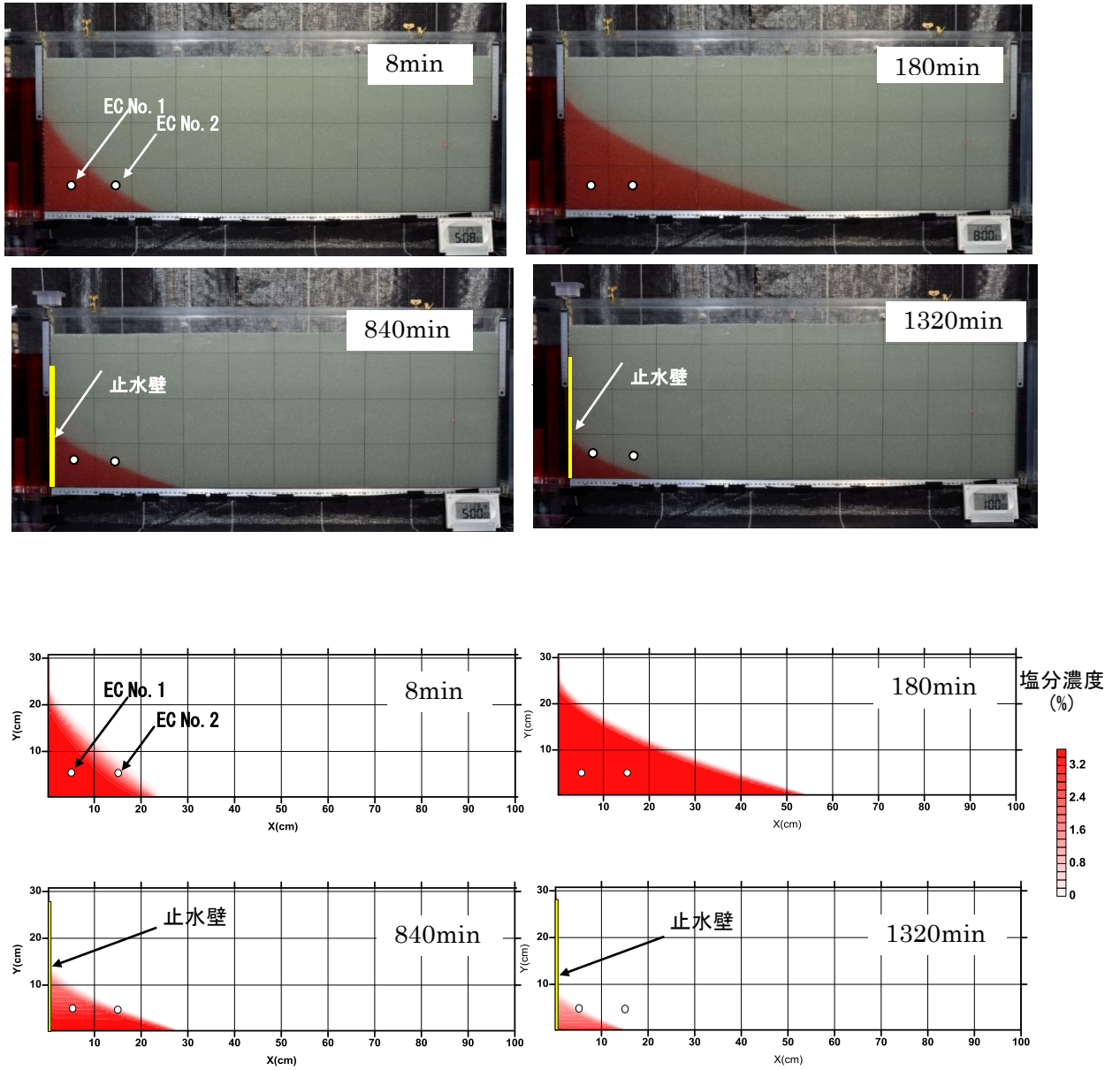
また今回の実験には二つの色素を利用したが、パルス・連続注入実験においては、得られる画像のノイズが極めて少ないことから、蛍光色素を用いたほうが有利であった。一方、後述する塩水侵入・排除実験における蛍光色素を用いたケースでは、着色した塩水塊からの反射による虚像が一部に発生し、真の画像が乱される結果が得られている。このため、塩水侵入・排除実験では蛍光色素よりも食用色素が有効と考える。

4. 4. 2 塩水侵入・排除実験と数値解析による塩水排除機構

(1) 塩水侵入・排除時の実験画像

塩水侵入過程において、淡水の下部に着色した塩水が侵入している時(開始後8分)、および塩水侵入がほぼ定常状態となった時(開始後180分)、さらに止水壁を挿入し、塩水を排除している時(開始後840分、1320分)の実験画像を図4-8に示す。本実験条件下では淡水に塩水を侵入させてから定常状態までには約3時間を要し、このとき塩水楔の先端は右端から約53cmに位置していた。次にこの状態で左端に止水壁を挿入した。この後、止水壁の上流に取り残された塩水はゆっくり排除され、最終的にはすべて淡水に置き換わった。この塩水排除にはほぼ36時間かかり、塩水侵入時と比較して12倍の時間を要

した。



(上段：塩水侵入，下段：塩水排除)

図 4-8 塩水侵入・排除実験画像と数値解析による再現結果

(2) 電気伝導度と画像解析

塩水侵入過程における電気伝導度（EC 値）および画像解析結果から得られた塩分濃度の経時変化を図 4-9 に示す。食用色素による実験結果をみると、左下端から右 5cm、上 5cm に位置する EC センサーNo.1 の塩分濃度は 1 分から 3 分の間に急激に上昇し、0.0%から 3.5%に変化した。同じく左下端から右 15cm、上 5cm にある EC センサーNo.2 の塩分濃度は、約 6 分から上昇し、約 12 分で 3.5%に変化した。画像解析で得られたセンサーNo.1 の位置における塩分濃度は実験結果とほぼ一致し、1 分から 3 分の間に 0.0%から 3.5%に変化した。センサーNo.2 の塩分濃度は、実測値に比べやや早く 5 分から上昇し、その後 EC センサーに比べ緩やかなカーブを描きながら、15 分程度で 3.5%に達した。

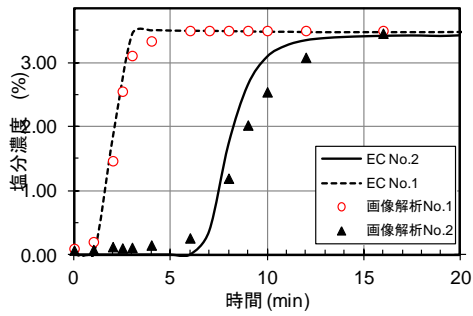
一方、蛍光色素の実験結果によると、EC センサーNo.1 の塩分濃度は食用色素とほぼ同じように変化するが、No.2 の塩分濃度は 8 分から 15 分とやや時間を要している。画像解析のうち、No.1 センサーの濃度変化は解析結果とほぼ一致する。しかし、No.2 では上昇する開始時間が 4 分からと早く、20 分の塩分濃度が 3.0%より低いなど、やや EC センサーの挙動と異なる。

次に食用色素を用いた実験の排除過程における EC センサーの測定結果をみると、止水壁設置後約 700 分から No.2 で塩分濃度の低下が始まり、900 分でほぼ 0.0%に達した。一方、No.1 では 900 分から塩分濃度が低下し始め、1400 分でほぼ 0.0%となった。この No.1 の EC 値は二つの勾配を有して低下しており、900 分から 1200 分までの濃度勾配は、1200 分から 1400 分にまでの濃度勾配よりもはるかに緩くなっている。この現象は画像解析においてもみられ、No.1 の塩分濃度は 800 分より緩やかに低下し始め、1300 分から急激に低下している。次に、No.2 の塩分濃度は 500 分で下がり始め、750 分から急に低下するパ

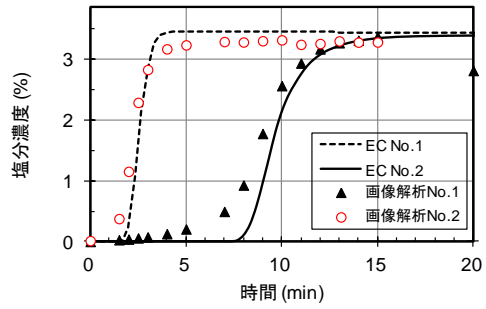
ターンを示す。最終的に画像解析における No.1 の塩分濃度は 1400 分、No.2 では 900 分でほぼ 0.0%となった。

蛍光色素の実験結果をみると、止水壁設置後 850 分から No.2 で塩分濃度の低下が始まり、1100 分でほぼ 0.0%に達している。一方、No.1 では約 1000 分から塩分濃度の低下が始まり、1800 分で 0.0%となっている。この No.1 の EC 値は食用色素と同様に、二つの勾配を有して低下しており、1000 分から 1600 分までの濃度勾配は、1600 分から 1800 分にまでの濃度勾配よりも緩い特徴がみられる。画像解析の結果は EC センサーの変化と概ね類似しているが、1000 分までの濃度のばらつきが大きいこと、さらに、EC センサー No.2 では淡水の電気伝導度の値となっているのに対し、No.2 の画像では、ガラスビーズ内において高濃度の蛍光色素から拡散した光が撮影画像に写り込み、あたかも塩分濃度を保持しているように解析されることなど、食用色素に比べ全体的に再現性が劣る結果となった。

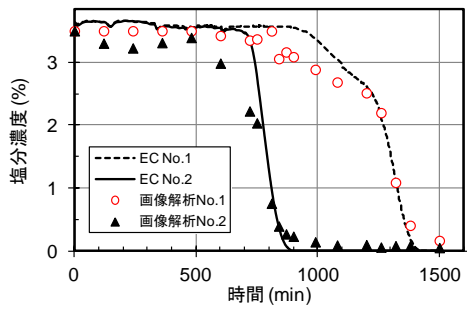
このように食用色素の実験では EC センサーにより得られた電気伝導度の時間的変化を、画像解析によりほぼ再現することが可能である。一方、蛍光色素の実験ではやや EC センサーと画像解析結果に乖離がみられた。これらのことから、数値解析では食用色素の実験結果を対象として、数値モデルによる再現を行う。



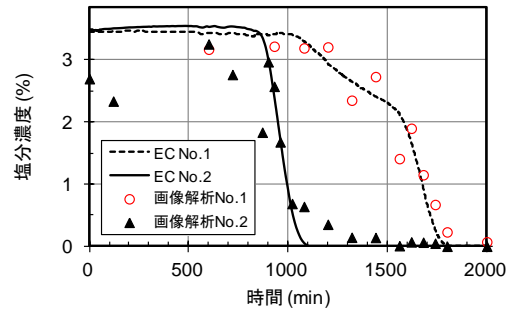
(食用色素実験結果 塩水侵入時)



(蛍光色素実験結果 塩水侵入時)

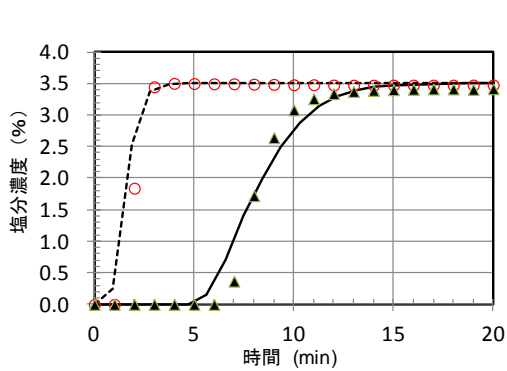


(食用色素実験結果 塩水排除時)

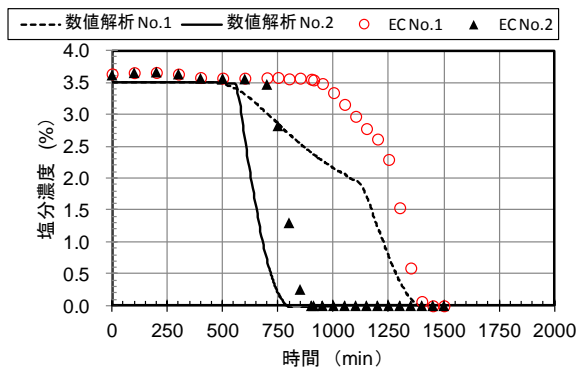


(蛍光色素実験結果 塩水排除時)

図 4-9 塩水侵入・排除実験時の塩分濃度変化



(数値解析 塩水侵入時)



(数値解析 塩水排除時)

図 4-10 数値解析による塩水侵入・排除の実験再現状況

(3) 数値解析による塩水侵入・排除の再現

食用色素で実施した塩水侵入・排除実験をモデル化し、パルス注入実験で得られた縦・横分散長を入力して密度依存型移流分散解析コード SEAWAT により再現計算を行った。塩水侵入・排除実験の数値解析による再現状況を図 4-8 に示す。同図によると、実験画像で見られる①塩水侵入直後は淡塩水境界面の傾斜が約 45 度に近いこと、②ほぼ定常状態に達した塩水侵入時には、淡塩水境界面が約 30 度に変化すること、および③塩水排水時には、淡塩水境界面の角度が 30 度を維持したまま、相似形で塩水領域が時間的に徐々に縮小していくことなど、それぞれの状況が良く再現できている。

図 4-10 には、EC センサー No.1, 2 の位置で得られた塩分濃度の経時変化を示す。同図によると、解析から得られる濃度変化は、ほぼ EC センサーの実測値の経時変化と同様な傾向を示している。

塩水侵入過程の解析結果と実測値を比較すると、実測値よりも解析値の方がやや変化勾配が緩く、画像解析結果に近いが、ほぼ実験結果を再現していた。一方、塩水排除過程においては、解析結果と実測値との間に相違が認められた。この相違については、今後の検討を要するが、数値計算において間隙平均流速 u' に基づく格子ペクレ数

$$Pe = u' \Delta x / D_L \approx \Delta x / \alpha_L = 2.6 \text{ が基準 } Pe < 2 \text{ (Zheng and Bennett, 2002) よりもやや大きく,}$$

数値分散などの計算誤差が生じている可能性もある。このため、現在採用している計算格子間隔 5 mm をさらに小さくして解析を行う必要があると考える。また、強度的な問題等で止水壁とガラスビーズの間に挿入したアクリル板を利用しなくても良いように実験装置を改良することも必要と考える。なお、排除実験において確認された EC センサー No.1 で二つの勾配を有することはモデルで再現されている。

4. 4. 3 横分散長が塩水侵入・排除に及ぼす効果

塩水侵入・排除過程における横分散長の違いに対する濃度変化への影響を把握する。ここでは、実験に基づいて求めた縦分散長を固定し、既往文献 (Chang and Clement (2013), Todd and Mays (2004), 稲積ほか (2011), 小田ほか (2010)) を参考に数値解析で一般的に用いられている縦横分散長比 $\alpha_L / \alpha_T = 10$, 現地スケールで得られたほぼ最大値である $\alpha_L / \alpha_T = 100$, および今回の実験値に基づく $\alpha_L / \alpha_T = 27$ に縦・横分散長比を変化させ、塩分濃度の断面分布および EC センサー No.2 の位置における塩分濃度の経時変化を予測した。なお、この予測解析では再現解析で用いたアクリル板に相当する左端メッシュの高い透水性は今回の塩水排除実験条件下での濃度分布の再現を目的としたものであることから採用せず、一般的な境界条件である (不透水) に置き換えて解析を行った。

(1) 濃度の時間変化

塩水侵入過程における No.2 位置の濃度の時間変化によると、縦横分散長比を変化させても、No.2 の濃度の時間変化には僅かな相違しか認められない (図 4-11)。一方、排除過程における同じ位置における時間変化によると、 $\alpha_L / \alpha_T = 10$ と $\alpha_L / \alpha_T = 100$ の排除時間には 1100 分に及ぶ大きな差が出現した。すなわち、縦・横分散長比が大きいほど排除時間は長く、小さいほど排除時間が短い。今回の室内実験では、縦・横分散長比は数値解析で従来から採用されている一般値 ($\alpha_L / \alpha_T = 10$) よりも大きい値 27 が得られている。この値を採用すると、一般値 ($\alpha_L / \alpha_T = 10$) の解析結果と比べ、1.48 倍の排除時間が必要になる。さらに現地スケールのほぼ最大値である 100 を用いた場合、1.97 倍の排除時間が必要になった。

高橋ほか (2011) が述べているように、塩水侵入過程では縦分散長が主に支配している

のに対し、排除過程では塩淡水境界面に沿う淡水の流れが主流方向で、これと直交する輸送は横分散長が支配している。このため、塩水侵入過程では横分散長を変化させても塩水侵入時間には大きな差が生じないが、塩水排除過程では、横分散長が大きいほど塩分の輸送量が多くなり、排除時間に大きな差が生じたと推察される。

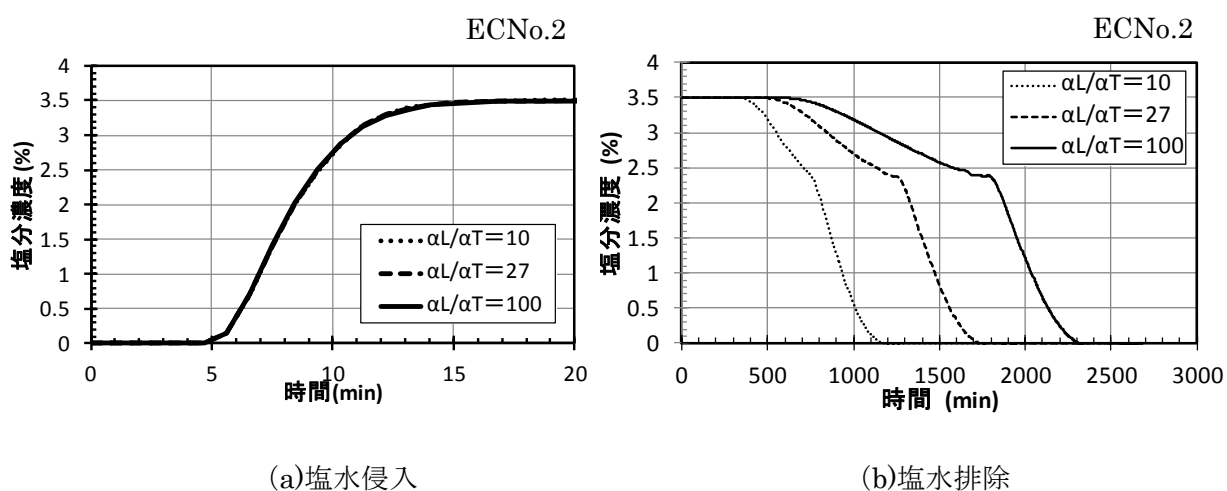


図 4-11 縦・横分散長比を変化させたときの塩分濃度の時間変化

(2) 濃度の断面分布

塩水侵入過程の濃度分布によると、塩水は左側境界から流入し、淡水と接する部分で向きを左斜め上に変え、最終的に左側境界上部から排出している（図 4-12）。塩水楔の先端位置は縦・横分散長比が変化してもほぼ同じ位置である約 53cm まで達している。一方、淡水（塩分濃度 0.0%）と塩水（塩分濃度 3.5%）との境界にあたる混合域面積（ここでは塩分濃度 0.35~3.15%の範囲とした）には、僅かではあるが差異が認められ、縦横分散長比が小さいほど混合域が大きい傾向がみられる。これは、混合域では、左斜め上向きの淡水の流れ（等濃度線 0.35~1.75%に沿った流れ）が主流方向であり、これと直交方向の塩分輸送が横分散長で支配されていることに起因していると考えられる。

次に、塩水侵入がほぼ定常状態になり止水壁を設置した後、即ち排除過程における縦・横分散長比=27 を用いた時の塩分濃度の断面分布を図 4-13 に示す。止水壁により残留した塩水は、淡水と塩水の混合域を流動する地下水により排除あるいは希釈される。このうち止水壁設置後 0 分から 1000 分までをみると、塩分濃度 1.75%以下の低濃度の混合域では地下水が等濃度線に沿って領域外に塩分を輸送・排除する。一方、塩分濃度 1.75%以上の高濃度の混合域では、地下水が等濃度線に沿って流動した後、止水壁近傍で方向を下向きに変え、再び塩水域に塩分を輸送する、いわゆる循環流の発生により塩水域を希釈する。なお、この循環流は塩水排除過程において閉じ込められた塩水域全体で生じる現象であり、塩水侵入過程では認められない。

止水壁設置後 1000 分以降については、混合域の平均濃度が低下するため、循環流が発生する塩分濃度が 1.75%から 1.0%程度に変化する。これに伴い、領域外へ塩分輸送・排除は塩分濃度が 1.0%以下の混合域で生じ、1.0%以上の混合域では循環流による希釈が生じてい

る.

次に、縦・横分散長比を ($\alpha_L / \alpha_T = 10,100$) に変化させたときの止水壁設置後における濃度分布を図 4-14, 15 に示す. 縦横分散長比=27 の結果も含めて比較すると、縦・横分散長比が小さいほど等値線の間隔は広がる、即ち濃度が低下している特徴が認められる. また、縦・横分散長比が小さいほど排除の速度が早くなっている.

ここで循環流に着目すると、縦・横分散長比が小さいほど、混合域から塩水域に流れこむ塩水量が多く、かつ混合域から塩水域に流入する領域の幅も長い特徴がみられる. このため、循環流による塩水域の希釈も早く進むことが推察できる. この循環流による希釈が塩水排除実験における EC センサー No.2 や数値解析結果の濃度-時間変化図 (図-9,10) にみられる二つの勾配のうちの緩い勾配部分の濃度変化をもたらしていると考えられる. また、もう一つの急な勾配をもつ濃度変化については低濃度 0.35~1.75%の混合域における等濃度線に沿った塩分輸送 (排除) と考える.

実験結果の EC センサー No.2 の濃度時間変化曲線では、急な勾配しか認められないが、これは循環流による希釈が発生する前に低濃度の等濃度線と同様な軌道で淡水の塩分輸送 (排除) が始まったためと解釈できる. このように止水壁により残留した塩水 (設置直後より 1000 分まで) には、低濃度の 0.35~1.75%の混合域の等濃度線に沿った輸送と、高濃度 1.75~3.15%の混合域で発生する循環流による希釈の両方が作用し、最終的に排除されていると考える.

以上の止水壁設置後の塩水排除現象を精度よく予測するには、これを支配する縦・横分散長の把握が極めて重要であることを再確認した.

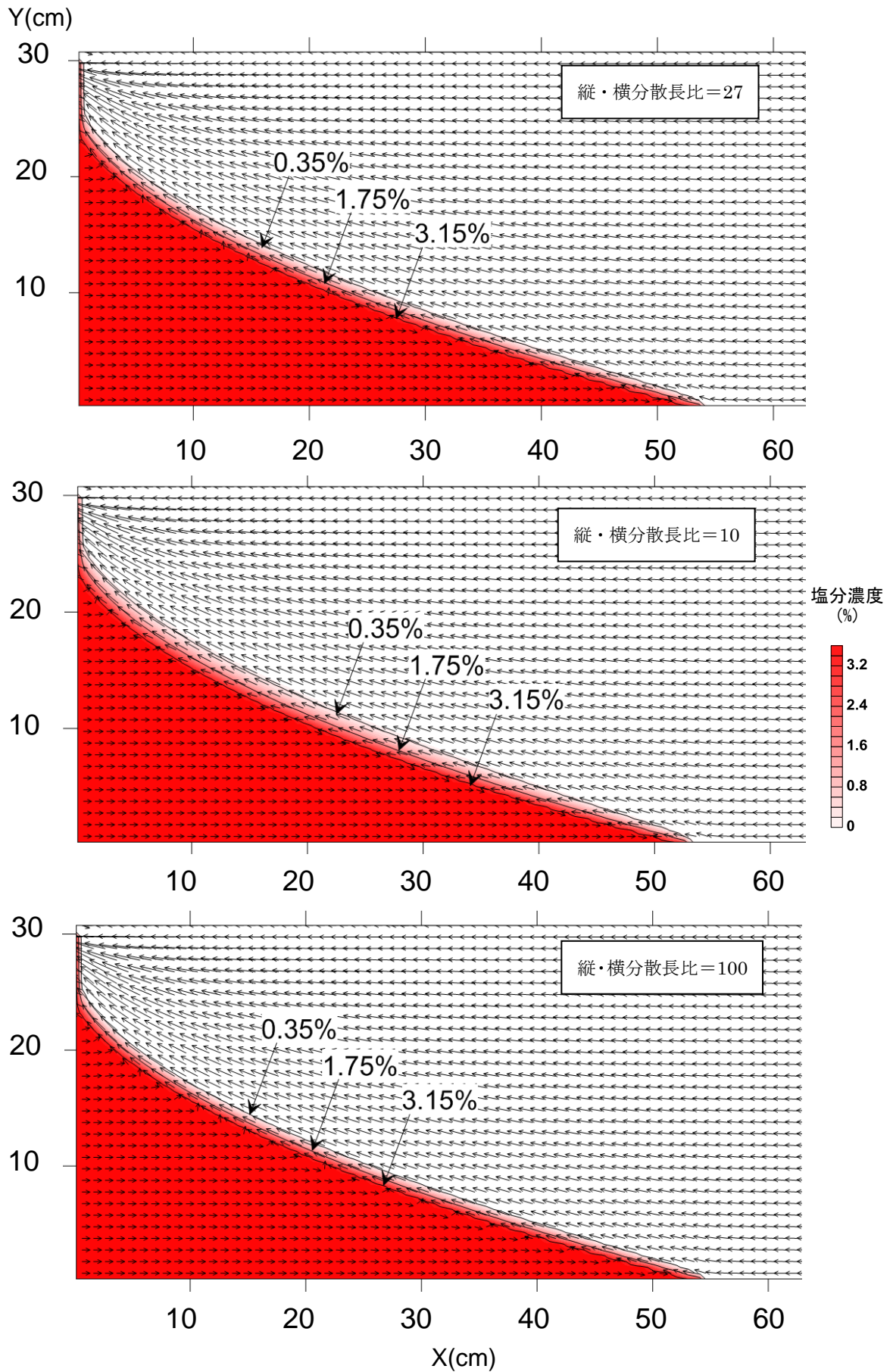


図 4-12 塩水侵入時の塩分濃度分布

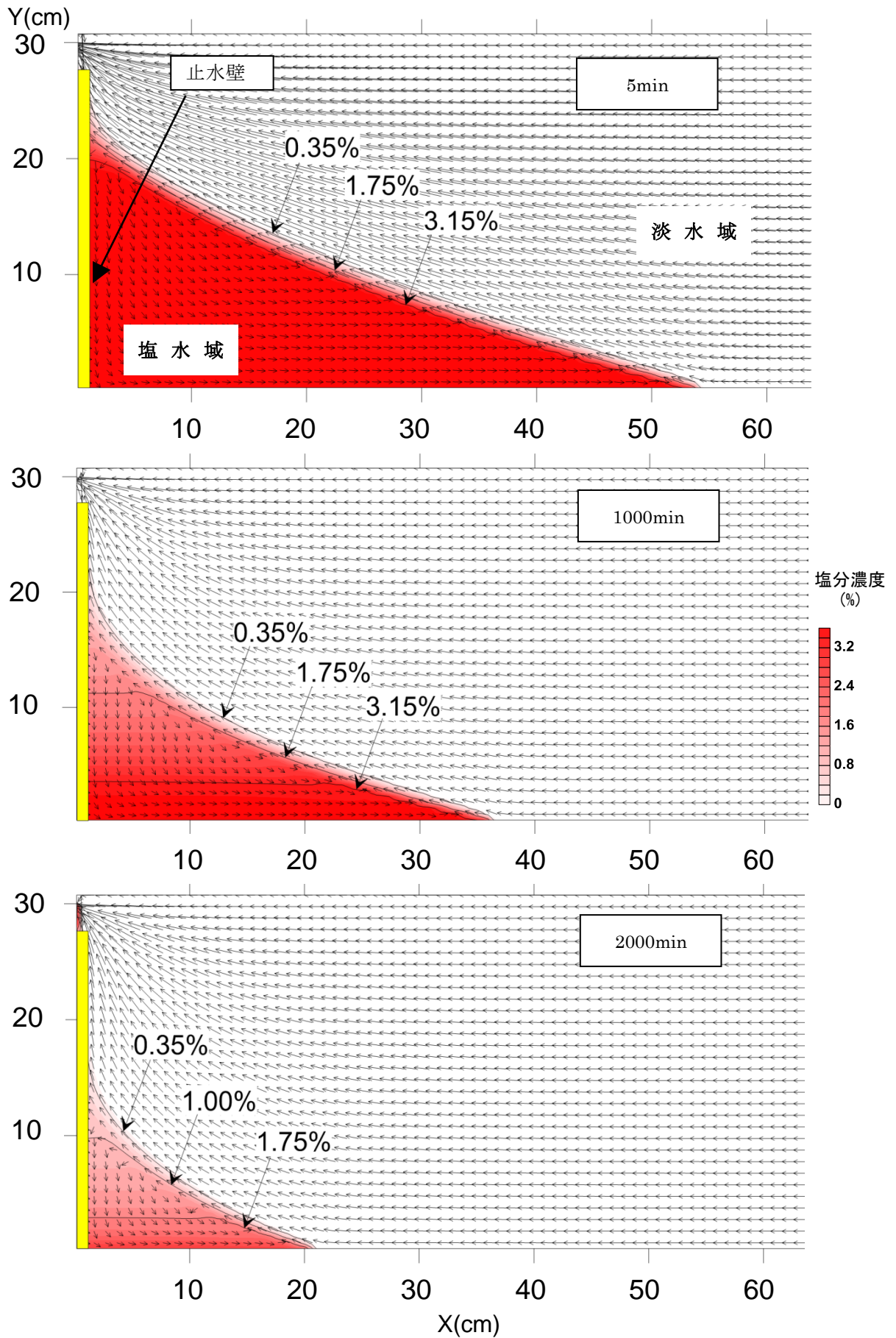


図 4-13 塩水侵入時の塩分濃度分布 ($\alpha_L / \alpha_T = 27$)

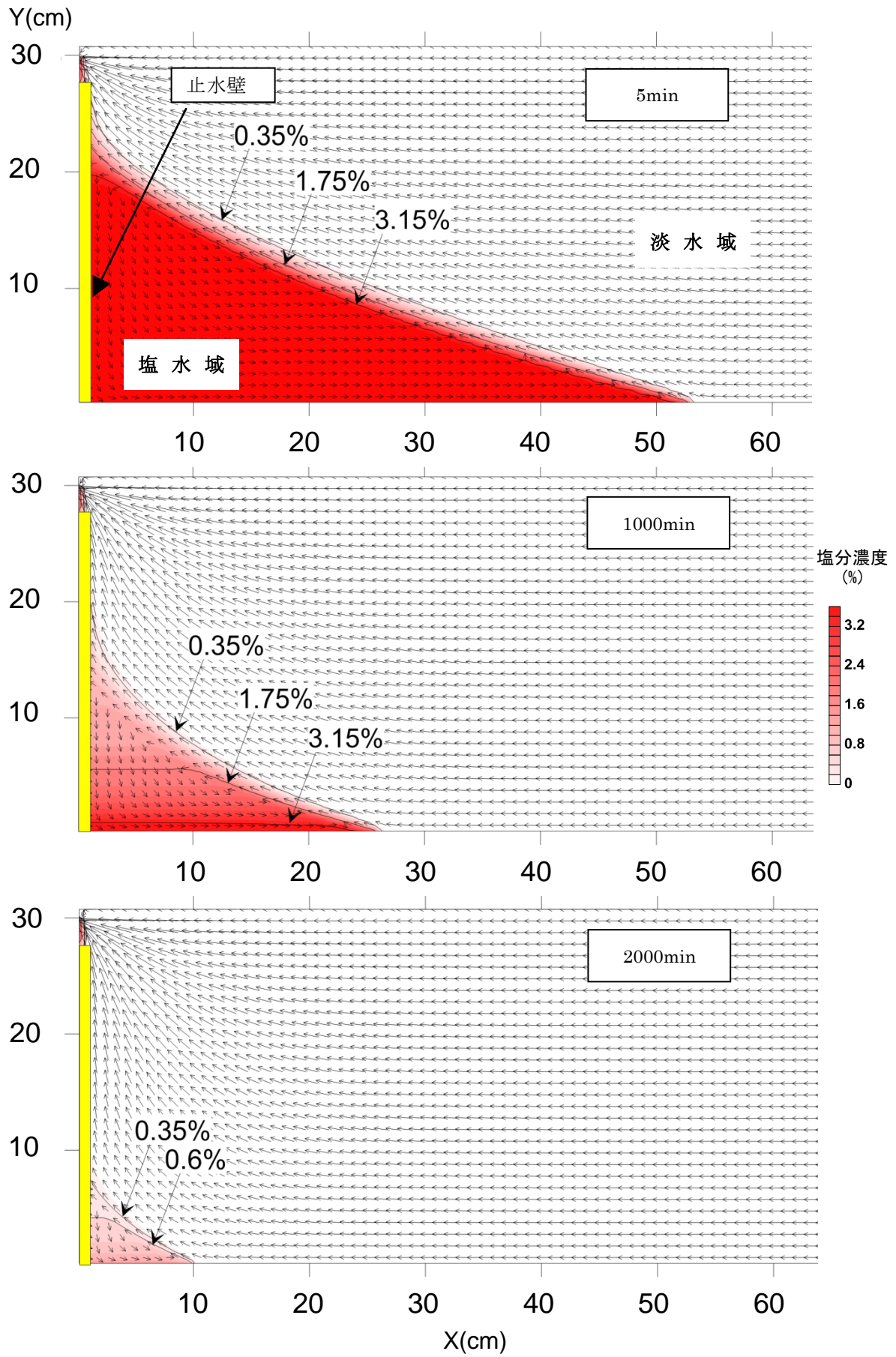


図 4-14 塩水排除過程の塩分濃度分布 ($\alpha_L / \alpha_T = 10$)

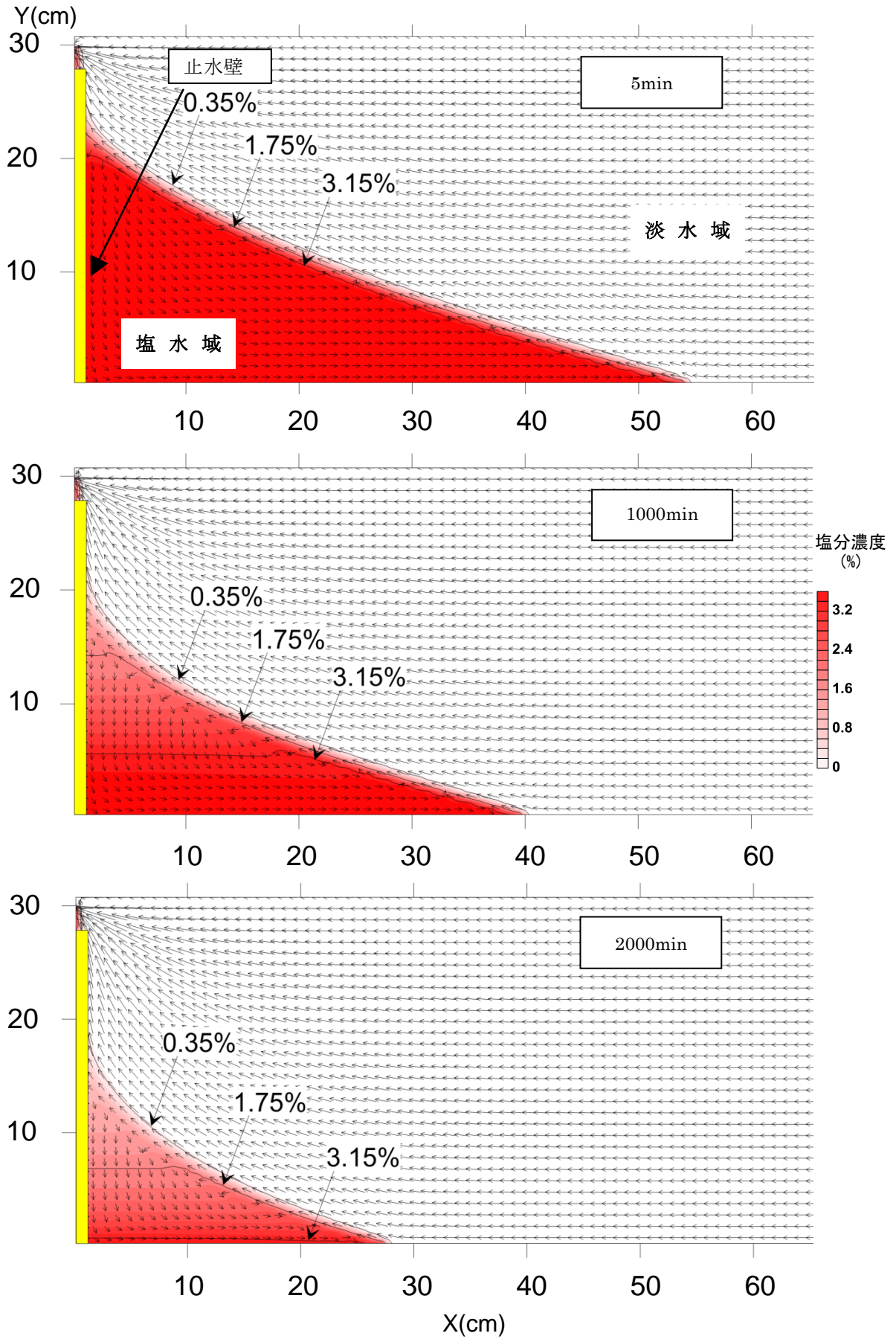


図 4-15 塩水排除過程の塩分濃度分布 ($\alpha_L / \alpha_T = 100$)

4. 4. 4 排除過程での淡塩混合域の塩分輸送

排除過程における淡水と塩水の混合域は、定常状態と同様に、塩水楔の先端位置で幅が狭く、流出部に向かって広がる形状となる。この形状は塩水排除が進むにつれ拡大する特徴を有している。この混合域面積の時間的变化に着目し（図 4-16）、塩水排除が開始された直後からの時間変化を図 4-17 に示す。図 4-17 によると、いずれのケースにおいても止水壁設置直後より混合域面積は拡大し、700～1500 分後に最大となる。その後、混合域面積は時間経過とともに徐々に減少していく。この混合域面積が最大になった後の減少は地下水による塩水の排除を表していると考えられる。またこの塩水の排除は混合域面積が最大になる前においても、塩水楔の面積が徐々に縮小しているため、継続していたと推察される。一方、ピーク前の混合域面積増加は塩分が排除される面積よりも、循環流により希釈される面積が大きかったことを意味しており、止水壁設置後速やかに、循環流により塩水楔の塩分濃度が 3.15% までの希釈されたことを表していると考えられる。

この混合域の面積変化においても、縦・横分散長比の変化の影響がみられ、同比が小さいほど循環流によるピークに達する時間が早い傾向が認められる。この現象は図 4-11 右の塩分濃度の時間変化予測とも一致する。この原因は、縦・横分散長比が小さいほど横分散長が大きいため等濃度線に沿った混合域の面積が大きく、これに伴い塩水域に向かう輸送量も多くなるためと推察される。なお希釈により混合域面積が最大に達する時間が短いほど、止水壁設置による残留塩水の全てが排除される時間も短くなる。

図 4-17 には、縦・横分散長比 ($\alpha_L/\alpha_T = 27$) が一定となるように縦・横分散長を変化させたときの混合域面積の変化も示している。このときの混合域面積の変化をみると、排除過程においては縦・横分散長の両者が混合域の面積変化に効果を及ぼしている。

さて、Abarca and Clement (2009) による縦・横分散長を変化させながら塩水侵入を再現した定常解析結果では、縦・横分散長比が異なるケースにおいても混合域面積がほぼ同じ

となるケースが認められる。今回の解析結果でも、塩水排除開始直後の混合域面積は、縦分散長、横分散長が異なっても混合域面積はほぼ同じとなるケースが認められた。しかし、止水壁を挿入し排除が開始され、循環流が発生し始めると、縦・横分散長の違いにより各ケースの混合域面積の時間変化には明瞭な相違がみられる。このことは定常状態の塩水侵入状況の塩分濃度分布が既知となっても、止水壁を設置後の排除時間を予測することが難しいこと、および正確な排除時間を予測するには、縦・横分散長を把握したうえで、数値解析等による検討が必要になることを示唆している。

以上のように、止水壁設置により貯水域に残留する塩水の排除には、混合域からの直接的な輸送と循環流による輸送（希釈）を考慮する必要があり、さらにこれらの二つの輸送現象には縦・横分散長が関係していることが明らかになった。

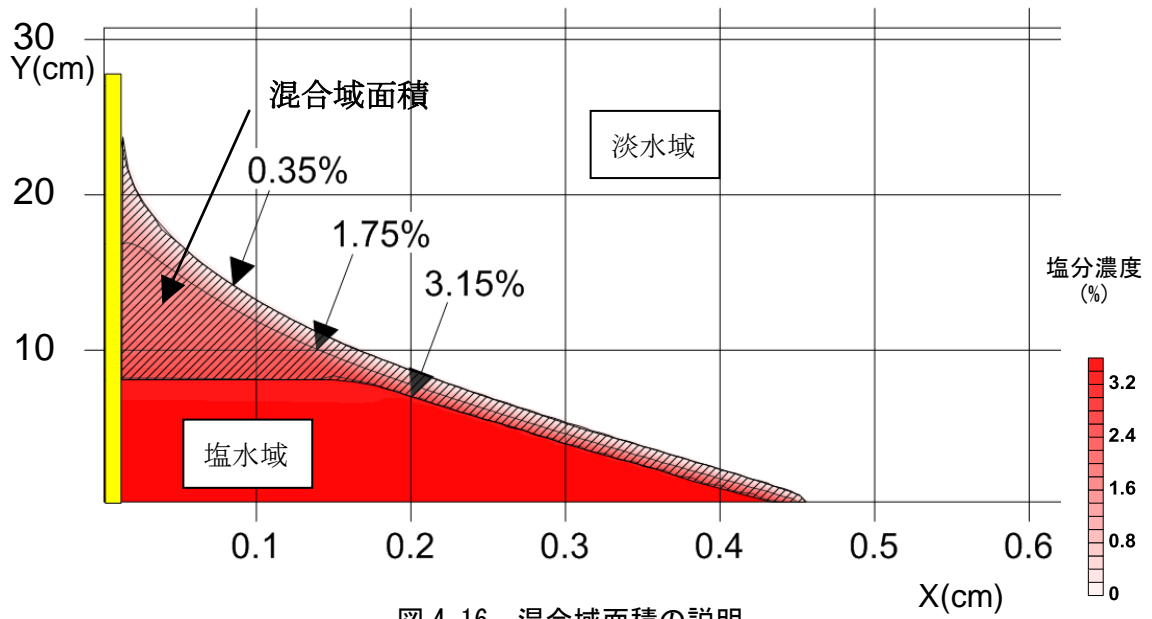


図 4-16 混合域面積の説明

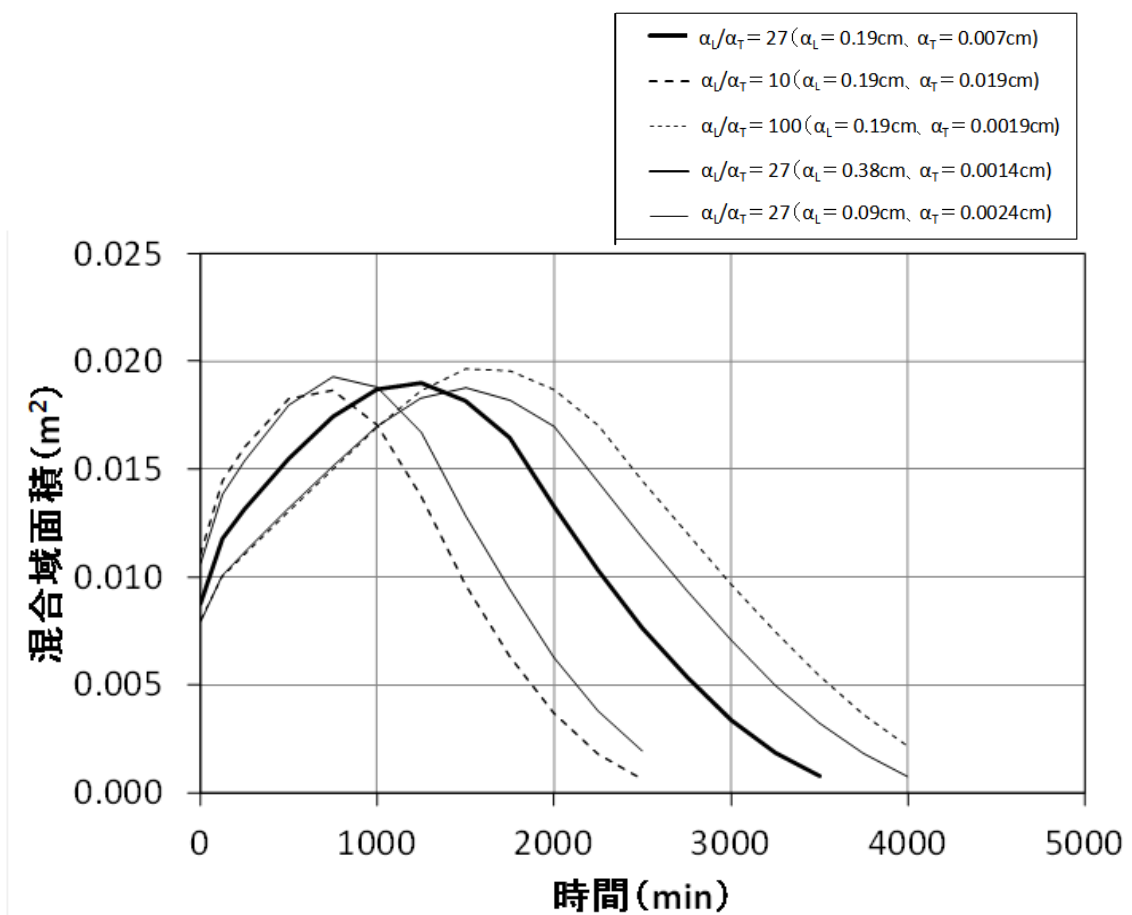


図 4-17 塩水排除過程における混合域面積 (0.35%~3.15%) の時間変化

4. 4. 5 排除時間の予測

今回実験を行った止水壁設置後の塩水排除状況（図 4-8）のうち、まず画像解析から目視によって塩分濃度が高い塩水塊（着色した箇所）の面積を算定した。同時に、数値解析により再現された塩分濃度 0.35%以上を示す面積を求め、初期状態からの面積変化を時間的にプロットした（図 4-18）。同図によると、実験結果と解析結果はほぼ一致しており、止水壁設置後の塩水塊面積は時間とともに縮小していくことが明らかとなった。

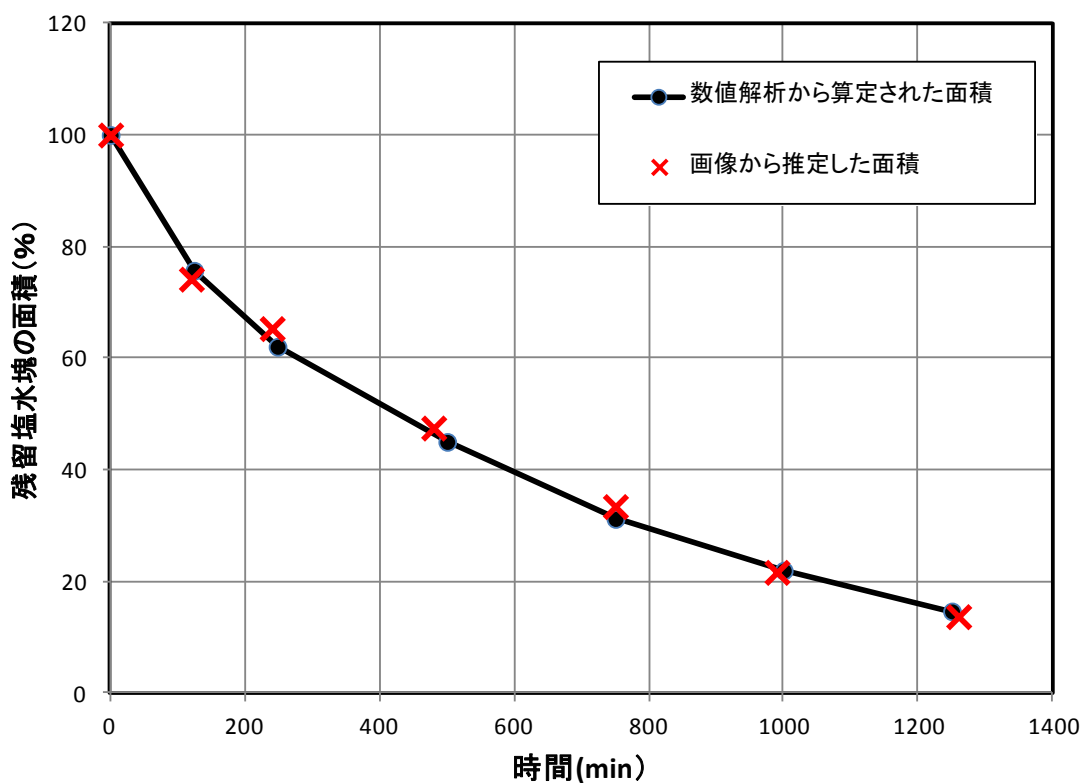


図 4-18 室内試験及びその再現解析から算定した残留塩水塊の面積変化（初期状態を 100%とした）

縦・横分散長比を変化させた予測解析結果においても、同じように止水壁設置後の塩水排除状況における初期状態からの面積変化を時間的にプロットした（図 4-19）。塩分濃度 0.35%以上の塩水塊の面積は、図 4-18 と同様に時間とともに小さくなる傾向がみられる。またどの解析結果においても面線の減少割合は初期状態に近いほど大きく、初期状態から

時間が経つと小さくなる傾向が認められる。このことは初期状態における残留塩水の排除状態から、線形関係で全てが排除される時間を推定することは危険であることを示唆している。なお、図 4-18 はアクリル板に相当する左端メッシュの高い透水性を考慮した場合、図 4-19 は アクリル板に相当する左端メッシュの高い透水性を考慮しない場合の計算結果を示したものである。

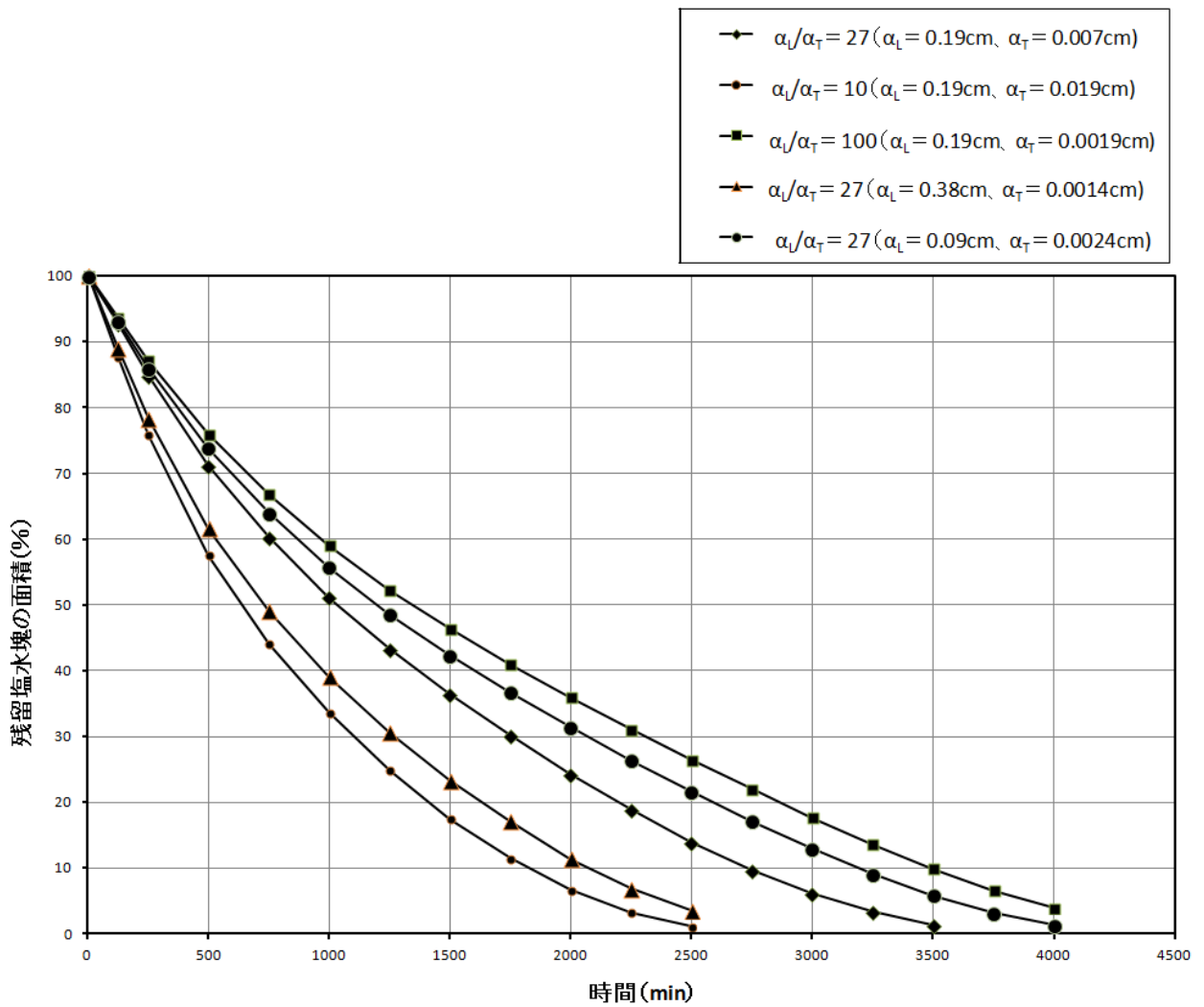


図 4-19 予測解析結果から算定した残留塩水塊の面積変化 (初期状態を 100%とした)

4. 5 結 論

縦・横分散長を正確に把握するためには、色素トレーサーを用いたパルス・連続注入実験およびデジタル処理した実験画像を用いた解析が有効であることが分かった。今回のガラスビーズを用いた実験では、蛍光色素と食用色素の二つの色素を用いている。このうち、パルス・連続注入実験においては低濃度でもノイズが低い蛍光色素が有効である。一方、塩水侵入・排除実験では高濃度の蛍光色素から拡散した光の撮影画像への写り込みがみられるなど、全体的に再現性が低いため、食用色素が有効であった。このように現時点では実験に応じた使い分けが必要と考える。

パルス注入実験では、数値解析でよく採用されている一般値 $\alpha_L / \alpha_T = 10$ よりも大きい値 $\alpha_L / \alpha_T = 20, 27$ を得た。本実験条件下では縦・横分散長比 $\alpha_L / \alpha_T = 27$ を用いて数値解析を行うと、塩水侵入・排除実験結果をほぼ再現することができた。止水壁により閉じ込められた塩水の排除について縦・横分散長比を 10, 27, 100 と変化させて予測すると、排除時間が大きく変動し、縦・横分散長比 10 を基準として、27 で 1.48 倍、100 で 1.97 倍となり、縦・横分散長比が小さいほど排除時間が短くなる。つまり、横分散長の設定により排除時間が大きく変動すること、さらに横分散長を過大に評価すると塩水排除時間を過小評価してしまうことが明らかとなった。このことは、地盤の不均質性の問題で縦・横分散長比の把握が難しい実フィールドでは、縦・横分散長比に幅をもたせ、予測するべきであることを示唆している。

数値解析の結果から塩水の排除過程（止水壁設置後 1000 分以内）を詳細に検討すると、塩水域と淡水域で囲まれた混合域（濃度 0.35～3.15%）のうち、淡水域に接した低濃度の混合域（濃度 0.35～1.75%）では、分散による希釈を生じながら、地下水が等濃度線に沿って、塩分を輸送・排除する。一方、塩水域と接している高濃度の混合域（濃度 1.75～3.15%）では、地下水が等濃度線に沿って流動した後、止水壁近傍で方向を下方に変え、再び塩水

域に塩分を輸送する，いわゆる循環流を形成している．この循環流の発生と分散により塩水域は継続的に希釈される．また領域外への塩分輸送量および希釈の割合は縦・横分散長比が小さいほど大きい．

以上のように，止水壁設置により貯水域に残留した塩分は，低濃度域の等濃度線に沿った分散を伴う輸送と，高濃度域の混合域で発生する循環による希釈と分散によって最終的に排除される．これら二つの輸送には縦・横分散長が寄与している．

5. 現地スケールでの沿岸域地下ダム構築時における残留塩水の挙動

5. 1 諸 言

本研究では、現地スケールで小さな離島に淡水資源を確保するため地下ダムを構築した時、止水壁上流側に発生する残留塩水がどのように挙動するかについて検討を加える。具体的には、鹿児島県の南端に位置する与論島の古里地区を対象として、海岸に沿って止水壁を構築し、止水壁の高さや縦・横分散長比を変化させた時の残留塩水の挙動を把握する。そのうえで、止水壁上流側の残留塩水が現地スケールにおいても室内実験結果と同じような挙動を示すかを確認する。

5. 2 対象地域の概況

解析地域は、水理地質状況および地下水位のデータ等、水文データが入手できた与論島と対象とした(小路ほか(1999))。与論島は沖縄本島北部より約 28km にある周囲 23.7km、面積 20.48km² の小さな島である。人口は約 6000 人で、主要な産業は農業と観光業である。耕地面積は 1050ha でこのうちの 6 割がさとうきび、2 割がローズガラス畑となっている。

本島の表層地質の大部分は第四紀の琉球層群より構成されている。また、この島には地形的に明瞭な断層が南北方向に存在する。この断層を基本に本島は、地下水区として 3 つ地域に区分され、このうち最も大きな地下水区が島の東側に位置する古里地域である。この地区には、農業用井戸や水道用井戸が集中し、特に島内の全ての水道を賄っている水源井戸が 9 箇所存在している。参考までにこの井戸の計画最大取水量は 3700m³/日であり、大量の地下水を取水可能である。

今回の解析はこの古里地区を対象に実施し、使用した現地観測データ等は、小路ほか(1999)に基づいている。



図 5-1 調査位置および地下水区（コンター：基盤等高線を示す）：小路ほか(1999)に加筆

5. 3 水理地質モデルの構築

5. 3. 1 水理地質

帯水層となる琉球石灰岩は基本的に下部石灰岩層、砂礫層、上部石灰岩層の3層に区分される（古川，1981）。下部帯水層は基盤の中生代の泥岩、輝緑岩等を覆って分布する琉球層群の最下部に位置しており、上位に下部砂礫層が分布する。この砂礫層は基盤岩由来の礫および砂を主体とし、層厚 10m前後で分布している。さらに、この砂礫層の上位には、与論島の表層を形成する上部石灰岩層が分布する。基盤岩の上面深度は海側で-30m、山側で-20m程度であり、陸側から海側に傾斜している。これらの結果を踏まえて、図 5-1 に示

す解析領域において水理地質モデルを構築した。なお、水理特性については、再現解析により $0.3 \times 10^{-0} \text{cm/s}$ 、有効空隙率は 15% を最終的に採用した。

5. 3. 2 地下水位観測結果

本地区における地下水位観測井は 4 本存在し、2001 年 9 月より 2002 年 8 月まで観測が実施されている。地下水位は、基本的に潮位と降雨に反応して変動しており、2001 年 9 月と 2002 年 8 月で高く、2002 年 2 月をほぼ最低とする地下水位変動を示している。また海岸に近接している井戸ほど潮位の影響を大きく受け、1m 程度の地下水位変動が認められる (Momii et al., 2005)。

5. 4 数値解析

5. 4. 1 数値モデルと検定

海底地形も含め東西方向 4000m(うち陸部 1800m), 南北方向 1600m を 50m メッシュ, 深度方向には 0.125m~5.0m で解析範囲を離散化し, 解析モデルを構築した (図 5-2). 解析コードは密度依存型移流分散解析コードである SEAWAT Ver4 (Langevin and Guo, 2006 ; Langevin et al., 2012) を用いた.

境界条件は, 海岸部に該当するメッシュを塩分濃度 3.5% に固定, さらに水位条件として 4 時間毎に変動する潮位データを与えた. 南北方向は濃度勾配・水頭勾配をともにゼロ (閉鎖条件), 西側については観測地下水と同様に経時的に変動する地下水位を固定条件として与えた.

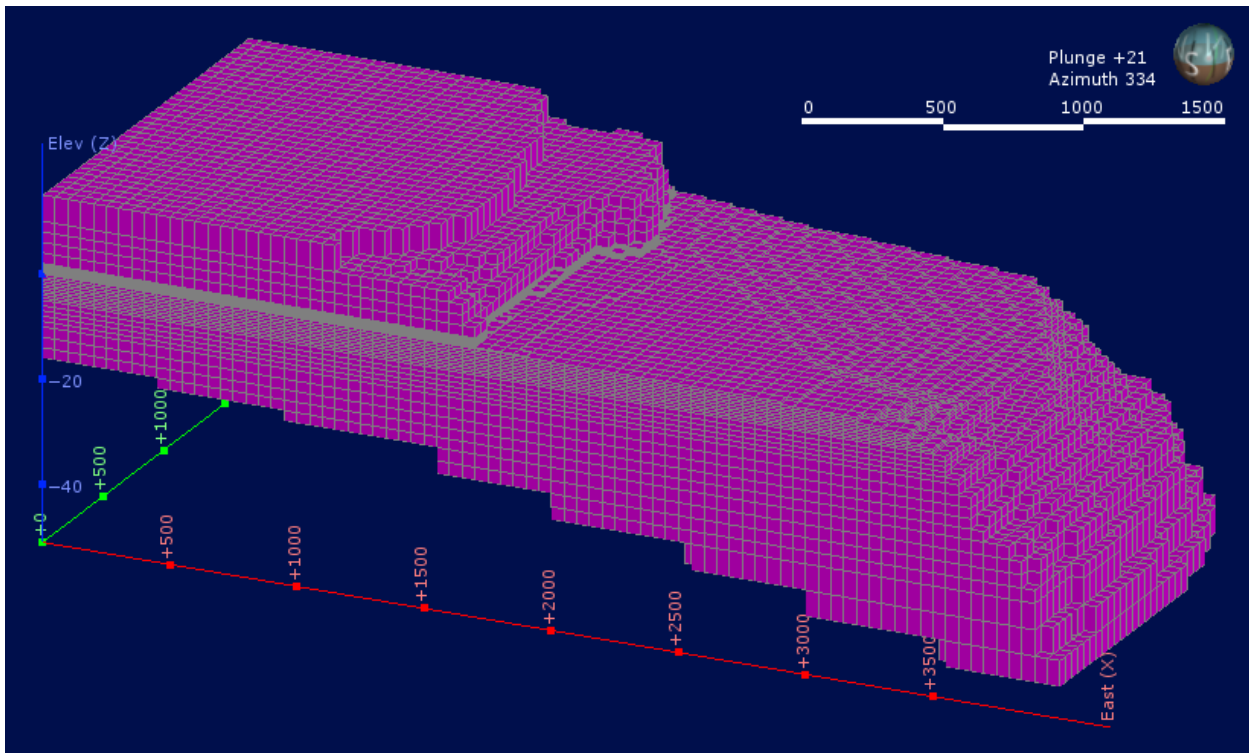


図 5-2 与論島古里地区を対象とした数値モデル (地表面は EL. 15m までを表示)

地下水涵養量については, 既往文献 (Momii et al., 2005)) を参考に直列 1 段のタンクモデルを構築し, 鉛直方向の浸透量をモデルに与えた. なお, タンクモデルは 1 年間の非

定常解析とし、これにより得られた4時間毎の地下水涵養量をモデルに入力した。

上記の条件設定を行った後、構築した数値モデルが観測結果を再現するよう試行錯誤によりモデルの検定を行った。最終的には、計算された地下水位が潮位の影響を受けて変動するとともに、内陸部に向かうにつれ、変動幅が小さくなる特徴を再現できた。ただし、内陸部まで地下水位が潮位に対し鋭敏に応答する結果については改善できなかった。これは数値計算では観測孔の水位がポイントで計算されているに対し、ボーリング孔の水位は、ストレーナ開口部の平均的なものとなること、また井戸貯留（井戸径等の影響による）の影響で細かい水圧応答がデータに反映されないことも原因として考えられる。

塩分濃度の鉛直分布は、図5-3に示すように（塩分濃度の単位はECとして表示している）、実測値が極めてシャープな塩淡境界を呈するのに対し、解析ではやや緩やかな塩淡境界となった。ただし、大局的には現地の鉛直方向の塩分濃度断面をほぼ再現できていると考えた。

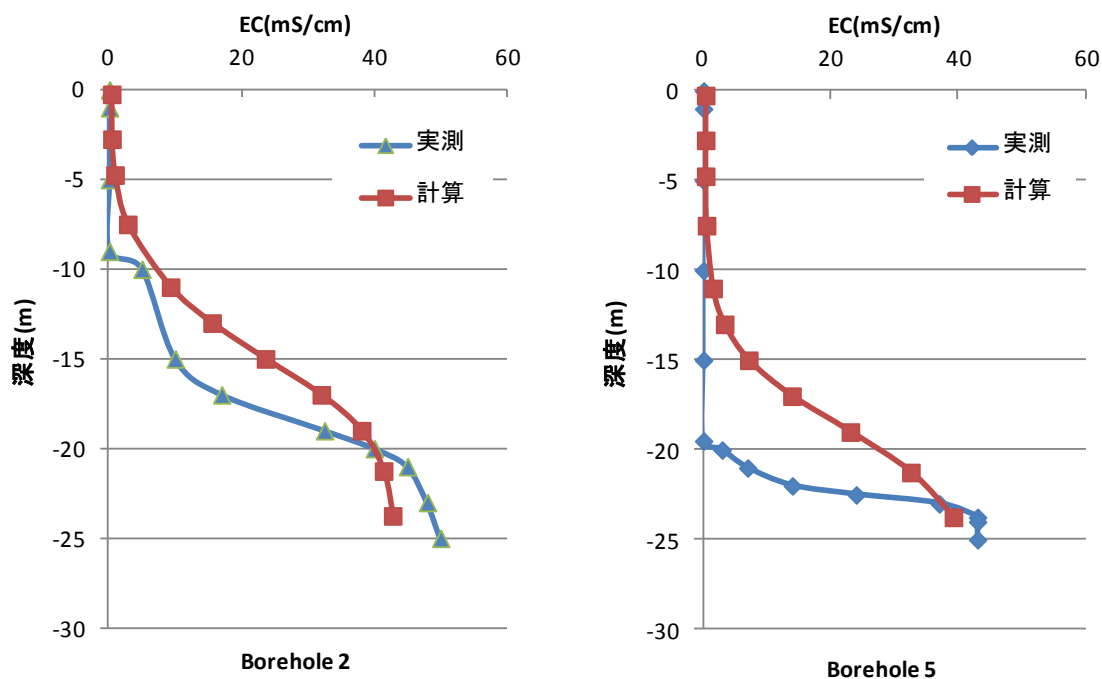


図5-3 塩分濃度（EC）の再現状況

5. 4. 2 結果および考察

予測解析では、再現解析で固定されたパラメーターを用いたモデルにより、止水壁を構築後の残留した塩水の挙動を検討した。予測解析においては、縦・横分散長比 ($= \alpha_L / \alpha_T$) を 10, 20, 100 に、また止水壁を海岸線に沿って設置し、その高さ EL0, -4, -8, -12, -16m に変化させて感度解析を行い、それぞれの塩分濃度の分布・時間変化から影響を判断した (なお、水平方向横分散長は 0.1m に固定している)。予測期間は 25 年とし、止水壁の透水系数を $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、幅を 1m に設定した。

縦・横分散長比=100、止水壁の高さを EL0m に設定した時の塩分濃度の 3 次元分布を図 5-4、東西断面分布を図 5-5 に示す。図 5-4 の右上は、止水壁を設置せず塩水侵入のみ生じている初期状態、左下は止水壁を設置して 10 年後、さらに右下はおよび 25 年後 (右下) における塩分濃度分布を示す。図 5-4 および図 5-5 上によると、止水壁の上流に残留した塩水は徐々に排除され、淡水に置き換っていることが読み取れる。また解析結果のうち止水壁の高さが-16m のケース (図 5-5 下) を除いて、排除時間に違いがあるものの残留塩水は 70%以上排除されている。排除が滞った止水壁の高さが-16m のケースでは、止水壁の高さが止水壁設置位置における塩水楔の高さとほぼ同じであった。したがって、止水壁構築による上流側の残留塩水の排除を期待するには、その地点の塩水楔の高さ以上の止水壁の高さが必要と推察される。

次に、止水壁の高さを EL-4m に固定し、縦・横分散長比 ($= \alpha_L / \alpha_T$) を 10, 20, 100 に変化させたときの塩分濃度の時間変化を図 5-6 に示す。塩水楔の先端に近いモニタリング位置 (M1, M2) における塩分濃度は、 $\alpha_L / \alpha_T = 10$ では約 8, 10 年、100 では約 12, 18 年で 0% まで低下し、前者に比べ後者は排除時間が 1.5~1.8 倍となっている。排除時間は、縦・横分散長比が小さいほど早く、大きいほど遅い傾向がみられる。

縦・横分散長比=100 に固定し、止水壁の高さを変化させたときの排除時間の変化を図

5-7 に示す。止水壁の高さ-16m にしたときモニタリング井 (M2) では、4 年目から塩分濃度の低下が滞っている。これは、前述したように塩水楔の高さに対し止水壁の高さが低いことに起因していると考えられる。また、モニタリング井 (M1) の塩分濃度は、排除時間が滞る止水壁の高さ-16m を除くと、高さ-12m のときに最も早く低下し、高さ 0m との差はおよそ 3 年程度に及ぶ。これは止水壁の高さが低い方が塩分を排除し易いことを意味している。

次に、止水壁設置による止水壁上流の残留塩水塊の体積 (解析領域の塩分濃度 0.5% ~ 3.5% の体積) の時間変化を図 5-8 に示す。残留塩分の体積は、図 5-6, 7 と同様にどのケースにおいても時間とともに徐々に減少している。このとき、設置後 10 年までの体積の減少が大きく、その後小さくなること、また縦・横分散長比が小さいほど体積減少が早く、大きいほど体積減少が遅い傾向が認められる。

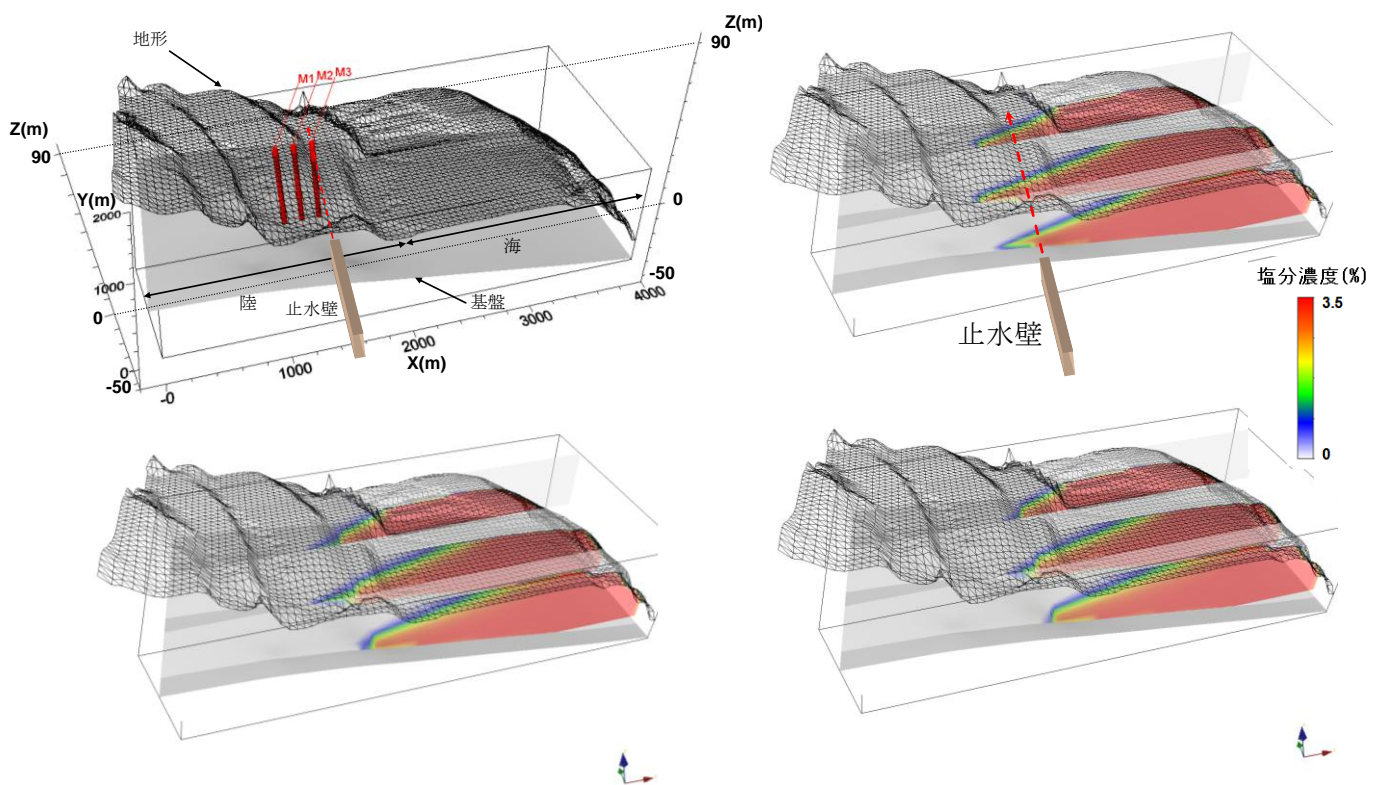


図 5-4 予測解析結果 (右上: 初期状態, 左下: 10 年後, 右下: 25 年後)

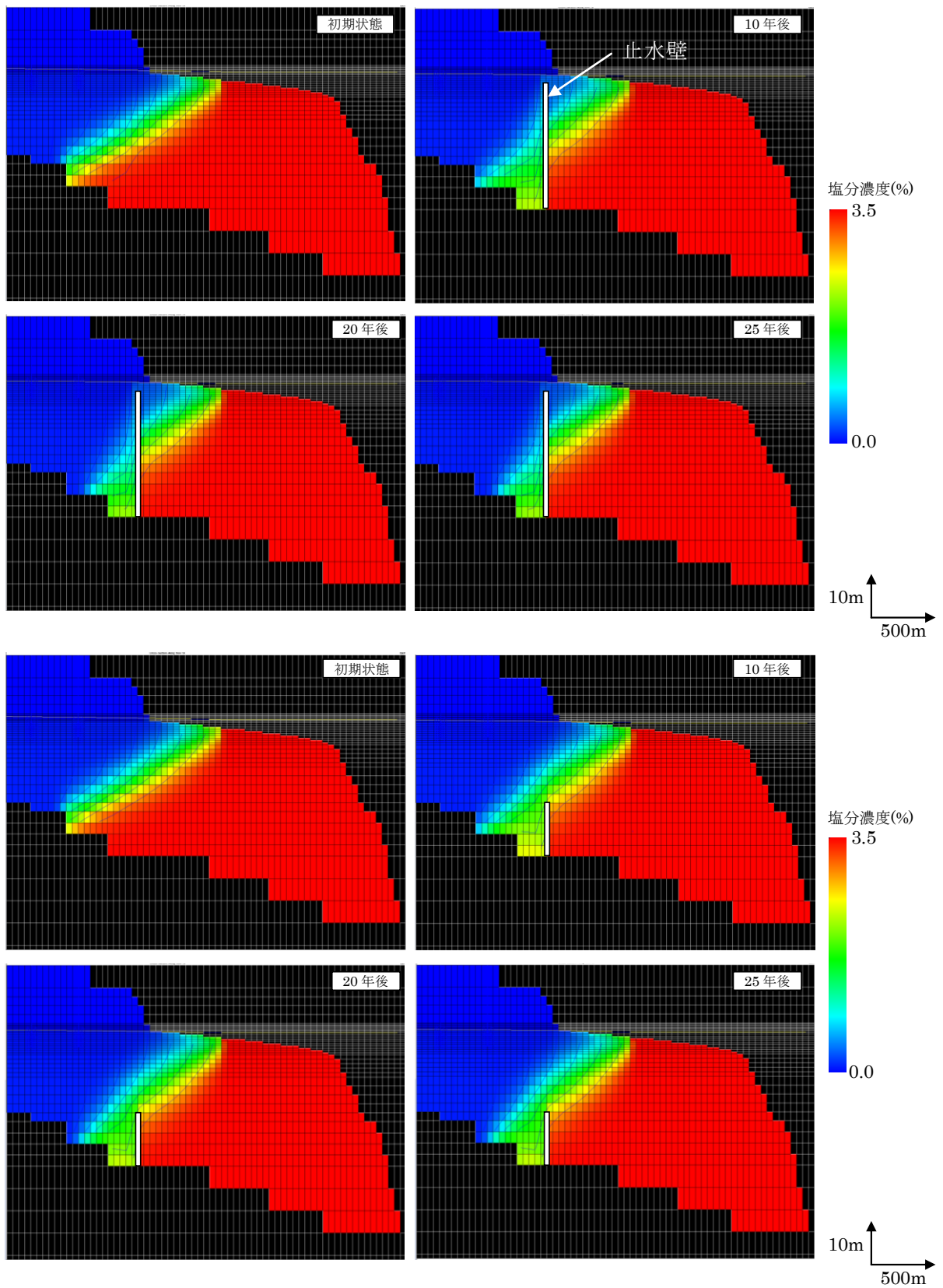


図 5-5 東西断面における塩分濃度分布（上段：止水壁の高さ EL-0m，下段：EL-16m）

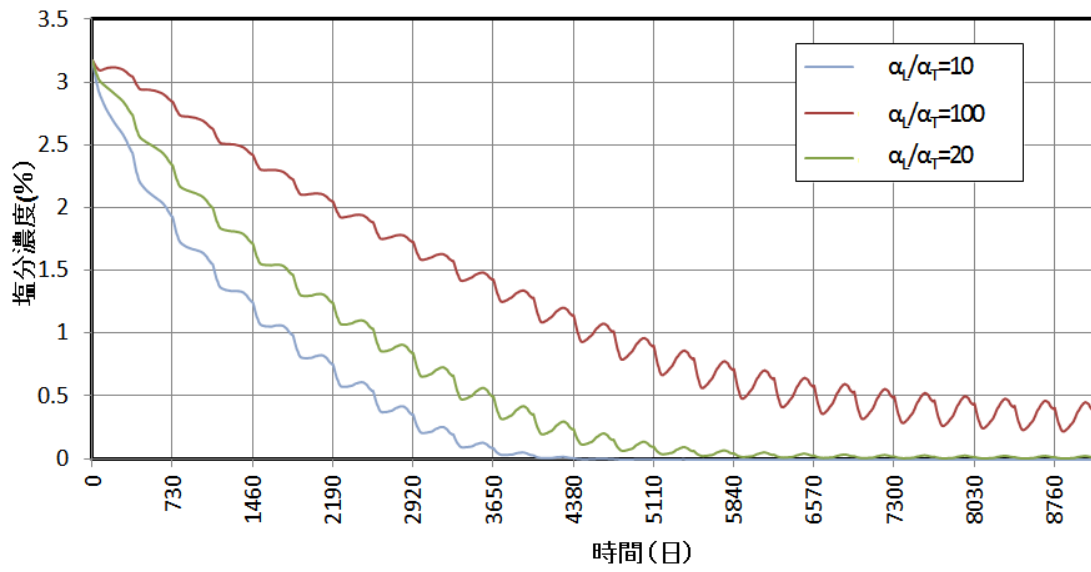
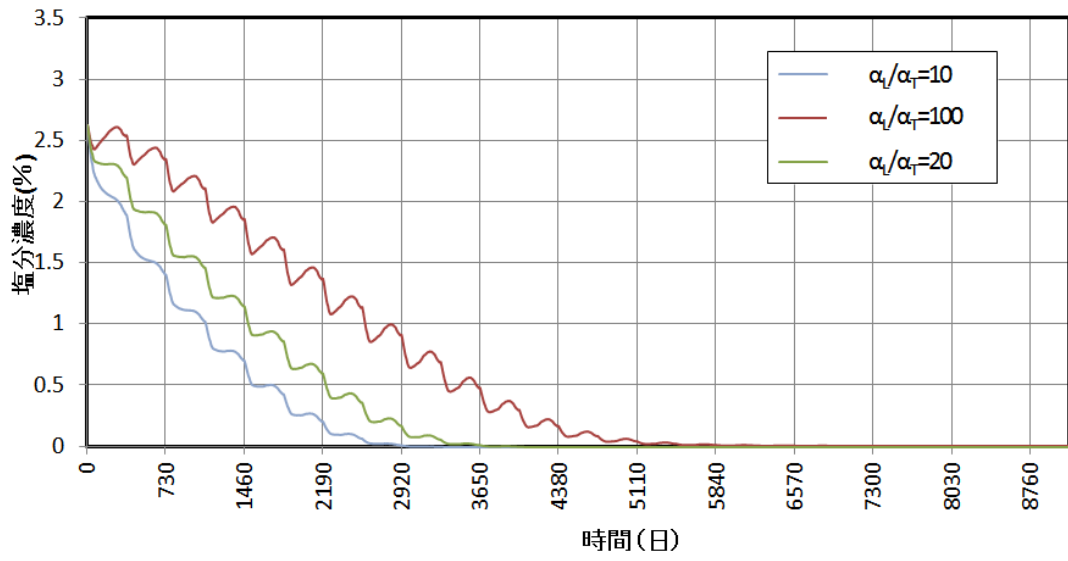


図 5-6 止水壁の高さ-6mにおけるモニタリング井の塩分濃度変化 (上 : M1, 下 : M2)
ここに, M1 は図 5-4 における上流側, M2 は下流側のモニタリング井を表している.

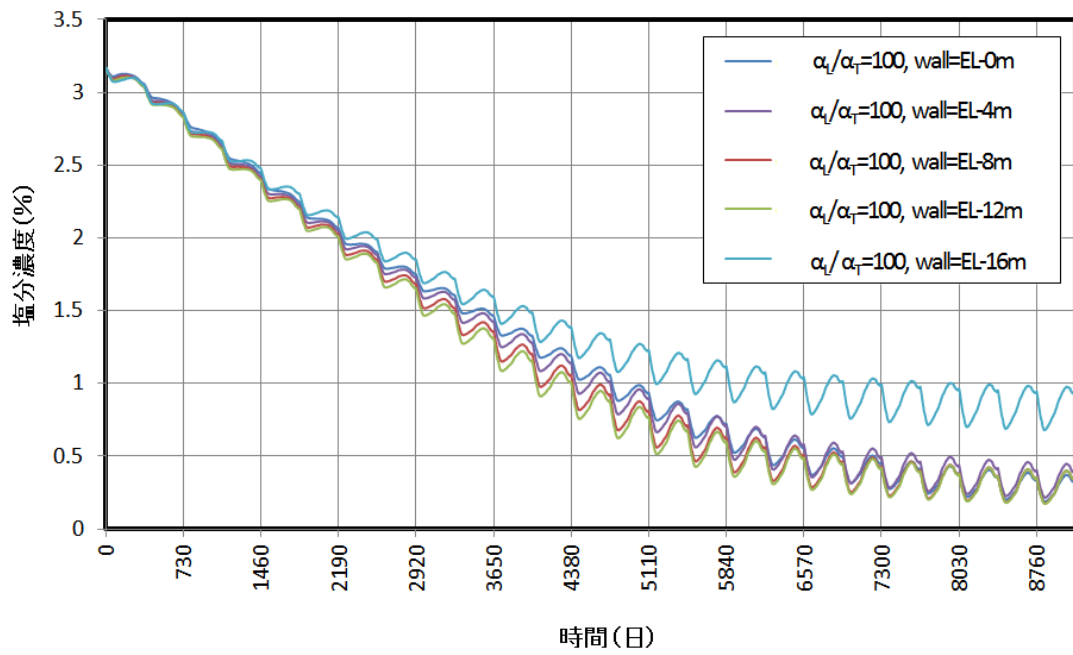
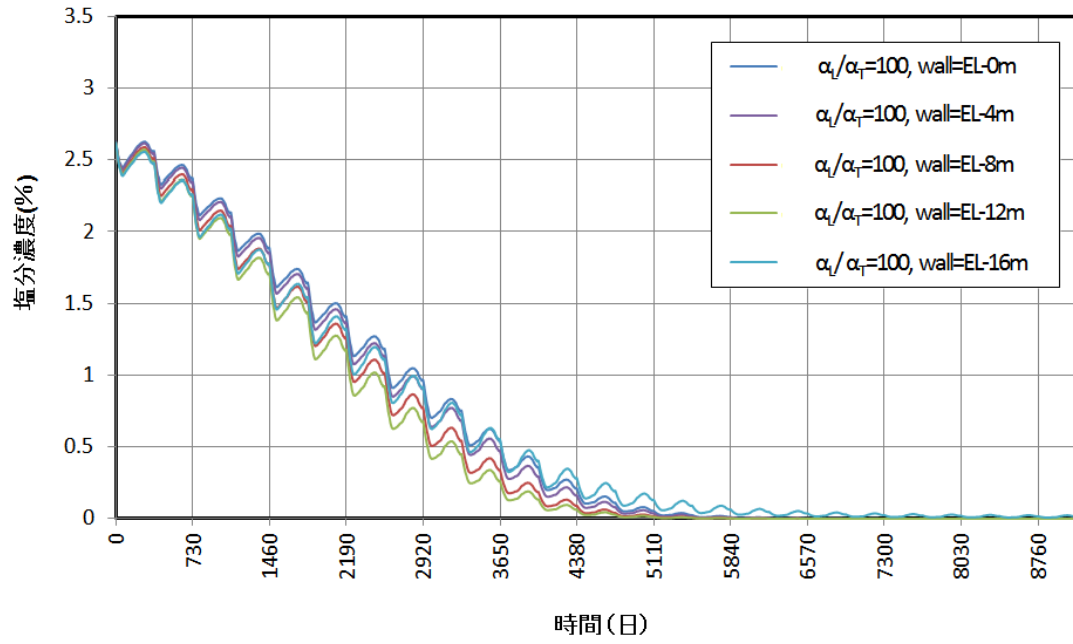


図 5-7 縦・横分散長比を固定し止水壁の高さを変えた時のモニタリング井の塩分濃度変化 (上 : M2, 下 : M1)

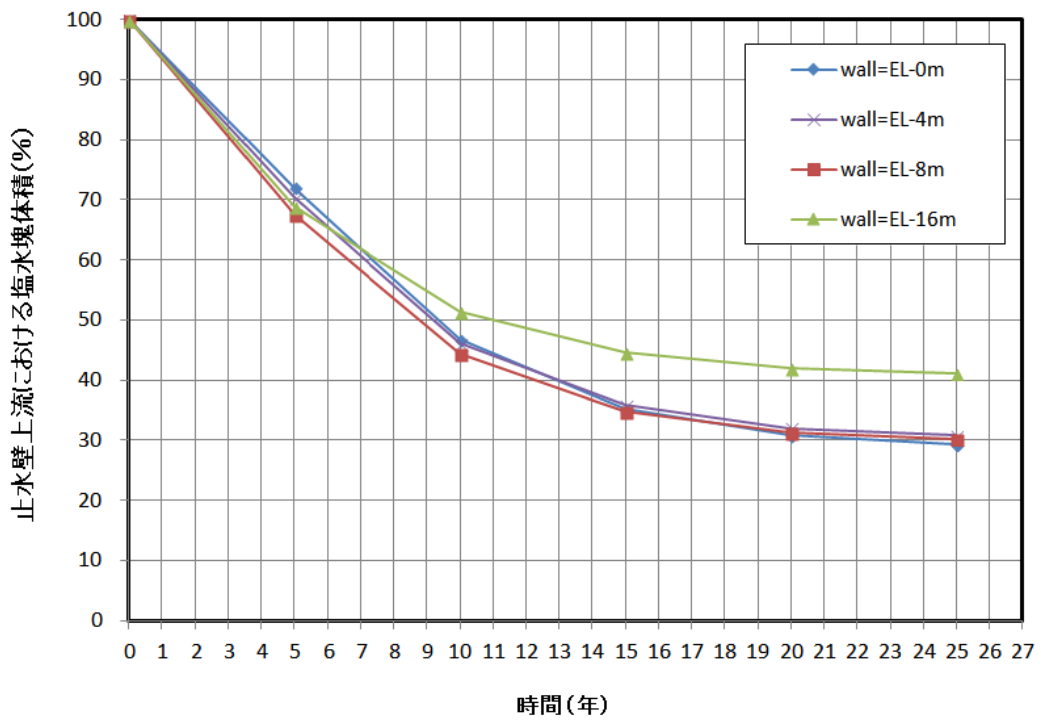
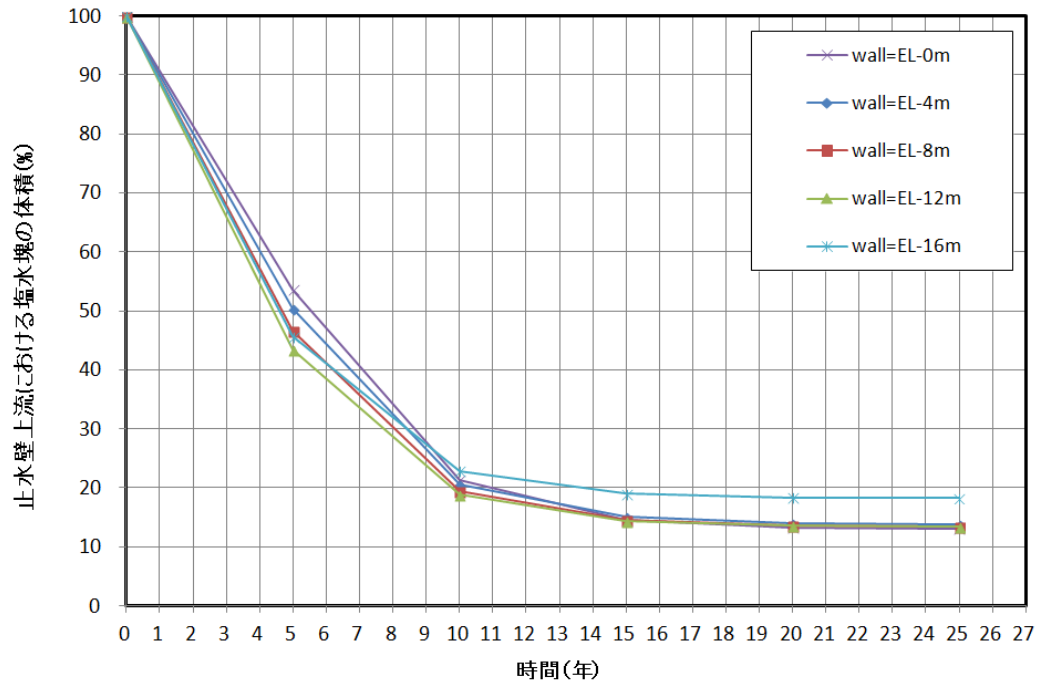


図 5-8 止水壁の高さを変化させたときの残留塩水の体積変化
 (上段：縦・横分散長比 1:10, 下段：縦・横分散長比 1:100)

5. 5 結 論

現地スケールの予測解析により以下のことが明らかとなった。

- ・ 止水壁上流に残留した塩水は徐々に洗い出される。今回の条件設定下において、全ての塩分が排除されるまでには 25 年以上の時間を要することが分かった。このため、実フィールドで止水壁の上流側を速やかに淡水化するには、残留塩水を揚水する等対策を行う必要がある（図 5-5）。
- ・ 縦・横分散長比が大きいほど、塩分排除に時間を要し、縦・横分散長比=10 と 100 との排除時間の差は 1.5~1.8 倍となる（図 5-6）。地盤が不均質性の問題もあるため正確な算定は難しい点があるが、縦・横分散長の把握が重要である。
- ・ 室内実験結果と同様に、止水壁設置位置における塩水楔の高さよりも止水壁の高さが低いと残留塩水の排除時間が滞る。上流側を淡水化するのであれば、止水壁設置位置における塩水楔の高さより高い止水壁を構築する必要がある。なお、止水壁の高さを上げれば上げるほど、残留塩水の排除時間は増加する（図 5-7）。
- ・ 止水壁設置後に残留塩水の体積は減少していく。このとき、塩水排除は止水壁設置直後に大きく進むことから、止水壁設置後間もない塩分排除状況で全てが排除される時間を予測することは危険と考える（図 5-8）。

6. 総括

本研究では、気候変動等で今後ますます重要となる離島の淡水資源を確保するための方策のひとつである地下ダム建設時に、やむを得ず生じてしまう地下ダム貯水域の残留塩水に対する検討を行ったものである。

第一段階としてまず被圧帯水層を模擬した室内実験により、実験装置に塩水侵入した状況を再現した後、止水壁を挿入すると塩水楔の先端位置が徐々に塩水タンク側へ後退し、最終的には全ての塩水が排除されることを確認した。これにより止水壁設置の塩水侵入を防ぐための有効性を確認した。続いて、格子ペクレ数に関する安定条件をほぼ満足する精緻な数値計算を実施し、今回の室内実験を再現した。この数値モデルを用いた予測解析によると、止水壁を挿入して残留塩分の洗い出しが効果的であるのは、止水壁挿入位置における塩水楔の高さにほぼ等しい高さとするれば良いということが分かった。この止水壁の高さに関する結論を普遍化するためには、室内実験も含め境界条件等を変化させた複数の応答解析を行う必要があるだろう。また残留塩水が洗い出される過程を詳細に調べた際に、残留塩水塊の内部で循環流が生じ、その外側を流れ塩水タンク側へ流出している淡水が塩分を輸送し、領域外へ塩水を排除していることが分かった。この塩水排除過程における主流方向である縦方向は、淡水流出に伴う洗い出し方向であり、塩水塊からの拡がりは、横方向である。したがって横方向の分散長がこの過程を支配していると考えられる。被圧帯水層において、止水壁挿入による残留塩分の洗い出しを数値計算によって検討する場合、正確な横方向分散長を与える必要があることを示唆している。

第二段階として、第一段階の結果を踏まえ、まず縦・横分散長の正確な把握を試みた。これには、色素トレーサーを用いたパルス・連続注入実験行うとともにデジタル処理した実験画像を用いた解析が有効であることが分かった。今回のガラスビーズを用いた実験装置では、蛍光色素と食用色素の二つの色素を用いている。このうち、パルス・連続注入実

験においては低濃度でもノイズが低い蛍光色素が有効である。一方、塩水侵入・排除実験では高濃度の蛍光色素から拡散した光の撮影画像への写り込みがみられるなど、全体的に再現性が低いため、食用色素が有効であった。このように現時点では実験に応じた使い分けが必要と考える。

パルス注入実験では、数値解析でよく採用されている一般値 $\alpha_L/\alpha_T = 10$ よりも大きい値 $\alpha_L/\alpha_T = 20, 27$ を得た。本実験条件下では縦・横分散長比 $\alpha_L/\alpha_T = 27$ を用いて数値解析を行うと、塩水侵入・排除実験結果をほぼ再現することができた。止水壁により閉じ込められた塩水の排除について縦・横分散長比を 10,27,100 と変化させて予測すると、排除時間が大きく変動し、縦・横分散長比 10 を基準として、27 で 1.48 倍、100 で 1.97 倍となり、縦・横分散長比が小さいほど排除時間が短くなる。つまり、横分散長の設定により排除時間が大きく変動すること、さらに横分散長を過大に評価すると塩水排除時間を過小評価してしまうことが明らかとなった。このことは、地盤の不均質性の問題で縦・横分散長比の把握が難しい実フィールドでは、縦・横分散長比に幅をもたせ、予測するべきであることを示唆している。

数値解析の結果から塩水の排除過程（止水壁設置後 1000 分以内）を詳細に検討すると、塩水域と淡水域で囲まれた混合域（濃度 0.35～3.15%）のうち、淡水域に接した低濃度の混合域（濃度 0.35～1.75%）では、分散による希釈を生じながら、地下水が等濃度線に沿って、塩分を輸送・排除する。一方、塩水域と接している高濃度の混合域（濃度 1.75～3.15%）では、地下水が等濃度線に沿って流動した後、止水壁近傍で方向を下方に変え、再び塩水域に塩分を輸送する、いわゆる循環流を形成している。この循環流の発生と分散により塩水域は継続的に希釈される。また領域外への塩分輸送量および希釈の割合は縦・横分散長比が小さいほど大きい。

以上のように、止水壁設置により貯水域に残留した塩分は、低濃度域の等濃度線に沿っ

た分散を伴う輸送と、高濃度域の混合域で発生する循環による希釈と分散によって最終的に排除される。これら二つの輸送には縦・横分散長が寄与していることが分かった。

第三段階として、現地スケールでの沿岸域地下ダム構築時における残留塩水の挙動を検討した。止水壁構築により残留した塩水は、室内実験と同様に、徐々に洗い出され25年後にはほぼ70%以上排除された。ただし、今回のモデルの条件設定下においては、全てが排除されるまでに25年以上の時間を要するので、実フィールドにおいて淡水利用を早期に実施するには、残留した塩水を強制的に揚水する等、対策を行う必要がある。

現地スケールにおいても室内実験と同様、止水壁設置位置における塩水楔の高さよりも、止水壁の高さが低いと残留塩水の排除が滞る結果が得られた。残留塩水を排除させるには少なくともその地点の塩水楔の高さ以上の止水壁を構築する必要があることが分かった。また、排除時間は止水壁の高さを上げれば上げるほど増加し、さらに縦・横分散長比が大きいくほど、排除時間を要し、縦・横分散長比=10と100の差は約1.5~1.8倍となった。止水壁設置後の残留塩水の体積変化をみると、室内実験とほぼ同様に時間とともに低下する特徴が見いだせ、塩水排除が止水壁設置後5-10年目に速く、その後はゆっくり進行する傾向がみられる。このことは止水壁設置後5-10年目の塩分排除状況で全てが排除される時間を予測することは危険であることを示している。

以上のように、室内実験結果と現地スケールでの解析結果をみると、濃度が変化する時間は異なるものの、塩分濃度変化の形態はほぼ同じであることが分かった。このことは、比較的扱いやすい小さなモデルで止水壁に対する塩分の挙動を検討し、それを現地に適用していく手法が合理的な手法であることを示唆している。

最後に、本研究では止水壁構築によって淡水貯留が有効に行われるための実験方法・検討方法を提供した。これにより、塩水侵入により生活用水や農業用水の利用ができなくなっている、あるいは温暖化等の影響で今後生活用水や農業用水の利用ができなくなると予

想される地域においても，止水壁の構築により塩水が淡水に置き換えられることにより利水できる可能性を示した。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、数多くの方々のご指導、ご助言、ご協力をいただきました。

はじめに、本論文をまとめる機会を与えてくださり、主指導教官として、終始適切なご指導ならびにご意見を賜りました鹿児島大学農学部教授靱井和朗先生に深く御礼申し上げます。本論文が完成できたのもひとえに先生の丁寧なご指導と終始変わらない励ましの言葉を頂いた賜と拝謝いたします。

鹿児島大学農学部教授岩崎浩一先生、琉球大学農学部教授酒井一人先生には、副指導教官を快くお引き受け頂き、学位公開審査会などにおいて室内実験や数値解析に対する貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに心より深く感謝申し上げます。

また、ご多忙のところ学位審査会にお越しいただき、適切なお助言を多数頂戴した佐賀大学農学部教授長裕幸先生、佐賀大学農学部近藤文義先生に深く感謝いたします。また、長崎大学教授環境科学部教授中川啓先生（前鹿児島大学農学部）には論文作成についてのご指導、さらに継続して温かい励ましを賜りました。ここに心より深謝いたします。

鹿児島大学大学院大島卓、鹿児島大学松本めぐみの両氏には室内実験装置を用いたパルス・連続注入実験ならびに塩水侵入・排除実験、これに伴うデータ収集や整理など多大なる協力を頂きました。ここに心より御礼申し上げます。

日本工営株式会社の皆様には研究活動全般に継続してサポートを頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。特に中央研究所環境科学グループの草間俊樹氏には図版の作成等にご協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

最後に、この6年間の研究活動への理解を示し応援してくれた両親と兄、特にいつも傍において忙しい時にも温かく励ましてくれた妻に心より感謝します。

参考文献

- 稲積真哉・木村亮・角田敏光 (2011) : 鋼管矢板継ぎ手の内部空間を活用した遮水浄化促進技術に関する解析的検討, 土木学会論文集C(地圏工学), 67(2), 216-227.
- 上田年比古監訳, W. キンツェルバッハ著 (1990) : パソコンによる地下水解析, 森北出版株式会社, 286p.
- 岡山地下水研究会訳, K.Spits and J.Moreno著 (2003) : 実務者のための地下水環境モデリング, 技報堂出版, 395p.
- 小田好博・綿引孝宜・佐藤久・澤田淳 (2010) : 塩淡境界部における塩濃度分布の移流・分散および密度流解析, JAEA-Research, 2010-20.
- 小橋秀俊・三木博史・平山光信・菱谷智幸・山本博之・大北康治 (2004) : 地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定方法について, 土木学会論文集, No.764/III-67, 53-67.
- 鹿児島県与論町 (2008) : 与論町水道ビジョン, 18p.
- 地盤工学会地盤汚染の調査・予測・対策に関する研究委員会 (1999) : 第3回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 11-21.
- 小路順一・靱井和朗・藤野和徳・国武昌人 (1999) : 非混合アプローチによる琉球石灰岩沿岸帯水層への海水浸入解析—離島における地下水資源の保全と開発に関する研究 (I)—, 農業土木論文集, 201, 59-66.
- 小路順一・靱井和朗・藤野和徳・国武昌人 (1999) : 沿岸帯水層における塩水侵入と分散の数値解析, 農業土木論文集, 204, 159-166.
- 高橋昌弘・中川啓・靱井和朗 (2011) : 被圧帯水層における止水壁設置後の淡塩水の挙動, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4.
- 中川啓・靱井和朗・内田一平 (2004) : 塩水侵入阻止型地下ダム貯留域の残留塩分の挙動, 水工学論文集, 48, 367-372.

- 古川博恭 (1981) : 九州・沖縄の地下水, 九州大学出版会, 92-94.
- Abarca, E., Vazquez-Sune, E., Carrera, J., Capino, B., Gamez, D. and Batlle, F. (2006): Optimal design of measures to correct seawater intrusion, *Water Resources Research*, 42, W09415, doi:10.1029/2005WR004524.
- Abarca, E. and Clement, T. (2009): A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater, *Geophysical Research Letters*, 36, L06402, doi:10.1029/2008GL036995.
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E. and Lockington, D.A. (1999): Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers, *Journal of Hydrology*, 216, 17-31.
- Bear, J., Cheng, A., Sorek, S., Ouazar, D. and Herrera, I. (1999): *Seawater intrusion in coastal aquifers - concepts, methods and practices*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bear, J. (1972): *Hydraulics of Groundwater*, Dover Publications, New York, 567p.
- Bjerg, P.L. (2008): *Dispersion in aquifers*, DTU Environment, Denmark
- Chang, S.W, and Clement, T.P. (2013): Laboratory and numerical investigation of transport processes occurring above and within a saltwater wedge, *Journal of Contaminant Hydrology*, 147, 14-24.
- Dagan, G. (1982): Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities. 1. Conditional simulation and the direct program, *Water Resources Research*, Vol.18, 813-833.
- Elfeki, A.M.M, Uffink, G,J.M. and Barends, F.B.J. (1997): *Groundwater Contaminant Transport*,CRC Press, 300p.
- Frind, E.O. (1982): Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater, *Advances in Water Resources*, Vol.5, Issue 2, 73-88.

- Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.R.(1992): A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resource Research*, Vol.28, No.7, 1955-1974.
- Goswami, R.R. and Clement, T.P. (2007): Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, *Water Resources Research*, 43, W04418.
doi:10.1029/2006WR005151.
- Hanson, G. and Nilsson, A. (1986): Ground-water dams for rural-water supplies in developing countries, *Ground Water*, 24(4), 497-506.
- Huang, W.E., Smith, C.C., Lerner, D.N., Thornton, S.F. and Oram, A. (2002): Physical modeling of solute transport in porous media: evaluation of an imaging technique using UV excited fluorescent dye, *Water Research*, 36, 1843-1853.
- Hill, M.C.(1990): Preconditioned conjugate-gradient 2 (PCG2), a computer program for solving groundwater flow equations, US Geological Survey, *Water-Resources Investigations Report*, 90-4048.
- Klotz.D., Seiler K.-P., Neumaier.F.(1980): Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments, *Journal of Hydrology*, 45, 169-184.
- Illangasekare, T.,Scott, W.T., Prabhakar, C., Karen, G.V, A.P.G.R.L. Perera, Jayantha, O., Ananda, G., C.R.Panabokke., David W.H., Kevin J.C., Jagath, J.K., William W.-G.Y., Martinus, T.van Genuchten and Karsten ,J., (2006): Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka, *Water Resources Research*, 42, W05201. doi:10.1029/2006 WR004876.
- Japan Green Resources Agency (2004) : Technical Reference for Effective Groundwater Development. Kanagawa, Japan.

- Langevin, C.D. and Guo, W. (2006): MODFLOW/MT3DMS-based simulation of variable-density ground water flow and transport, *Ground Water*, 44(3), 339-351.
- Langevin, C.D., Daniel T.T,J, Dausman, A.M, Sukop, M.C., Guo, W.(2012), SEAWAT Version 4:A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport, *Techniques and methods book 6 Chapter A22*, U.S. Geological Survey, 39p.
- Luyun Jr., R., Momii, K. and Nakagawa, K. (2009): Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall, *Journal of Hydrology*, 377, 227-236.
- Luyun Jr., R., Momii, K. and Nakagawa, K. (2010) : Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. *Ground Water*,
doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00719.x
- Momii, K., Shoji, J. and Nakagawa, K. (2005): Observations and modeling of seawater intrusion for a small limestone island aquifer, *Hydrological Processes*, 19, 3897-3909.
- Nagata, S., Azuma, K., Asano, M., Nishijima, T., Shiiba, H., Yang, D.S., Nakata, R. (1994): Nakajima subsurface dam, water policy and management: solving the problems. In: *Proceedings of 21st Annual Conference on Water Resources Planning and Management Div. /ASCE*. Denver, Colorado.
- Nakagawa, K., Momii, K. and Berndtsson, R. (2005): Saltwater intrusion in coastal aquifer– comparison between the CIP and MOC simulation technique, *Environmental Modeling and Assessment*, 10, 323-329.
- Nishigaki, M., Kankam-Yeboah, K., Komatsu, M. (2004): Underground dam technology in some parts of the world. *Journal of Groundwater Hydrology* 46(2), 113-130.
- Oswald, S.E., Scheidegger, M.B. and Kinzelbach, W. (2002): Time-dependent measurement of strongly density-dependent flow in a porous medium via nuclear

- magnetic resonance imaging, *Transport in Porous Media*, 47, 169-193.
- Oude Essink G.H.P. (2001): Improving fresh groundwater supply – problems and solutions. *Ocean and Coastal Management*, 44, 429-449.
- Pickens, J.F and Grisak, G.E.(1981): Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, *Water Resoucece Reserch*, Vol.17, No.4, 1191-1211.
- Rasband, W.S. (1997-2012): Image J, U.S.National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>
- Schulze-Makuch D.(2005): Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior, *Ground Water*, 43, 3, 443-456.
- Thorenz, C., Kosakowski, G., Kolditz, O. and Berkowitz, B. (2002): An experimental and numerical investigation of saltwater movement in coupled saturated–partially saturated systems, *Water Resources Research*, Vol.38, No.6, doi:10.1029/2001WR000364.
- Todd, L.W and Mays, L.W. (2004): *Groundwater Hydrology*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 652p.
- Zheng, C. and Wang, P.P. (1999): *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*, Vicksburg, Miss. Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, 169p.
- Zheng, C. and Bennett, G.D. (2002): *Applied Contaminant Transport Modeling*, John Wiley & Sons, New York, 621p.

要 旨

本研究では、気候変動等で今後ますます重要となる離島の淡水資源を確保するための方策のひとつである地下ダム建設時において、地下ダム貯水域に生じる残留塩水の挙動を室内実験と数値解析により検討した。

第一段階として被圧帯水層を模擬した室内実験により、実験装置に塩水侵入させた後、止水壁を挿入すると塩水楔の先端位置が徐々に後退し、最終的には全ての塩水が排除されることを確認した。これにより止水壁設置が塩水侵入を防ぐための有効性を確認した。数値モデルを用いた予測解析によると、止水壁を挿入して残留塩分の洗い出しが効果的であるのは、止水壁挿入位置における塩水楔の高さにほぼ等しい高さとすれば良いということが分かった。また残留塩水が洗い出される過程を詳細に調べた際に、残留塩水塊の内部で循環流が生じ、その外側を流れ塩水タンク側へ流出している淡水が塩分を輸送し、領域外へ塩水を排除していることが分かった。被圧帯水層において、止水壁挿入による残留塩分の洗い出しを数値計算によって検討する場合、正確な横方向分散長を与える必要があることが判明した。

次の段階として、不圧地下水を対象として、地下ダム建設時の止水壁設置により貯水域に残留した塩水の挙動を室内実験と数値解析により検討した。分散長はトレーサーを用いたパルス・連続注入実験の画像解析に基づいて推定した。さらに数値解析および解析解により推定分散長の妥当性を確認した。横方向に対する縦方向の分散長比は20と27を得た。塩水侵入および止水壁設置時の残留塩水の排除実験結果は、室内実験で推定した分散長比27を用いて密度依存型移流分散解析コードSEAWATにより概ね再現できた。縦分散長を固定した分散長比10,27,100の数値解析によれば、分散長比10に比べ塩水排除時間がそれぞれ約1.5倍、2倍となり、排除過程に及ぼす横分散の影響は大きいことが判明した。

第三段階として、現地スケールでの沿岸域地下ダム構築時における残留塩水の挙動を数値

解析により検討した。止水壁構築により残留した塩水は、室内実験と同様に、徐々に洗い出され 25 年後には 70%以上排除された。今回の条件設定下においては、全てが排除されるまでに 25 年以上の時間を要するので、止水壁の上流側を淡水化するには揚水等の対策を行う必要がある。室内実験結果と現地スケールでの解析結果をみると、濃度が変化する時間が異なるものの、残留塩水の塩分濃度変化の形態はほぼ同じであることが分かった。

Study on Residual Saltwater Behavior in Water Storage Area of Subsurface Dam

Summary

The effect of climate change necessitated the construction of subsurface dams as one countermeasure for securing freshwater resources in small islands. The behavior of residual saltwater in the storage area of subsurface dam was examined based on the laboratory experiments and numerical analysis. First, laboratory experiments on saltwater intrusion in a confined aquifer were performed and the behavior of residual saltwater trapped between the cutoff wall and the storage area were observed. The results showed that the toe of the saltwater wedge gradually retreated until all saltwater was finally removed, and that the cutoff wall is effective to prevent saltwater intrusion. Numerical analyses using SEAWAT showed that the most effective wall height to washout the residual salt mass was approximately equal to the height of the saltwater wedge at the where the cutoff wall location. A rotational flow in the saltwater wedge occurred and fresh water discharge flowing at the outer part of this circulation transported and finally flushed out the saltwater. In the numerical evaluation of cutoff wall in confined aquifer, the appropriate transverse dispersivity should be given to flush out the residual salt.

Secondly, laboratory experiments and numerical simulation were performed to investigate the behavior of residual saltwater after installation of a cutoff wall in an

unconfined aquifer. The dispersivity values were estimated using image analysis of tracers on pulse and continuous injection experiments, and validated by numerical analysis and analytical solution. The ratio of longitudinal to transverse dispersivity was 20 in the red food dye tracer and 27 in the fluorescent tracer experiment. Saltwater intrusion and removal experiments were then simulated in SEAWAT using the estimated dispersivity ratio of 27. Numerical analysis using a fixed longitudinal dispersivity showed that compared with a dispersivity ratio of 10, the removal time of the residual saltwater was 1.5 and 2 times for the dispersivity ratio of 27 and 100, respectively. This result shows that transverse dispersion significantly affected the removal process.

Finally, a field scale numerical analysis of the behavior of the residual saltwater after installation of cutoff wall at a coastal area was performed. As with the laboratory experiments, the residual saltwater was gradually washed out. However, it took 25 years for more than 70% of the residual saltwater to be removed. Therefore, real field scenario would require forcible removal of the residual saltwater by pumping to enable freshwater use as soon as possible.