



JAEA-Research

2010-020

## 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

Advection Dispersion and Density Flow Simulation for Salinity Distribution on  
the Transition Zone of Saltwater Intrusion Experiment

小田 好博 綿引 孝宜 佐藤 久 澤田 淳

Yoshihiro ODA, Takanori WATAHIKI, Hisashi SATO and Atsushi SAWADA

地層処分研究開発部門  
地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

JAEA  
Research

August 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:[ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:[ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

## 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

日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

小田 好博, 綿引 孝宜\*, 佐藤 久\*\*, 澤田 淳

(2010年4月22日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの評価において、地下水の挙動を適切に把握することは非常に重要である。また塩水系地下水が存在する場合、緩衝材候補であるベントナイトの基本特性が変化するため、塩水系地下水の分布を把握することが重要となる。塩水系地下水の分布を原位置で把握するためには多大な調査が必要となるため、多くは解析コードによって評価されるが、塩水系地下水と淡水系地下水が存在する場合、密度流が発生し、移流・分散と連成させた複雑な解析が必要とされる。この解析コードの検証については、これまでにも室内試験との比較を通じて積極的に行われてきたが、室内試験で得られるデータの定量性が低かったために、解析コードの比較・検証も定性的にならざるを得なかった。

今回、均質な多孔質媒体を模擬した室内試験装置を用いた塩水楔試験において、塩淡境界（遷移帶）の塩濃度分布等について定量的データが得られたことから、密度流と移流・分散を連成して解析可能な解析コードを用いて解析を行い、比較を行った。その結果、塩水楔の先端位置に関しては比較的良好一致が見られたが、上端位置については過大評価の傾向が見られた。また遷移帶の幅については試験結果では先端側から上端側に向かい大から小になるのに対し、解析では逆に小から大になる傾向が見られた。

今後は試験データの拡充と解析結果の比較を進め、解析結果と試験結果の差異の原因を探る予定である。

---

核燃料サイクル工学研究所（駐在）： 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

\*: (株) NESI

\*\*: 技術開発協力員

## Advection Dispersion and Density Flow Simulation for Salinity Distribution on the Transition Zone of Saltwater Intrusion Experiment

Yoshihiro ODA, Takanori WATAHIKI\*, Hisashi SATO\*\* and Atsushi SAWADA

Geological Isolation Research Unit,  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 22, 2010)

For the geological disposal of high level radioactive waste, it is important to know the groundwater flow to evaluate the performance of geological isolation system. If there is saline groundwater, it is also important to know the distribution of saline groundwater because it affects the fundamental properties of bentonite which is one of candidates for the buffer material. Simulation codes have been widely used for the evaluation of the saline groundwater flow and distribution, to avoid a lot of in-situ investigations and experiments. For this purpose, simulation codes have to solve advection-dispersion flow coupling with density flow which occurs by the density difference between saline and fresh groundwater. Until now, a lot of efforts are done for the verification of the codes through the comparison with the results of laboratory experiments, but the laboratory experiments have so far provided only qualitative data, then the verification cannot be done in quantitatively.

The quantitative data of saltwater intrusion experiment, the width of transition zone and others, are obtained, then we try to simulate saltwater intrusion by a simulation code which can calculate advection-dispersion flow coupled with density flow. Between the results of the simulation and the experiments, the toe point of wedge by the simulation shows good coincidence, but the top point is not good coincidence. As for the transition zone of saltwater intrusion, the band width of the experimental result decrease from the toe to the top, but the simulation result shows countertrend.

We will investigate the cause of the difference through many experiments and simulations in various conditions.

Keywords: Advection-dispersion, Density Flow, Saltwater Intrusion, Saline Ground Water, Distribution of Salinity

---

\*: NESI Nuclear Energy System Inc.

\*\*: Collaborating Engineer

## 目次

1.はじめに .....	1
2.解析 .....	2
2.1 解析モデルおよび境界条件 .....	2
2.2 解析条件 .....	3
3.解析結果 .....	5
3.1 試験結果との比較 .....	5
3.2 分散長をパラメータとした解析結果 .....	12
3.3 分散長と拡散係数 .....	16
4.結論 .....	21
参考文献 .....	22

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Simulation of Saltwater Intrusion .....	2
2.1 Simulation Model and Boundary Conditions .....	2
2.2 Other Conditions .....	3
3. Simulation Results .....	5
3.1 Comparison of Simulation Result with Experimental Result .....	5
3.2 Influence of Dispersion Length .....	12
3.3 Dispersion Length and Diffusion Coefficient .....	16
4. Summary .....	21
References .....	22

## 図表目次

図 1 小型 MACRO 試験装置 .....	3
図 2 塩水楔試験結果（水頭差 13 mm） .....	6
図 3 解析結果（水頭差 13 mm） .....	7
図 4 解析結果（水頭差 8~12, 14~18 mm） .....	8
図 5 塩水楔上端および先端位置における水頭差の影響 .....	9
図 6 塩水楔の上端・先端位置の時間変化 .....	10
図 7 塩水楔の上端・先端位置の時間変化(0~1,500 s) .....	10
図 8 塩水楔の先端, 中央, 上端付近における遷移帯拡大図 .....	12
図 9 透水係数と縦・横分散長を変化させたときの塩水楔の形状 .....	13
図 10 圧力水頭分布 .....	15
図 11 全水頭分布（定常状態） .....	15
図 12 塩水楔形状（透水係数 $6.03 \times 10^{-6} \sim 6.03 \times 10^{-9}$ m/s, 拡散有り, 3×10 <sup>5</sup> 秒後） .....	17
図 13 塩水楔形状（透水係数 $6.03 \times 10^{-3} \sim 6.03 \times 10^{-9}$ m/s, 拡散無し, 定常状態） .....	17
図 14 動水勾配-縦分散長関係図 .....	19
図 15 透水係数-縦分散長関係図 .....	19
図 16 動水勾配-透水係数関係図 .....	20
 表 1 解析条件と試験条件 .....	4
表 2 塩水楔試験結果と解析結果の比較（上端および先端位置） .....	7
表 3 塩水楔試験結果と解析結果の比較（遷移帯） .....	11
表 4 透水係数と縦・横分散長を変化させたときの塩水楔の形状 .....	14
表 5 透水係数と縦・横分散長を変化させたときの遷移帯幅および凹部深さ .....	14
表 6 流速ベクトルの折り返し点の比較 .....	16

## List of Figures and Tables

Figure 1 Equipment for saltwater Intrusion experiment (Mini-MACRO).....	3
Figure 2 Experimental result (water head difference 13 mm).....	6
Figure 3 Simulation result (water head difference 13 mm).....	7
Figure 4 Simulation results (water head difference 8~12, 14~18 mm).....	8
Figure 5 Influence of water head difference on top and toe points of saltwater wedge.....	9
Figure 6 Alterations of top and toe points of saltwater wedge from moment to moment.....	10
Figure 7 Alterations of top and toe points of saltwater wedge from moment to moment (0~1,500 s).....	10
Figure 8 Extended figures of transition zones around of top, middle, and toe points of saltwater wedge.....	12
Figure 9 Shapes of saltwater wedge with different hydraulic conductivities and dispersion lengths.....	13
Figure 10 Pressure head distribution.....	15
Figure 11 Total water head distribution at steady state.....	15
Figure 12 Shapes of saltwater wedge with diffusion coefficient at $3 \times 10^5$ s.....	17
Figure 13 Shapes of saltwater wedge without diffusion coefficient at steady state.....	17
Figure 14 Relation between hydraulic gradient - longitudinal dispersion length.....	19
Figure 15 Relation between hydraulic conductivity - longitudinal dispersion length.....	19
Figure 16 Relation between hydraulic gradient - hydraulic conductivity.....	20
 Table 1 Simulation conditions and experimental conditions.....	4
Table 2 Comparison of simulation result with experimental result (top and toe points of saltwater wedge).....	7
Table 3 Comparison of simulation result with experimental result (transition zone of saltwater wedge).....	11
Table 4 Shapes of saltwater wedge with different hydraulic conductivities and dispersion lengths.....	14
Table 5 Transition zone of saltwater wedge with different hydraulic conductivities and dispersion lengths.....	14
Table 6 Comparison of the turning point of flow vector.....	16

This is a blank page.

## 1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分において、地下深部における地下水挙動の把握あるいは解析は、安全評価における最も重要な事項の一つである。高い塩分濃度を有する塩水系地下水と淡水系地下水が共に地下深部に存在する場合、それぞれの地下水の流動は、互いの地下水分布や流動の影響を受け、複雑な挙動を示すものと考えられる。また、塩水系では淡水系に比べて緩衝材の候補であるベントナイトの力学特性等の変化が大きい<sup>1)-7)</sup>ことからも、塩水系地下水の分布や挙動を把握あるいは解析することが重要であると考えられる。そのため、塩水系地下水が地層処分の調査地区に存在する場合に備えて、塩水系地下水の流動挙動を把握し、塩濃度分布や地下水挙動を評価する手法の整備を進めておく必要がある。更に処分場選定段階においても、処分場設計や人工バリアの設計検討を、塩水影響を考慮して実施することが予想されるため、塩水系地下水が存在する場合の地下水の挙動を基礎的情報として解析評価しておく必要があると考えられる<sup>8)</sup>。

塩水系地下水と淡水系地下水の両方が存在する場合、両者の密度差によって流れが発生（密度流）し、塩水系地下水が淡水系地下水の下部側に浸入する現象（塩水楔現象）が起きる。この現象は、塩水系地下水が存在する場合に地下水の挙動を複雑にする原因の一つと考えられている。安全評価や処分場設計等のためにも、密度流による塩水楔の分布とその経時変化を把握することが重要であるが、原位置において地質環境調査でこの現象を把握するには、地層の不均質性の他、ボーリング孔等で濃度の平均化が起きる<sup>9)</sup>ために、地下水組成分布や流動状況の把握が難しくなり、多大な調査が必要となる<sup>9)-13)</sup>。そのため、数値解析による補足的評価が行われている<sup>9), 14)</sup>。しかしながら塩水楔現象は、浸透流に移流・分散と密度流が連成した複雑な現象であり、解析コードの定性的な検証が行われてはいる<sup>15)-18)</sup>が、原位置のデータを用いた十分に定量的な検証が行われているとは言い難い状況である。そのため解析コードの検証を目的として室内試験<sup>15)-22)</sup>も行われているが、これまででは塩水楔の塩淡境界部の位置の比較が中心的で、塩水と淡水が混じり合う遷移帶における塩濃度分布に関する定量的な測定には至っていなかった。

そこで塩濃度分布を光学的手法で定量的にデータを得る手法を開発<sup>22)</sup>し、小型の多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置（Mass transport Characterization in host Rock, 以下、小型MACRO）<sup>20)-22)</sup>を用いて、塩水楔現象に関する室内試験を実施し、その浸入速度や形状、塩水の分散状況等の定量的なデータの取得に成功した<sup>23)</sup>。

本解析では、小型MACRO試験装置における試験条件を元に、Dtransu2D・EL<sup>24)</sup>を用いて解析を実施し、試験結果との比較を行った。また、小型MACRO試験装置は実際の地質に比べて透水性が非常に高いこと、さらに実際の地質環境では地質によって異なる分散が起き、これが不確実性の要因の一つとなっていることから、分散長と透水係数を変化させることによって塩水楔の形状や塩の濃度分布がどのように変化するかを解析・評価し、実際の地質での解析のための情報を整理することとした。

## 2. 解析

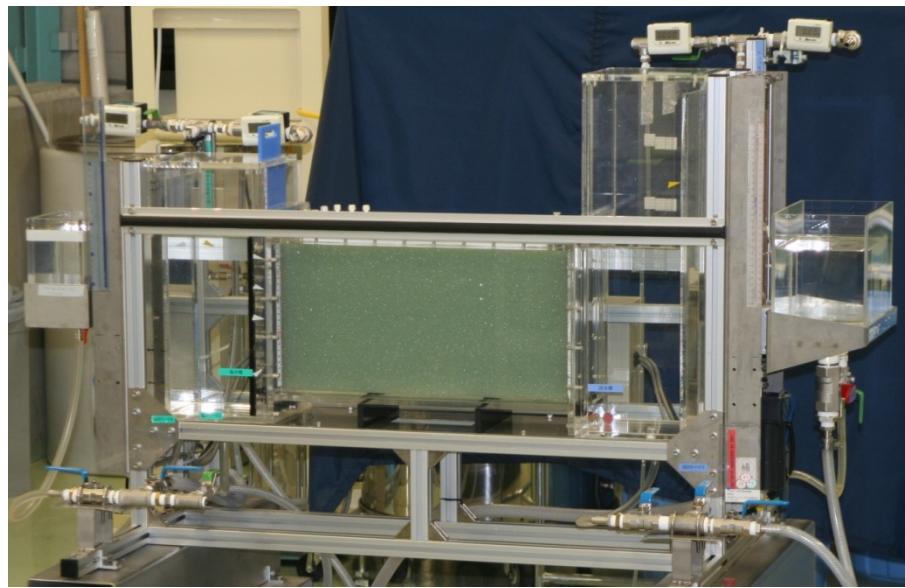
小型MACRO試験装置の形状と後述の試験条件、および塩水楔の浸入現象の性質から、奥行き方向について塩水楔の形状や遷移帶の濃度分布は変化しないと考えられる。そのため、2次元でのモデル化により解析が十分に可能と考えられることから、解析コードは、2次元飽和不飽和移流分散解析プログラムDtransu2D・EL<sup>24)</sup>を利用することとした。使用したバージョンは2.23で、コードの一部について倍精度化等の修正を行った後、解析に使用した。

### 2.1 解析モデルおよび境界条件

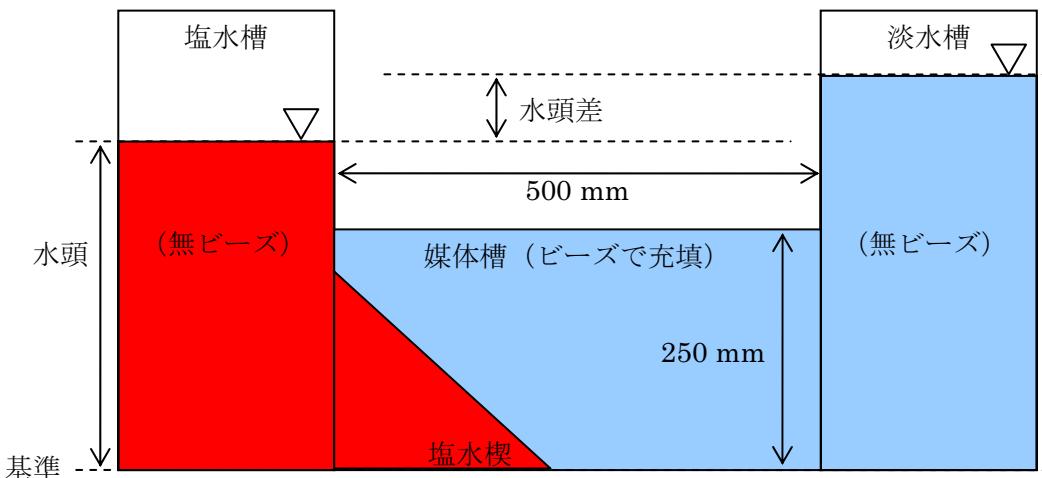
解析対象となる小型 MACRO 試験装置の概観写真と概略図を図 1 に示す。小型 MACRO 試験装置はガラスビーズを充填して均質媒体を模擬した媒体槽と、その両側に塩水及び淡水を供給する水槽（いずれもガラスビーズの充填なし）から成る。塩水楔の遷移帶の塩濃度分布を定量的に測定した試験<sup>23)</sup>では、媒体槽に充填したガラスビーズは粒径 0.710~0.990 mm、密度 2.46 g/cm<sup>3</sup>で、その間隙率は 38.8 %である。塩水楔試験中の水頭は、塩水槽側が 354 mm、淡水槽側及び媒体槽内が 367 mm である。試験に用いた塩水、淡水の水温は共に約 16°C であった。塩水の濃度は 4.00 wt% で、濃度  $50.0 \times 10^{-6}$  g/m<sup>3</sup> の食紅で染色されている。媒体槽の内寸は、幅 499.5 mm、高さ 249.5 mm、奥行き 100.0 mm である。

解析では、媒体槽のみを対象として奥行きのない 2 次元で幅 500 mm × 高さ 250 mm でモデル化した。有限要素メッシュは四角形とし、Dtransu2D・EL の制約上、数万節点が限界であるため、最初に塩水が浸入する部分（塩水槽側）と、塩水の流れが折り返す塩水楔先端付近（底辺近傍）を密にして作成した。すなわち高さ方向については、底部から 20 mm までを 1 mm 間隔、20~40 mm を 2 mm 間隔、40~230 mm を 2.5 mm 間隔、230~250 mm を 5 mm 間隔とした。また横方向については、左端の塩水浸入側から 20 mm までを 1 mm 間隔、20~400 mm を 2.5 mm 間隔、400~500 mm を 5 mm 間隔とした。総節点数は 21,423 点である。

塩水槽側境界は塩水の密度に応じた圧力水頭固定境界とし、また淡水槽側境界は淡水槽の全水頭および濃度”0”的固定境界とした。媒体槽の初期の水頭は、淡水槽の全水頭とした。



(a) 試験装置概観写真



(b) 試験装置略図

図 1 小型 MACRO 試験装置

## 2.2 解析条件

塩水密度は 4.00 wt%を 20°Cの値  $1.0268 \text{ g/cm}^3$ に変換<sup>25)</sup>して用いた。なお、染料の濃度は塩水の濃度に比べて十分に小さいため、粘性等、密度流には寄与しない<sup>22)</sup>として解析上は無視した。

分散長は、原位置等では地盤の不均質性により流速分布が一様ではないため、物質移行距離に依存すると言われており、実際の地質環境においては、一般に流れ方向の分散長（縦分散長）は移行距離の  $1/10\sim1/100$ 、また流れに垂直な方向の分散長（横分散長）は縦分散長の更に  $1/10\sim1/100$  程度に設定されることが多い<sup>26)</sup>。一方で媒体が均質な砂等の場合には縦分散長が土粒子の平均粒

径にほぼ等しく、横分散長は縦分散長のほぼ 1/10 程度と考えられている<sup>26)</sup>。本解析では、小型 MACRO 試験装置で用いたガラスビーズの粒径が 0.710~0.990 mm であることから、縦分散長をビーズ粒径の中央値である 0.85mm とした。横分散長については、縦分散長の 1/10 として 0.085 mm として解析を行った。

媒体槽の透水係数は、試験結果から 6.03 mm/s<sup>23)</sup>、NaCl の拡散係数は  $1.39 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$  とした<sup>27)</sup>。媒体として球形ガラスビーズを用いることから、透水係数の異方性は”0”，また屈曲率は”1”，吸着係数・減衰係数・比貯留係数は全て”0”とした。解析条件と試験条件を表 1 に示す。

解析は、塩水の濃度変化と塩水楔の上端および先端の位置が変化しなくなった状態を定常状態とし、定常状態まで行った。

表 1 解析条件と試験条件

条件		解析	試験
媒体槽	幅 [m]	0.5	0.4995
	高さ [m]	0.25	0.2495
水頭	淡水槽側 [m]	0.367	0.367
	塩水槽側 [m]	0.354	0.354
水温 (塩水・淡水) [°C]	20.0	約 16	
塩濃度 [wt%]	4.00	4.00	
塩水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.0268		
間隙率 [-]	0.388	0.388	
透水係数 [m/s]	$6.03 \times 10^{-3}$	$6.03 \times 10^{-3}$	
縦分散長 [m]	$8.5 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-3}$	
横分散長 [m]	$8.5 \times 10^{-5}$	-	
拡散係数 [m <sup>2</sup> /s]	$1.39 \times 10^{-9}$	-	

### 3. 解析結果

#### 3.1 試験結果との比較

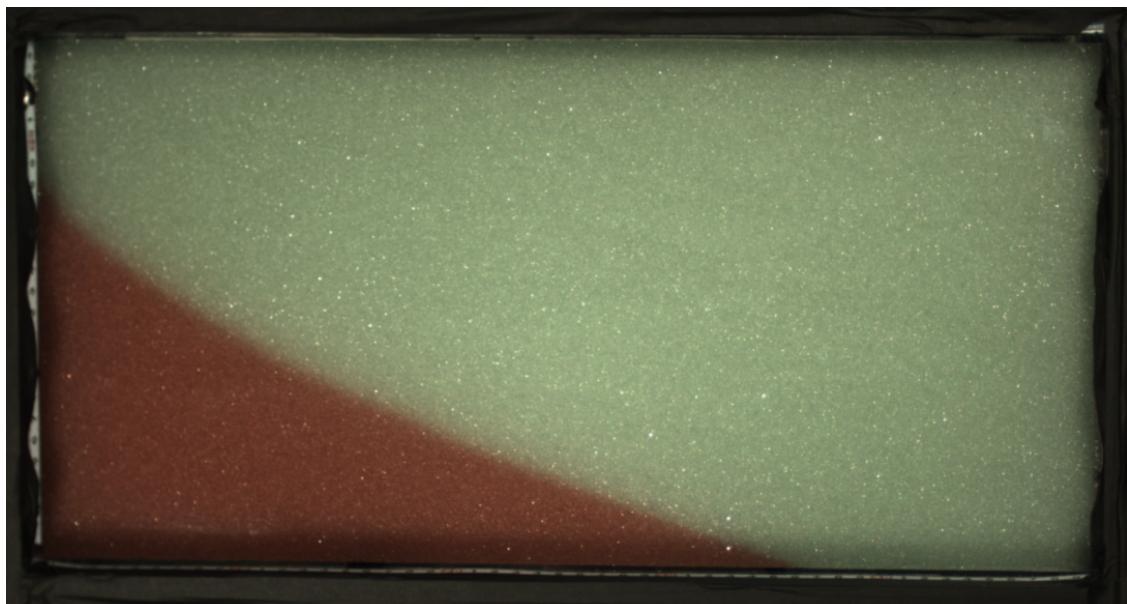
水頭差 13 mm (淡水槽側水頭 367 mm, 同塩水槽側 354 mm) の定常状態における塩水楔の試験結果を図 2 に, 解析結果を図 3 に, 試験との比較を表 2 (解析結果については, メッシュサイズに合わせて 0.5 mm または 1 mm 単位で先端位置等を求めていた) に示す. ここで先端および上端位置は塩濃度 2.00 wt% (相対濃度 50.0 %) で求めている.

水頭差 13 mm における解析と試験の結果を比較すると, 塩濃度 2.00 wt% (相対濃度 50.0%) における塩水の先端位置および上端位置は, いずれも試験結果に比べて解析結果の方が小さくなっている. そこで水頭差が塩水楔の形状に与える影響を調べるために, 水頭差を 8~18 mm の範囲, つまり塩水槽側の水頭を 354 mm に固定し, 淡水槽側の水頭を 362~372 mm 間で 1 mm ずつ変えて解析を行った. この結果を表 2 および図 3~図 5 に示す. 水頭差 8 mm および 9 mm では, 塩水楔の先端が鋭くなっていない. これは淡水槽側の境界を濃度および水頭固定境界にしているためであり, 試験であれば塩水楔の先端が淡水槽側に浸入していたものと考えられる. 水頭差の先端および上端位置への影響は, 水頭差 1 mm で先端位置 15~83 mm, 上端位置が 10~15 mm 变化することが分かる. 先端位置は水頭差が小さい側では水頭差変化の影響が大きい (水頭差 10 mm で 380.0 mm が 11 mm で 297.5 mm と 82.5 mm の変動) が, 水頭差が大きい側では水頭差変化の影響が小さい (水頭差 17 mm で 107.5 mm が 18 mm で 92.4 mm と 15.1 mm の変動) ことが分かる. 一方で上端位置は水頭差 11 mm 付近が最も水頭差変化の影響を受けることが分かる.

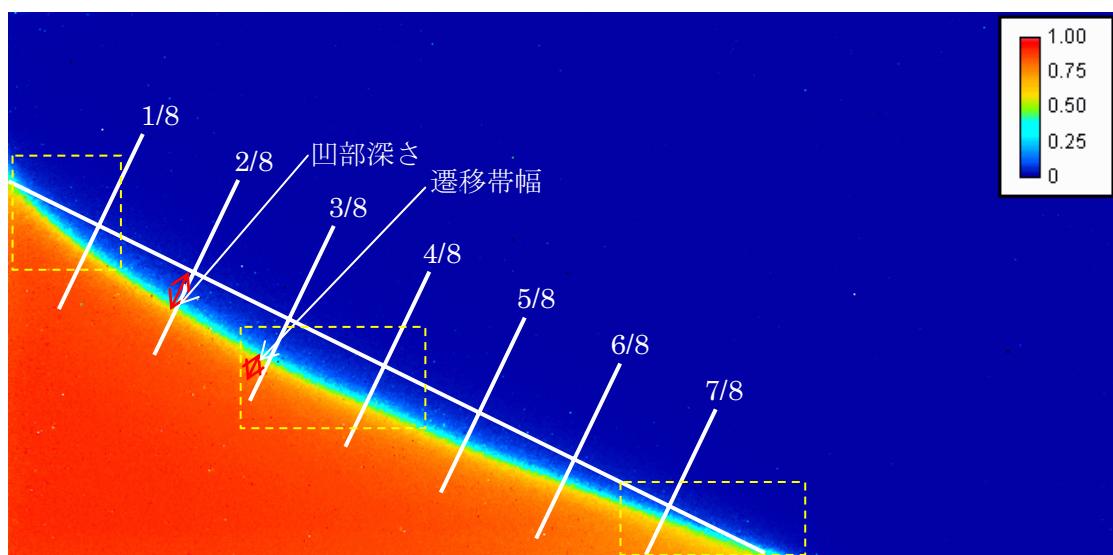
図 5 には Ghyben-Herzberg の法則で求められる塩水楔先端の到達位置を参考までに載せている. Ghyben-Herzberg の法則では, 遷移帯が無視できるほど小さく, また速度水頭が無視できるほど十分に流速が小さいことが想定されている. 水頭差が大きくなるに従い, Ghyben-Herzberg の法則で得られた先端の位置と解析結果の先端の位置が離れていくことが分かる.

試験における水頭差には 1 mm 程度の誤差が見込まれている. 仮に解析結果から試験における水頭差を推定すれば, 先端位置からは 10.6 mm, 上端位置からは 11.1 mm となる. 15.9°C における 4.00 wt% の塩水の密度を文献<sup>25)</sup>より推定すると, 1.0279 g/cm<sup>3</sup> となり, 圧力水頭に換算すると 20.0°C で 1.0268 g/cm<sup>3</sup> の塩水密度の圧力水頭よりも 0.39 mm 程度大きくなる. つまり試験における 13 mm の水頭差は, 20.0°C では 12.6 mm となり, これに試験時の水頭差の誤差 1 mm を考慮しても水頭差は 11.6~13.6 mm となる. 解析結果の先端や上端の位置から推定した水頭差との間に明らかな差が見られる. 他の温度による影響として, 動粘性の変化が考えられる. 淡水の動粘性係数は 20.0°C で  $1.0038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>25)</sup>, 15.9°C は文献<sup>25)</sup>から推測すると  $1.1121 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  と約 10% の違いがある (4.0 wt% の塩水の動粘性係数は文献<sup>28)</sup>から推定すると 20.0°C で  $1.099 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , ただし温度依存性は不明). この違いが塩水楔形状 (上端および先端の位置) に影響を

与えている可能性が考えられる。なお、解析結果の上端位置と先端位置から推定される水頭差に違いがある原因の一つとして、小型 MACRO による塩水楔試験では媒体槽を透過した淡水が塩水槽に流入し塩水濃度が低下することが予想されるが、今回の解析では塩水濃度の低下を考慮していないことが考えられる。いずれにしろ、解析コードの検証のためには、水頭差と塩水楔形状の関係について試験結果を充実させる必要があると考えられる。



(a) カラー画像



(b) 試験結果（濃度校正後）

図 2 塩水楔試験結果（水頭差 13 mm）

塩水楔の上端および先端における相対濃度 50 % の位置を結んで斜辺とし、斜辺を 8 等分した各点から斜辺に垂直に遷移帯に直線を延ばす。各直線上で遷移帯幅を相対濃度 10~90 % で求め、また斜辺から相対濃度 50 % までの距離を凹部深さとする。点線で囲まれた四角は図 8 で拡大する部分である。

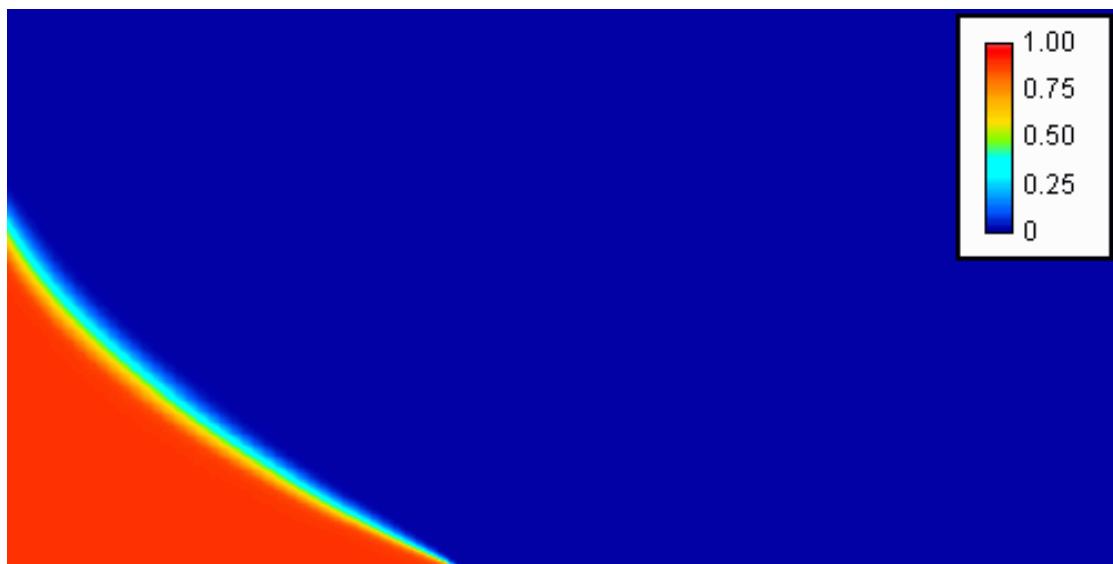


図 3 解析結果（水頭差 13 mm）

表 2 塩水楔試験結果と解析結果の比較（上端および先端位置）

	水頭差 [mm]	先端 [mm]	上端 [mm]
試験	13	345.4	173.4
解析	8	490.0	217.5
	9	490.0	205.0
	10	380.0	192.5
	11	297.5	177.5
	12	240.0	162.5
	13	200.0	150.0
	14	167.5	137.5
	15	145.0	125.0
	16	122.5	112.5
	17	107.5	100.0
	18	92.5	90.0

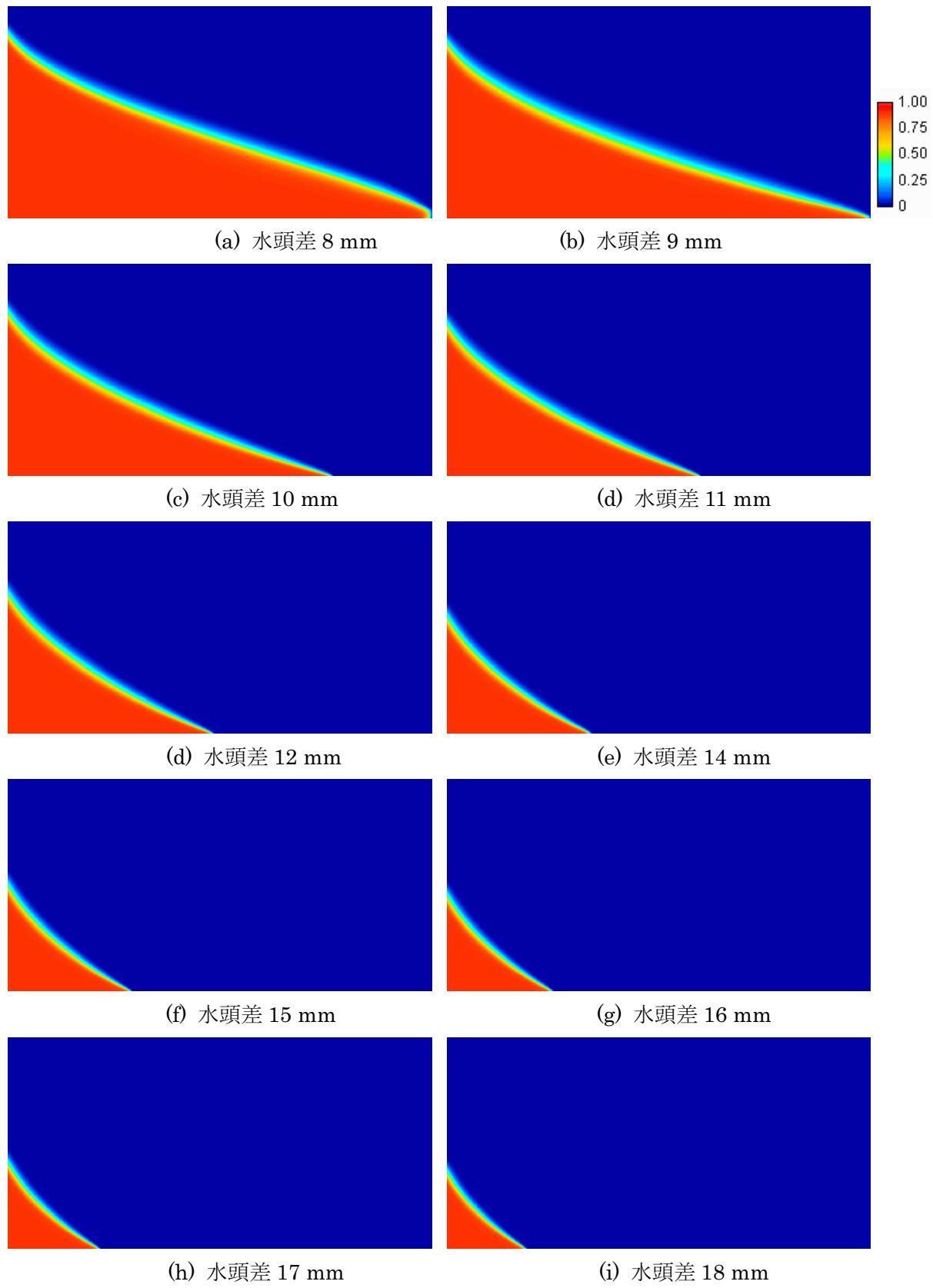


図 4 解析結果 (水頭差 8~12, 14~18 mm)

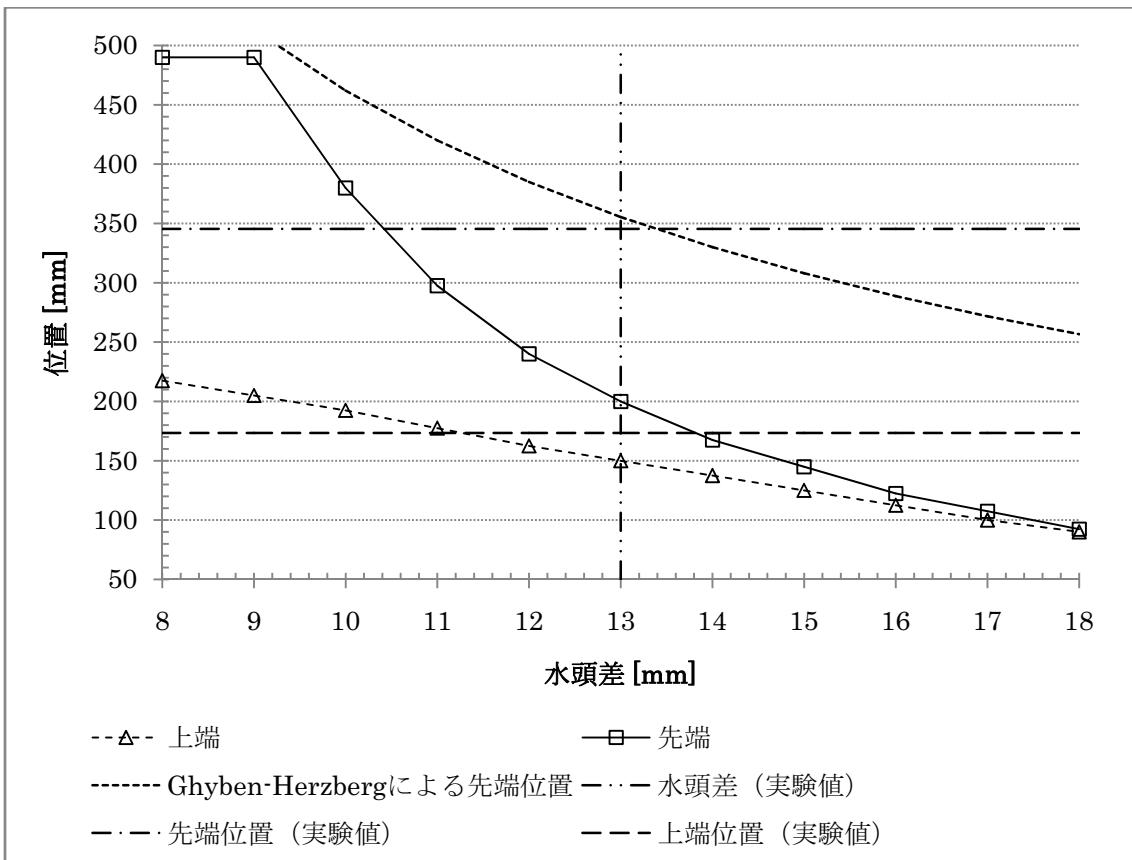


図 5 塩水楔上端および先端位置における水頭差の影響

図 6 は、塩水楔の先端と上端位置の時間変化をグラフ化している。解析では、先端位置が 30 分以上停滯してから動いている結果も得られている。そのため、試験では 10 分間以上、形状変化がないことをもって定常としているが、解析結果と比較すると試験における 10 分間の形状変化の停滯が、定常状態として判断するのに適切であったかどうかを確認する必要があると思われる。先端および上端位置の時間変化について最初の 1,500 秒を拡大したものを図 7 に示す。図 6 からは解析結果も試験結果も、いずれも上端が先に位置変化が小さくなり、先端の位置変化が長く続くことが分かる。図 7 からは、塩水浸入の初期段階において先端の位置変化が試験結果に比べて解析結果では過大評価されていることが分かる。また上端位置変化については更に大きく評価されていることが分かる。解析では塩水楔形状の水頭変化に対する応答速度に過大評価する傾向が見られることから、特に応答速度によって結果が変わるような条件での解析（例えば沿岸域での潮位変化に伴う塩水と淡水の混合等）については、試験結果の拡充を待って、より丁寧な比較検討を行う必要があると考えられる。

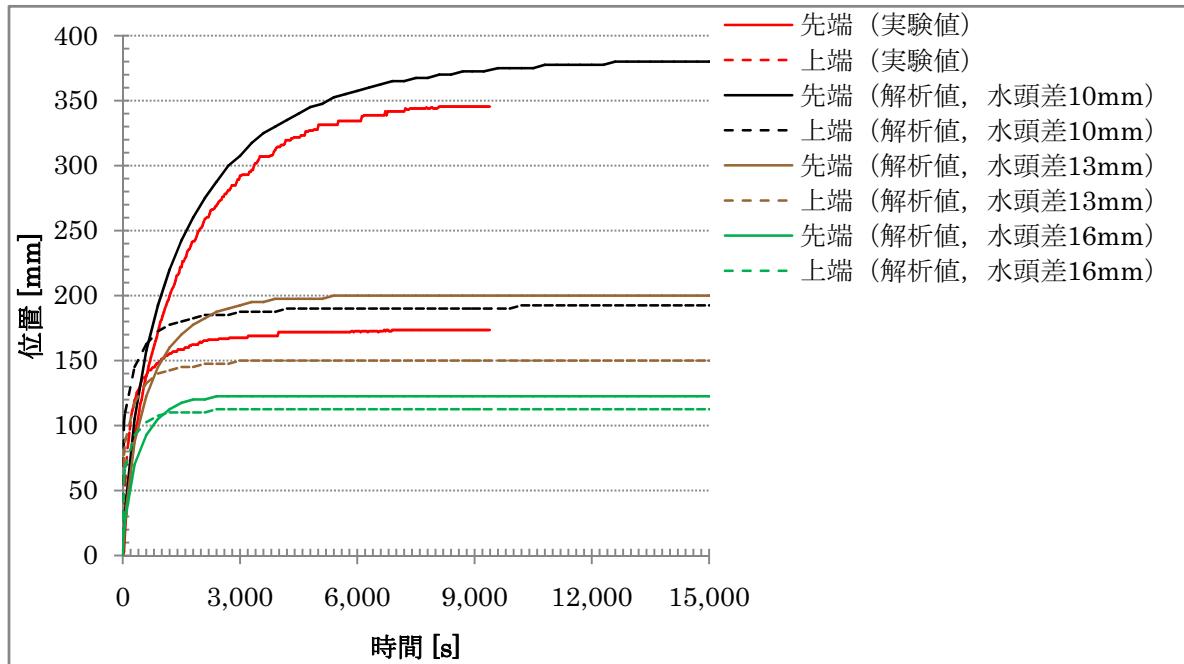


図 6 塩水楔の上端・先端位置の時間変化

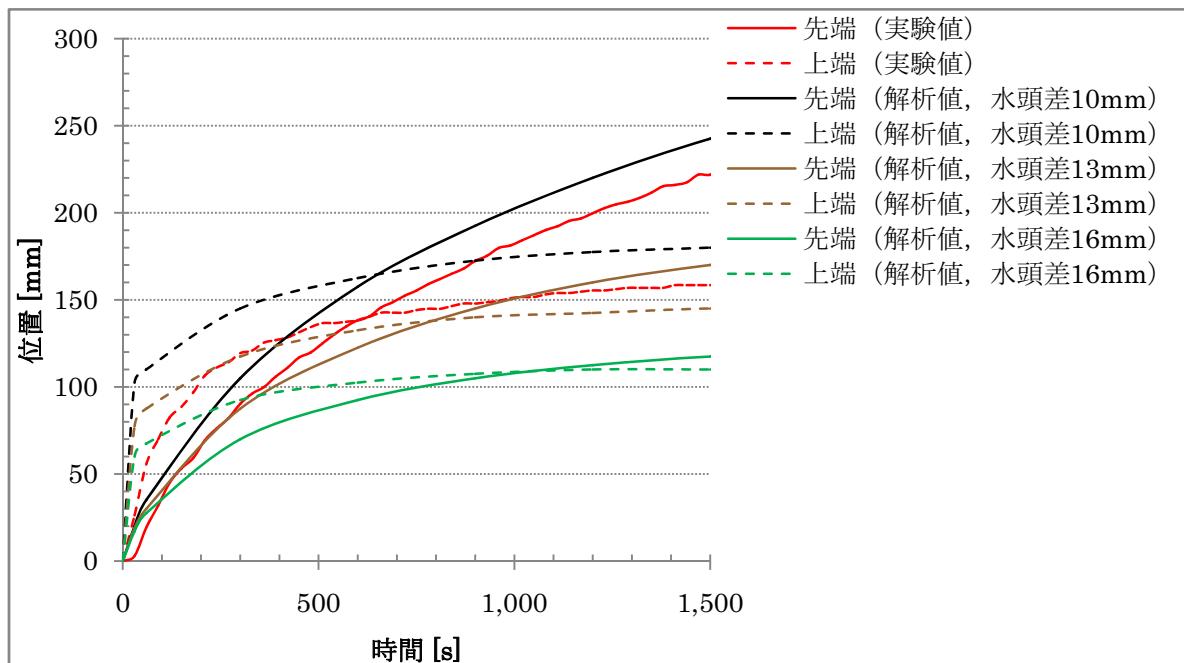


図 7 塩水楔の上端・先端位置の時間変化(0~1,500 s)

塩濃度 2.00 wt% (相対濃度 50%) の塩水楔先端と上端を繋いだ線を塩水楔斜辺として、これを 8 等分した 7 つの点 (図 2 (b) の 1/8~7/8 点) から斜辺に垂直な直線を遷移帯に伸ばした直線上で、遷移帯幅を塩濃度 0.40~3.60 wt% (相対濃度 10.0~50.0 %) で求め、試験結果と比較した (表 3)。解析結果では、水頭差が大きくなるに従い、遷移帯の幅が小さくなっている。塩水楔の上端および先端の位置が試験結果に近い水頭差 10 mm での解析結果で比較すると、塩水楔の中央付近 (2/8~4/8 点) では試験結果と解析結果の遷移帯がほぼ同じ大きさとなり非常に良く一致する。

致している。先端側の 5/8~7/8 点については試験結果の遷移帯幅が解析結果よりも大きくなっているが、上端側の 1/8 点の遷移帯幅については解析結果が試験結果よりも逆に小さくなっている。そこで図 8 に塩水楔先端、中央、上端付近におけるそれぞれの遷移帯の拡大図（図 2 (b) の黄線枠内、解析結果については水頭差 10 mm）を示す。試験結果では、塩水楔先端付近の遷移帯が解析結果に比べて大きく、また解析結果の塩水楔の先端は非常に細く鋭くなっている様子が見られる。中央付近ではいずれの結果も遷移帯の大きさに変化は見られない。上端付近では解析結果の遷移帯の大きさに変化は見られないが、試験結果では小さくなっている様子が見られる。塩水楔先端付近における低濃度の領域が、試験結果では解析結果よりも大きくなっていることから、試験では解析に比べて塩水の下降流が楔の手前で折り返しが始まっている可能性が考えられる。

また同様に斜辺の各点から斜辺に垂直な直線を遷移帶に伸ばした直線上で、遷移帶の塩濃度 2.00 wt%（相対濃度 50%）の位置までの斜辺からの距離（凹部の深さ）を求め、試験結果と比較した（表 3）。その結果、解析結果は試験結果とほぼ同様に斜辺中央よりも少し上（3/8 点）の凹部が最も深いと評価していることが分かった。解析結果から水頭差が大きくなるに従い、凹部の深さが大きくなっていることが分かる。遷移帶と同様に水頭差 10 mm での解析結果で比較すると、解析結果では凹部の深さを過大評価していることが分かる。

表 3 塩水楔試験結果と解析結果の比較（遷移帶）

		水頭差 [mm]	位置						
			1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
遷移帶幅 [mm]	試験値	13	17.0	20.0	20.0	20.7	22.9	25.2	21.5
	解析値	10	20	20	20	19	17	13	10
		13	16	16	16	14	13	10	10
		16	14	13	13	12	10	9	6
凹部深さ [mm]	試験値	13	11.3	17.5	20.8	17.9	15.2	10.3	5.3
	解析値	10	19	25	27	26	21	15	7
		13	9	14	16	16	14	10	5
		16	6	9	10	10	10	6	3

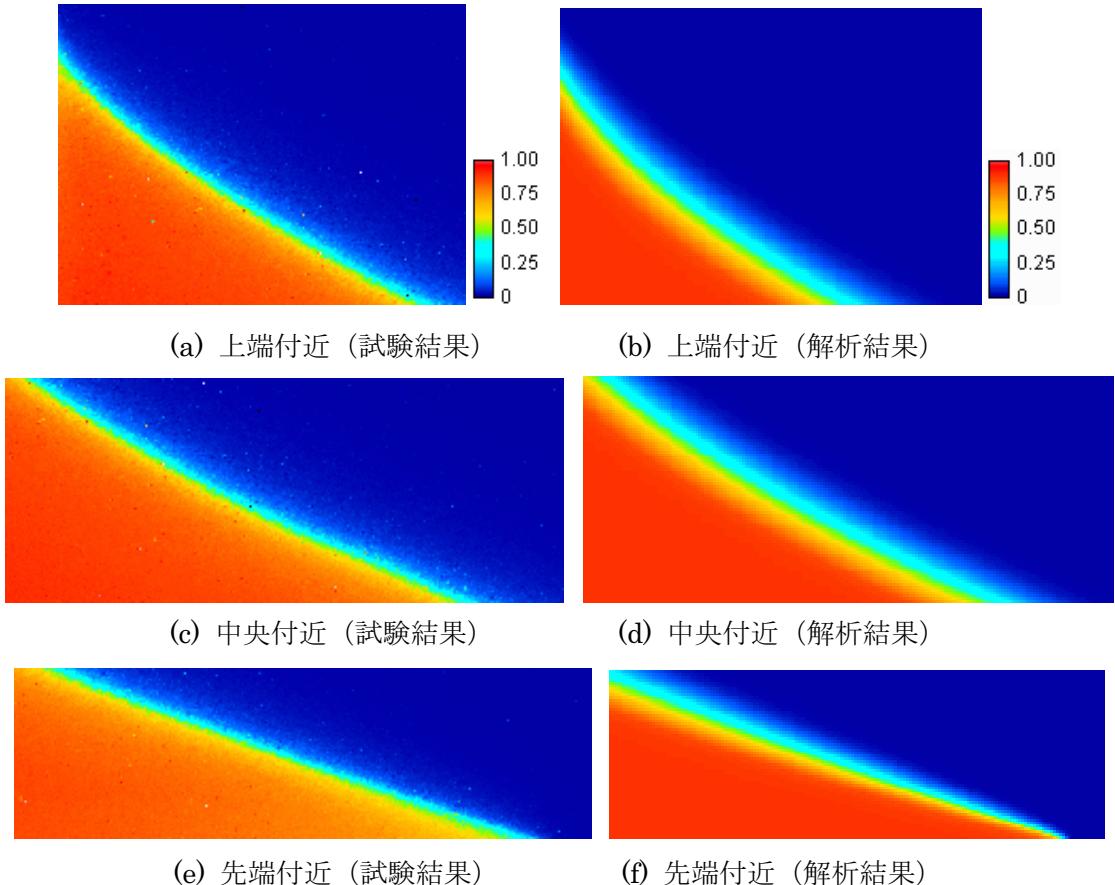


図 8 塩水楔の先端, 中央, 上端付近における遷移帯拡大図

### 3.2 分散長をパラメータとした解析結果

本解析では縦・横分散長が不確定であるため, 便宜的に 0.85 mm 及び 0.085 mm として解析を行っている。そこで縦・横分散長が塩水楔の形状に与える影響を調べるために, 縦・横分散長をパラメータとして, 塩水楔の解析を行った。水頭は塩水槽側 354 mm, 淡水槽側 364 mm とした。また本解析は, 実際の地質に比べて非常に流速が早い条件で解析を行っている。実際の地下環境に解析条件を近づけて検討を行うために, 流速が遅い場合における縦・横分散長の影響についても解析を行った。

図 9 および表 4, 表 5 に解析結果を示す。同じ透水係数で横分散長を小さくした場合(図 9 (a) および(b)) には, 塩濃度 2.00 wt% (相対濃度 50%) での上端位置は変化していないが, 先端位置は分散長が小さい方が長く, また遷移帯も小さくなっている。一方で縦・横分散長を変えず, 透水係数を小さくした場合(図 9 (a), (c) および(d)) では, 塩濃度 2.00 wt% (相対濃度 50%) での先端位置も上端位置も小さくなり, また遷移帯幅も大きくなっている。凹部の深さについては, いずれの場合でも中央より上部側で最も大きくなっている。また図 9 (a) と図 9 (d) を比較すると, 透水係数  $6.03 \times 10^{-3}$  m/s の先端は透水係数  $6.03 \times 10^{-5}$  m/s の先端よりも進んでいるが, 上端付近や中央では逆に透水係数  $6.03 \times 10^{-5}$  m/s の遷移帯が透水係数  $6.03 \times 10^{-3}$  m/s の遷移帯を内

包できるほど広がっている。Ghyben-Herzberg の法則では水頭差 10 mm のとき、先端位置は 462.0 mm となる。Ghyben-Herzberg の法則で想定している条件を考えれば当然であるが、遷移帶が大きくなるに従い、解析結果の先端位置が Ghyben-Herzberg の法則で得られた先端位置から離れていくことが分かる。

塩水楔の先端位置が透水係数の大きさで変わる理由の一つとして、底辺の境界条件との位置関係が考えられる。実際の地質で塩水楔等の解析を行う場合には、評価の対象位置から底辺の境界を十分に遠く設定する必要がある。また塩水分布の到達可能範囲を大きめに評価したい場合は、ただし遷移帶における塩水の濃度分布を特に詳細に議論するのでなければ、縦・横分散長を大きい値で設定する方法が有効である。この場合でも、例えば本解析では、下側 1/3 付近で透水係数  $6.03 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  の遷移帶が  $6.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  の遷移帶の外（淡水側）に現れる。よって本解析から推定すれば、塩水分布の到達可能範囲を大きめに評価する場合、評価対象位置が全体の下側 1/3 以下にならない体系とすべきであると言える。

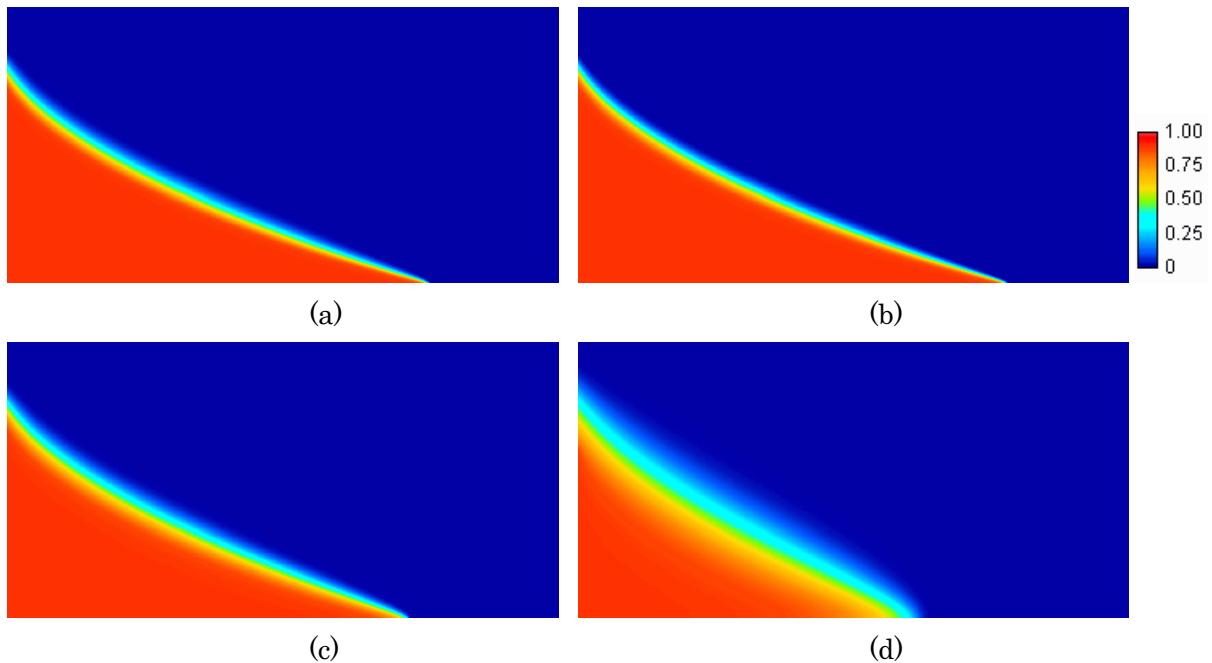


図 9 透水係数と縦・横分散長を変化させたときの塩水楔の形状

- (a) 透水係数  $6.03 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ , 縦分散長  $8.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ , 横分散長  $8.5 \times 10^{-5} \text{ m}$
- (b) 透水係数  $6.03 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ , 縦分散長  $8.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ , 横分散長  $8.5 \times 10^{-6} \text{ m}$
- (c) 透水係数  $6.03 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , 縦分散長  $8.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ , 横分散長  $8.5 \times 10^{-5} \text{ m}$
- (d) 透水係数  $6.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , 縦分散長  $8.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ , 横分散長  $8.5 \times 10^{-5} \text{ m}$

表 4 透水係数と縦・横分散長を変化させたときの塩水楔の形状

透水係数 [m/s]	縦分散長 [m]	横分散長 [m]	先端 [mm]	上端 [mm]
$6.03 \times 10^{-3}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$	380.0	192.5
		$8.5 \times 10^{-6}$	387.5	192.5
$6.03 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$	357.5	190.0
$6.03 \times 10^{-5}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$	290.0	187.5

表 5 透水係数と縦・横分散長を変化させたときの遷移帯幅および凹部深さ

透水係数 [m/s]	縦分散長 [m]	横分散長 [m]	項目	位置						
				1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
$6.03 \times 10^{-3}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$	遷移 帯幅 [mm]	19	19	19	19	16	13	9
		$8.5 \times 10^{-6}$		16	17	17	16	14	11	7
$6.03 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$		25	26	26	26	24	21	16
$6.03 \times 10^{-5}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$		52	58	60	60	58	54	46
$6.03 \times 10^{-3}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$	凹部 深さ [mm]	19	25	27	25	21	15	8
		$8.5 \times 10^{-6}$		19	26	27	26	22	16	9
$6.03 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$		16	22	24	23	19	13	7
$6.03 \times 10^{-5}$	$8.5 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-5}$		10	15	15	13	9	4	0

図 10 に透水係数  $6.03 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  と  $6.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  の浸入初期（ $10^{-3}$  秒後）と定常状態における圧力水頭分布（いずれも縦分散長 0.85 mm, 横分散長 0.085 mm）を示す。また同条件での定常状態における全水頭分布を図 11 に示す。Ghyben-Herzberg の関係式からも自明であるが、塩水楔の釣り合いは、塩水の濃度と塩水－淡水の水頭差で決定される。図 10 に示されるように、浸入開始直後の圧力水頭分布は全く同一であるが、透水係数  $6.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  の定常状態では、遷移帶の大きさに呼応して高圧力水頭の領域が小さくなっている。

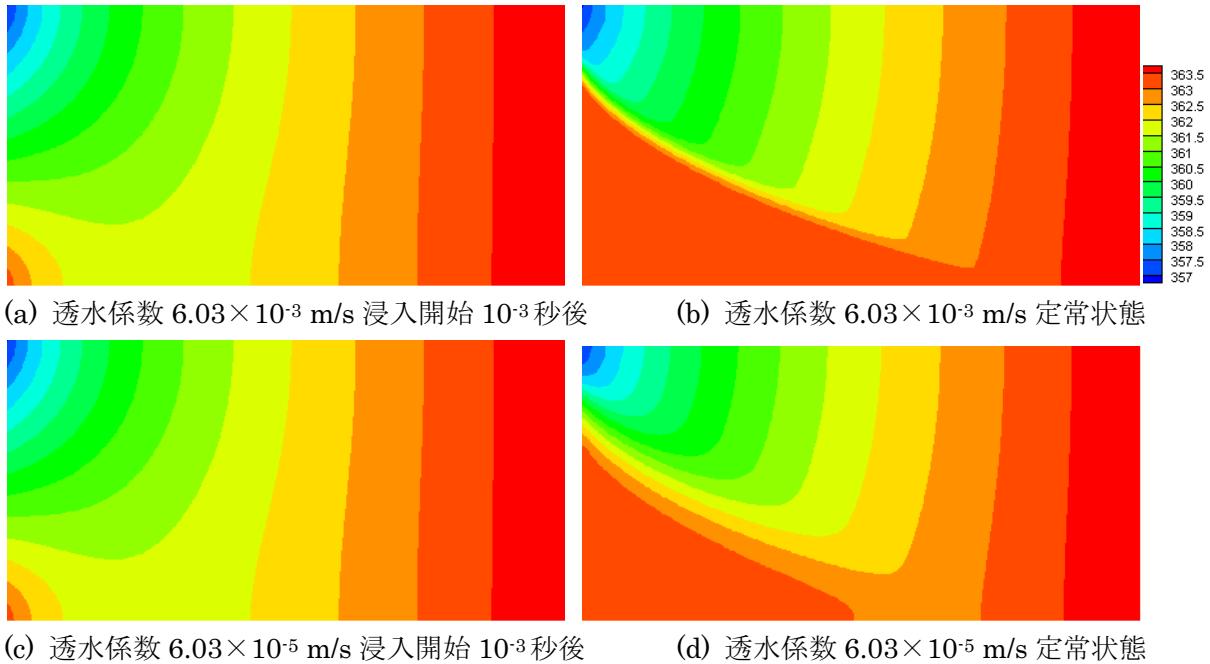


図 10 圧力水頭分布

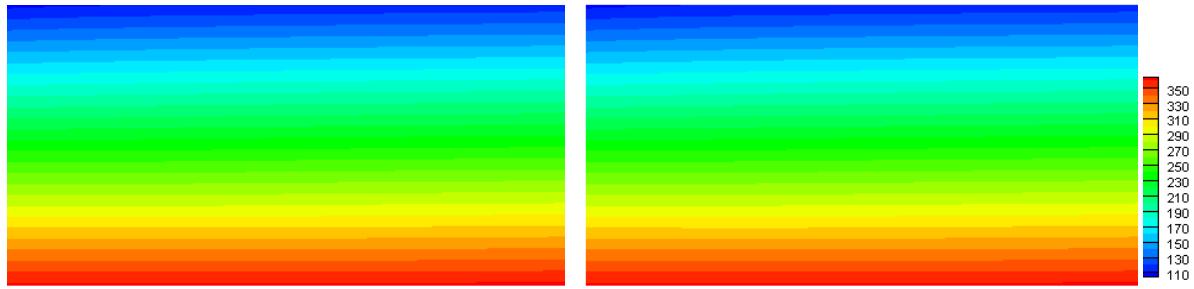


図 11 全水頭分布（定常状態）

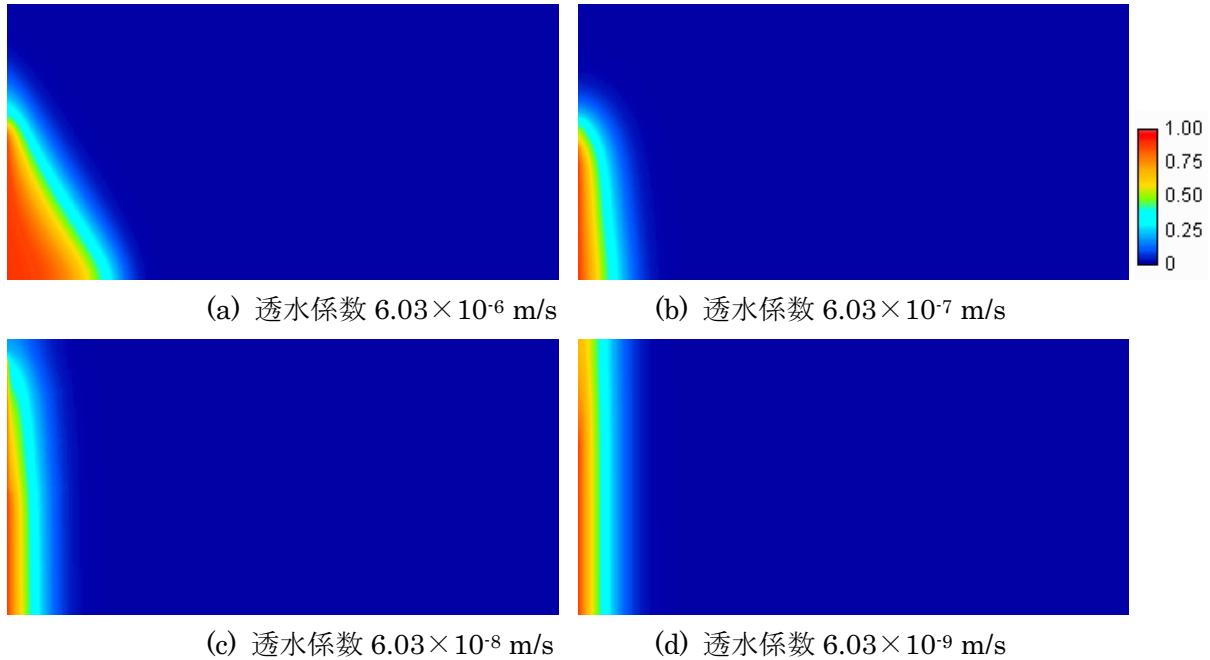
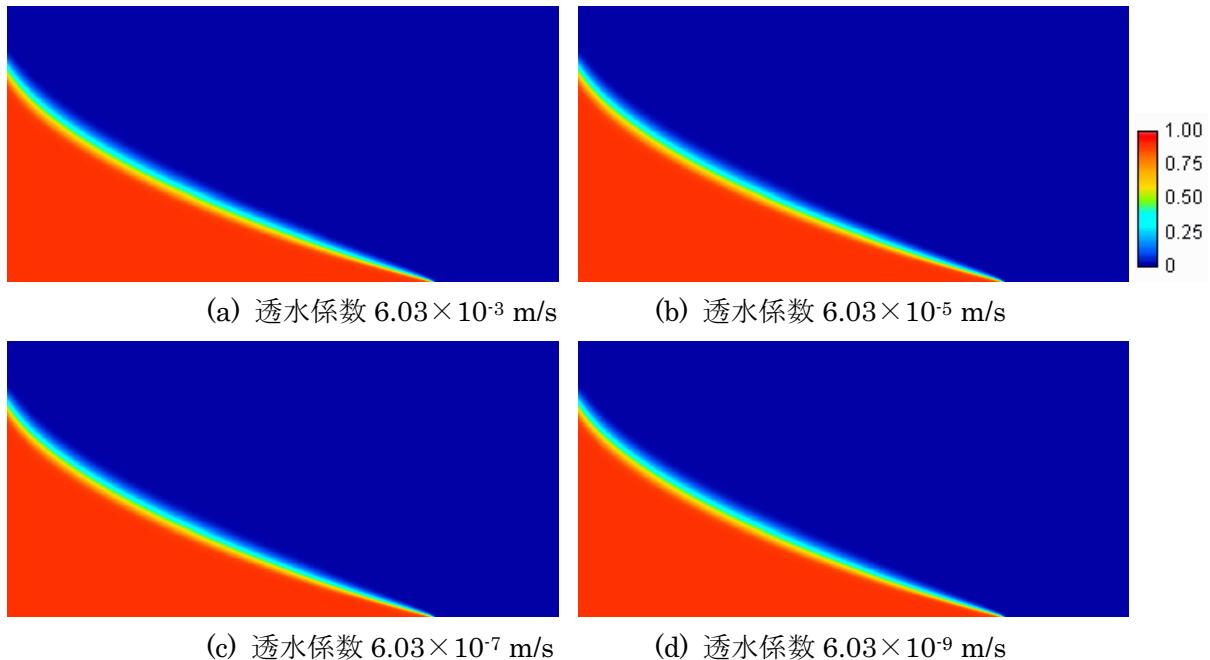
前節で、試験では塩水の流れが楔の先端ではなく、手前で折り返している可能性について言及した。そこで縦分散長 0.85 mm, 横分散長 0.085 mm の時に楔先端付近で遷移帯が大きくなっている透水係数  $6.03 \times 10^{-5}$  m/s の各結果について、同じく透水係数  $6.03 \times 10^{-3}$  m/s,  $6.03 \times 10^{-4}$  m/s の結果と、定常状態で底辺のどの位置で流れの横方向成分の向きが変わっているか比較した（表 6）。透水係数  $6.03 \times 10^{-3}$  m/s のとき、塩水楔先端において相対濃度 10%の位置は 382.5 mm, 相対濃度 50%の位置は 380.0 mm で、ここで塩水の流速ベクトルの底辺に平行な方向の成分（以下、X 方向成分）の正負が逆転している（相対濃度 90%の位置は 375.0 mm）。 $6.03 \times 10^{-4}$  m/s では相対濃度 10%の位置は 365.0 mm（相対濃度 50%の位置は 360.0 mm, 相対濃度 90%の位置は 340.0 mm）で、362.5 mm で流速ベクトルの X 方向成分の正負が逆転している。同様に  $6.03 \times 10^{-5}$  m/s では相対濃度 10%位置は 310.0 mm（相対濃度 50%は 292.5 mm, 相対濃度 90%の位置は 230.0 mm）で、ここで流速ベクトルの X 方向成分の正負が逆転している。いずれの結果でも、解析結果では遷移帯の幅の大小に依らず、塩水の流速ベクトルの X 方向成分は塩水楔の先端近傍で折り返していることが分かる。

表 6 流速ベクトルの折り返し点の比較

透水係数 [m/s]	$6.03 \times 10^{-3}$	$6.03 \times 10^{-4}$	$6.03 \times 10^{-5}$
相対濃度 90%位置[mm]	375.0	340.0	230.0
相対濃度 50%位置[mm]	380.0	360.0	292.5
相対濃度 10%位置[mm]	382.5	365.0	310.0
流速変化位置 [mm]	380.0	362.5	310.0

### 3.3 分散長と拡散係数

地下水の流速が十分に小さい地下環境では、分散よりも拡散によって塩濃度分布が広がっているものと考えられる。そこで、小型 MACRO の条件で透水係数を小さくし、また拡散の考慮の有無によって塩水楔の形状と遷移帯幅がどのように変化するか調べた。透水係数  $6.03 \times 10^{-6}$  m/s ~  $6.03 \times 10^{-9}$  m/sにおいて拡散を考慮した解析結果について、解析上の時間で  $3 \times 10^5$  秒後の結果を図 12 に示す。また比較のため、拡散係数を”0”とした透水係数  $6.03 \times 10^{-3}$  m/s から  $6.03 \times 10^{-9}$  m/s の定常状態の結果を図 13 に示す（代表して  $6.03 \times 10^{-3}$ ,  $6.03 \times 10^{-5}$ ,  $6.03 \times 10^{-7}$ ,  $6.03 \times 10^{-9}$  m/s の 4 つの結果を示している）。透水係数  $6.03 \times 10^{-6}$  m/s では、辛うじて塩水楔の形状を保っているが非常に大きな遷移帯となっており、また透水係数  $6.03 \times 10^{-9}$  m/s では塩分濃度は塩水槽側の境界に平行に広がり既に塩水楔の遷移帯とは言い難い形状となっている。これらの結果から、透水係数が小さくなるに従い、塩水楔の形状が明らかに崩れていることが分かる。一方で拡散係数を”0”とした解析では、いずれも塩水楔の上端と先端に位置について全く同じ結果が得られている。遷移帯については  $6.03 \times 10^{-3}$  m/s から  $6.03 \times 10^{-6}$  m/s までは少しずつ小さくなっているが、 $6.03 \times 10^{-6}$  m/s から  $6.03 \times 10^{-9}$  m/s については全く同じ結果が得られている。この結果から、 $6.03 \times 10^{-6}$  m/s より小さい透水係数では、数値分散が移流・分散の数式モデル上の分散よりも大きくなっていると思われる。

図 12 塩水楔形状（透水係数  $6.03 \times 10^{-6} \sim 6.03 \times 10^{-9}$  m/s, 拡散有り,  $3 \times 10^5$  秒後）図 13 塩水楔形状（透水係数  $6.03 \times 10^{-3} \sim 6.03 \times 10^{-9}$  m/s, 拡散無し, 定常状態）

Dtransu2D・EL や多くの移流・分散解析コードで採用されている Bear らの分散テンソル  $D_{ij}$ <sup>29)</sup> は次式の通りである。

$$D_{ij} = \alpha_T \|\vec{V}^P\| \delta_{ij} + (\alpha_T - \alpha_L) \frac{V_i^P V_j^P}{\|\vec{V}^P\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij}$$

ここで  $\alpha_L$  は縦分散長 [m],  $\alpha_T$  は横分散長 [m],  $\vec{V}^P$  は実流速ベクトル [m/s] ( $\|\vec{V}^P\|$  は実流速の大きさ),  $V_i^P$  は実流速ベクトルの方向成分 [m/s],  $\alpha_m$  は拡散係数 [ $m^2/s$ ],  $\tau$  は屈曲率 [-],  $\delta_{ij}$  はクロネッカーデルタ。

デルタ関数である。実流速 $\vec{V}^P$ は、ダルシー流速 $\vec{V}^D$  [m/s], 動水勾配 $i$  [-], 透水係数 $k$  [m/s], 有効間隙率 $n_e$  [-]を用いて次の通り表すことができる。

$$\vec{V}^P = \frac{\vec{V}^D}{n_e} = \frac{i k}{n_e}$$

これを1次元で単純化すると次の式になる。

$$D = \alpha_T V^P + \alpha_m \tau$$

この式で分散が拡散よりも優位となる条件は次の通りである。

$$\alpha_L \frac{i k}{n_e} \geq \alpha_m \tau$$

小型 MACRO の試験条件から、間隙率 0.388、屈曲率 1、塩の拡散係数  $1.39 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s、縦分散長  $8.5 \times 10^{-4}$  m をこの式に適用すると、透水係数が  $3.17 \times 10^{-5}$  m/s 以上の時に分散が拡散より優位となることが分かる。この値は1次元に単純化した結果であるが、塩水楔現象では、定常状態では遷移帯付近の塩水および淡水の流れは遷移帶に沿っており、また塩水浸入の初期の流れは底辺にほぼ平行していることから、これらについては1次元での検討が適用可能であると考えられる。試験で得られた透水係数よりも 3~6 枝小さくした  $6.03 \times 10^{-6} \sim 6.03 \times 10^{-9}$  m/s 条件での解析結果（図 12）を透水係数が試験結果の 0~1 枝小さい条件での解析結果（図 9）と比較すると、明らかに拡散が先行し、遷移帶が崩れている様子が見られる。

また試験で得られた透水係数よりも 2 枝小さくした  $6.03 \times 10^{-5}$  m/s 条件での解析結果と、透水係数が試験結果の 0~1 枝小さい条件での解析結果を比較する（図 9）と、2 枝小さい透水係数で得られた遷移帶の幅の方が明らかに大きくなっている。これは流れに垂直な方向の分散と拡散によるものである。流れに垂直な方向の分散は横分散長で表されるが、横分散長は通常、縦分散長の 1/10~1/100 に設定される。拡散との優位関係は縦分散長の場合と同様に次式で表され、より早い段階から拡散の影響が顕著に表れることが分かる。

$$\alpha_T \frac{i k}{n_e} \geq \alpha_m \tau$$

実際の地質では、有効間隙率は幅広い値を取り<sup>30~34)</sup>、また屈曲率や間隙径分布も幅広い値が示されている<sup>35), 36)</sup>。仮に間隙率 0.4、屈曲率 0.5 として、塩水における拡散と分散の関係を整理すると、縦分散長、動水勾配、透水係数の関係として次の式のように表すことができる。

$$\alpha_L i k \geq 0.278 \times 10^{-9} [\text{m}^2/\text{s}]$$

この結果を、動水勾配-縦分散長（図 14）、透水係数-縦分散長（図 15）、動水勾配-透水係数（図 16）として整理した。いずれの図も各線より上に離れるほど分散が拡散に比べて優位となり、また線から下に離れるほど拡散が優位になる。これらの図から、塩水系地下水と淡水系地下水の両方が存在する場合に塩水楔現象のように小さい遷移帶が現れるような現象が起きるには、小型 MACRO のように十分に透水係数が大きい、あるいはアップコーニングのように水頭差が十分に大きいと言う条件が必要なことが分かる。

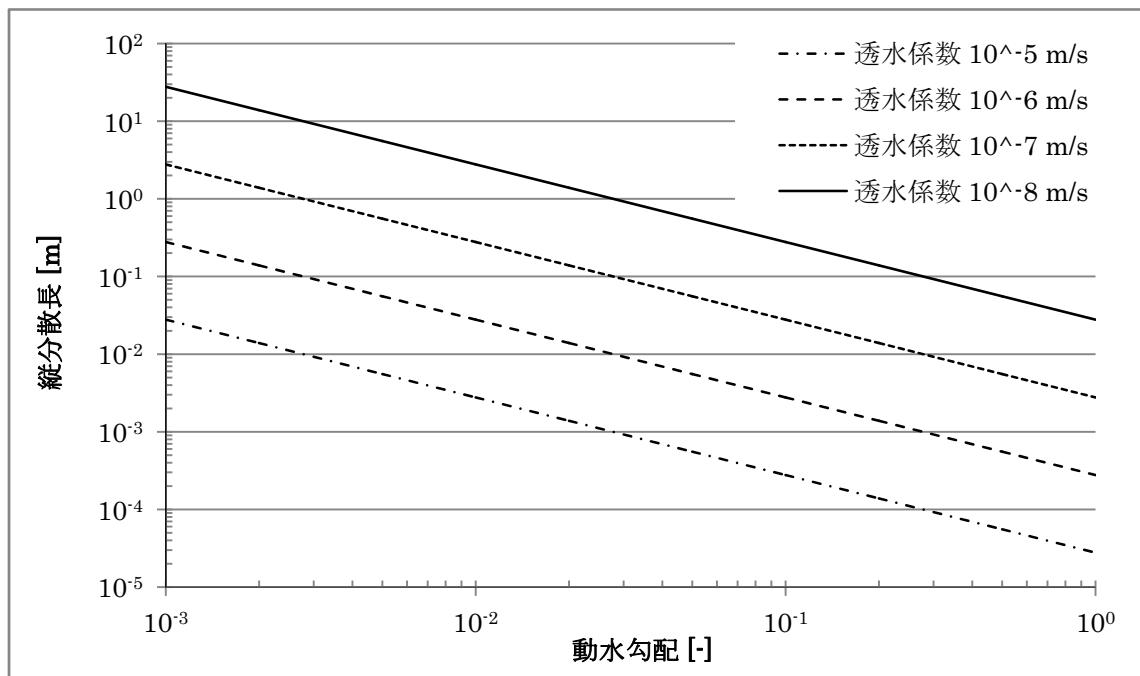


図 14 動水勾配－縦分散長関係図

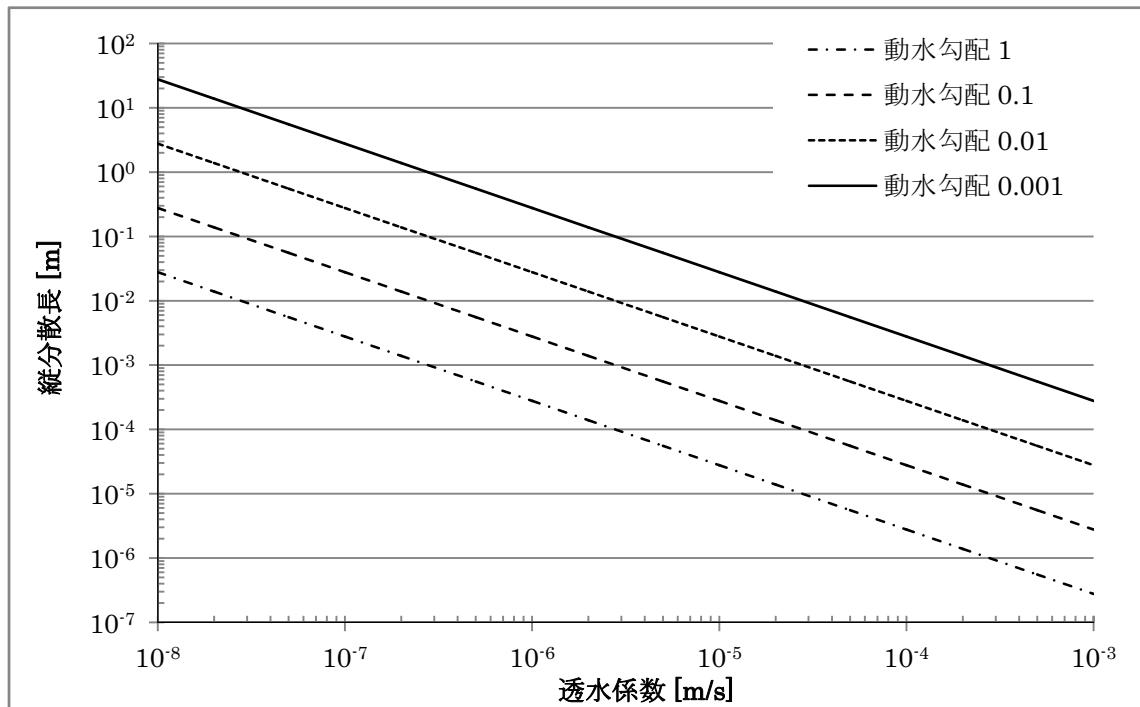


図 15 透水係数－縦分散長関係図

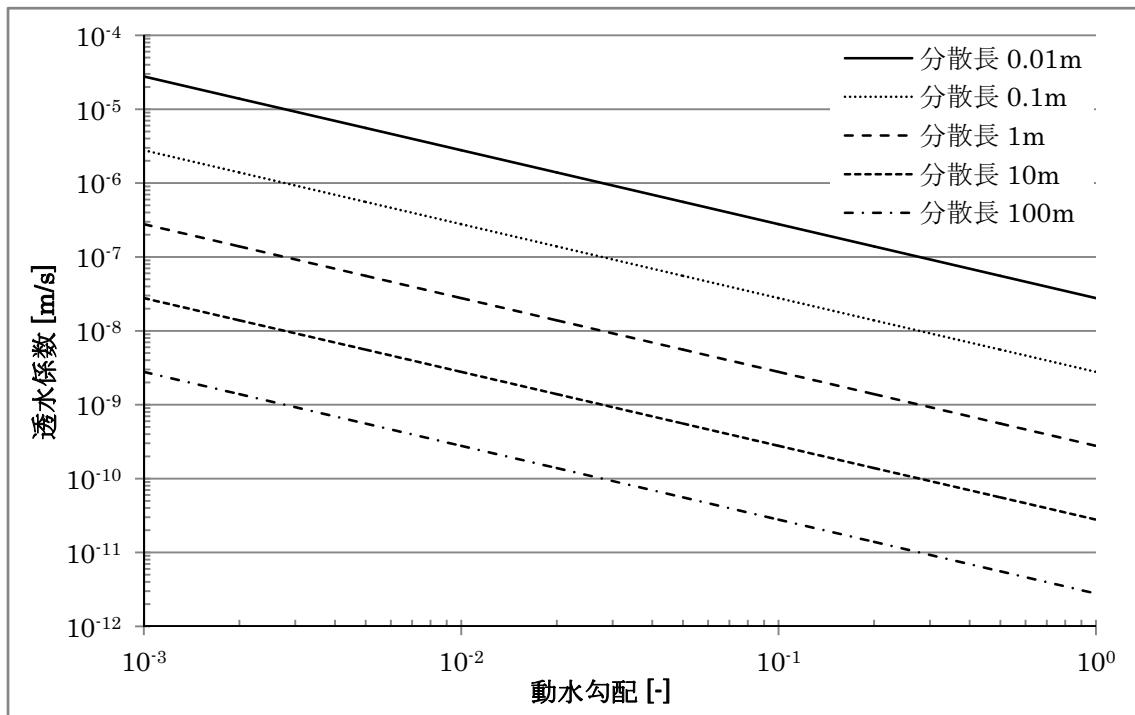


図 16 動水勾配－透水係数関係図

#### 4. 結論

塩水系地下水と淡水系地下水が共存する場合には、地下水の流動評価に移流・分散および密度流を連成して解析を行う必要があり、一方で解析コードの定量的な比較・検証は十分に行われているとは言い難い状況である。そこで小型 MACRO 試験装置を用いた塩水楔試験の条件を元に、Dtransu2D・EL を用いて解析を行い、試験結果と比較した。

塩水楔の上端および先端位置については、試験における水頭差の誤差を考えれば、解析結果は余り一致していないと考えられる。同程度の先端位置となった解析結果で、遷移帯幅や遷移帯が相対濃度 50% の上端と先端の位置で作る斜辺からの遷移帯の距離を試験結果と比較すると、どちらも好い一致が見られた。しかしながら遷移帯の幅や広がり方については、試験と解析で逆の傾向となった。この違いについては Dtransu2D・EL では考慮していない温度の影響（動粘性や密度）も考えられるが、一方で比較可能な試験データが少ないことから、データの拡充が必要であると考えられる。先端や上端の位置の時間変化が、特に塩水楔浸入初期の上端位置について解析が過大評価する傾向が見られた。

透水係数と分散長をパラメータとした解析結果から、透水係数が同じ場合には遷移帯の大きさや上端、先端の位置が分散長に依存することが示された。分散長が同じ場合には、透水係数が小さくなるに従って遷移帯幅が大きくなっている。拡散係数を”0”とした解析の結果では、塩水楔の形状や遷移帯幅は透水係数に依らず同じ大きさであった。この結果から透水係数  $6.03 \times 10^{-4}$  m/s 以下で拡散の影響が現れ、透水係数が小さくなるに従い、その影響が大きくなっていることが分かる。これは Bear 等の分散テンソルを 1 次元で簡略化した結果からも支持される。

以上の結果を踏まえると、実際の地質における塩水分布の解析では、評価対象の位置を底辺（または底面）の境界より十分に離して設定する必要があると考えられる。また塩水楔の到達可能な最大位置を見積もる場合には、塩水楔が十分に再現できる程度に分散長を大きくして解析する必要がある。一方で塩水の到達の有無のみを議論の対象とするのであれば、塩水楔現象が起きる範囲で遷移帯がより大きくなるように分散長を小さく設定することが望ましいと言える。

今回の比較では、遷移帯の幅やその増加・減少傾向、定常状態達するまでの時間や塩水楔浸入初期の位置変化において、解析と試験の結果の間に差異が見られた。今後は他の解析コードでの比較や、より細かいメッシュで解析を行う他、試験データの拡充を待って再度、比較を行うとともに、動水勾配の大きい条件（アップコーニング現象）等での解析を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 菊池広人, 棚井憲治: “緩衝材の基本特性データベース”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8450 2003-010 (2004).
- 2) 菊池広人, 他: “緩衝材の飽和透水特性-II—海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2003-002 (2003).
- 3) 菊池広人, 棚井憲治: “幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2004-005 (2005).
- 4) Hirohito KIKUCHI, Kenji TANAI, and Mikazu YUI: “Database development of fundamental properties for the buffer material in Japan”, Proceedings of GLOBAL2005, Tsukuba, Japan, Oct. 9-13, 2005, Paper No.238 (2005).
- 5) 直井優, 他: “各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響”, 土木学会論文集 No.785/III-70, pp.39-49 (2005).
- 6) 田中幸久, 他: “海水の濃度が各種ベントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に及ぼす影響のモデル化”, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.66-84 (2009).
- 7) Hideo Komine, et al.: “Swelling characteristics of bentonites in artificial seawater”, Can. Geotech. J. 46, pp.177-189, doi: 10.1139/T08-120 (2009).
- 8) 松井裕哉, 他: “設計技術（地下施設設計, 人口バリア設計, 閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”, JNC TN5400 2005-004 (2005).
- 9) 操上広志, 他: “幌延深地層研究計画の地上から調査研究段階における地下水流动に関する調査研究”, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.680-695 (2008).
- 10) 今井久, 他: “気候・海水準変動が地下水流动に与える影響に関する解析的検討—北海道幌延地域を例として—”, ハザマ研究年報 (2007).
- 11) 甲斐邦男, 前川恵輔: “北海道幌延地域の新第三系珪藻質泥岩中の地下水の酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度”, J. Japanese Assoc. Petroleum Tech., Vol.74, No.1, pp.96-106 (2009).
- 12) 核燃料サイクル開発機構: “広域地下水流动解析対象地域における地下水位データ整理業務”, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告, JNC TJ7440 2000-010 (2000).
- 13) 核燃料サイクル開発機構: “広域地下水流动研究の現状—平成4年度～平成11年度—”, 核燃料サイクル開発機構研究報告, JNC TN7400 2000-014 (2000).
- 14) Kenji Karasaki, et al.: “Uncertainty reduction of hydrologic models using data from surface-based investigation”, proceedings, TOUGH Symposium 2009 (2009).
- 15) Rohit R. Goswami and T. Prabhakar Clement: “Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics”, Water Resour. Res. 43, W04418, doi:10.1029/2006WWR005151 (2007).
- 16) Roger Luyun Jr., Kazuro Momii, and Kei Nakagawa: “Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall”, J. Hydrology, 377, pp.227-236 (2009).
- 17) Guangyao Gao, et al.: “Comparison of alternative models for simulating anomalous

- solute transport in a large heterogeneous soil column”, J. Hydrology, 377, pp.391-404 (2009).
- 18) Kenzi Karasaki, Kazumasa Ito, and Keisuke Maekawa: “Simulation of Saltwater Intrusion”, Proceedings, Tough Symposium 2006 (2006).
  - 19) Adrian D. Werner, Daniel Jakovovic, and Craig T. Simmons: “Experimental observations of saltwater up-coning”, J. Hydrology, 373, pp.230-241 (2009).
  - 20) 高須民男, 前川恵輔 : “多孔質媒体中の水理・物質移行現象可視化装置（小型 MACRO）の開発及び予察試験結果”, JAEA-Technology 2006-061 (2007).
  - 21) 高須民男, 前川恵輔, 澤田淳 : “多孔質媒体均質層及び二層均質層を対象とした塩淡境界面の挙動”, JAEA-Research 2008-030 (2008).
  - 22) 佐藤久, 高須民男, 澤田淳 : “小型 MACRO による塩水侵入試験の光学的手法を用いた塩水濃度分布の定量的評価”, JAEA-Research 2008-105 (2009).
  - 23) 小田好博, 他 : “室内試験による塩淡境界部における塩濃度分布の定量的評価” (投稿中)
  - 24) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎 : “飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究”, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.135-144 (1995). (著作権登録番号 P 第 4135 号-1)
  - 25) 国立天文台編 : “理科年表 第 63 冊”, 丸善株式会社 (1989).
  - 26) Karlheinz Spitz and Joanna Moreno: “A Practical Gide to Groundwater and Solute Transport Modeling”, John Wiley & Sons. Inc., pp.69-71 (1996).
  - 27) 化学大辞典編集委員会 : “化学大辞典 2”, 共立出版株式会社, p.328 (1963).
  - 28) David R. Lide: “CRC Handbook of Chemistry and Physics 87th Edition”, CRC Press (2006).
  - 29) Jacob Bear and Arnold Verruijt: “Modeling Groundwater Flow and Pollution”, D. Reidel Publishing Company (1987).
  - 30) Mary P. Anderson and William W. Woessner: “APPLIDE GROUNDWATER MODELING Simulation of Flow and Advective Transport”, Academic Press, Inc., p.41 (1992).
  - 31) 岩の調査と試験編集委員会 : “岩の調査と試験”, 土質工学会, pp.385-387 (1989).
  - 32) 土木学会編 : “水理公式集. 昭和 46 年改訂版”, 土木学会, pp.365-366 (1974).
  - 33) 大久保雅弘, 藤田至則編著 : “地学ハンドブック新訂版”, 築地書館, p.192 (1984).
  - 34) 榎並信行, 大橋幹夫, 楠田隆, 国分邦紀, 小前隆美 : “地下水資源・環境論－その理論と実践－水収支研究グループ編”, 共立出版, p.77 (1993).
  - 35) Jacob Bear: “Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier”, pp.111-115 (1972).
  - 36) 福江正治, 加藤義久, 小松田精吉訳 : “Yong Mohamed and Warkentin 著 Principles of Contaminant Transport in Soils 地盤と地下水汚染の原理”, 東海大学出版会, pp.240-242 (1995).

This is a blank page.



