

## 大気-表流水-地下水混相流連成数値解析

数値解析 混相流 連成問題

名城大学 正会員 ○日比義彦  
八千代エンジニアリング 富樫聡  
名城大学 柏原あゆみ

## 1.はじめに

これまでに地表水と地下水を統合した三次元陸水シミュレーション<sup>1)</sup>が多く使用されてきた。この三次元陸水シミュレーションは地表水を静水圧かつ流れが地表面に平行であるという仮定条件で定式化された。そこで、本研究では、これらの条件を仮定する必要がない気液2相混相流モデル<sup>2)</sup>を、大気、地表水と地下水の連成問題の地表流に適用した。その結果、陸水シミュレーションでは取り扱えない地表面に直交する流れ、また、循環流を扱うことができることが分かった。

## 2.解析方法

今回開発した大気-地表水-地下水連成数値解析シミュレーションでは、地下水にダルシーの法則、地表水と大気に気液2相混相流の一流体モデル<sup>2)</sup>を用いた。なお、気液2相混相流の一流体モデルの運動方程式にはナビエ・ストークスの式を用いた。従って、今回開発したシミュレーションは自由水面の変動、大気と地表水の流れを求めることができる。三次元陸水シミュレーション<sup>1)</sup>の仮定条件を用いる必要がない。

## 3.検証実験方法と解析条件

## (1) 検証実験方法

今回開発した数値解析シミュレーションの検証のために、図-1に示す実験装置を用いた。実験装置は、一辺5cmの正方形の内空断面を持つ長さ90cmの亚克力製の角柱とプレートから構成された。実験装置下端のプレートと角柱の間にスクリーンとOリングを挟み、6本のM6ボルトで角柱とプレートを固定した。

角柱には、水の採取口が実験装置下端より45mmに設置され、さらに、195mmから395mmまでは50mmピッチで設置された。また、実験装置下端より145mmの角柱両面に設置された塩水注入口から0.5%の塩水を圧力水頭500mmで注入した。また、角柱内の水は、実験装置下部から545mmに設置された排水口へ流れ、最終的に大気へと排水された。この実験は25℃の室内で行われた。

実験装置下端から45mm~42.5mmまで、間隙率0.42となるように豊浦砂が詰められた。この試料の固有透過度は透水試験の結果より $2.64 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ となった。塩水注入後、20分と40分に角柱内の水をシリンジ(ERUMO Co., Ltd., 最大体積1.0ml, 最小目盛0.05-ml, 針21G×5/8")により0.5ml採取し、塩分濃度計(ATAGO Co., Ltd., Pocked salt meter PLA-ES1, 測定範囲0~3.0%, 分解能0.01%)で塩分濃度を測定した。

## (2) 検証解析条件

実験装置の上端、塩水の注入口と排水口の圧力を、それぞれ、0kPa、静水圧+0.98kPa、0kPaとし、それ以外では流体の流入流出がない条件(壁)とした。また、実験装置の上端、塩水の注入口の飽和度をそれぞれ0.0と1.0とした。ただし、排水口の中央より下側の飽和度を1.0、上側の飽和度0.0とした。一方、流速に関しては、実験装置下端より45mmまでの境界に平行な流速を0とした。塩分注入口の塩分濃度は0.5%とした。実験装置内の初期の飽和度を実験装置下端から545mmまで1.0とし、それより上側で0.0とした。初期の圧力を静水圧状態とし、さらに、流速と塩分濃度を0と

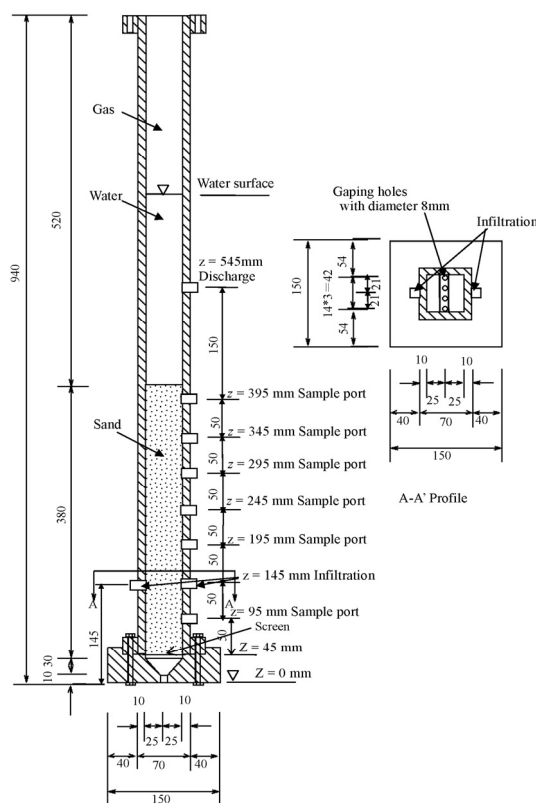


図-1 実験装置の概要

した。実験装置内を、要素幅が鉛直方向に 0.05cm から 2.0 cm, 水平方向に 0.031cm から 2.00 cm の台形または長方形の要素(節点数 2539, 要素数 2372)で分割した。なお、時間間隔を  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$  とした。

土試料の固有透過度は実験で得られた値を用いた。また、空気と水の粘性係数はそれぞれ  $8.9 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  と  $1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 空気と水の密度はそれぞれ  $0.0012 \text{ kg/m}^3$ ,  $1.0 \text{ kg/m}^3$  とした

#### 4. 解析結果

図-2 に実験と数値解析により得られた土試料内の塩分濃度を示す。図-2 によると、塩水注入後 20 分では、実験装置下端より 345mm の水採取口を除いて、数値解析の塩分濃度は実験結果の塩分濃度より 0.03~0.04% 大きくなった。一方、実験装置下端より 345mm の水採取口では、実験結果と数値解析結果の塩分濃度の差は 0.12% と他の水採取口の塩分濃度の差より大きくなった。また、塩水注入後 40 分では、実験装置下端より 30cm 以深で、数値解析の塩分濃度は実験結果の塩分濃度より 0.02~0.04% 小さくなった。一方、実験装置下端より 30cm 以浅で、数値解析の塩分濃度は実験結果の塩分濃度より 0.02~0.06% 大きくなった。

以上のことより、塩水注入後 20 分の実験装置下端より 345mm の水採取口の塩分濃度を除いて、解析精度は 0.02~0.08% となった。従って、今回開発した数値シミュレーションは概ね実験を再現できたと考えることができる

図-3 には数値解析より得られた、塩水注入後 20 分、26 分と 40 分の実験装置内の塩分濃度の分布を示す。本論文では示していないが、数値解析結果の土試料中の水は実験装置の両側の塩水注入位置から上向きに流れた。図 3(a) に示すように、解析結果の土試料内の塩水は、この流れに伴い、実験装置内を下から上へ移動した。特に壁側の塩分濃度が高く、実験装置の中央付近で濃度が低くなった。図 3(b) に示すように、解析結果では、塩水注入後 26 分に塩水が土試料の上端の地表水に流出し始めた。解析結果の地表水中の水は右回りの循環の流れとなり、自由水面付近から排水口へ移動して大気中へ排水された。数値解析結果では、地表水中へ流出した塩水はこの循環により移動した。その結果、図-3(c) のように左の壁側で塩分濃度が高くなり、塩水が流れに従い右回りに移動した。最終的に自由水面付近の塩分が排水口から大気へと排出された。なお、大気中のガスの流れは、実験装置上端より排水口へと流れた。自由水面と排水口に向かう主なガスの流れの間でガスの右回りの循環が生じた。

#### 5. まとめ

本研究では、今回開発した数値解析シミュレーションを用いて、飽和した豊浦砂とその表面に位置する地表水内の水のの流れと、0.5%の塩水の物質移動を再現することができた。従って、今回開発した数値解析シミュレーションが、陸水シミュレーションでは取り扱えない地表面に直交する流れ、または、循環流を扱うことができることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 登坂博之, 地下水と地表水・海水との相互作用 9. 地表水流れの結合解析, 地下水学会誌, 第 44 巻第 1 号, pp.45-52, 2002.
- 2) 秋山守・有富正憲監修, 新しい気液二相流数値解析—多次元流動解析—, コロナ社, pp.150-164, 2002.

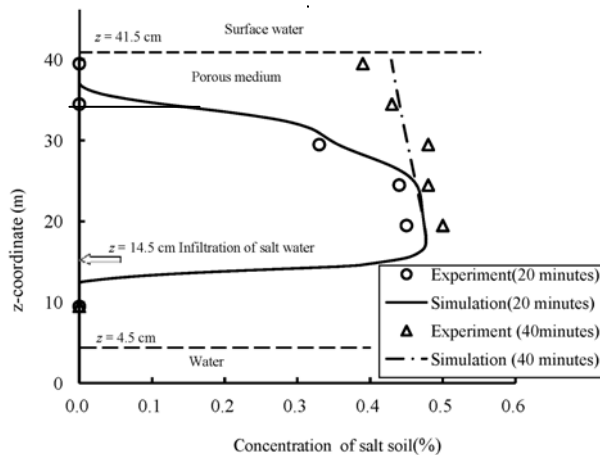


図-2 実験結果と解析結果の塩分濃度の比較

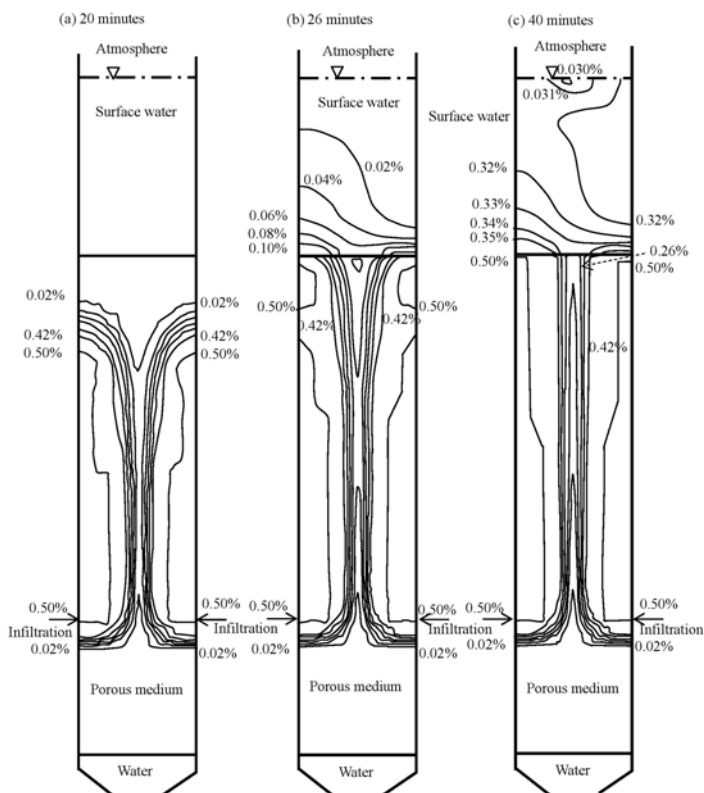


図-3 解析結果より得られた実験装置内の塩分濃度の分布