

数理モデルによる陸水流動系、塩淡境界、および海底湧水のシミュレーション

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 登坂 博行

1. はじめに

海洋から大気圏を通し輸送された水（水蒸気や微細な液滴）は、陸域に降水としてもたらされ淡水陸水（河川、湖沼、地下水）が形成される。これらは周辺海域の海水圧とのバランスにより河川や地下水として沿岸部や海底に流出し、最終的に海洋へ回帰するサイクルを構成している。

この循環系は陸域地形、地表・地下の地質、沿岸海底部の地質、海洋の状態（潮位の変動、長年の海水準の変動）により支配され、極めて短時間の河川流出から、極めて深部を通り長時間・長距離を経由する流動が存在する。

沿岸海底にしばしば見つかる海底地下水湧水は、このような循環の一部であり、沿岸部の地質状態や陸域淡水ポテンシャルに関し貴重な情報を与えてくれるものと考えられる。

本発表では、特に沿岸部から海底地下における淡水と塩水の動きに関して数理的な説明をすると共に、2次元、3次元の計算によるいくつかの試みを紹介する。

2. 陸水・塩淡境界・海底湧水の連成系シミュレーション

陸域および海域地下の淡水と塩水の流動は、一般化されたダルシー則と、密度の異なる流体の混合・置換・移流分散現象として定式化される。陸域不飽和帯の気液2相流も考慮すれば、以下の様になる（例えば、登坂ら,1996；登坂,2006 参照）。

$$\nabla \cdot \left(\frac{(\rho_w - C) K k_{rw}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - (\rho_w - C) q_{w,well} = \frac{\partial}{\partial t} ((\rho_w - C) \phi S_w) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho_g K k_{rg}}{\mu_g} \nabla \Psi_g \right) - \rho_g q_{g,well} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \phi S_g) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho_w K k_{rw} C}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) + \nabla \cdot (D \nabla C) - q_{w,well} C_{well} = \frac{\partial (\phi S_w C)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_w + S_g &= 1, \Psi_g = P_g + \rho_g g z, \Psi_w = P_w + \rho_w g z \\ P_w &= P_g - P_c(S_w), k_{rw} = k_{rw}[S_w], k_{rg} = k_{rg}[S_w] \\ \rho_w &= \rho_{w0}[P_w, C, T], \rho_g = \rho_g[P_g, T] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、添え字 w, g は水相、気相を表し、 $\rho [kg/m^3]$: 気相或いは塩水を含む水の密度、 $C [kg/m^3]$: 塩分濃度、 $K [m^2]$: 地層の浸透率、 $\mu [Pa \cdot s]$: 粘性係数、 $kr [-]$: 相対浸透率、 $\Psi [Pa]$: 流体の水理ポテンシャル、 $\phi [-]$: 間隙率、 $S [-]$: 飽和率、 $q [m^3 / (m^2 s)]$: ソース項、 $D_{i,j} [m^2/s]$ は分子拡散および機械的分散効果の係数である。

方程式(1)~(3)を、未知量として気相圧力、水飽和率、塩分濃度につき解くことで、塩淡密度流の解析ができる。

3. 塩淡境界と海底地下水湧水に関するケーススタディ

3.1 沿岸地層の均質性・異方性による塩淡境界形状変化

沿岸域地下には陸域淡水圧と海洋塩水圧の押し合いにより塩淡境界が形成される。その形は以下のような要因により変化するものと考えられる。

- ・陸域地形：沿岸部に高い山や台地が迫っているか、沖積平野が広がっているかなど
- ・降水量：降水量が少ない場合は地下水位が低く、海水の侵入が大きい。逆の場合は逆
- ・地層の形態：陸域から海底への連続性、互層状態、水理物性、均質性・異方性などが影響する
- ・地下水位分布：上記要因の結果として出来上がる地下水位の標高が塩淡境界の形に影響する。

ここでは、KOYAMA et al.(2008) が行なった多数のケーススタディを紹介し、沿岸域の塩淡水境界形状が前記条件の変化によりどのように変化し、結果として海底地下水湧出などにどのように寄与するかを説明する。

3.2 長期海水準変動と塩淡水境界・海底地下水の動き

過去の最も新しい氷河期（ウルム氷期）は約 12 万年前に始まり、約 2 万年前に最氷期を迎え海水準は 120m 程度低下し、やがて急激に温暖化し、1 万年～5 千年程度前には最大海水準となったと考えられている。このような気候変化に伴う海水準変動は 10 万年オーダーで繰り返していると考えられ、必然的に陸域淡水の流動系に変化を与える。例えば、海退により陸化した海底の河川浸食、淡水地下水の海底地下への張り出し、露出海底地下の塩水の淡水による置換、或いはその逆の作用が想像される。

では、果たして、過去の海退時の淡水地下水の残塊が現在の海底地下に残っている可能性があるのだろうか。

発表では、登坂(2002a, b)が東北地方の陸域から海域をつなぐ 1 断面を使い行った地層の隆起、海進・海退の条件下での計算を紹介し、考察を行う。

3.3 国土スケールモデルによる海底地下水湧水の推定

非常に広い領域（数万 km²）の大規模な 3 次元モデルを作成し、陸域と沿岸域の流動系を捉えようとする試みが行われている（森ら,2008；佐土原,2010）。また、日本全土にわたり陸域と海底地形をモデル化し、陸域・沿岸水循環の大局構造を捉える試みも行なわれている。これは、大地形による地表や地下の流動系の構造推定、広域の水資源量評価、温暖化による地下水淡水資源量の変化の予測、潜在水力発電ポテンシャルなどの全国概要評価を目的としたものである。

後者のモデルは、陸域および沿岸海洋部を平面的に 1km オーダーのグリッドに分割し、地形および大まかな地質状況を入力した 3 次元モデルであり、降水入力に対応して河川による流出、地下水流動が計算される。また、このモデルには海底地形が反映され、海域に塩水が満たされた条件で計算が行われており、陸域地形や地質条件次第では海底に地下水が湧出する様子が出てくる。

計算では、まず気相圧力、水飽和率、塩分濃度が算出され、流動場（速度場）が決定される。次にその流動場の多数の点に粒子を置き、粒子追跡法により 3 次元の動きを捉えることで、陸域で涵養された水粒子の地下浅部を通過した流動系や、地下深部に潜り込みながら海底地下を通り海底面に湧き出すものなどが可視化される。

このような計算は粗いものであるが、大きな地形によりできる流れの様子を比較的よく反映しているようであり、今後の海底地下水湧水などに有益な情報を提供できる可能性がある。

本発表では、以上のような様々なシミュレーション事例を紹介し、今後の海底地下水や地震の研究にお役に立てれば幸いと考えている。

参考文献

登坂博行、小島圭二、三木章生、千野剛司（1996）： 地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌、第 38 巻第 4 号、253-267.

登坂博行（2002）：地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討、その 1 静的境界条件下における感度解析と一般的議論、応用地質、43巻5号、293-305.

登坂博行（2002）：地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討、その 2 動的境界条件下における感度解析と一般的議論、応用地質、43巻5号、306-315.

登坂博行(2006)：地圏水循環の数理、東大出版会、2006.

Hajime KOYAMA, Hiroyuki TOSAKA (2008) :What dynamic shapes of freshwater-saltwater interfaces are expected under realistic hydro-geological conditions?, Int. Assoc. Hydrology, Oct., 2008 in Toyama.

森康二、多田和弘、西岡哲、佐藤裕一、ガウラブ・ショレスタ、佐土原聡、登坂博行（2008）：神奈川拡大流域圏における自然水循環挙動の復元可能性の検討、日本地下水学会平成 19 年度秋季講演会講演論文集、68-73.

佐土原聡編（2010）：時空間情報プラットフォーム—環境情報の可視化と協働、東京大学出版会、202-218.