

## 沿岸域帯水層塩水侵入平面モデル開発に関する基礎的研究

### Fundamental Study on Development of Horizontal Seawater Intrusion Model in Coastal Aquifer

浜口 俊雄・Ahmed KAMAL<sup>(1)</sup>・角 哲也

Toshio HAMAGUCHI, Ahmed KAMAL<sup>(1)</sup> and Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

This paper proposes a horizontally two-dimensional seawater intrusion model in conjunction with vertically two-dimensional seawater intrusion behavior. In modeling vertically two-dimensional seawater intrusion behavior, the freshwater depth at the coastal line is theoretically modified from zero to the theoretically appropriate value. The positions of the interface between seawater and freshwater in a vertical section can be then obtained. The horizontal model of seawater intrusion is produced through incorporation of the modified interface positions based on the two-dimensional advection-dispersion equation in the porous media. It can be shown that seawater intrusion behavior is described by the proposed model on behalf of three-dimensional model.

**キーワード** : 地下水, 帯水層, 塩水侵入, 淡水, 平面モデル

**Keywords** : Groundwater, Aquifer, Seawater intrusion, Freshwater, Horizontal model

#### 1. 序論

世界中の沿岸部は帯水層が海に面しており, そこから地下水が流出すると同時に海水がくさびとなって帯水層内に侵入している。また河口部でも, 河川が海に流出する一方, 河床部では塩水遡上が見受けられる。日本は島国であり, Fig.1. で見て取れるように, 昔から沿岸域の多くの地点で塩水侵入が認められている。近年では, 気候変動に伴う地球温暖化によって, 海面上昇が危惧されてきているため, さらなる深部への塩水侵入・塩水遡上が予想される。そこで日本の塩水侵入問題を深刻に受け止め, これに対して事前に解析などで予測検討しておく必要がある。しかしながら, 現状, 流域毎に地下水塩水侵入を検討するには大変な労力と時間を要する。特に地下水塩水侵入では3次元挙動をするため, 事前検討を進

めることは1つの流域の地下水に対する塩水侵入解析の準備すら多大な時間がかかり, 計算労力も多大なものとなることは想像に難くない。そのため, 広域塩水侵入解析が準備過程も計算過程も容易に遂行できるモデルの存在が望まれる。

本研究では, こうした広域解析を視野に入れ, 広域の帯水層内の塩水侵入の影響特性を解析で容易に把握すべく, まずは定常な状態での鉛直断面での理論展開から検討を始める。そこで得られた理論展開結果を基に, 塩水侵入平面モデルを提案する。ただし本稿では上記特性把握ならびに大きな計算格子でも適用できる塩水侵入平面モデル開発が主眼であるため, 理論展開する上で, 塩水と淡水が容易に分散拡散的な混合をせずに淡塩境界面が明瞭な状態のままであると仮定して式展開し, 実際に分散拡散で生じる混合域を特性把握過程では表現しないか

- : Area damaged by seawater intrusion
- : Area partially damaged by seawater intrusion

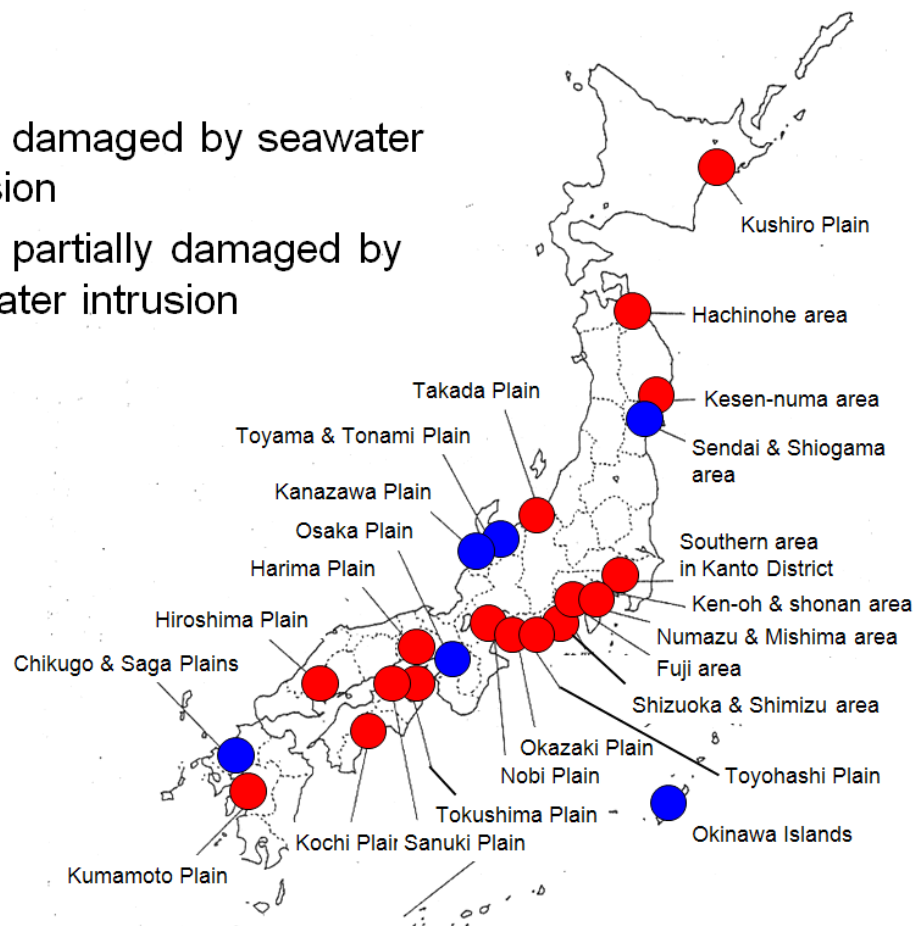


Fig.1 Japan map of seriously and partially damaged by seawater intrusion

たちで検討を進めても上記特性についての定性的な一般性は失われない。

## 2. 淡塩界面

まずガイベン・ヘルツベルグの近似とデュブイの準一様流仮定を用いて、上述の仮定の下で、鉛直2次元断面の定常不圧地下水で塩水くさびを考える。Fig.2の様に、塩水くさびの淡塩境界面の形状は、陸面と海面の交点を原点とし、そこから内地へ  $x$  だけ移動した場所には、海面位置から地下に  $h$  だけ下がったところに淡塩境界面があるとし、定常な降雨が一樣に生じている場合を考えると、流量  $q$  は、式(1)のようになる。

$$q = q_0 - \varepsilon x \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon$  : 一樣一定な単位面積あたりの地下淡水の涵養強度 (m/s),  $q_0$  : 地下水涵養がなかったときの単位奥行きあたりの淡水流量 (m<sup>2</sup>/s) であり、 $q_0$  は

$$\begin{aligned} q_0 &= \int_{-\zeta}^h (-u) dy = -u(h + \zeta) \\ &= -uh(1 + \omega) \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。 $\omega$  は式(3)で定義された密度の無次元定数とする。

$$\omega = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (3)$$

ここに、 $\rho_s$  : 海水密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_f$  : 淡水密度 (kg/m<sup>3</sup>) である。また地下淡水の水平流速  $u$  は、 $k$  : 透水係数 (m/s) として式(4)で与えられる。

$$u = -k \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -k\omega \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

式(4)を式(2)に代入し、 $x=0$  かつ  $\zeta=0$  ( $h=0$ ) を条件にして  $x$  方向に積分して解くと、式(6)を得る。

$$\begin{aligned} h &= \sqrt{\frac{2q_0 x}{k\omega(1 + \omega)}} \\ &\approx \sqrt{\frac{2q_0 x}{k\omega}} \end{aligned} \quad (5)$$

(since  $\omega \ll 1$ )

しかし同式では明らかに、海岸線位置での淡水出口にあたる地下淡水層厚がゼロになる。帯水層の淡水領域に関して、一樣一定な涵養がある場合に準一様流仮定と海岸線位置で地下水面が海面に一致する条件を用いて算定し

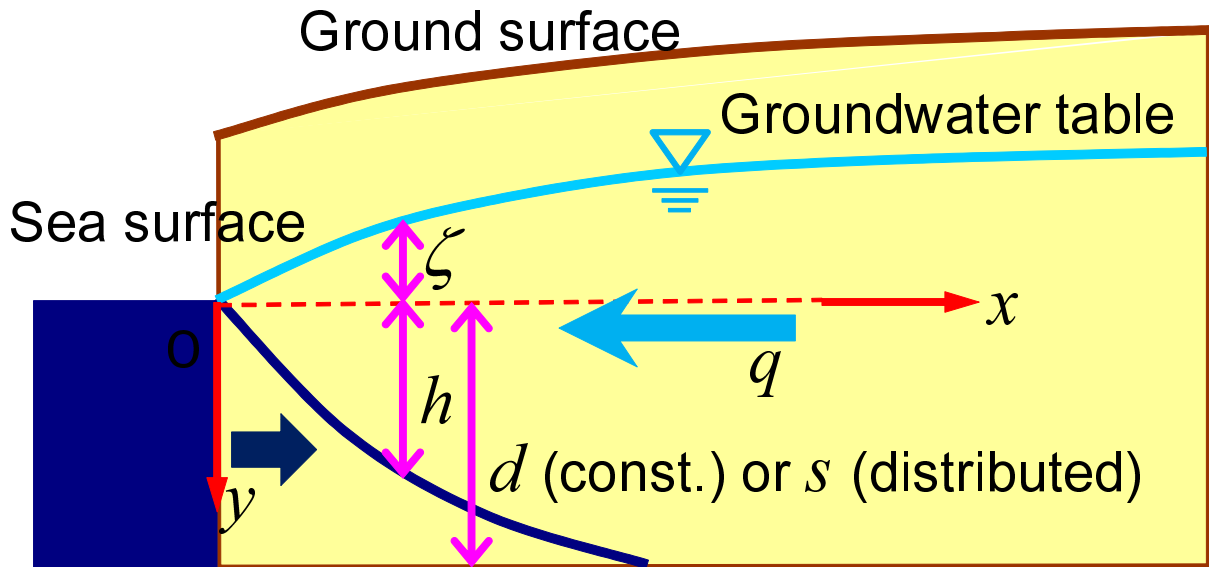


Fig.2 Schematic of vertical section in a coastal aquifer

たものの、この近傍で準一様流仮定が成立せずに鉛直流動分だけ差異が生じている(佐藤・岩佐, 2002) ことよると思われる。

そこで、淡水部の鉛直流速  $v$  として、帯水層淡水部に対して連続式(6)を鉛直方向に積分する。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

地下水面変動量は淡塩境界面変動量に比べて十分小さいとおけるので、地下水面近傍の鉛直流速はゼロと近似し、 $v$  について整理すると式(7)になる。

$$\begin{aligned} v &= - \int_{-\zeta}^h \frac{\partial u}{\partial x} dy \\ &= \int_{-\zeta}^h \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{q_0}{h(1+\omega)} \right\} dy \end{aligned} \quad (7)$$

上式に式(2),(4)を代入して整理すると、

$$v = - \int_{-\zeta}^h \left\{ \frac{q_0^2(1+\omega)}{k\omega} \cdot \frac{1}{(h+\zeta)^3} \right\} dy \quad (8)$$

となり、この積分計算結果が

$$v = - \frac{q_0^2(1+\omega)}{k\omega} \cdot \frac{y+\zeta}{(h+\zeta)^3} \quad (9)$$

である。いま  $p_f$ : 淡水部の静水圧 ( $\text{kg/ms}^2$ ) として鉛直流動のダルシ - 則を考えると

$$v = -k \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{p_f}{\rho_f g} - y \right) \quad (10)$$

を得る。式(10)を式(9)に代入して整理した後、鉛直方向に積分すると、

$$\frac{p_f}{\rho_f g} = y + h + \frac{q_0^2(1+\omega)}{2k^2\omega} \cdot \frac{(y+\zeta)^2}{(h+\zeta)^3} \quad (11)$$

が得られる。ここで求めたい海岸線上の淡塩境界面までの深さを  $h_0$  と置き、そこでの淡水圧と海水圧が釣り合っていることを鑑みて式(11)を考えると、式(12)が得られる。

$$h_0 = \frac{q_0}{k\omega} \sqrt{\frac{1+\omega}{2}} \quad (12)$$

海岸線上の境界条件に  $h_0$  を用いて式(6)を得る過程と同様の計算を行うと、近似式(14)が得られる。

$$\begin{aligned} h &= \sqrt{\frac{2q_0x}{k\omega(1+\omega)} + \frac{q_0^2}{2k^2\omega^2} \cdot \frac{1+\omega}{2}} \\ &\approx \sqrt{\frac{2q_0x}{k\omega} + \frac{q_0^2}{2k^2\omega^2}} \end{aligned} \quad (13)$$

(since  $\omega \ll 1$ )

この  $h$  が淡塩境界面形状を示している。なお、 $q_0$  は海岸線位置以外の点で  $h$  または  $\zeta$  の値が計測されることで  $q_0$  が定まり、式(1)から一様涵養下の水平方向の地下淡水流量  $q$  も定まる。

### 3. 平面地下水移流分散拡散モデル

以下、議論簡略化のため、対象の帯水層底面が一様に平らで海面下  $d$  にあるといても一般性は失われない。塩分濃度  $c$  と混合密度  $\rho$  の関係は

$$\begin{aligned} c &= \frac{\rho - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \\ \Leftrightarrow \rho &= (1 + c\omega)\rho_f \end{aligned} \quad (14)$$

で定義される。

沿岸帯水層内の地下水柱図は、理論的に界面が存在していたとすれば、Fig.3のようになっている。いま、濃度

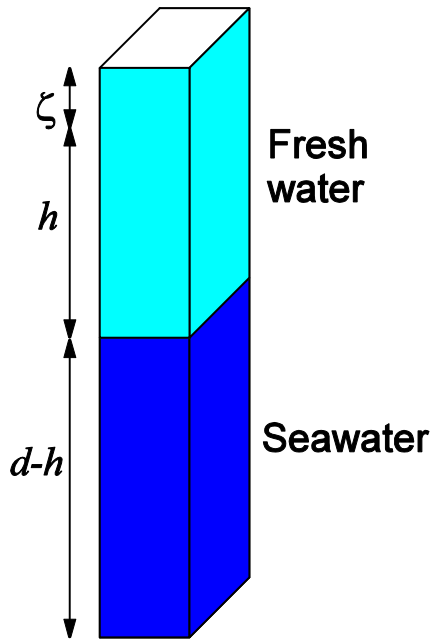


Fig.3 Schematic of a theoretical groundwater column in a coastal aquifer

の鉛直平均値  $\bar{\rho}$  を求めると,

$$\lambda \bar{\rho} \int_{-\zeta}^d dz = \lambda \rho_s \int_h^d dz + \lambda \rho_f \int_{-\zeta}^h dz$$

$$\Leftrightarrow \bar{\rho}(d + \zeta) = \rho_s(d - h) + \rho_f(h + \zeta)$$

$$\Leftrightarrow \bar{\rho} = \rho_f \frac{(1 + \omega)d}{d + \omega h} \quad (15)$$

の様に変形して表せる．ここで， $\rho = \bar{\rho}$  と見なせば，式(14),(15)から

$$c = \frac{d - h}{d + \omega h} = \frac{d - h}{d + \zeta} \quad (16)$$

が得られる．この平面濃度式は，鉛直方向の塩水帯水層厚に対する淡水帯水層厚の比を示していることがわかる．なお帯水層底面が平らでない一般の場合も同様に展開して用いればよく，海面から帯水層底面(不透水性基盤面)までの位置を一定値  $d$  から，空間変動する  $s$  にして考える．つまり，式(16)で  $d$  から  $s$  に置き換えても成り立つ．

また  $c$  と  $h$  が線形対応していることから，平面的な視点で見ると，平面濃度分布を得ることができれば理論上の鉛直方向の淡塩境界面位置を一意に定めることが出来る．すなわち平面濃度分布の計算によって塩水くさび形状も一意に得られることになる．実際に界面付近に淡塩界面混合帯域が発生するものの，その中心位置がこの理論上の界面位置であり，それが特定されていると言える．塩水侵入最深部の濃度を考えれば，式(16)に  $h = d$  を代入して  $c = 0$  となり，平面的に見た塩水侵入最深位置と  $c = 0$  の位置が合致する．塩水侵入開始位置である海岸線部を考えれば，式(14)から得られる  $h$  と  $\zeta$  の条件関係式

$$h = \frac{q_0}{\sqrt{2k\omega}} \ll d \quad \text{かつ} \quad \zeta = \frac{q_0}{\sqrt{2k}} \ll d \quad (17)$$

を式(16)に代入して検討すると  $c \cong 1$  となり，同じく平面的に見た海岸線部と  $c = 1$  の位置は合致する．先述の海岸線での淡水層厚補正を加味しても補正前と同様に  $c$  は平面位置とその地点の値からその地点の鉛直界面位置(混合帯域の中心位置または代表位置)を推定できていることがうかがえる．

ところで平面地下水モデルの基礎方程式は，ピエゾ水頭は  $d + \zeta$  であることに留意すれば，式(18)で与えられる．

$$\lambda \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(d + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(d + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right\} + \varepsilon \quad (18)$$

ここに， $\lambda$ : 有効間隙率である．なお先述の通り，議論簡略化のために帯水層厚底面を平らにした場合の式を与えているが， $d$  を空間変動する  $s$  で表せば，式(18)は一般の場合に用いることが出来る．ここから  $\zeta$  の平面分布が得られ，その結果から  $x, y$  方向の地下水流速  $v_x, v_y$  がそれぞれ式(19),(20)で算定できる．

$$v_x = -k \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (19)$$

$$v_y = -k \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (20)$$

これらを用いて下記の平面地下水移流分散式(21)を解けばよい(神野, 2001)．

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial(v_x c / \lambda)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y c / \lambda)}{\partial y} + c\delta \quad (21)$$

ここに， $D_x, D_y$ :  $x, y$  方向の分散係数， $\delta$ : 涵養水の塩分濃度である．なお鉛直挙動を考慮した地下水移流分散解析であれば，式(18),(21)も鉛直方向( $z$  方向)の項を加味した式で，かつ，密度変動分布を考慮するように密度を変数に加える必要があるが，本研究では，鉛直方向の挙動が平均化された平面モデルのため，式(18),(21)は非連続で考えられる．

以上で平面塩水侵入モデルが導出された．

#### 4. 結論

本研究は，広域の沿岸帯水層の塩水侵入解析を目的とするため，平面地下水モデルとともに解析可能となる平面地下水移流分散モデルを誘導した．そこではまず理論的にモデル誘導を行うべく，分子拡散を表現しないで式展開すると，淡塩界面が実際に混合帯域として存在する

こととは異なり，同界面が明瞭に存在すると仮定する必要が生じるが，これで得られた明瞭な界面位置が混合帯域の中心位置または代表位置を示していると解釈することができ，モデルの妥当性の検討に対して一般性は失われない．

また海岸線位置の地下淡水深を考慮して補正した．その後，塩分濃度の鉛直平均化を行い，それを地下水塩水侵入の平面化モデルや平面地下水モデルに利用することで，塩分濃度の平面分布が求まり，かつ，その平面濃度分布から淡塩界面の鉛直位置も（混合帯域代表位置として）容易に推定できるメリットを確認した．

本稿では，広域塩水侵入解析に向けたモデルの誘導提案を行った．今後具体的な地域での数値解析による検証を行ってきたい．

## 謝 辞

本研究を始めるにあたり，本所水資源環境研究センター故小尻利治教授におかれましては病床にありながらご指導ご鞭撻を賜りましたこと，衷心より追悼の意を表しますとともに深謝の意を表します．

## 参考文献

佐藤邦明・岩佐義朗 編著：地下水理学，丸善出版，2002．  
神野健二 編著：地下水中の物質輸送数値解析，九州大学出版会，2001．

(論文受理日：2013年6月7日)