

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・角 哲也
Toshio HAMAGUCHI, Ahmed KAMAL, Tetsuya SUMI

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.

1. 序論

世界の沿岸部では地下水が海に流出すると同時に海水が地下水に侵入している。本研究では、帯水層内の塩水侵入の影響特性を把握すべく、まずは定常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が主眼であるため、理論展開する上で、塩水と真水が容易に分散拡散的な混合をせずに淡塩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帯域を特性把握過程では表現しないかたちで検討しても、上記塩水侵入特性についての定性的な一般性は失われない。

2. 塩水くさび界面

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¹⁾。図1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、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),(2)のようになる。ここに、*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 (m²/s), *k*: 透水係数 (m/s), ε : 一樣一定な単位面積あたりの地下淡水の涵養強度 (m/s), ρ_s, ρ_f : 海水・淡水密度 (kg/m³) で、 ω は式(3)で定義された密度の無次元定数とする。地下水の水平流速*u*は式(4)で与えられる。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(5)を得る。しかし同式では明らかに、海

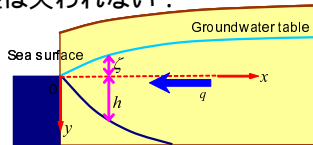


図1: 沿岸帯水層鉛直断面

$$\begin{aligned}
 q &= q_0 - \varepsilon x & (1) \\
 q_0 &= \int_{-\zeta}^h (-u) dy = -u(h + \zeta) = -u h(1 + \omega) & (2) \\
 \omega &= \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} & (3) \\
 u &= -k \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -k \omega \frac{\partial h}{\partial x} & (4) \\
 h &= \sqrt{\frac{2q_0 x}{k\omega(1+\omega)}} \approx \sqrt{\frac{2q_0 x}{k\omega}} \quad (\text{since } \omega \ll 1) & (5) \\
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 & (6) \\
 v &= -\int_{-\zeta}^h \frac{\partial u}{\partial x} dy = \int_{-\zeta}^h \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{q_0}{h(1+\omega)} \right\} dy & (7) \\
 v &= -\int_{-\zeta}^h \left\{ \frac{q_0^2(1+\omega)}{k\omega} \cdot \frac{1}{(h+\zeta)^3} \right\} dy & (8) \\
 v &= -\frac{q_0^2(1+\omega)}{k\omega} \cdot \frac{y+\zeta}{(h+\zeta)^2} & (9) \\
 v &= -k \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_f}{\rho_f g} - y \right) & (10) \\
 \frac{p_f}{\rho_f g} &= y + h + \frac{q_0^2(1+\omega)}{2k^2\omega} \cdot \frac{(y+\zeta)^2}{(h+\zeta)^3} & (11) \\
 h_0 &= \frac{q_0}{k\omega} \sqrt{\frac{1+\omega}{2}} & (12) \\
 h &\approx \sqrt{\frac{2q_0 x}{k\omega} + \frac{q_0^2}{2k^2\omega^2}} \quad (\text{since } \omega \ll 1) & (13) \\
 c &= \frac{\rho - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \iff \rho = (1 + c\omega)\rho_f & (14) \\
 \bar{\rho} &= \rho_f \frac{(1+\omega)d}{d+h\omega} \iff c = \frac{d-h}{d+h\omega} \quad (\text{as } \rho = \bar{\rho}) & (15) \\
 \frac{\partial c}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial(v_x c/\lambda)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y c/\lambda)}{\partial y} + c\delta & (16)
 \end{aligned}$$

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ことによると思われる。そこで、淡水部の鉛直流速*v*として、連続式(6)を帯水層淡水部に対して鉛直方向に積分し、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。これに式(2),(4)を代入して整理した結果が式(8)、その積分結果が式(9)である。いま *p_f*: 淡水部の静水圧 (kg/ms²) として鉛直流動のダルシ - 則を考えると式(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、式(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。海岸線上の境界条件に *h*₀ を用いて式(5)を得る過程と同様の計算を行うと、近似式(13)が得られる。この *h* が淡塩境界面の形状を示している。鉛直方向の分布はなお、*q*₀ は海岸線位置以外の点で *h* または ζ の値が計測されることで *q*₀ が定まり、式(1)を用いて、一樣涵養下の水平方向の淡水流量 *q* も定まる。

3. 平面地下水移流分散拡散モデル

ここで対象の帯水層底面が平面で一樣に海面下 *d* にあるとおいても一般性は失われない。塩分濃度 *c* と混合密度 ρ の関係は式(14)で定義され、鉛直分布平均値 $\bar{\rho}$ は $\rho = \bar{\rho}$ と見なせば式(15)となる。これを踏まえて平面地下水移流分散式(16)を解けばよい。ここに、 λ : 有効間隙率, *D_x*, *D_y*: *x*, *y* 方向の分散係数, *v_x*, *v_y*: *x*, *y* 方向の地下水流速, δ : 涵養水の塩分濃度である。平面地下水モデルの基礎式と式(16)を同時計算することで平面での塩水侵入が算定できるようになる。

4. 結論

海岸線位置の淡水深を考慮した理論式を基に鉛直平均塩分濃度を算定し、それを平面モデルに活かすことで塩水侵入の平面モデル化を可能とした。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。

参考文献

1) 佐藤邦明・岩佐義朗 編著：地下水理学，丸善出版，2002。