

## III-384 地下水塩水化現象の3次元有限要素解析について(第二報)

徳島大学工学部 正 山上 拓男  
徳島大学工学部 正 ○安富 英樹

## 1. まえがき:

近年、海岸地域における地下水の塩水化現象が社会問題としてクローズアップされている。この現象は種々の原因により海水が内陸部に侵入することによって起こり、その挙動は地下水流況に応じて変化することが知られている。コンピューターを用いた数値シミュレーションは、こうした地下水流況や塩分侵入の挙動を把握するための有効な手段の一つとなっている。筆者らは先に、塩分侵入問題をより実態に即した遷移領域を伴う移流分散現象として取り扱い、三次元有限要素解析プログラムを作成しその検証を行った<sup>1)</sup>。本報告では、分散係数が流速の関数として与えられた場合すなわち帯水層内における流速の大きさに応じて分散係数が場所ごとに異なる場合の塩分侵入状況の解析結果と、前報<sup>1)</sup>で行った分散係数が一定値を取る場合すなわち帯水層内のいたるところで分散係数の値が一定である場合との比較検討を行う。

## 2. 基礎方程式と解析手法:

塩水と淡水は混合流体であり、移流分散現象によって塩水化が進行すると考えた地下水塩水化現象における3次元混合流体飽和浸透流の基礎式は、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} \left( -\frac{\partial h}{\partial x_j} + \eta \cdot c \cdot e_j \right) \right\} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \phi \cdot \eta \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\rho}{\rho_0} q \quad i, j=1, 2, 3 \quad \dots(1)$$

ここで、 $K_{ij}$ は透水係数( $K_{ij} = \rho \cdot g \cdot k_{ij} / \mu \dots(2)$ )、 $\rho$ は混合流体密度、 $g$ は重力加速度、 $k_{ij}$ は固有透水係数、 $\mu$ は粘性係数、 $h$ は全水頭( $h = P / \rho_0 g + Z \dots(3)$ )、 $P$ は圧力、 $\rho_0$ は淡水密度、 $Z$ は位置水頭、 $\eta$ は密度カップリング係数

( $\eta = \varepsilon / C_s \dots(4)$ )、 $\varepsilon = (\rho_s - \rho_0) / \rho_0 \dots(5)$ 、 $C_s$ は最大密度 $\rho_s$ での濃度、 $c$ は塩分濃度、 $S_s$ は比貯留係数、 $\phi$ は間隙率、 $e_j$ は鉛直方向のみ1、他方向は0をとる。そして、 $q$ はDiracの $\delta$ 関数を用いて $q = \sum_{I=1}^m Q_I \cdot \delta(x_i - x_{iI}) \dots(6)$ 、 $Q_I$ は点( $x_{iI}$ )に存在する井戸の揚水量、 $m$ は井戸総数である。

また、淡塩水の混合流体における密度と塩分濃度の関係は次式で表される。

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \varepsilon \frac{c}{C_s} \right) \quad \dots(7)$$

一方、塩分の移流分散方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \phi \cdot D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \phi \frac{\partial c}{\partial t} - q \cdot c \quad i, j=1, 2, 3 \quad \dots(8)$$

ここに、 $D_{ij}$ は分散係数、 $V_i$ はDarcy流速である。この分散係数 $D_{ij}$ は流速 $V_i$ の関数として次のように表すことができる。<sup>2)</sup>

$$\phi D_{ij} = D_T |V| \delta_{ij} + (D_L - D_T) \frac{V_i V_j}{|V|} \quad i, j=1, 2, 3 \quad \dots(9)$$

ここに、 $|V| = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2)^{1/2}$ 、 $D_L$ は流れ方向の分散長(縦分散長)、 $D_T$ は流れに垂直な方向の分散長(横分散長)、 $\delta_{ij}$ はKronecker deltaである。

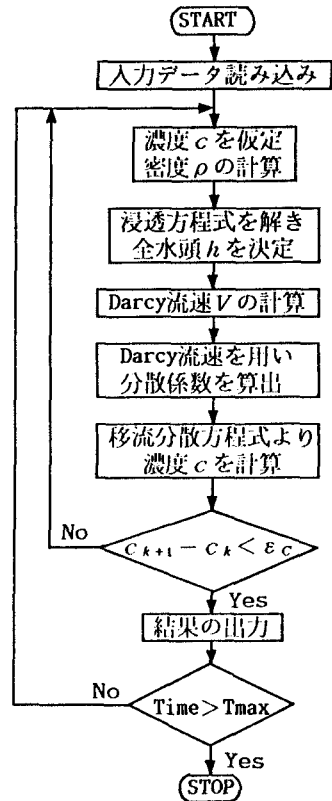


図-1 フローチャート

塩水化問題の解析は、式(1)、(8)における全水頭 $h$ と濃度 $c$ が相互に影響し合うため複雑となる。そこで本解析においては、図-1のフローチャートに示す手順により数値計算の各段階で繰り返し計算を行い解析を進めることとした。なお、式(1)、(8)にはGalerkin有限要素法を用いて解析を行った。

### 3. 解析例：

ここでは、Henryの問題<sup>3)</sup>として知られる図-2のモデルを用いて解析を行った。これは、上下に不透水境界をもつ帯水層において、一方の側より淡水が一定流量で流入しており、他方は塩水側としたものである。なお、この領域の要素数および節点数はそれぞれ150要素、352節点であり、解析に用いた境界条件および物性値は図中に示す通りである。ここで、塩水側境界において解析領域内部に向かって塩水が侵入してくる部分は $c=1$ を与え、逆に領域内より外に向かって流出するところは、 $\partial c / \partial x = 0$ を与えた。

図-3は、初期条件として解析地盤内の濃度が零の状態から出発した非定常解析による0.5等濃度線の時間推移を表したものである。同時に、分散係数が一定値( $D=6.6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ )を取る場合も合わせ示してある。また図-4、5にはそれぞれ、一定分散係数と流速の関数としての分散係数による100分後の濃度分布を示している。これらの図より、分散係数を流速の関数で表した方が一定値とした場合よりも時間の経過と共に等濃度線が領域内部により深く侵入すること、また濃度の分布幅が狭くなっていることなどがわかる。ただし、この問題における実測データが存在しないため、いずれが正しいかの判定はできない。なお、1回のタイムステップにおいて必要な繰り返し回数は2～6回であり、解析(16タイムステップ100分まで)に要したCPU TIME(徳島大学情報処理センターFACOM M-760/10)は67.39秒であった。

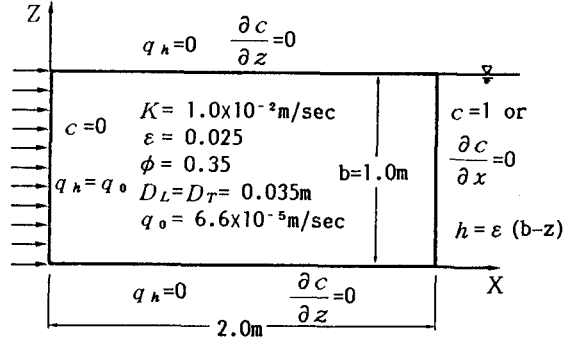


図-2 解析モデル

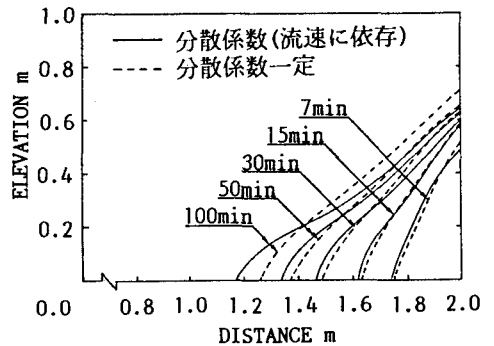


図-3 濃度分布の時間推移(0.5等濃度線)

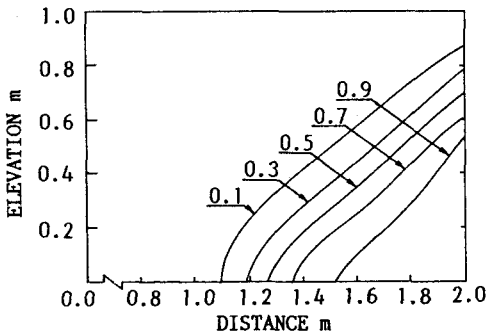


図-4 濃度分布(100分後、一定分散係数)

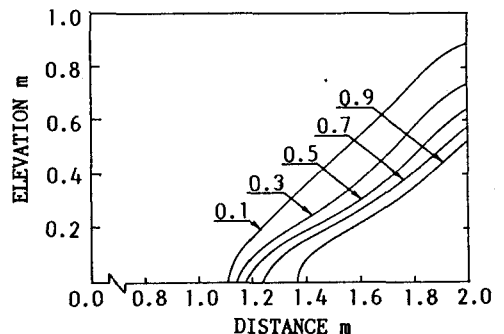


図-5 濃度分布(100分後、流速依存分散係数)

4. おわりに： 移流分散現象によって塩水化が進行すると考え、分散係数が流速の関数として与えられた場合の解析結果と一定分散係数によるそれとの比較を行った。今後、実地盤への適用をめざす予定である。

【参考文献】1) 山上・安富：第25回土質工学研究発表会，平成2年(投稿中)。2) Bear, J.: Hydraulics of groundwater, McGraw-hill, P. 567, 1979. 3) Henry, H. R.: U. S. Geol. Surv. Water Supply Pap. 1613-C, 1964.