非正方メッシュを用いた地下水解析モデル

鳥取大学工学部　正員　道上　正規　　鳥取大学工学部地域共同研究センター　正員　宮本　邦明
鳥取大学工学部　正員　桧谷　治　　鳥取大学工学部　学生員〇井戸　俊介

1．はじめに

近年,地球環境問題に関する議論が盛んに行われるようになり,流域における水循環に伴う環境物質の輸送についての関心も高まってきている.本研究は水循環による物質輸送の予測,環境物質による流域への影響の評価方法の開発を目的としている.GIS を利用することを念頭において検討を行っているが,その手始めとして被圧帯水層を含まない多層帯水層における地下水流の簡単なモデルを作成したので報告する.

2．地形・地層構造モデル

GIS 上に地形・地層モデルを構築するときそのもととなるデータを直接数値情報から得る方法と地形図・地質図などをもとに作成する場合が考えられる.たとえば地形図を用いて標高データを得る場合コンターライン上に点をとることが効率的で,そのとき得られた点は不規則な並びとなる.この不規則な並びの点(point)から正方メッシュを作成するのは困難で三角形にするとメッシュの作成が容易になる.そこで point により構成される三角形メッシュ（penta）で地形全体をカバーすることで地形モデルを penta 集合として認識する（図 1）.このとき point 周りの penta の重心を連ねた多角形を polygon と呼ぶ.地層構造は地表面の三角形メッシュを用いて,地層境界の標高をそれぞれ point に与えることにより認識する.このようにして,地表面および地層境界を同一の point に対する標高データとして認識する.

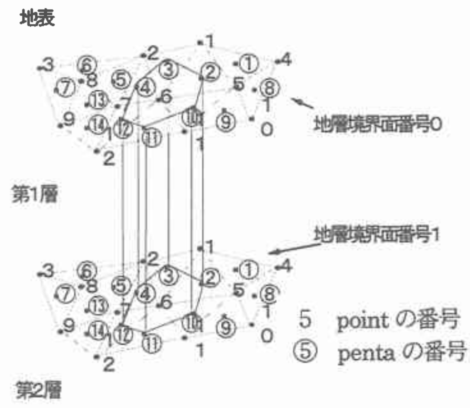


図１　地形・地層構造モデル

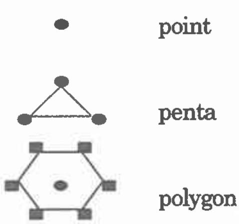
3．地下水の移動モデル

3．1　基礎方程式

本解析ではダルシーの法則（式 1）と浸透流の水量保存則（式 2）を用いて解析を進めていく.

$$\vec{u} = -k\vec{\nabla}H \quad (1) \qquad \lambda\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda u_x h) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda u_y h) = r \quad (2)$$

ここに,u ：真の流速,k ：透水係数,H ：圧力水頭,h ：地下水位,λ ：有効間隙率,r ：湧き出し項であり,r は単位時間に帯水層の単位面積あたりの系に流入する体積を表し,流入時にプラスをとる.



3．2　差分化

上述の（式 1）及び（式 2）を解くためにリープ・フローグ法を用いて差分化する.point に地下水位h と,湧き出し項r の値を与え,penta の重心すなわち polygon の頂点にフラックスを与える.したがって水面勾配$\partial H/\partial x$, $\partial H/\partial y$,透水係数,はフラックス同様 penta の重心に与えられる.空間差分には中央差分を時間的には前進差分をとる.まず時間差分から,

$$h_i(t+\Delta t) = h_i(t) - \frac{\Delta t\int_L(\lambda\bar{u}h)\cdot\bar{n}\,dl}{A_i} + \frac{r_i}{A_i}\Delta t \qquad (3)$$

となる.ここに,i ：point の番号,$\int_L dl$ ：polygon の辺に関する周回積分,Δt ：計算時間間隔,$\bar{n}$ ：polygon の各辺の外向き単位法線ベクトルである.ここで$\int_L(\lambda\bar{u}h)\cdot\bar{n}\,dl$ の$\bar{n}$ は polygon の各辺に与えられているので$\int_L(\lambda\bar{u}h)\cdot\bar{n}\,dl$ は

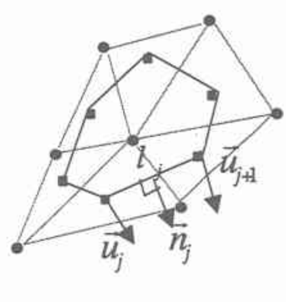


図２　空間差分

$$\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\lambda_j\bar{u}_j\bar{h}_j + \lambda_{j+1}\bar{u}_{j+1}\bar{h}_{j+1}}{2}\right)\cdot\bar{n}_j l_j \qquad (4)$$

で与えられる.

3．3　境界条件

境界条件としてはモデル地形の周辺境界に当たる point では水深を0としている.これは,外縁に当たる差分格子に入ってきた流量はすべて出ていっていることとなる.地層境界面での地下水の取り扱いは

$$fout_{i,s}=\begin{cases}h_{i,s} & (h_{i,s}\le k_{i+1}\Delta t)\\ k_{i+1}\Delta t & (h_{i,s}\ge k_{i+1}\Delta t)\end{cases}\quad(5)\qquad wup_{i,s}=\begin{cases}h_{i,s}-d_{i,s} & (h_{i,s}\ge d_{i,s})\\ 0.0 & (h_{i,s}\le d_{i,s})\end{cases}\quad(6)$$

で与える.ここに,d ：層厚,$fout$ ：下層への浸出量,wup ：上層への湧出量,

である.圧力水頭の取り扱いは,水深が層厚に達するまではその層の圧力水頭は水深に一致する（式 7）.水深が層厚に達した場合その層の上層の圧力水頭とその層の圧力水頭（層厚）を加えたものが圧力水頭になる（式8）.

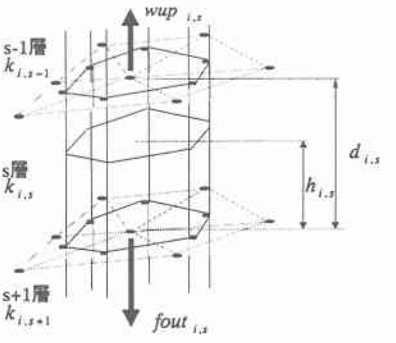


図3　地層境界面での地下水の取り扱い

$$H_{i,s}=h_{i,s}\quad(7)\qquad H_{i,s}=d_{i,s}+H_{i,s-1}\quad(8)$$

＊圧力水頭を上層から（s ＝ 1, 2, 3, …）計算することにより、一つ上の層の圧力水頭のみ参照することで得られる。

4．モデルの評価

モデルの妥当性を評価するために単純な地形・地層モデルを作成し，シミュレーションを行った.モデルは point 間の距離が x 方向に 100m, y 方向に 86.6025mで,斜面長が 4330m(50 メッシュ)，幅が 10,000m(100 メッシュ),地表・地層境界ともに y 方向に 30 度の勾配をもっている.以下に計算条件を示す.

降雨時間：25920 時間　(1080 日)			
降雨範囲：x 方向：	2000m＜x＜8000m		
y 方向：	2000m＜y＜4000m		
第一層：透水係数	0.180	(m/hour)	
層厚	200m		
第二層：透水係数	0.180	(m/hour)	(y＜1000m, 2500m＜y)
透水係数	0.000	(m/hour)	(1000m ＜y＜ 2500m)
層厚	100m		
第三層：透水係数	0.000	(m/hour)	
層厚	20m		
降雨強度：10mm/h	層構造　：三層構造		

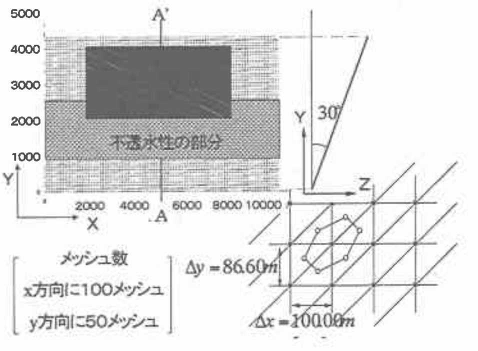


図4　model30

図5に X 座標 5000 の位置（モデル中央・ A－A 断面（図 4)）における地下水の時間的変化を示す.このシミュレーションでは不透水層（第3層）の上の一部に不透水性の地層がある場合の計算を行い,不透水層の上層への乗り上げと不透水層下流端での段落ちの解析結果の評価を行う.

まず第2層の不透水性の部分の上流側で図5の a 点に水深が達するまで第1層,第2層にそれぞれ独立に水深が発達していく.

240 日後には第2層の不透水性の部分の上流端の第1層に地下水位が生じている.これは不透水性の部分の上流側の水深が a 点に達した後はそこに存在する地下水は不透水性の部分上を流れるためである.

次に段落ちについて,360 日後前後に達したとき第 2 層の不透水性の部分の下流側に水深が発達している.これは第 2 層の流下方向の浸透水が第 1 層の不透水性の部分から段落ちするためであり,この浸透水量は上層からの浸透量として下層に与えられる.またこの部分での両層の地下水面の勾配は第 1 層,第 2 層の透水係数が同じことから同一の値をとっている.

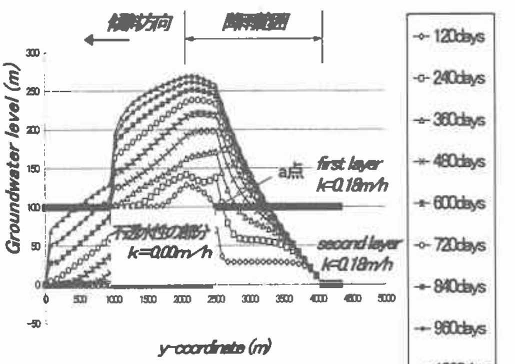


図5　計算結果

5．まとめ

本研究では,地下水の物質輸送モデルの構築を目的として不定形三角形メッシュを用いた数値解析法について検討し,単純な地形・地層構造モデルを用いてその評価を行った.その結果,作成した地下水移動モデルが地下水位の発達の様子をうまく表現できることを確かめた.今後,鉛直浸透プロセス,表面流および被圧帯水層を含む多層帯水層における地下水移動モデルについて検討を進めていく予定である.