

(4) 地表流の疑似相対浸透率と疑似毛管圧力

(13)式から計算される地表流の疑似相対浸透率 k_{rw}^* は離散化の大きさと水飽和率に依存した非線形性を有する量であり、高さとの比によって図-4の様に変化する。実際のシミュレーションでは H/W はこの範囲に入り、 k_{rw}^* は H/W によってはそれほど大きく変化しない。また、図-1の一般的な相対浸透率と同じ非線形性を持っており、数値計算上は2相流と全く同じに扱える。

地表流を考える上で、もう一つ考慮すべきものは水相の圧力である。2成分2相解析では地表での空気相圧力は大気圧とし、大気空間は物理的には毛管圧力が0の領域として、空気相圧力 P_g を未知量として解く。しかし、そのままでは、水相の圧力 P_w も常に大気圧となり、地表流の水深勾配 $\partial h/\partial x$ は常に0で水深の変化による流れが表現できず、(12)式の近似を用いても解が不自然となる。このため次のような量 P_{ci}^* (以降、地表流の疑似毛管圧力 Pseudo capillary pressure for surface flow と呼ぶ) を考える。図-5の様に、水深 h 、格子高さ H 、格子中央深度 Z_c とすると、 Z_c における空気相圧力 P_g と水相圧力 P_w の差は次式となる。

$$P_{ci}^* = P_g - P_w = \rho g H (0.5 - S_w) \quad (14)$$

(14)式より、格子中の水相圧力は水飽和率が0.5 (水面が格子中央深度にある時) 以下では大気圧より低く、0.5で0、それ以上で大気圧より高い様に見積られる。この P_{ci}^* を使うと、流れの解析上、隣合う格子間の水深差(圧力差)がうまく表現できる。この場合、圧力の絶対値自体は水深があるにもかかわらず大気圧より小さくなり物理的には若干おかしいが、水の圧縮性が小さいことから計算上は影響を及ぼさない。上式から得られる毛管圧力と水飽和率の関係は直線的で、一般的な岩石中の毛管圧力(図-2)とは全く異なる形となる。

また、地表格子に降雨が入力された時、少々水分(飽和率)でも速やかに降下・地下浸透できるように、鉛直下方に関しては図-6の様に、飽和率の低い部分で急激に立ち上がる疑似相対浸透率を与える。

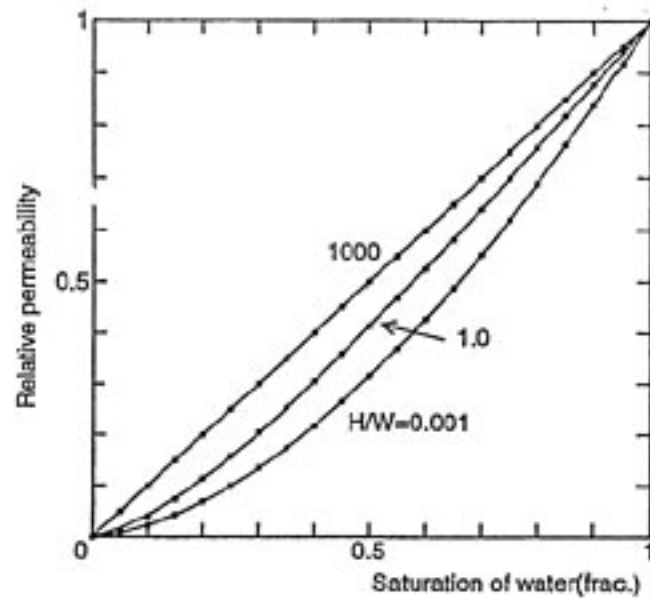


図-4 地表流の疑似相対浸透率曲線
Fig. 4 Pseudo relative permeability for surface flow.

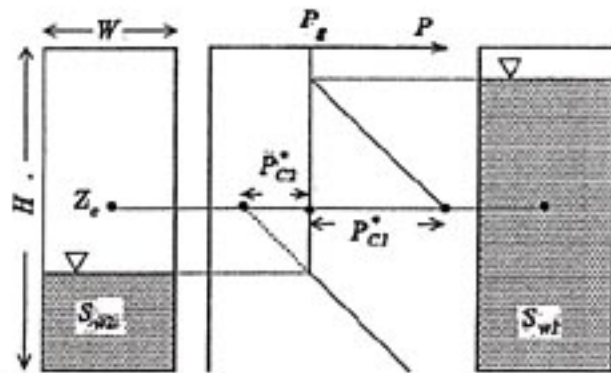


図-5 地表流の疑似毛管圧力の概念図
Fig. 5 Conceptual figure of pseudo capillary pressure for surface flow.

3 統合型陸水シミュレーションの手法

著者らは、以上の検討より、地下水流と地表流を結合し、多成分多相の流れを追跡する統合型シミュレータを開発した。この中には、3成分3相までの流れが取り扱われているが、本論では、空気・水2成分2相陸水解析に関係した部分の要点を記述する。

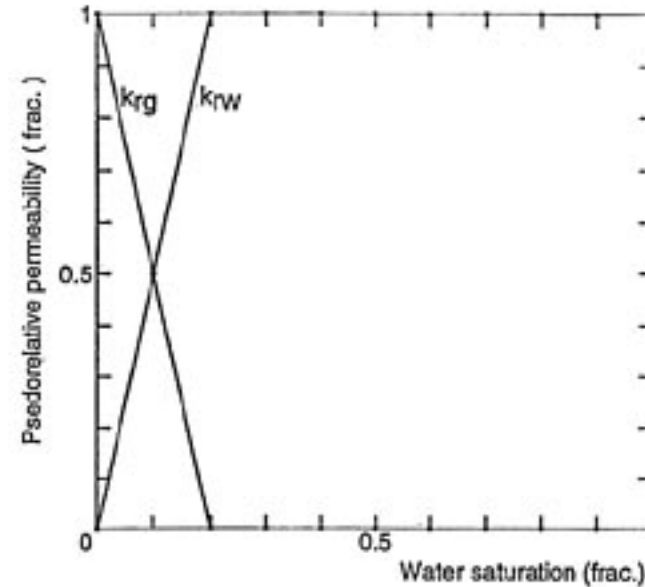


図-6 鉛直下方への疑似相対浸透率曲線の例
Fig. 6 Downward pseudo relative permeability for surface gridblocks.

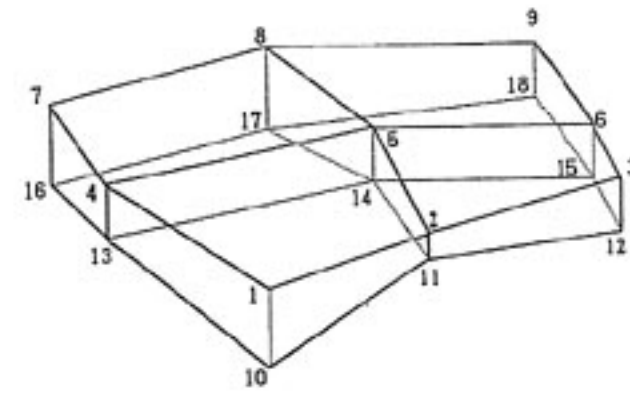


図-7 コーナーポイント型格子分割の概念図
Fig. 7 A schematic of corner-point geometry of discretized gridblocks.

3.1 数値計算の手法

陸水挙動のシミュレーションでは、大きな時空スケール、複雑な3次元地形、不均質な地質・地層物性を取り扱う必要がある。実用的意味では、なるべく細かい離散化で、自然かつ物理的整合性のある解を速く算出できる手法が望まれる。一般的差分法は空間表現に柔軟性がなく、有限要素法の使用は計算時間、記憶容量、安定性の面で得策ではないことを考慮し、著者らは、コーナーポイント型格子による形状表現を取り入れた有限差分法を採用した。コーナーポイント型差分では与えられた8個の端点により構成されるゆがんだ格子を基本とする差分展開を考え、体積、面間の浸透率は立体幾何学的に算出する。図-7は格子分割の例である。勿論、あまりゆがんだ格子や大きさのひどく異なる格子を使うことは、数値的誤差の面から好ましくないが、ある程度漸移的な直交性をそれほど崩さない格子システムを柔軟に構成できる。大きな地質学的な対象を扱うシミュレーションにおける物性値自体の曖昧さ、離散化の粗さを考えると、この手法により実用的に十分な精度の解析が可能であろう。

数値計算上、差分展開は1点上流法により完全陰的に行い、Newton-Raphson法により2式を反

復的かつ同時に解く方法(同時完全陰解法)を採用している。この方法は、陽的な展開を含めた他の方法と比較し、安定性の面で格段に優れ、実用的である。

3次元問題のブロック行列方程式の計算を低容量かつ高速で行うため前処理付き共役残差法(前処理はNested Factorization)を採用している(Cheshire, et al., 1980; Vinsome, 1976)。この方法では、3次元の複雑な問題においても10回程度の反復で安定に行列方程式を解くことが出来る。また、更に大規模問題における高速化を図るため、逐次陽化解法(Successive Explicitization Process)(Tosaka and Matsumoto, 1987)を適用し、非線形解が収束した格子から順次行列計算から除外し、問題の次数を減らして行く方法を採用している。この手法では、得られる解は本来得られる解と殆ど一致するが、ニュートン反復段階での急激な未知数の減少により計算時間は大幅に短縮できる。短縮の程度は大きな問題におけるほど大きい。

3.2 領域離散化の方法

本シミュレーションでは地下岩盤、地表、大気層を一括して離散化し各々に適切なパラメータを与えるが、数値計算上は全く同じ形式で扱われる。具体的には次のような設定を基本とする。

全ての格子(6面体)に対し、端点座標、孔隙率およびその圧縮率、6面各々の浸透率、空気相圧力、水飽和率を与える。隣接格子面間の浸透率は各面別個に計算されるため、表土、堆積岩層、火

成岩体、断層系などが混在するような不均質性の高い流動場のシミュレーションが可能である。また、毛管圧力、3方向(水平、垂直上向き、下向き)の相対浸透率は入力される複数のテーブルから選択し計算に使用する。

地表面上には、地表・河川流を表現するための格子が領域全面に配置される。この格子は、予想される最大水深以上の適当な高さとし、孔隙率1.0を持つように設定し、地表状態(林草地、河床、舗装面など)に応じマニングの粗度係数を与え、地表に沿う4方向の疑似浸透率を計算する。地表流の疑似相対浸透率、疑似毛管圧力は前章で説明した式により反復過程の中で計算される。降雨(観測降雨量-蒸発散量)はこの格子への注入として与えられ、地表に沿った流動、下方への浸透、その位置での停留として同時に計算され、質量保存則を満たす様に解が求められる。即ち、斜面や河川での流出と再浸透も整合的にモデル化される。

地表面格子の更に上部に一定圧力の大気層を付加する。大気層の孔隙率は非常に大きく、定圧状態とする。また、地表面格子と大気層格子間の浸透率は非常に大きく、地表面格子の空気相圧力は常に上部の大気圧に保たれるようにする。このように付加された大気層格子を利用すると、大気圧の時間変動(高気圧、低気圧)をも含めた解析も出来る。

3.3 周辺境界条件・人工境界の取扱い

広域陸水解析において必要となるのは基本的に閉境界、定圧境界、定流量境界である。一般に、領域の最外部は閉境界とする差分展開を行うので、広域の地下水解析において分水嶺を連ねた線で囲って格子システムを作れば閉境界条件は自動的に満足される。また、領域内の任意の場所に閉じた領域を設定することはデータ操作により容易に行える。

定圧境界、例えば、大気境界、海・湖境界面、地下空洞壁面境界などでは、圧力一定の条件を作り出す必要があるが、これは格子に与える孔隙率データの操作(具体的には非常に大きな値とする)により設定することができる。尚、この操作を地上格子の河川流出点位置の格子に対して行うことで、外部へ向けたスムーズな流出が計算上表現できる。また、定流量境界は後述の生産圧入項によ

り設定される。

トンネル、坑道、地下空洞、地下ダムなどの人工構造物の周辺に起こる流れ、湧水、周辺地下水位変化の様子、などを解析することもこの種のシミュレーションの目的である。このような場合に対処するため、工事の進展に合わせ状態量(圧力、飽和率)と物性変化(浸透率、孔隙率、相対浸透率、毛管圧力)を一連のデータとして与え直すことができる。例えば、開削空洞(大気圧、空気飽和)では、開削時点で孔隙率が非常に大きく、水飽和率0である空間として置き換え、次の時間での状態はそれを出発点として計算する。

3.4 井戸境界の取扱い

一般的な水文・水理問題では、井戸(坑井、孔)は人間が自然に働きかけ、かつ計測をする点として特に重要な意味を持つ。しかし、広域の問題では井戸の大きさは格子の大きさに比し無視できるほど小さく、細かい離散化を行う訳には行かないので、特別な取扱いを必要とする。本シミュレータでは井戸問題を次の様に扱うが、詳細は紙面の都合上割愛する。

- (1) 井戸は複数の地層(格子)を貫いて延びる一次元の導管(垂直、水平方向、斜め)と考える。
- (2) 離散化の粗さを補正するため放射状流の非定常解を利用して井戸位置での圧力を求める(Peaceman, 1983)。
- (3) 井戸は全流量規定型(地表での生産・圧入量を規定し、複数の地層からの流量の和が規定された全流量に合致するような孔口・孔底圧、孔内水位を計算により得るもの)、および圧力規定型(孔口、孔底圧力、孔内水位を規定して、複数の地層、即ち離散格子、からの個別流量及び地表での全流量は計算により得るもの)に分けて取り扱う。
- (4) 観測井での水位は、井戸の貫く全ての格子からの流量の和が0となる井戸底圧力を計算し、外挿して大気圧状態になる深度として求める。

4 地表流出モデルに関するケーススタディ

ここでは、特に地表流の表現式((12)式)の妥当

性、および解の安定性を検討する。計算モデルとしては砂田(日野ら、1989、p.106)の用いている図-8の様なスケールの長方形斜面、収束型斜面、発散型斜面(いずれも傾斜10°)を使い、特性曲線法による砂田の解と比較する。数値計算で用いた格子分割は、斜面の流れの方向に400個の格子(格子幅0.5m)、それと直交する方向に3個の格子、縦方向は大気層と地表面格子の2層、合わせて2400個に区切ったものである。各斜面モデルの第一層(大気層)の全格子、及び第二層の流出端側の格子には孔隙率を非常に大きく(1.0×10^{30})与え、常に大気圧かつ水飽和率0の状態が維持され、第二層の空気相圧力が大気圧に保たれると共に、地表流が淀みなく流出できるように設定した。これら3つの斜面モデルに対し、時間ステップ5秒で、最初の1分間だけ降雨50mm/hを与え、全20分間のハイドログラフを計算した。図-9はその計算結果と砂田の詳しい計算結果を比較したもので、両者はかなり良くあっていることがわかる。長方形斜面や収束型斜面の計算結果は砂田の解よりなまっているが、これは離散化の粗さによるものである。また、発散型斜面の場合に時間刻みを60秒、600秒と伸ばした結果も図-9に示してあるが、この程度の問題では計算の安定性には問題がなく、計算結果は数値的誤差により時間刻みが大きいほど砂田の解から離れるものの、傾向的に妥当なものが得られていることがわかる。

複数の斜面が連結されたモデル(傾斜10度の斜面、平坦地、傾斜10度の斜面の直列連結)を使いKinematic wave近似と著者らの近似との比較も試みた。著者らのシミュレータでは疑似毛管圧力を0とすればKinematic wave近似そのものとなる。図-10に使用した斜面モデルと平坦地での水深を

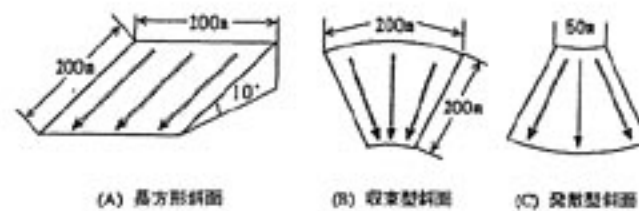


図-8 地表流出計算に使用した斜面モデル
Fig. 8 Illustration of rectangular, converging, and diverging slopes used for surface flow calculation.

示した(全体を一括した表示はしにくいため)。降雨条件は図-9と同じである。Kinematic wave近似では、上方斜面から平坦地になる場所では予想

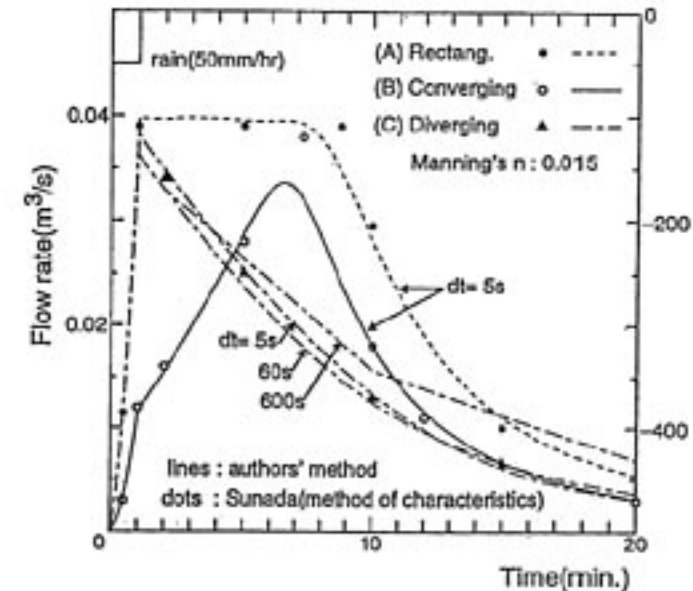


図-9 斜面モデルによる地表流出計算結果と砂田の解との比較
Fig. 9 Comparison of calculated surface flow performances.

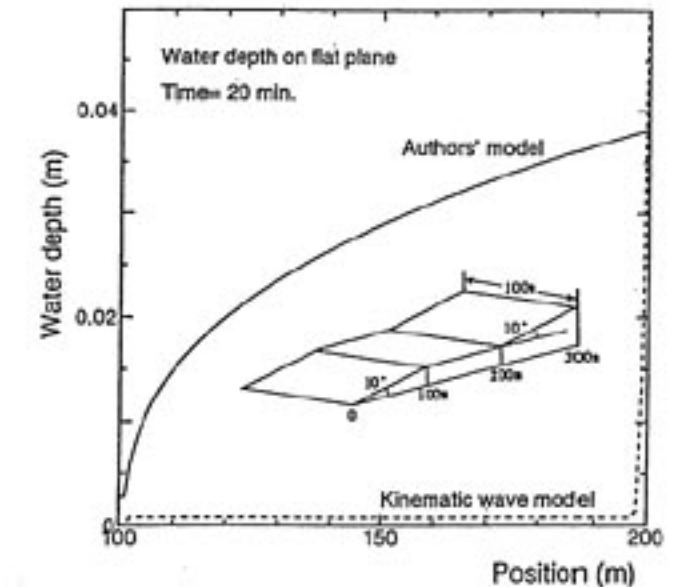


図-10 複数斜面モデルにおける水深分布の計算結果の比較
Fig. 10 Calculated water depth distributions from kinematic wave and authors' method for a multi-slope model.