

4. 地上部水収支モデル

4.1. 地上部水収支モデルの選定

地上部水収支モデルと地下水解析モデルの結合により水循環系の計算が行われるが、水循環系モデルの各要素との対応は図 4-1 の通りである。

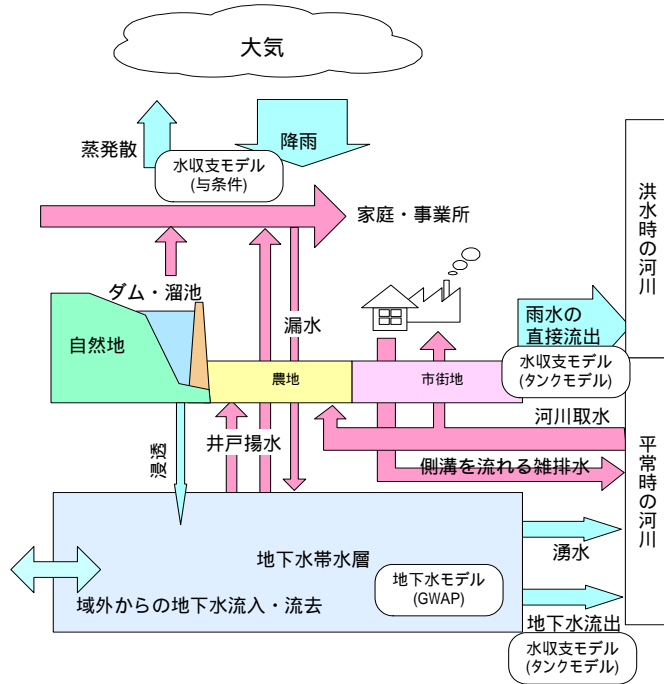
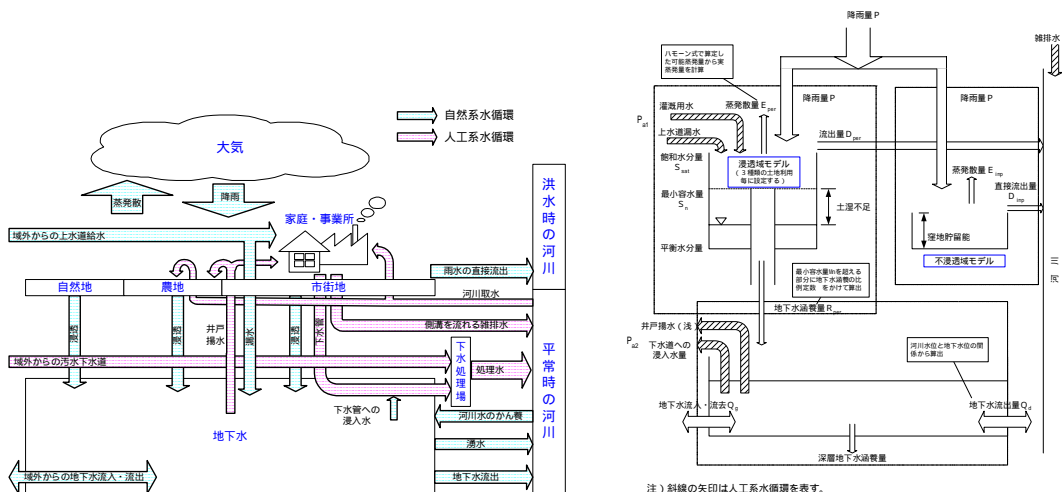


図 4-1 水循環系における各要素

図 4-1 から分かるように、水循環系の観点から見れば、地表水と地下水は相互に関連するものであるため、両者を連携したモデルを作成する必要がある。図 4-2 には、すでに構築されている代表的な 4 つの水循環系モデル(地表水と地下水が連携したモデル)を示した。それぞれのモデルは、表 4-1 に示した各対策(目的)に応じて使い分けられる。



注) 斜線の矢印は人工系水循環を表す。

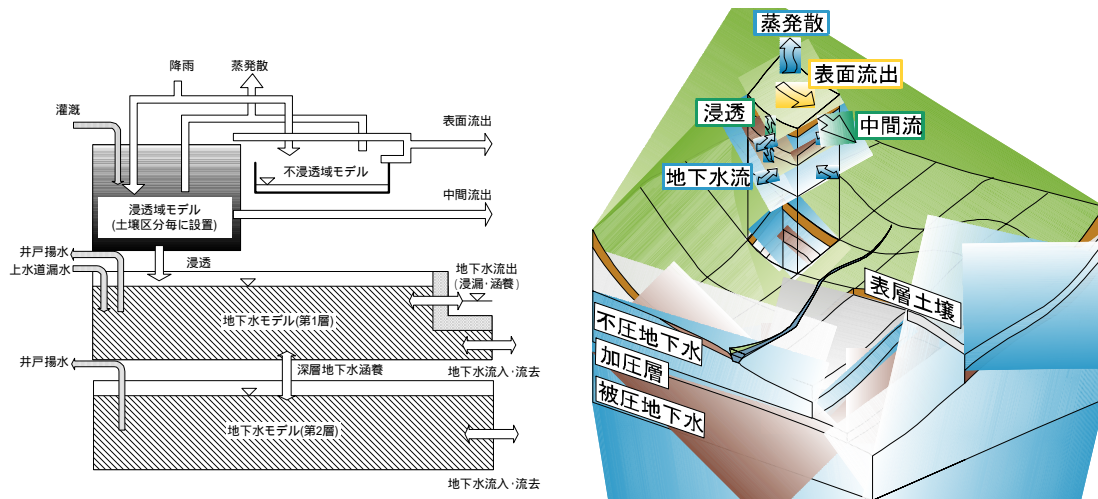


図 4-2 代表的なモデルの概念図(左上：年間水収支法，右上：SMPT，左下：SHER，右下：PDE)

- ・年間水収支法：水循環系経路を流れる水量を年間単位で把握する手法
- ・SMPT (Soil Moisture Parameter Tank Model)：表層土壌をタンクモデルで表現．流域は水文学的に均一な特性を持つ地域ごとに分割し，それぞれにモデルを一つずつ対応させ，流域全体を表現
- ・SHER (Similar Hydrologic Element Response Model)：SMPT において，表層土壌部分に不飽和浸透計算を組み込んだ手法
- ・PDE (Physically based Distributed model for Ebigawa-river)：流域をメッシュ分割し，各メッシュにおいて鉛直方向の水分移動を計算し，それを地表面，表層土壌，地下水のそれぞれに平面的に接続し，流域全体を 3 次元的に連続したものとして表現した手法

表 4-1 対策と対応する解析モデル

対策		年間 水収支法	SMPT モデル	SHER モデル	PDE モデル
課題 (評価指標)	対策分類				
平常時の流量の確保 (日流量)	河川水の利用				
	下水処理水の活用				
	地下水の利用				
	貯留水の利用				
	雨水浸透				
	自然地の保全				
洪水制御 (ピーク流量)	河川の整備				
	下水道の整備				
	雨水貯留				
	雨水浸透				

水資源の保全と開発 (年間水量)	雨水, 再生水の利用				
生態系の保全と復元 (日流量)	-				
汚濁制御 (日流量)	浄化水の導入				
	下水道の整備				
	合流式下水道の越流対策				
	河川, 池沼における直接浄化				
	汚濁負荷流入の分離				
下水道未普及地域での汚水処理					
熱環境の改善等 (蒸発散量)	-				

印は対応する事を示す。 印は限定的に対応することを示す。

出典:「都市域における水循環系の定量化手法」 都市小流域における雨水浸透, 流出機構の定量的解明研究会 平成 12 年

4 つのモデルの中では, PDE モデルの精度が 1 番高く, 多くの対策評価が可能である。この PDE モデルのようにモデル化を行う場合は, 地下水モデルに大気格子モデルを組み込む必要がある(図 4-3 左)。ただし, 目的や開発コスト, 計算時間等を考慮した場合, 地下水モデルに SHER モデルの地表(+ 表層土壌)部分を組み込んだモデルも考えられる(図 4-3 右)。両モデル化の比較を表 4-2 に示す。本研究の目的が, 洪水追跡計算ではなく, 水収支の算定であることを考えれば, SHER モデル+ 地下水モデルでも十分対応可能である。

以上のことから, 地上部水収支モデルとして SHER モデルを選定する。

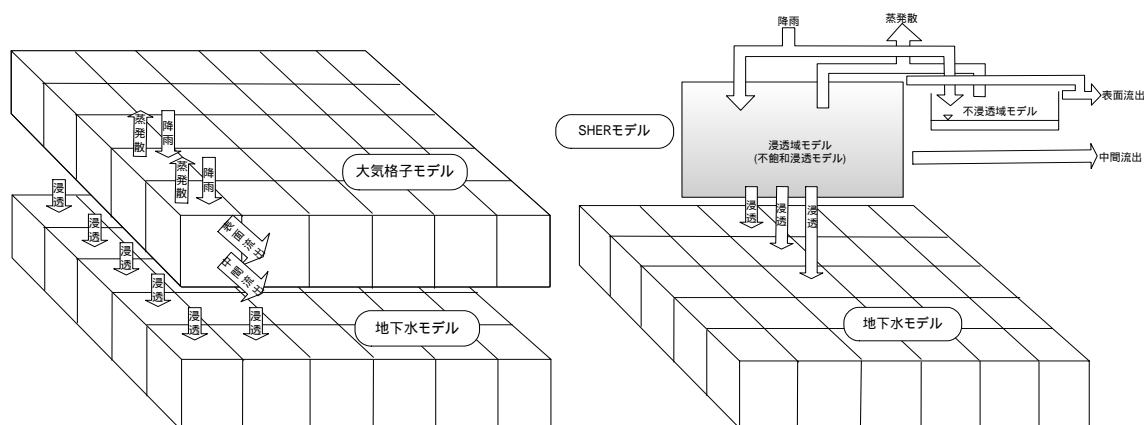


図 4-3 地表流モデルと地下水モデルの組み合わせ
(左: 大気格子モデル+ 地下水モデル, 右: SHER モデル+ 地下水モデル)

表 4-2 地下水モデルと地表流モデルの組み合わせ比較

		大気格子 + 地下水モデル	SHER + 地下水モデル
評価対象 (用途)	年間水収支		
	日単位の河川流量		
	洪水追跡計算		-
	氾濫解析		-
計算精度		高い	比較的高い
計算の安定性		中	高い
計算時間		長い	短い
開発コスト		非常に大きい	小さい

4.2. SHER モデルの概要

以下に SHER モデルにおける地表面 + 表層土壌部分のモデル化の考え方を記す。

SHER モデルでは、地下水位と河川水位の関係を現実に近いものとするため、また、部分流出寄与域 (図 4-4) の考え方にならい、低平地で地下水深度が浅い地域では流出応答が異なることを再現するために流域分割を行う。分割は河川近傍とその外周部分とに分割することを基本的な方針とする。

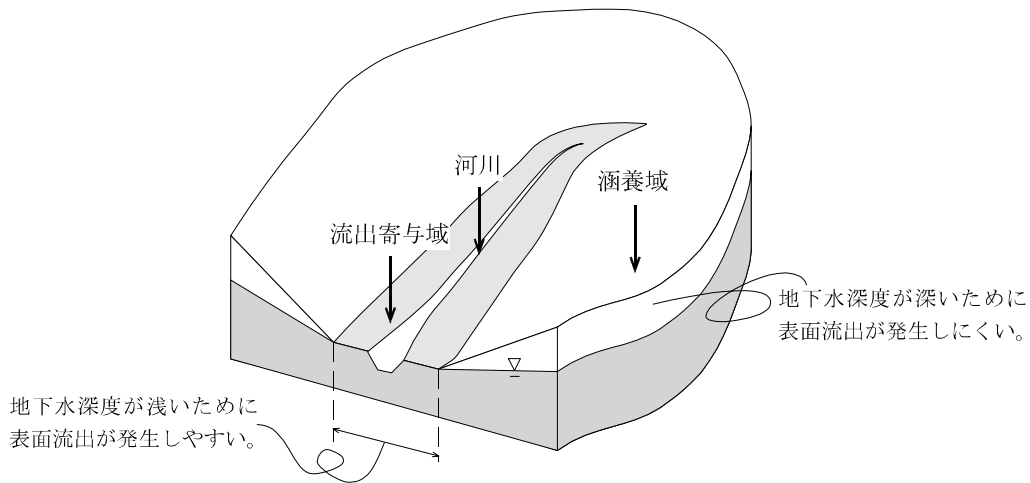


図 4-4 涵養域と流出寄与域

それぞれの流域(ブロック)においては、地表面を表 4-3 に示した 4 種類に分類する。それぞれの地表面からの水の流れは、図 4-4 に示すようである。

表 4-3 モデル上の地目分類

地表面の分類	概要	対応するモデル
不浸透域	屋根や道路	不浸透域モデル
水田	水田。水田は特殊な土壤であることから他と区分する。	浸透域モデル

浸透域 (締め固められていない土地)	国土数値情報の土地利用で山林、畑地等をこの区分とする	
浸透域 (締め固められた土地)	造成などにより締め固められた土地利用の浸透域	

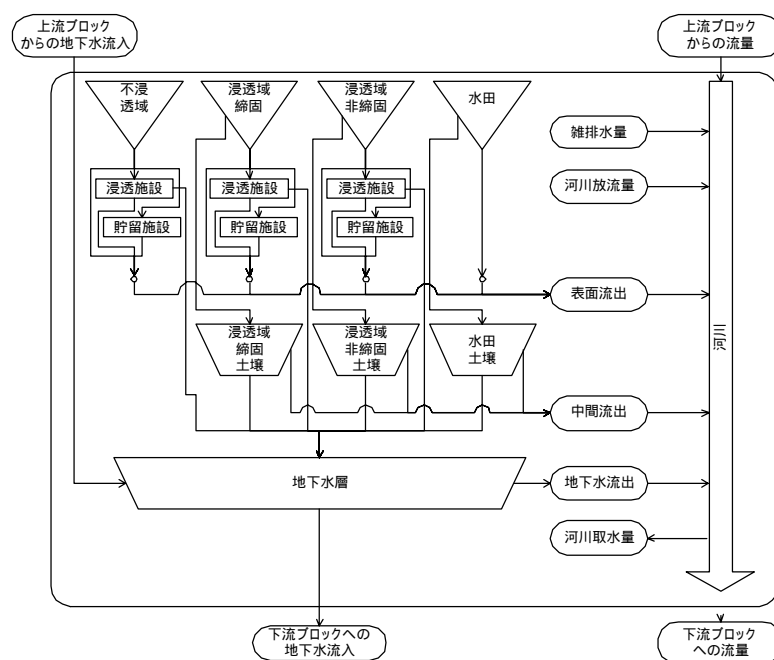


図 4-5 ブロック内の水の流れ概要図

以下に不浸透域と浸透域モデルの考え方を示す。

1) 不浸透域モデル

a. 概要

不浸透域モデル (図 4-6, 図 4-7) の基礎式を示すと次式となる。

$$\frac{dS_{imp}}{dt} = P - D_{imp} - E_{imp} \quad (1)$$

ここに、

- P : 降水量
- S_{imp} : 不浸透域窪地貯留池の貯留量
- D_{imp} : 不浸透域からの表面流出
- E_{imp} : 不浸透域窪地貯留池からの蒸発量

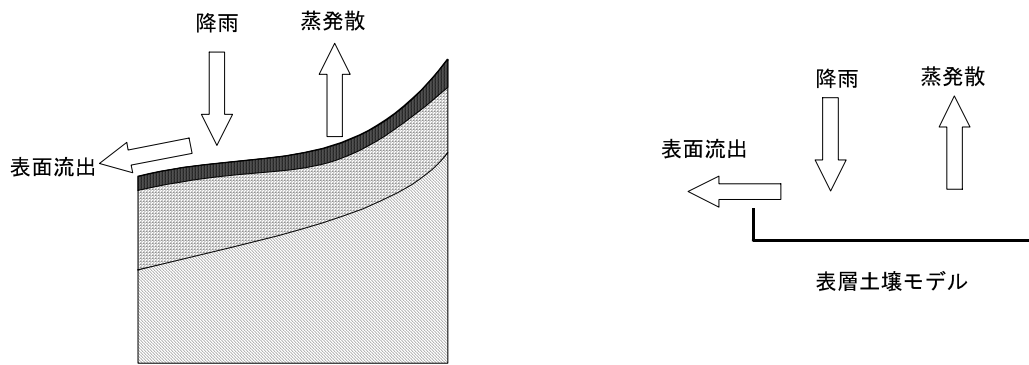


図 4-6 不浸透域のモデル化の概念

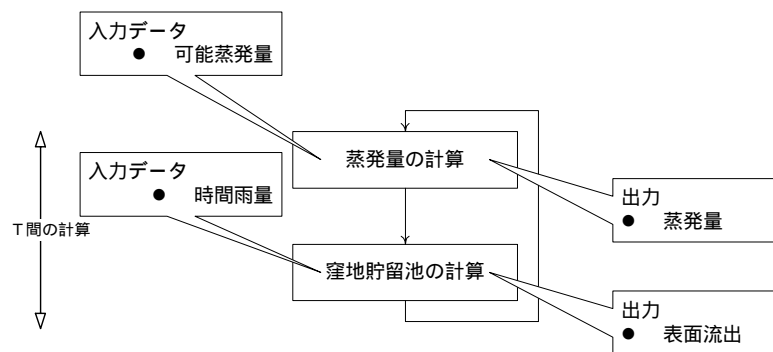


図 4-7 不浸透域モデルの計算フローと入出力の関係

b. 表面流出

降水量と窪地貯留能を比較して，降水量が上回ればその余剰分を表面流出とする．

c. 蒸発散

ここではハーモン式により可能蒸発量を算定し，窪地貯留池の水量を上限として実蒸発量を算定する．計算の手順は下記である．

降水中は，可能蒸発量はゼロとする．

窪地貯留池の水量と可能蒸発量を比較し，窪地貯留池の水量を上限として実蒸発量を求める．

2) 浸透域モデル

a. 概要

一般に河川への流出は表面流出と中間流出（速い中間流と遅い中間流），それに地下水流出により構成されていると言われる．ここでは，図 4-8 に示すようなモデルを作成する．図中の左側の図が雨水流出経路の概念図であり，それを右図のように表層土壌モデル及び地下水層モデルとして表現することとする．表層土壌モデル内では，土壤の水分伝達特性として Richards 式を基礎式として表現し，簡単な数値解法で水分量の追跡を行うこととする．計算フローと入出力の関係を図 4-9 に示した．

貯留量を窪地貯留池，表層土壌内，および地下水層内の 3 種類に分けて考えることとし，次式を基礎式とする．

$$\frac{dS_1}{dt} = U_s - E_1 - D_s \quad (2)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = P - E_2 - R - I - U_s + P_{a1} \quad (3)$$

$$\frac{dS_g}{dt} = R - D_g - P_{a2} \quad (4)$$

ここに、

- S_1 : 窪地貯留池の貯留量
- S_2 : 表層土壌内の貯留量
- S_g : 地下水層内の貯留量
- D_s : 表面流出量
- E_1 : 窪地貯留池からの蒸発量
- E_2 : 表層土壌内からの蒸発量
- P : 表層土壌への浸潤量 (= 降水量)
- R : 地下水涵養量 (降下浸透量)
- I : 中間流出量 (側方浸透流)
- U_s : 地表面への復帰流
- D_g : 地下水流出量
- P_{a1} : 表層土壌へ浸入する人工系水循環水量
(灌漑水量 (水田の場合のみ), 上水道漏水量などの合計)
- P_{a2} : 帯水層から引き抜かれる人工系水循環水量
(井戸揚水量, 下水道管渠への浸入水量などの合計)

以下に、蒸発散、鉛直浸透、側方浸透、復帰流の順に計算手法を説明する。

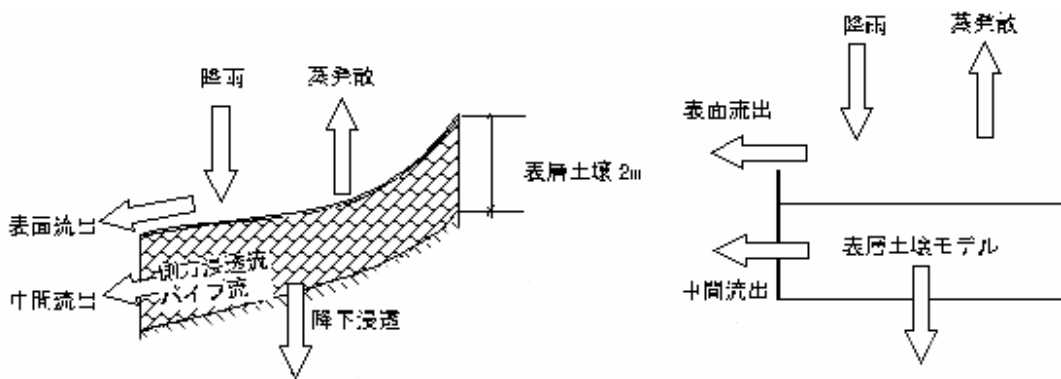


図 4-8 裸地のモデル化の概念

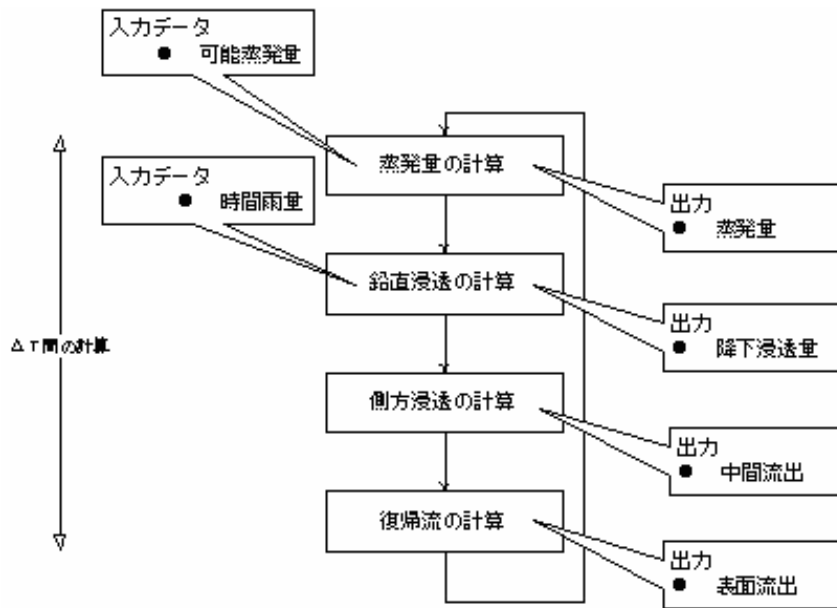


図 4-9 裸地モデルの計算フローと入出力の関係

b. 蒸発散

蒸発散は、樹冠などからの蒸散と窪地や裸地からの蒸発に大別できる。これらの現象に影響を与える要因は、気温、風速、湿度、樹種など多くが言われており、その確定した評価手法は未だ開発段階といってよい。そこで、ここではハーモン式により可能蒸発量を算定し、窪地貯留池と土壌含水量の合計を上限として実蒸発量を算定する。計算の手順は下記である。

降水中は、可能蒸発量はゼロとする。

窪地貯留池の水量と可能蒸発量を比較し、窪地貯留池の水量を上限として実蒸発量を求める。可能蒸発量からで算定した実蒸発量を比較して、可能蒸発量が余る場合はその余剰部分を土壌からの可能蒸発量とする。

土壌からの可能蒸発量と土壌含水量を比較して、土壌含水量を上限として実蒸発量を求める。

で求めた窪地貯留池からの実蒸発量にこれを加えて、流域からの実蒸発量とする。

土壌の体積含水率は、実蒸発量を減じた値で更新する。

c. 鉛直浸透

[浸潤（地表面を通過する浸透量）]

地表面を通過する浸潤量（浸透量）は、土壌の含水率（乾き具合）により様々に変化することが言われている。含水率が低ければ、浸潤の速度は大きくなり、この速度は土壌が飽和に近づくにつれて飽和透水係数に漸近する。しかし、ここでは単純に、地下水層モデルが飽和するまでは無条件で浸潤が生じるとする。

降水量と窪地貯留池の水分量は全て、地表面を通過し、その分だけ土壌含水量が増加することとする。計算上は一時的な過飽和状態（土壌の全空隙よりも水分量が上回る状態）が生じる場合もある。

[降下浸透（地下水涵養）]

土壌の水分量は、鉛直下方向には重力により排水されるが、排水が進み含水率が低下すると、土壌

の不飽和透水係数が小さくなり、排水速度が減少することとなる。ここでは、この機構を単純にモデル化するために、 T （ここでは1時間）を10等分して、状態量（土壌の体積含水率）を順次更新して行く陽形式の差分計算とする。計算手法は下記である。

土壌の含水率から不飽和透水係数を算定する。

$dt (= T/10)$ の間はその不飽和透水係数が継続するとして、土壌含水量を重力排水する。

流速は（不飽和透水係数） \times （1.0）とする。

土壌含水量から排水量を減じ、土壌の体積含水率を更新する。

に戻り、これを10回繰り返す。

$$R = \int_T^{T+\Delta T} K_0 \cdot k_r(\theta) dt \quad (5)$$

ここに、

K_0 : 飽和透水係数

$k_r(\theta)$: 相対透水係数

θ : 体積含水率

d. 側方浸透

土壌内に浸潤した水分は鉛直方向に重力排水されると同時に斜面に平行な方向（斜面方向）にも流速ベクトルを生じる。これには直接流出成分を構成する速い中間流と基底流出を構成する遅い中間流が含まれる。速い中間流は、土壌中の大孔隙（動植物がつくる穴など）や土壌中に発達した亀裂や水みちを通る流れが主成分と考えられ、これはパイプ流などと呼ばれる。他方、遅い中間流は土壌の中を一樣に進行する浸透流であり、側方浸透などと呼ばれる。

斜面方向の流れは鉛直方向の浸透現象と同時に生じているが、モデル化の際には簡単化のために、鉛直方向の浸透を先に計算し、その状態から斜面方向の流れを計算する。また、パイプ流の存在を考慮して、鉛直方向と斜面方向の飽和透水係数は異なることとし、斜面方向を大きな値とする。計算手法は下記である。

土壌の含水率から不飽和透水係数（斜面方向）を算定する。

$dt (= T/10)$ の間はその不飽和透水係数が継続するとして、流量を算定する。流速は

（不飽和透水係数） \times （斜面勾配）とする。

土壌含水量から流量を減じ、土壌の体積含水率を更新する。

に戻り、これを10回繰り返す。

$$I = \int_T^{T+\Delta T} K_{0I} \cdot k_r(\theta) \cdot s dt \quad (6)$$

ここに、

K_{0I} : 斜面方向飽和透水係数

k_r : 相対透水係数

s : 斜面勾配

e. 復帰流

側方浸透流の計算を終えた段階で、土壌の含水率が飽和含水率を上回る場合は、復帰流が生じたこととして、地表面流を発生させる。計算手法は下記の通りである。

側方浸透の計算を終了した時点で、土壌の体積含水率と飽和含水率を比較して、土壌の体積含水率が飽和含水率を上回る場合は、その過剰分を地表面へ戻す。

地表面上の水深と窪地貯留能を比較して、窪地貯留能を上回る部分の水量は、表面流出させる。

f. 水分伝達特性

鉛直方向と斜面方向の浸透量を計算する際に、不飽和透水係数を用いるが、その式形はここでは Mualem の式形を用いる。鉛直方向は(8)式であり、斜面方向は(9)式で求める。

Mualem(1978) の不飽和透水係数～含水率の関係

$$k_r(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_0 - \theta_r} \right)^n \quad (7)$$

$$k = K_0 k_r(\theta) \quad (8)$$

$$k = K_{0f} k_r(\theta) \quad (9)$$

ここに、

- k_r : 相対透水係数
- k : 不飽和透水係数 [cm/s]
- K_0 : 飽和透水係数 [cm/s]
- K_{0f} : 斜面方向飽和透水係数 [cm/s]
- n : 定数 (Mualem の n)
- θ : 体積含水率 [cm³/cm³]
- θ_0 : 飽和水分量 [cm³/cm³]
- θ_r : 残留水分量 [cm³/cm³]