

一般的な山地小流域における地下水流出の3次元浸透解析と問題点 Three dimensional analysis of groundwater flow in a small watershed

埼玉大学 工学部 正会員 渡 辺 邦 夫
山 中 和 雄

はじめに

山地小流域の地下水流れを3次元的に解析することは、表面流出が顕著でない流域の流出機構や山地萌壊現象などを考える上で基礎的であるといえる。今回、山地小流域の地形をある程度近似しえ、表層斜面内の地下水流れを、飽和—不飽和両領域にわたって3次元的に解析しうるプログラムを開発した。また、そのプログラムを用いて、愛知県犬山試験流域で観測された短時間の雷雨性降雨に対する流出を例にとり、流域の地質特性が流出に与える影響について検討した。その結果、雷雨のような、短時間の強い降雨の流出機構について、2、3の基礎的な性質が明らかとなったので報告する。

1 一般的な流域地形のモデル化と有限要素分割

まず、山地小流域の、表層土下部岩盤の形状を図-1のようにモデル化して考える。小流域は、谷部と谷をはさむ斜面（以下、谷斜面と記す）、谷の頭部を形成する斜面（以下、谷頭部斜面と記す）により構成されている。いま、谷斜面上面が平面で近似しえ、谷斜面尾根と谷が平行であるならば、尾根勾配と谷勾配は等しくなる。また、谷斜面の形状が、谷をはさんで対称であるならば、解析の対象は谷の片側のみを取り上げれば良い。今回、基本的にこのようなモデル地形の上に表層土が乗ったものを流域と考え、表層土中にのみ地下水浸透がおこるものとする。

上記の仮定を設ければ、まず表層土下部の地形は、谷の片側を取り出した時、図-2中 $L_1 \sim L_5$ 、 H_1 、 H_2 であらわしうる。ここに、 L_1 は谷斜面の谷に直交する方向の水平長さ、 L_2 は谷の水平長さ、 L_3 は谷方向の谷頭部斜面の水平長さ、 L_4 は谷幅、 L_5 は、図に示されるように、谷入口に向かう水落線と尾根との交点から、谷入口から谷に直交する線と尾根との交点までの水平長さである。また、 H_1 は、尾根と谷との、谷に直交する方向での標高差、 H_2 は、谷入口と谷上部端との標高差である。今回のモデルでは、斜面表層部には2枚の地層が重なっていると考えている。各地層の厚さは、谷から尾根にかけて直線的に変化することを仮定する。図中、 D_1 、 D_2 は、それぞれ上・下層の谷に面した部分の厚さ、 D_3 、 D_4 は各々の尾根での厚さである。このモデルによれば、谷入口に向かう水落線上が、1つの境界となる。地下水浸透においてもこの線が流れの境界となるかは確かに問題であるが、今回はこのように設定した。

表層土内の地下水流れは、領域を六面体2次アイソパラメトリック要素に分割して有限要素法により解析する。図-3に、斜面形状の一例およびその地表面上での要素分割状況を示す。本プログラム中に設定した要素数は、表層の上・下層それぞれにつき28、総計56であり、総節点数は401である。要素

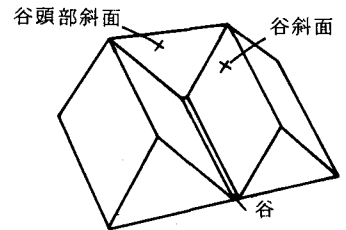


図-1 流域のモデル化

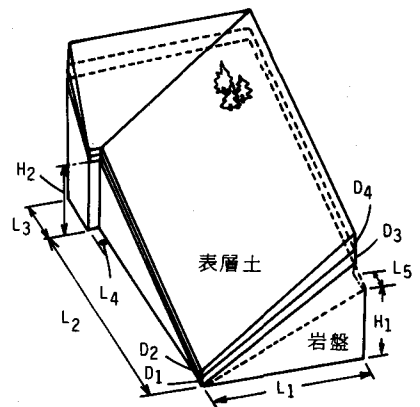


図-2 モデル流域の形状

の大きさは谷付近で小さくしている。流域の形状は、前述の $L_1 \sim L_5$ 、 $H_1 \sim H_2$ を変えることによって、また表層土厚さは $D_1 \sim D_4$ を変えることで容易に変化させることができる。

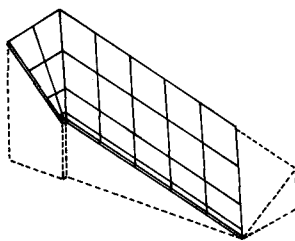


図-3 要素分割の例

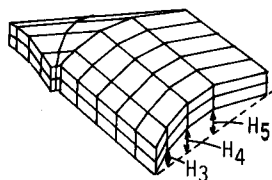


図-4 勾配の変化する斜面の例

さらに、本プログラムでは、図-4に示すように、 $H_3 \sim H_5$ を与えることによって、斜面勾配をある程度実際の地形にあうように、

場所的に変えることができるよう考慮されている。なお、境界は、谷に面した要素面を自由浸出面とし、他は流入出0とした。以上により、かなり実際に近い流域モデルが作り得るものと考えられる。

2 数値解析

数値解析は、以前より筆者らが報告しているように^{1), 2), 3)}、(1)式で示す飽和-不飽和浸透流基礎式をガラキン法により解くことによって行った。透水係数は等方性を仮定している。

$$C(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial t} = k(\theta) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k(\theta) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k(\theta) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + q \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C(\theta)$ は比水分容量、 ϕ はポテンシャル、 θ は飽和度、 $k(\theta)$ は不飽和透水係数、 q は系外からの水の出入りをあらわしている。計算にあたって、時間項は、克蘭クニコルソン型の差分で表現した。また式の非線形性を考慮し、 $C(\theta)$ 、 $k(\theta)$ を以下の方法で近似しつつ計算した。まず、 t 時点での $C(\theta)^t$ 、 $k(\theta)^t$ を用いて、 $t + \Delta t$ 時点のポテンシャル ϕ^{t+1} を求め、その値から、 $t + \Delta t$ 時点での $C(\theta)^{t+1}$ 、 $k(\theta)^{t+1}$ 値を求める。つぎに、 $t + \frac{1}{2} \Delta t$ 時点のポテンシャル値、比水分容量、不飽和透水係数、 $\phi^{t+\frac{1}{2}}$ 、 $C(\theta)^{t+\frac{1}{2}}$ 、 $k(\theta)^{t+\frac{1}{2}}$ をそれぞれ、 t と $t + 1$ 時点の値の平均とおき、計算を $\frac{1}{2} \Delta t$ 進め、再度 $t + \Delta t$ 時点の値を求めた。つぎに、解析では、谷に面した自由浸出境界上の各計算節点が、浸出面内にあるかどうかの判断を各時点で行ってゆかねばならない。この判断はとくに、地下水流出が低減する場合困難である。これについては、自由浸出境界上の各節点流出の流向により行った。

降雨は地表面上の節点に与えるが、それらの節点の飽和度が100%に達した後は、節点からの浸透量を計算し、節点降雨量と節点浸透量の差が表面流出となり、急速に谷入口に流下すると考える。実際には、表面流出する降雨が谷入口に達するまでには、ある程度時間がかかるはずである。そのため、表面流出成分が多くなる条件では、計算ハイドログラフと実測ハイドログラフでは誤差が生ずる。このような問題があるものの、地下水流出が卓越する流域では、解析はある程度と妥当と考えられる。なお、前述した流域モデルにおいて、谷部に降った雨は、表面流出と同様、急速に谷入口に達するとしている。

つぎに、本解析法を実際の流域に適用し、実測ハイドログラフと比較して解析上の問題点を検討してみる。またあわせて、種々の表土層地質特性が、どのように流出に影響するかを調べてみる。

3 犬山試験流域の雷雨性降雨に伴う地下水流出の解析と問題点

3. 1 試験流域のモデル化

開発したプログラムを用いて、愛知県犬山試験流域⁴⁾における短時間、高降雨強度の雷雨に伴う地下水流出を解析してみる。試験流域の概略的な地形を図-5に示す。図中●は流出量測定点である。谷勾配はかなり急であることがわかる。流出量測定点に流入する降雨の流域は、おおよそ図中の破線で囲まれた範囲と考えられる。なお、流域の岩盤地質は、古生代ないし中生代の頁岩、チャートであり一部砂岩をはさんでい

る⁵⁾。この流域を、斜面が平面で近似しうると考え、また谷が直線的であるとしてモデル化したものが図-6である。図中、実際の地形に良く合うように選んだ $L_1 \sim L_5$ 、 H_1 、 H_2 値を示している。谷幅は 4 m (片側 2 m) とやや大きくとっている。表層土厚さ $D_1 \sim D_4$ については、計算ケースごとにそれぞれ変えたが、 $30\text{ cm} \sim 1.5\text{ m}$ 程度とした。本流域内の表層土厚さ分布についてはすでに報告しているが、それによれば、尾

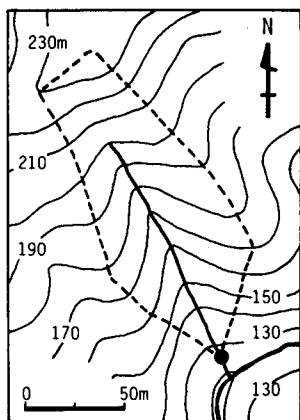


図-5 大山試験流域の地形

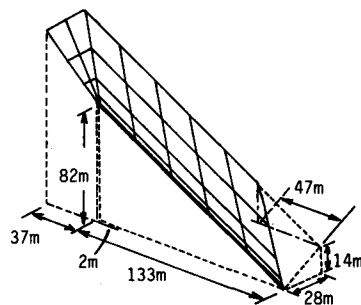


図-6 試験流域のモデル化

根部で 30 cm 程度、谷付近で $1.0 \sim 1.5\text{ m}$ 程度である。⁵⁾ したがって、今回設定した値は実際の表層土厚さに比べてやや大きい。しかし、岩盤上部の風化が進んだ部分も表層土と同様に浸透経路となりうると考え、このように設定した。全体的にみて、おおまかな地形はうまく表現されていると考える。

3. 2 流出特性と解析にあたっての注目点

今回主に検討の対象とするのは、1985年8月12日午後4時45分から5時15分にかけて総降雨量 20 mm の降雨である。とくに、4時50分から5時10分までの20分間の降雨強度が大きく、20分間 20 mm の降雨と考えることができる。その降雨に対する流出ハイドログラフを図-7 (a) に示す。8月12日以前は雨がが多く、斜面表層土の飽和度はかなり高い状態にあった。図から、降雨終了後約1時間程度で流出量がピークに達し、約2時間半後より急激に低下していることがわかる。一方、図-6 (b) は、比較のため示した1980年8月21日の、(a) よりやや長時間の降雨に対する流出ハイドログラフである。この場合は、最大降雨時点より約2時間程度遅れて流出量がピークに達しており、その後約1時間、急激に低下したあと、ゆっくりと流出量が低減している。いずれの場合も、斜面表面では顕著な表面流出は観測されておらず、大部分の降雨は一度表層土内に浸透したと考えられる。このことをふまえて、今回の解析の1つのポイントを、降雨後1～2時間後に流出量がピークとなる現象がうまく表現しうるかどうかに設定した。

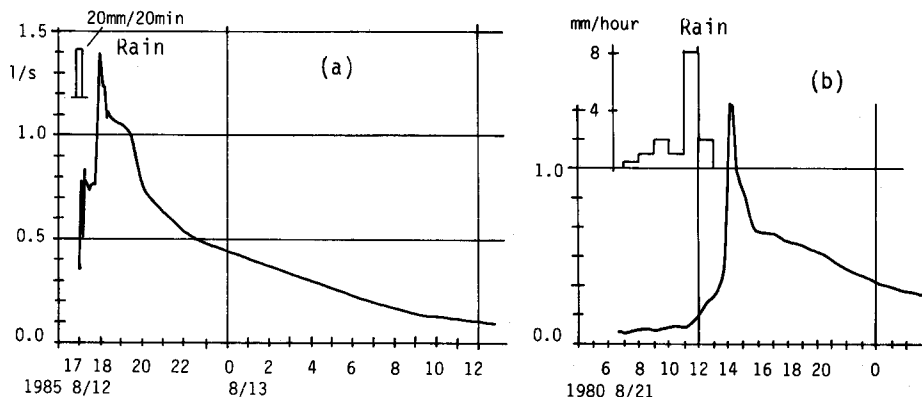


図-7 測定ハイドログラフ ((a): 1985年8月12日降雨、(b): 1980年8月21日降雨)

3. 3 計算結果と考察

解析にあたって、表層土の不飽和特性を妥当に与えねばならない。今回、飽和度 (θ) - サクション水頭 (Ch)、飽和度 - 透水係数比 r 、($r = k(\theta) / k_0$ 、 k_0 は飽和透水係数) 関係をそれぞれ図-8 (a)、(b) のように設定した。各々2パターンづつあり、各パターン名称を図中示すように定める。これらの関係は実測に基づいたものではなく仮定したものである。計算にあたって、斜面内の初期飽和度分布を図-9のようにやや高く与えた。

図の縦軸は、鉛直線上の節点位置(2要素5節点)をあらわしている。計算では、斜面を断面的にみた時、飽和透水係数(k_0)が場所的に変化すると考え、図-10に示す4つの領域(R-1~R-4)にそれぞれの値を設定した。とくに、上層および

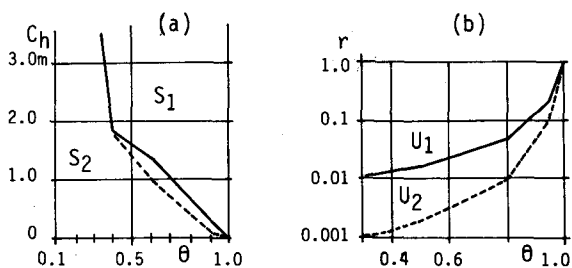


図-8 飽和度-サクション水頭(a)、飽和度-不飽和透水係数比 r (b) 関係の仮定

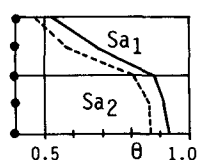


図-9 初期飽和度分布

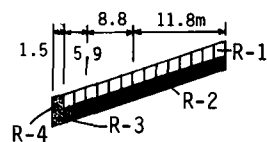


図-10 斜面の透水性区分
谷斜面断面の例

表-1 計算ケース

Case	Thickness of layers m				θ - Ch	θ - r	Initial condition	Permeability $\times 10^3$ cm/s			
	D_1	D_2	D_3	D_4				R-1	R-2	R-3	R-4
A	1.0	1.0	1.0	1.0	S_1	U_1	Sa_1	4.0	0.1	2.0	1.5
B	1.0	1.0	1.0	1.0	S_1	U_1	Sa_1	4.0	0.1	2.0	1.5
C	0.3	0.3	0.3	0.3	S_1	U_1	Sa_1	4.0	0.1	2.0	1.5
D	1.0	1.0	0.3	0.3	S_1	U_1	Sa_1	4.0	0.1	4.0	4.0
E	1.0	1.0	1.5	1.5	S_2	U_2	Sa_2	25.0	0.5	25.0	25.0

谷に近い要素の透水係数をかなり大きく設定した。また、表層土の有効間隙率は30%、10%の2ケースとした。

計算では、まず初期状態より、約10時間降雨を与えず流出させ、その後20分間総量20mmの降雨を与えた。実際には、植生の影響などあって、地表面に達する降雨は、総降雨の一部であるが、今回、すべての降雨が地表に達するとしている。

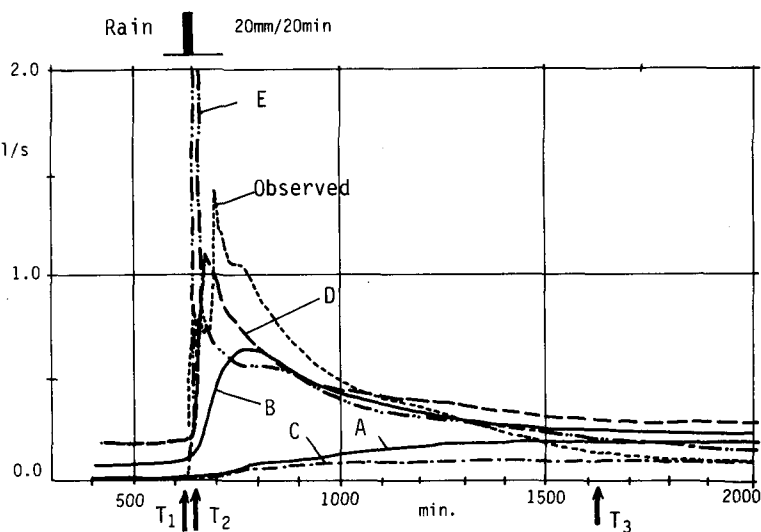


図-11 表-1中の各ケースのハイドログラフ

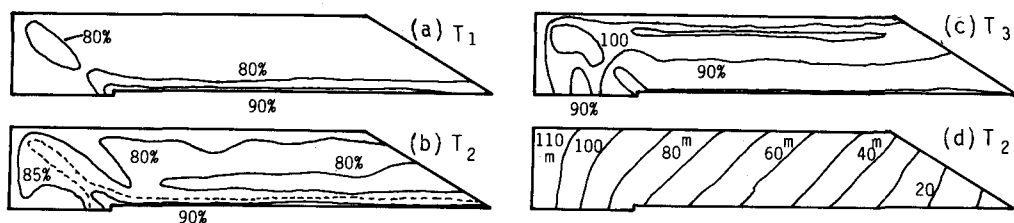


図-12 上下層境界面上の図-11中(a) T_1 、(b) T_2 、(c) T_3 時点の飽和度分布および (d) T_2 時点のポテンシャル分布 (ケース B)

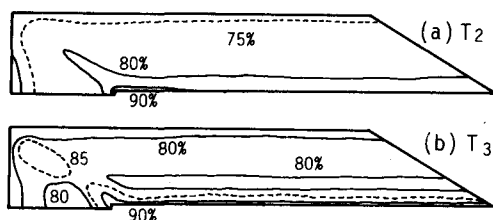


図-13 (a) T_2 、(b) T_3 時点の飽和度分布 (ケース A)

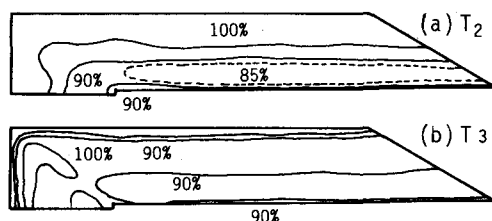


図-14 (a) T_2 、(b) T_3 時点の飽和度分布 (ケース D)

表-1に今回報告する計算ケースおよび各々の計算条件をまとめて示す。ケースBは、ケースAに比べて有効間隙率が小さい場合である。ケースCはケースAに比べて、表層土厚さが小さい場合である。ケースD、ケースEは、ケースBより飽和透水係数を一部もしくは全体的に大きくし、表層土厚さも谷部と尾根部で変えた場合である。

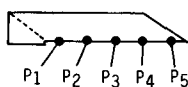


図-11に、各計算ケースにおける計算ハイドログラフを示す。これらは地下水流出のみを示してある。表面流出は、尾根部で表層土厚さがうすく、有効間隙率も10%と小さいケースDで多かった他は、あまり大きくなかった。図-11中にあわせて、図-7(a)で示した実測ハイドログラフを示す。実際の場合、降雨の全量が地表面に達せず、また蒸発などの影響をつよくうけており、今回の計算条件とは必ずしも正確に対応していないことや、計算結果は、谷の片側のみを対象にしていることに注意を払う必要がある。

図-11に、各計算ケースにおける計算ハイドログラフを示す。これらは地下水流出のみを示してある。表面流出は、尾根部で表層土厚さがうすく、有効間隙率も10%と小さいケースDで多かった他は、あまり大きくなかった。図-11中にあわせて、図-7(a)で示した実測ハイドログラフを示す。実際の場合、降雨の全量が地表面に達せず、また蒸発などの影響をつよくうけており、今回の計算条件とは必ずしも正確に対応していないことや、計算結果は、谷の片側のみを対象にしていることに注意を払う必要がある。こういった問題はあつたものの、全体的なハイドログラフのパターンは比較することができると考える。図から、有効

間隙率が30%と大きいケースA、Cの場合、流出が実測に比べてかなり遅れ、ピークも明瞭でないことがわかる。有効間隙率10%の場合、流出のピークは早くなつており、この傾向は全体的な表層土透水係数が大きい程顕著である。とくに、ケースEでは、降雨直後に鋭いピークを示す。これらの計算ケースをみる限

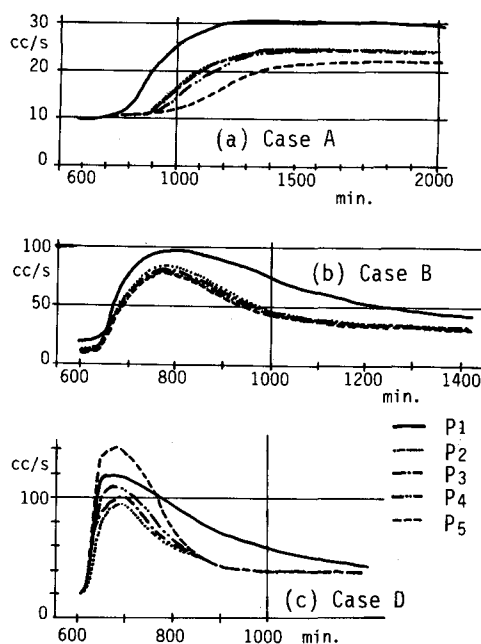


図-16 各ケースの各節点流出量の変化

り、実測ハイドログラフが地下水流出によって主に説明しうるとするならば、ケースB、ケースDのハイドログラフパターンが最も実測に近いといえる。ただ、流出の低減は実測に比べややゆるやかである。

図-12は、表層の上下層境界面における、ケースBの場合の、図-11中 T_1 、 T_2 、 T_3 時点の飽和度分布および T_2 時点のポテンシャル分布である。図-13、図-14はそれぞれケースA、ケースDにおける T_2 、 T_3 時点の飽和度分布である。まず飽和度分布から、いずれの場合も、谷頭部斜面と谷斜面との境界付近で飽和度の高い部分が認められる。飽和度が高いことは、その部分の不飽和透水係数が大きいことを示し、一種の水みちとなっていることを意味する。これらの図中、とくに谷斜面中央よりやや谷に近い部分で飽和度が小さくなっているが、これは、その付近から下層の透水係数が大きくなり、鉛直下方に水分が多く移行することによるものである。

図-12(d)のポテンシャル分布から、地下水は全体的には斜面の最大傾斜方向に流下している。これは、設定した初期飽和度が大きく、谷に面した各要素面の下部がいつも浸出面となっていることによるものである。もし、斜面がより乾燥し、標高の低い谷入口付近のみから浸出する場合は、斜面内地下水流れは全体に谷に平行と近くなるはずである。

つぎに、谷に沿って場所的な流量の分布を調べてみる。図-15中の $P_1 \sim P_5$ は、いずれも谷に面した要素の中間節点位置であり、各要素の谷に面した長さは等しい。ケースA、B、Dについて $P_1 \sim P_5$ 位置の節点流量の変化をみたものが図-16である。ケースDにおいて、一時期谷入口に近い P_5 節点の流量が大きくなっている他は、谷頭部斜面と谷斜面との境界に近い P_1 節点からの流量が大きい。これは、前述したように、その境界付近に形成された水みちの影響をうけたものと考えられる。

以上述べたように、本プログラムにより、ある程度山地流域からの地下水流出を解析することができ、地下水流れの状態を把握しうる。ただ、前述したように、実測ハイドログラフに近い流出が、有効間隙率10%とかなり小さい条件となっていることが疑問の残る点である。このことは、雷雨性降雨のように、短時間に強い降雨が与えられた場合、局所的に地下水が流れることを推定させる。このような状態を模式的にあらわしたものが図-17である。図において、局所的に、表層土内のクラックやソイルパイプを中心とした高透水部が存在することを示している。もちろん、有効間隙率の減少は前述(1)式中の比水分容量を小さくする効果を持つわけであるから、同様な効果は、飽和度-サクション圧関係を変えることによってでも得られるはずである。しかし、いづれにしても、物理的には、局所的な高透水部の存在が推察しうる。

さらに、今回の解析では、流出流量の低減が、実測に比べてややゆるやかであった。この点については、地表面に達する降雨量の測定や蒸発量の測定を通じてさらに検討してゆきたい。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、内容全般にわたって御教示いただいた東京工業大学教授日野幹雄先生、また現地流出測定に関して暖い御助力をいただいた名古屋大学助教授志知竜一先生に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫、今井久、第28回水理講演会論文集、pp. 527-533、1984。
- 2) 渡辺邦夫、大矢直和、第29回水理講演会論文集 pp. 103-108、1985。
- 3) 渡辺邦夫、今井久、応用地質、vol. 25、no. 1 pp. 1-9、1985。
- 4) 水文小委員会、全国試験流域調査表、pp. 135-136、1985。
- 5) 渡辺邦夫、茂木君郎、志知竜一、応用地質、vol. 22、no. 1、pp. 104-117、1981。

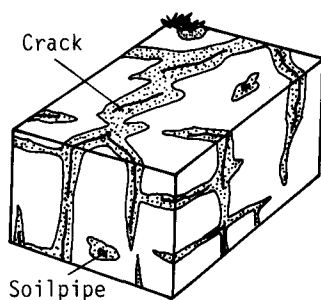


図-17 表層土モデル