

斜面の地下水流出に与える水みちの影響に関する基礎研究

Influence of Soil Pipe on Groundwater Runoff from Idealized Slop

埼玉大学工学部 学生員 今 井 久

埼玉大学工学部 正 員 渡 辺 邦 夫

はじめに

実際の斜面内の地下水流れは、たとえ地形・地質的にみてほぼ一様、均質といえるような場の中にあっても、必ずしも一様ではないことが多い。これは、従来から指摘されているように、ソイルパイプなど局所的に透水性の良い小スケールの水みちの存在によるものである。最近、この水みちの形状、地下水流れや降雨流出応答に与える影響を調べた研究が多くなって来た。たとえば、Beven・German¹⁾は、長期の地下水流れに伴った浸食の結果生じた“natural soil pipe”は、斜面全体の空隙量に占める割合は小さいものの、透水性が周囲に比べてはるかに大きく、全体の地下水流れに多大な影響を与えることを示した。田中ら²⁾、新藤³⁾は、実際の小流域の流出観測により、ソイルパイプが降雨流出応答にかなり大きな影響を与えていることを明らかにした。一方、筆者ら^{4) 5) 6)}は、水みちの形成過程や降雨の地下水流出、とくにその立ち上がりに与える影響を室内実験と3次元数値解析により調べた。その結果、形成についてはまだ問題が多いものの、目づまりにより、透水性の場所的差が拡大されることを示した。また、水みちの斜面内での位置によってかなり降雨流出応答に違いが生ずることを示した。今回の研究は、以前の研究結果をふまえ、斜面の降雨流出に与える水みち、とくにその位置の影響をモデル斜面を用いた降雨流出実験と、3次元浸透流解析によってさらに詳細に検討したものである。

1. モデル実験による水みち位置の影響評価

1.1-1 実験装置と実験方法

実験は図-1に示す2つの傾斜した土槽を用いて行った。各土槽中にそれぞれ水みち位置を変えてあり、aは水みちが下方に、bは上方に存在する場合を想定している。野外でのソイルパイプの観測報告によると、ソイルパイプは難透水層直上に多く存在していることが指摘されている。そこで、このモデルでも流れの場として表土層を対象とし、その下に難透水層が存在すると考え、ソイルパイプを難透水層直上、すなわち表土層底部に設定した。ただしソイルパイプとしては空洞になっていることも報告されているが、ここでは透水性の良い砂をつめて表現している。つまり、ソイルパイプ内の流れはダルシー則に従うとしていることになる。斜面両側面と上端面は板で囲み水の流入出のない条件としている。下端面は金網(目間隔 約0.33mm)を張り、試料の崩壊を防いでいる。また、水は自由に流出できる。流出した水は横樋で受け、メスシリンダーに入り流量を測定する。図中みられるように、下に水みちのある場合、水みち部分からの流量を分離して測定できる。使用した材料は、地山部に豊浦標準砂(透水係数 $4.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$)を用い、水みち部はろか

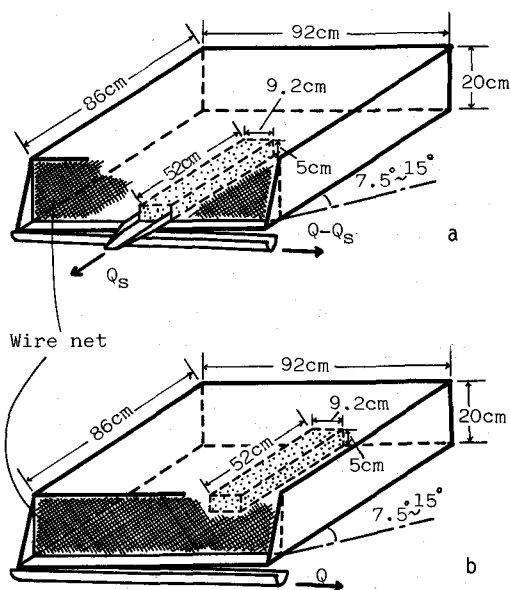


図-1 実験装置概略図

砂(透水係数 0.8 cm/s)を用いている。なお、モデル斜面下底面勾配としては、 15° と 7.5° の2つの場合を設定した。降雨は、市販の園芸用電動噴霧器を使用し、鉛直上方より斜面上面に均一に散布して与えた。その強度としては、 13 mm/h と 26 mm/h の2通り与え、降雨強度の流出特性に与える影響をみた。

表-1 実験条件

実験ケース	勾配	降雨強度	経続時間
EXP-1 a, b	15°	13 mm/h	25 min
EXP-2 a, b	"	26 mm/h	60 min
EXP-3 a, b	7.5°	"	40 min

実験は、表-1に示すように斜面勾配、降雨強度・継続時間の組み合わせで3通り、そのそれぞれで下に水みちがある場合をa、上にある場合をbとし、EXP-1 a, b~EXP-2 a, bの6通りについて行った。なお、bはaの約2時間後に行った。なお、実験装置は野外に数ヶ月放置し、土壌状態を十分安定させてから行った。ただ、実験装置は野外に設置してあるため、試料の初期飽和度は実験前の自然降雨の有無などで異なる。EXP-1は降雨(総降雨量 43.2 mm)の翌日に、EXP-2はEXP-1の後2週間降雨のない時を経過してから、EXP-3は降雨(総降雨量 44.1 mm)の2日後に、それぞれ実験を行った。従って、EXP-1, -3は初期飽和度の高い条件で実験を行ったことになる。

1-2 実験結果と考察

図-2はEXP-1、図-3はEXP-2、図-4はEXP-3の降雨流出応答をそれぞれ示している。また、 Q_s として水みち部分からの流出応答を示している。なお、いずれの実験も定常状態に達していない。各実験ともに降雨を与えてからそれぞれタイムラグを持って流出を始める。このタイムラグは水みち位置によって異っている。しかし同じ位置に水みちがあった場合でも、各図により異なっている。これは与えた降雨強度に加え、実験前の試料の飽和度分布の違いによるものと考えられる。このことは図-3, -4の比較から明らかである。図-3のEXP-2は2週間降雨のない状態を経ているが、図-4のEXP-3は降雨のあった翌々日に行っている。その結果、実験初期飽和度が大きく異なり、30分程度のタイムラグの差が生じている。図-2~4それぞれの図をみると、水みちが下にある場合は上にある場合よりもタイムラグが小さく、流量の立ち上がりが良く、減速も速く、降雨流出応答が良いことがわかる。また、水みちの影響をEXP-2 a, EXP-3 aについてみると、全横断面に占める水みち部の面積は約2.5%であるが、水みち部からの流量は、全体からの流量の約40%を占めており、水みちの流出における重要性が示されている。さらに、斜面勾配の小さいEXP-3は、EXP-2に比べ流出が始まってからの流量の立ち上がりが

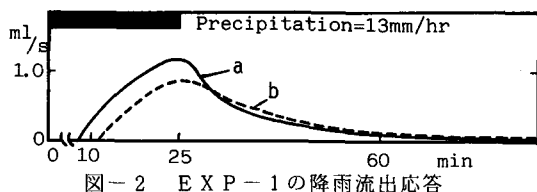


図-2 EXP-1の降雨流出応答

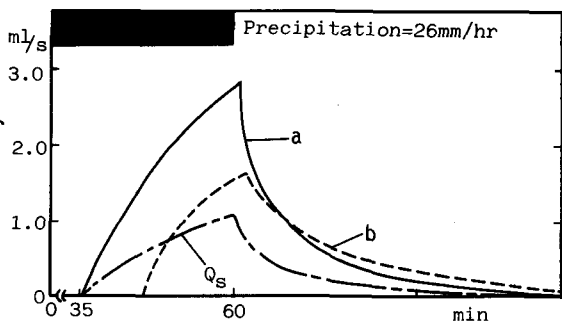


図-3 EXP-2の降雨流出応答

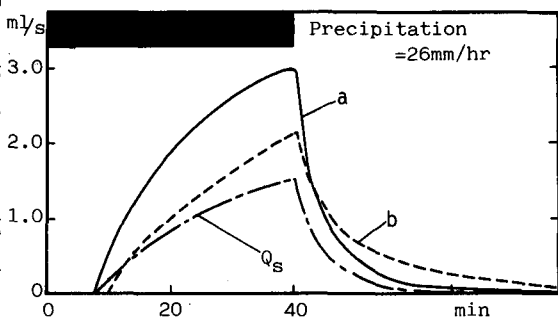


図-4 EXP-3の降雨流出応答

悪く、減速が速い傾向がみられる。流量測定とは別に、EXP-2を行なった約2週間後(この間、降雨は

ない)、土槽内の試料を採取し飽和度を求めた。採取した箇所は、各土槽とも、図-5 (土槽を鉛直上方から見たもので、図の下方は斜面下方に相当) に示す9箇所である。各箇所とも、深さ約3 cm、10 cm、20 cmの3点から採取した。水みち相当箇所では、20 cmの点ではなく、水みち直上部より採取した。得られた結果より、図-6 に飽和度分布を示す。図中、i・kは、i, k 断面上各点の同一深さごとの平均に基づくi, k断面共通の飽和度分布を意味する。この図からみられるように、水みち位置、断面により、飽和度分布に顕著な違いはみられない。

以上、モデル実験によってみられたように、水みち位置によって降雨流出応答に相違が生じ、下にある方が、立ち上がりが良く、通減も速いことが示された。つぎに、3次元浸透流解析によってこのような性質が表現しうるか調べた。

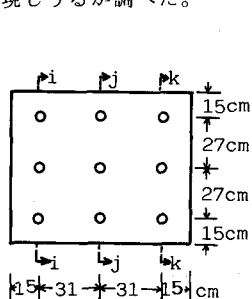


図-5 試料採取箇所

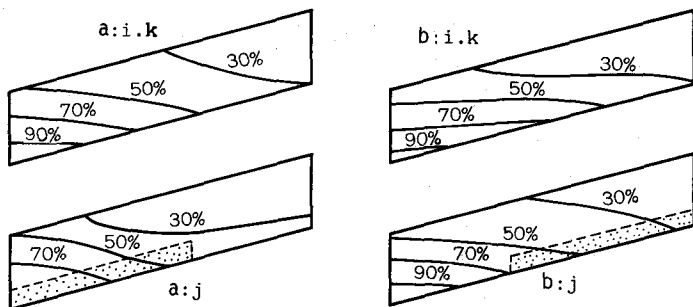


図-6 断面内の飽和度分布

2. 3次元解析による実験に対するシミュレーション

2-1 解析手法と諸条件

水みちを有する斜面内の流れは3次元性が高く、飽和・不飽和両状態にわたっている。従って基礎式として、(1)式で示すRichards, Klute らの考えに基づく3次元飽和・不飽和浸透流の式⁷⁾を用いた。ここに、 $C(\theta)$ は比

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

水分容量、 θ は飽和度、 ϕ はポテンシャル、 $k_s(\theta)$ は不飽和透水係数、 q は系外からの水の

出入り項である。この式を有

限要素法を用い、数値計算する

ことにより解析を行った。図-

1に示す様に、土槽斜面は水み

ち中心軸を通る鉛直断面に関し

て対称であり、その片側を解析

対象領域とした。図-7に要素

分割状態、座標系などを示し、

図-8に要素のスケールを2次

元的に示す。図-7で、要素番

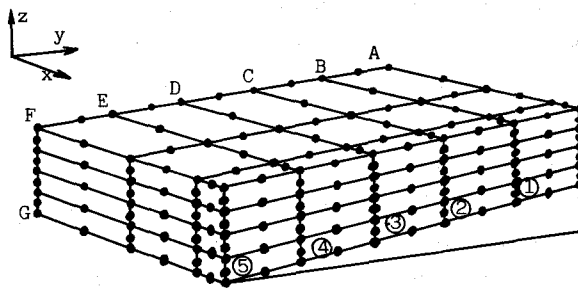


図-7 計算対象領域の形状と要素分割

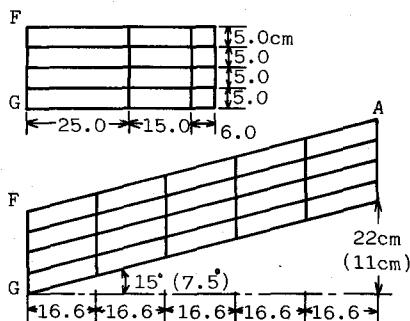


図-8 要素スケール

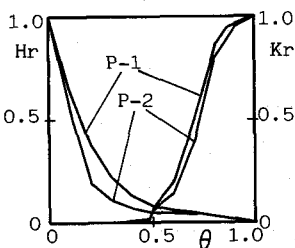


図-9 θ , Hr, Kr 関係

号①②③を水みちとすることでbの場合を、③④⑤を水みちとすることでaの場合を表現する。図-9に計算

上仮定した飽和度 θ 、 $\theta = 0$ に於ける仮想毛管力水頭 h_{co} に対する毛管力水頭 $h_c(\theta)$ の比 H_r 、飽和透水係数 k_0 に対する不飽和透水係数の比 K_r の相互関係を示す。この関係として、図中示す P-1 の関係を地山部に、P-2 の関係を水みち部に用いた。また、 k_0 、 h_{co} として、地山部に $4.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ と -200 cm を、水みち部には 0.8 cm/s と -100 cm を用いた。今回の解析では、飽和度 - 毛管力関係のヒステリシスを考慮していない。これらの関係は、従来の報告や今回の実験値を参考にしたものであり、大きな誤りはないものとする。境界条件としては、斜面の下端面は自由浸出面の条件とし、上面より降雨が一様に入り、側面、上端面および底面は流入出のないものとした。初期条件は、領域内全節点に、浸出面上の最も低い高さの節点の位置水頭を初期ポテンシャルとして与えた。ただし、実験結果を考慮し、初期飽和度が 47% 以上になる様設定した。本来初期条件としては、このような単一の降雨に対する応答を調べる場合、実験の初期条件と同じポテンシャル、飽和度分布を用いるべきである。しかし測定が難しく今回このように設定した。いずれも降雨継続時間は 25 分間に設定した。表-2 に計算条件をまとめて示す。

表-2 計算条件

計算ケース	降雨強度	勾配	水みち位置
RUN-1	26 mm/h	15°	a
RUN-2	"	"	b
RUN-3	"	7.5°	a
RUN-4	13 mm/h	15°	a

2-2 解析結果と考察

図-10は RUN-1 と-2 の比較、すなわち水みちの位置の違いによる降雨流出応答特性の差異をみたものである。RUN-1 の斜面下方に水みちが存在する場合の方が RUN-2 に比べて立ち上がり、通減ともに速いことが認められる。これは実験と同じ傾向である。ただ、実験の方がこの傾向がやや顕著に認められた。次に図-11は下に水みちを持つ a のケースを比較したものである。RUN-1 と-4 の比較により、与えた降雨強度による流出応答の違いがわかる。RUN-1 は-4 の 2 倍の降雨強度であるが、ピーク時の流出量も、約 2 倍となっている。さらに降雨強度が強いため急速に飽和度、不飽和透水係数が大きくなり、全体として流出量の増加率も 2 倍である。次に RUN-1 と-3 により、斜面勾配の違いによる流出応答の違いが比較しうる。初期条件として同じポテンシャルを与えた場合、RUN-3 の方が斜面勾配が小さく、その結果、各節点の標高が低くなり、初期の飽和度と透水係数が大きくなる。この違いによって RUN-3 の場合、初期の流量の増加が大きくなっている。また、通減をみても RUN-3 の方が速い。このことは実験結果と同じ傾向といえ、全体的に数値解析が実験をよく再現しているといえる。

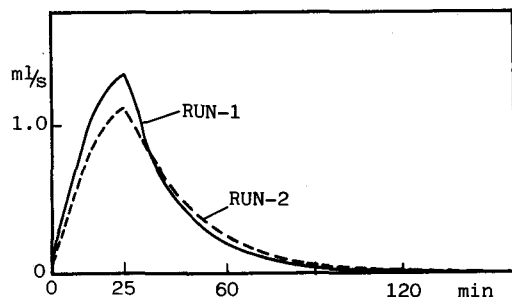


図-10 水みち位置の流出応答への影響

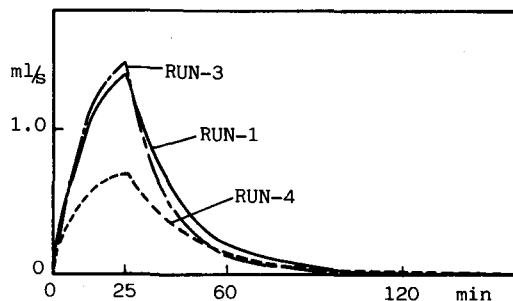


図-11 降雨強度、斜面勾配による流出応答差

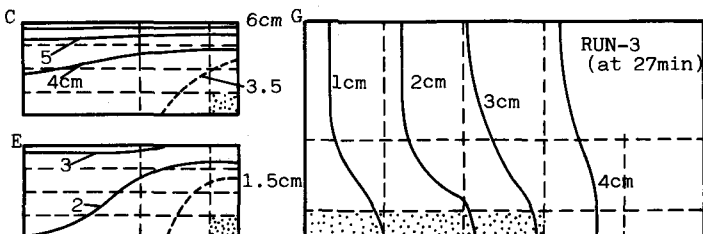


図-12 斜面内ポテンシャル分布

図-12は斜面内のポテンシャル

分布を示す。各図はそれぞれ図-7中の、C点を含むy軸に直交するC断面、同様にE断面および最下層要素の底面に於けるものである。等ポテンシャル線より、水みち部に向かって水が集まっている事がわかり、断面に占める水みち部の面積は小さくても、実験でみられた様に水みち部を流れる量が多い事がわかる。

水みち位置の降雨流出に与える影響をみると、全体的な傾向としては、解析と実験はよく合致している。しかし流出量は解析と実験とでは多少異っている。これは、前述したように、解析と実験との初期飽和度が異っていた事などが考えられる。

3. 実際のスケールの斜面に於ける水みちの影響評価

以上、土槽実験とその解析を示したが、これらのスケールは実際の斜面に比べて小さい。そのためにより実際に近いスケールでの水みちの降雨流出応答、とくに流出の立ち上がりへの影響を、前述したものと同様な手法で数値解析により評価した。対象とする斜面の形状、スケール、要素分割、座標系などを図-14に示す。ここで、表土層が不透水性岩盤上にある場合を想定している。この斜面形状は、従来から地形学の分野で提唱されている斜面発達の数学的モデルで表現されるものである⁸⁾。図中、最小要素に番号を付けてあり、その①②③の要素を水みちとすることで、上に水みちがある場合bを、③④⑤を水みちとすることで、下に水みちがある場合aを表わす。図-15に飽和度 θ 、毛管力比Hr、透水係数比Krの関係を示す。 θ -Hr関係としては、C-1

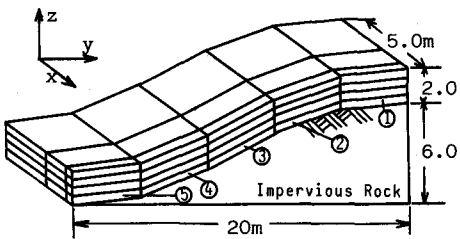
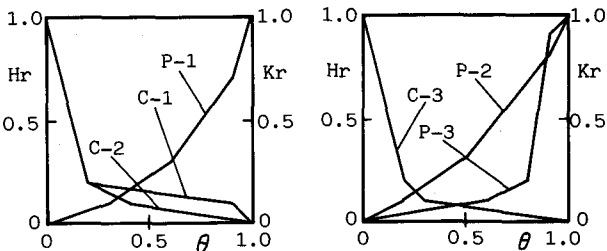


図-14 斜面形状および要素分割

～3の3通り、 θ -Kr関係としてP-1～3の3通り設定した。なお、 h_{co} 、 k_o として、地山部で、 -80 m 、 $5 \times 10^{-3}\text{ cm/s}$ 水みち部では、 -40 m 、 $5 \times 10^{-1}\text{ cm/s}$ を与えた。実験と比べて、飽和透水係数 k_o は水みち部で地山部の、100倍と大きいのが1つの特徴である。この程度の差は十分考えられよう。



(i) 地山部

(ii) 水みち部

図-15 飽和度、毛管力比、透水係数比の関係

境界条件としては、上面に10mm/hの一定降雨が入り、下端面には60cmの一定水位があり、その上部は自由浸出面の条件とし、その他の部分は流入出のない条件とした。初期条件としては、全節点に60cmのポテンシャルを与え、流れのない条件とした。

表-3 計算条件

計算ケース	水みち の位置	$\theta \sim \text{Hr}$		$\theta \sim \text{Kr}$	
		地 山	水みち	地 山	水みち
RUN-1	a	C-1	C-3	P-1	P-2
RUN-2	a	"	"	"	P-3
RUN-3	b	"	"	"	"
RUN-4	a	C-2	"	"	"
RUN-5	b	"	"	"	"
RUN-6	-	"	-	"	-

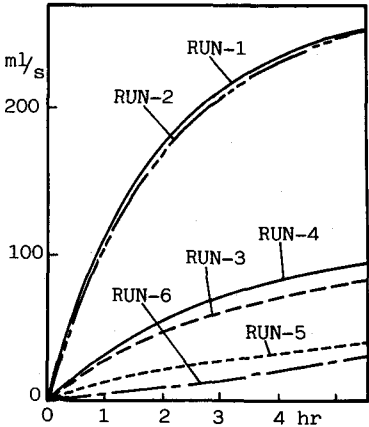


図-16 流出応答特性

表-3に計算条件を示す。計算はRUN-1～-6の6ケース行った。このうちRUN-6は比較のため行った水みちを持たない場合である。

図-16に、10mm/hの降雨が6時間続いた際の、RUN-1～-6での流出応答特性を示す。水みちを想定したRUN-1～-5は、水みちのないRUN-6に比べて流量の立ち上がりが速い事がわかる。RUN-1と-2は水みち部の θ -Kr関係が異なる場合であるが、ほとんど違いはみられない。RUN-2と-4の比較、およびRUN-3と-5の比較により地山部の θ -Hr関係の違いによる影響が調べられる。図から、この関係がかなり流出の立ち上がりに影響を与えている事がわかる。これは、1つには初期飽和度の影響である。今回、すべての計算初期条件で、同じポテンシャル分布を与えたが、 θ -Hr(飽和度-毛管力)関係が異なれば、同一ポテンシャルでも飽和度が異なることとなり、不飽和透水係数も異なる。したがって、より飽和度が大きくなるような θ -Hr関係の方が流出が速くなるわけである。このような影響は、1つの方法として、解析を今回のような単一降雨にではなく、何回かの降雨に対して行うことによって今後改良しようと思われる。単一の降雨に対する解析では、設定した初期条件の影響が強く現われすぎることが考えられる。RUN-2と-3の比較およびRUN-4と-5の比較によって、水みち位置のみの差による流出の違いがわかるが、下に水みちがある方が明らかに流出しやすいことがわかる。これは、実験および実験スケールの解析と同じ傾向である。このように、水みち位置によってかなり流出特性に相違がでるといえる。

4. 結論と今後の問題点

以上、実験と数値解析により、水みちを含む斜面の降雨流出応答の特徴を調べた。実験と数値解析により共通して言える事は、第1に、斜面内で水みちの存在する位置によって降雨流出応答がかなり影響される事である。つまり、斜面下端に水みちが存在した方が、斜面上端に存在するより流量の立ち上がり及び逓減が速く、全体として応答が良いことが言える。第2に、初期飽和度が流出応答に大きく影響する。すなわち、飽和度が大きい程速く流出し、流出量の増加が大きくなることである。また、降雨流出には、 θ -Hr関係がかなり影響していることもある程度明らかとなったと考える。しかしながら今回の計算では、単一の降雨に対する応答をみたため、設定した初期条件、つまり飽和度-毛管力関係によって決定された初期飽和度分布によって、かなり大きな差が生じた。今後、断続した何回かの降雨に対してどう応答するかを調べる必要があると考える。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、実験を手伝ってくれた埼玉大学学生、飯田茂君、石山宏二君、大矢直和君にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Beven, K. and Germann, P. : Macropores and water flow in soils, Water Resour. Res., 18, pp. 1311-1352, 1982.
- 2) 田中正・安原正也・丸井敦尚：多摩丘陵源流域における流出機構，地理評，vol. 57, pp.1-19, 1983.
- 3) 新藤静夫：谷頭部斜面に発達する崩壊と地中水の挙動，文部省科学研究費報告，pp. 1-93, 1983.
- 4) 渡辺邦夫・今井久：斜面モデル内の水みち形成に関する基礎的研究，第28回水講，pp. 572-533, 1984.
- 5) 渡辺邦夫・今井久：水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質，応用地質，25-1, pp. 1-9, 1984.
- 6) 今井久・渡辺邦夫：3次元浸透解析によるモデル斜面内水みちの降雨流出特性に与える影響評価，第39年講
- 7) Bear, J : Hydraulics of Groundwater Flow, Mc Graw-Hill, pp. 190-224, 1979.
- 8) 平野昌繁：斜面発達の数学的モデルに関する若干の補足，地理評，vol. 39, pp. 606-617, 1966.