

強雨時における土中浸透量の評価に関する研究

Estimations of Infiltration Rates under Heavy Rainfalls

長崎大学工学部 正 員 野口正人
長崎大学大学院 学生員 ○ 米倉広幸
長 崎 市 正 員 森尾宣紀

1. はじめに

長崎市では昭和57年 7月豪雨の被害を蒙り、河川改修も十分には終わっていないが、昭和60年梅雨・秋霖期には、再び大きな時間雨量の強雨に襲われた。とくに、 9月22日の雨では、昭和57年の災害で浸水した地域の幾つかが再度浸水し、急傾斜市街地での河川管理の重要性が改めて示された。ところで、河川管理を行うにあたって、流域の変貌に応じた流出量の予測は欠かすことができず、雨水流の流出機構を明らかにする必要がある。

前報では、水文資料が乏しい地域に適用しうる流出解析法として、変形雨水流法を提案した¹⁾。この方法では、実用化を考慮して、中間流が lumped system として取り扱われたため、流出量の予測精度は、浸透量の評価の妥当性に依存した。これらのことから、本論では、水文観測結果をもととして、強雨時における土中浸透量の評価を行った。あわせて、流出解析を行う上での問題点について、若干の検討を試みた。

2. 水文観測の概要と降雨状況

昭和57年の豪雨災害を経験してから、われわれの研究室では、浦上川の支川である三川川の上流に試験流域を設定し、水文観測を続けている

(図-1)。これは、主として、今後の豪雨被害の防災に役立てるため、長崎地方における流出量を

実証的に把握し、同時に雨水流出機構の解明を目ざしたものである。浦上川流域の概要ならびに水文観測の内容については、前報に記されたので説明を省略する。ただ、今年度(昭和60年度)は土壌水分の観測箇所を、図-2の st.6 , st.7 の2箇所に限定し、そ

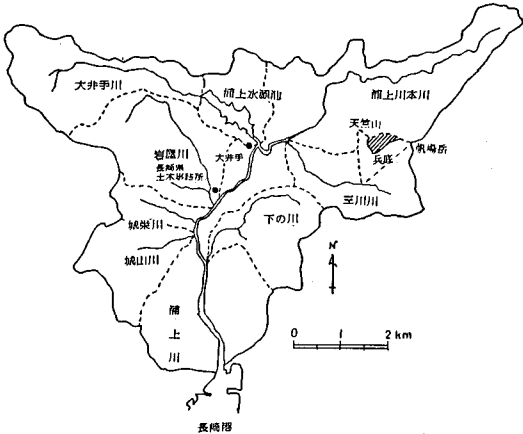


図-1 浦上川流域の概念図

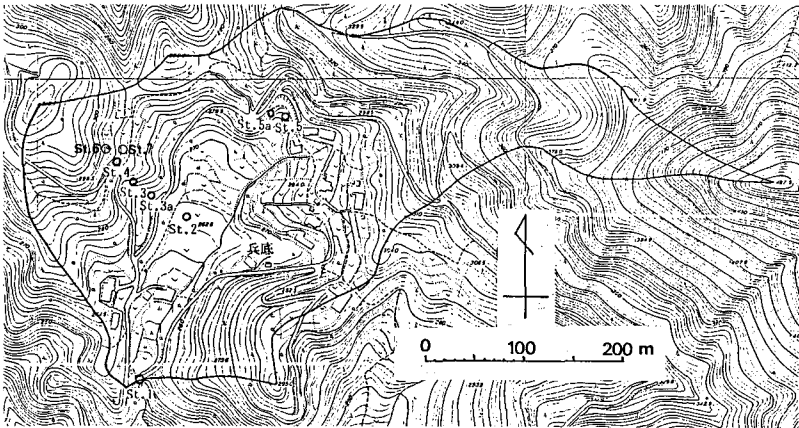


図-2 水文観測対象流域(兵底)

表 - 1 5～10月の月雨量，月最大日雨量，月最大時間雨量

月	昭和 5 9 年			昭和 6 0 年		
	月雨量	月最大日雨量	月最大時間雨量	月雨量	月最大日雨量	月最大時間雨量
5	91.5	29.5 [May 13]	18.5 [13,16:30]	229.5	57.0 [May 13]	18.5 [19,16:00]
6	309.5	65.0 [Jun.16]	21.0 [24, 2:30]	456.5 477.0	236.5[Jun.28] 201.5["]	45.5 [28, 2:10] 49.5 [" , 1:50]
7	160.0	96.0[Jul. 1]	40.5 [1, 6:50]	239.0	198.0[Jul. 9] (131.5["])	70.5 [9,12:10] (29.0 [" , 9:10])
8	245.0	141.0[Aug.21]	27.5 [21, 7:50]	183.5	124.5[Aug.31]	51.5 [31, 7:00]
9	130.0	57.0[Sep.30] (39.5["])	35.5 [30, 5:20] (24.5 [" , 6:10])	373.0	186.0[Sep.22] *214.5["]	86.0 [22,18:30] *76.5 [" , "]
10	16.0 25.5	9.0[Oct. 3] 18.5["]	8.5 [3, 7:20] 4.5 [" , 4:00]	174.5 183.5	63.5[Oct.11] 95.5["]	34.5 [11,13:10] 58.0 [" ,13:10]

単位：mm〔上段：長崎海洋気象台 下段：兵 底（ただし・長崎土木事務所）〕

れぞれ、4深度（10, 20, 30, 40cm），2深度（10, 20cm）で土壤中の吸引圧を測定した。なお、雨量は昨年度（昭和59年度）と同様，st.1において転倒ます型雨量計により測定された。

長崎地方では、昭和60年は昭和59年と異なり、多量の降雨に見舞われた。表-1には、両年の5～10月における月雨量，月最大日雨量，月最大時間雨量が示されている。表から明らかなように、この期間の降雨量は、それぞれ 951.5mm, 1710.0mm であり、昭和60年の値は昭和59年の2倍に近い。このほか 9月22日の降雨では時間雨量が86.0mmであったことや、6月28日の日雨量が 236.5mmであったことなどが、昭和60年の降雨の特徴である。ところで、表からわかるように、降雨の種類によっては局地性が強く、長崎海洋気象台で測定された値と現地（兵底）の値では、かなりの隔たりがある。その代表的なものとして、7月9日の雨が上げられるが、これは、太平洋高気圧の周辺部にあたり、大気が不安定となり、雷を伴って降ったものである。上述されたことから、水文観測資料の整理にあたっては、降雨資料の欠測部分は長崎土木事務所（大橋）の値で補うことにした。

3. 雨水の土中浸透量

雨水の土中浸透量を知ることが、精度良く流出解析を行うために欠かすことが出来ない。従来、浸透能を表現する式として Horton の式や Philip の式等が提案されており、土中浸透量の評価は、降雨強度を浸透能と対比させることにより行われていた。しかし、個々の土壌に対する初期浸透能や最終浸透能の具体的な値はともかくとして、雨が止んだときの浸透能の回復曲線を累加雨量との関連で求めることは難しいのが現状である。これらのことから本節では、昭和60年 9月13日～11月19日に兵底で実施された水文観測結果をもととして、雨水の土中浸透量について若干の検討を行った。

降雨量と土壌中の吸引圧

昭和60年秋期には多量の降雨があったが、とりわけ、9月22日（日雨量 214.5mm, 時間雨量 76.5mm;長崎土木事務所），9月28日（日雨量 62.0mm, 時間雨量 15.2mm），10月11日（日雨量 95.5mm, 時間雨量 58.0mm）の降雨は大きかった。この期間中における降雨量と土壌中の吸引圧の時間的変化を示せば、図-3の通りであるが、これらの降雨に対して、各深度とも土壌中の吸引圧は急激に減少している。しかし、昭和59年に st. 2（図-2，参照）で観測された値と異なり¹⁾、比較的小さな降雨に対しても、深度40cmの吸引圧が変化していることが特徴的である。これは、たとえ近くの地域でも、雨水浸透量が、地質の違いや締め固め等の土質条件の

違いにより大きく変化することを示しており、流出量を精度良く求めることの困難さが窺われる。

一方、土壌中の吸引圧の空間的分布を調べるため、図-4～図-7には、上述された降雨ならびに10月26日の降雨（日雨量 10.5 mm）に対して、水理水頭の分布の時間的変化が示されている。

9月22日の時間雨量は非常に大きく、浸水被害を蒙ったことは前述された通りである。図-4から明らかなように、時間雨量が最大になる19時を境に、水理水頭の値が一様になっており、土壌中の含水量が飽和状態に近づいていることがわかる。

9月28日の雨は、さほど大きくない強度で降り続いたため、図-5に示されたように異なった深度での水理水頭の違いが比較的明瞭に表されている。この降雨の最大時間雨量は 4:30 ～ 5:30 の22.0mmに過ぎないが、その時間には水理水頭の勾配はほぼ 1 となり、透水係수에等しい土中浸透量が見られる。また、雨が止むとともに土壌中の水分は順調に減少しており、浸透能も回復するが、図-3から明らかなように、降雨前の状態に戻るには 4～5日を要していることがわかる。

図-6には、時間雨量58.0mmの10月11日の雨に対する水理水頭の分布が表されており、9月28日の降雨時に類似した時間的変化の様子が見られる。すなわち、この雨では、日雨量のほぼ 2/3が 13:10～14:10 の1時間に降っており、土中浸透量は浸透能に等しい状態である。ただ、10月11日以後、断続的に雨が降り続いたため、土中の含水状態が降雨前のものに戻るには、10日間ほどの日数を要している。

ところで、水文観測期間には、前述された強雨以外にも多くの降雨があった。とくに、日降雨量が 10～20mmであった日数のみを取り上げても10日間ほどあるが、その一つとして、10月26日の雨に対する水理水頭の時間的変化を示せば、図-7のようである。降雨量ならびに降雨強度が小さいために、水理水頭の時間的変化は非常に緩慢であるが、十分な時間経過後には、30、40cmの深度の吸引圧にも変化が見られる。

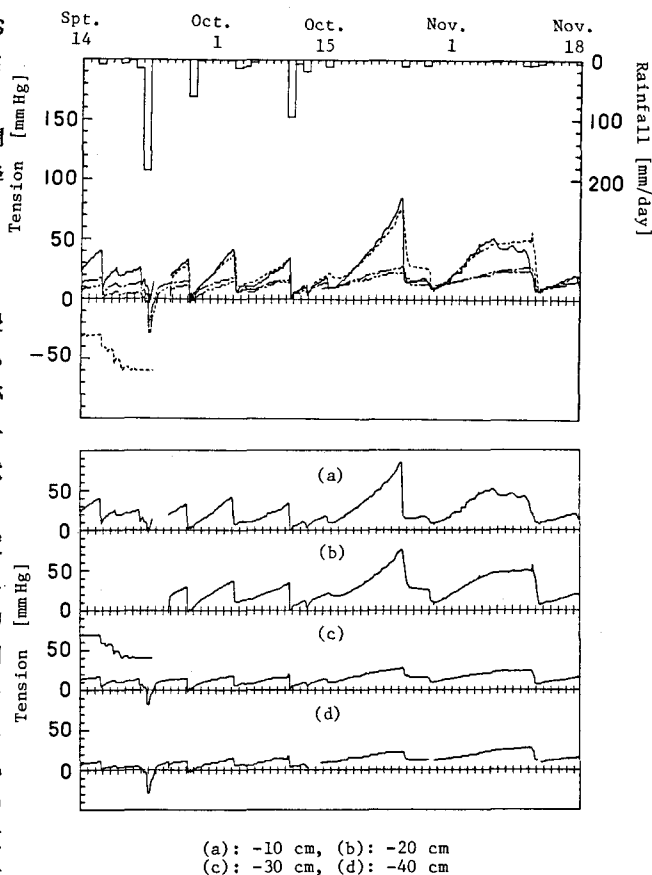


図-3 降雨量ならびに吸引圧の時間的変化

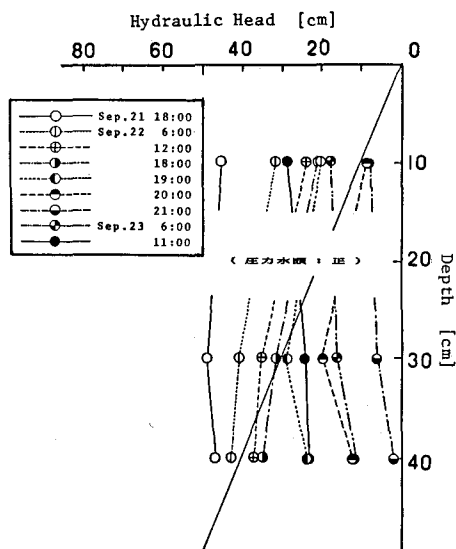


図-4 水理水頭の時間的変化（9月21～23日）

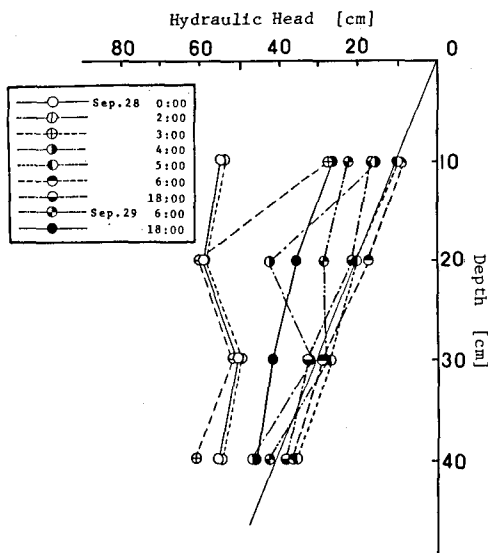


図-5 水理水頭の時間的変化（9月28～29日）

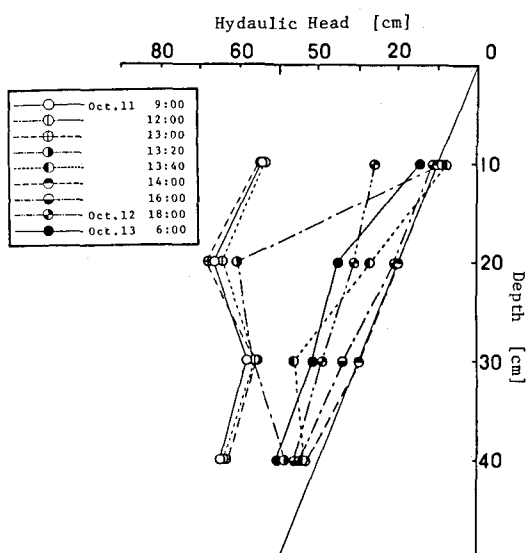


図-6 水理水頭の時間的変化（10月11～13日）

地表面における土中浸透量

吸引圧を用いて土壌内での含水量を計算するためには、吸引圧と含水量の関係を定める必要がある。テンシオメーターによる観測では、それぞれのプローブに対して吸引圧と含水量の関係を求めなければならないが、以下では便宜的に、前報で示された関係を用いて前述の吸引圧より含水量を計算する。

ところで、土壌中の体積含水率は次式で表される²⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} + K_{ij} \frac{\partial Z^*}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$D_{ij} = K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (2)$$

ここに、 θ ：体積含水率， ψ ：圧力ポテンシャル， D_{ij} ：拡散係数， K_{ij} ：透水係数， Z^* ：基準面からの高さ，である。

地表面近傍の体積要素に対して (1) 式を適用し、側方流の影響を無視して、深度10cm, 20cmの観測値より地表面での土中浸透量を求めれば、図-8のようになる。

図より明らかなように、降雨時には大きな流入量の値が示されている。しかし、上述されたことから、これには、地表面の浸透量とともに横方向の流入量をも含んでおり、浸透量を評価するためには、土中における雨水流の3次元解析が必要になる。また、 $\psi - \theta$ 関係の妥当性等により、ここで浸透量の増減を絶対値まで含めて云々することは問題があるが、降雨と対比させた場合、定性的には十分説明されうるものである。

他方、流域に降った雨水の流出量は表面流の大きさ、及び、地表面より浸透した短期流出成分の合計として流出解析により求められる。ところで、われわれが観測を行っている兵底の基準点（流域面積：57.0ha）では、流れの状態ならびに水位計の据付け方法により、或る強度以上の降雨でしか水位が測定できない。図-9

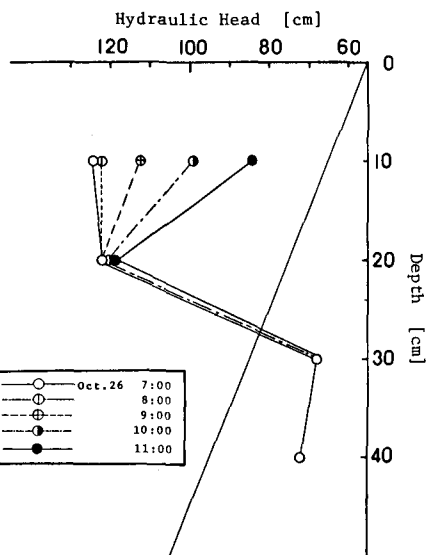


図-7 水理水頭の時間的変化（10月26日）

には、その値（換算流量：0.28m³/s）を用いて単純に流出量を大きいものと小さいものとに分け、7日間ないし3日間の先行雨量と最大時間雨量との関係で表示されている。この種のデータの整理法は、土砂崩壊の発生・未発生を降雨量との関係で明らかにする場合によく用いられる方法であり³⁾、それぞれの現象解明のため、雨水の土中浸透量を評価せねばならぬ点は共通している。図-9によれば、ここで取り上げているような小流域の流出量算定にあたっては、ごく短期間の先行雨量を考慮すれば十分であるように思える。このことは、前小節で述べられたこととも符合する。

なお、図中に示された破線は概念的なものであり、理論的には、次節で述べられる方法により地表面での浸透量を計算し、降雨量との関係で求められるべきものである

4. 土中浸透量の評価法と流出解析

既に述べられたように、観測結果を用いてさえ、土表面での土中浸透量を正確に求めることは困難である。したがって、浸透量を流出量と関連づけるためには、土中の雨水を3次元的に追跡しなければならない。

(1) 式を与えられた境界条件のもとで解くため、有限要素法により基礎方程式を離散化する。すなわち、Galerkin法を適用して4節点四面体要素に対する方程式を導けば、形状関数を N_α として次式を得る。

$$A_{mn} \frac{\partial \theta_n}{\partial t} + B_{mn} \theta_n = -Q_m - C_m \quad (3)$$

ここに、

$$A_{mn} = \iiint_V N_m N_n dv$$

$$B_{mn} = \iiint_V \frac{\partial N_m}{\partial x_i} D_{ij} \frac{\partial N_n}{\partial x_j} dv$$

$$C_m = \iiint_V \frac{\partial N_m}{\partial x_i} K_{i3} dv$$

$$Q_m = \iint_S N_m \left\{ D_{ij} \frac{\partial (N_n \theta_n)}{\partial x_j} + K_{i3} \right\} \cos(x_i, n) ds$$

ただし、添字 i, j は軸方向 ($i, j = 1, 2, 3$) を表しており、 m, n は要素内節点番号 ($m, n = 1, 2, 3, 4$) である。計算方法の詳細については、次の機会に譲ることとし、図-10に、深さ方向に体積要素を並べた場合の結果のみを示す。地表面の境界条件は、3.の項で述べられた水分フラックスを与えたが、 $\phi - \theta$ 関係が十分には定められていないこと等により、

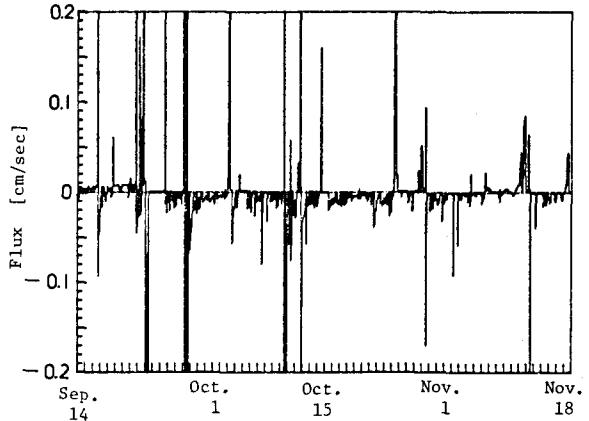


図-8 地表面における流入フラックス

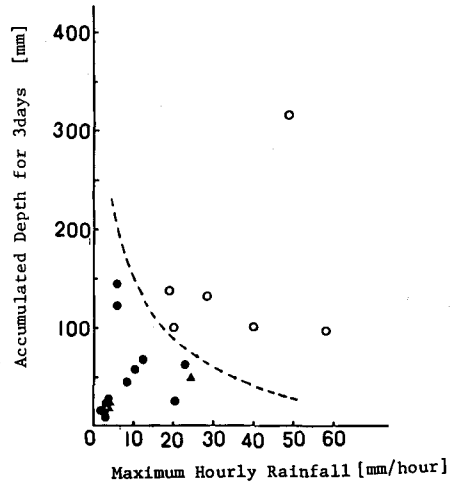
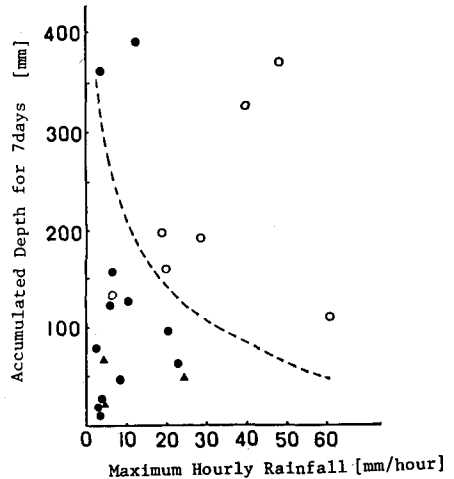


図-9 先行雨量 ((a) 7日間, (b) 3日間)
最大時間雨量と流出の有無

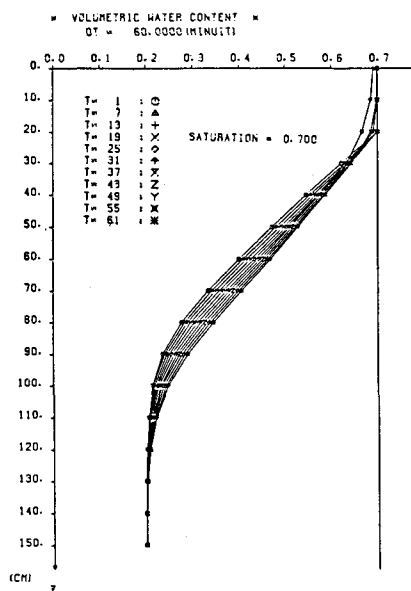


図-10 体積含水率の時間的変化

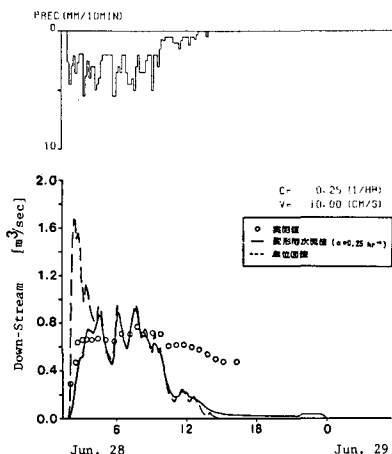


図-11 流出量の時間的変化

今、直ちに実測された含水量の分布と比較することはできない。しかし、この数値モデルを使って、土中水の動きを3次的に追跡することは可能である。

また、図-11には、6月28日の降雨に対する流出解析結果が示されている。前報で示されたように、水文資料が乏しい地域で流出解析を行わねばならぬ機会が多い。そのようなとき、土中浸透量が流域特性量との関係で求められるならば、精度良く流出量を計算することができる。

5. まとめ

実際の降雨に対して土中浸透量を明らかにすることは、流出解析を精度良く行う上からも重要である。本論では、長崎市における昭和60年の強雨を対象にして、土中浸透量について若干の検討を行った。また、土中浸透量の定量的把握のための数値モデルについても簡単に触れた。もっとも、この方法により実測値を十分に説明するためには、流出モデルの設定等に残された課題は多いが、これらについても、今後、検討していきたい。

最後に、本論で取り上げられた水文観測については、本学学生の飯盛俊治・武藤英海両君も共同研究者であることを記し、その労に感謝致します。また、観測の実施・データ整理等にご援助戴いた中村武弘助手・平山康志技官や、大学院生の桑元伸二君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野口正人・米倉広幸・菅浩一；水文資料が乏しい地域における流出解析法、第29回水理講演会論文集，土木学会，1985
- 2) Eagleson, P.S.; Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, 1970
- 3) 伊勢田哲也・落合英俊・棚橋由彦；土砂崩壊の実態と降雨特性との関係、昭和57年 7月長崎豪雨による災害の調査報告書，長崎大学，1982