

研究ノート

流域管理システム (WMS) のための流出解析モデル

Development of a rainfall-runoff model for watershed-management system (WMS)

富田 陽子^{*1}

Yoko TOMITA

鈴木 伴征^{*3}

Tomoyuki SUZUKI

森 俊 勇^{*2}

Toshio MORI

水山 高久^{*4}

Takahisa MIZUYAMA

武藏 由育^{*3}

Yoshiiku MUSASHI

Abstract

The management of runoff and sediment discharge in a mountain watershed requires a watershed-management system (WMS) that predicts runoff and sediment discharge in any stream section under given rainfall conditions. As part of this system, a rainfall-runoff model was developed. As an example, the Sumiyoshi River on Mount Rokko was selected. So-called zero-order torrents were treated as channels to evaluate erosion and debris flow. In the system, multilayer intermediate flow is introduced to explain the observed flow discharge to avoid eliminating the initial rainfall loss.

Key words : watershed-management system(WMS), multilayer intermediate flow, rainfall-runoff model, Sumiyoshi River, Mount Rokko

1. はじめに

流域として望ましい土砂管理の視点から「土砂の量および質に関する流砂系一貫したモニタリング結果に基づき、土砂を流す砂防を推進する」ことが河川審議会(1998)から報告されたことにより、「流砂系の総合的な土砂管理」が国土交通省の取り組みのひとつとなり、全国の山地溪流において流砂観測が実施されデータが蓄積されてきている。流砂観測データはその山地流域の水・土砂動態を示すものであり、砂防計画策定上必要な土砂生産・流出を把握するものであることから、筆者らは、砂防事業者が流砂観測データに基づいて砂防計画を立案し、また、市民等と協働する流域管理計画を立案するために、その手段として「流域管理システム(watershed-management system : WMS)」(以降、流域管理システム(WMS)と称する)を提案するものである(富田ら, 2014)。流域管理システム(WMS)は、図-1に示すように、

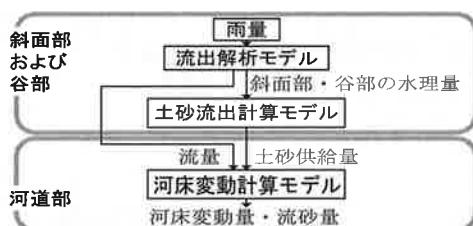


図-1 流域管理システム (WMS) の構成

Fig.1 Structure of the watershed-management system

雨量のみを条件として与え、山地流域における水・土砂の移動を斜面部→谷部→河道部と丁寧に追跡するもので、流出解析モデル、土砂流出計算モデル、砂防施設の効果量を組み込んだ河床変動計算モデルを統合したものである。このように降雨流出過程と土砂流出計算モデル、河床変動計算モデルを統合して構築したモデルとしては、例えば、高橋ら(2000)があるが、本研究では筆者らが過去に六甲山系住吉川を事例地として検討した「砂防施設計画策定支援システム(CASFPS)」(以降、CASFPSと称する)(水山ら, 1998)を改良する方法で進める。CASFPSは、流路に沿った河床変動計算に重きを置くもので、山地溪流の土砂生産・土砂流出量については支川の上流端に任意に与え、流水の運動方程式、流砂量の計算、流砂の連続式を連立して解き、水通し幅などの砂防施設の諸元を組み込むことによって砂防施設の効果を評価するものである。流域管理システム(WMS)の前段のシステムとして作成したものである。今回の改良では、六甲山系住吉川の流砂観測データを基にCASFPSに降雨流出過程および土砂生産・流出過程の解析モデルを加える。流砂観測データ等を用いてパラメータを設定して各モデルを作成するので個々の流域の状況を反映させることができ、山地流域における土砂生産・流出量を推定できるなどCASFPSにはなかった特性を付加するものである。

本稿では、流域管理システム(WMS)(図-1)を構成するモデルのひとつである流出解析モデルについて検

*1 正会員 国土交通省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所 (現新潟県土木部都市局) Member, Jinzu River Sabo Office, Hokuriku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Now in Urban Planning Bureau, Department of Public Works, Niigata Prefecture (tomita.yoko@pref.niigata.lg.jp) *2 正会員 (一財)砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation *3 正会員 八千代エンジニアリング(株) Member, Yachiyo Engineering Co., Ltd. *4 正会員 京都大学大学院農学研究科 Member, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

討作成したので報告する。

2. 流域管理システム (WMS) の構築にあたって必要な条件

流出解析モデルの検討について述べる前に、流域管理システム (WMS) を構成する各モデル (図-1) の作成にあたって考慮したことを次に述べる。

1) 崩壊土砂として生産土砂を与えるのではなく、山地流域における土砂移動を合理的に追跡するため、土石流の発生・非発生を評価できるように、斜面部と谷部を表現できるゼロ次谷も流路とした流域区分を行う。

2) 山地流域では一般に、流出解析において一次損失雨量を設定して山地の保水能力分を雨量から差し引いている。これは山地の水の移動の物理的な現象に基づいていないという課題がある。流域管理システム (WMS) の流出解析の次の段階 (富田ら, 2014), すなわち、土砂の生産・流出を土石流の発生・非発生を含めて考え、土砂移動を追跡していくことの接続を考えると、損失雨量を差し引いて有効雨量とする流出解析だけを目的としたモデルではなく、すべての雨量を計算対象とすることが望ましいことから、本研究では、特性曲線法に基づく降雨・流出解析モデルにおいて、中間流層を上層と下層に多層化したモデルを導入して下層の透水係数を小さく設定することで山地の保水能力のモデル化を行う。これにより初期損失雨量を設定する必要がなくなる。

3) 土砂供給単位となる流域において、生産土砂は一出水中に全量が流出することは少なく、出水中～出水後に斜面部・谷部・河道部に堆積残存し、その後の出水で二次的に流出する。土砂流出計算モデルでは、流出土砂量は斜面部・谷部の水理量に基づいて侵食あるいは土石流の発生による場合を計算するものとする。

4) 河床変動は、土砂流出計算モデルにより算出された谷部から河道部への流出土砂量を条件に計算するものとし、砂防堰堤による水位・土砂通過の影響、除石による土砂の除去をモデルに組み込んで砂防堰堤や除石による流出土砂量の低減効果を検討できるものとする。

流出解析モデルについては、上記 1) と 2) を考慮して検討作成する。

3. 流出解析モデルの検討

先の CASFPS モデルでも検討事例地とした六甲山系住吉川流域 (流域面積 11.16 km^2) を本研究の検討対象とする。住吉川では、斜面侵食の現地観測が 2002 年度以降、流砂観測が 2003 年度以降実施されている。本稿では、検討に用いるデータとして、2004 年 10 月 20 日前後のデータ (総雨量 206 mm) と 2006 年 5 月 11 日前後のデータ (総雨量 110.5 mm) を用いる。

3.1 既往モデル (Kinematic Wave モデル) による観測データの再現

まず、CASFPS で用いた流出解析モデル (Kinematic

Wave モデル) による観測データの再現を試みる。観測データは西滝ヶ谷第二床固地点 (流域面積 1.48 km^2)、白鶴堰堤地点 (流域面積 11.0 km^2) で観測された水位データを流量に換算したものをを用いる。雨量は荒神山雨量観測所 (六甲砂防事務所) の 5 分間隔雨量を用いる (図-2)。計算結果 (Case-0) と観測データを図-3 に示す。ここでの流域区分は、主な流路について、ゼロ次谷は無視してひとつの斜面としてモデル化する従来どおりの方法によるもので、斜面から直接河道に流出するものである。表-1 に設定した計算条件において再現性が最も良



図-2 観測位置図

Fig.2 Location of the observation sites on the Sumiyoshi

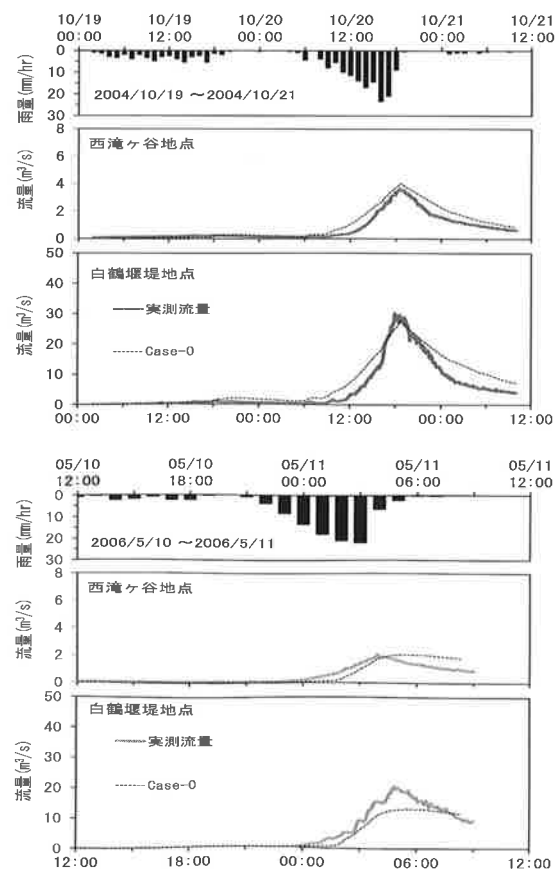


図-3 2004 年および 2006 年出水時の計算結果

Fig.3 Calculated results for the 2004 and 2006 floods

好となった。中間流は上層のみであり、透水係数 0.002 m/s、層厚 0.375 m、初期損失雨量 50 mm、一次流出率 0.1 となった。

3.2 既往流出モデルの改良

土砂の生産・流出を土石流の発生・非発生を含めて考えて水・土砂の移動を追跡していくこととの接続を考えると、損失雨量を差し引いて有効雨量とする流出解析だけを目的としたモデルではなく、すべての雨量を計算対象としたほうが望ましいことから、本稿では中間流層を上層と下層の 2 層とすることで山地の保水能力をモデル化することを検討する（図-4）。また、土石流発生等の土砂移動を追跡するために、斜面部→谷部→河道部というようにゼロ次谷までを考慮して図-5 のような細かい

流域区分を行う。その結果、区分された流域の数は 136 から 2,178 に増加した。

この流域区分において、表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル（高棹ら，1981）で流出を計算する。斜面部の基礎式は式(1)および式(2)となり、谷部は式(1)の右辺 r を斜面部から流出する流量に置き換えて適用することで同様に表現される。斜面部、谷部ともに縦断方向に 10 m 間隔で分割して Lax-Wendroff 法を用いて差分分解を求めるものとした。

基礎式

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_{ws}}{\partial x} = r \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$q_{ws} = \begin{cases} \frac{k_{ps2} \cdot I_s}{\gamma} h_s & (h_s < d_{ps}) \\ \frac{k_{ps1} \cdot I_s}{\gamma} (h_s - d_{ps2}) + \frac{k_{ps2} \cdot I_s}{\gamma} d_{ps2} & (d_{ps2} < h_s \leq d_{ps1} + d_{ps2}) \dots\dots(2) \\ \frac{I_s^{1/2}}{n_s} (h_s - d_{ps1} - d_{ps2})^{5/3} + \frac{k_{ps1} \cdot I_s}{\gamma} d_{ps1} + \frac{k_{ps2} \cdot I_s}{\gamma} d_{ps2} & (d_{ps1} + d_{ps2} < h_s) \end{cases}$$

ここに、 h_s ：斜面水深、 q_{ws} ：斜面単位幅流量、 r ：雨量、 I_s ：斜面勾配、 n_s ：斜面におけるマンニングの粗度係数、 k_{ps1} ：斜面中間流上層の透水係数、 k_{ps2} ：斜面中間流下層の透水係数、 γ ：土層の有効空隙率である。また、 d_{ps1} 、 d_{ps2} は、それぞれ斜面中間流上層、斜面中間流下層の空隙分の厚さであり、層厚が上層、下層についてそれぞれ D_{ps1} 、 D_{ps2} であるとする、 $d_{ps1} = \gamma \cdot D_{ps1}$ 、 $d_{ps2} = \gamma \cdot D_{ps2}$ である。

3.3 既往モデルとの比較

3.2 で示した新たな流出解析モデルを用いて、既往モデルで再現性が良好だった表-1 に示す計算条件で計算した（Case-1）。結果を図-6 に示す。いずれも既往モデル（Case-0）よりも出水のタイミングが早くなり流量が大きく算出される結果となった。原因として、従来はひとつの斜面としていたものを斜面部と谷部に分割したことにより谷部への斜面長が短くなり流出が早まったことが考えられる。

3.4 透水係数、中間流層厚が与える影響の検討

3.3 で明らかとなったように、新しい解析モデルでは流出のタイミングが早まり流量が大きくなったのでパラメータの調整が必要である。また、雨量を入力条件として計算を進めるため、中間流層を 2 層化することで初期損失雨量を表現することを試みるため、斜面部、谷部それぞれの透水係数、中間流層厚の設定が与える影響を検討した。具体的には、斜面部中間流上層の透水係数と層厚、谷部中間流上層の透水係数と層厚、斜面部中間流下層の透水係数と層厚、谷部中間流下層の透水係数と層厚

表-1 2004 年、2006 年の再現計算条件

Table 1 Conditions used to reproduce the 2004 and 2006 floods

項目	記号	単位	値
雨量単位時間	T	秒	300
計算流路長単位	Δx	m	10
計算時間間隔	Δt	秒	5
中間流層厚	D_{ps1}	m	0.375
透水係数	k_{ci}	m/s	0.002
流域等価粗度係数	n_s		0.4
初期損失雨量	r_{loss}	mm	50
一次流出率	f		0.1

※中間流層厚は空隙率（0.4）を加味している

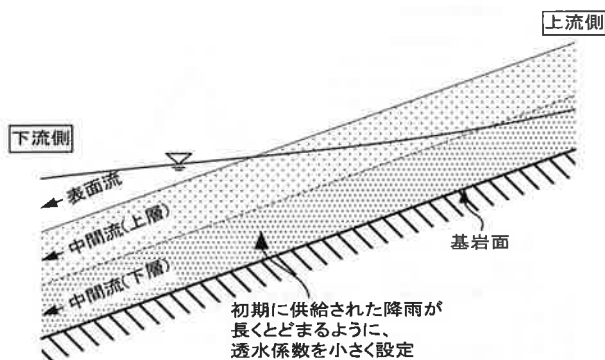


図-4 中間流層の 2 層化の概念図

Fig.4 Schematic diagram of the two-layer intermediate flow

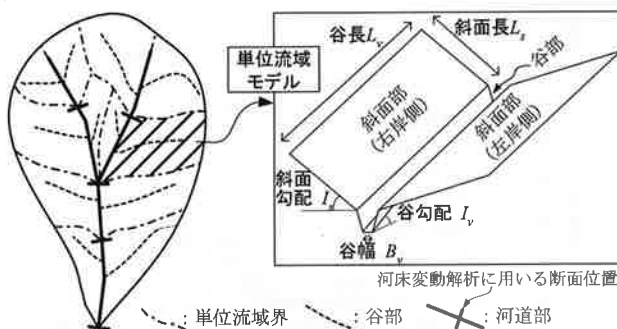


図-5 本研究で用いた流域の地形区分

Fig.5 Modeling of a watershed slopes and channel

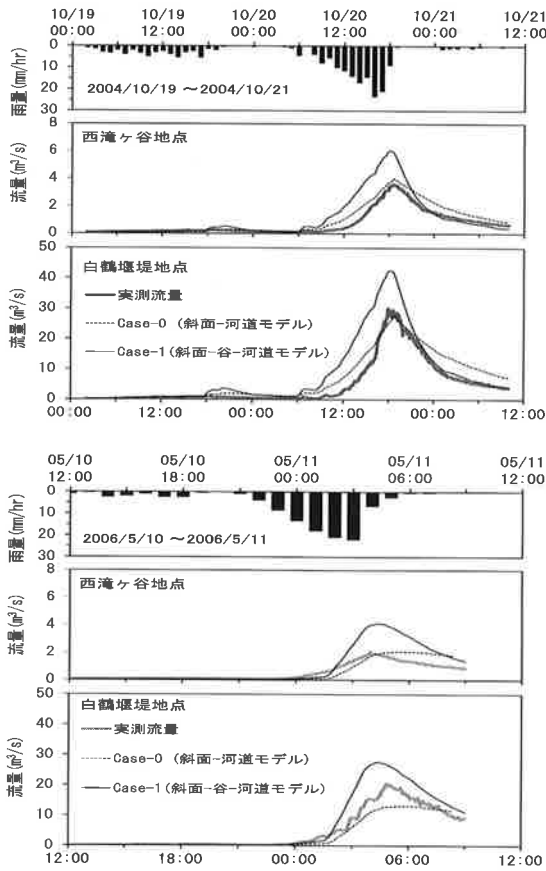


図-6 表-1の条件を用いた既往モデル・新モデルでの計算結果の比較

Fig.6 Comparison of the results calculated using an old model and our new model

を表-1に示す値を基準に種々試行錯誤的に変化させて流出計算を行い観測値との比較を行った。

1) 斜面部中間流上層の透水係数の変化

計算条件を表-2に、計算結果を図-7に示す。透水係数を小さくすることで出水ピークまでの流量を観測値にほぼ近づけることができ、0.0008 m/s程度で観測値に最も近づいた。

2) 斜面部中間流上層の層厚の変化

計算条件を表-3に、計算結果を図-8に示す。2004年10月については、層厚を0.375 mより小さくするとピーク流量が大きく算出されるが、層厚を0.375 mより大きくしても流量はほとんど変化しない。2006年5月については、層厚を小さくしても大きくしても流量はほとんど変化しない。

流量にほとんど変化がないのは、その条件では表面流が発生していないことが考えられる。

3) 谷部中間流上層の透水係数の変化

計算条件を表-4に、計算結果を図-9に示す。表-1では谷部に中間流層を導入していないため、透水係数は0.001~0.1 m/sの範囲で変化させた。透水係数を0.1まで大きくすると、いずれも谷部の中間流層を導入していない場合にほぼ近い結果となった。透水係数を小さくしていくと、2006年5月については出水のタイミング

表-2 斜面部中間流上層の透水係数を変化させた計算条件
Table 2 Calculation conditions; the permeability of the upper layer for the intermediate flow is varied

項目	記号	単位	値	備考
斜面部	透水係数	k_{s1}	m/s	0.002 Case-1
				0.0016 Case-2
				0.0012 Case-3
				0.0008 Case-4
				0.0004 Case-5
谷部	中間流層厚	D_{ps1}	m	0.375
	透水係数	k_{s2}	m/s	0.0
	中間流層厚	D_{ps2}	m	0.0
表層	等価粗度	n_s		0.4
初期損失雨量	r_{loss}	mm	50	
一次流出率	f		0.1	

※中間流層厚は空隙率(0.4)を加味している

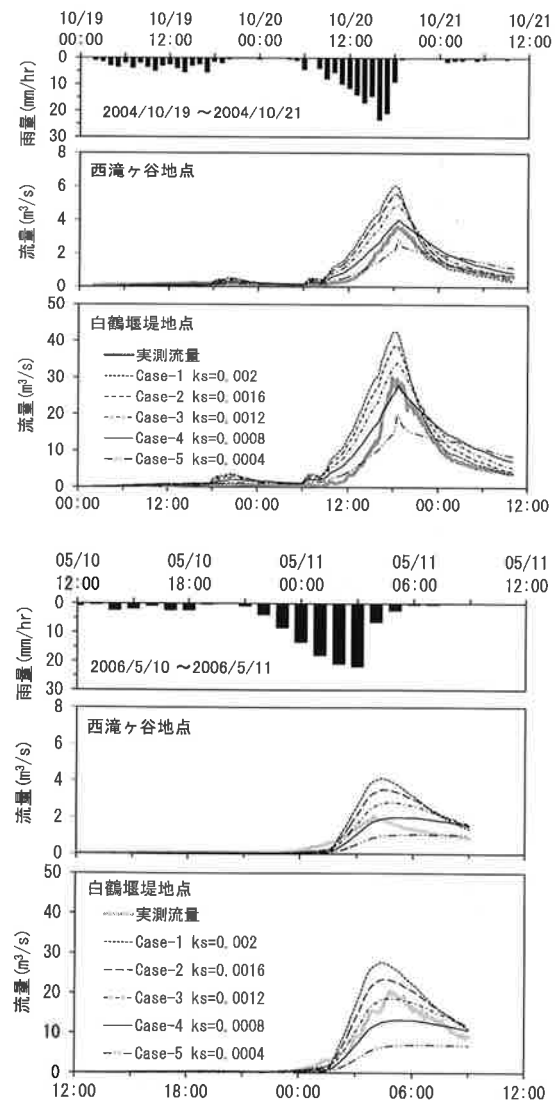


図-7 表-2の計算条件に対する計算結果
Fig.7 Calculated results using the condition shown in Table 2

表-3 斜面部中間流上層の層厚を変化させた計算条件

Table 3 Calculation conditions; the thickness of the upper layer of the intermediate flow is varied

項目		記号	単位	値	備考	
斜面部	上層	透水係数	k_{s1}	m/s	0.0008	Case-4 Case-6 Case-7 Case-8 Case-9
		中間流層厚	D_{ps1}	m	0.375	
					0.350	
					0.325	
					1.250	
	下層	透水係数	k_{s2}	m/s	0.0	0 値を与えて下層 が無い条件とする
		中間流層厚	D_{ps2}	m	0.0	
		表層	等価粗度	n_s		
	谷部	上層	透水係数	k_{v1}	m/s	0.0
中間流層厚			D_{pv1}	m	0.0	
下層		透水係数	k_{v2}	m/s	0.0	
		中間流層厚	D_{pv2}	m	0.0	
表層		等価粗度	n_v		0.4	
初期損失雨量		r_{loss}	mm	50		
一次流出率		f		0.1		

※中間流層厚は空隙率（0.4）を加味している

表-4 谷部中間流上層の透水係数を変化させた計算条件

Table 4 Calculation conditions; the permeability coefficient is varied

項目		記号	単位	値	備考	
斜面部	上層	透水係数	k_{s1}	m/s	0.0008	
		中間流層厚	D_{ps1}	m	0.375	
	下層	透水係数	k_{s2}	m/s	0.0	
		中間流層厚	D_{ps2}	m	0.0	
	表層	等価粗度	n_s		0.4	
谷部	上層	透水係数	k_{v1}	m/s	0.001	Case-10
					0.002	Case-11
					0.005	Case-12
					0.01	Case-13
					0.1	Case-14
		中間流層厚	D_{pv1}	m	0.375	
	下層	透水係数	k_{v2}	m/s	0.0	0 値を与えて下層 が無い条件とする
		中間流層厚	D_{pv2}	m	0.0	
表層	等価粗度	n_v		0.4		
初期損失雨量		r_{loss}	mm	50		
一次流出率		f		0.1		

※中間流層厚は空隙率（0.4）を加味している

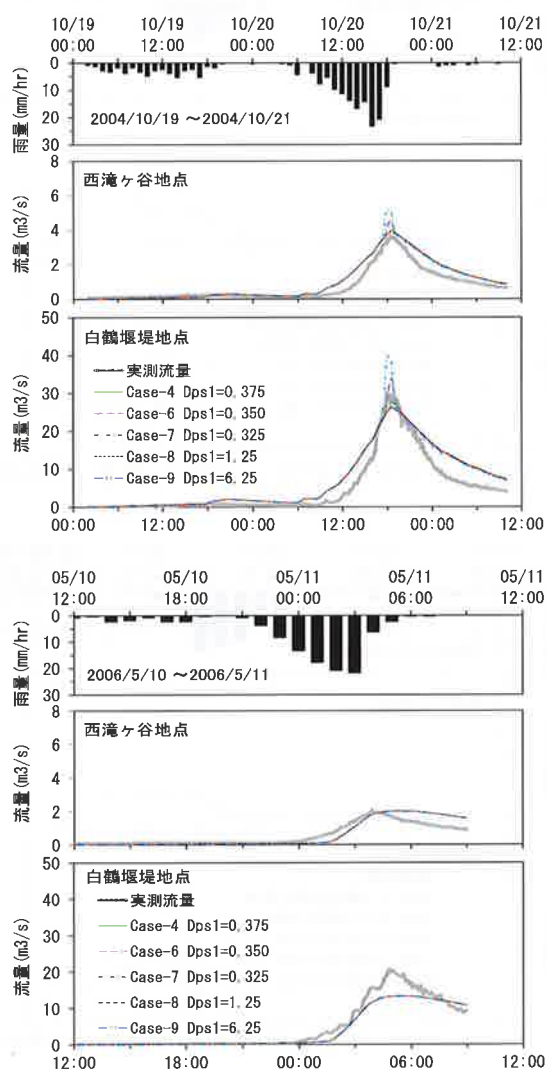


図-8 表-3 の計算条件に対する計算結果

Fig.8 Calculated results using the conditions shown in Table 3

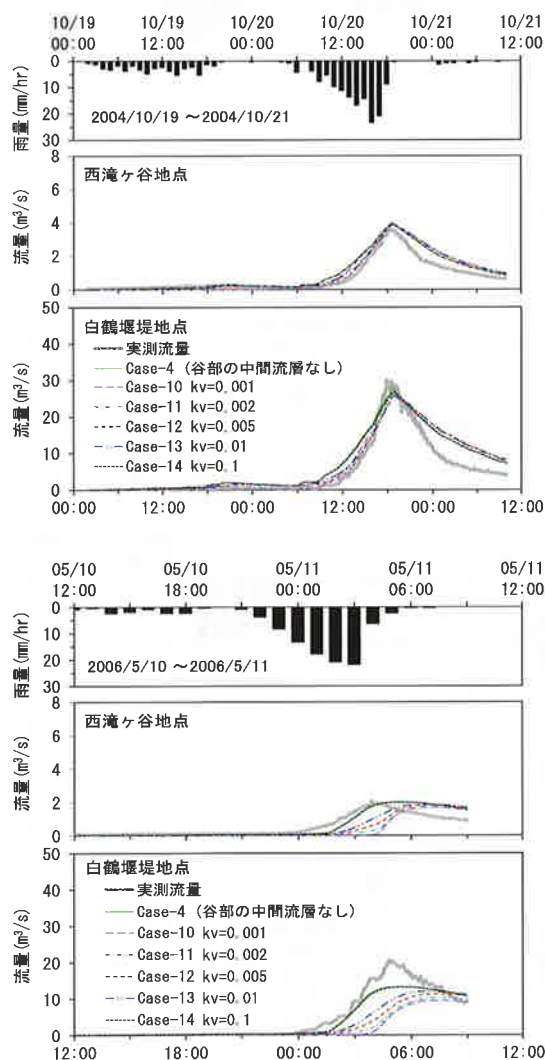


図-9 表-4 の計算条件に基づく計算結果

Fig.9 Calculated results using the condition shown in Table 4

表一五 斜面部中間流下層の透水係数と層厚を変化させた計算条件

Table 5 Calculation conditions ; the coefficient of permeability and thickness of the lower layer are varied

	項目	記号	単位	値	備考
斜面部	上層	透水係数	k_{s1}	m/s	0.0008
	中間流層厚	D_{ps1}	m	0.375	
	下層	透水係数	k_{s2}	0.0	Case-15
				0.0004	Case-16
				0.0002	Case-17
				0.00008	Case-18
	中間流層厚	D_{ps2}	m	0.0	Case-15
				0.375	Case-16~18
谷部	表層	等価粗度	n_s		0.4
	上層	透水係数	k_{v1}	m/s	0.0
		中間流層厚	D_{pv1}	m	0.0
	下層	透水係数	k_{v2}	m/s	0.0
		中間流層厚	D_{pv2}	m	0.0
	表層	等価粗度	n_v		0.4

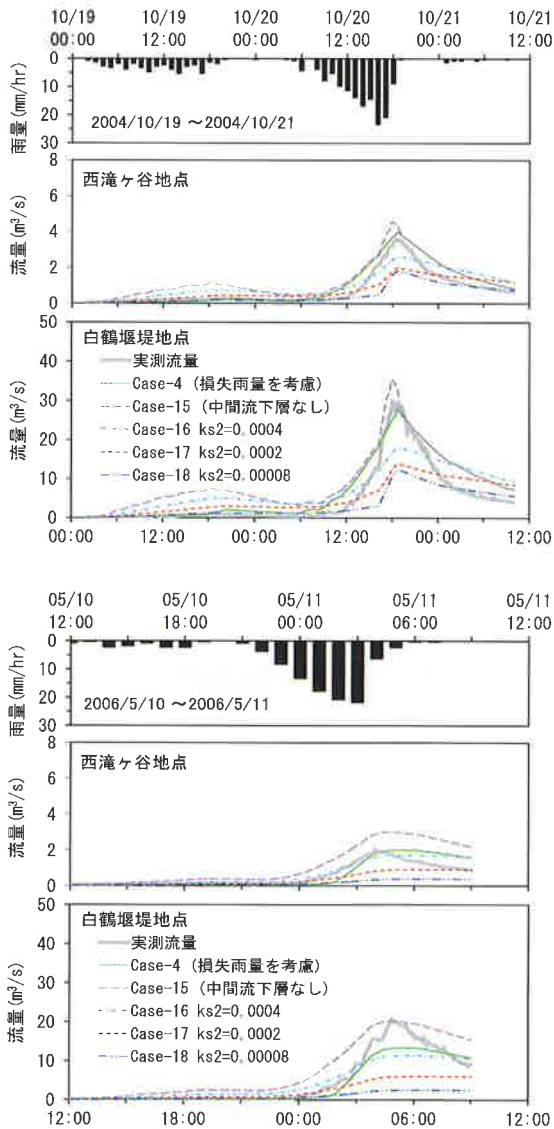
※中間流層厚は空隙率 (0.4) を加味している

表一六 斜面部中間流下層の層厚の条件を変化させた計算条件

Table 6 Calculation conditions ; the thickness of the lower layer of the intermediate flow is varied

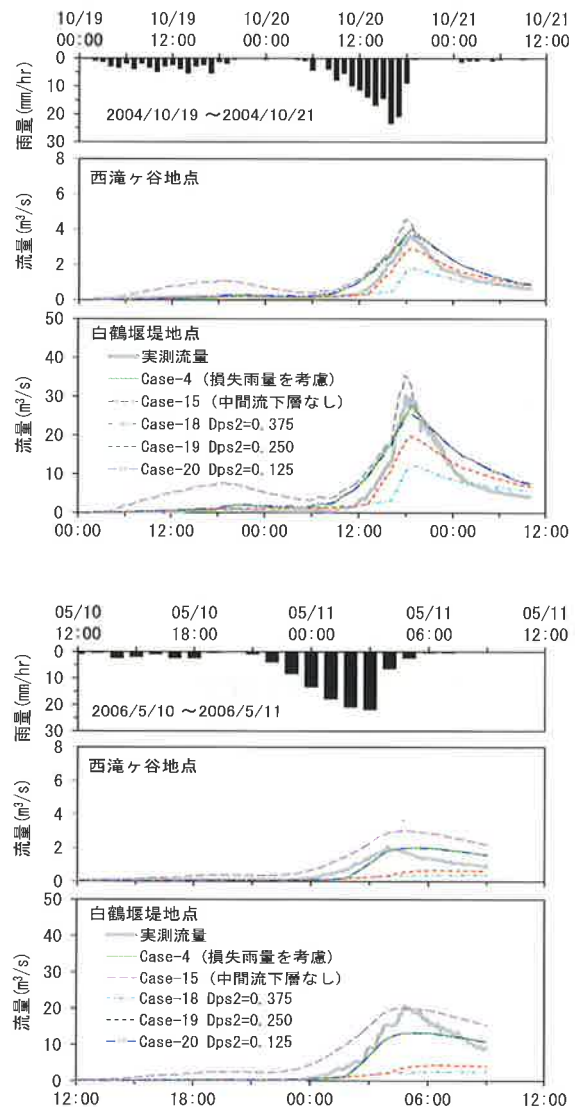
	項目	記号	単位	値	備考
斜面部	上層	透水係数	k_{s1}	m/s	0.0008
	中間流層厚	D_{ps1}	m	0.375	
	下層	透水係数	k_{s2}	0.0	Case-15
				0.00008	Case-18~20
				0.0	Case-15
				0.375	Case-18
	中間流層厚	D_{ps2}	m	0.250	Case-19
				0.125	Case-20
谷部	表層	等価粗度	n_s		0.4
	上層	透水係数	k_{v1}	m/s	0.0
		中間流層厚	D_{pv1}	m	0.0
	下層	透水係数	k_{v2}	m/s	0.0
		中間流層厚	D_{pv2}	m	0.0
	表層	等価粗度	n_v		0.4

※中間流層厚は空隙率 (0.4) を加味している



図一〇 表一五の計算条件に対する計算結果

Fig.10 Calculated results using the condition shown in Table 5



図一〇 表一六の計算条件に対する計算結果

Fig.11 Calculated results using the condition shown in Table 6

が遅れるが、この場合以外は中間流層を導入していない場合と同様であることから、今回の検証データでは住吉川において谷部に中間流層を導入する必要はないと判断した。よって以降、谷部の中間流上層の層厚、谷部中間流下層の透水係数と層厚については解析対象としない。ただし、流域の条件によっては谷部の中間流層を考慮する必要が生じることも考えられるので、新たなモデルの基礎式はそのままとする。

4) 斜面部中間流下層の透水係数の変化

中間流下層の設定は、初期損失雨量を物理的モデルで表現するためなので、中間流下層を導入することで初期損失雨量を表現できるかどうか、また、その数値はどの程度であるかを試行錯誤的に解析した。計算条件を表-5に、計算結果を図-10に示す。中間流下層を導入した場合の層厚はここではとりあえず上層と同じ0.375 mとした。

中間流下層を導入せず初期損失雨量と一次流出率を導入しない場合には降雨初期(2004年は10/20 6:00まで、2006年は5/11 0:00まで)は大きく算出されるが、中間流下層を導入して透水係数を小さくしていくと観測値にほぼ近づく。斜面部中間流上層の透水係数より1オーダー小さい値0.00008 m/sで最も近づく。一方で、透水係数を小さくしていくとピーク流量は観測値より小さくなる。これは、降雨が中間流下層に貯留される量が過大となっていることが考えられ、中間流下層の層厚を小さくしていく検討を以下に行う。

5) 斜面部中間流下層の層厚の変化

上記4)で層厚を0.375 mとした条件では降雨が中間流下層に過大に貯留される現象となったことが考えられたことから、層厚の条件を表-6のように設定して計算した。計算結果を図-11に示す。層厚を0.375 mよりも小さくしていくと洪水の立ち上がり以降の流量は大きく変化するようになり、層厚0.125 mになると観測値に近づく。

3.5 結果

前節の4)および5)に示す結果は、初期損失雨量と一次流出率を用いた場合(Case-4)とほぼ同様となり、

中間流層を2層とすることで初期損失雨量を内包することが可能であることが分かった。

4. まとめ

本稿では、流域管理システム(WMS)を構成する3つの計算モデル(図-1)のうち最初のモデルである流出解析手法を検討した。この結果、限られた検証事例ではあるが、土砂生産・流出を土石流の発生・非発生を含めて評価できるようにゼロ次谷も考慮した細かい流域区分を行うこと、また、降雨のみを入力条件として種々の降雨に対する流出応答が評価できるよう中間流層を多層とすることで初期損失雨量を反映させることができる流出解析モデルを作成することができた。なお、流域管理システム(WMS)の流出解析以降の計算モデルについてはすでに報告した(富田ら, 2014)。

最後に、貴重な観測資料を提供くださいました六甲砂防事務所の皆様に感謝いたします。

なお、本報告の一部は「平成24年度砂防学会研究発表会」で発表した(富田ら, 2012)。

引用文献

- 河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会(1998):「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」
- 水山高久・富田陽子・井戸清雄・藤田正治(1998):砂防施設計画策定支援システム-六甲山住吉川を事例とする研究-, 砂防学会誌, Vol. 50, No. 6, p. 40-43
- 高棹琢馬・椎葉充晴(1981):KINEMATIC Wave法への集中効果の導入, 京都大学防災研究所年報, 第24号B-2, p. 159-170
- 高橋保・井上基行・中川一・里深好文(2000):山岳流域における土砂流出の予測, 水工学論文集, 第44回, p. 717-722
- 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武藏由育・鈴木伴征・水山高久(2012):流域管理システム(仮称)の検討・開発について-六甲山系住吉川を事例に-, 平成24年度砂防研究発表会概要集, p. 696-697
- 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武藏由育・鈴木伴征・水山高久(2014):流域管理システム(WMS)のための土砂流出計算モデルと河床変動計算モデルの作成, 砂防学会誌, Vol. 66, No. 5, p. 3-12

(Received 21 May 2013 ; Accepted 5 June 2014)