

Title	山地流域の管理に関する研究 -六甲山系住吉川を事例にして-( Dissertation_全文 )
Author(s)	富田, 陽子
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2013-11-25
URL	<a href="http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r12792">http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r12792</a>
Right	許諾条件により要旨・本文は2014-10-03に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

山地流域の管理に関する研究  
-六甲山系住吉川を事例にして-

2013年

富田 陽子

# 目 次

緒論

## 第1章 流砂観測の方法と事例

- 1.1 流砂観測の方法とその特性
- 1.2 観測方法の課題
- 1.3 流砂観測の事例
- 1.4 六甲山系における流砂観測の事例
  - 1.4.1 斜面部・谷部における流砂観測
  - 1.4.2 河道部における流砂観測

## 第2章 六甲山系で実施されてきた土砂災害対策

- 2.1 六甲山系で土砂災害対策が必要とされる背景
  - 2.1.1 地形・地質と山麓の開発
  - 2.1.2 観光開発
  - 2.1.3 六甲山系からの土砂流出
  - 2.1.4 土砂災害の特徴
  - 2.1.5 砂防施設の整備状況
  - 2.1.6 まとめと六甲山系の土砂災害対策の今後の課題
- 2.2 植生の変遷
  - 2.2.1 六甲山系の植生分布と人々の生活(里山から奥山へ)
  - 2.2.2 土砂災害防止と水源涵養
  - 2.2.3 現在の六甲山系の植生
  - 2.2.4 住吉川流域の植生の変遷
  - 2.2.5 住吉川流域の土地利用と管理
  - 2.2.6 住吉川の現在の植生
  - 2.2.7 六甲山系の植生と土砂災害の関係

## 第3章 六甲山系の森林状態の異なる斜面・小流域の流出・土砂流出特性

- 3.1 六甲山系の森林状態の異なる斜面・小流域の流出特性
  - 3.1.1 降雨に対する流出の応答
  - 3.1.2 まとめ
- 3.2 森林状態の異なる斜面・小流域における侵食土砂量と流出土砂量

- 3.2.1 斜面における侵食土砂量の特徴
- 3.2.2 小流域における流出土砂量
- 3.2.3 侵食土砂量と流出土砂量の比較
- 3.2.4 まとめ
- 3.3 森林状態の異なる斜面の流出・土砂流出特性のまとめ

#### 第4章 六甲山系住吉川流域の河道部における流出・土砂流出特性

- 4.1 西滝ヶ谷における流出・土砂流出特
  - 4.1.1 観測データに影響を与える西滝が谷上流域の状況
  - 4.1.2 出水に対する流砂の応答
  - 4.1.3 ピット流砂計測装置による累加流砂量の流砂量への変換
  - 4.1.4 掃流砂量の時系列変化
  - 4.1.5 浮遊砂量の時系列変化
  - 4.1.6 ハイドロフォンパルス数とピット流砂計による流砂量の対応
- 4.2 河道での流砂観測から得られた知見とまとめ

#### 第5章 流域管理システム(WMS)の構築

- 5.1 流域管理システム(WMS)の概要
- 5.2 流出解析モデルの作成
  - 5.2.1 既往モデル(CASFPSの流出解析モデル)による観測データの再現
  - 5.2.2 既往モデルの改良
  - 5.2.3 既往モデルとの比較
  - 5.2.4 透水係数、中間流層厚が与える影響の検討
  - 5.2.5 結果
- 5.3 土砂流出計算モデルの作成
  - 5.3.1 土砂流出計算モデルの構成
  - 5.3.2 斜面部の土砂移動
  - 5.3.3 谷部の土砂移動
- 5.4 河床変動計算モデルの作成
  - 5.4.1 計算の手順
  - 5.4.2 水面形計算
  - 5.4.3 河床変動計算
- 5.5 検証計算
  - 5.5.1 土砂流出計算モデルの検証
  - 5.5.2 河床変動計算モデルの検証

## 5.6 検証計算結果のまとめと今後の課題

## 第6章 流域管理システム(WMS)を用いた住吉川流域における砂防堰堤による流出土砂量の低減効果の評価事例

### 6.1 計画規模降雨時の砂防堰堤による流出土砂量の低減効果の検討

#### 6.1.1 各パラメータの設定

#### 6.1.2 流出土砂量の変化

#### 6.1.3 河床高の変化

### 6.2 除石による流出土砂量の低減効果の検討

#### 6.2.1 解析条件

#### 6.2.2 計算結果

#### 6.2.3 流出土砂量の変化

#### 6.2.4 河床高の変化

### 6.3 まとめ

## 第7章 山地流域の管理手法について

### 7.1 治山治水の意義の捉え方

### 7.2 砂防事業の意義の捉え方

### 7.3 砂防施設の配置と機能の捉え方

### 7.4 山地流域の管理をめぐる近年の社会の動き

### 7.5 山地流域の管理における砂防の役割

## 第8章 結論

## 謝辞

## 結 論

砂防指定地の管理の視点からの流域管理を都市計画法等の枠組みも活用して取組む「都市山麓グリーンベルト」が兵庫県および神戸市の兵庫県南部地震(1995年)からの復興計画に位置づけられ六甲山系で実施されてきている。「都市山麓グリーンベルト」は、都市計画法により「防砂の施設」として位置づけられ、流域管理の視点も含めて山地が緑地として保全されていくことが期待できるようになった(富田ら 2001)。全山がほぼはげ山だった明治初期とは異なり現在は植生に覆われている六甲山において、都市近郊の緑地としての保全と流域として望ましい土砂管理という両方の視点から砂防事業者に求められる役割は多様になってきている。特に流域の望ましい土砂管理においては、六甲山の山地溪流における水・土砂動態を定量的に把握し、それに応じたより適切な砂防施設の配置と施設管理が必要になる。

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」ことが河川審議会から報告された(1998)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水・土砂動態の観測(流砂観測)を本格的に実施する道筋ができた。

さらに、流砂系においてより適切な砂防計画、すなわち砂防施設配置計画や除石などの砂防施設管理計画を考えるうえでは、流砂観測結果に基づいて山地流域における水・土砂の移動を合理的に追跡し、砂防施設がそれにどのように影響するのかを評価できる仕組みが必要である。現時点においてこのような「仕組み」はなく、流砂観測データを用いた砂防施設の配置計画や管理計画を策定するための考え方は整理されておらず、その方法も提示されていない。このため、「土砂を流す砂防」として既存の砂防堰堤のスリット化や除石が提案され実施されている地域もあるが、スリット化や除石による事業効果を適切に評価する方法もない。

河川審議会の報告以降、山地溪流において流砂観測の手法が提案され、各地で観測が実施されてきている(水山ら 1998, 藤田ら 2003, 水山ら 2008, 小田ら 2008, 鈴木ら 2010, 谷ら 2012)。観測方法についてはまだ研究段階のものもあるが、これまでの観測結果からは、たとえば、浮遊土砂の供給源と流出経路について推定が可能であることや土砂供給源が季節的に変化することが示される(谷ら 2012)など、流砂観測データの蓄積は進んできている。

本研究は、六甲山系住吉川流域を事例地として、住吉川流域で現在までに蓄積してきた流砂観測の結果を基に住吉川流域における水・土砂の移動を合理的に追跡し、砂防施設がそれにどのように影響するのかを評価する仕組みである「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。)(富田ら 2012)について検討し、その開発を行う。流域管理システム(WMS)は、山地流域において、豪雨時・平常時、すなわちすべての降雨によるゼロ次谷をも含めた流域からの流出土砂量の変化を計算し、砂防施設の新設や既設砂防堰堤の改修(たとえばスリット化)・除石等維持作業による流出土砂量の変化を把握するもので、最適な山地流域の管理に資するものである。さらに、本研究により、山地流域の管理行為をな

すためにはどのようなデータが必要なのかが明確になり、現在計測しているデータと流域管理計画との関連、また、新たなデータ取得の必要性が明らかになる。

本研究では、過去に六甲山系住吉川を対象にして筆者らが検討した「砂防施設計画策定支援システム (Computer-Aided Sabo Facilities Planning System : CASFPS)」(以降、「CASFPS」と称する。)(水山ら 1998)を基本に、これを改良する方法で進める。CASFPS は、河床変動計算に重きを置き、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堰堤の施設諸元を組み込むことによって砂防堰堤の効果を評価するものである。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設定するものとなっている。流域管理システム(WMS)は、CASFPS に降雨流出過程および土砂生産・土砂流出過程の解析モデルを加え、流出解析モデルによる流量と土砂流出計算モデルにより算出された谷から河道への流出土砂量を条件に、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による流出土砂量の低減効果や除石による流出土砂量の低減効果を検討できる河床変動計算モデルを統合して構築する。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、たとえば高橋ら(2000)のモデルがあるが、本研究は先にも述べたように筆者らが今回の前段のシステムとして作成したCASFPSを改良する方法で進める。

まず、山地流域における流砂観測の現状を整理し、六甲山系で実施している流砂観測手法を整理する。次に事例地とする六甲山系について、土砂災害とそれに対応した砂防事業について経緯と現状を整理する。特に植生は山地流域の管理の視点から重要な指標の一つであるので、六甲山系の植生の変化について経緯を整理し、現在の植生状況を把握する。これらを基礎として、六甲山系において森林状態の異なる斜面・小流域の流出・土砂流出を観測し、その特性を把握する。また、河道部で流砂観測を行い流出・土砂流出特性を把握する。以上により山地流域における流出・土砂流出特性に関する情報がそろったところで流域管理システム(WMS)の構築を行う。流域管理システム(WMS)の構築にあたっては、まず、土石流の発生・非発生を評価できるように普段流水のないゼロ次谷も流路として考慮し、また、設定された場の条件の下で、降雨のみを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に流出解析モデルを作成する(富田ら 2012)。これを用いて六甲山系住吉川流域の土砂生産・流出の特性を再現する。あわせて、豪雨時に多くの斜面崩壊・土石流が発生する場合を想定した土砂流出をシミュレーションして現在の砂防堰堤の効果を評価する(富田ら 2012)。最後に、流域管理システム(WMS)を活用した砂防施設配置計画の考え方を提案し、山地流域の管理のあり方を論じる。

**第1章**では、山地溪流で実施している流砂観測の方法とその特性、課題について整理する。また、六甲山系で実施している流砂観測手法を整理する。

**第2章**では、本研究の対象地である六甲山系について、土砂災害の歴史とそれに対応した砂防事業の経緯と現状、また、植生の復旧について経緯と現状を整理する。

**第3章**では、六甲山系の森林状態の異なる斜面・小流域の流出・土砂流出の実態を観測データから整理し、その特性を整理する。

**第4章**では、斜面からの水・土砂の流出が集約する河道部において、流出の実態を観測データをもとに整理し、その特性を整理する。あわせて、第3章で整理した「斜面部での水・土砂の流出」と河道部への流出とのつながりを整理する。

**第5章**では、第3章、第4章を受けて、六甲山系住吉川流域を対象に、「流域管理システム(WMS)」を構築する。

**第6章**では、第5章で構築した「流域管理システム(WMS)」を用いて、六甲山系住吉川流域において砂防堰堤の整備状況を変化させたシミュレーションを行い、砂防堰堤による流出土砂量の低減効果と除石による流出土砂量の低減効果について検討し、「流域管理システム(WMS)」の適用性について検討する。

**第7章**では、山地流域の管理手法について提案する。

**第8章 結論**



## 引用・参考文献

- 藤田正治・沢田豊明・水山高久(2003):山地小流域における土砂動態のモニタリング手法、京都大学防災研究所年報、No.46B, p.213-223
- 兵庫県(1995):阪神・淡路震災復興計画
- 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」
- 神戸市(1995):神戸市復興計画
- 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
- 水山高久・富田陽子・野中理伸・藤田正治(1998):ハイドロフォンによる流砂量の観測(続報), 砂防学会誌, Vol.50, No.6, p.44-47
- 水山高久・松岡美和・野中理伸・(2008):流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測(音圧データの取得), 砂防学会誌, Vol.61, No.1, p.35-38
- 小田晃・水山高久・Jonathan B.Larronne・野中理伸・松岡美和(2008):ハイドロフォンの特性に関する水路実験, 砂防学会誌, Vol.60, No.5, p.66-71
- 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智・平澤良輔・水山高久(2010):音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌, Vol.62, No.5, p.18-26
- 谷寧人・堤大三・水山高久(2012):流砂観測に基づく土砂移動特性の評価及び土砂供給源の推定、砂防学会誌、Vol.65, No.3, p.21-28
- 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巻, p.717-722
- 富田陽子・寺田秀樹(2001):都市山麓グリーンベルトにおける土石流危険溪流の砂防計画の考え方に関する提案、砂防学会誌、Vol.54, No.3, p.63-65
- 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武蔵由育・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・武蔵由育・鈴木伴征・水山高久(2013):流域管理システムの開発-流域管理システムを用いた砂防施設の流出土砂量低減効果の評価事例-、平成25年度砂防研究発表会概要集、p.A140-A141

# 第1章 流砂観測の方法と事例

本章では、山地溪流で実施している流砂観測の方法とその特性、課題について述べる。また、六甲山系で実施している流砂観測の方法を整理する。

## 1.1 流砂観測の方法とその特性

現在山地溪流で実施している流砂観測の項目と主な方法を表1.1に示す。表1.1に示すように、土砂の観測は、掃流砂と浮遊砂に大別され、それぞれに土砂を直接的に捕捉する手法と土砂移動に伴う副次的現象を観測する間接的な手法とがある。掃流砂と浮遊砂の移動時間差を利用すれば土砂生産形態・土砂生産位置を推定することが可能になる(第4章)。

掃流砂観測の直接的な方法であるピット流砂計は、ピット底面にロードセルを設置すれば掃流砂が堆積したその重量を時系列で記録できる。またピット内に堆積した土砂は、人力で定期的に回収すれば土砂の粒度分析を行うことができる。間接的な方法であるハイドロフォンは、河床に埋設した金属管に砂礫が衝突する音を検知するもので、省電力で連続的に計測できる従来型と、間隔をおいて観測する国総研型(商用電源が必要)とがある。

浮遊砂観測の直接的な方法である自動採水器は人力による回収と分析が必要になる。パーティクルカウンターは CCD カメラと画像処理で粒径分布や濃度を自動測定する装置である。間接的な方法としては濁度計によるものがある。濁度計は、0~1000NTU の低い濃度と0~4000NTU の高い濃度を精度よく計測できるものがよいとされている。

流量も観測項目として重要であるが、山地溪流では直接計測することが難しい場合が多い。このため、流量を直接計測することが困難な場合には、水位と流速を計測している。水位計には水圧式、超音波式、電波式がある。水圧式は精度がよいが、土砂混入量が多い場合には非接触型である超音波式や電波式のほうが安全である。流速計は非接触型であり、0.5m/s以上の主に出水時を対象とする電波式と、低速向きの電磁式がある。

表1.1 流砂観測の項目・主な方法(2012(H24)年時点)

区分	観測項目	方法	観測機器	備考
土砂	主に掃流砂	直接	ピット流砂計(ロードセル付)	連続観測可、堆積土砂の分析可
		間接	従来型ハイドロフォン	連続観測可
			国総研型ハイドロフォン	観測は間欠的
	主に浮遊砂	直接	自動採水器	人為回収と分析が必要
			パーティクルカウンター	粒径 0.01~0.5mm 程度、実績少
		間接	濁度計	自動計測可、連続計測可
流量	水位	接触	水圧式水位計	mm 精度
		非接触	超音波式水位計	cm 精度
			電波式水位計	cm 精度
	流速	非接触	電波式流速計	主に出水時、0.5m/s 以上を対象
			電磁式流速計	主に低水時

## 1.2 観測方法の課題

表1.1で示した方法は現在、全国の山地溪流で設置され観測が続けられているが、観測機器の選定やその設置方法などいまだ研究段階のものもある。研究の現状を以下に整理する。

### 1) ハイドロフォンとピット流砂計

ハイドロフォンは、流砂発生のタイミング、相対的な変化量を捉えることができるが、ハイドロフォンで得られたパルス数を掃流砂量へ定量的に換算する方法はまだ確立していない。このため、現時点では、ハイドロフォンとピット流砂計の両方を設置して観測し、ハイドロフォンパルス数とピット流砂計による流砂量実測値との相関をとりキャリブレーションを実施しているが、相関が低い場合がある。土砂を確実に捉えるためのハイドロフォンとピット流砂計の設置位置の検討が必要である。ハイドロフォンの設置について統一した方法は確立していない。

ピット流砂計に捕捉される土砂の粒径は平均1～2mm程度である。この粒径はハイドロフォンでは捉えにくい。また、流砂量が多くなると、ハイドロフォンパルス数の低下・頭打ち現象が発生する(小田ら2005)。対応として、平均音圧データの同時取得が行われ(たとえば、鈴木ら 2012)そのデータ処理方法等が検討されている。

### 2) パーティクルカウンター

まだ新しい装置であり、現場実績が少なく、精度の確認ができていない。

### 3) 濁度計

濁度計は光の透過あるいは光の散乱強度から濃度を換算しており、浮遊物の鉱物の種類、粒径、形、色によって応答特性が異なる。山地溪流の多くは射流域で相対水深が小さく、また、浮遊土砂には2mm程度の粒径も含まれるなど、粒径が大きく粒度分布が広い。

六甲山におけるこれまでの観測では、出水時にデータが取得できている場合とノイズが多くデータ取得できていない場合とがあり、データ取得の安定性が低い。濁度計を常に流水中にあるようにするために河床付近に設置している場合が多く、このため、流砂量が多い場合に濁度計が埋没している可能性が考えられる。あるいは、掃流砂が濁度計に作用している可能性や草木・ゴミ等の浮遊物が作用している可能性も考えられる。

射流域で相対水深の小さい溪流では水深方向の浮遊砂濃度はほぼ一定と考えられるので、水位の上昇に伴い計測位置も上昇するような仕組みなどが必要である。また、バケツ採水等によるSS濃度と濁度計濁度の応答関係のデータを蓄積して、両者が対応していれば濁度計濁度の値をSS濃度に置き換え浮遊土砂量を算定する必要がある。

## 1.3 流砂観測の事例

流砂観測を実施している主な地域を表1.2に示す。

表1.2 流砂観測の主な実施機関、実施場所、実施期間

実施機関	実施場所と実施期間
北海道開発局	石狩川上流(2011(H23).9～)、十勝川上流(2010(H22).3～)

東北地方整備局	最上川上流((2011(H23). 10～)、赤川上流((2010(H22). 11～)、阿武隈川上流(2011(H23). 4～)、北上川上流(2011(H23). 7～)、雄物川上流(2011(H23). 11～)、栗駒山系迫川(2010(H22).3～)
関東地方整備局	利根川上流(2011(H23).4～)、富士川上流(2009(H21).3～)
北陸地方整備局	信濃川上流(2005(H17). 7～)、常願寺川上流(2007(H19). 6～)、手取川上流(2001(H13). 9～)、神通川上流(2010(H22).4～)、姫川上流(2010(H22).8～)、飯豊山系荒川(2010(H22).4～)
中部地方整備局	天竜川上流(2009(H21).9～)、安倍川上流(2010(H22).1～)、木曾川上流(2010(H22).8～)、揖斐川(2010(H22).6～)、富士山大沢川(2000(H12).11～)
近畿地方整備局	六甲山住吉川(2003(H15).7～)、瀬田川上流(2010(H22).12～)、木津川上流(2010(H22).7～)、
中国地方整備局	大山山系日野川(2011(H23).4～)、大山山系天神川(2010(H22).12～)、
四国地方整備局	重信川上流(2012(H24).4～)
九州地方整備局	大淀川上流(2010(H22).6～)、球磨川上流(2011(H23).1～)
京都大学防災研究所	神通川上流

これまでの観測事例では、観測データにより土砂流出のタイミングや浮遊土砂の供給源と供給経路の推定が可能であること、また、溪流によっては土砂供給源が季節的に変化することなどが確認できたことが報告されている(谷ら 2012)。

## 1.4 六甲山系における流砂観測の事例

六甲山系では土砂災害の防止と自然環境の保全、とりわけ植生に覆われた緑地の保全が求められている(第2章に詳述)。六甲山系における土砂管理計画は、「広義には豪雨時の直接的な土砂災害を防止する計画とともに、平時の自然環境面を考慮した土砂流出に配慮した計画の両方を含む」(水山 2004)ものである必要がある。

そこで六甲山系では、植生の維持・整備に伴う生産・流出土砂量の変化を捉えるために、森林状態の異なる斜面部と、その斜面と直結する谷部において流砂観測を実施し、さらに谷部から流下する河道部における流砂観測を行っている。

### 1.4.1 斜面部・谷部における流砂観測

六甲山系で2003(H15)～2010(H22)年度までの期間に実施した観測位置と観測項目・内容を図1.1および表1.3に示す。観測地点はS-1～S-13 および西おたふくで、森林状態の異なる斜面を選定して、①区画における表面侵食土砂量・流出土砂量観測(SR)、②各区画が含まれる小流域における流出土砂量観測(SE)、③各区画が含まれる小流域における流出量等観測(SF)を行っている。

森林状態は表1.4に示すように区分(富田ら 1997)し、この区分に基づき斜面を選定している。

①SR 観測は、図1.2、表1.5に示すように、斜面上に100m<sup>2</sup>程度の区画を設け、一ヶ月おきに下流端に集積する土砂量を計測する。また、表面流量を転倒マス雨量計に導き10～15分間隔で自動計測する。

②SE 観測は、①の区画から小流域へのスケールアップを検討することを目的に実施するもので、①の区画を含む0.0058～0.0448km<sup>2</sup>程度の小流域の末端で、図1.3、表1.6に示すような装置を用いて流出土砂量を一ヶ月おきに計測する。あわせて、三角堰等を用いて流量を計測する。

③SF観測は、小流域での降雨に対する流出応答の実態を捉えるために実施するもので、図1.4、表1.7の装置を用いて、流出量、電気伝導度、水温等を自動計測する。

SR, SE, SFの観測は、同じ流域でセットで実施している場合もあれば、単独で実施している場合もある。SR, SE, SFをセットで実施している場合には同じ番号を付している(表1.3)。

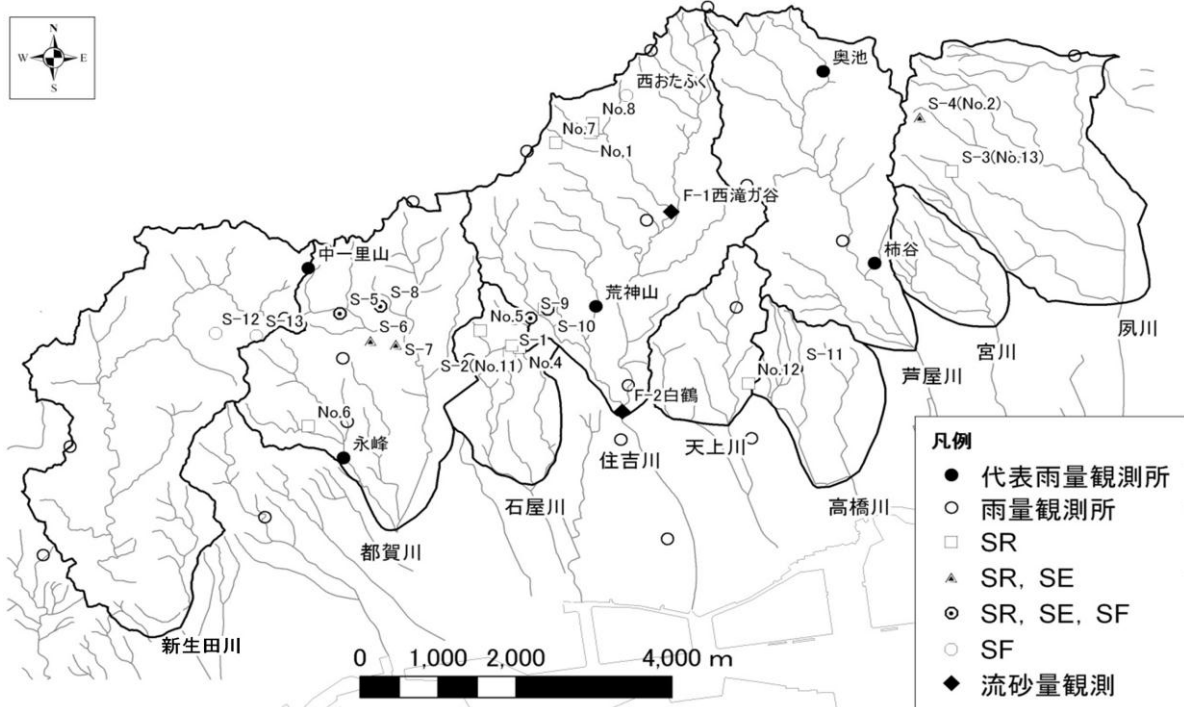


図1.1 六甲山系における斜面部・谷部・河道部の観測位置図

表1.3 観測位置の流域状況と観測内容

森林区分	観測位置と観測内容				河川名	名称	流域面積 (km <sup>2</sup> )	0次谷長さ (m)	平均斜面勾配 (°)	林相
	観測位置	SR	SE	SF						
II	S-1	SR-1	—	—	石屋川	渦森	—	—	30	ヤシヤブシ林
	S-2	SR-2	—	—	石屋川	渦森	—	—	40	森林整備施業地
III	S-3	SR-3	—	—	夙川	六麓荘	—	—	—	コナラ2次林
I	S-4	SR-4	SE-4	—	夙川	ゴロゴ岳	0.0143	230	35	裸地・崩壊地
	S-5	SR-5	SE-5	SF-5	都賀川	都賀谷堰堤	0.0058	180	39	アカマツ-モチツツジ群集
	S-6	SR-6	SE-6	—	都賀川	山田堰堤	0.0174	280	40	コナラ-アベマキ群集
	S-7	SR-7	SE-7	—	都賀川	ルーフ橋	0.0448	400	36	アカマツ-モチツツジ群集
II	S-8	SR-8	SE-8	SF-8	都賀川	六甲山トンネル入口	0.0092	140	35	スギ-ヒノキ群集
	S-9	SR-9	SE-9	SF-9	住吉川	渦森元住吉神社	0.0154	60	28	スギ-ヒノキ群集
						180		29		
III	S-10	SR-10	SE-10	SF-10	住吉川	渦森千丈谷堰堤	0.0036	120	34	コナラ-アベマキ群集
II	S-11	SR-11	SE-11	SF-11	高橋川	甲南台	0.0086	160	30	ニセアカシア林
	S-12	SR-12	—	SF-12	新生田川	最上流域1	0.0043	160	35	アカマツ林
	S-13	SR-13	—	SF-13	新生田川	最上流域2	0.0022	20	35	アカマツ林
			0.0028				35	35		
			0.0011				40	42		
—	—	—	西おたふく	住吉川		0.0203	90	35	コナラ2次林	

表1. 4 六甲山系における土砂災害防止の観点からの森林区分

区分	土砂災害防止の観点からの森林区分	該当する林分例
I	荒廃している、あるいは今後荒廃が予想される	裸地・崩壊地など
II	森林の形成はみられるが、偏向遷移がみられるなど良好な遷移状態になく、土砂災害防止の観点から森林整備が必要である	ヤシャブシ林、ニセアカシア林など
III	良好な森林状態である	コナラ・アベマキ群集など

(富田ら 1997)

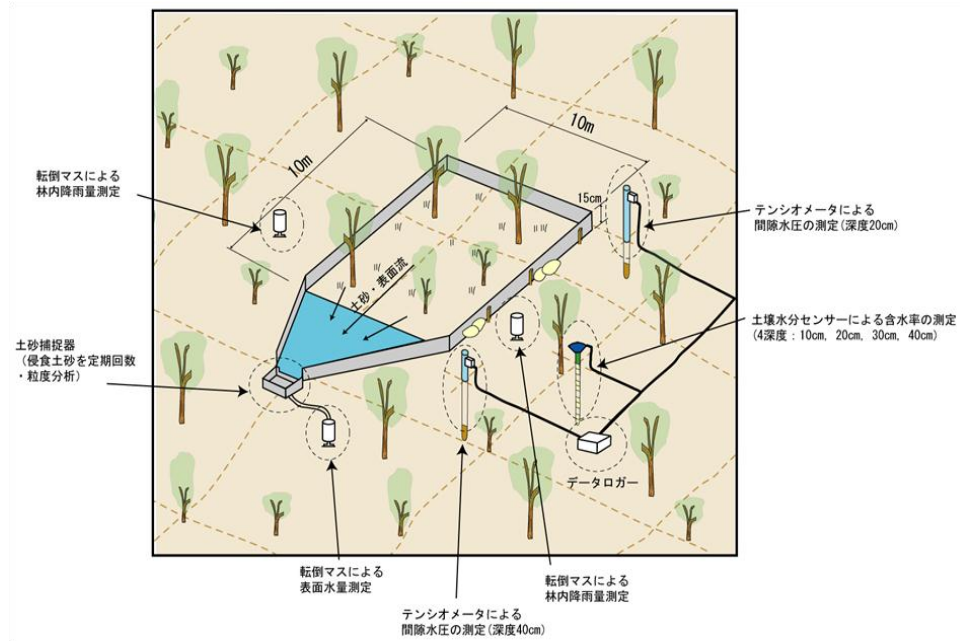


図1. 2 区画における表面侵食土砂量・流出土砂量の観測方法(SR)

表1. 5 SR 観測における観測内容

観測項目	観測機器	記録	計測間隔
表面流量	転倒マス雨量計 0.5mm(～H.18)・1mm(H.19～)	自動	15分(～H.18)・10分(H.19～)
流出土砂量(手測)	土砂捕捉器(湿潤・乾燥重量)	手動	1回/月
リター量	土砂捕捉器(湿潤・乾燥重量)	手動	1回/月
粒度分布	土砂捕捉器(粒度試験)	室内	1回/月
テンシオメータ	深さ0～50cmの2深度	自動	15分(～H.18)・10分(H.19～)
土壌水分計	深さ0～50cmの4深度	自動	15分(～H.18)・10分(H.19～)
林内雨量	転倒マス雨量計(0.5mm)	自動	1時間(～H.18)・10分(H.20～)
流出土砂量(ロードセル)	土砂捕捉器内のロードセル(水中重量)	自動	15分(～H.18)・10分(H.19～)

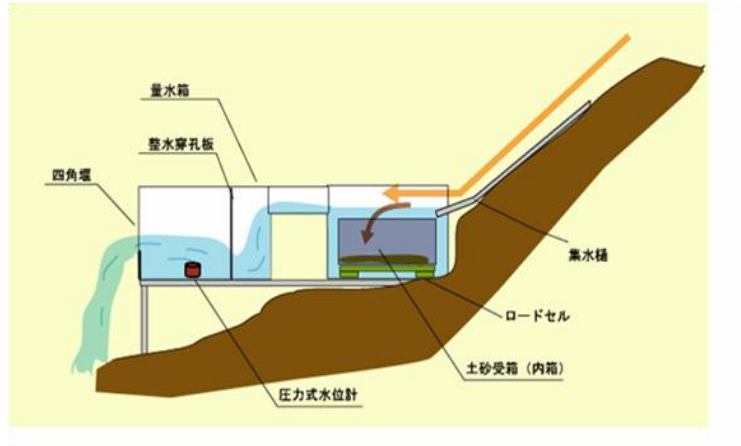


図1.3 小流域における流出土砂量等の観測方法(SE)

表1.6 SE観測における観測内容

観測項目	観測機器	記録	計測間隔
流量観測	量水箱による四角堰と圧力式水位計	自動	10分
流出土砂量(ロードセル)	土砂捕捉器内のロードセル(水中重量)	自動	10分
流出土砂量(手測)	土砂捕捉器(湿潤重量)	手動	1回/月
粒度分布	土砂捕捉器(粒度試験)	室内	1回/月

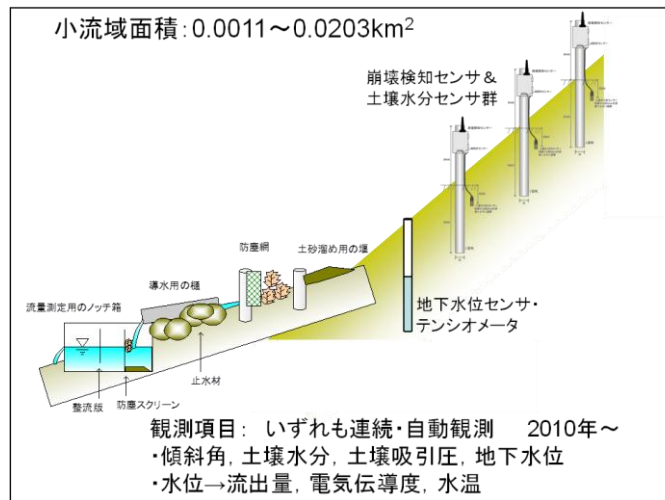


図1.4 小流域における流量観測等の観測方法(SF)

表1.7 SF観測における観測内容

観測項目	単位	S-5(SF)	S-8(SF)	S-9(SF)	S-10(SF)	S-11(SF)	S-12(SF)	S-13(SF)	西おたふく(SF)
		都賀川 (都賀谷環境)	都賀川 (トンネル)	住吉川 (湯森)	住吉川 (湯森)	高橋川 (甲南台)	生田川 (最上流1)	生田川 (最上流2)	
簡易貫入試験	箇所	95	163	231	192	124	212	181	142
雨量計	基	1	1	1	1	1	1	1	1
崩壊検知センサ	崩壊検知センサー	7	14	22	16	14	10	15	14
	土壌水分計	7	14	22	16	14	10	15	14
流量測定	四・三角堰+水位計	1	0	2	1	0	1	3	1
	電気伝導度・水温計	1	1	2	1	1	1	3	1
テンシオメータ	基	0	0	0	0	4	0	0	0
電気伝導度・水温計	基	0	0	0	0	1	0	0	0
地下水位計	基	2	5	14	4	4	4	7	3

注)S-12の流量測定はパーシャルフリュームで実施

### 1.4.2 河道部における流砂観測

図1. 1において、F-1 西滝ヶ谷、F-2 白鶴堰堤の2地点で流砂観測を開始したが、2011 (H23) 年末時点では、西滝ヶ谷、千丈谷、白水谷の3地点において流砂観測を実施している。現在の観測状況を表1. 8に示す。掃流砂についてはピット流砂計による直接的手法と従来型ハイドロフォンによる間接的手法との両方を実施している。浮遊砂については濁度計による間接的手法で実施している。流量観測は実施していないが、水圧式水位計により水位を観測している。

西滝ヶ谷を例にして、観測位置と観測項目・方法を表1. 9、図1. 5、図1. 6、写真1. 1に示す。

表1. 8 河道部における観測内容

設置 時期	流域	場所	観測項目					
			掃流砂	浮遊砂	水位	流速	土砂重量 (掃流砂)	土砂採取 (掃流砂)
H15	住吉川	F-1 西滝ヶ谷	従来型*	濁度計	水圧式	—	ピット流砂計	ピット流砂計
H16 開始 H17 中止	住吉川	F-2 白鶴堰堤	従来型*	濁度計	水圧式	—	—	—
H23	住吉川	千丈谷	従来型*	濁度計	水圧式	—	ピット流砂計	ピット流砂計
H23	船坂川	白水谷	従来型*	濁度計	水圧式	—	ピット流砂計	ピット流砂計

\*従来型ハイドロフォン

表1. 9 F-1 西滝ヶ谷における観測項目と方法

観測項目	観測機器	方法
掃流砂	従来型式ハイドロフォン ピット流砂計測装置	流砂の衝突回数 (パルス) を記録 プレッシャーピローによる荷重変化 定期的な土砂採取による堆砂量の計測 と粒度分析
浮遊砂	濁度計 (OBS-3)	赤外線 (850nm±5nm) 後方散乱計測方式による浮遊物質の反射強度測定
水位	水圧式水位計	ハイドロフォン位置の水位 (水位1) ピット流砂計測装置内の水位 (水位2)



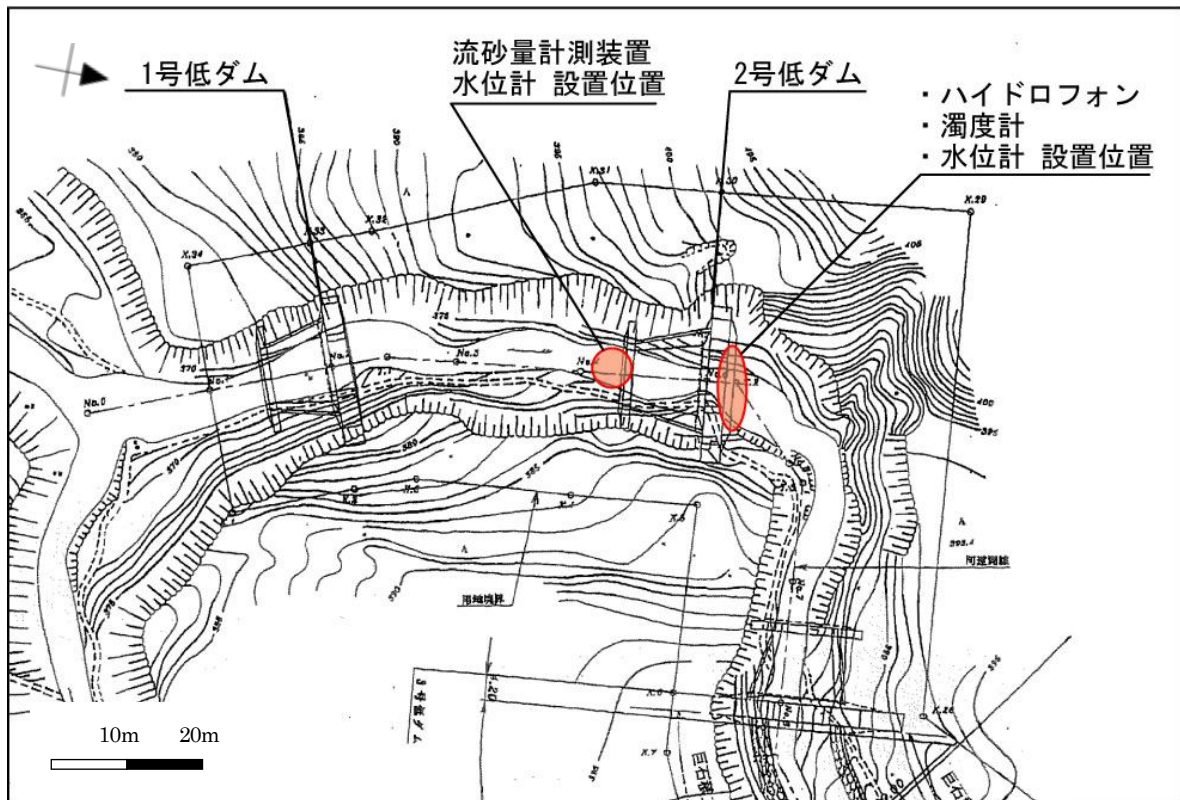


図1.5 流砂観測機器設置位置図(平面図)(西滝ヶ谷)

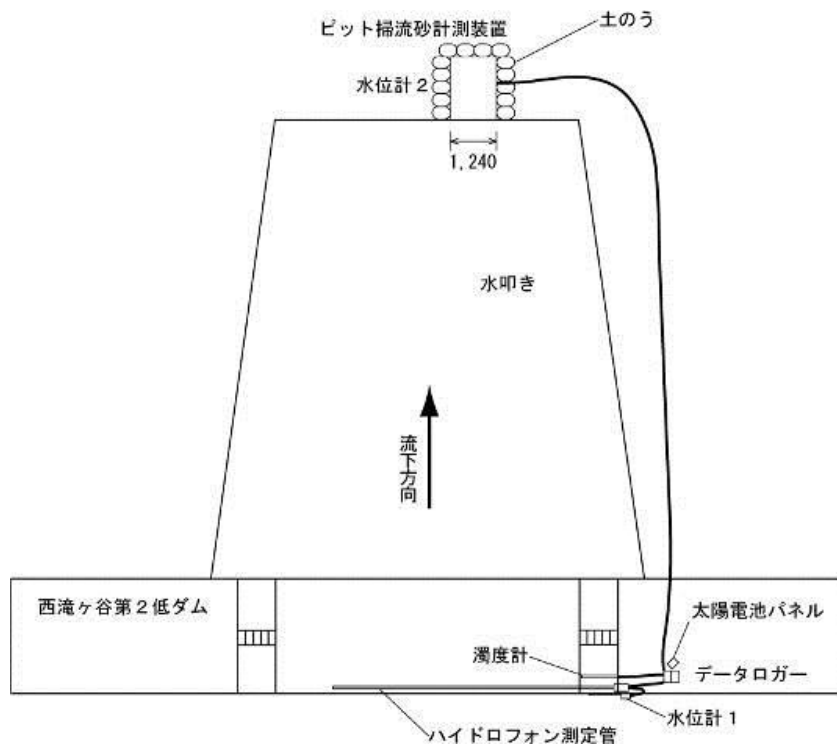


図1.6 観測機器の全体配置図(西滝ヶ谷)



写真1.1 観測機器の全体配置状況(西滝ヶ谷)

## 1) 掃流砂観測

### 1-1 直接的な手法

ピット流砂計は、図1.7に示すように、内箱と外箱、 $B0.5\text{m} \times L1.4\text{m}$  のスリットの付いた蓋、荷重計測用プレッシャーピローからなる。プレッシャーピローの水圧センサーにより内箱の荷重変化を水頭として連続計測し、同時に計測される現位置の水位との差をもとに流砂量を荷重換算することにより連続的な流砂量の変化を把握する。ピットはハイドロフオンの下流に設置している(写真1.1、写真1.2)。ピットがハイドロフオンの上流にあると、土砂がピットに捕捉されてハイドロフォンでの掃流砂の観測ができなくなることを防ぐためである。

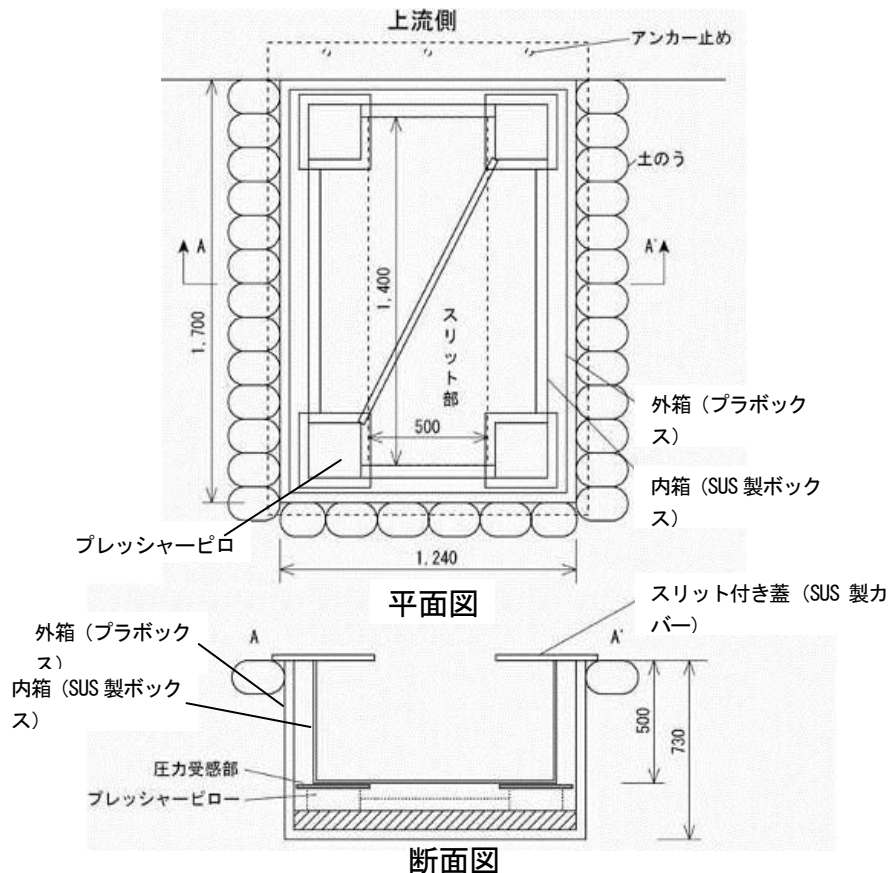


図1.7 ピット流砂計測装置詳細図(西滝ヶ谷)



写真1. 2 ピット流砂計測装置状況(西滝ヶ谷)

#### 1-2 間接的手法

従来型ハイドロフォンは、西滝ヶ谷第二床固工の水通し(B=8m)に設置した外径 48.6mm、内径 42.6mm、長さ 6.5m の測定管(SUS304)とその端に取り付けたマイクロフォン(エレクトレットコンデンサーマイク)及び変換器で構成されている。パルス数は6段階の異なる倍率を設定している(図1. 6)。

#### 2)浮遊砂観測

図1. 6において、濁度計を、掃流砂の影響を受けないよう下流に向かって堰堤天端右岸側に設置している。

#### 3)水位観測

図1. 6において、水圧式水位計を、下流に向かって右岸側袖小口に設置している。

#### 4)流速観測

実施していない。

観測結果については、第3章、第4章に詳述する。

## 引用・参考文献

- 水山高久(2004):流砂系における土砂動態と土砂管理そして砂防, 土木学会論文集, No.754/Ⅱ-66, pp.1-8
- 小田晃・長谷川祐治・水山高久・宮本邦明・野中理伸(2005):ハイドロフォンによる流砂量計測の水理模型実験への適用、砂防学会誌、Vol.58,No.2,pp.15-25
- 鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦・蒲原潤一・中島一郎・福本晃久(2012):音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性について、第61回砂防学会研究発表会概要集、
- 谷寧人・堤大三・水山高久(2012):流砂観測に基づく土砂移動特性の評価及び土砂供給源の推定
- 富田陽子・岩村美樹・内山均・中西収(1997):六甲山系グリーンベルト「緑の指標」、第46回砂防学会研究発表会概要集、p.96-97,1997.5

## 第2章 六甲山系で実施されてきた土砂災害対策

本章では、六甲山系で土砂災害への対応が必要とされた背景、経緯および現在までの砂防事業の実施状況等について整理する。また、植生は山地流域の管理の視点から重要な指標のひとつであるので、六甲山系の植生の変遷について経緯を整理し、現在の植生状況を把握する。

### 2.1 六甲山系で土砂災害対策が必要とされる背景

六甲山系(図2. 1)は、阪神間にあつて早くから観光開発、宅地開発が進行し、一方で瀬戸内海国立公園の一部でもあり、開発と環境保全とが併存する地域である。六甲山系では、開発の進行の中で山地からの土砂流出に起因する災害が度々発生してきた(表2. 1)が、その復興において砂防施設の設置とともに砂防指定地の指定による流域管理の徹底が提唱されてきた。六甲山系に広く指定されている砂防法第二条による砂防指定地の指定及び都市計画法による「防砂の施設」(都市山麓グリーンベルトの一部)の指定がそうである。

ここではまず、開発の進行の中で見舞われてきた土砂災害について、開発の状況と併せて土砂災害の特徴を整理する。その上でこの地域に今後求められる土砂災害防止の手法について考察する。

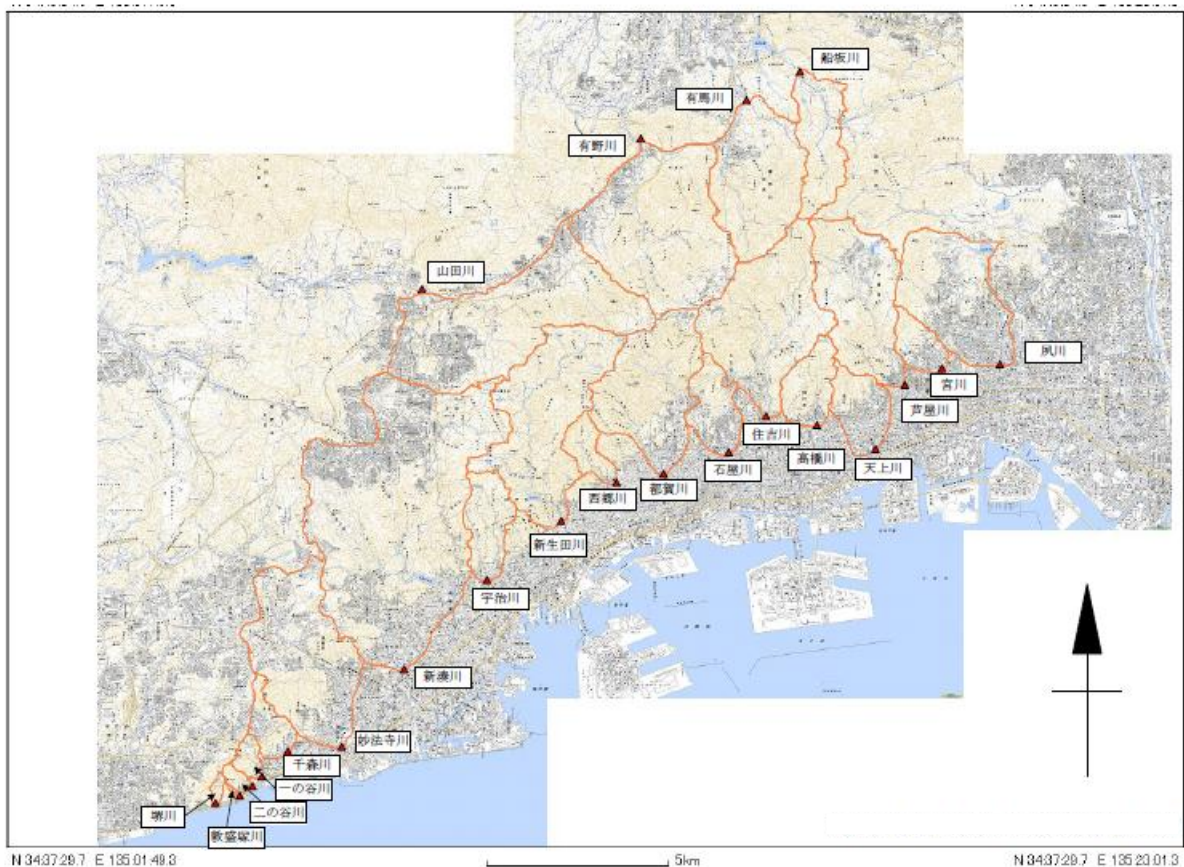


図2. 1 六甲山系の主要河川の位置

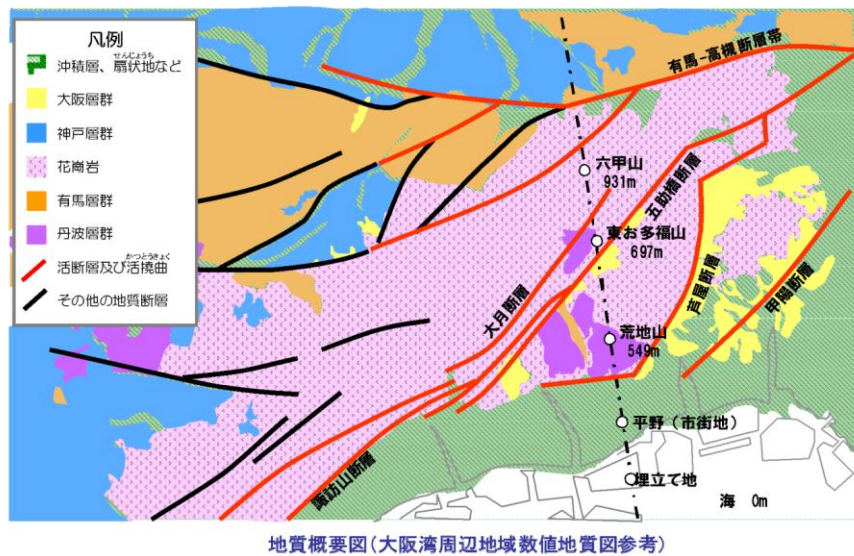
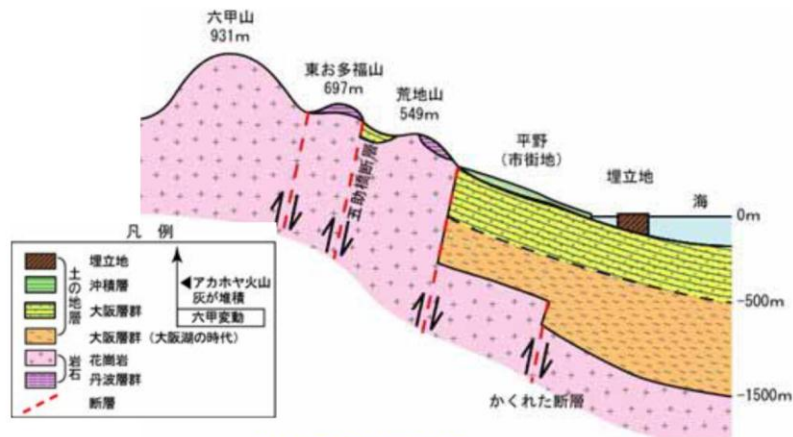


図2. 2 六甲山系周辺の地質図(「住吉川物語」より引用)

### 2. 1. 1 地形・地質と山麓の開発

最高峰931mの六甲山系には、北東－南西、東北東－西南西方向に延びる多くの活断層が存在している(図2. 2)。各断層は右横ずれ変位を行いながら北西側が隆起する滑動を繰り返しており、この滑動の累積によって六甲山系は形成された。六甲山系は第四紀の地殻変動による傾動地塊であり、東が高く、西に向かって次第に低くなっていく。六甲山系東部は多数の断層による構造起伏が著しく、西部は南北方向に地形的な段差がある。山系中央部には北東－南西に延びる小起伏断面が発達している。六甲山系は、この小起伏断面、南側斜面、北側斜面の3つに区分できる。逆断層の存在により、南側斜面が急峻な地形であるのに対し北側斜面はやや緩やかである。これらの斜面にはそれぞれ南方向、北方向に流下する多くの谷がある。地質はほとんどが花崗岩であり(表2. 2 および図2. 2)、風化によりマサ化が進んでいる。

六甲山系南側斜面は概して、谷頭部の傾斜は20～40度、下流は4～8度の勾配であり、海岸から数 km 程度で山頂となる。表2. 3及び図2. 3は、六甲山系の流域毎の斜面勾配について20度を基準にして区分し、その面積と、20度以上の斜面がそれぞれの流域面積に占める割合を示したものである。20度は、「崩壊面積率の変化

点が確認できる斜面勾配20度以上の占める割合が50%以上の河川は土砂生産量が高い河川である」とする報告書(平成13年度六甲山形砂防基本計画検討業務報告書)に基づいて設定したものである。一方、流域の土地利用について、各流域面積に占める造成地等の割合を図2. 4に示す。これは表2. 18の「その他」面積の占める割合である。さらに、造成地等の開発が20度未満の斜面で行われたと考えた場合に各流域毎の20度未満の斜面に占める造成地等の割合を表2. 3(1)に示す。これらからは次のことがわかる。

- ・六甲山系南側斜面の全流域でみると、20度以上の斜面が占める面積は全流域面積の54%、20度未満の斜面が占める面積は46%であり、20度以上の斜面面積と20度未満の斜面面積が全流域に占める割合はそれぞれ半分程度である。また、全流域面積の32%は開発されている(表2. 3(1))。

- ・妙法寺川、石屋川、高橋川、宮川、夙川は、流域面積の50%以上が開発されている。これらの流域では、20度未満の斜面面積がそれぞれの流域に占める割合が60%以上であり(表2. 3(1))、これは20度未満の斜面面積が全流域に占める割合である46%よりも高い(表2. 3(1))。

- ・20度以上の斜面面積率が50%以上の河川では、流域の開発がその流域面積に占める割合は平均して13%である(表2. 3(2))。

- ・20度以上の斜面面積率が50%以上の河川では、その流域の開発が主に20度未満の斜面において進んだと考えた場合に、各流域の20度未満の斜面面積に対する開発面積は平均して44%であるが、都賀川では78%、敦盛塚川では100%と高い(表2. 3(2))。

- ・20度以上の斜面面積率が50%未満の河川では、流域の開発がその流域面積に占める割合は平均して48%である(表2. 3(3))。

- ・20度以上の斜面面積率が50%未満の河川では、流域の開発が主に20度未満の斜面において進んだと考えた場合に、各流域の20度未満の斜面面積に対する開発面積は平均して79%程度である。高橋川、石屋川、宮川では90%を超える(表2. 3(3))。

- ・全流域において、20度未満の斜面において開発が進んだと考えた場合に、その面積に対する開発面積は約69%である(表2. 3(1))。

すなわち、土砂生産量が高いとされる河川、すなわち、20度以上の斜面の占める面積が50%以上を占める流域では、平均して流域面積の10%程度が開発されており、その開発が20度未満の斜面で進んだと考えた場合にはその40%程度が開発されており、中にはそのすべてが開発されている流域もある(表2. 3(2))。また、20度未満の斜面が占める面積が50%未満の流域では、平均して流域面積の50%程度が開発されており、その開発が20度未満の斜面で進んだと考えた場合にはその80%程度が開発されている(表2. 3(3))。このような開発の状況を経年的に概観すると、図2. 5に整理できる。六甲山系の流域においては概して、20度未満の斜面の70%程度は開発されており、その背後には20度以上の斜面が存在しているということである(表2. 3(1))。

住吉川に目を移すと、流域の約10%が開発されており、これが20度未満の斜面で進んだと考えた場合には約40%が開発されている。これは流域面積に対する20度以上の斜面が占める面積が50%以上の流域のほぼ平均的な数字である(表2. 3(2))。

これらの開発は人口の増加と無縁ではない。六甲山麓の人口の移り変わりを神戸市と芦屋市がHP等で公表し

ている人口推移でみると、次のようである。

神戸市は、1989(M22)年の市制発足当時の人口は約13万人。ただし、この人口分布は現在の兵庫区から中央区である。1920(T9)年には現在の須磨区も加わり約60万人に、その後周辺の村や区も加わって、1938(S13)年にはすでに100万人を超えている。第2次世界大戦、神戸大空襲を乗り越えた1945(S20)年には約38万人となるが、その後の昭和の大合併により現在の神戸市がほぼ形づくられ、1965(S40)年には120万人を超える規模になり、さらに1993(H5)年には150万人を超えている。1995(H7)年の阪神・淡路大震災の影響によりその後約10万人減少したものの、2004(H16)年には約152万人となり、現在は震災前の人口を上回っている

芦屋市は、村制発足当時の1989(M22)年に約3千人。1920(T9)年には約1.1万人、1935(S10)年には約3.6万人となっている(1938(S13)年のデータがない)。終戦を迎えた1945(S20)年には約3.1万人となるが、1965(S40)年には約6.3万人となる。阪神・淡路大震災前の1993(H5)年に約8.7万人あった人口は震災後約1万人減少したものの、2004(H16)年にはすでに9万人を超える規模となり、現在は神戸市同様に震災前の人口を上回っている。

これらをもって六甲山麓の人口の変遷とはただちには言えないが、戦災、震災による一時的な減少はあったものの、六甲山麓の人口は一貫して増加している。

表2.1 六甲山系での主な土砂災害史

年号（西暦）	記 事
永和3年 (836)	5月18日 朝廷より大輪田泊に派遣せる使者通行あたわず。（続日本後記）
文明7年 (1475)	8月6日 尼崎、兵庫、須磨、明石間に大洪水。（続応仁後記）
天文13年 (1557)	7月9日 尼崎より明石の浦々まで高塩さしあげ…文明後80年目…（続応仁後記）
寛永14年 (1637)	6月 兵庫大風雨有り。（網尾新九郎記）
万治2年 (1659)	5月22日 大洪水有り寺院土中に埋まる。（須磨寺旧記）
宝永3年 (1706)	6月 脇浜海岸波浪により流出す。（脇浜村記録）
正徳2年 (1712)	7月2日 武庫川から生田川まで大洪水。（生田川境界争論裁許状）
天文5年 (1740)	生田川大洪水。（神戸村留日記）
寛保2年 (1742)	6月3日 大風雨。（神戸村留日記）、五毛村堤防決壊、山崩れ。（五毛村記録）
宝暦4年 (1754)	妙法寺川堤防決壊。（大手村、須磨寺書上）
宝暦6年 (1756)	5月29日 生田川満水、水防を行う。（神戸村留日記）
明和5年 (1768)	5月27日 畿内洪水。（皇年代略畿） 脇浜村洪水。（脇浜村喜六）
安永3年 (1774)	6月 脇浜村に波浪侵入。（脇浜村記録）
寛政3年 (1791)	4月 波浪脇浜村に侵入。（脇浜村記録）
寛政12年 (1800)	7月25日 湊川出水につき人足500人割当、水防す。（兵庫総会所日記）
文政3年 (1820)	5月23日 大雨のため長田天神山名倉池決壊。（長田村記録）
天保9年 (1829)	4月26日 湊川満水川越人足にて水防。（安田惣兵衛文書）
天保14年 (1843)	3月19日 湊川の出水かって見ざるほど。（広瀬旭荘日間鎖事備志）
弘化2年 (1845)	12月 湊川切所普請する。日雇ちん66匁（三方立会勘定所）
安政4年 (1857)	5月22日まで16日雨続く。（西灘村史） 7月朔日 畿内洪水。（嘉永明治間録）
慶応元年 (1865)	8月15日 灘川破堤7人ほど死亡。（西灘村史） 天王川破堤。（奥平野村記録）
慶応2年 (1866)	7月 天王川西堤防決壊。（奥平野村記録） 8月16日 大風雨洪水。（五毛村記録）
明治元年 (1868)	11月 天王寺川堤防決壊。（神戸市水害法）
明治3年 (1870)	9月18日 午後5時烈風猛雨被害多し。（神戸開港30年史）
明治6年 (1873)	7月13日 日風波大いに起こり被害有り。（神戸開港30年史） 10月2日～3日 大雨生田川川床破損堤防決壊。（神戸開港30年史）
明治7年 (1874)	7月28日～8月3日 生田川、湊川堤防決壊。（神戸水害史）
明治10年 (1877)	5月16日～18日 大出水。（神戸市史）
明治29年 (1896)	6月より連続雨。9月30日 湊川破堤。（神戸開港30年史）
明治36年 (1903)	7月7日～9日 宇治川堤防破損、使者4名。（県統計書）
明治38年 (1905)	8月26日 時間最大73.3mm、20分最大39mm、浸水1万余戸。
明治43年 (1910)	9月6日 10時～9日8時 251.8mm、大水害。



大正元年 (1912)	9月23日 四国東端から大阪に台風進む。総雨量159.7mm、大風水害。
大正13年 (1924)	9月11日～12日 中型台風、使者10名、浸水1,495戸。
昭和9年 (1934)	9月21日 室戸台風、1時間最大26.5mm、床上2,547戸、床下7,919戸、死者6名。
昭和13年 (1938)	7月3日～5日 3日49.6mm、4日141.8mm、5日270.4mm(日界22時)計461.8mm、1時間最大60.8mm(5日)、住家流失1,497戸、埋没966戸、全壊2,658戸、半壊7,878戸、床上31,643戸、床下75,252戸、死者671名、行方不明24名、堤防決壊14、道路決壊69、橋梁流失57。
昭和14年 (1939)	8月1日 1時間最大87.7mm、浸水14,165戸、死者2名、堤防決壊23。
昭和20年 (1945)	10月8日～11日 阿久根台風、1時間最大49.6mm(9日)、河川決壊破損87、道路決壊破損141、橋梁被害61。
昭和21年 (1946)	6月18日～19日 河川決壊破損53、道路決壊破損46、橋梁流失破損12。
昭和22年 (1947)	7月 全壊 3戸、半壊 7戸、流出 2戸、床上浸水 228戸、床下浸水 5,862戸
昭和23年 (1948)	7月21日 負傷者 8人、流出 10戸、全壊 26戸、床上浸水 1,077戸、床下浸水 2,425戸
昭和24年 (1949)	6月18日～19日 デラ台風、土砂堆積 21,778m <sup>3</sup>
昭和25年 (1950)	9月3日 ジェーン台風、1～3日総雨量161mm、家屋全半壊1,067戸、流失30戸、床上58戸、床下2,682戸、堤防決壊44、道路破損70。
昭和28年 (1953)	6月7日 台風2号、浸水673戸、死者4名、堤防決壊37、道路破損30。9月25日 台風13号、家屋全半壊689戸、浸水1,047戸。
昭和36年 (1961)	6月24日～27日 24日76.8mm、25日195.2mm、26日127.7mm、27日72.4mm、計472.1mm、1時間最大44.7mm(27日)、家屋流失11戸、全壊140戸、半壊263戸、床上3,960戸、床下29,376戸、死者28名、行方不明3名、河川被害973、道路被害580、橋梁流失62。9月16日 第二室戸台風、14～16日総雨量136.0mm、家屋全半壊流失2,555戸、床上8,801戸、床下36,034戸、死者10名、河川被害1,756、砂防98、道路1,044、橋梁121、緊
昭和39年 (1964)	9月25日 死者 2人、負傷者 28人、全壊 136戸、半壊 373戸、流失 15戸、床上浸水 4,178戸、床下浸水 3,016戸
昭和40年 (1965)	9月10日 台風23号、総雨量118.6mm、家屋全半壊1,765戸、床上2,603戸、床下1,262戸。9月17日 台風24号、13～17日総雨量336mm、家屋全半壊176戸、床上102戸。
昭和42年 (1967)	7月9日 6日7.7mm、7日28.6mm、8日34.1mm、9日301.3mm(日界9時)計371.7mm、1時間最大75.8mm(9日)、家屋全壊367戸、半壊390戸、床上9,187戸、床下49,650戸、死者90名、行方不明8名、河川決壊67、溢水氾濫74、橋梁流失38、山くずれ141、がけくずれ168、道路崩壊162。
平成7年 (1995)	1月17日 マグニチュード7.2 死者5,502名、負傷者41,521名、避難者(ピーク時)342,293名(死者、負傷者は消防庁調べ(平成7年5月10日12時集計)、避難者は兵庫県調べ(ピーク時は1/20～1/24))

(六甲砂防事務所 HP 資料より引用)

表2. 2 六甲山系流域の表層地質区分

	中・低 位段丘 層	上部垂 層群	玉瀨溶 結凝灰 岩	岩脈類	中部累 層	下部垂 層	下部累 層	上部累 層	六甲花 崗岩	金剛童 子流紋 岩溶岩	甲山安 山岩	中部垂 層	花崗岩 類II	花崗岩 の割合
夙川	13.5%	23.1%	0.0%	0.0%	0.0%	9.0%	0.0%	0.0%	46.9%	0.0%	0.2%	7.3%	0.0%	46.9%
宮川	26.7%	30.9%	0.0%	0.0%	0.0%	11.6%	0.0%	0.0%	24.4%	0.0%	0.0%	6.4%	0.0%	24.4%
芦屋川	2.4%	14.7%	0.4%	0.5%	0.0%	1.5%	0.0%	0.0%	77.5%	0.0%	0.0%	3.0%	0.0%	77.5%
高橋川	69.8%	15.4%	0.0%	0.0%	0.0%	14.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
天上川	18.9%	3.0%	12.9%	16.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	43.3%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	48.4%
住吉川	2.2%	3.9%	4.3%	3.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	82.6%	0.0%	0.0%	2.2%	1.7%	84.3%
石屋川	4.5%	15.5%	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	53.4%	0.0%	0.0%	0.0%	24.4%	77.8%
都賀川	5.6%	6.7%	0.0%	4.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	72.8%	0.0%	0.0%	0.0%	10.3%	83.1%
西郷川	1.9%	3.9%	0.0%	1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	61.7%	0.0%	0.0%	0.0%	30.6%	92.3%
新生田川	0.0%	0.1%	0.8%	0.8%	0.0%	0.0%	1.1%	0.0%	75.4%	0.0%	0.0%	0.0%	21.8%	97.1%
宇治川	5.0%	2.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	7.1%	0.0%	0.0%	0.0%	84.8%	92.0%
新湊川	1.6%	2.7%	0.0%	0.8%	13.8%	0.6%	10.7%	1.6%	45.2%	0.0%	0.0%	1.5%	21.5%	66.8%
妙法寺川	5.8%	0.0%	0.0%	0.0%	26.9%	1.1%	3.4%	0.7%	57.8%	0.0%	0.0%	0.0%	4.4%	62.1%
千森川	11.7%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	87.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	87.5%
一の谷川	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	98.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	98.5%
二の谷川	8.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	91.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	91.9%
三の谷川	34.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	65.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	65.4%
敦盛塚川	47.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	52.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	52.9%
堺川	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.7%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	100.0%
山田川	1.9%	1.9%	21.0%	1.4%	13.6%	0.0%	11.2%	0.0%	45.6%	3.5%	0.0%	0.0%	0.0%	45.6%
有野川	3.2%	2.2%	34.9%	1.7%	2.9%	0.0%	7.6%	0.0%	46.2%	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%	46.2%
有馬川	11.8%	0.0%	19.4%	0.7%	0.0%	0.0%	8.5%	0.0%	59.3%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	59.3%
船坂川	6.6%	3.4%	6.4%	0.4%	0.0%	0.0%	15.9%	0.0%	67.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	67.3%

表2. 3(1) 流域ごとの斜面勾配等と流域面積に占める割合

	流域面積 (km <sup>2</sup> ) a	20° 未満の斜面 の面積(km <sup>2</sup> ) b	20° 以上の斜面 の面積(km <sup>2</sup> ) c	「その他」の面積 (km <sup>2</sup> ) d *1	c/a (%) *2	d/b (%) *3	d/a (%) *4
堺川	0.24	0.04	0.20	0.01	83	25	4
敦盛塚川	0.04	0.01	0.03	0.01	75	100	25
三の谷川	0.11	0.05	0.06	0.03	55	60	27
二の谷川	0.25	0.06	0.19	0.03	76	50	12
一の谷川	0.94	0.49	0.45	0.40	48	82	43
千森川	1.35	0.75	0.60	0.58	44	77	43
妙法寺川	10.62	6.56	4.06	5.61	38	86	53
新湊川	28.92	16.30	12.62	12.33	44	76	43
宇治川	3.00	0.72	2.28	0.35	76	49	12
新生田川	11.70	2.72	8.98	0.56	77	21	5
西郷川	1.47	0.19	1.28	0.11	87	58	7
都賀川	9.22	2.71	6.51	2.11	71	78	23
石屋川	2.88	1.70	1.18	1.54	41	91	53
住吉川	11.16	2.94	8.22	1.06	74	36	9
天上川	2.59	0.79	1.80	0.35	69	44	14
高橋川	2.64	1.74	0.90	1.62	34	93	61
芦屋川	8.64	3.61	5.03	1.50	58	42	17
宮川	1.77	1.11	0.66	1.01	37	91	57
夙川	7.86	5.53	2.33	4.03	30	73	51
計	105.40	48.02	57.38	33.24	54	69	32

\*1: 表2.4に示した「その他」で、市街地、ゴルフ場、造成地、農地等の面積

\*2: 流域面積に占める20°以上の斜面が占める割合

\*3: 20°未満の斜面において開発が進んだと考えた場合に、20°未満の斜面面積に対する「その他」面積割合

\*4: 流域面積に占める「その他」面積割合

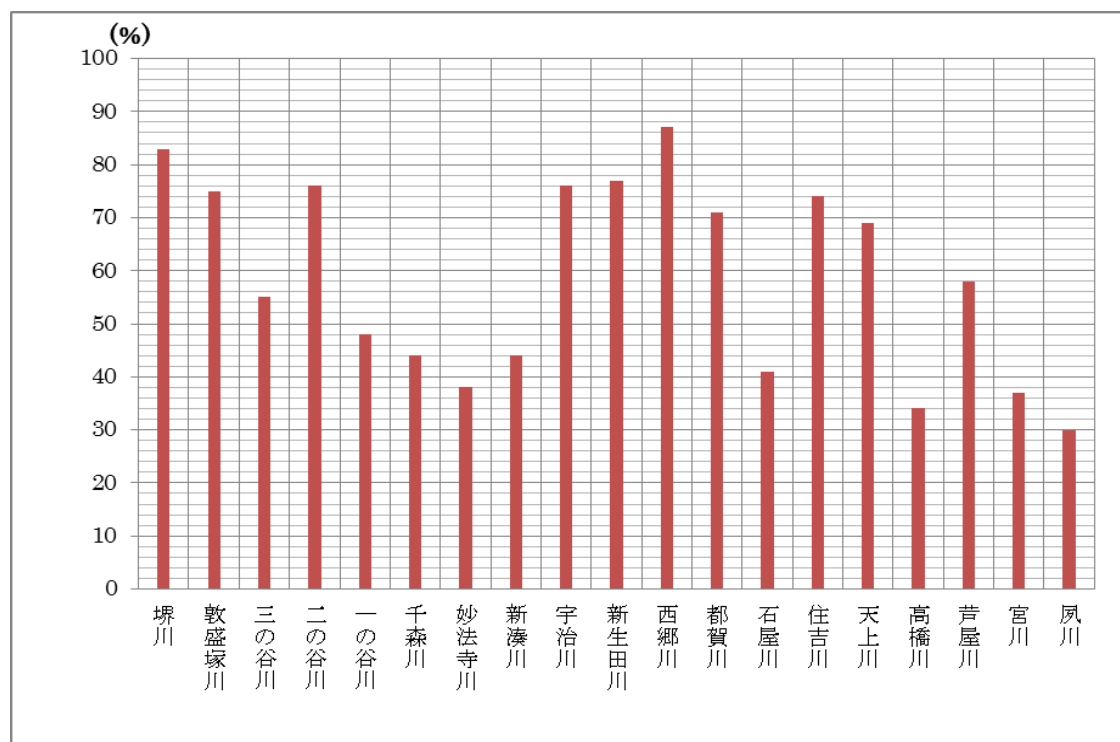


図2. 3 六甲山系南側斜面の各流域において20°以上の斜面が占める割合

(表2. 3(1)より作成)

表2. 3(2) 20度以上の斜面面積率が50%以上を占める流域における各面積割合

	流域面積 (km <sup>2</sup> ) a	20° 未満の斜面 の面積(km <sup>2</sup> ) b	20° 以上の斜面 の面積(km <sup>2</sup> ) c	「その他」の面積 (km <sup>2</sup> ) d *1	c/a (%) *2	d/b (%) *3	d/a (%) *4
堺川	0.24	0.04	0.20	0.01	83	25	4
敦盛塚川	0.04	0.01	0.03	0.01	75	100	25
三の谷川	0.11	0.05	0.06	0.03	55	60	27
二の谷川	0.25	0.06	0.19	0.03	76	50	12
宇治川	3.00	0.72	2.28	0.35	76	49	12
新生田川	11.70	2.72	8.98	0.56	77	21	5
西郷川	1.47	0.19	1.28	0.11	87	58	7
都賀川	9.22	2.71	6.51	2.11	71	78	23
住吉川	11.16	2.94	8.22	1.06	74	36	9
天上川	2.59	0.79	1.80	0.35	69	44	14
芦屋川	8.64	3.61	5.03	1.50	58	42	17
計	48.42	13.84	34.58	6.12	71	44	13

(表2. 3(1)より作成)

表2. 3(2) 20度以上の斜面面積率が50%未満の流域における各面積割合

	流域面積 (km <sup>2</sup> ) a	20° 未満の斜面 の面積(km <sup>2</sup> ) b	20° 以上の斜面 の面積(km <sup>2</sup> ) c	「その他」の面積 (km <sup>2</sup> ) d *1	c/a (%) *2	d/b (%) *3	d/a (%) *4
一の谷川	0.94	0.49	0.45	0.40	48	82	43
千森川	1.35	0.75	0.60	0.58	44	77	43
妙法寺川	10.62	6.56	4.06	5.61	38	86	53
新湊川	28.92	16.30	12.62	12.33	44	76	43
石屋川	2.88	1.70	1.18	1.54	41	91	53
高橋川	2.64	1.74	0.90	1.62	34	93	61
宮川	1.77	1.11	0.66	1.01	37	91	57
夙川	7.86	5.53	2.33	4.03	30	73	51
計	56.98	34.18	22.80	27.12	40	79	48

(表2. 3(1)より作成)

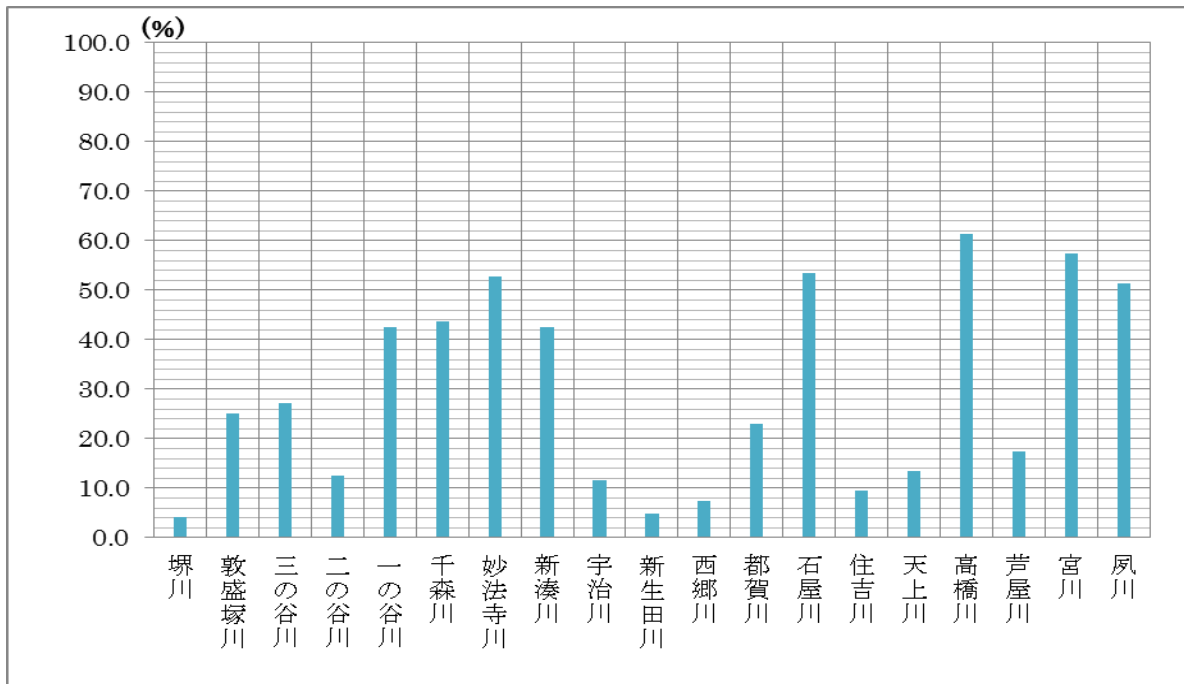


図2. 4 六甲山系南側斜面の各流域面積に占める造成地等の開発面積の割合

(表2. 3(1)より作成)

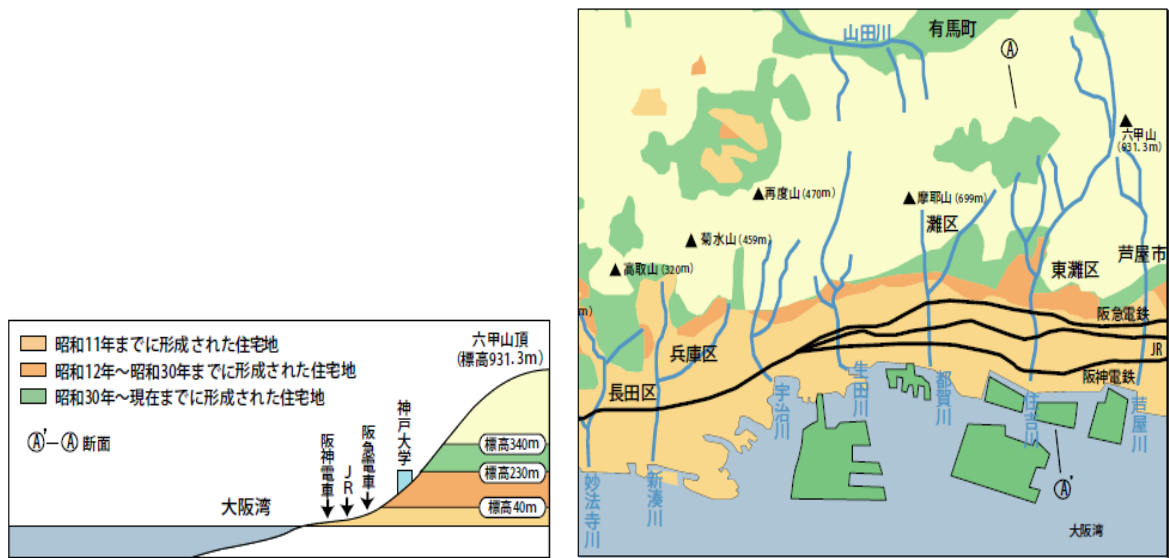


図2.5 六甲山麓のうつりかわり  
 (「住吉川物語」より引用)

表2.4 六甲山の開発と植林等砂防関係事業

	ホテル・別荘等	観光施設	公園等	交通インフラ	その他	砂防事業等
1895(明治28年)						兵庫県(砂防)が山腹工開始
1897(明治30年)						治水三法制定
1901(明治34年)			ゴルフ場4ホール開業			兵庫県(砂防)と神戸市が再度山で植林開始
1902(明治35年)	登山用休憩所など開所					
1923(大正12年)					山林火災 800余町歩焼失	
1925(大正14年)		摩耶ケーブル開業				
1928(昭和 3年)			諏訪山動物園 諏訪山公園	裏六甲ドライブウェイ 開通(バス運行) (有馬⇄山上)	神戸市灘区から芦屋川 上流まで600ha山林焼失	
1929(昭和 4年)	六甲山ホテル開業			表六甲ドライブウェイ 開通(バス運行) (阪急六甲⇄山上)		
1930(昭和 5年)					裏山開発調査委員会 発足(神戸市)	
1931(昭和 6年)		六甲ロープウェイ開業			国立公園法制定 (→1956に自然公園法 に)	
1932(昭和 7年)		六甲ケーブル開業	ひよどり越遊園地	山上回遊道路開通		
1933(昭和 8年)			六甲山高山植物園			兵庫県(砂防)が、S8～ S17まで住吉川、芦屋川 植林
1934(昭和 9年)	六甲オリエンタルホテル開業			東六甲縦走道路開通		
1935(昭和10年)				再度山ドライブウェイ 開通		
1936(昭和11年)	凌雲荘開業					
1937(昭和12年)			再度山公園			
1938(昭和13年)					阪神大水害	・建設省直轄砂防事業 開始 ・営林署が住吉川・湊川 で植林開始(S18まで)
1952(昭和27年)		六甲山牧場開業				
1955(昭和30年)		奥摩耶ロープウェイ開 業				
1956(昭和31年)					六甲山地区が瀬戸内海 国立公園の一部に編入	
1961(昭和36年)				芦有道路供用開始 (私有)	豪雨災害	
1964(昭和39年)		六甲山人工スキー場 開業				
1967(昭和42年)					豪雨災害	
1970(昭和45年)		六甲有馬ロープウェイ 開業				

\*住吉川流域にかかわるものは朱文字

\*開発関係は「都市政策」を参考に作成

\*「植林等」は表 2.16 より作成

### 2. 1. 2 観光開発

特に用事もないのに山へ出かけたり(散歩)、山の中に別荘を建てたりする外国人の行為を、日本人は当初奇異に感じていたようだ、という記載を六甲山に関する過去のいくつかの文献の中に見ることができる。当時日本人にとって山というのは、生活に必要な物資を採取したり林業を営む場ではあっても、休養や娯楽のために出かける場所ではなかったようである。しかし六甲山では、明治時代後半になると、日本人も楽しむための施設が整備されていく。表2. 4に六甲山の開発と植林等砂防関係事業について整理した。

1901(M34)年、六甲山上にゴルフ場が4ホールでスタートする。1902(M35)年には神戸市と兵庫県により再度山地区で植林が始まり、明治末頃には登山者の便宜を図る施設ができる。1925(T14)年には摩耶ケーブルが営業を開始した。

1928(S3)年に有馬から山上への裏六甲ドライブウェイが開通してバスの運行が、また1929(S4)年には阪急六甲から山上へ表六甲ドライブウェイが開通しバスの運行が始まった。さらに、1931(S6)年に六甲ロープウェイ、1932(S7)年には六甲ケーブルが開業した。1930(S5)年、神戸市は失業救済と観光施設充実のために裏山開発調査委員会を発足させ、道路網の整備を主体とした六甲山の開発を計画し、1932(S7)年に山上回遊道路、1934(S9)年に東六甲縦走道路、1935(S10)年再度山ドライブウェイが開通し、1937(S12)年に市バスが運行を開始した。公園計画も、諏訪山動物園、諏訪山公園(ともに1928(S3)年)、鶴鳥越遊園地(1932(S7)年)、鉢伏山、六甲山高山植物園(ともに1933(S8)年)、再度山公園(1936(S11)年)と進められた。ホテルも、1929(S4)年に六甲山ホテル、1934(S9)年に六甲オリエンタルホテル、1936(S11)年に凌雲荘が開業している。

当時、六甲山の別荘は300余り、六甲山への遊覧者は50万人以上だったとの記録があり、第二次世界大戦までには六甲山はすでに活発に開発が行われていた。これらの施設の中には、「昭和13年7月豪雨」で壊滅的に被災したものもあり、また、第二次世界大戦中には摩耶ケーブル、六甲ロープウェイの撤去が行われた。終戦後の1952(S27)年に六甲山牧場、1955(S30)年に奥摩耶ロープウェイが開業している。

1956(S31)年に六甲山地区が瀬戸内海国立公園の一部に編入され、自然公園法のもとで開発が進められることになり、その後も芦有道路(1961(S36)年)、六甲山人工スキー場(1964(S39)年)、六甲有馬ロープウェイ(1970(S45)年)などが整備されている。

2010(H22)年の六甲山(六甲・摩耶)への観光客の入込み数は、年間523万人(神戸市調べ)である。

### 2. 1. 3 六甲山系からの土砂流出

六甲山系からの土砂流出については、それによる土砂災害の記録として表2. 1にみることができる。

山地斜面からの土砂生産は扇状地の形成、ひいては市街地の形成に寄与する。六甲山麓の市街地は扇状地に形成されており、なかでも住吉川は、周辺の流域と比較しても特に明治・大正時代以前にはすでに山地からの土砂流出量が多かったことを端的に示しているものがある。地形図(図2. 6, 図2. 7)からも明らかではあるが、さらに、明治初期に敷設されたJR東海道線(写真2. 1)について、「当時の鉄道車両の動力性能上、勾配のほとんどない水平な路盤形成が必要であったため、当時すでに天井川であった住吉川の地下を鉄道が通るように建設された」という。

表2. 1に示す土砂災害の記録について、大正時代以前については、土砂災害発生に関わる気象条件、土砂の流出状況、被災状況等について詳細なものは得られていない。ただ、明治期までには六甲山系の大部分が禿げ山となっていたこと(後述)から、山地における土砂生産は活発で、少量の雨でも頻繁に土砂流出が発生し、六甲山麓の河川は総じて河床が高く氾濫しやすかったものと考えられ、山地からの土砂流出は下流市街地の基盤形成に大きな影響を与えていたものと考えられる。

1938(S13)年度に建設省直轄の砂防工事が開始されて以降の流域内の土砂生産量については、砂防堰堤の堆砂の実態調査から流域毎に整理された年平均堆砂量(表2. 5及び図2. 8)にみる事ができる。これによると、どの流域でも1997～2003年(平成 9～15 年)において平均値よりも高い堆砂量がみられる。特に芦屋川、住吉川、山田川では平均値の4倍程度となっており、「平成 7 年兵庫県南部地震」によって発生した斜面崩壊(表2. 1 2)との関連がうかがえる。



写真2. 1 住吉川鉄道トンネルの位置図  
(「住吉川物語」より引用)



図2. 6 住吉川の扇状地  
(「六甲山の地理-その自然と暮らし」より引用)



図2. 7 住吉川流域の地形 (六甲砂防事務所 検討委員会資料より引用)

表2.5 単位面積あたりの流域別年平均堆砂量一覧

流域区分		年平均堆砂量(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )								
名称	流域面積(km <sup>2</sup> )	S13-S20	S26-S35	S36-S41	S42-S51	S52-S61	S62-H8	H9-H15	S13-H8 平均値	全期間 (S13-H8) 平均値
夙川	7.853					1,361.4	174.0		768	768
宮川	1.651								—	—
芦屋川	8.421		566.9		1,910.9	1,594.0	5,776.2	42,055.6	2,462	10,381
高橋川	2.843		535.6	3,649.2	156.4	6,101.0		11,562.5	2,611	4,401
天上川	2.497				440.8				441	441
住吉川	10.584	3,170.4	12,789.9		4,070.2	1,798.9	7,215.5	46,586.6	5,809	12,605
石屋川	2.771								—	—
都賀川	8.647		2,609.1	176.6	3,466.2	1,408.3	5,247.7	8,135.3	2,582	3,507
西郷川	1.245	1,548.1			1,297.7	808.4	5,366.7		2,255	2,255
新生田川	11.354	3,691.9	3,106.7	562.3	2,089.5	2,211.2	3,317.4		2,497	2,497
宇治川	3.015	5,198.3			914.9	165.2	883.3		1,790	1,790
新湊川	28.675	4,470.6	335.8		906.1	1,294.0	885.8		1,578	1,578
妙法寺川	10.887		573.9		1,055.1	1,656.4	338.3		906	906
千森川	1.526					2,114.6		6,888.9	2,115	4,502
一の谷川	0.746	1,684.5				1,272.2			1,478	1,478
二の谷川	0.338	2,419.4				2,519.0			2,469	2,469
敦盛塚川	0.090					1,815.5			1,816	1,816
堺川	0.222				11,268.3		1,556.1		6,412	6,412
山田川	14.778	305.7		1,122.4	3,386.9	2,344.6	764.6	8,026.1	1,585	2,658
有野川	14.634	549.1		55.1	498.8	1,780.0	1,066.8	2,709.3	790	1,110
有馬川	8.395			3,960.4	4,156.9	2,410.2	1,108.8	7,234.0	2,909	3,774
船坂川	4.030			1,366.1	416.8	5,306.4	868.7		1,990	1,990
総計	145.202	—	—	—	—	—	—	—	—	—

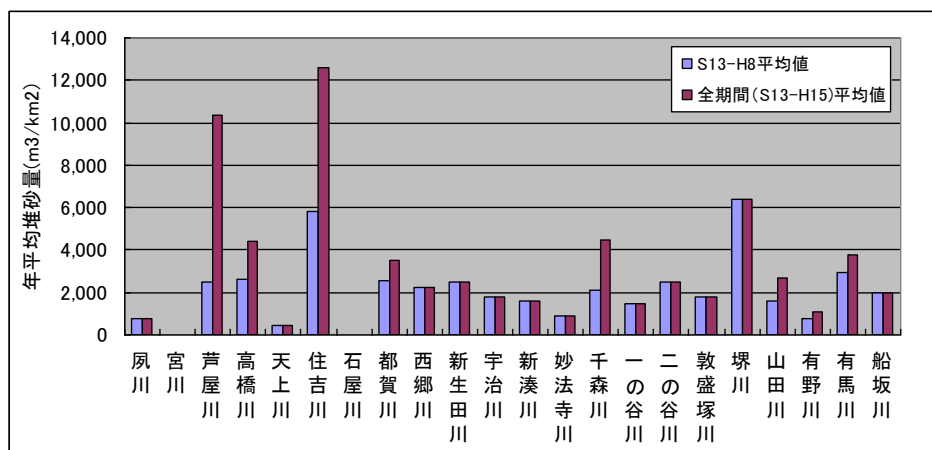


図2.8 六甲山系流域の砂防堰堤堆砂状況(表2.6をもとに作成)



## 2. 1. 4 土砂災害の特徴

### 1) 土砂災害発生時の降雨の特徴

1896 (M29)年に兵庫県立神戸測候所が創設され、1897 (M30)年に観測が始まってから1937 (S12)年までの41年間の神戸における降水量の記録によると、この41年間の6月の平均総降水量は191. 2mm、7月の平均総降水量は152. 2mm である。1938 (S13)年7月の総降水量は519. 5mm であり、例年の3倍以上の降水量があり、そのうちの461. 8mm (約9割)が7月3日から5日までの3日間で降っている。

また、1897 (M30)年から1960 (S35)年までの63年間の神戸における6月の平均降水量は196mm、7月の平均降水量は168. 9mm である。1961 (S36)年の6月の総降水量は584. 2mm であり、例年の約3倍の降水量があり、そのうちの472. 1mm (8割)が6月24日から27日までの4日間で降っている。

さらに、1897 (M30)年から1966 (S41)年までの69年間における神戸の6月の平均降水量は203. 9mm、7月の平均降水量は167. 2mm である。1967 (S42)年 7 月の総降水量は520. 8mm であり、例年の3倍以上の降水量があり、そのうちの371. 7mm (7割)が7月6日から9日までの4日間で降っている。

1987 (M30)年から1966 (S41)年までの69年間で見ると、神戸の6月の平均降水量は190～200mm 程度、7月の平均降水量は150～170mm 程度であり、全国的にみて梅雨どきの雨としてそれほど多いわけではない。この間に6月の総降水量が1961 (S36)年の584. 2mm を超えた年はなく、以降2011 (H23)年までにおいてもない。また、7月の総降水量が1938 (S13)年の519. 5mm を超えた年は1903 (M36)年7月の628. 0mm と1967 (S42)年7月の520. 8mm の 2 か年であるが、以降2011 (H23)年までにおいてははない。

大きな土砂災害の誘因となった降水量は、この地域にとってとてつもなく多量であったことがわかる。

表2. 6 「昭和13年,36年, 42年土砂災害発生」時の降水量 (気象庁 HP 資料より作成)

昭和13年阪神大水害前後 の降水量				昭和36年災害前後 の降水量				昭和42年災害前後 の降水量			
月日	降水量			月日	降水量			月日	降水量		
	日雨量	最大			日雨量	最大			日雨量	最大	
		1時間	10分間			1時間	10分間			1時間	10分間
6月27日	-	-	-	6月18日	-	-	-	7月1日	1.5	0.9	0.6
6月28日	0.7	0.7	0.4	6月19日	-	-	-	7月2日	75.6	26.9	10.5
6月29日	2.3	1.1	0.6	6月20日	-	-	-	7月3日	11.4	6.9	2
6月30日	0	-	-	6月21日	0	0	0	7月4日	0	0	0
7月1日	1.3	1.1	0.3	6月22日	-	-	-	7月5日	7.7	3.5	2.2
7月2日	7.2	1.5	0.5	6月23日	2.3	1.8	1.8	7月6日	0	0	0
7月3日	49.6	18.2	4.8	6月24日	76.8	19.4	4.8	7月7日	10.1	5.2	2.3
7月4日	141.8	17.2	6.4	6月25日	195.2	42	9.5	7月8日	41.7	23.1	11.2
7月5日	270.4	60.8	15.3	6月26日	127.7	40.2	9.7	7月9日	319.4	75.8	23.4
7月6日	0	0.5	0.5	6月27日	72.4	44.7	9.8	7月10日	0.5	0.5	0.4
7月7日	0.5	0	0	6月28日	37.2	13.1	5.4	7月11日	0	0	0
7月8日	7.2	5.8	1.7	6月29日	1.1	0.3	0.2	7月12日	41.5	19.2	6.3
7月9日	-	-	-	6月30日	0	0	0	7月13日	-	-	-
7月10日	-	-	-	7月1日				7月14日	0	0	0
7月11日	24.6	24.6	8.7	7月2日				7月15日	-	-	-

## 2)「昭和13年災害」(阪神大水害)

昭和13年7月(1938年7月)、神戸海洋気象台によると、3日には日雨量49.6mm、4日には日雨量141.8mm、土砂災害が発生した5日には日雨量270.4mmとなり、この3日間の積算雨量は461.8mmに達した。この時の被害状況については、兵庫県、神戸市等が災害誌として記録しているが、加藤(2007)は、最も激しい被害のあった住吉川流域において、武庫郡本山村の災害誌「本村山水禍録」の内容が充実しているとしてこれに書かれている被害状況を要約している。それによると、住吉川流域の被災の様子は次のようである。なお、本山村は、1889(M22)年の市制・町村制公布に伴い、野寄・岡本・田中・田邊・北畑・小路・中野・森の8村落から誕生した(同村は、1950(S25)年に神戸市と合併し、御影町・住吉村・魚崎町・本庄村とともに現在は東灘区となっている。)。1922(T11)年には神戸市の都市計画区域に編入されている。本山村を流れる主な河川は、住吉川、天上川、大谷川、要玄寺川等であり、住吉川左岸上・中流域に本山村はあった。住吉川右岸は住吉村、下流域は魚崎町である。

『本山村に激甚な災害をもたらしたのは住吉川の氾濫であった。7月3日及び4日の雨によって住吉川上流部の両岸が崩壊し、流木とともに巨礫を含む土砂が下流へ流出して川底を2m程度上昇させた。5日7時頃には住吉川に架かる阪神国道の通行は水位の上昇で危険な状態になった。8時頃には大規模な山崩れが発生し、阪急線鉄橋の北100m付近で右岸(住吉村側)堤防が決壊し、10時頃にはそれよりさらに上流100m付近で左岸(本山村側)堤防が決壊した。濁流は一気に野寄地区を襲い、第二小学校付近を経て田中地区へ到達。土砂の堆積は甲南高等女学校付近では約3mに達した。濁流は、省線(現JR神戸線)・阪神国道を越えて東進し、大谷川・天上川方面からの濁流と合流して魚崎町に流れ込み、ここでも大災害をもたらした。大谷川流域は暗渠になっていたためそれが塞がれ、溢れた濁流は岡本地区南部一帯に及び、住吉川の氾濫水と合流して田中地区へ流入した。

天上川流域では、岡本八幡谷より水の勢いが増し、岡本八幡神社を倒壊させ、付近の家屋のみこみながら北畑地区に流入し、両岸に氾濫しながら流下して省線・国道間に溢れ、魚崎町に達した。

要玄寺川流域では北畑妙見谷より伊勢講田の開墾地を崩壊させ、河道を変えて北畑地区に出て小路地区を泥土化した。要玄寺川左岸の耕地は水没し、支流と合流して省線・国道へ達した。

この災害により、本山村では死者11名(全体では600名以上)、その他重軽傷者は376名。住宅被害は、全戸数3,102戸のうち流出50戸、全壊221戸、半壊427戸、床上埋没112戸、床下埋没208戸、床上浸水80戸、床下浸水1,100戸の計2,198戸、総被害見積額は2,533,000円で、うち農業被害は、耕地の流失面積約16万m<sup>2</sup>、埋没面積約20万m<sup>2</sup>、浸水面積約9万m<sup>2</sup>、作付被害額約58,500円、山林被害は約20万m<sup>2</sup>、牛馬の被害は5頭であった』(加藤 2007)。(写真2.2および写真2.3)

以上からわかることは、斜面崩壊により直接的に被災するというものではなく、河川上流域からの土砂流出により下流河床が上昇して河川が氾濫するという形態の災害であったということである。

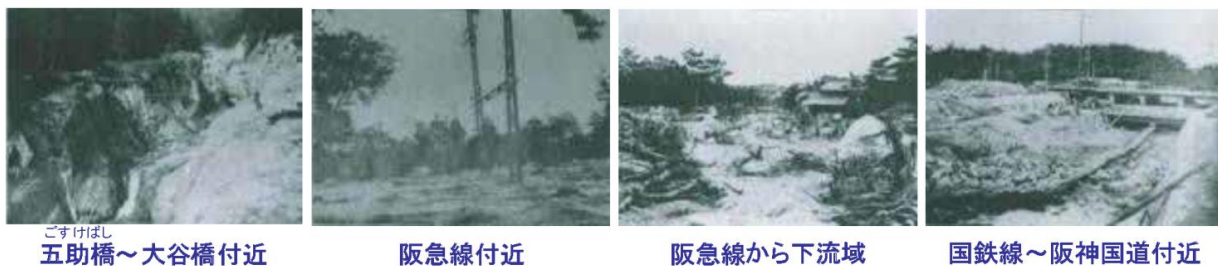


写真2. 2 住吉川流域の被害状況(「昭和13年7月豪雨」)  
 (「住吉川物語」より引用)

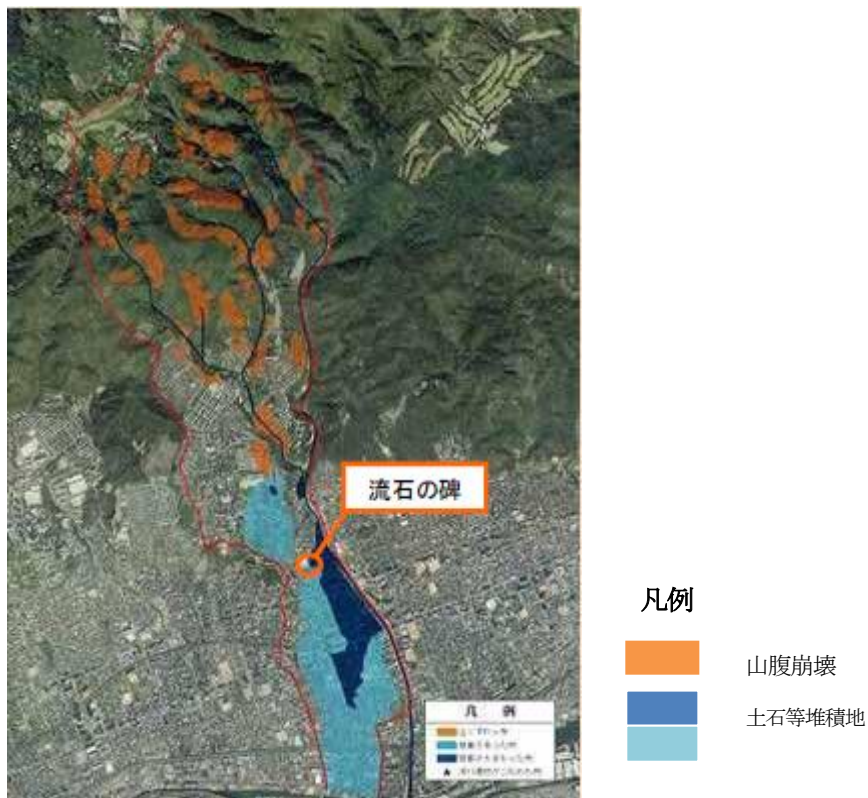


写真2. 3 住吉川の当時の被害の様子(「住吉川物語」より引用)

表2. 7 「昭和13年7月豪雨」による土砂堆積量(流出土砂量)(千 m<sup>3</sup>)

	市内堆積	山地堆積	貯水池堆積	海河口堆積	山崩れ箇所数	総体積量
妙法寺川	42	6		18	236	66
荊藻川	33	5		15	162	53
天王・石井川	152	7	300	60	442	519
宇治川	279	4		16	222	299
生田川	251	64	360	35	424	710
西郷川	109	3		4	95	116
都賀川	683	17		110	313	810
石屋川	208	8		50	186	266
住吉川	1543	26		160	449	1729
天上川	23	2		4	30	29
芦屋川	247	24	4	150	168	425

(「昭和13年災害資料(その2)表六甲地方の山津波」を参考に作成)

\*「生田川」は「新生田川」のことと思われるが、出典表記に基づき「生田川」とした。

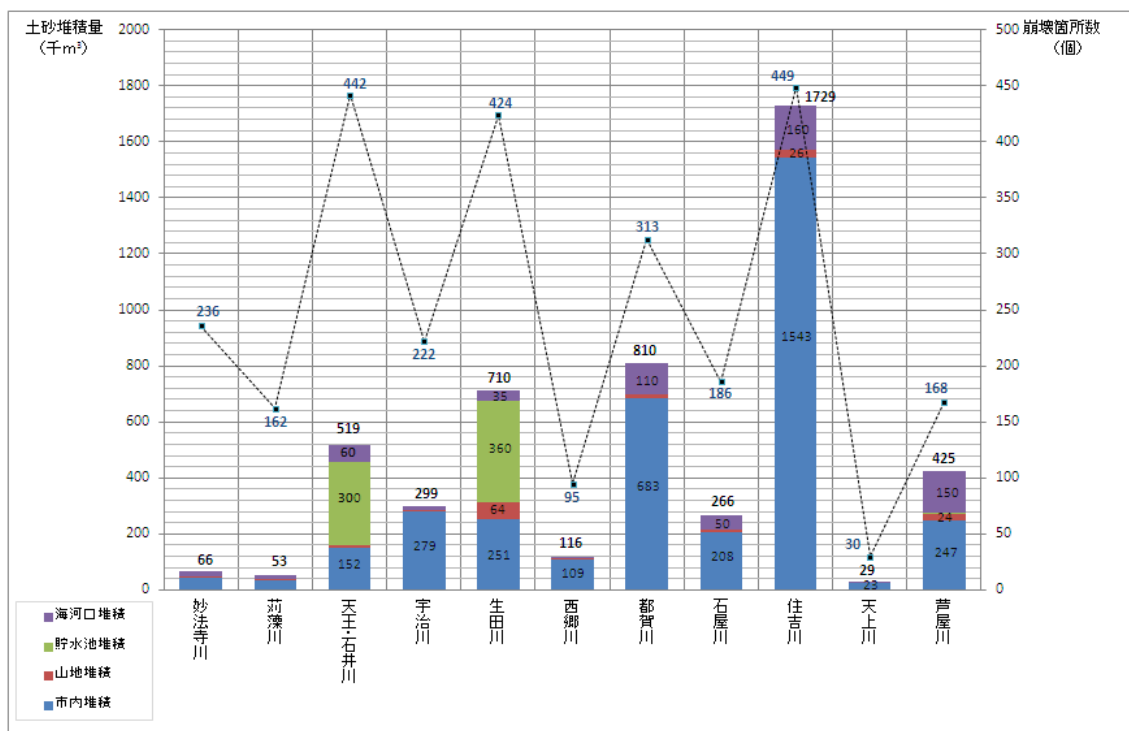


図2. 9 「昭和13年7月豪雨」による土砂堆積量(流出土砂量)(千 m<sup>3</sup>)

(表2.8より作成)

表2. 7は、「昭和13年7月豪雨」による流出土砂量を示したものである。これを図2. 9に整理した。山崩れ箇所数があるまま流出土砂量に反映しているわけではないようである。住吉川では市内堆積量、すなわち市街地に流出した土砂量が他の河川に比べて多かったことがわかる。

### 3)「昭和36年災害」

日本は高度経済成長期にあつて、六甲山麓でも宅地開発がさらに進行した(図2. 5)。

このような中で発生した六甲山麓での豪雨による災害は、「昭和13年7月豪雨災害」とは様相が全く異なってい

る。山麓の宅地地盤の崩壊・流出が卓越していたこと、市街地開発のために地下化されていた河川が流木や土砂により閉塞したことである。この災害を契機に、議員立法による宅地造成等規制法が成立した。

#### 4)「昭和42年災害」

日本において昭和42年を含む1960年代は、経済成長が続く一方で大気汚染や日照権などいろいろな公害問題が深刻化した時期でもある。先の阪神大水害から約30年を経過したこの時点では、六甲山や六甲山麓でも当時とは自然環境、社会環境が異なるところがいくつもある。特に、山麓部における宅地開発がそうである。

1961(S36)年の死者・行方不明者41名となった山麓部での土砂災害を契機に議員立法による宅地造成等規制法が成立していたにも関わらず、大阪に至近という地の利から六甲山麓部の宅地開発はさらに盛んに行われていた。図2. 5によると、「昭和13年災害」当時は標高40m程度までであった市街地は、1955(S30)年頃までには標高230m付近まで進み、それ以降さらに標高340m付近にまで進んでいる。一方で、建設省(当時)、兵庫県、神戸市による砂防施設、治山施設の整備や河川改修工事が進められてきており、砂防施設は、1967(S42)年までに六甲山系全体で直轄だけでも砂防堰堤174基、流路工9箇所、護岸工事7箇所、床固工5基が完成している。住吉川では砂防堰堤は13基完成している(表2. 13)。このような中で、1967(S42)年7月、熱帯低気圧となった台風7号は西日本に停滞していた梅雨前線を刺激して集中豪雨を西日本にもたらした。

神戸海洋気象台が観測した土砂災害発生時の降水量は、総雨量は371mmと昭和13年災害時より少なかったが、最大24時間雨量319.4mm、最大時間雨量75.8mmは「昭和13年7月豪雨」より大きかった。7日10.1mm、8日41.7mm、災害発生日の9日319.4mmを観測している。最も雨が激しかったのは9日20時頃で、災害発生もその頃と考えられている(出典:昭和42年7月豪雨に関連した大気じょう乱の構造について、松本誠、防災科学技術総合研究報告第24号、1970(S45)年)。

山腹崩壊による山麓での直接的な被害と、未改修の小河川から氾濫した流出土砂による下流市街地での被害が発生したものの、市街地にあふれた土砂量は「昭和13年災害」時よりも少なく被害も少ない(表2. 9, 表2. 10)。砂防施設の整備が功を奏したと考えられる。住吉川五助谷に完成していた五助堰堤(建設省)は、12万 m<sup>3</sup>の土砂を貯留したと記録されている(写真2. 4)。表2. 9からは昭和42年7月豪雨時の下流市街地への流出土砂量が「昭和13年7月豪雨」時と比較して大きく減少していることがわかる。砂防堰堤の整備はその後も引き続き行われ、六甲山系全体で2011(H23)年3月末までに500基以上が完成している。また、小河川は、1970(S45)年に都市小河川改修費補助制度が創設され、国・県の補助のもと各自治体が2級河川の改修に取り組むことになり、現在に至っている。

1967(S42)年には神戸市のほか、広島県呉市でも山腹崩壊による山麓部の直接的な被害という神戸市同様の災害が発生しており、急傾斜法制定の契機となった。表2. 11に「昭和13年、36年、42年豪雨災害」の特徴と当時の社会背景を示す。豪雨により常に多数の山腹崩壊が生じていたこと、時代を追うごとに山麓部への開発が進んだこと、開発に対する規制等が行われてきたことがわかる。

本来ならば、後述する「都市山麓グリーンベルト」はこの時点ですでに導入されるべきであったと考えられるのであるが、経済成長とそれに伴う山麓部の急激な宅地化のほうがこの時代から最近までの社会の要請であった。

表2. 8 「昭和42年7月豪雨」による土砂堆積量(流出土砂量)(千 m<sup>3</sup>)

河川名	水系	道路上堆積量	河川内流出量	海中堆積量	計
小屋谷川 ・ゴマ谷川 ・天井川	妙法寺川	0.34	0.53	33	33.87
湊川流域 ・長田区内	新湊川	8.5			8.5
新湊川 ・天王谷川	新湊川	26	20	54	100
楠谷川	宇治川		0.2		0.2
城ヶ口川 ・宇治川	宇治川	15	10.2	8	33.2
北野川	生田川	9	0.3	55	64.3
狐川 ・芋川 ・桜谷川	生田川	21.6	2.3		23.9
西郷川	西郷川		15	11	26
日柳川 ・貧乏川	都賀川	24.2	2.6	40	66.8
石屋川	石屋川		8		8
住吉川 流域	住吉川	2.3		48	50.3
背谷川 ・西天上川	天上川	11.7	2		13.7

(「六甲砂防三十年史」を参考に作成)

\*「生田川」は「新生田川」のことと思われるが、出典表記に基づき「生田川」とした。

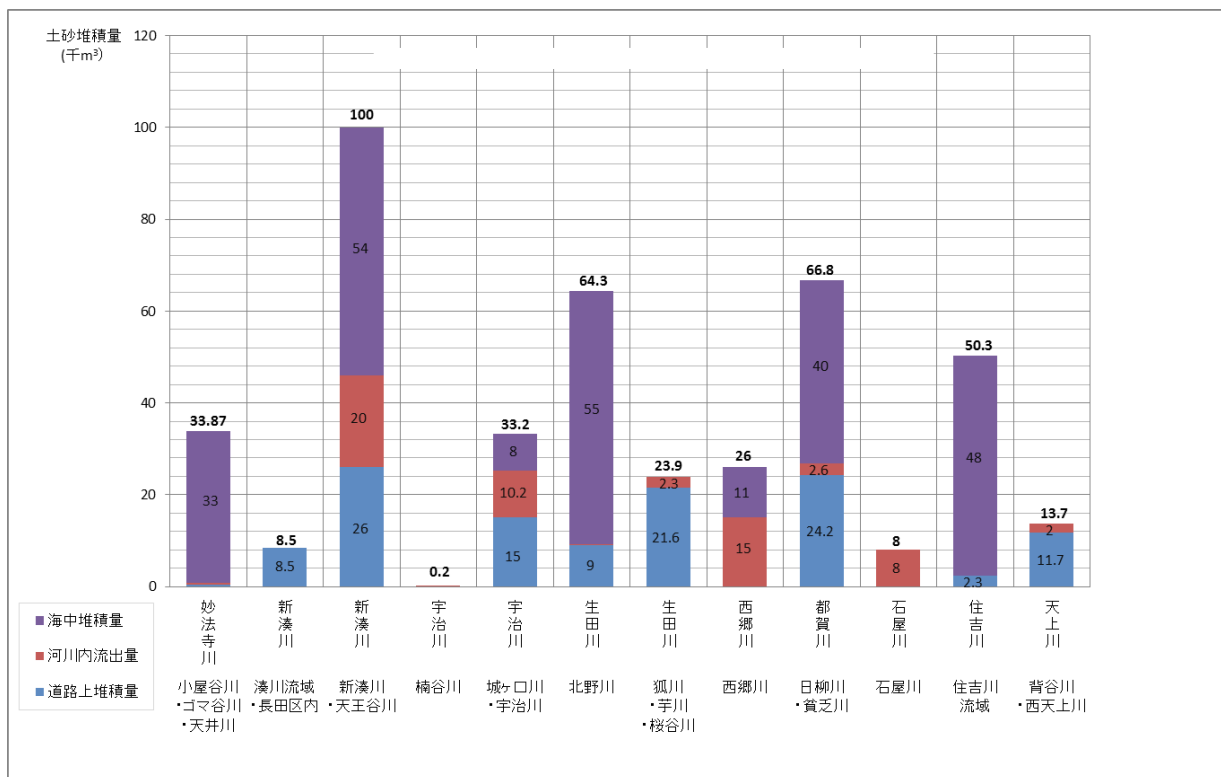


図2. 10 「昭和42年7月豪雨」による土砂堆積量(流出土砂量)(千 m<sup>3</sup>)

(表2. 9より作成)



災害前



災害後(12万m<sup>3</sup>の土石流を貯留)  
ちよりゅう

表 2.9 「昭和 13 年豪雨」と「昭和 42 年豪雨」時の住吉川の土砂堆積量(流出土砂量)比較

(千m<sup>3</sup>)

	昭和13年 a	昭和42年 b	b/a
市街地堆積量	1,543	2.3	1/1,000
河口堆積量	160	48	3/10
計	1,703	50.3	3/100

(表 2.8 の「市内堆積」「海河口堆積」および表 2.9 の「道路上堆積」「海中堆積」から作成)

写真 2.4 五助砂防堰堤が捕捉した土砂  
(1967(S42)年 住吉川)  
(「住吉川物語」より引用)

表 2. 10 「昭和13年、42年豪雨災害」発生時の市街地被災状況

	昭和 13 年 7 月 (1938 年)	昭和 42 年 7 月 (1967 年)
死者 行方不明者	695 人	98 人
被災家屋	150, 973 戸	38, 305 戸

(六甲砂防事務所 HP 資料より作成)

表 2. 11 「昭和13年、36年、42年豪雨」災害の特徴と社会背景

	S13災	S36災	S42災
災害の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土石流災害</li> <li>・山腹の崩壊(2,727ヶ所)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・山麓部の災害</li> <li>山腹崩壊(214)</li> <li>造成地の斜面崩壊</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中小河川の氾濫</li> <li>・流木災害</li> <li>・山腹崩壊(2,549)</li> </ul>
社会背景			
災害前	<ul style="list-style-type: none"> <li>・まだ裸地がある</li> <li>・神戸市人工100万人突破</li> <li>・六甲山に縦断道開通</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・宅開急増</li> <li>・(神戸市)宅造及び傾斜地に 関する条例の制定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・山麓開発さらに進む</li> <li>・中小河川に防災対策進んでいる</li> <li>・植林のマツクイムシ被害</li> </ul>
災害後	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主要河川への防災対策</li> <li>・山麓への宅開さらに進む</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・宅地造成等規制法による規制 区域の指定</li> <li>・しかし、さらに山麓開発進む</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・急傾法制定</li> <li>・流木対策の実施</li> <li>・人口は増加を続ける</li> </ul>

(六甲山系グリーンベルト整備事業検討委員会資料より引用)

## 5)兵庫県南部地震

1995(H7)年1月17日にM7.2の直下型地震が発生した。最大加速度818gal 最大震度7を観測し、特に神戸市の六甲山系南側では甚大な被害となった。六甲山系では、この地震動により山腹崩壊が約450カ所発生した。その後半年以内に、幾度かの降雨により、崩壊地の拡大や新たな山腹崩壊が生じ(図2.11, 富田ら 1996)、地震動により地盤がゆるんだことでこれまでよりも少量の雨で山腹崩壊が生じやすくなった(富田ら 1996)。実際に表2.5によると1997~2003(H9~H15)年間の年平均堆砂量はそれ以前と比べて算出されたいずれの流域も多くなっており、地震による崩壊と地震後の崩壊のしやすさが影響しているものと思われる。六甲山系では地震発生から約1年後までに地震による山腹崩壊にその後の降雨によると思われる新たな山腹崩壊を併せて1,685箇所確認できており(表2.12)、新たな崩壊と崩壊地の拡大は活断層沿いに分布している(図2.12)。また、分布が六甲山系東部に多いのはより急峻な地形が反映されているものと思われる。このようなことから、地震後、土砂災害に対する警戒避難基準雨量を引き下げて運用するとともに、六甲山麓の抜本的な土砂災害対策として、土砂災害危険箇所がれんたんする地域(写真2.5)の土地利用について、従来の砂防指定地の管理規則だけでは補足できなかった流域管理について、都市計画法等の枠組みも活用して実施する「六甲山系都市山麓グリーンベルト」を設定することになった。(図2.13)(中野ら1997)。

六甲山系の各流域の土地は、国・県・市・財産区などが所有する公有地と、個人や企業が所有する私有地が混在している。また、土地利用や管理の状況も様々で、砂防法、森林法、自然公園法、都市計画法等により土地利用の方針や規制が定められてはいるものの、流域管理を視点においた指定や指導内容とは必ずしもなっていない。砂防法も最近では線指定である場合が多く、面的な管理のためには不十分である。また、何ら法指定がなされていないために土地利用について規制や行政による指導の及ばない空白地域が存在している。都市山麓グリーンベルトは、それぞれの法律が現行の範囲内において、あるいは条例等により、流域管理も視点に入れた指定や指導のあり方を検討・実施し、また、空白地域への対応を連携して実施することを行政間の合意とすること、特に「市街地に面する斜面(Aゾーン)」の土地利用については人が居住地として利用しないことを市民の合意とすることとしたものである。このような考え方を背景に、兵庫県、神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市は1998(H10)年、都市山麓グリーンベルトのうち「市街地に面する斜面(Aゾーン)」を「防砂の施設」として都市計画決定した。このような下で砂防事業者が事業を実施する場合には、「緑地として保全することを基本とする」こととしたものである。この緑地保全には、砂防事業において「平時の土砂流出に対する考え方」を含めたものとなっている(富田ら 2001)。しかしながら、富田らの提唱はこれまでは概念に過ぎず、平時の土砂流出を砂防計画に反映させる具体的な手法は提示できていなかった。本研究により、ようやく具体の手法を示すことになる。



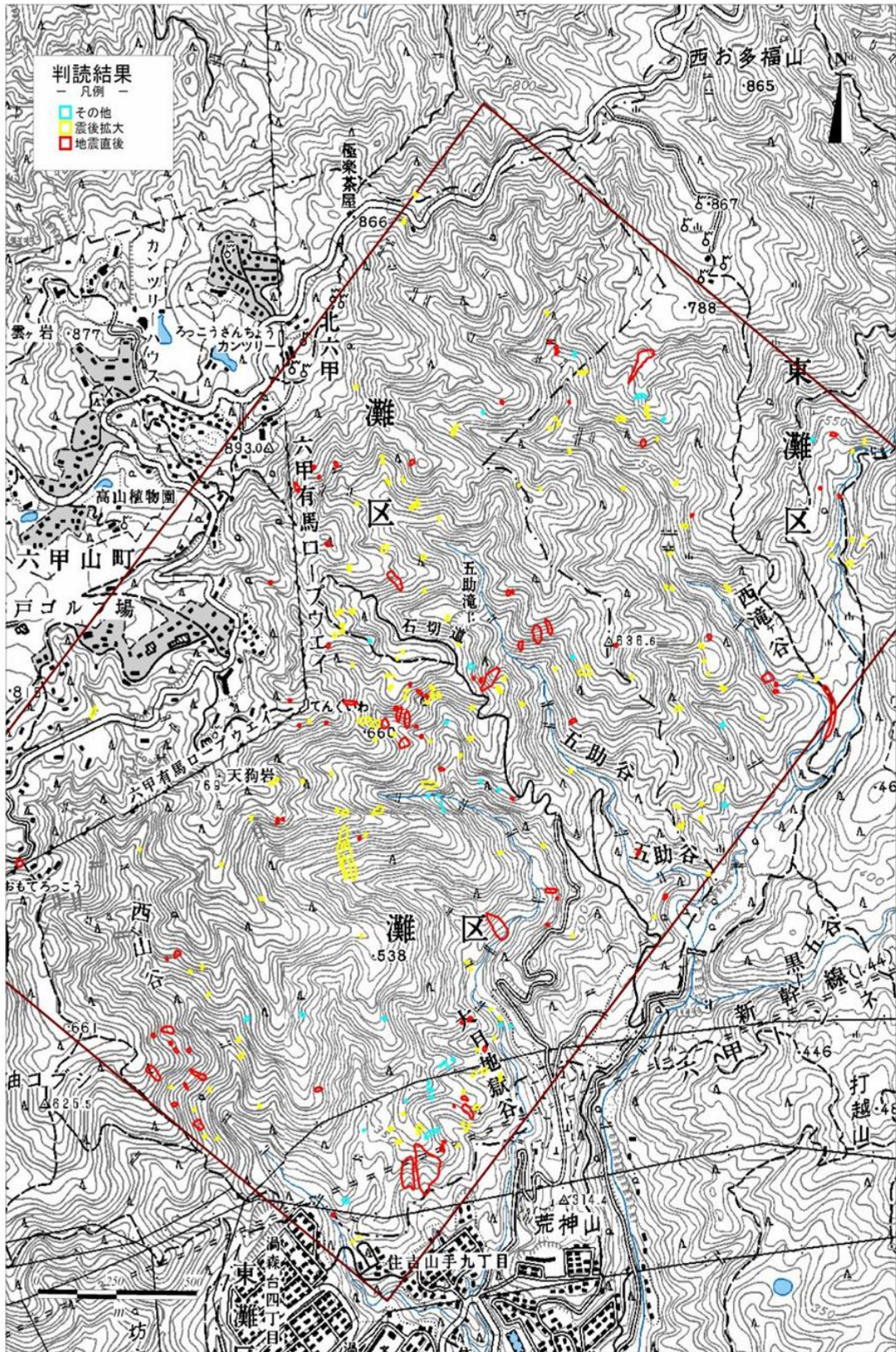


図2. 11 地震後の崩壊発生の変化(地震後1年間:住吉川流域)

(六甲砂防事務所資料より抜粋)

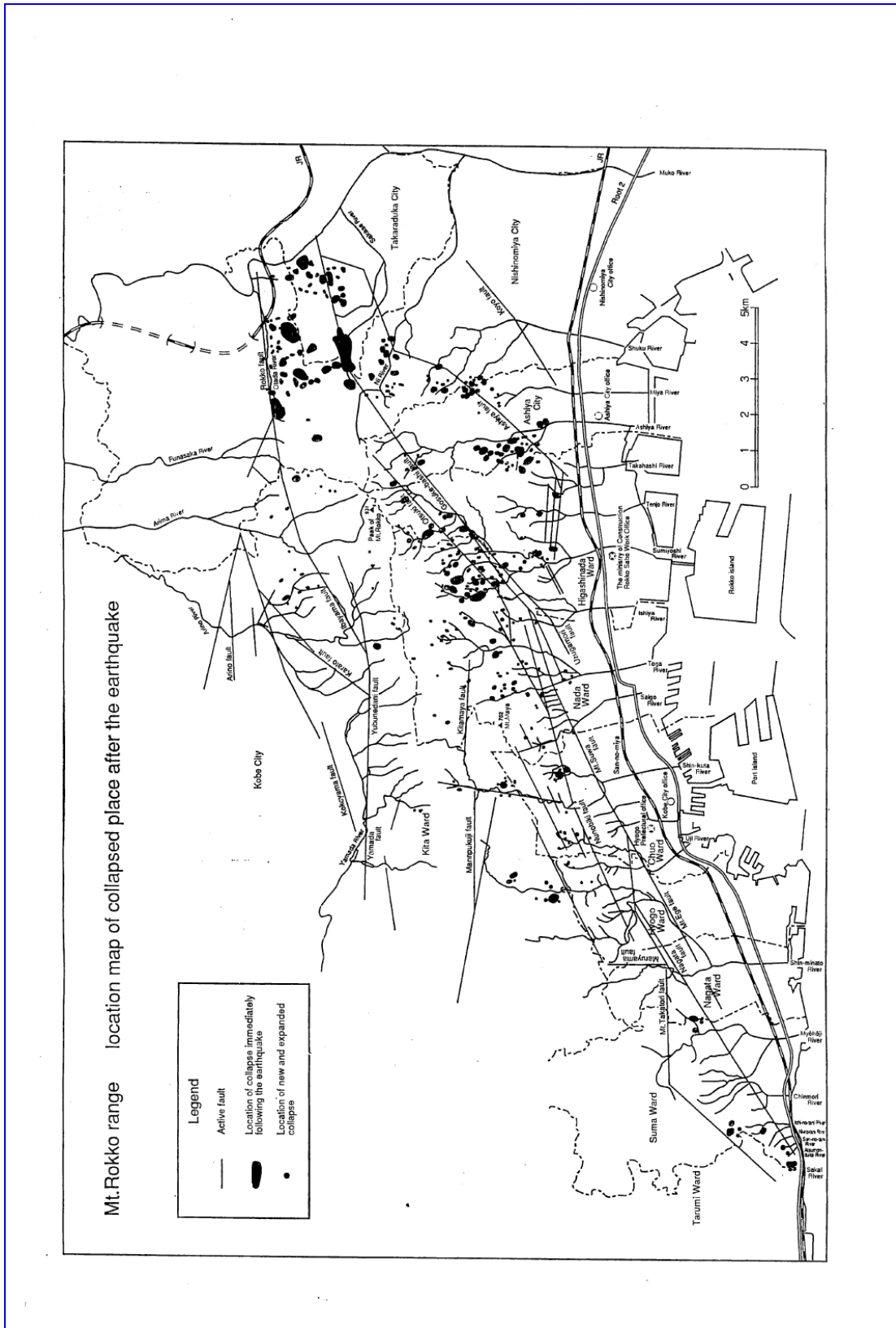


図2. 12 兵庫県南部地震(1995(H7))による崩壊地分布 (中野ら 1997)

表2.12 流域毎の地震による崩壊地(1996(H8)年3月時点)

河川名	崩壊地数	崩壊面積 (m <sup>2</sup> )	崩壊土砂量 (m <sup>3</sup> )	1km <sup>2</sup> に対して		
				崩壊地数	崩壊面積 (%)	崩壊土砂量 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )
堺川	11	2,190	8,060	47.6	0.95	34,890
敦盛塚川	0	0	0	0.0	0.00	0
二の谷川	8	120	430	26.7	0.04	1,430
一の谷川	12	720	3,830	17.1	0.10	5,470
千森川	7	430	1,890	10.0	0.06	2,700
妙法寺川	52	6,530	16,970	9.3	0.12	3,030
新湊川	34	3,850	6,560	1.7	0.02	330
宇治川	4	90	940	1.4	0.00	320
新生田川	84	4,830	23,030	7.2	0.04	1,970
西郷川	1	10	10	0.7	0.00	10
都賀川	63	6,780	15,800	8.4	0.09	2,110
石屋川	36	7,170	20,370	21.2	0.42	11,980
住吉川	328	44,380	59,710	30.1	0.41	5,480
天上川	13	680	1,380	5.7	0.03	600
高橋川	0	0	0	0.0	0.00	0
芦屋川	271	22,730	44,700	33.5	0.28	5,520
宮川	17	460	790	18.9	0.05	880
夙川	111	6,910	13,560	27.8	0.17	3,390
山田川	185	23,640	66,980	14.8	0.19	5,360
有野川	256	23,690	81,610	17.7	0.16	5,630
有馬川	133	42,220	223,810	15.7	0.50	26,380
船坂川	59	15,500	40,910	13.3	0.35	9,220
計	1,685	212,930	631,340	14.0	0.18	5,260

(桜井ら 1997)

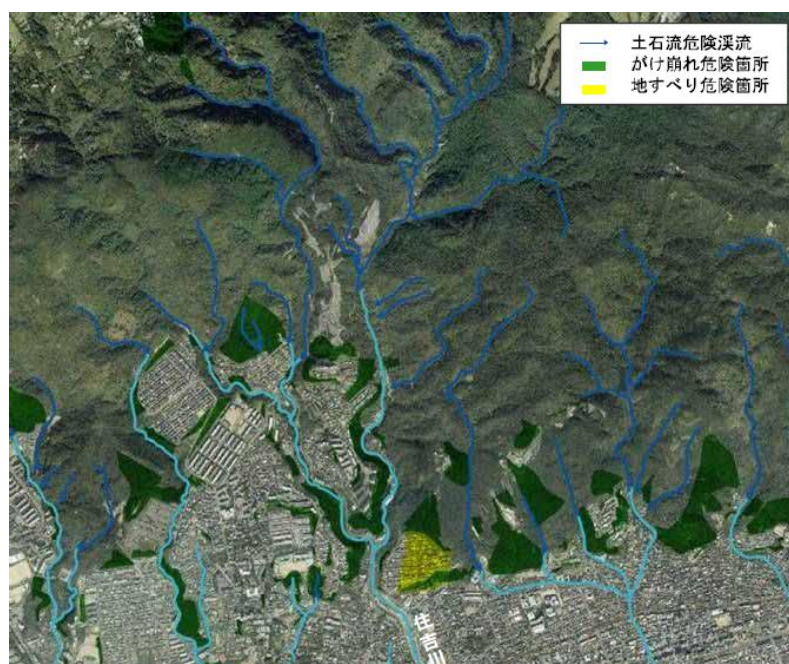


写真2.5 東灘区周辺の土砂災害危険箇所

(「住吉川物語」より引用)



図2. 13 六甲山系グリーンベルトの区域(1996 (H8)年3月現在)  
 (六甲砂防事務所 HP より引用)

## 2. 1. 5 砂防施設の整備状況

### 1) 砂防施設の整備状況

ここでは、第3章以降に研究事例地として取り扱う住吉川流域における砂防施設のうち、砂防堰堤の整備状況を示す。2000(H12)年度末までに完成した砂防堰堤は63基である。表2.13にその諸元を示す。なお2001(H13)年度以降2009(H21)年度までに完成した砂防堰堤はない。図2.14はその位置を示したものである。流域の下流では、砂防堰堤の周辺は市街化されている。住吉川は、流域面積11.16km<sup>2</sup>、主な支川は13である。

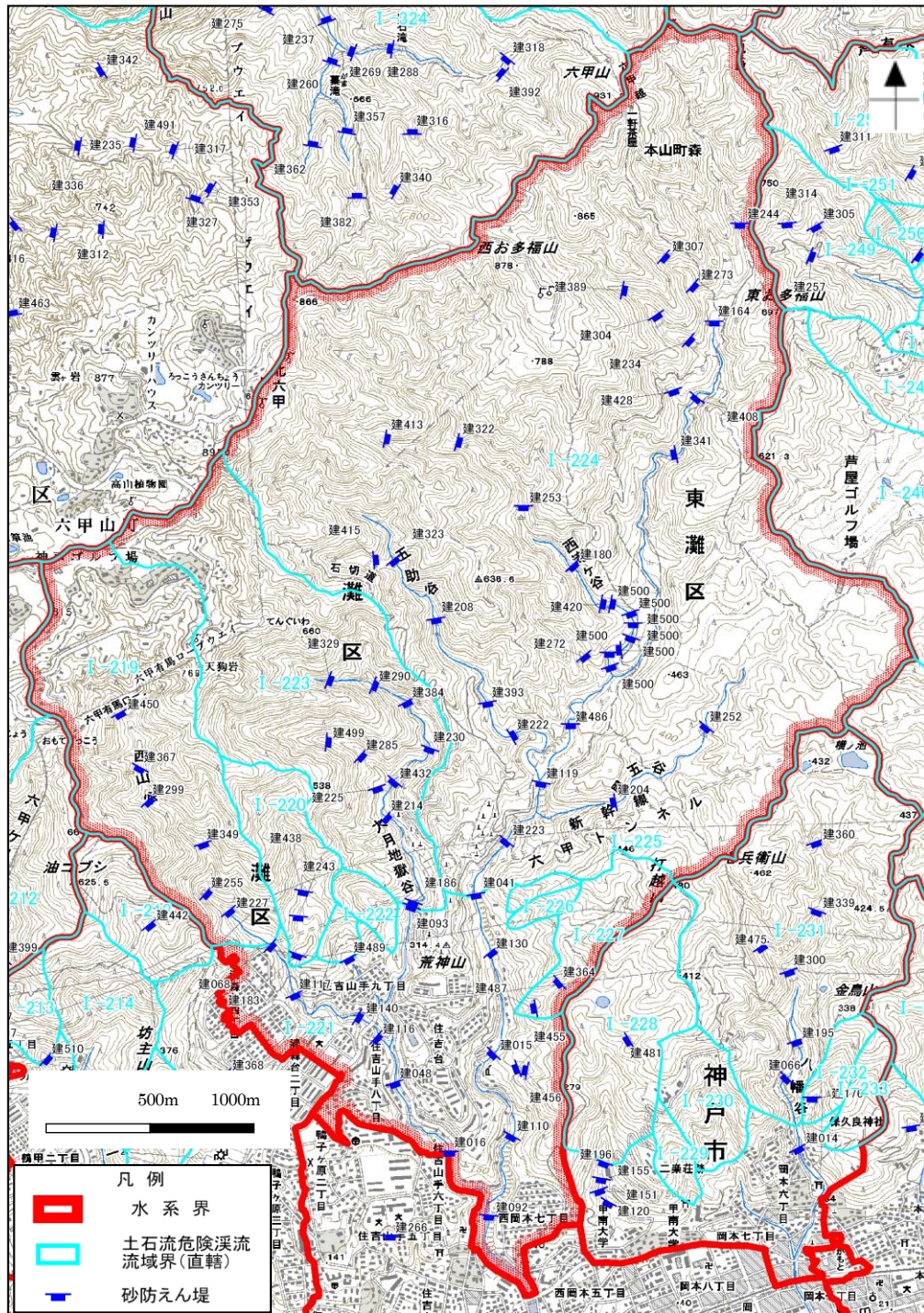


図2.14 砂防堰堤の位置図(住吉川流域:2000(H12)年度末までに完成)

(六甲砂防事務所資料より抜粋)

表2. 13 住吉川流域の既設砂防堰堤の諸元(2000(H12)年度末までに完成分)

施設 番号	堰堤名	竣工年	流域面 積 (km <sup>2</sup> )	標高 (m)	堰堤諸元									
					貯砂容量 (m <sup>3</sup> )	堤高(m)	堤長(m)	堤底幅 (m)	天端幅 (m)	水通幅 (m)	水通高 (m)	表法	裏法	
1	16	安場堰堤	s14	3.53	136	14,400	10	41	13	2.2	12	3	0.2	0.4
2	15	神楽岩堰堤	s15	7.43	180	33,400	15	70	12	2.4	18	4	0.2	0.4
3	48	赤塚堰堤	s16	3.1	176	20,000	13	42		2	12	3	0.2	0.5
4	68	千丈谷堰堤	s21	1.18	302	36,000	16	51		2	10	2	0.2	0.5
5	41	小峰ヶ原堰堤	s24	6.81	252	94,000	21	60	12	3	16	3.5	0.2	0.5
6	92	白鶴堰堤	s25	11.04	102	3,600	6	60	20	2	48	2	0.2	0.3
7	93	荒神山堰堤	s26	1.56	269	64,000	16	46	16	2.5	10	3	0.2	0.5
8	110	大谷堰堤	s27	8.15	-	17,100	9	34	10	2.4	12	1.5	0.2	0.4
9	116	西谷堰堤	s27	1.7	194	8,000	8	33		2	10	3	0.2	0.4
10	117	寒天山堰堤	s27	1.6	268	8,500	10	34	11	2	8	3	0.2	0.4
11	130	東谷堰堤	s29	7.4	203	19,000	13	24	12	3	8	2	0.2	0
12	140	西谷上流堰堤	s30	2.1	215	16,000	12	47	24	2	8	2.5	0.2	0.4
13	119	五助堰堤	s32	4.2	320	374,000	30	78		3.1	18	3	0.2	0.6
14	164	本庄堰堤	s44	1	581	130,000	20	102.7	19	2.5	17	2	0.2	0.6
15	180	水晶谷堰堤	s45	1.4	464	50,000	23	50	13	2.5	10	3	0.2	0.6
16	183	大月谷堰堤	s45	0.3	300	16,000	17	46	10	2	5	2	0.2	0.5
17	186	荒神山第二堰堤	s46	1.5	279	90,000	13.5	71	50	2.5	13	3	0.2	0.5
18	204	黒五谷堰堤	s49	1.35	359	68,000	16	62.5	20	2	15	2.5	0.2	0.5
19	208	五助谷堰堤	s49	0.9	466	86,000	28	50.5	12	2.5	7	3	0.2	0.6
20	214	荒神山第三堰堤	s49	1	319	13,000	18	47.1	15.6	2	10	2.6	0.2	0.5
21	222	五助上流堰堤	s50	0.92	355	23,000	14	64.5	14	2	10	2.5	0.2	0.5
22	223	小峰ヶ原第二堰堤	s50	6.5	27	9,500	11	38	22	2.5	15	4.6	0.2	0.6
23	225	大西谷堰堤	s50	0.25	340	4,300	13	36	12	2	5	2	0.2	0.5
24	227	千丈谷第二堰堤	s50	0.81	334	12,600	15	55	12	2	8	2.5	0.2	0.6
25	230	紅葉谷堰堤	s51	0.41	371	14,600	14	40	18	2	13	1.7	0.2	0.6
26	234	田辺谷堰堤	s51	0.4	600	9,400	15	56	12	2	6	2	0.2	0.6
27	243	大月谷第二堰堤	s51	0.3	323	4,300	11.5	42	10	2	6	1.9	0.2	0.5
28	244	黒岩谷堰堤	s52	0.4	641	23,900	18	56	15.9	2	8	2	0.2	0.6
29	255	千丈谷第三堰堤	s52	1	359	9,100	16	41	12	2	7	3	0.2	0.6
30	252	黒五谷第二堰堤	s54	0.85	390	86,600	15	83	14	2	10	2.5	0.2	0.6
31	253	水晶谷第二堰堤	s54	1.2	522	90,000	25	65.1	18	2.5	13	2.6	0.2	0.6
32	272	五助第二堰堤	s54	0.1	403	16,000	17	55	12	2	10	1.4	0.2	0.6
33	273	三条谷堰堤	s54	0.2	621	22,600	18	56	20	2	8	1.7	0.2	0.6
34	285	大西谷第二堰堤	s55	0.27	376	4,600	15	30	8	2	6	2	0.2	0.6
35	290	紅葉谷第二堰堤	s55	0.64	434	16,800	18	39.8	14	2	10	2.3	0.2	0.6
36	299	千丈谷第四堰堤	s56	0.91	504	16,050	15	42	12	2	8	2.6	0.2	0.6
37	304	田辺谷第二堰堤	s56	0.31	641	12,600	17	64	10	2	6	2.1	0.2	0.6
38	307	三条谷第二堰堤	s57	0.17	661	11,830	17	44	23	2	6	1.8	0.2	0.8
39	322	水晶谷第三堰堤	s58	0.92	585	57,630	25	63	10	2.5	8	2.8	0.2	0.8
40	323	五助谷第二堰堤	s58	0.45	545	27,360	18	55	16	2	8	2.2	0.2	0.8
41	329	紅葉谷第三堰堤	s59	0.18	506	9,200	16	45	11	2	6	1.8	0.2	0.8
42	341	本庄第二堰堤	s59	1.62	500	64,100	17.5	49	20	2.5	16	2.7	0.2	0.8
43	349	千丈谷第五堰堤	s60	0.91	431	23,500	20	34	10	2	7	3	0.2	0.8
44	364	神楽岩上流堰堤	s61	0.18	289	8,910	15	52	11.8	2	6	1.7	0.2	0.7
45	367	千丈谷第六堰堤	s62	0.63	534	15,164	14	49	15.1	2	8	2.3	0.2	0.6
46	384	紅葉谷第四堰堤	H1	0.68	406	17,658	19	39	9.9	3	7	2.5	0.2	0.7
47	389	田辺谷第三堰堤	H1	0.24	693	8,901	17	54	9	3	5	2	0.2	0.7
48	393	五助上流第二堰堤	H1	0.81	391	32,745	18.5	58	12.4	3	8	2.5	0.2	0.7
49	408	本庄第三堰堤	H3	1.37	542	108,562	20	87.5	19.4	3	15	2.5	0.2	0.7
50	413	水晶谷第四堰堤	H4	0.14	662	21,567	23	53.5	9.6	3	6	1.6	0.2	0.7
51	415	五助谷第三堰堤	H4	0.12	567	24,000	27.5	54	8.6	3	5	1.6	0.2	0.7
52	420	西滝ヶ谷堰堤	H5	1.4	432	20,400	14.5	78	36	3	10	2.9	0.2	0.5
53	428	本庄第四堰堤	H6	0.14	555	10,752	16	43.5	11	3	8	1.2	0.2	0.7
54	432	荒神山第四堰堤	H6	0.79	343	31,797	19	63	16.7	3	10	2.3	0.2	0.8
55	438	大月谷第三堰堤	H7	0.18	351	8,126	14.5	43	9.8	3	6	1.4	0.2	0.5
56	450	千丈谷第七堰堤	H7	0.21	595	8,214	14.5	36	11.2	3	6	1.8	0.2	0.5
57	455	十文字鋼製枠堰堤	H7	-	-	2,342		6	46		3	0	0.2	0
58	456	十文字堰堤	H8	-	215	1,941	10	33		3	3	0.9	0.2	0.3
59	486	五助第三堰堤	H9	3.93	347	83,309	22	75.8	20.8	3	15	3.9	0.2	0.8
60	487	神楽岩第二堰堤	H9	0.19	257	25,159	20	85.7		3	4	1.6	0.2	0.7
61	489	焼ヶ原堰堤	H10	0.04	269	9,667	14	101	50	3	6	1.4	0.2	0.4
62	499	大西谷第三堰堤	H11	0.19	428	23,605	21.5	52.5	10	3	6	1.4	0.2	0.8
63	500	西滝ヶ谷低ダム群	H11	-	-	7,111	5	24	14	3	8	2	0.2	

(六甲砂防事務所資料より抜粋)

## 2) 現行の施設配置計画の考え方

六甲山系も含めて、全国の一般的な砂防施設の配置計画は、砂防基本計画で決定した各計画基準点ごとに計画対象土砂量に対して最も合理的かつ効果的となるよう砂防施設の位置と規模を決定することになっている。具体的方法は「河川砂防技術基準」(国土交通省 2012)や「砂防・地すべり・がけ崩れ・雪崩防止工事ポケットブック」(池谷ら 2001)に記載されている。

計画基準点とは、対象溪流流域内で取り扱う土砂量を決定する地点のことで、対象溪流流域の最下流端、あるいは土石流区域と掃流区域の境界点とする場合が多い。計画対象土砂量には、計画生産土砂量、計画流出土砂量、計画許容流砂量、計画超過土砂量がある。それぞれ意味と算定方法の考え方を次に示す。

### ・計画生産土砂量

計画規模の降雨によって、山腹および溪岸での新規崩壊土砂量、既往崩壊地の拡大見込み土砂量、既往崩壊の残土量のうち河道に流出するものおよび河床に堆積している土砂のうち出水によって流出する土砂量。算定は、土砂の生産形態別に流域の特性を考慮する。たとえば、崩壊に関しては崩壊率、流域面積、平均崩壊深、残土率、土量の変化率を考慮する。表面侵食土砂量は降雨量との関係式を求めて決定する。河床堆積物の再移動には既往災害における河床変動調査資料を参考にする。

### ・計画流出土砂量

計画生産土砂量のうち、土石流または流水の掃流力によって運搬されて計画基準点に流出する土砂量。流域の特性、河道の調節能力などを考慮して決定する。

### ・計画許容流砂量

下流河道の安定のために計画基準点より下流に流下させるべき土砂量。掃流力、流出土砂の粒径、下流の状況などを考慮して決定する。

### ・計画超過土砂量

砂防基本計画における土砂処理計画の対象となる土砂量。計画基準点ごとに計画流出土砂量から計画許容流砂量を差し引いた値。

計画生産土砂量、計画流出土砂量、計画許容流砂量ともに、それぞれの流域での調査に基づいて設定することになっている(国土交通省 2012)が、実際には過去の災害資料をもとにした表2. 14に示すような参考値が示されており(日本河川協会 1971)、詳細な現地調査に基づかなくても算出できる。また、一旦生産された土砂は、途中で砂防堰堤に堆積する量と、河道調節という考え方で一定の率をかけて河道に堆積残存する土砂量を見込みながら差し引きの量で下流へ流出する算定方法であるため、算出された数量は安全側に寄りすぎる場合が多く現実的ではないとの議論がしばしばある。

六甲山系においては、計画対象土砂量については、六甲山系の既往最大である「昭和13年災害」時の流出土砂量を参考に定めている。計画許容土砂量は、下流河川への土砂混入率として高水流量の10%以下の容積となるよう設定されている(表6. 4)。

表2. 14 流出土砂量(河川砂防技術基準(案)より)

土石流区域(標準流域面積1km <sup>2</sup> の場合)	
1)花崗岩地帯	50,000～150,000m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> / 1洪水
2)火山噴出物地帯	80,000～200,000 //
3)第三紀層地帯	40,000～100,000 //
4)破碎帯地帯	100,000～200,000 //
5)その他の地帯	30,000～80,000 //
掃流区域(標準流域面積10km <sup>2</sup> 、年超過確率1/50の場合、1/100の場合は1.1倍とする)	
1)花崗岩地帯	45,000～60,000m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> / 1洪水
2)火山噴出物地帯	60,000～80,000 //
3)第三紀層地帯	40,000～50,000 //
4)破碎帯地帯	100,000～125,000 //
5)その他の地帯	20,000～30,000 //

## 2. 1. 6 まとめと六甲山系の土砂災害対策の今後の課題

六甲山系の流域は、地形・地質の観点から潜在的に土砂生産・流出の危険性を孕んでいるが、砂防施設の整備が進められており(表2. 13、図2. 14)、ほぼ同規模の降雨量を記録した「昭和13年7月豪雨」と「昭和42年7月豪雨」を比較すると、流出土砂量も市街地の被災程度も低減している(表2. 9、表2. 10)。また、明治初期にはほぼ全山がはげ山だったが、現在は山地斜面の約70%はおおむね良好な植生に覆われており(表2. 19)、緑の保全是震災復興の柱の一つとなっている。砂防事業・治山事業が着手された頃とは社会事情も自然環境も大きく変化してきている。1995(H7)年には地震動により斜面崩壊が多数発生し生産土砂量が増加していると考えられるが、それは河川ごとに大きく異なっている(表2. 12)。地震発生以降これまでの間大きな降雨がないことから崩落土砂のほとんどは山腹斜面にとどまるか崩壊斜面直下の溪床にとどまっていると考えられ、今後はこれらがどのような降雨の時にどのように移動するのかを予測して既存の砂防施設の維持管理や新たに設置する砂防施設の配置・規模に反映させる必要がある。

土砂移動の予測については、これまでは実測把握されてきていなかった平常時の降雨時の斜面上の土砂の動きや溪流の流量や土砂の動きについて、観測によりある程度状況を把握できるようになってきた。これにより、溪流のどこでどのような土砂動態に対応していくのかといった、各河川のゼロ次谷を含めたすべての降雨時の土砂動態等を基本とする整備計画の策定が可能となると考えられ、これにより、より適切な既設砂防堰堤の補修・除石を含めた砂防計画・砂防施設配置計画を立案していくことが可能になる。



## 引用・参考文献

兵庫県立工業学校:昭和13年災害資料(その2)表六甲地方の山津波 昭和13年8月実地調査

池谷宏・吉松弘行・南哲行・寺田秀樹・大野宏之(2001):「現場技術者のための砂防・地すべり・がけ崩れ・雪崩防止工事ポケットブック」, 山海堂, p.49-56

加藤尚子(2007):昭和13年「阪神大水害」における旧本村山(現神戸市東灘区)の災害対応と復旧支援、自然災害科学 J.JSNDS 26-3 291-305

気象庁 HP:<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>

神戸市 HP:<http://www.city.kobe.lg.jp>

(財)神戸都市問題研究所:都市政策 第142号,p.6-63

建設省六甲砂防工事事務所(1974):「六甲砂防三十年史」

国土交通省(2012):「河川砂防技術基準 調査編」

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所:六甲山系グリーンベルト整備事業計画検討委員会資料、1995

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所 HP:<http://www.rokko.kkr.mlit.go.jp>

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所:「六甲の川物語 みんなで語り、伝えよう!住吉川物語」

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所:「住吉川について 第1回検討委員会資料④」、H18.10.30

日本河川協会(1971):「建設省河川砂防技術基準(案)」

中野泰雄・富田陽子・桜井亘(1997):兵庫県南部地震後の土砂災害対策、地形、第18巻第3号,p.277-295

桜井亘・富田陽子・中庸充・岡野和行(1997):兵庫県南部地震による崩壊の現地調査結果について、第46回砂防学会研究発表会概要集、p.52-53

田中真吾(1988):「六甲山の地理・その自然と暮らし」,神戸新聞総合出版センター

富田陽子・桜井亘・中庸充(1996):六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について、砂防学会誌、Vol.48, No.6, p.15-21

## 2.2 植生の変遷

国内で禿げ山が広く分布していた時代、六甲山系もその例外ではなく、明治初期にはすでにほぼ全山が禿げ山であった。阪神間は早くから人の居住が始まり、六甲山系は常に人為にさらされてきた。また、本格的に開発が始まる(すなわち、地域が活性し、居住がますます進む)ようになると、禿げ山であるということ、また、禿げ山からの土砂流出は開発・まちの発展に様々に支障を及ぼすこととなった。六甲山の緑化事業は100年以上の歴史がある。

ここでは、六甲山系の植生の変遷について整理し、植生の回復が都市環境の保全という面だけではなく、砂防指定地管理の観点から重視されてきた点について明らかにする。

### 2.2.1 六甲山系の植生分布と人々の生活(里山から奥山へ)

六甲山系を覆う植生の原型は5～6千年前頃の縄文時代に成立したとされる(表2. 15)。氷期が終わったこの頃の平均気温は現在よりも2～3℃程度高く、大阪湾の海面は現在より2～3m程度高かった。このため、海岸線は現在の国道43号からJRあたりまで入り込んでいて、弥生時代に農耕が始まるまでは山系周辺はほとんど人手のはいらない鬱蒼とした原始林が広がっていたと考えられている。標高900m付近ではブナ・ミズナラなどの温帯落葉広葉樹林が存在し、標高800～600m付近にはモミ・コウヤマキ・イヌブナ・コナラなどの針広混交林が分布し、さらに高度を下げて中腹から山麓にはアカガシ・ウラジログガシなどのカシ類や、シイなどの照葉樹林が繁茂していた。さらに、現在は市街地となっている所にもクスノキ、シイ、シラカシなどが林を作り、ハンノキが湿地の林を形成していた(たとえば、前田ら 1980)。

これらの林は、稲作農耕の開始とともに山麓の照葉樹林は伐採されアカマツを中心とする二次林になり、いわゆる里山として利用・管理されるようになった。一方で、中世は戦乱の時代でもあり、六甲山系にも摩耶城(摩耶山)や多々部城(再度山)などいくつかの山城が築かれ、この山城を中心に山麓から中腹は合戦の舞台となった。合戦により山火事が発生し森林も相当被災した。また、村の入会地(共有地)における乱伐も発生した。山火事跡や裸地にはアカマツが侵入し、花崗岩(酸性岩)からなる六甲山の土壌とよく適合して広くアカマツ林が形成されていった。ただ、中腹から山頂にはまだカシ、イヌブナ、ブナ、ミズナラなどの自然林は残された。奥山まではまだ開発されなかった。しかしながら、これらの植生は、近世にはいってほとんどが失われた(たとえば、前田ら

1980)。「開港神戸之図」(1868(M1)年)では山麓を除いてほとんど樹木はみられない。また、山鳥(1944)によると、明治時代には六甲山の南斜面は山麓部のマツ林と、大龍寺、天上寺付近を除いて山頂までほとんど裸地となっていた。大龍寺、天上寺にみられる樹林はシイ・カシなどの広葉樹や、スギ・ヒノキなどの針葉樹である。北斜面は、マツ林とコナラークヌギ林が広く分布していた。近世における裸地化の理由として、中世以降のさらに中腹から山頂に至る村の入会地(共有地)における燃料材や肥料等の無秩序な採取の結果と考えられている。また、山火事の記録も多数あり、明治以降においても1938(S13)年までの間に1923(T12)年、1928(S3)年に山林火災発生記録がある。

特に1928(S3)年には、神戸市灘区から芦屋川上流に至る約600ha が山林火災により焼失したとの記録がある(表2. 4)。この位置はほぼ住吉川と芦屋川の流域に相当し、住吉川流域(約11km<sup>2</sup>)と芦屋川流域(約9km<sup>2</sup>)の

うちの30%程度の植生が焼失したことになる。両流域ではこの後、1933(S8)年から1942(S17)年にかけて兵庫県砂防事業により植林が行われている(表2. 16)。

表2. 15 六甲山の植生の移り変わり

	六甲山の森	林相	備考
約1万5000年前	全体がトヒ、コツガなどの針葉樹林でおおわれる	針葉樹林	大阪湾一帯は広大な盆地状の湿原
約1万年前	全体がブナ、イブナ、ミナラ、コナラなどの落葉樹林でおおわれる	落葉樹林	気温の温暖化のため海面が上昇
約6千年前	中腹以下では照葉樹林、それより上では落葉樹林	常緑・落葉混交林	気温の上昇にともない落葉樹林と照葉樹林が置き換わる
約5千年前	山頂部一帯にブナ、ミナラなどの落葉樹林、それより下では照葉樹林	常緑・落葉混交林	気候的には現在よりも2～3℃高い
約2千年前(縄文～弥生時代)	照葉樹林が減少し、マツ、コナラなどの2次林が増加する	マツ、コナラの2次林	人類の生産活動が拡大し、2次林が増加する
中世の時代(戦国時代)	崩壊地や裸地にアカマツがひろがる	アカマツの2次林	樹木の伐採、戦いによる山火事により、自然林は破壊される
近世の時代(江戸～明治時代)	山麓を除いてほとんど樹木はみられない	はげ山	農民による燃料・肥料用の樹木等の略奪
明治末期以降	マツ、スギ、ヒノキ等の植林が行われる	若齢の植林地	土砂流出による水害を防ぐため植林が盛んに行われる
現在	アカマツ、コナラを主体とした2次林であるが、山頂付近や中腹の社寺に自然植生であるブナ林や杉林が点在する	マツ、コナラの2次林	植林後約100年たち、植生が復元されている

六甲山の植物(近藤ら,1992),六甲の森と大阪湾の誕生(前田ら,1980)より作成

## 2. 2. 2 土砂災害防止と水源涵養

表2. 16および表2. 17は、砂防法施行(1897(M30)年)前後からの六甲山系における施工機関別の山腹工の推移である。六甲山系で治山治水を目的に植林が開始されたのは1895(M28)年兵庫県によるもので、仁川、逆瀬川、太多田川等の流域で山地緑化と流路整備に着手している。続いて神戸市が1902(M35)年から植林を開始している。なお、表2. 16と表2. 17は、可能な限り情報収集したが、整合していないところがある。

1890(M23)年神戸市にコレラが発生したことから、神戸市は水道の整備を検討し、生田川(現 新生田川)に貯水池(現在の布引貯水池)の建設を計画した。当時東京大学本多静六博士に造林について立案を依頼している。神戸市は当初、布引貯水池の水源の涵養を目的としていたが、本田博士から土砂流出による災害から市街地を守るためにも六甲山系に植林が必要であると提言された。神戸市はこれを受けて1902(M35)年から植林を開始した。1903(M36)年には再度山地区で植林を開始して植栽樹種に多少の変化をもちながら平成の時代まで施業を続けている。

当時は表六甲の再度山から摩耶山にかけて主として神戸市が、六甲山系東部及び北部を兵庫県の砂防事業が実施するという分担になっているようにみえるが、再度山修法ヶ原周辺も1904(M 37)～1905(M38)年に砂防法が適用され兵庫県砂防事業により山腹工が着工された。当時施工された石積の谷止工は今も多数残存している。植栽樹種は、初期の頃はヒノキ、スギ、クロマツ等が主体であったが、その後オオバヤシャブシ、ヒメヤシャブシ、ニセアカシアなどが植栽されるようになり、現在では裸地・崩壊地の有無に関わらず、既往植栽地においても偏向遷移がみられる場合には林相転換を目的として緑化常緑広葉樹、落葉広葉樹など多様な樹種が植栽されている。

表2. 17に整理した緑化施工面積66. 252km<sup>2</sup>は、六甲山系の面積を北は太多田川―有馬―山田川を結ぶ線、西を妙法寺川、東は甲山、南を市街地の線で囲むほぼ150km<sup>2</sup>とすると、六甲山系の約44%に及ぶ。再度山修法ヶ原一帯の大部分は現在、1903(M36)～1907(M40)年にかけてのアカマツ、クロマツを主体とした植栽に由来するアカマツ林で、2011(H23)年時点で100年以上が経過しており、群落高20m前後のアカマツ―モチツツジ群落となっている。

表2. 16 六甲山系における山腹工の推移

西暦	年号	兵庫県砂防	建設省 直轄砂防	営林署 直轄治山	営林署 民有林治山	兵庫県治山	神戸市植林	備考
1895	明治28	開始 六甲山系北部・東部 (逆瀬川等)						六甲山系砂防事業の始まり
1896	明治29							
1897	明治30							
1898	明治31							
1899	明治32							
1900	明治33							
1901	明治34							
1902	明治35							
1903	明治36							
1904	明治37							
1905	明治38							
1906	明治39							
1907	明治40							
1908	明治41							
1909	明治42							
1910	明治43							
1911	明治44							
1912	大正1	湊川 六甲山系北部・東部 (船坂川等)				補助開始 位置不明	開始 生田川・再度山 ヒノキ・スギ・クロマツ 主体 クスギ・カシ・カエデ ハゼノキ	
1913	大正2							
1914	大正3							
1915	大正4							
1916	大正5							
1917	大正6							
1918	大正7							
1919	大正8							
1920	大正9							
1921	大正10							
1922	大正11							
1923	大正12							
1924	大正13							
1925	大正14							
1926	昭和1	船坂川完成				再度山等	再度山等	
1927	昭和2							
1928	昭和3							
1929	昭和4							
1930	昭和5							
1931	昭和6							
1932	昭和7							
1933	昭和8							
1934	昭和9							
1935	昭和10							
1936	昭和11							
1937	昭和12							
1938	昭和13							
1939	昭和14							
1940	昭和15							
1941	昭和16							
1942	昭和17							
1943	昭和18							
1944	昭和19							
1945	昭和20							
1946	昭和21							
1947	昭和22							
1948	昭和23							
1949	昭和24							
1950	昭和25							
1951	昭和26							
1952	昭和27							
1953	昭和28							
1954	昭和29							
1955	昭和30							
1956	昭和31							
1957	昭和32							
1958	昭和33							
1959	昭和34							
1960	昭和35							
1961	昭和36							
1962	昭和37							
1963	昭和38							
1964	昭和39							
1965	昭和40							
1966	昭和41							
1967	昭和42							
1968	昭和43							
1969	昭和44							
1970	昭和45							
1971	昭和46							
1972	昭和47							
1973	昭和48							
1974	昭和49							
1975	昭和50							
1976	昭和51							
1977	昭和52							
1978	昭和53							
1979	昭和54							
1980	昭和55							
1981	昭和56							
1982	昭和57							
1983	昭和58							
1984	昭和59							
1985	昭和60							
1986	昭和61							
1987	昭和62							
1988	昭和63							
1989	平成1							
1990	平成2							
1991	平成3							
1992	平成4							
1993	平成5							
1994	平成6							
1995	平成7							
1996	平成8							

\*河川名等の表記は出典に基づく

表2. 17 施工機関別の山腹工の推移

	神戸市		兵庫県	兵庫県	大阪営林局 km <sup>2</sup>
	砂防植栽 km <sup>2</sup>	人工造林 km <sup>2</sup>	砂防事業 km <sup>2</sup>	治山事業 km <sup>2</sup>	
～1903(明治36年)	0.027		3.06 (0.963)	0.059	
1904(明治37年) ～1913(大正2年)	5.100	1.660	4.9 (0.467)		
1914(大正3年) ～1923(大正12年)	3.990	1.670	2.15 (2.307)		
1924(大正13年) ～1933(昭和8年)	1.110	0.240	3.13 (0.172)		
1934(昭和9年) ～1943(昭和18年)		4.020	0.078 (0.046)	(8.731)	
1944(昭和19年) ～1953(昭和28年)		5.110		(9.824)	0.773
1954(昭和29年) ～1963(昭和38年)		0.900		(3.650)	0.010
1964(昭和39年)～		0.530		(1.520)	0.055
計	10.227	14.130	13.318 (3.955)	0.059 (23.725)	0.838

施工図面から読み取った面積を基に算出した面積

( )書きは施工台帳に記載されている面積

施工図面と施工台帳に記載された面積の違いの理由は不明

### 2. 2. 3 現在の六甲山系の植生

明治以降、山林火災による焼失はあったものの、約100年をかけて六甲山系の植生は復元されてきた(写真2. 6)。現在の植生の大部分はアカマツ林、コナラ林である。ブナ・イヌブナ林やスダジイ・アカガシ林など自然植生に近いものも山頂付近や中腹の社寺(大龍寺、天上寺跡周辺)に分布している。

表2. 18は、六甲山の現在の植生を流域毎に区分して示したものである。これを表2. 19に示すように六甲山の南側斜面の全流域(105. 4km<sup>2</sup>)についてみると、アカマツ・モチツツジ群集とコナラ・アベマキ群集とで約52%、スギ・ヒノキ群落は約4%、ニセアカシア群落は約3%、市街地、ゴルフ場、造成地、農地等を示す「その他」は約32%を占める。崩壊地・裸地・露岩地は、南側斜面の全流域に占める割合は0. 2%程度であるが、これらが分布する流域は限られており、新湊川で0. 1%程度、新生田川で0. 2%程度、夙川流域で0. 3%程度、住吉川で0. 5%程度、芦屋川、妙法寺川で0. 6%程度をそれぞれ占める。明治時代から山腹工が始まった新生田川流域、大正時代から山腹工が始まった新湊川流域は現在の六甲山系の平均的な崩壊地・裸地・露岩地の分布であるが、1931(S6)年頃から山腹工が始まった妙法寺川(表2. 16、表2. 19)、1933(S8)年頃から山腹工の始まった芦屋川、住吉川、1951(S26)年頃から山腹工が始まった夙川流域(表2. 16、表2. 19)では比較的広い面積で裸地・露岩地が分布していることがうかがえる。

山腹工が実施された流域の現状をみると、裸地・露岩地の分布は上記のとおりであるが、流域の50%以上が「その他」に分類される妙法寺川、石屋川、高橋川、宮川、夙川を除く流域においては、それぞれの流域の約60%以上がアカマツ・モチツツジ群集とコナラーアベマキ群集等何らかの植生で占められており、特に新生田川、住吉川、芦屋川の各流域においては70%以上をアカマツ・モチツツジ群集とコナラーアベマキ群集の良好な植生が占めている(表2. 19)。

以上のように現在の六甲山は、開発が進行している流域もあるが、ほぼ全山が良好に植生に覆われているといえる(図2. 15)。



明治初期頃の六甲山

明治中期頃の山腹工の様子

現在の六甲山

写真2. 6 六甲山の植生復旧の状況(再度山の山腹工)

(「住吉川物語」より引用)

表2. 18 流域ごとの現存植生区分 (2008(H20)時点)

(km<sup>2</sup>)

流域面積	崩壊地	裸地	露岩地	ススキ-ネザサ群落	セイタカアワダチソウ群落	クズ-フジ群落	シナダレスズメガヤ群落	タラノキ-クサイチゴ群落	ニセアカシア群落	オオバヤシヤブシ群落	ヌマガヤオ-ダー	ヒルムシロクラス	ミヤコザサ群落	メタセコイヤ群落	スギ-ヒノキ群落	モウソウチク-マダケ群落	エノキ-ムクノキ群落	ウバメガシ群落	アラカン群落	クスノキ群落	ウラジロガシ-サカキ群落	コジイ-カナメモチ群落	フナ-シラキ群落	アカマツ-ハナゴケ群落	マテバシイ群落	アカマツ-モチツツジ群落	コナラ-アベマキ群落	その他
	夙川	7.86	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.09	0.01	0.02	0.00	0.12	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	1.54
宮川	1.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.27	1.01	
芦屋川	8.64	0.00	0.02	0.03	0.08	0.01	0.01	0.07	0.06	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.31	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	3.96	2.46	1.50
高橋川	2.64	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.42	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.33	1.62	
天上川	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	1.08	0.35	
住吉川	11.16	0.01	0.03	0.01	0.06	0.01	0.17	0.04	0.10	0.01	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.77	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	3.81	1.06
石屋川	2.88	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.73	1.54
都賀川	9.22	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.07	0.00	0.03	0.06	0.13	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.01	0.00	0.09	0.01	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	3.45	2.60	2.11
西郷川	1.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.01	0.00	0.08	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.66	0.46	0.11	
新生田川	11.70	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07	0.47	0.22	0.00	0.02	0.00	0.01	1.29	0.01	0.08	0.00	0.35	0.15	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	5.25	3.15	0.56
宇治川	3.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.15	0.00	0.00	0.00	0.01	0.34	0.00	0.01	0.00	0.20	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.45	1.40	0.35
新湊川	28.92	0.00	0.01	0.03	0.26	0.13	0.27	0.01	0.71	1.12	0.43	0.00	0.05	0.00	0.88	0.27	0.17	0.00	0.37	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.80	5.04	12.33
妙法寺川	10.62	0.01	0.02	0.03	0.15	0.04	0.01	0.02	0.25	0.52	0.15	0.00	0.00	0.00	0.06	0.17	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.69	2.10	5.61
千森川	1.35	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02	0.07	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.12	0.58
一の谷川	0.94	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.16	0.40
二の谷川	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.03
三の谷川	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03
敦盛塚川	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
堺川	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.01
山田川	15.31	0.00	0.00	0.01	0.10	0.18	0.04	0.10	0.13	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.35	0.18	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	5.37	3.25	5.40
有野川	14.52	0.00	0.01	0.00	0.07	0.05	0.03	0.07	0.01	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.03	1.99	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	6.80	2.70	2.52
有馬川	8.32	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	5.46	1.31	0.96
船坂川	3.95	0.01	0.06	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.48	0.66	0.48
計	147.50	0.04	0.17	0.13	0.96	0.53	0.69	0.31	1.64	3.23	1.53	0.01	0.22	0.01	0.06	7.11	0.99	0.32	0.15	2.91	0.21	0.13	0.04	0.13	0.18	49.79	33.22	42.60

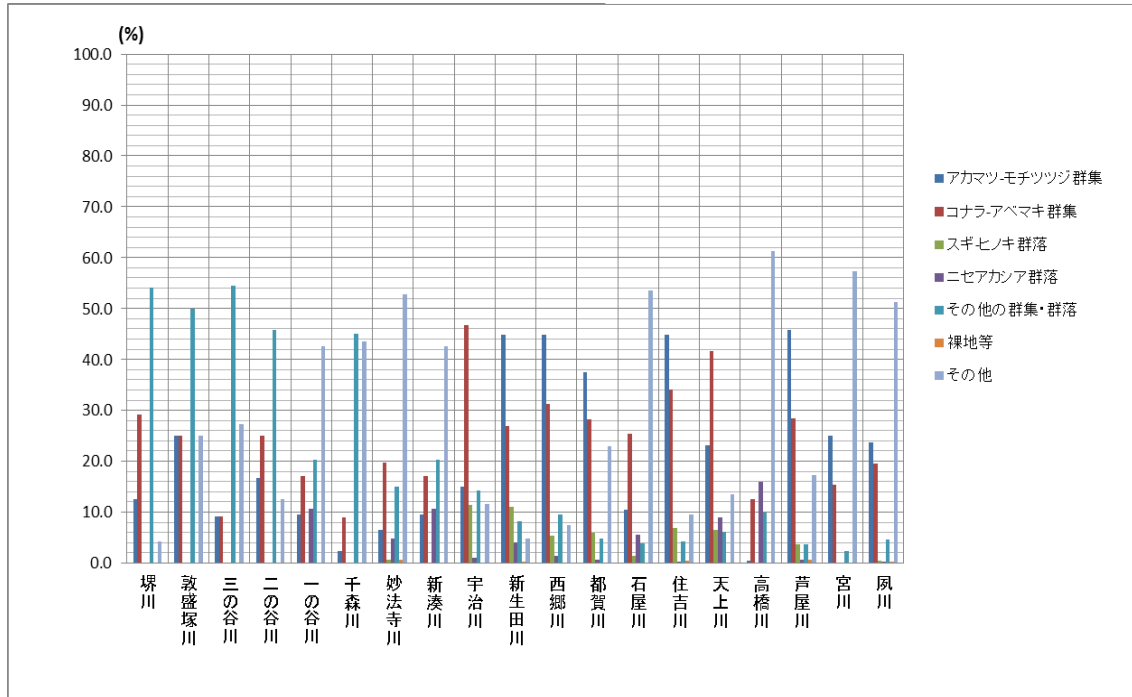


図2. 15 各流域面積に占める主な現存植生の割合(六甲山系南側斜面流域)

(表 2.19 より作成)



表2. 19 流域ごとの現存植生区分割合(六甲山系南側斜面流域)

(km<sup>2</sup>)

	流域面積	アカマツ モチツツジ 群集	コナラ アベマキ 群集	スギ ヒノキ 群落	ニセアカシ ア群落	その他の群 集・群落	裸地等	その他(市 街地等)
塚川	0.24 (割合)	0.03 12.50	0.07 29.17	0.00 0.00	0.00 0.00	0.13 54.17	0.00 0.00	0.01 4.17
敦盛塚川	0.04 (割合)	0.01 25.00	0.01 25.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.02 50.00	0.00 0.00	0.01 25.00
三の谷川	0.11 (割合)	0.01 9.09	0.01 9.09	0.00 0.00	0.00 0.00	0.06 54.55	0.00 0.00	0.03 27.27
二の谷川	0.25 (割合)	0.04 16.00	0.06 24.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.11 44.00	0.00 0.00	0.03 12.00
一の谷川	0.94 (割合)	0.09 9.57	0.16 17.02	0.00 0.00	0.10 10.64	0.19 20.21	0.00 0.00	0.40 42.55
千森川	1.35 (割合)	0.03 2.22	0.12 8.89	0.00 0.00	0.00 0.00	0.60 44.44	0.00 0.00	0.58 42.96
妙法寺川	10.62 (割合)	0.69 6.50	2.10 19.77	0.06 0.56	0.52 4.90	1.59 14.97	0.06 0.56	5.61 52.82
新湊川	28.92 (割合)	6.80 23.51	5.04 17.43	0.88 3.04	1.12 3.87	2.70 9.34	0.04 0.14	12.33 42.63
宇治川	3.00 (割合)	0.45 15.00	1.40 46.67	0.34 11.33	0.03 1.00	0.43 14.33	0.00 0.00	0.35 11.67
新生田川	11.70 (割合)	5.25 44.87	3.15 26.92	1.29 11.03	0.47 4.02	0.96 8.21	0.02 0.17	0.56 4.79
西郷川	1.47 (割合)	0.66 44.90	0.46 31.29	0.08 5.44	0.02 1.36	0.14 9.52	0.00 0.00	0.11 7.48
都賀川	9.22 (割合)	3.45 37.42	2.60 28.20	0.55 5.97	0.06 0.65	0.45 4.88	0.00 0.00	2.11 22.89
石屋川	2.88 (割合)	0.30 10.42	0.73 25.35	0.04 1.39	0.16 5.56	0.11 3.82	0.00 0.00	1.54 53.47
住吉川	11.16 (割合)	5.00 44.80	3.81 34.14	0.77 6.90	0.01 0.09	0.47 4.21	0.05 0.45	1.06 9.50
天上川	2.59 (割合)	0.60 23.17	1.08 41.70	0.17 6.56	0.23 8.88	0.16 6.18	0.00 0.00	0.35 13.51
高橋川	2.64 (割合)	0.01 0.38	0.33 12.50	0.00 0.00	0.42 15.91	0.26 9.85	0.00 0.00	1.62 61.36
芦屋川	8.64 (割合)	3.96 45.83	2.46 28.47	0.31 3.59	0.06 0.69	0.31 3.59	0.05 0.58	1.50 17.36
宮川	1.77 (割合)	0.44 24.86	0.27 15.25	0.00 0.00	0.00 0.00	0.04 2.26	0.00 0.00	1.01 57.06
夙川	7.86 (割合)	1.86 23.66	1.54 19.59	0.04 0.51	0.01 0.13	0.36 4.58	0.02 0.25	4.03 51.27
合計	105.40 (割合)	29.68 28.16	25.40 24.10	4.53 4.30	3.21 3.05	9.09 8.62	0.24 0.23	33.24 31.54

(表2. 18より作成)

#### 2. 2. 4 住吉川流域の植生の変遷

現在の住吉川は、流域の約10%が開発されているが、約80%がコナラーアベマキ群集とアカマツーモチツツジ群集、約7%がスギーヒノキ群落であり、開発地を除いた流域の約90%はおおむね良好な森林で覆われている(表2. 19)。

住吉川では、1933(S8)～1942(S17)年にかけて兵庫県砂防により山腹工が実施され、1938(S13)～1943(S18)年にかけて営林署により植林が実施されていることが記録より確認できる(表2. 16)。植栽樹種は、営林署の記録ではクロマツ、ヒメヤシャブシとなっている。山腹工等の施工位置についてその資料を入手できていない。また、施工面積は、営林署の記録が入手できなかったため詳細にはわからない。1934(S9)～1942(S17)年の兵庫県砂防による山腹工施工面積を表2. 17における該当年の0. 078km<sup>2</sup>と仮定すると、兵庫県砂防事業により住吉川流域の少なくとも約0. 7%が植栽等されたことになる。兵庫県砂防事業が継続中であり、かつ、営林署が治山事業を開始した1938(S13)年は、阪神大水害が発生した年でもあり、住吉川流域の植生回復のための工事が行われていたものと思われる。なお、住吉川流域での植林は、兵庫県砂防事業によるものが1942(S17)年まで、営林署治山事業によるものが1943(S18)年までとなっており、これ以降は1995(H7)年度にグリーンベルト整備事業が建設省(当時)によって開始されるようになるまでどの事業者によるものも確認できない。なお、表2. 16では、建設省砂防事業による山腹工が1988(S63)年頃に記録があるが、これは小規模な斜面崩壊防止工事にとどまっている。

#### 2. 2. 5 住吉川流域の土地利用と管理

1950(S25)年に東灘区が神戸市に編入される際に東灘区は(財)住吉学園を設立して従来からの住吉川流域の区の所有地の管理を市ではなく財団法人が直接行う体制をとった。現在、山地部の所有地のほとんどは都市山麓グリーンベルトの砂防事業用地として国有地となっているが、少なくともそれまで(1995(H7)年頃まで)は事実上区の管理下にあった。(財)住吉学園が植林を行ってきたという記録は確認できなかったが、開発が抑制されてきたことはうかがうことができる。

#### 2. 2. 6 住吉川の現在の植生

住吉川流域は、現在流域の約90%がおおむね良好な植生に覆われている。ごく一部に偏向遷移がみられるところがあるものの、そのような箇所はグリーンベルト整備事業により手当が進行中であり、今後規模の大きな土砂流出を引き起こす直接的な要因になることは考えられない。

砂防指定地管理・流域管理の観点から、現在の良好な植生が維持され、天然更新がなされていくよう土地の利用・管理がなされていくことが重要である。

#### 2. 2. 7 六甲山系の植生と土砂災害の関係

六甲山系同様の風化花崗岩山地における裸地と森林地について、表面侵食による土砂生産量が森林地では低減することが滋賀県田上山を事例に報告されている(鈴木ら 1989)。よって、六甲山系が1938(S13)年頃ま

での状況とは異なり、ほぼ全山が良好な植生で覆われている現在は、表面侵食に対して植生の効果が発揮されているものと考えられるが、実際に六甲山系でどの程度の降雨に対してどの程度低減しているのかは明確ではない。流砂観測により定量的に把握する必要がある。

## 引用・参考文献

近藤浩文、武田義明、松下まり子、小西美恵子(1992):六甲山の植物、神戸市新聞総合出版センター

前田保夫、久保利雄(1980):六甲の森と大阪湾の誕生、神戸市教育研究所

中西 哲、服部 保、武田義明(1982):神戸の植生、神戸市環境局

鈴木雅一、福蔦義宏(1989):風化花崗岩山地における裸地と森林の土砂生産量—滋賀県南部、田上山地の調査資料から—、水利科学、190,p.89-100

山鳥吉五郎(1937):六甲山、摩耶山植物目録

矢野悟道、武田義明、岸本 浩(1990):再度山永久植生保存地調査報告書・第4回、神戸市土木局

矢野悟道、大川徹(1982):六甲山の潜在自然植生、六甲の自然(室井・清水)p18-21、神戸新聞出版センター

### 第3章 六甲山系の森林状態の異なる斜面・小流域の流出・土砂流出特性

本章では、どういう斜面からはどのような土砂がどういうタイミングで生産されどのように流出するのか、その実態を把握し整理する。具体には、森林状態の異なる斜面に区画を設定して平時の降雨で斜面に生じる表面流量と生産土砂量の観測結果を整理する。また、区画末端の小流域では流出してくる水・土砂の量(表面流量と流出土砂量)、流出のタイミングについて観測結果を整理する。

#### 3.1 六甲山系の森林状態の異なる斜面・小流域の流出特性

ここでは、第1章 1.4.1で示した観測位置、観測項目、観測内容によって得たデータを整理する。表3.1(表1.3の再掲)に示すように、六甲山系では夙川、高橋川、住吉川、石屋川、都賀川、新生田川流域においてSR,SE,SF観測(第1章 1.4.1)を実施している。森林区分を表3.2(表1.4の再掲)に示す。

表3.1 SR,SE,SF観測地の流域状況

森林区分	観測位置と観測内容				河川名	名称	流域面積(km <sup>2</sup> )	0次谷長さ(m)	平均斜面勾配(°)	林相
	観測位置	観測内容								
		SR	SE	SF						
II	S-1	SR-1	—	—	石屋川	渦森	—	—	30	ヤシャブシ林
III	S-2	SR-2	—	—	石屋川	渦森	—	—	40	森林整備施業地
	S-3	SR-3	—	—	夙川	六麓荘	—	—	—	コナラ2次林
I	S-4	SR-4	SE-4	—	夙川	ゴロゴロ岳	0.0143	230	35	裸地・崩壊地
	S-5	SR-5	SE-5	SF-5	都賀川	都賀谷堰堤	0.0058	180	39	アカマツ・モチツツジ群集
	S-6	SR-6	SE-6	—	都賀川	山田堰堤	0.0174	280	40	コナラ・アベマキ群集
	S-7	SR-7	SE-7	—	都賀川	ループ橋	0.0448	400	36	アカマツ・モチツツジ群集
II	S-8	SR-8	SE-8	SF-8	都賀川	六甲山トンネル入口	0.0092	140	35	スギ・ヒノキ群集
	S-9	SR-9	SE-9	SF-9	住吉川	渦森元住吉神社	0.0154	60 180	28 29	スギ・ヒノキ群集
III	S-10	SR-10	SE-10	SF-10	住吉川	渦森千丈谷堰堤	0.0036	120	34	コナラ・アベマキ群集
II	S-11	SR-11	SE-11	SF-11	高橋川	甲南台	0.0086	160	30	ニセアカシア林
	S-12	SR-12	—	SF-12	新生田川	最上流域1	0.0043	160	35	アカマツ林
	S-13	SR-13	—	SF-13	新生田川	最上流域2	0.0022	20	35	アカマツ林
			0.0028				35	35		
			0.0011				40	42		
—	—	—	西おたふく	住吉川		0.0203	90	35	コナラ2次林	

表3.2 六甲山系における土砂災害防止の観点からの森林区分 (富田ら 1997)

区分	土砂災害防止の観点からの森林区分	該当する林分例
I	荒廃している、あるいは今後荒廃が予想される	裸地・崩壊地など
II	森林の形成はみられるが、偏向遷移がみられるなど良好な遷移状態になく、土砂災害防止の観点から森林整備が必要である	ヤシャブシ林、ニセアカシア林など
III	良好な森林状態である	コナラ・アベマキ群集など

### 3. 1. 1 降雨に対する流出の応答

図3. 1に小流域(表3. 1に示したSE,SF観測を実施している流域で、以降「小流域」という。)近傍の雨量観測所(国土交通省六甲砂防砂防事務所)で観測した日雨量(月別総雨量)を示す。2003(H15)年、2004(H16)年、2010(H22)年、2011(H23)年には日雨量100mmを越える日が出現しており、その頻度は2010(H22)年、2011(H23)年に増している。

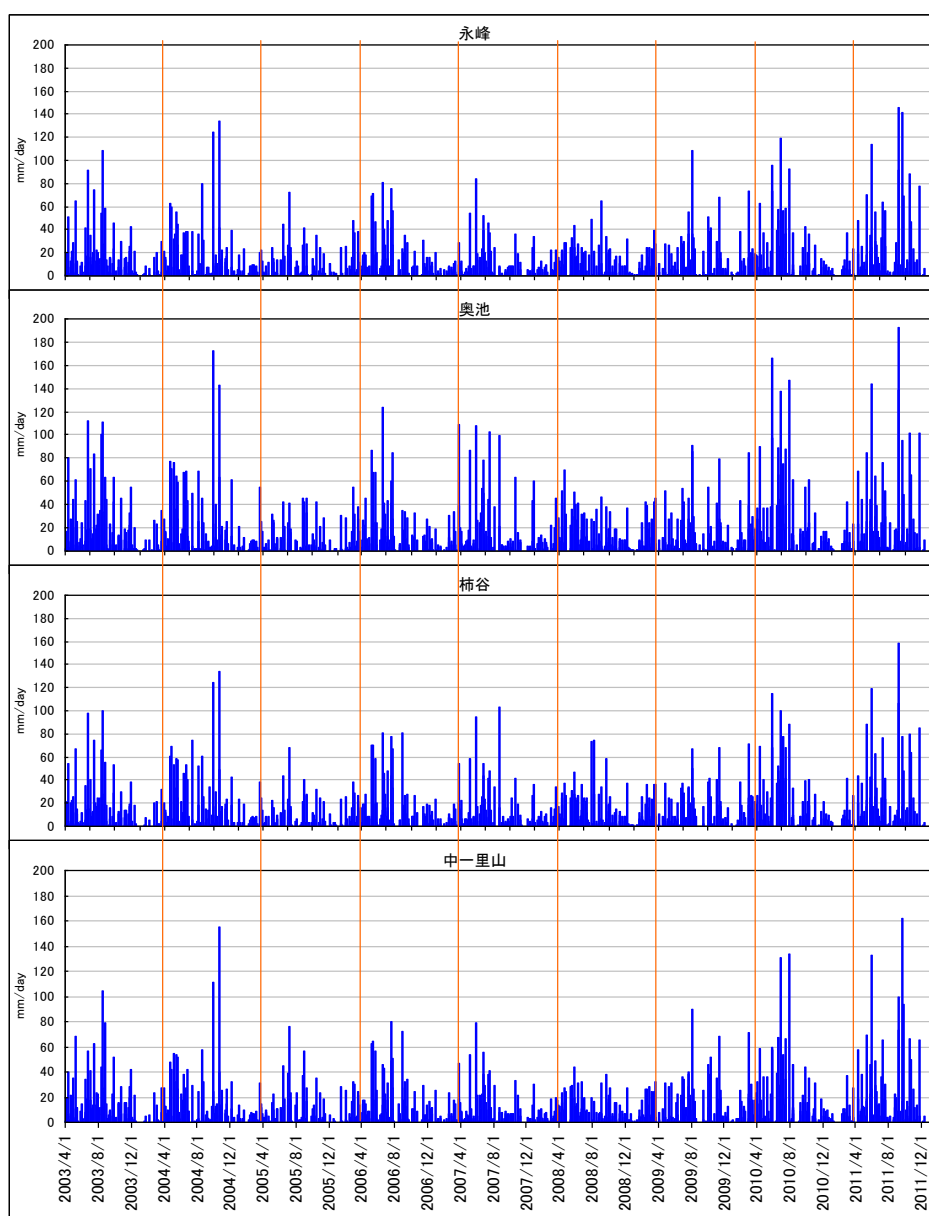


図3. 1 六甲山系における日雨量の分布(2003(H15)年～2011(H23)年)

小流域における表面流量は、量水箱による四角堰と圧力式水位計により(図1. 3)計測している。また、小流域内にはそれぞれ雨量計(林内雨量計、とする)を設置している。林内雨量計で計測した雨量は、森林区分Ⅲでは近傍の雨量観測所よりも若干小さめの値を示す傾向にあったものの、すべての林内雨量は図3. 1に示す近傍の雨量観測所とほぼ同様の時系列変化を示した。よって、林内雨量計のデータはここに示さない。

### 3. 1. 1. 1 降雨波形と流出波形

小流域における観測期間は2008(H20)年～2010(H22)年である。この期間に各小流域で観測した降雨波形に対する流出波形を図3. 2に示す。降雨波形に対して流出波形は常に反応し、流出のピークは降雨のピークにすぐに反応している。降雨終了後、流出は速やかに低減し、元に戻る。この特徴は、恩田ら(1999)、加藤ら(2000)が報告している花崗岩地帯の流出特性と一致している。

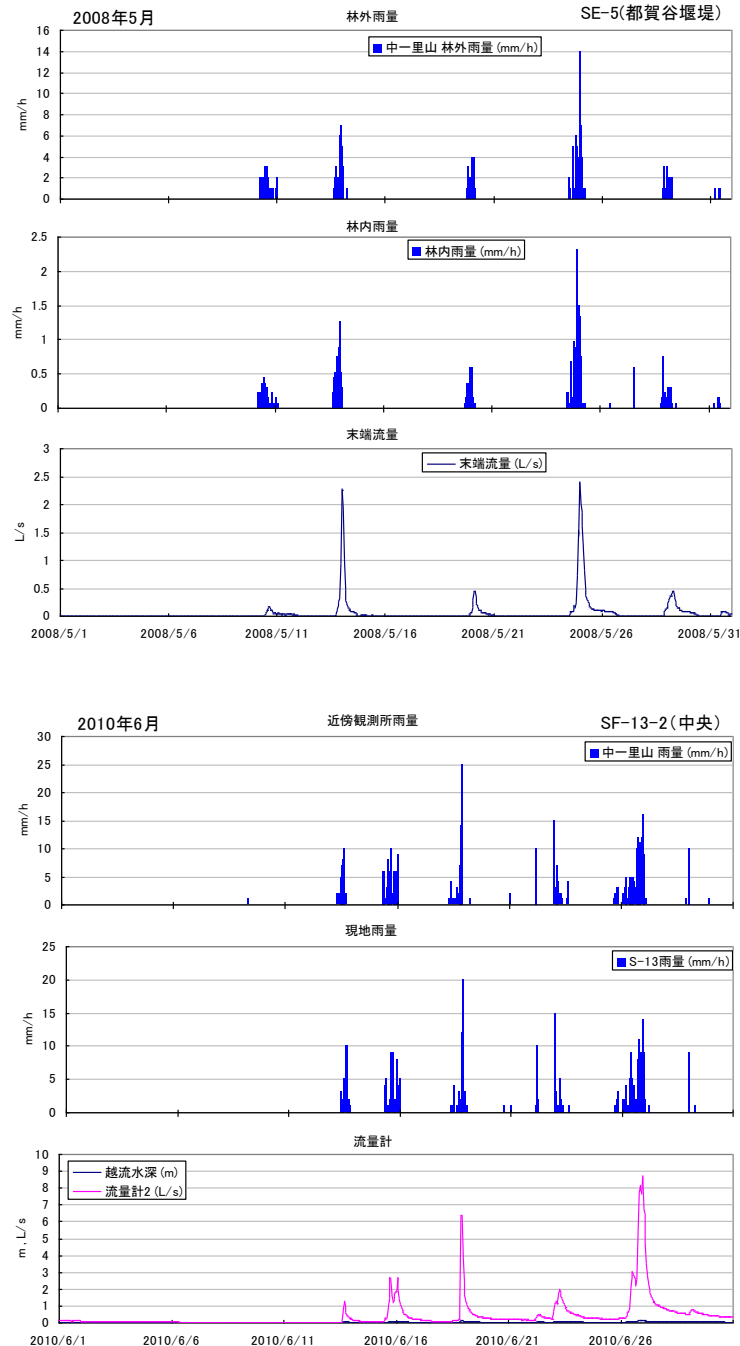


図3. 2 降雨波形に対する流出波形の応答

上:SE-5(都賀谷堰堤)の2008(H20)年5月の事例

下:SF-13-2(新生田川上流部)の2010(H22)年6月の事例

### 3. 1. 1. 2 降雨・流出ピークの遅れ

降雨・流出ピークの遅れ時間を詳細にみるために、観測期間中に図3. 1に示した小流域近傍の4箇所の雨量観測所において、平均連続雨量50mm以上かつ平均時間雨量10mm以上の降雨イベントを抽出して、その降雨時に各小流域で観測した林内雨量・表面流出量を95事例抽出し、各小流域の観測所ごとにピークの遅れ時間をみたものを図3. 3に示す。これによると、降雨・流出ピークの遅れは60分以内に69事例(73%)が収まる。しかし、同じ観測場所でも降雨毎に流出ピークの遅れ時間は異なっている。また、森林区分Ⅰに該当するSE-5, SF-5, SE-6, SE-7、森林区分Ⅱに該当するSE-9, SF-9-1, SF-9-2、森林区分Ⅲに該当するSE-10を比較すると、森林区分がⅠ→Ⅱ→Ⅲとなるに従い流出ピークが遅くなる傾向にもみえるが、バラつきがあり明確ではない。また、同じ森林区分Ⅰであっても、SE-7はほかよりも流出ピークが遅い傾向にある。

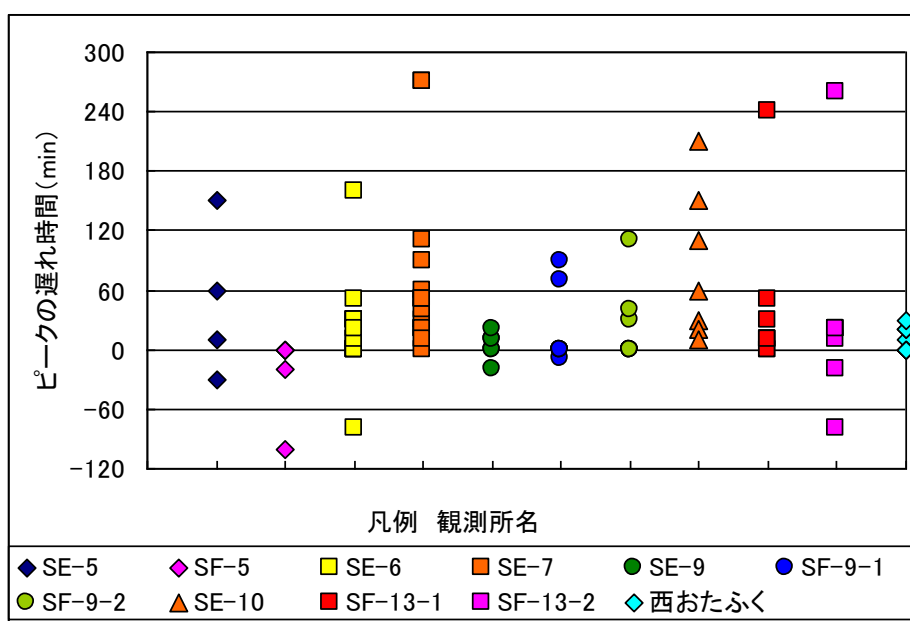


図3. 3 各観測所の降雨流出ピーク遅れ

### 3. 1. 1. 3 降雨・流出ピークの遅れと降雨特性

3. 1. 1. 2に示した同じ場所での観測でも降雨毎に流出ピークの遅れに違いがあるのは、降雨ピークまでの総降雨量と降雨ピーク時の降雨強度による影響ではないかと考えられる。そこで、降雨ピークまでの総降雨量と降雨ピーク時の最大10分間雨量との関係を見る(図3. 4)。

降雨ピークまでの総雨量が50mm以下である場合、流出ピークの遅れは60分程度までにある程度収束しているが、240分を越える場合もありデータのばらつきがある。降雨ピークまでの総降雨量が50mm以上になると、120分までに収まる。ただし、60分以上早いケースもある。

降雨強度が7mm以下である場合、流出ピークの遅れは60分程度までにある程度収束しているが、240分を超えるケースもあり、データのばらつきがある。8mm以上になると、流出ピークの遅れはほとんどない。

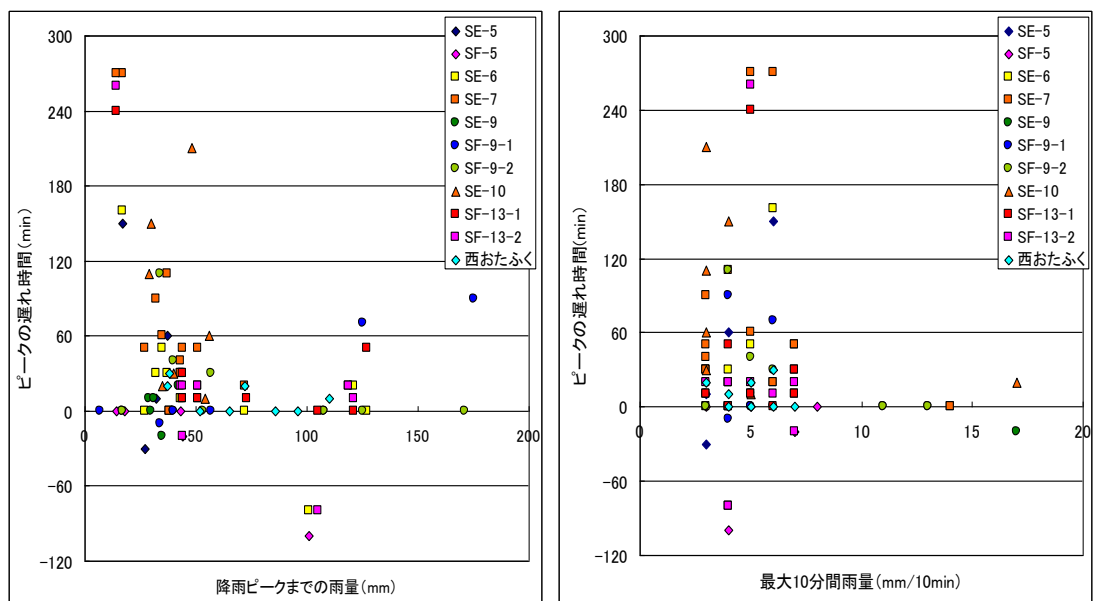


図3. 4 降雨流出ピーク遅れと降雨特性との関係(左:降雨ピークまでの総雨量、右:最大10分間雨量)

### 3. 1. 1. 4 雨量と表面流量

計測したひと雨の林内雨量と表面流量の関係をみると、図3. 5のようになる。林内雨量に対する表面流出高は森林区分Ⅰで大きくなり、森林区分Ⅱ、森林区分Ⅲの順に小さくなっていく。また、森林区分Ⅰ、森林区分Ⅱにおいては、林内雨量が大きくなると表面流出高も大きくなるが、区分Ⅲではその傾向は小さい。

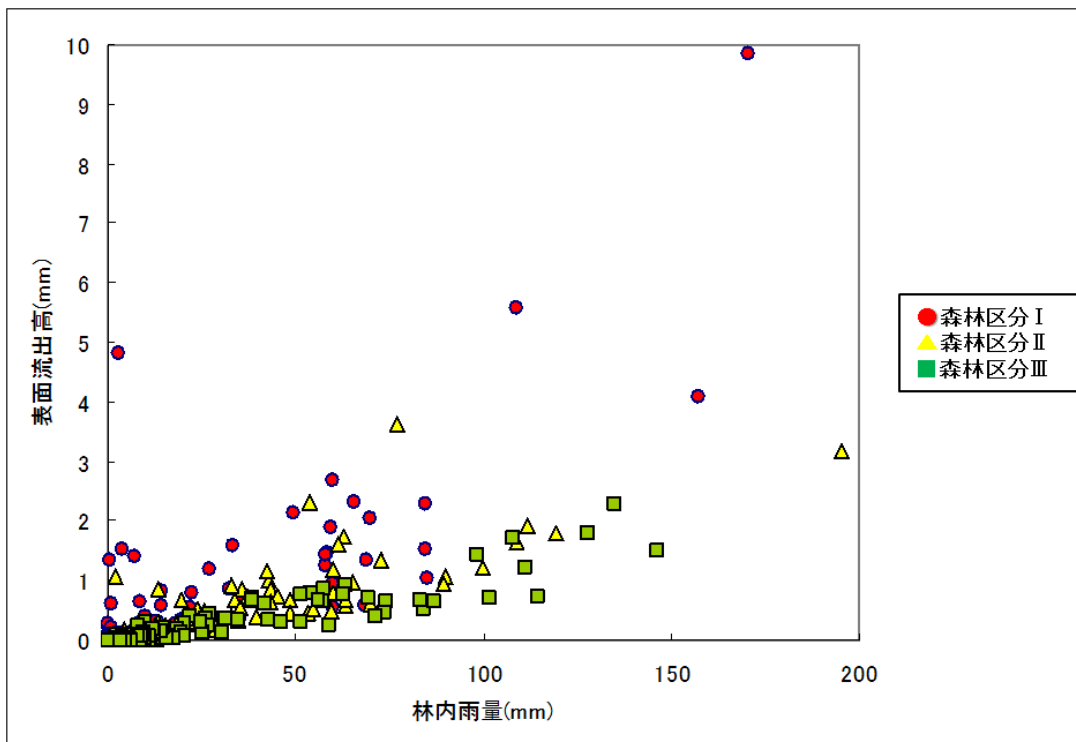


図3. 5 各小流域におけるひと雨の林内雨量と流出量の関係



### 3. 1. 1. 5 流域特性の類似した流域の流出応答

地形、地質、森林状態が類似した流域面積が同程度の2つの小流域(図3. 6)の、ある期間に発生した降雨に対する流出波形、流出量、電気伝導度、水温及び地下水位の変動について整理する。図3. 7に一例を示す。

#### 1) 流量の応答

同一降雨に対して流量が大きく異なる。どちらの流域も流量のピークは降雨のピークよりも遅れて出現するが、SF-13-2 小流域は急激に増水するのに対して SF-13-1 小流域では急激な増水はみられず増水の程度も小さい。降雨ピーク後の流出量は、SF-13-2 小流域では急激に減水しその後はゆっくり減水していくが、SF-13-1 小流域では急激な減水はなく、そのままゆっくり減水していく。

#### 2) 電気伝導度

SF-13-1 では増水が始まった時から急激に低下し、その後減水にともなってゆっくり上昇する。SF-13-2 ではもともと電気伝導度は SF-13-1 ほど高くなく、増水が始まったときからゆっくり低下しその後減水にともなってゆっくり上昇する。

#### 3) 水温

SF-13-1, SF-13-2 ともにほとんど変化していない。

#### 4) 地下水位

SF-13-2 流域の下流凹部に設置した No.2 地点では、増水のはじまりから少し遅れて急激に上昇し流量のピークを過ぎるとゆっくり低下する。SF-13-1 流域の中流凹部に設置した地点では、増水の始まる少し前から比較的ゆっくり上昇し、流量のピークを過ぎるとゆっくり低下する。

以上のことから、地形、地質、流域面積、植生が同じであっても、同一降雨による流出量、流出波形は異なる。次に、流域面積や地質等が異なる場合の比較をみる。

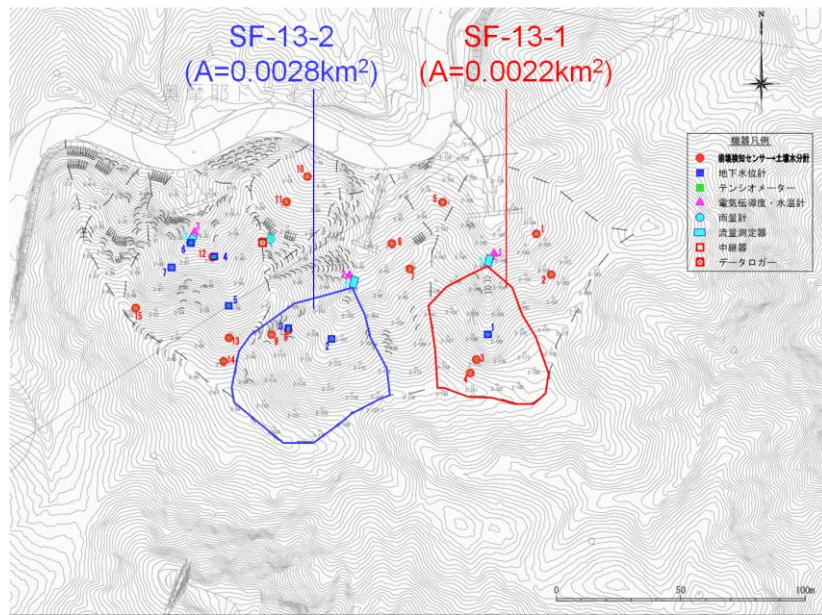


図3.6 地形、地質、森林状態が類似した2つの小流域の位置図

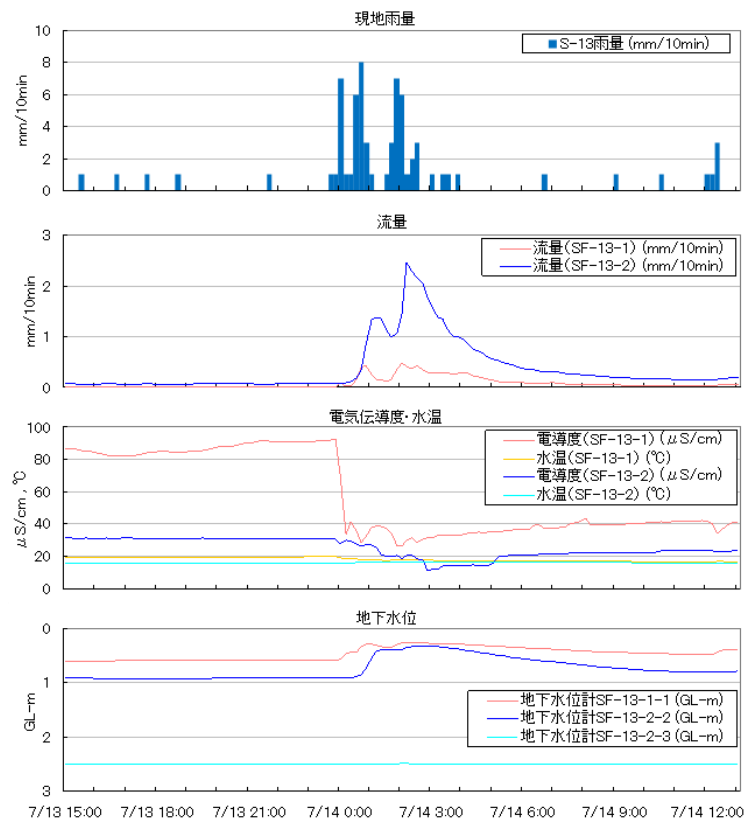


図3.7 図3.6に示した2つの流域における流量等の変動

### 3. 1. 1. 6 流域面積は異なるが、地形、地質、森林状態が類似した流域の流出応答

SE6、SE7は、流域面積は異なるが、地形、地質、森林状態はほぼ同様である。SE6 の流域面積 $0.0174\text{km}^2$ 、SE7 の流域面積 $0.0448\text{km}^2$ である。

この観測所における2009年10月7日～10月8日までの降雨時の降雨波形に対する流出波形を図3. 8に示す。流出量は SE6のほうが大きい。降雨に対する反応は、SE6 は SE7 より速やかで急激であり、流出ピークの遅れはわずかに小さい。降雨ピーク後の減水は SE6 のほうが SE7 より速やかである。

このことから、流出応答が異なることを流域面積の違いから説明することは難しい。

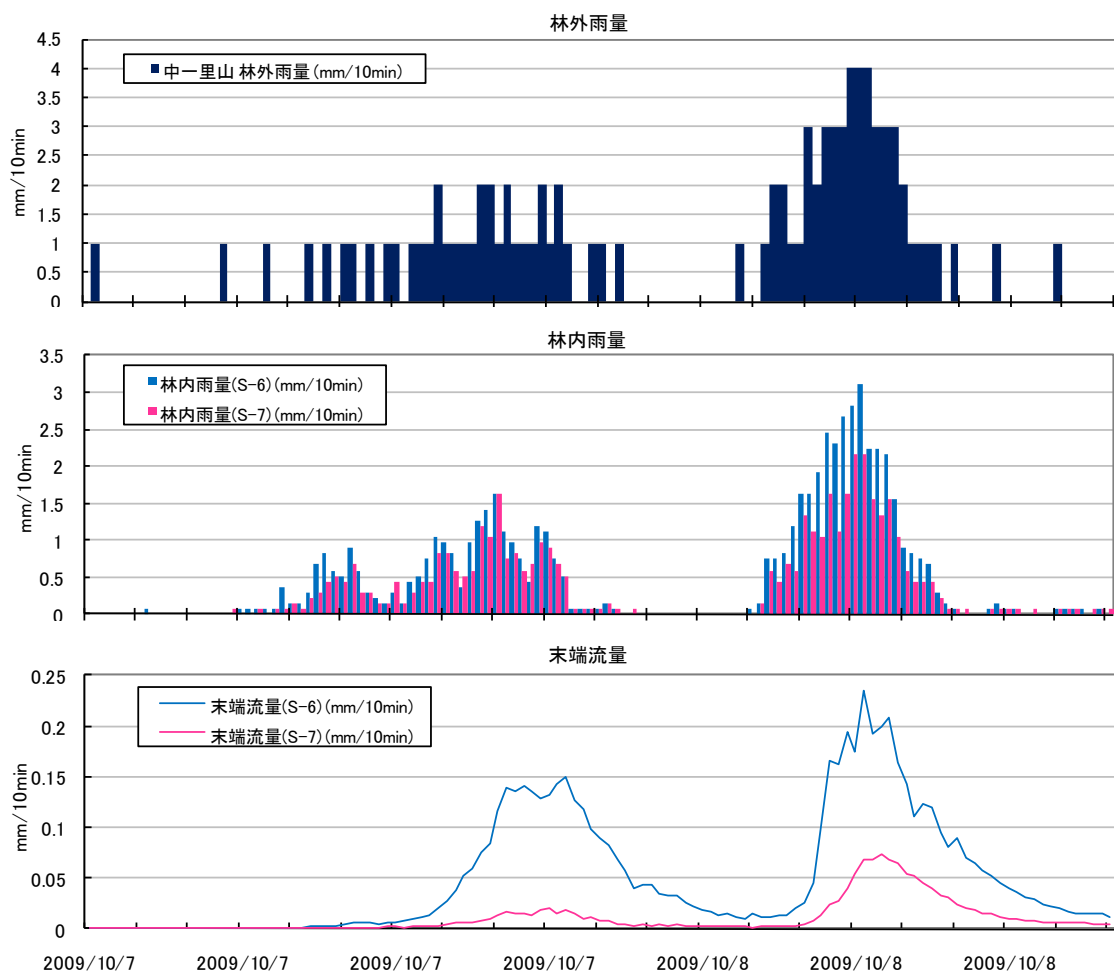


図3. 8 2009(H21)年10月7日13:00～10月8日9:00の降雨中の SE-6 と SE-7 観測における降雨波形に対する流出波形

### 3. 1. 1. 7 流域面積、地形、森林状態は異なるが、地質が同様である流域の流出応答

流域面積、流域平均傾斜、生育樹種は異なるが、地質が同じである SE-9(流域面積0. 0154km<sup>2</sup>、28° スギーヒノキ林)、SE-10(流域面積0. 0036km<sup>2</sup>、34°、コナラーアベマキ)における2009(H21)年3月31日～3月14日までの降雨時の降雨波形に対する流出波形は図3. 9のとおりである。流出量は SE-10 のほうが大きい。降雨に対する流出の反応は、SE9のほうがやや早くゆっくり増加し、流出ピークの遅れはほとんどない。SE10 は反応はやや遅いものの急激に増加し、流出ピークはやや遅れる。降雨ピーク以降、SE9 はゆっくり減水し、SE10 は急激に減水する。

このことから、地質等の特定の要因をもって流出特性の違いを説明することは難しい。

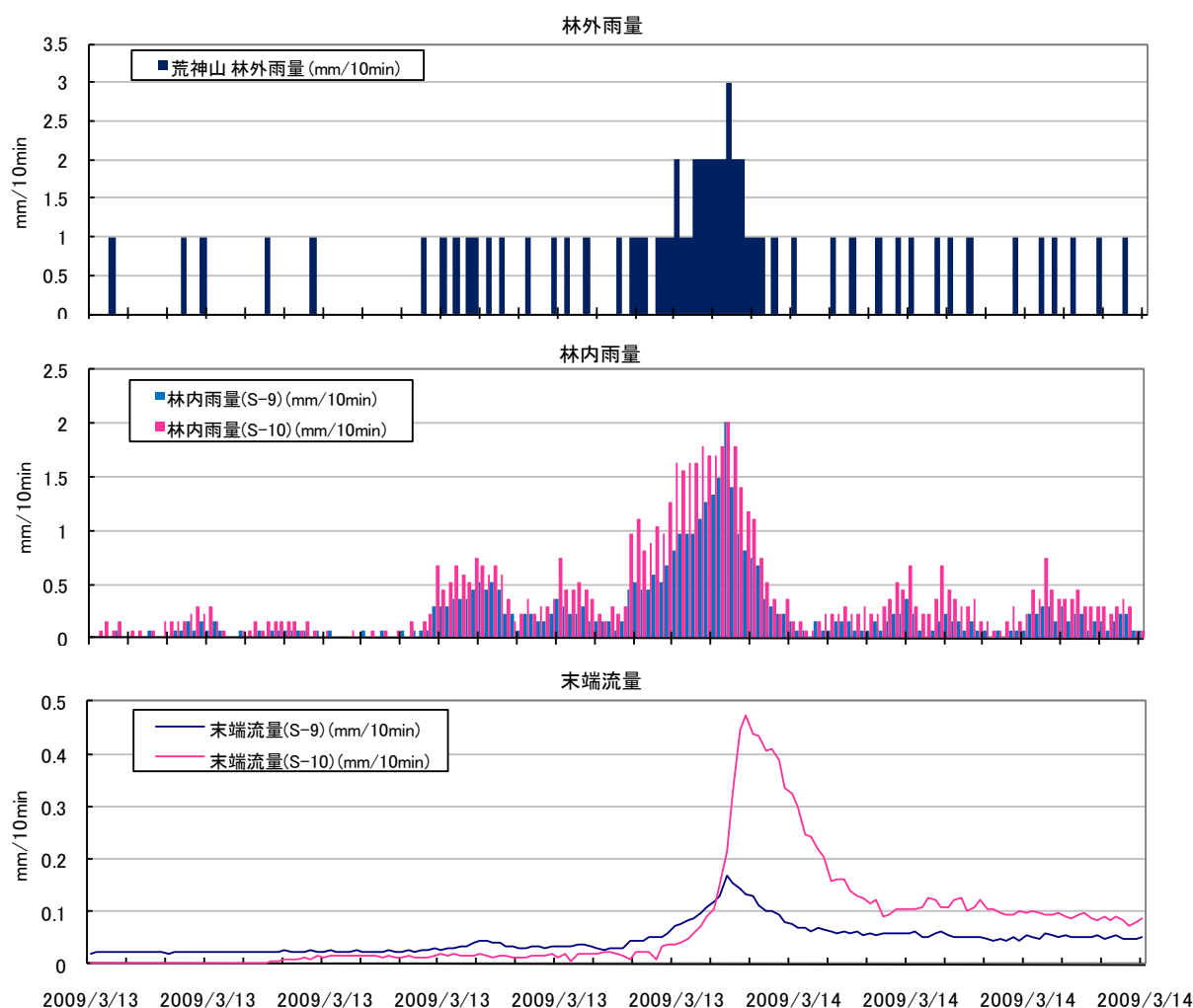


図3. 9 2009(H21)年3月13日8:00～3月14日11:00の降雨中のSE-9とSE-10観測における降雨波形に対する流出波形の応答

### 3. 1. 2 まとめ

降雨に対する流出の応答については次のように整理できる。

- ・降雨に対して速やかに流出が応答し、降雨終了後には流出は速やかに低減する。
- ・降雨ピーク後60分以内に流出ピークが出現する。
- ・流出ピークの遅れは、森林区分による明確な違いはない。
- ・降雨に対する表面流出高は、森林区分Ⅰから区分Ⅱ、区分Ⅲに向かうに従い小さくなる。森林区分Ⅰ、Ⅱでは雨量が大きくなると表面流出高も大きくなるが、森林区分Ⅲではその傾向は小さい。
- ・地形、地質、流域面積、森林状態が同様であっても、同一降雨に対する流出量、流出波形は異なる。この理由を地質、流域面積、森林状態の違いで説明することは難しく、土層及び基岩の構造に要因が考えられる。

## 3. 2 森林状態の異なる斜面・小流域における侵食土砂量と流出土砂量

### 3. 2. 1 斜面における侵食土砂量の特徴

各区画の侵食土砂量(毎月土砂を回収し重量を測定)の計測期間中の月ごとの変化を図3. 10に示す。計測期間は2008(H20)年4月から2011(H23)年12月である。どの区画も経年的な変化や季節的な変化など規則的な変化はみられないが、区分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの順に侵食土砂量が少なくなる傾向にある。

この土砂の粒度分布は図3. 11に示すようであり、区分Ⅰの区画ではd60が10mm以上、区分Ⅲの区画ではd60が1mm以下となる。植被率が低く露岩転石の多い区分Ⅰでは粗粒な土砂が、植被率が高く露岩転石の少ない区分Ⅲでは細粒分を含む土砂が生産される傾向にある。

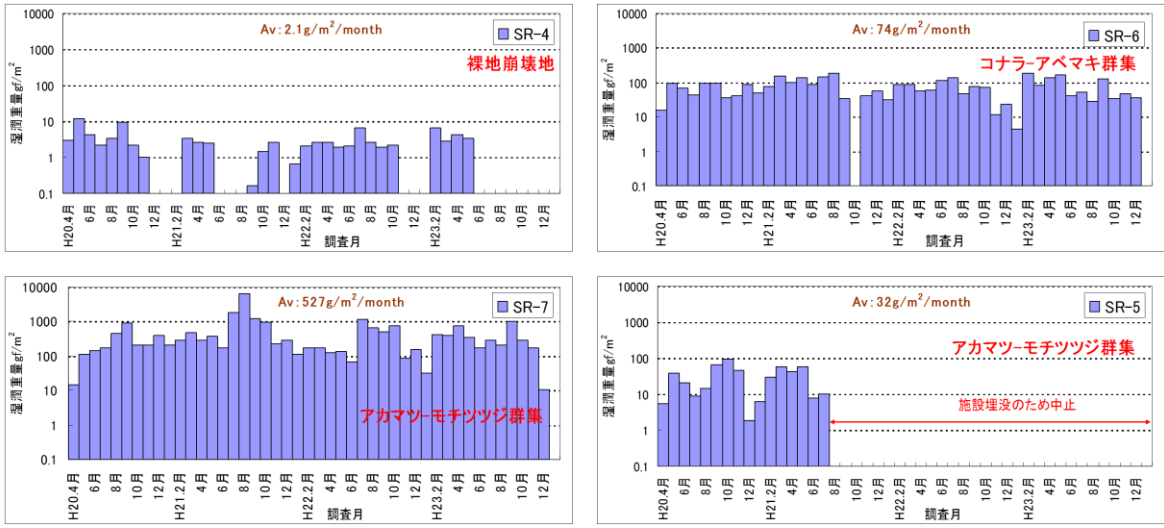
また、各区画では、降雨に対応して表面流出がみられた。2011(H23)年4月～12月に観測した各区画の表面流出量と侵食土砂量についてみると、図3. 12に示すように、区分Ⅰでは流出量に対する侵食土砂量は大きく、区分Ⅱ、Ⅲでは小さい。また、土壌水分計が捉えた土壌水分量の時系列変化から、斜面部での表面流はリターマットフローと考えられる(図3. 13)。

### 3. 2. 2 小流域における流出土砂量

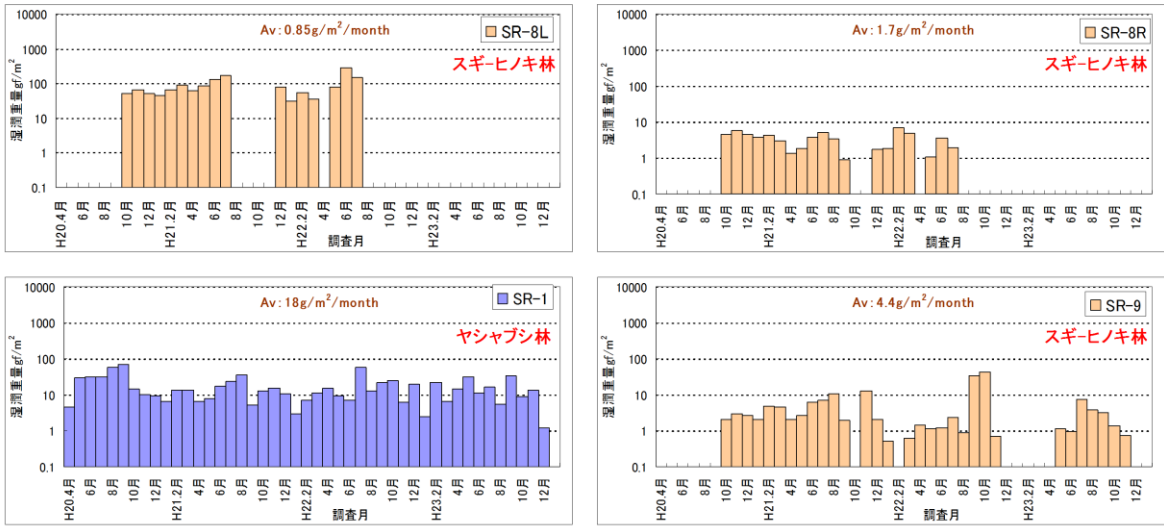
区画を含む各小流域の流出土砂量について、計測期間中の月ごとの変化(図1. 3の土砂受箱に堆積した土砂を回収して重量を計測)を図3. 14に示す。計測期間は2008(H20)年4月から2011(H23)年12月である。どの小流域も、経年的な変化はみられない。また、区分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲによる明確な違いはみられない。

小流域末端で捕捉した土砂の粒度分布は図3. 15に示すようになり、総じて0. 1mm以下の粒径は10%以下となり、侵食土砂量の粒度分布(図3. 11)と比較すると粗くなっている。

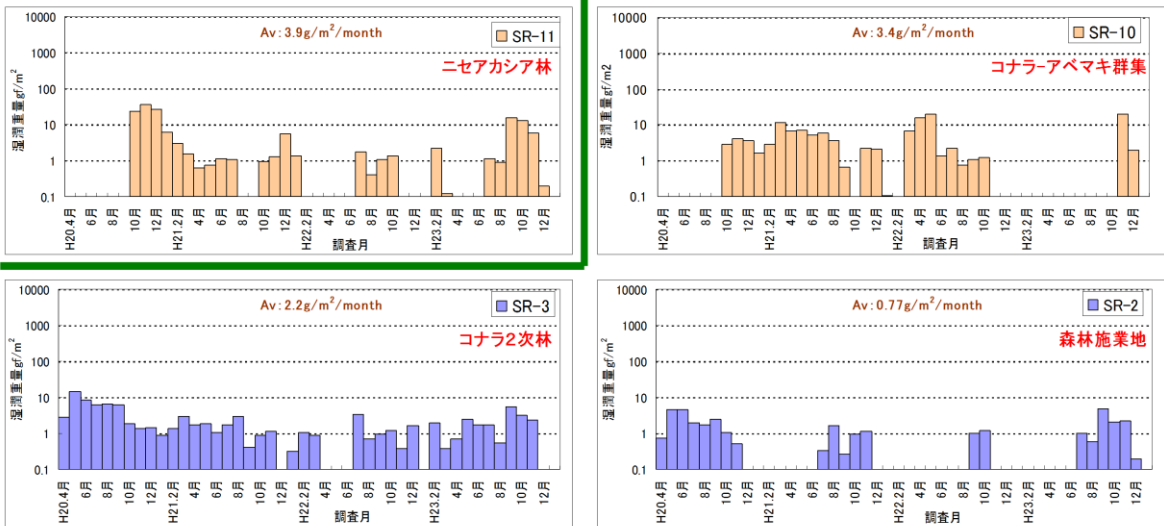
森林区分Ⅰ



森林区分Ⅱ



森林区分Ⅲ



■ 2008年(H20年)4月～2011年(H23年)12月観測      ■ 2008年(H20年)10月～2011年(H23年)12月観測

図3. 10 各区画(SR)の月別侵食土砂量(湿潤重量)の経年変化(2008(H20)年4月～2011(H23)年12月)

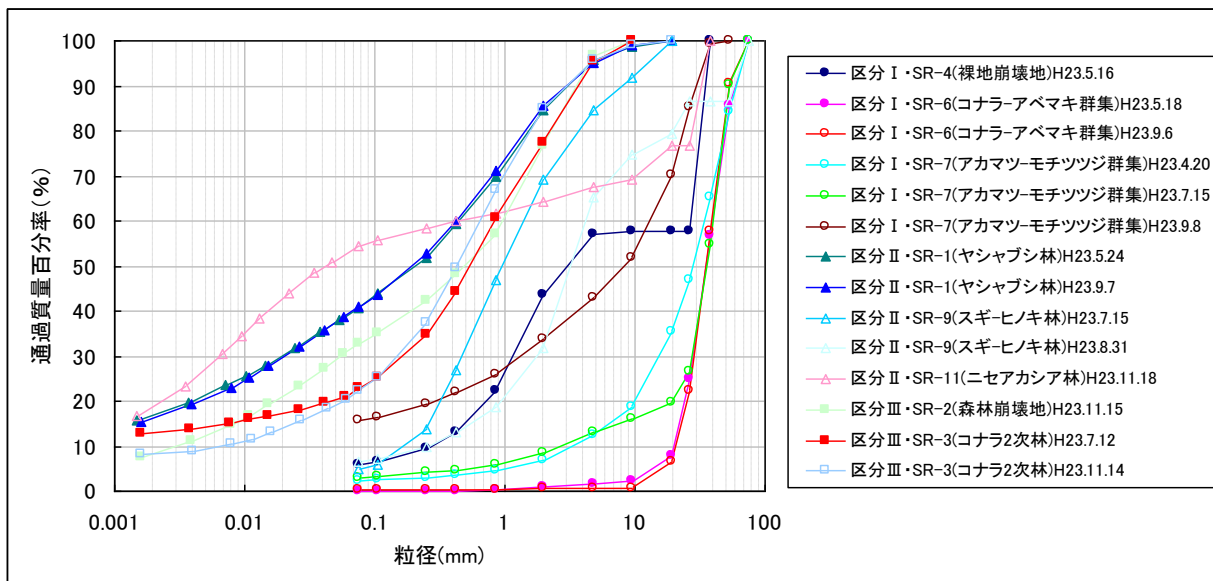


図3. 11 各区画(SR)の生産土砂(侵食土砂)の粒度分布(○:区分Ⅰ、△:区分Ⅱ、□:区分Ⅲ)

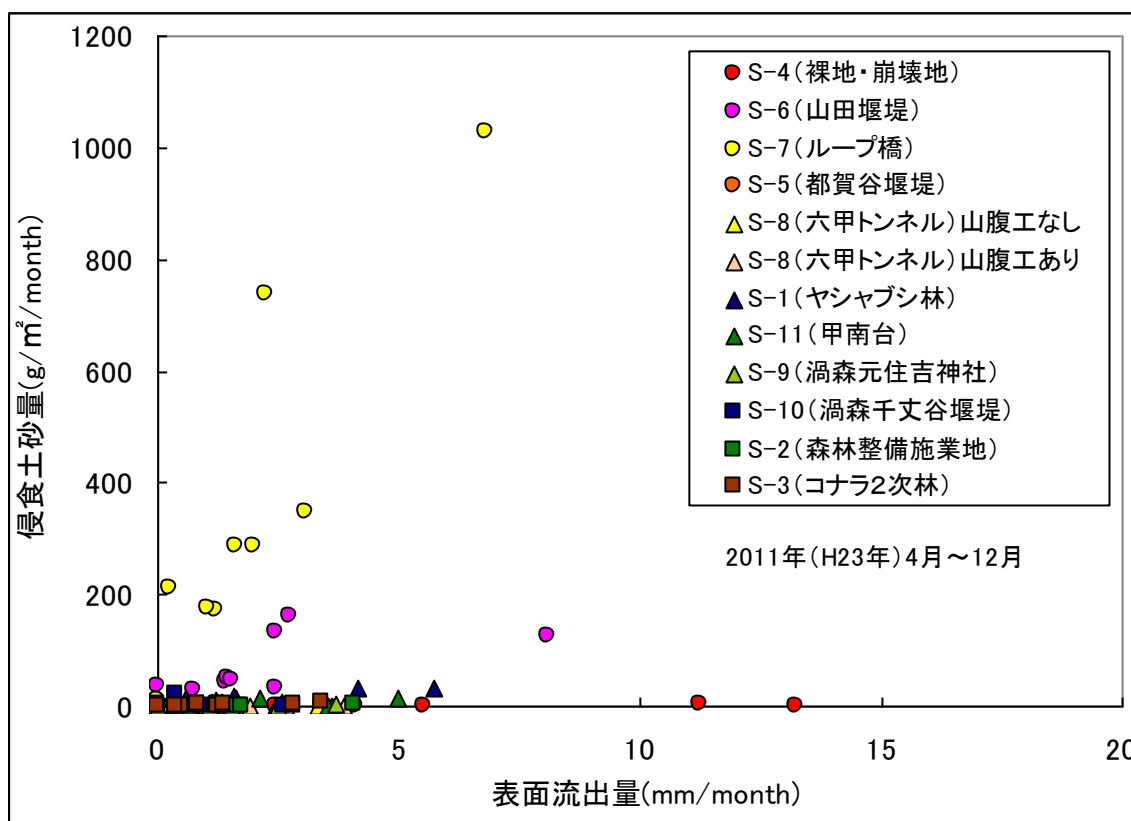


図3. 12 各区画(SR)の表面流出量と侵食土砂量の関係(2011(H23)年4月~12月)

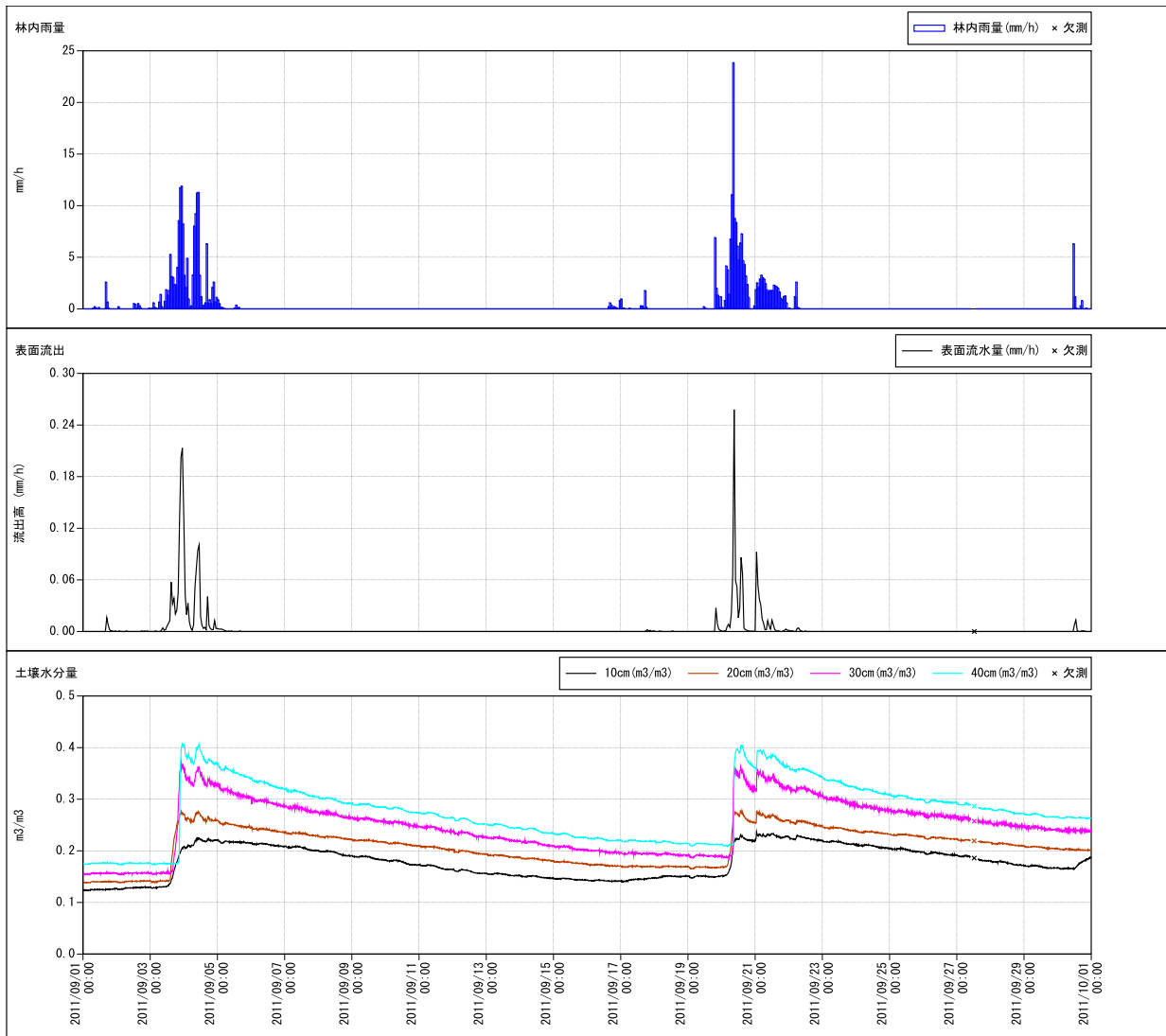


図3.13 区画(SR)における土壌水分変動の一例(区分Ⅲに該当する地点において2011(H23)年9月)

- \*降雨時、土壌水分(体積含水率)は地表面10cmから20cm, 30cm, 40cmと逐次反応するが、10cm, 20cm, 30cm, 40cmの順で土壌水分の上昇は大きくなる。
- \*降雨、表面流出高のピークと土壌水分のピークはほぼ一致し、降雨が少なくなると土壌水分もゆっくり低下する。
- \*深さ40cmの土壌水分が最も高く、最高で40%程度を示し、30cm, 20cm, 10cmの順で低くなる。
- \*表面下10cmの位置の土壌水分(体積含水率)は20%程度であり、飽和体積含水率に達しているとは考えられない。



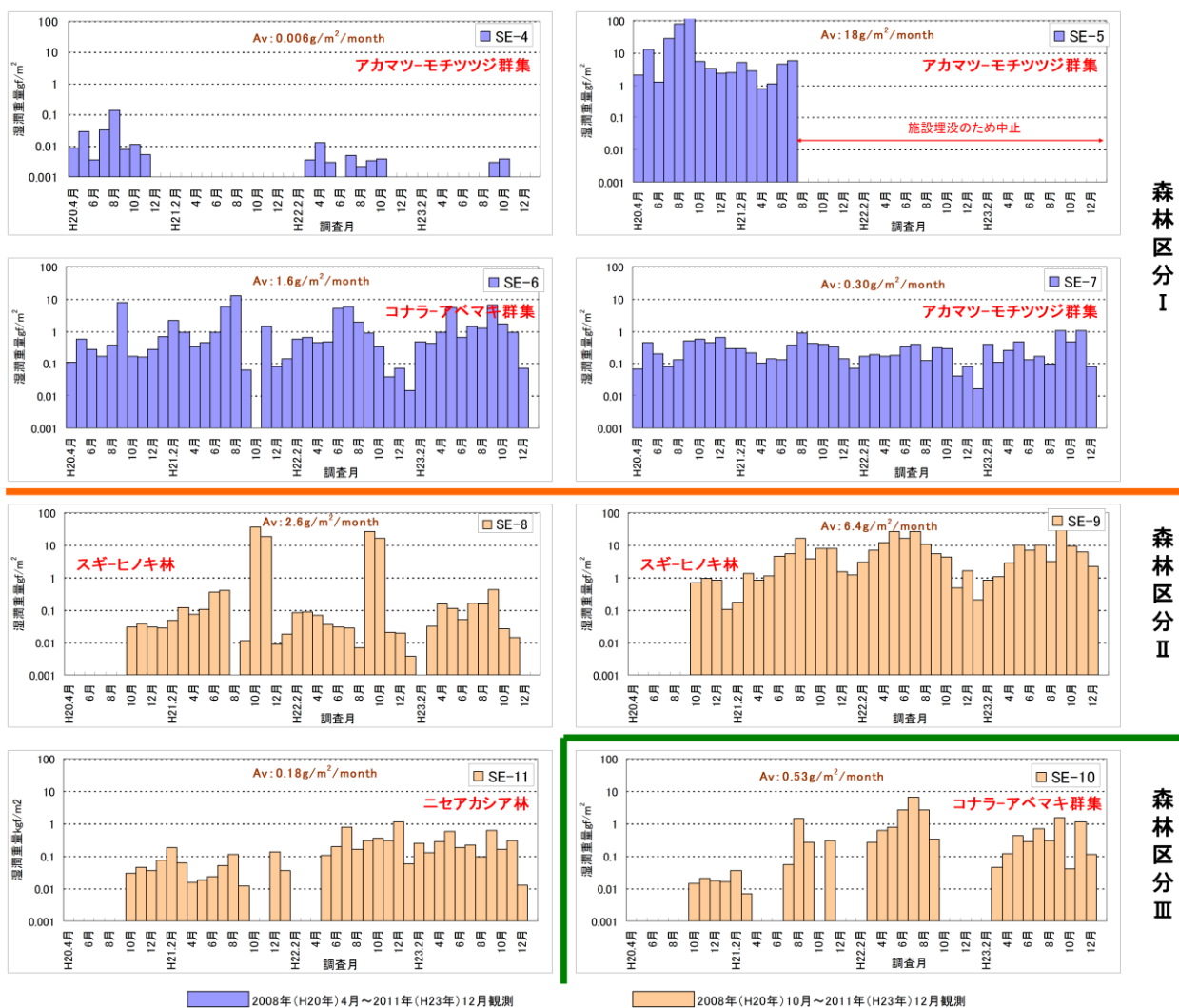


図3. 14 小流域(SE)の月別流出土砂量の経年変化(2008(H20)年4月～2011(H23)年12月)

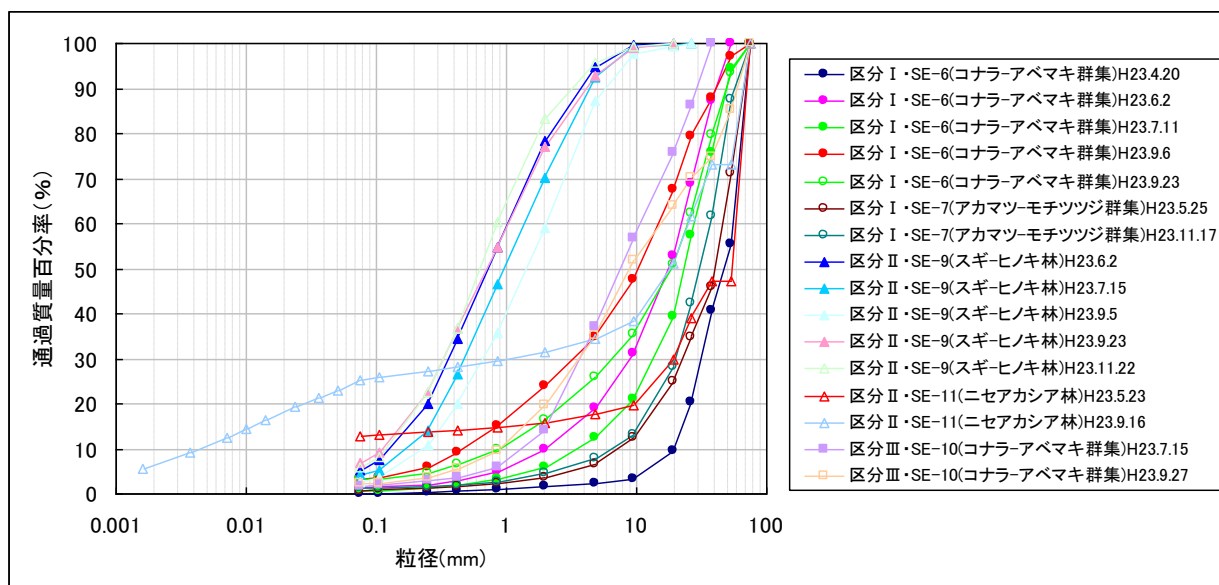


図3. 15 小流域(SE)に流出した土砂の粒度分布(○:区分Ⅰ、△:区分Ⅱ、□:区分Ⅲ)

侵食土砂量、流出土砂量ともに、ロードセルを設置して観測を試みているので(図1. 2、図1. 3)、回収による土砂量とロードセルによる計測値との関係を見た(図3. 16、図3. 17)。侵食土砂量については、ロードセルにより時系列での土砂量の把握が可能と期待したが、図3. 16に示すようにロードセルの読み値に累積傾向がなく、侵食土砂量の時間的な変化を捉えていなかった。また、流出土砂量については、図3. 17に示すように、回収による土砂重量に対してロードセル計測による土砂重量は半分程度以下となっており、流出土砂量を捉えていない。ロードセルの応答性にはまだ問題があると考えられるので、本研究ではロードセル計測による土砂量は検討対象としない。

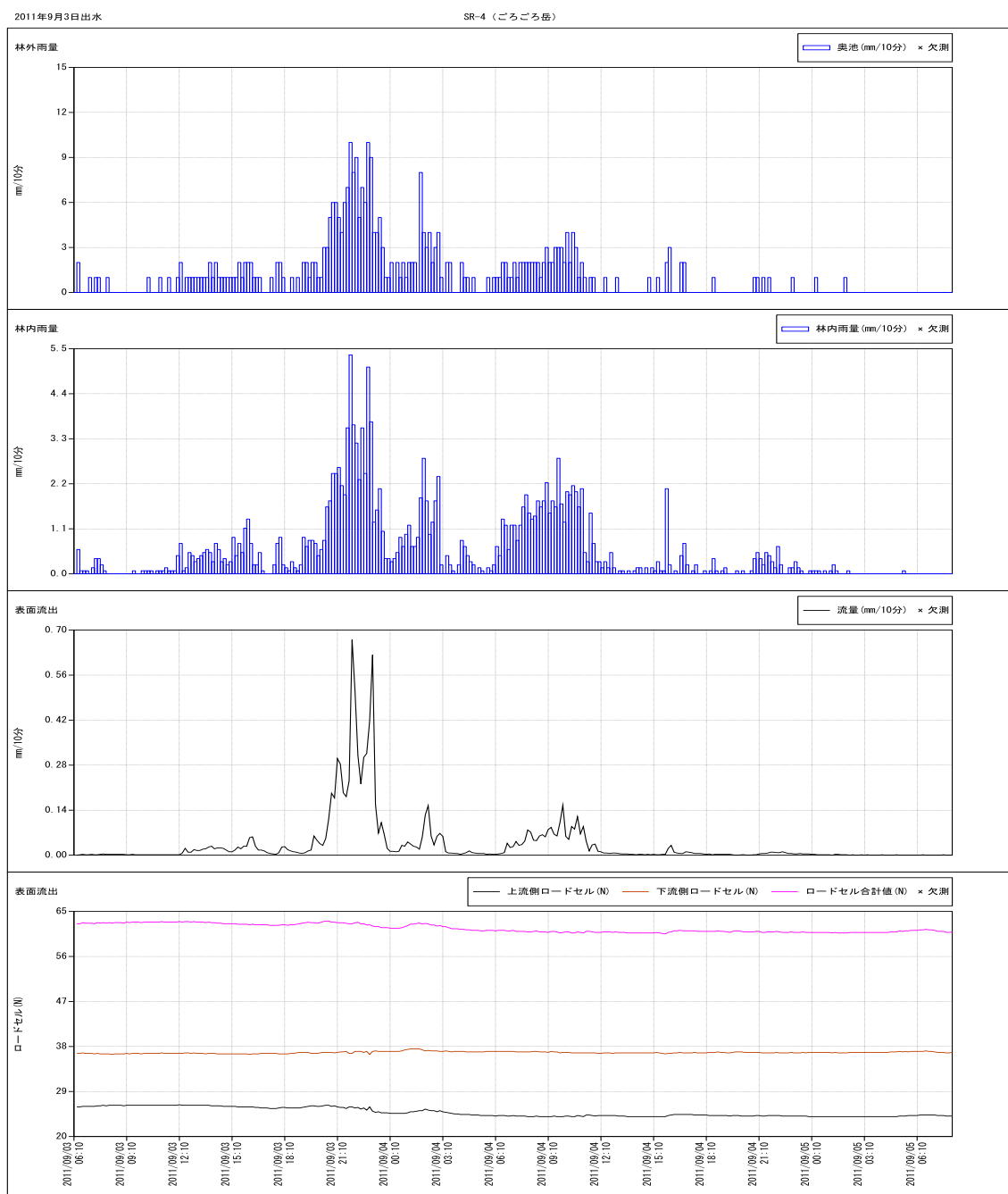


図3. 16 ロードセルを用いた区画(SR-4)における侵食土砂量観測の時系列変化

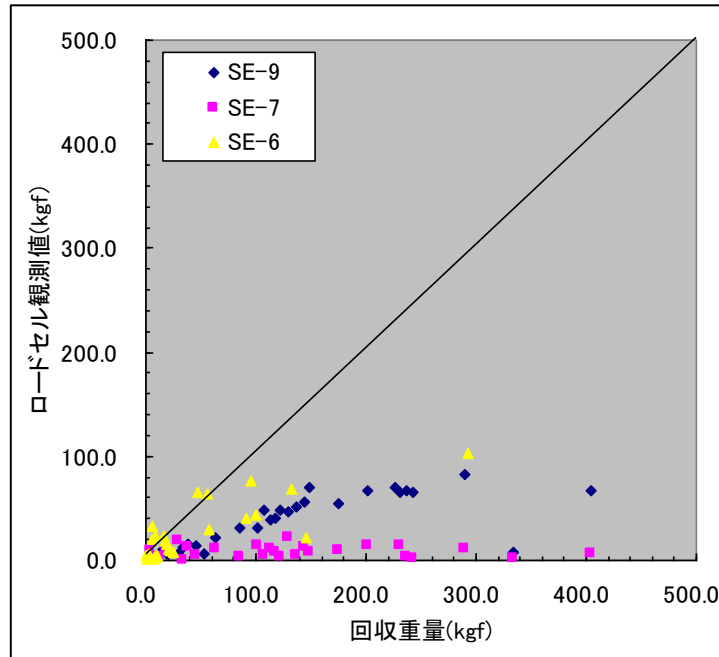


図3. 17 回収による流出土砂量とロードセルによる流出土砂量計測値との関係

### 3. 2. 3 侵食土砂量と流出土砂量の比較

表3. 3は、図3. 10の侵食土砂量と図3. 14の流出土砂量を比較したものである。表中の倍率とは、それぞれの区画・小流域における侵食土砂量に対する流出土砂量の割合をみたものである。流出土砂量と侵食土砂量とがほぼ変わらない観測地点もあるが、総じて、流出土砂量は侵食土砂量よりも小さく、斜面か河道部へ供給される土砂量は少なくなることがわかる。つまり、区画の単位面積あたりの侵食土砂量がそのまま流出するわけではないことを示している。このことは、区画での調査結果をそのまま流域に適用するのは適切ではないことを示している。スケールアップに関する研究が引き続き必要である(内田2004, 五味2006)。

表3. 3 侵食土砂量と流出土砂量の比較

観測所名	小区画(SR)		流域末端(SE)		差		備考
	面積 (m <sup>2</sup> )	侵食土砂量 (gf/m <sup>2</sup> /month)	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流出土砂量 (gf/m <sup>2</sup> /month)	土砂量 (gf/m <sup>2</sup> /month)	倍率	
S-4	41.0	2.1	0.0143	0.006	2.09	1/350.0	森林区分Ⅰ
S-5	54.8	32.0	0.0058	18.00	14.00	1/1.8	
S-6	38.5	74.0	0.0174	1.60	72.40	1/46.3	
S-7	38.5	527.0	0.0448	0.30	526.70	1/1756.7	
S-8	45.5	1.7	0.0092	2.60	-0.90	1/0.7	森林区分Ⅱ
S-9	42.0	4.4	0.0154	6.40	-2.00	1/0.7	
S-11	44.0	3.9	0.0086	0.18	3.72	1/21.7	
S-10	38.5	3.4	0.0036	0.53	2.87	1/6.4	森林区分Ⅲ

(図 3.10、図 3.14 より作成)

### 3.2.4 まとめ

斜面・小流域における侵食土砂量と流出土砂量については次のように整理できる。

- ・森林区分Ⅰから区分Ⅱ、区分Ⅲに向かうに従い、侵食土砂量は低減する。
- ・侵食土砂量に対してその流出土砂量は2～4オーダー程度小さくなり、斜面から河道部へ供給される土砂量は少なくなる。この傾向はどの森林状態でも同様である。
- ・小区画での侵食土砂量の調査結果をそのまま流域にスケールアップして適用することは適切でない。

### 3.3 森林区分の異なる斜面の流出・土砂流出特性のまとめ

上記3.1および3.2の結果から、六甲山系の斜面部における流出・土砂流出特性については次のように整理できる。

- ① 降雨に対して速やかに流出が応答し、降雨終了後には流出は速やかに低減する。
- ② 降雨ピーク後 60 分以内に流出ピークは出現する。流出ピークの遅れは、森林区分による明確な違いはない。
- ③ 降雨に対する表面流出高は、森林区分Ⅰから区分Ⅱ、区分Ⅲに向かうに従い小さくなる。森林区分Ⅰ、Ⅱでは雨量が大きくなると表面流出高も大きくなるが、森林区分Ⅲではその傾向は小さい。
- ④ どの区画にも侵食土砂量の経年的な変化や季節的な変化といったような規則的な変化はみられないが、森林区分Ⅰから区分Ⅱ、区分Ⅲに向かうに従い、表面流出量、侵食土砂量は低減する。
- ⑤ 侵食土砂量に対してその流出土砂量は2～4オーダー程度小さくなり、斜面から河道部へ供給される土砂量は少なくなる。この傾向はどの森林状態でも同様である。
- ⑥ 小区画での侵食土砂量の調査結果をそのまま流域にスケールアップして適用することは適切でない。
- ⑦ ほぼ同一の地形、地質、森林状態で、流域規模もほぼ同一の小溪流において、降雨時の流出量等の時系列変化は異なっている。この理由を地質、流域面積、森林状態の違いで説明することは難しい。土層中・基岩中の浸透・流出プロセスの違いが考えられる。

### 引用・参考文献

五味高志(2006): 土壌侵食と森林—森林斜面から流域の視点へ—, 森林科学, 47, pp.10-14

加藤裕子・恩田裕一・水山高久・小杉賢一郎・吉川愛・辻村真貴・秦耕二・岡本正男(2000): 揖斐川上流の地質の異なる流域における流出の遅れ時間の違い, 砂防学会誌, Vol.53, No.4, pp.38-43

恩田裕一・小松陽介・辻村真貴・藤原淳一(1999): 降雨流出ピークの遅れ時間の違いからみた崩壊発生時刻予知の可能性, 砂防学会誌, Vol.51, No.5, pp.48-52

内田太郎(2004): 近年における山地の土砂移動現象に関わる斜面水文プロセス研究の進歩, 砂防学会誌, Vol.57, No2, pp.58-64

## 第4章 六甲山系住吉川流域の河道部における流出・土砂流出特性

本章では、斜面・谷からの水・土砂の流出が集約される河道部において、その流出の実態を把握し整理する。具体には、ハイドロフォンと濁度計等を用いた流砂観測に基づき、流域単位の流出・土砂流出特性について把握し整理する。

### 4.1 西滝ヶ谷における流出・土砂流出特性

ここでは、第1章 1. 4. 2に示した住吉川流域の西滝ヶ谷での流砂観測結果について整理する。西滝ヶ谷で流砂観測を開始した2003(H15)年から2011(H23)年までの住吉川流域荒神山雨量観測所における日雨量の分布を図4. 1に示す。2004(H16)年、2010(H22)年、2011(H23)年は比較的日雨量が多い年となっており、特に2011(H23)年は日雨量が100mmを超える日が増加している。

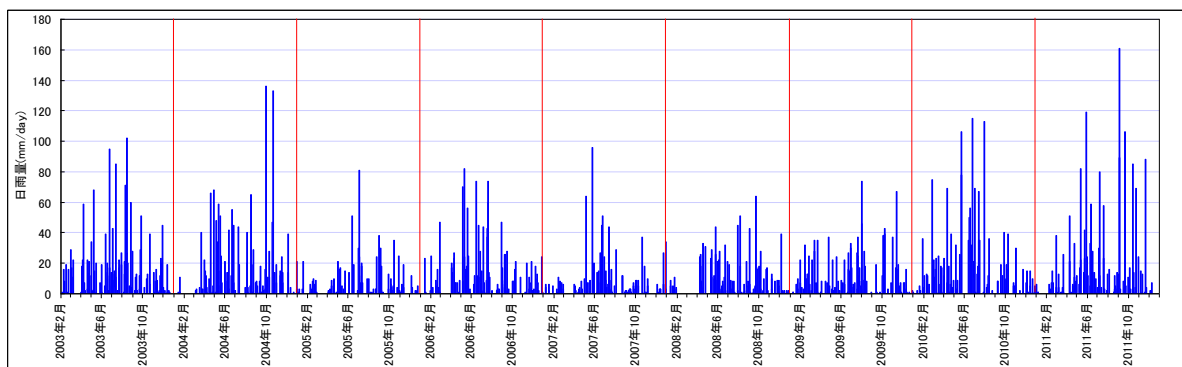


図4. 1 2003(H15)年～2011(H23)年までの住吉川荒神山観測所(六甲砂防事務所)における日雨量の分布

表4. 1 荒神山観測所(住吉川)の年間降雨量、最大日雨量

年	年間降雨量(mm/y)		荒神山		
	荒神山	アメダス神戸	20mm/day以上の日数	年最大日雨量(mm/day)	生起日
H15(2003)	1,722	1,538	29	102	8/14
H16(2004)	1,666	1,449	24	136	9/29
H17(2005)	870	687	14	81	7/4
H18(2006)	1,497	1,480	25	82	5/11
H19(2007)	932	922	13	96	5/25
H20(2008)	1,423	1,041	28	64	9/21
H21(2009)	1,419	1,198	23	75	2/26
H22(2010)	1,927	1,633	30	115	6/26

荒神山		
順位	生起年月日	日雨量(mm)
1	H16(2004/9/29)	136
2	H16(2004/10/20)	133
3	H22(2010/6/26)	115
4	H22(2010/7/29)	113
5	H22(2010/5/23)	106
6	H15(2003/8/14)	102
7	H19(2007/5/25)	96
8	H15(2003/6/24)	95
9	H15(2003/7/13)	85
10	H18(2006/5/11)	82

西滝ヶ谷での観測項目、方法を表4. 2に示す。

表4. 2 西滝ヶ谷における観測項目・方法

設置機器	観測項目	方法
ハイドロフォン	流砂量	流砂の衝突回数（パルス）を記録
濁度センサー (OBS-3)	濁度	赤外線（850nm±5nm）後方散乱計測方式による浮遊物質の反射強度測定
水圧式水位センサー	ハイドロフォン位置の水位（水位1） ピット流砂計測装置内の水位（水位2）	水圧
ピット流砂計測装置	ピット内堆積土砂量	プレッシャーピローによる荷重変化 定期的な土砂採取による堆砂量の計測と粒度分析

#### 4. 1. 1 観測データに影響を与える西滝ヶ谷流域の状況

図4. 2に西滝ヶ谷流域の縦断面図を示す。西滝ヶ谷第二床固が流砂観測実施地点である。

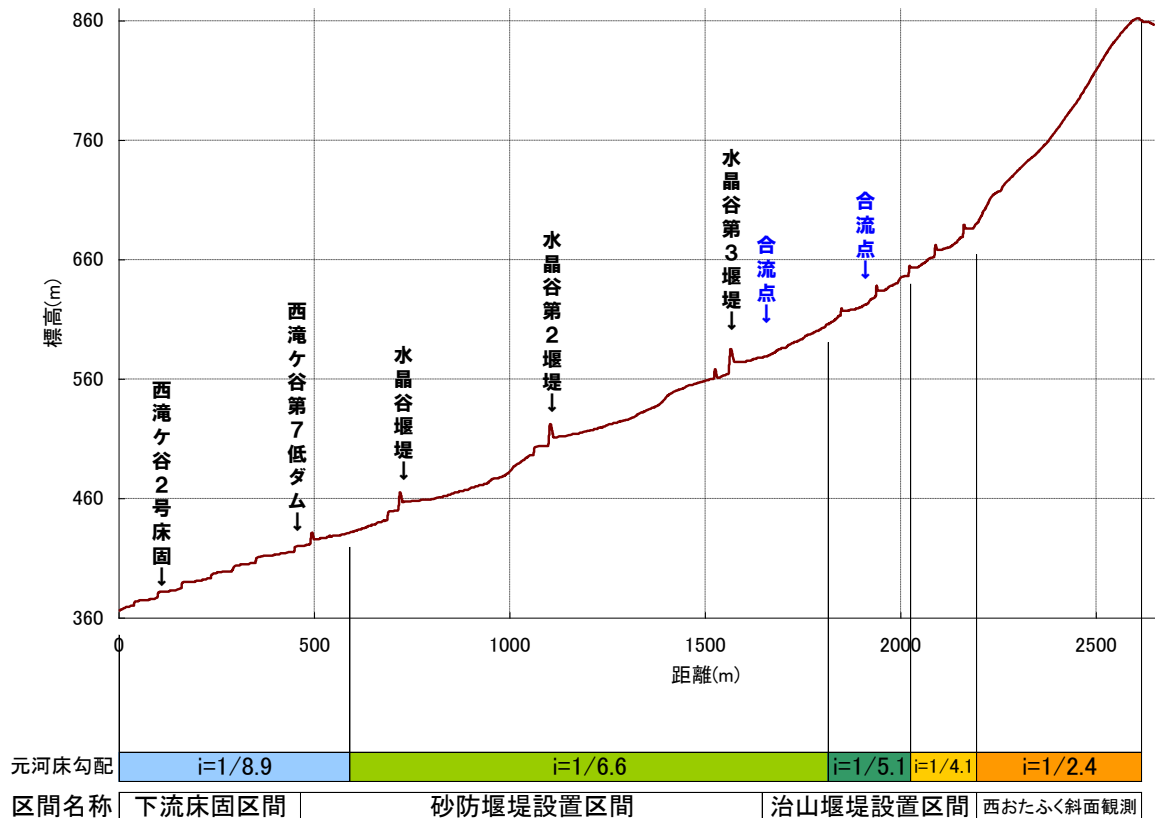


図4. 2 西滝ヶ谷流域縦断面図(すべての砂防堰堤の名称は記載していない)

### 1) 西滝ヶ谷流域の崩壊地の分布・推移

2004(H16)年、2006(H18)年、2008(H20)年の空中写真から、崩壊地の分布、推移を把握した。崩壊地の面積は2004(H16)年が最大であった。崩壊地の多くは水晶谷第2堰堤から水晶谷第3堰堤にかけての左岸側に分布している。2008(H20)年の空中写真では、水晶谷第3堰堤より上流の治山堰堤設置区間の左岸側に山腹工(植生基材吹付工)が確認できた。2006(H18)年には、水晶谷第2堰堤から水晶谷第3堰堤にかけて(図4. 2)の右岸側に崩壊地が存在しているが、これが純増なのかどうかは、2004(H16)年の空中写真ではこの部分が陰になっていたことから崩壊地の有無が判読できていないため不明である。

### 2) 土砂流出の実態

2004(H16)年前後から2011(H23)年の土砂流出実態について、文献・報告書及び空中写真の判読から把握した。星野ら(2004)によると、水晶谷第3堰堤副堤の左岸側に2003(H15)年5月～6月の降雨により20m<sup>3</sup>の溪岸崩壊が発生した。2004(H16)年、2006(H18)年、2008(H20)年の空中写真判読では、この期間に新たに発生したと思われる崩壊地、侵食は確認できない。2008(H20)年の空中写真では、水晶谷第3堰堤上流にある治山堰堤2基の堆砂域に土砂が新たに堆積したような状況がみられたが、治山堰堤は2007(H19)年に竣工しており、施工に伴う堆積域の攪乱の影響によるものと思われる。

### 3) 現地確認による状況

流砂観測地点の床固工群を含めて、これより上流に設置されている6基の砂防堰堤はすべて未満砂である。治山堰堤には工事の埋戻し土砂による堆積域での堆砂がみられるが、空き容量はある。水晶谷第2堰堤から水晶谷第3堰堤の間には過去に土砂が流出したと思われる堆積地があり、堆積地には樹高8m程度のヤシヤブシが侵入している。またこの区間の溪岸～山腹斜面には過去に発生したと思われる崩壊跡地がある。流砂観測実施場所(西滝ヶ谷第2床固工)から西滝ヶ谷第7低ダムの間は、床固工によって溪床は安定している。

### 4) 砂防堰堤・治山堰堤の工事

観測地点上流域では、1996(H8)年に着手した西滝ヶ谷床固工群の工事(図4. 2の西滝ヶ谷第2号床固から西滝ヶ谷第7低ダムまでの間)が1999(H11)年に竣工している。また、治山堰堤2基が2007(H19)年に着工され2009(H21)年に竣工している。

以上から、流砂観測データに影響を与える要素として、2003(H15)年5月～6月に発生した水晶谷第3堰堤副堰堤左岸側の20m<sup>3</sup>の溪岸崩壊、1999(H11)年に竣工した砂防施設と2007(H19)年に竣工した治山堰堤の工事中の溪岸・河床の攪乱の影響、未満砂の砂防堰堤・治山堰堤が考えられる。特に、工事中の溪岸・溪床の攪乱は流砂量と粒径分布に、また、未満砂の砂防堰堤・治山堰堤はその上流で発生した掃流砂を捕捉するので、これも観測される流砂量と粒径分布に影響することが考えられる。

#### 4. 1. 2 出水に対する流砂の応答

西滝ヶ谷で得た流砂観測データには、流量と流砂の応答に特徴がみられる事例があった。その事例を図4. 3に示す。流砂観測は、従来型ハイドロフォン、水圧式水位計、濁度計、ピット流砂計による(前出)。

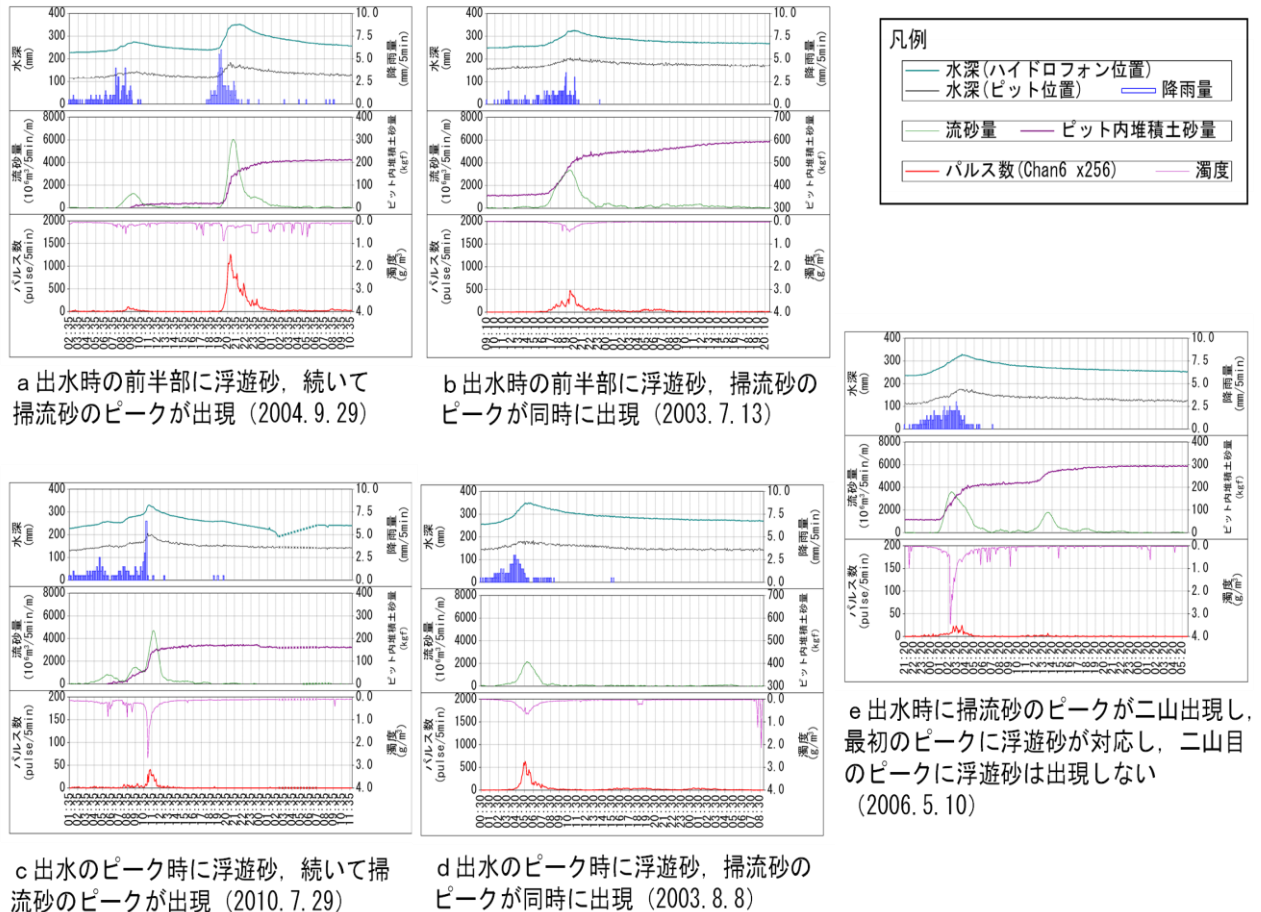


図4. 3 西滝ヶ谷における出水時の掃流砂、浮遊砂の流出状況

事例 a は、出水の前半部に浮遊砂(濁度)が、続いて掃流砂(ハイドロフォンパルス、ピット流砂計)のピークが出現する。

事例 b は、出水の前半部に浮遊砂(濁度)と掃流砂(ハイドロフォンパルス、ピット流砂計)のピークが同時に出現する。

事例 c は、出水のピーク時に浮遊砂(濁度)のピークが出現し、少し遅れて掃流砂(ハイドロフォンパルス、ピット流砂計)のピークが出現する。

事例 d は、出水のピーク時に浮遊砂(濁度)のピークと掃流砂(ハイドロフォンパルス、ピット流砂計)のピークが同時に出現する。

事例 e は、出水時に掃流砂のピークが2回出現し、最初のピーク時には浮遊砂のピークも同時に出現しているが、2回目の掃流砂のピーク時には浮遊砂は応答していない。



以上のような、出水波計、ハイドロフォンパルス波形、濁度波形の相互の出現順とその現れ方の特徴は、土砂生産形態と土砂生産位置の違いによるものと思われる。

浮遊砂成分の多い溪岸・山腹斜面からの土砂は、掃流砂とともに多量に流下する。浮遊砂成分の少ない溪床堆積土砂の再移動は、掃流砂よりも浮遊砂が少なくなる。掃流砂の移動は、河床材料と交換しながら流下し、一部滞留した掃流砂が遅れて流出することも考えられる。この場合には浮遊砂は伴わないと考えられる。また、土砂生産場所から流砂観測場所までの距離が長くなると、それに応じて掃流砂と浮遊砂は分離してくる、すなわち、流砂観測場所への到達時間に差が生じると考えられる。たとえば、山腹・溪岸で生産された土砂は流れのなかで掃流砂と浮遊砂に分離し、浮遊砂のほうが掃流砂よりも移動速度が速いので先に流砂観測場所に到達する。この掃流砂と浮遊砂の到達時間差を利用すると、土砂生産形態、土砂生産位置の推定が可能になると考えられる。

この視点から、事例 a～e の土砂生産形態、土砂生産位置は次のように推定できる。

事例 b,d はともに2003(H15)年7月、8月のデータである。掃流砂と浮遊砂(濁度)が同時に流砂観測点に到達していることから、土砂生産源は流砂観測地点の直上流であると考えられる。

事例 a は2004(H16)年のデータである。掃流砂よりも浮遊砂(濁度)のほうが早く流砂観測点に到達する出水状況になっている。これは、掃流砂と浮遊砂(濁度)の出現にタイムラグが生じる程度に土砂生産源が流砂観測点よりも上流域であると考えられる。

事例 e は2006(H18)年のデータ。掃流砂の到達が2回あり、1回目は浮遊砂を伴っているが2回目は浮遊砂はない。出水前半の降雨ピーク時に斜面崩壊が発生し崩壊土砂が河道に供給され観測点に流出したと思われ、掃流砂と浮遊砂(濁度)のピークがほぼ一致していることから土砂生産源は観測地点の直上流と思われる。出水の後半の流砂では浮遊砂(濁度)を伴っていないことから、先の流砂の一部が観測地点上流で一旦滞留したのちに流出したことが想定できる。さらに、表4.3からは、2008(H20)年～2009(H21)年の出水で掃流砂と浮遊砂(濁度)がほぼ同時に観測地点に到達しており、観測所の直上流に土砂生産域があると考えられる。事例 c は2010(H22)年のデータで、掃流砂と浮遊砂の流出状況は事例 a とほぼ同様の傾向にあり、土砂生産源は流砂観測地点よりも上流域であると考えられる。

このようにみると、流砂形態に時系列的な変化があるようにみられる。観測した流砂データを時系列に整理した表4.3をもとに詳細を次節で述べる。

1) 流砂形態の時系列変化

表4. 3は観測期間中の中小出水時に観測した流砂データを時系列に整理したものである。

表4. 3 観測期間中の中小出水時の流砂形態

出水名称	出水期間	期間雨量 (mm)	最大時間雨量		ピーク流砂量 (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)	ピット内堆積土砂量 (kgf)	ピーク水深 (mm)	単位幅ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s/m)	流砂の流出形態					
			時刻	雨量 (mm)					掃流砂-出水前半濁度-掃流砂直前	掃流砂-出水前半濁度-掃流砂同時	掃流砂-出水同時濁度-掃流砂直前	掃流砂-出水同時濁度-掃流砂同時	掃流砂-ふた山型濁度-一山型	
H15/7/3出水	2003/7/3 17:35 ~ 2003/7/4 5:20	42.0	2003/7/3 21:00	12.0	2863.491	217.251	301.0	1.25					○	
H15/7/13出水	2003/7/13 9:10 ~ 2003/7/14 5:25	77.5	2003/7/13 19:00	16.5	3353.892	203.270	326.0	1.43		○				
H15/8/8出水	2003/8/8 11:10 ~ 2003/8/9 14:55	99.0	2003/8/9 5:00	28.0	2164.528	94.644	350.0	1.61					○	
H15/8/14出水	2003/8/14 0:45 ~ 2003/8/15 13:25	127.0	2003/8/14 12:00	19.0	1561.392	234.459	329.0	1.45		○				
H15/8/26出水	2003/8/26 17:15 ~ 2003/8/27 4:10	44.0	2003/8/26 19:00	17.0	355.118	33.340	312.0	1.33					○	
H15/8/30出水	2003/8/30 18:45 ~ 2003/8/31 2:55	38.0	2003/8/30 21:00	30.5	873.703	30.114	329.0	1.45		○				
H15/9/24出水	2003/9/24 22:10 ~ 2003/9/25 18:45	56.0	2003/9/25 10:00	14.0	1324.646	59.153	319.0	1.38		○				
H16/5/13出水	2004/5/13 8:05 ~ 2004/5/13 22:55	57.0	2004/5/13 15:00	25.0	1916.509	73.134	312.0	1.33				○		
H16/5/15出水	2004/5/15 20:50 ~ 2004/5/17 0:45	62.0	2004/5/16 10:00	11.0	946.981	68.832	297.0	1.22					○	
H16/9/28出水	2004/9/28 21:30 ~ 2004/9/29 16:45	70.5	2004/9/29 9:00	21.5	1257.005	48.398	275.0	1.08				○		
H16/9/29出水	2004/9/29 18:15 ~ 2004/9/30 14:45	78.0	2004/9/29 20:00	34.0	6031.368	196.817	353.0	1.63	○					
H18/5/10出水	2006/5/10 10:50 ~ 2006/5/11 13:30	111.5	2006/5/11 3:00	21.5	3601.910	202.194	330.0	1.46			○			
H18/5/19出水	2006/5/19 9:20 ~ 2006/5/20 3:55	60.5	2006/5/19 17:00	19.5	4244.505	186.062	296.0	1.22					○	
H18/6/15出水	2006/6/15 5:20 ~ 2006/6/16 7:35	77.0	2006/6/15 19:00	13.5	1865.778	89.267	282.0	1.12				○		
H18/7/18出水	2006/7/18 12:05 ~ 2006/7/19 21:00	89.0	2006/7/19 6:00	16.0	1764.316	131.211	307.0	1.29	○					○
H18/8/29出水	2006/8/29 20:55 ~ 2006/8/30 6:25	59.5	2006/8/29 22:00	49.0	3878.113	92.483	291.0	1.18				○		
H19/3/24出水	2007/3/24 10:40 ~ 2007/3/25 11:25	76.5	2007/3/24 19:00	9.0	558.042	50.549	268.0	1.03					○	
H20/5/24出水	2008/5/24 11:05 ~ 2008/5/25 13:00	70.0	2008/5/25 0:00	14.0	3663.915	141.966	242.0	0.87					○	
H21/2/13出水	2009/2/13 17:15 ~ 2009/2/14 12:30	48.0	2009/2/14 2:00	13.0	12124.741	180.684	237.0	0.84					○	
H21/8/1出水(2)	2009/8/1 22:15 ~ 2009/8/2 13:30	78.0	2009/8/2 3:00	33.0	5225.307	51.624	293.0	1.20					○	
H22/2/26出水	2010/2/26 4:50 ~ 2010/2/27 6:00	75.0	2010/2/26 20:00	12.0	2173.547	63.024	238.0	0.85					○	
H22/4/2出水	2010/4/2 1:55 ~ 2010/4/2 13:20	23.0	2010/4/2 3:00	10.0	2698.896	71.628	238.0	0.85					○	
H22/5/23出水	2010/5/23 1:35 ~ 2010/5/24 19:20	184.0	2010/5/23 19:00	16.0	2183.693	241.988	337.0	1.51	○					○
H22/6/15出水	2010/6/15 8:45 ~ 2010/6/16 7:50	75.0	2010/6/16 1:00	22.0	683.179	61.949	267.0	1.02					○	
H22/6/18出水	2010/6/18 15:35 ~ 2010/6/19 4:30	46.0	2010/6/18 20:00	12.0	4648.099	190.794	300.0	1.24					○	
H22/7/28出水	2010/7/28 22:35 ~ 2010/7/29 19:10	111.0	2010/7/29 11:00	29.0	4707.849	199.613	330.0	1.46				○		

流砂形態は、前出どおり、

- ① 掃流砂が出水時の前半に出現し、浮遊砂(濁度)は掃流砂よりも早く到達する
- ② 掃流砂が出水時の前半に出現し、浮遊砂(濁度)は掃流砂と同時に到達する
- ③ 掃流砂が出水ピークとほぼ同時に出現し、浮遊砂(濁度)は掃流砂よりも早く到達する
- ④ 掃流砂が出水ピークとほぼ同時に出現し、浮遊砂(濁度)は掃流砂と同時に到達する
- ⑤ 掃流砂のピークが2回出現し、浮遊砂(濁度)は掃流砂の1回目のピーク時にのみ出現する

の5パターンの特徴に整理できる。

これによると、2003(H15)年の出水時には、掃流砂のピークが出水の前半部に発生している場合と、出水のピーク流量とほぼ同時期に発生している場合とが同数生じているが、濁度のピークは掃流砂のピークとほぼ同時に流砂観測地点に到達している。2004(H16)年の出水時には、濁度が掃流砂よりも早く観測地点に到達する流砂形態が出現するようになる。掃流砂は、出水のピーク前あるいはピーク時に出現している。2006(H18)年の出水時には、濁度が掃流砂よりも早く観測地点に到達する流砂形態が多く出現する。なお、掃

流砂が出水ピークの前半部に出現する場合よりも、出水ピークと同時に出現している場合の方が多い。また、2006(H18)年の出水時には、掃流砂が二山出現する場合が認められ、二山目の掃流砂のピークには濁度(浮遊砂)を伴わない。2008(H20)～2009(H21)年の出水時には、出水のピークと掃流砂のピーク及び濁度のピークがほぼ同時に出現している。2010(H22)年の出水時には、2004(H16)年と同様の傾向がみられ、また、掃流砂が二山出現する場合が認められ、二山目の掃流砂のピークには濁度(浮遊砂)を伴わない場合もみられる。

土砂生産源は、2003(H15)年には観測点直上流、2004(H16)年には観測点よりも上流域、2006(H18)年には観測点よりも上流域でさらに掃流砂の一部は出水期間中に上流で滞留していた可能性がある。2008(H20)年、2009(H21)年は観測点の直上流に土砂生産源が発生し、2010(H22)年には土砂生産源に2004(H16)年、2006(H18)年と同様の傾向がみられる。流砂形態に5年程度で一つのパターンがあるように見えるが、規則性は不明である。

なお、小田ら(2005)は、水理模型実験において、流砂量が増えているのに記録されるパルス数が減少する場合やほとんどゼロになる場合を報告している。それを受けて水山ら(2008)は、流砂量の多い状態でのハイドロフォンによる流砂計測は音圧データでの取得が良いことを示した。西滝ヶ谷での計測において、小田ら(2005)が報告したような「流砂量の増加に伴うパルス数の低下現象」が発生しているのかどうかを確認するため、図4.3で検証すると、パルス数のピークと流砂量のピークは一致しており、両方の波形は同一であり、流砂量のピーク付近の波形と比較してパルス数が低下していると認められる波形はしていない。このため、小田ら(2005)が報告したような現象は発生していないと判断した。これは、観測対象溪流においては、パルス数の低下を生じさせるような規模の流砂が発生していなかったから、と考えられる。

#### 4. 1. 3 ピット流砂計測装置による累加流砂量の流砂量への変換

1.2に示したように、ハイドロフォンパルス数の変化は掃流砂量の相対的な変化は示すが、絶対量はわからない。そのため、ハイドロフォンのキャリブレーションのためにピット流砂計による掃流砂量計測をセットで行っている(前出)。ピット流砂計測装置は、ピットに捕捉された土砂の重量を圧力水頭に換算して算定するもので、土砂がピットに捕捉されるとプレッシャーピローが反応して圧力水頭が振動を始める仕組みである。つまり、プレッシャーピローで計測される累加流砂量は振動しながら増加するので、振動による誤差をなくする必要がある。このため、移動平均をとることとし、データ整理を行いやすい60分に設定した。また、累加流砂量を流砂量に変換する場合、求める時刻の流砂量はその時刻の累加流砂量からその前の時刻の累加流砂量との差をとることになる。この差をとる時間の設定も移動平均と同様60分とした。

#### 4. 1. 4 掃流砂量の時系列変化

ピット流砂計で観測された掃流砂量とその粒度分布を整理する。なお、ピット内が出水時に満杯となりあふれたということはなく、流砂は確実に捕捉されていた。

1) ピット流砂計による掃流砂量と粒度分布

図4. 4は、ピット流砂計で計測した掃流砂量の累加重量(kgf)を2003(H15)年～2010(H22)年まで時系列で示したものである。同図には荒神山雨量観測所の日雨量を同時に示した。また、図4. 5には、ピット内に捕捉した掃流砂の粒度分布を示す。

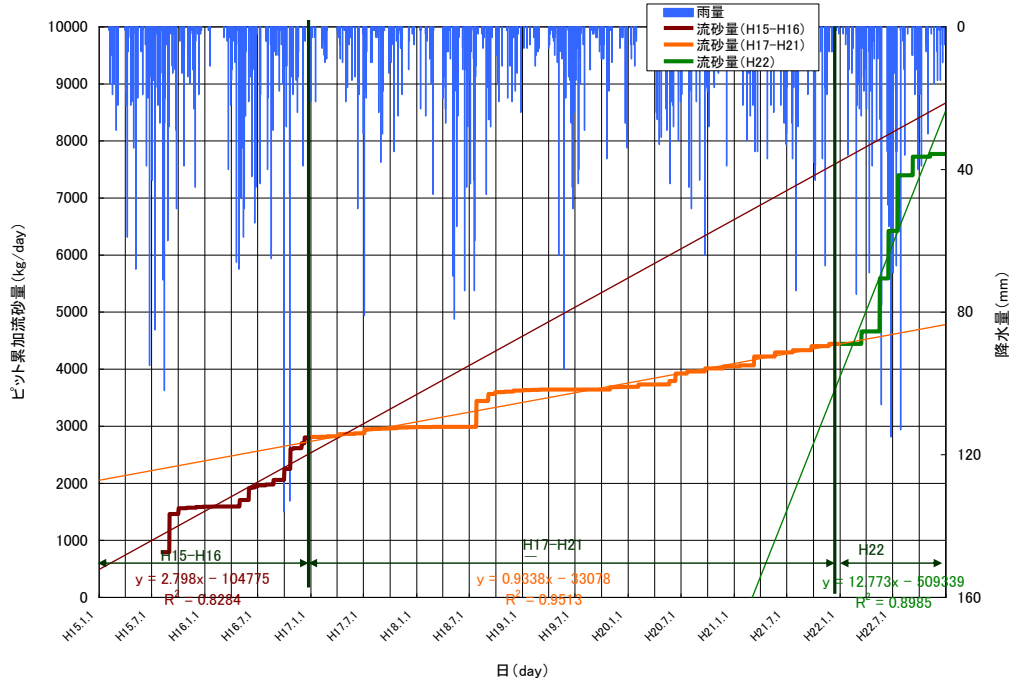


図4. 4 西滝ヶ谷流砂観測地点における掃流砂量の時系列変化

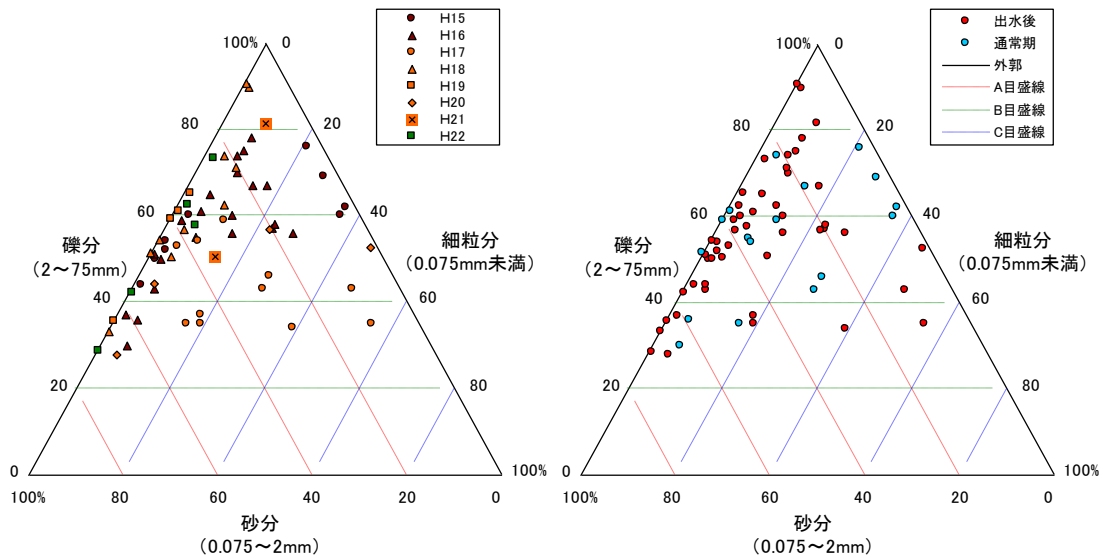


図4. 5 西滝ヶ谷流砂観測地点のピット内捕捉土砂の粒度分布

2003(H15)年から2004(H16)年にかけて、また、2010(H22)年は、観測期間中において掃流砂量が多い。この量は2005(H17)年から2009(H21)年までに観測した掃流砂量の総量に対して、2003(H15)～2004(H16)年は

約3倍、2010(H22)年は約12倍となっている。この理由について、日雨量との関係を見ると、2003(H15)～2004(H16)年、2010(H22)年は日雨量100mm を越える日に掃流砂量が増加している傾向がみられるが、2007(H19)年5月25日の日雨量96mm に対しては掃流砂量の増加はみられない。ほかの時期と比較して2003年(H15)、2005(H17)年に細粒分が目立つが、やはり雨量との関係は見いだせない。1996(H8)年に着工し1999(H11)年に竣工した砂防施設、2007(H19)年に着工し2009(H21)年に竣工した治山施設の工事中の河床等の攪乱や施設による流砂量の貯留の影響は考えられる。すなわち、砂防施設の完成により溪床の粗粒化現象が進む中で2003(H15)～2004(H16)年は掃流砂量が増加した。また、この砂防施設は観測場所の直上流であるため、2003(H15)年は浮遊砂も掃流砂と同時に観測場所に到達した、と考えられる。2005(H17)年以降は、アーマコートが形成されたために観測場所の直上流からの土砂生産は少なくなり、さらに上流での土砂生産・流出がデータに表れていると思われる。つまり、土砂生産場所から観測場所までの距離が長くなったため、浮遊砂のほうが掃流砂よりも早く観測場所に到達する事例が多くなったものと考えられる(表4. 3)。また、2007(H19)年に治山工事により溪岸・河床が攪乱されたが、その後の日雨量は平均的に40mm 程度以下と少なかったため土砂流出は発生しなかったものの、その影響は2010(H22)年になって日雨量が100mm を越えるようになると流砂量の増加として現れるようになったと考えられる。

なお、出水時の単位幅ピーク流量( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )と、その出水時の総流砂量(kgf)の関係を年別に図示すると、図4. 6ようになる。単位幅ピーク流量が増加すると総流砂量も増加する。2005(H17)年以降では、単位幅ピーク流量が $0.70\text{m}^3\sim 0.95\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  の範囲では総流砂量が0となる場合があるが、 $0.95\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  以上になると必ず流砂がある。このため、西滝ヶ谷では、2005(H17)年以降はアーマコートが形成され、単位幅流量 $0.95\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  が移動限界流量であると推測される。

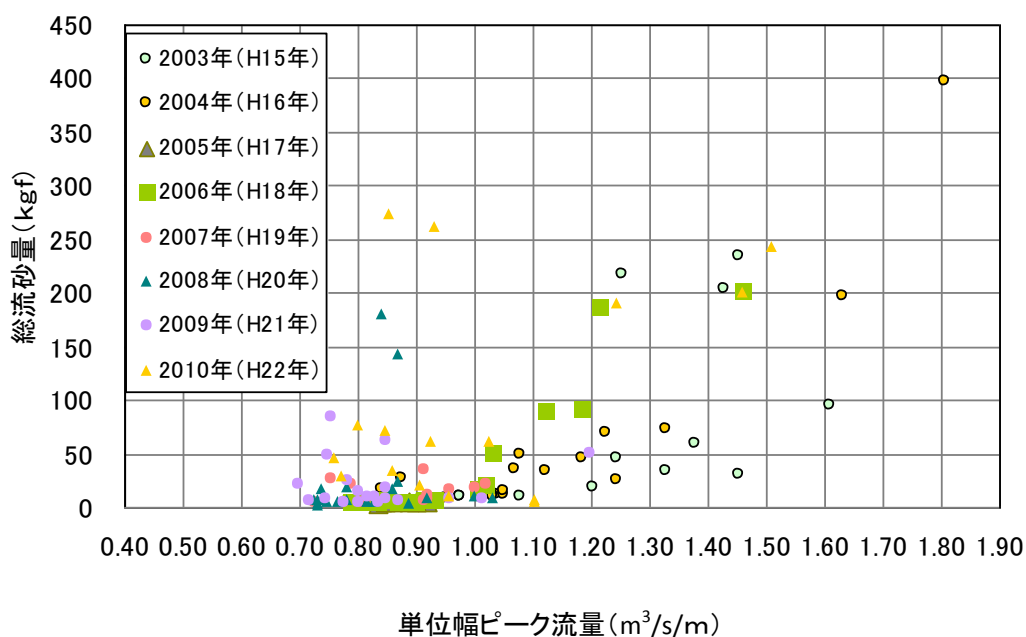


図4. 6 単位幅ピーク流量と総流砂量の関係(観測年別)

#### 4. 1. 5 浮遊砂量の時系列変化

図4. 7は、流量と、濁度計から得た浮遊砂量との関係を時系列で示したものである。なお、2005(H17)年、2007(H19)年は、データが取得できていない。

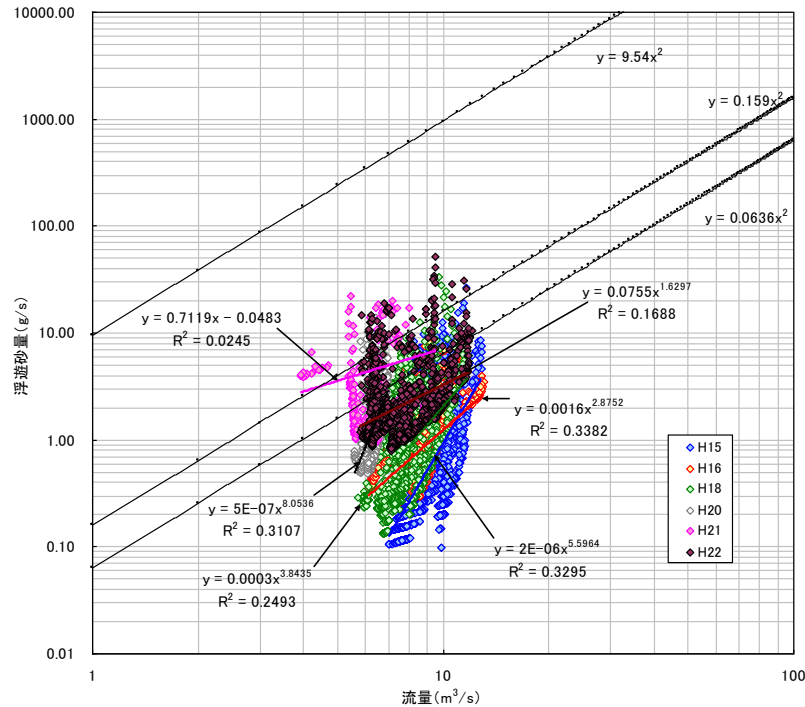


図4. 7 流量—浮遊砂量の関係の時系列変化

2003(H15)年、2004(H16)年、2006(H18)年は、流量—浮遊砂量の関係はほぼ同様な傾向にあり、流量に対する浮遊砂量は少ない。2008(H20)年、2009(H21)年になると、浮遊砂量は多くなる。浮遊砂量の変化の理由には、2007(H19)年に着工した治山堰堤工事の影響が考えられる。すなわち、工事により溪岸・溪床が攪乱され、そこから濁水が発生したものと考えられる。

#### 4. 1. 6 ハイドロフォンパルス数とピット流砂計による流砂量の対応

図4. 8に2003(H15)年、2004(H16)年のハイドロフォンパルス数とピット流砂計による流砂量の対応関係を示す。ハイドロフォンパルス数とピット流砂量との間に良好な関係が得られており、計測値には一次の相関がみられる。出水毎にみると相関はさらに高くなるが、相関式の傾きは出水ごとに異なる。流量が少ないほど傾きは急になっている。この理由については、流出土砂の粒度分布の違い、流量の違い、が考えられる。そこで粒度分布と流量について分析した。

##### 1) 出水ごとの流出土砂の粒度分布とハイドロフォンパルス

ハイドロフォンに衝突する砂礫の運動量は粒径にも依存するので、西滝ヶ谷観測所のピット流砂計に捕捉された土砂の粒度分布をみた(図4. 9)。d50=1~2mm程度で、出水による差異はみられない。ハイドロフ

オンパルス数とピット流砂計による流砂量の関係式の傾きを流砂の粒度分布で説明することは難しい。

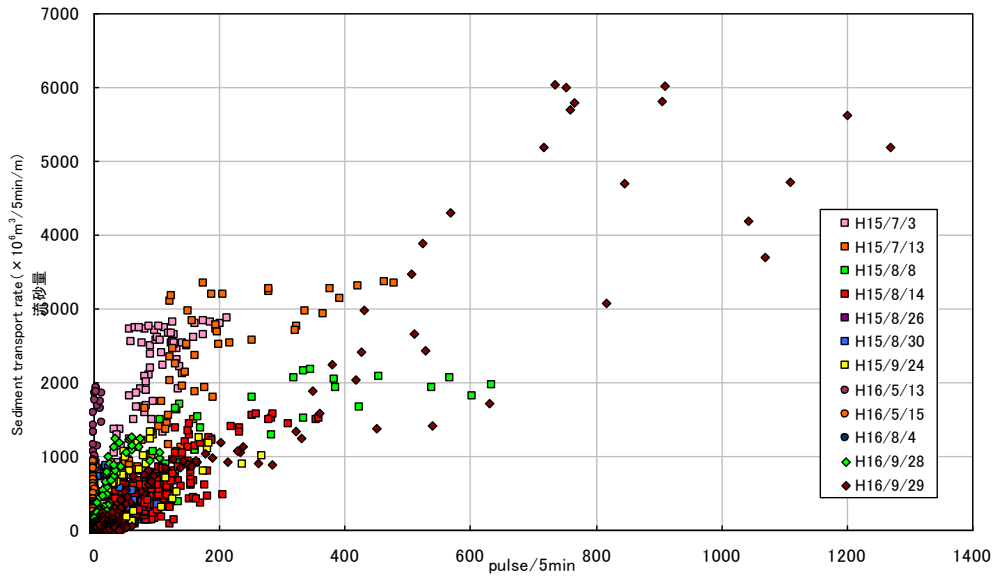


図4. 8 ハイドロフォンパルスとピット流砂計による流砂量の相関図(2003(H15)年～2004(H16)年)

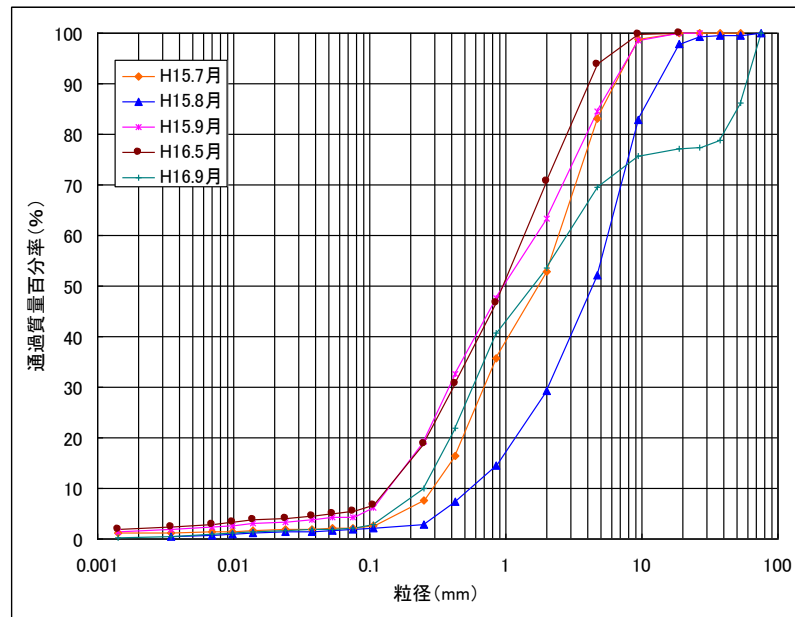


図4. 9 2003(H15)年、2004(H16)年にピット流砂計に堆積した土砂の粒度分布

試験時期	対応出水
H15.7月	H15(2003)/7/3 H15(2003)/7/13 H15(2003)/7/29
H15.8月	H15(2003)/8/9 H15(2003)/8/26 H15/(2003)/8/30
H15.9月	H15(2003)/9/25
H16.5月	H16(2004)/5/13 H16(2003)/5/16
H16.9月	H16(2004)/9/29

## 2) 流量とハイドロフォンパルス

ハイドロフォンは、流砂が鋼管に衝突したときの弾性波をセンサーで捉え、設定した閾値を超えたものをパルスとしてカウントする。同程度の流砂量、粒度分布であっても、流量が異なると掃流層の速度が異なるのでハイドロフォンに与える衝突エネルギーが異なると考えられる。そこで、流量の違いによってハイドロフォン-流砂量関係式の傾きがどのように変化するか、その時の決定係数がどう変化するかを検討した。なお、流量は直接観測していないため、水位の違いで検討した。水位は10mm単位で区分した。

図4. 10は水位ごとにパルス数と流砂量の関係を見たものである。図4. 11はこのときの相関式の傾きと決定係数を示したものである。

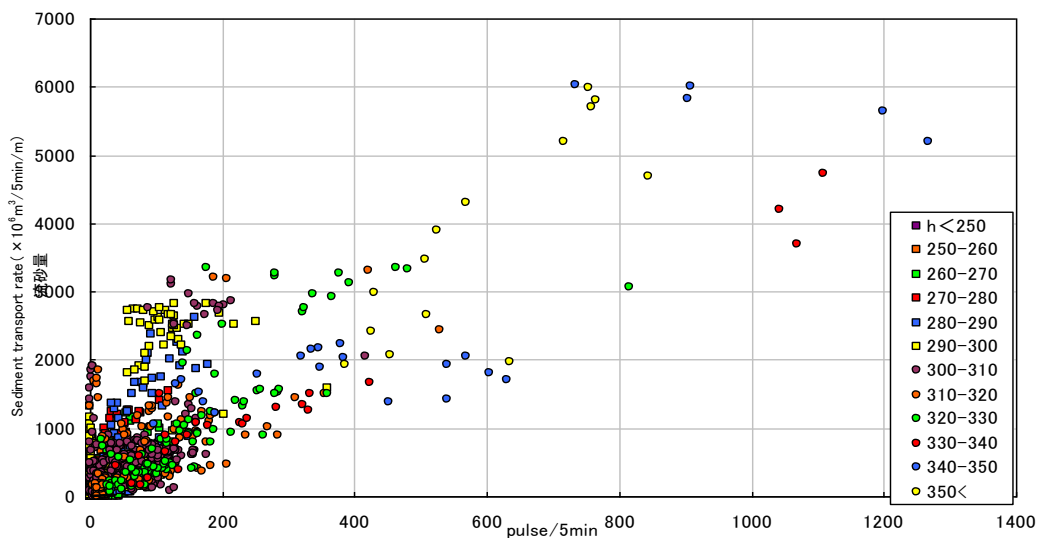


図4. 10 水位ごとのパルス数と流砂量の関係(2003(H15)年、2004(H16)年)

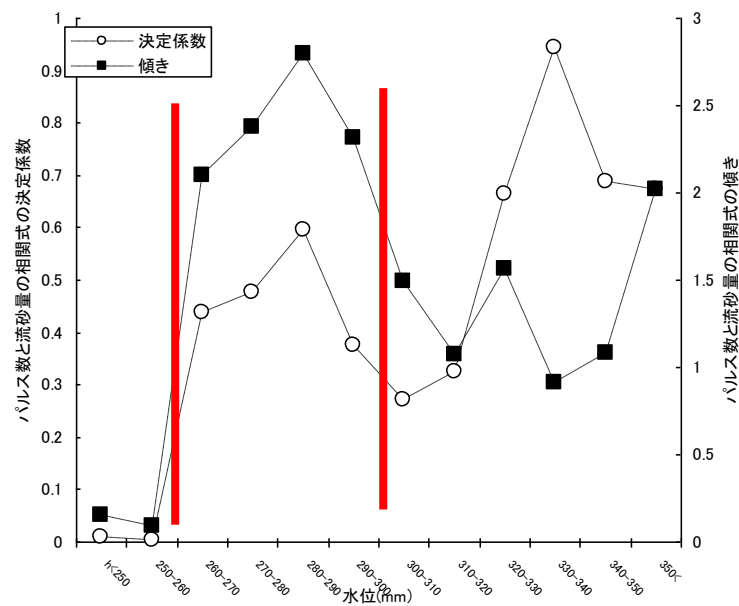


図4. 11 水位ごとのパルスと流砂量の相関式の関係(2003(H15)年、2004(H16)年)



水深が260mm未満、290～320mmの間でハイドロフォンパルスと流砂量との相関は低くなるが、320mm以上になると相関は高くなる(決定係数は大きくなる)。相関式の傾きは、水深の上昇とともに変化し、 $h < 260\text{mm}$ 、 $260\text{mm} \leq h < 300\text{mm}$ 、 $h \geq 300\text{mm}$ の区分で分けることができる。300mm以上で傾きは小さくなり、パルスの発生確率が高くなっている(図4.12)。ハイドロフォンパルス数と流砂量の関係式を流量(水位)で区分して作成することは可能であると思われる。

なお、ハイドロフォンによる流砂量への換算の試みはほかにも行われているが(中谷 2008)、現時点ではまだ確立していない。

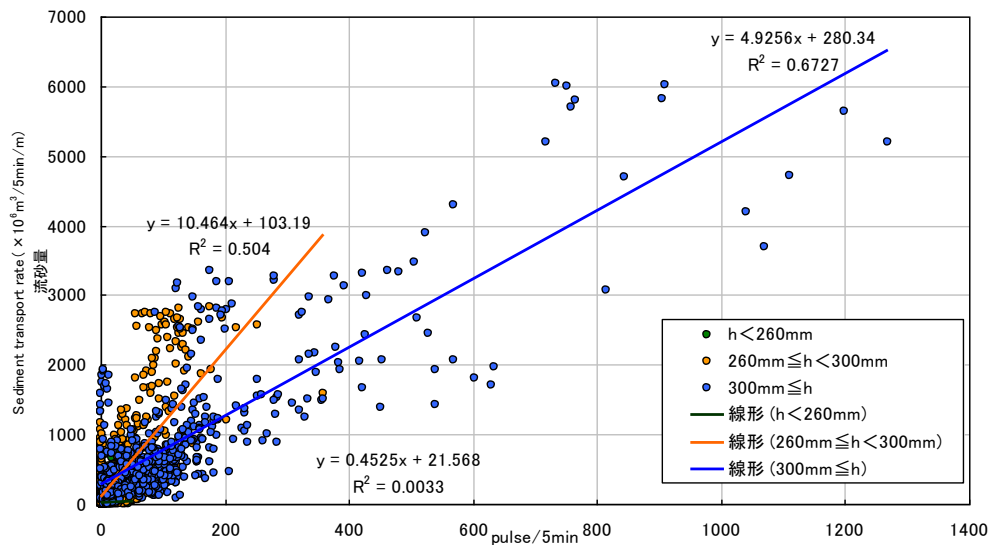


図4.12 水位ごとに相関係数を算出した場合(2003(H15)年、2004(H16)年)

出水時に水位が上昇すると掃流砂に影響する溪床付近の流速は増大し、ハイドロフォンに衝突する砂礫の運動量は大きくなるとともに、ハイドロフォンを跳躍して衝突しない砂礫が多くなることが予想される。図4.12からは、水深300mm未満から300mm以上になると、ハイドロフォンに衝突する砂礫の個数自体に差異はなくても、流速が早くなった分運動量が大きくなり、計測できなかった砂礫が計測できるようになるため相関式の傾きが緩くなっているものと思われる。さらに増水し水深が大きくなると、流砂量は増えるがハイドロフォンを跳躍する砂礫が多くなり、関係式の傾きは再び大きくなると考えられる。

## 4.2 河道での流砂観測から得られた知見とまとめ

住吉川西滝ヶ谷流砂観測所での観測結果の解析から得られた知見をまとめると、次のとおりである。

- ①流砂観測により、流砂の生起時間を把握できた。
- ②河道での水・土砂動態には時系列に5つのパターンがみられたが、規則性は不明である。
- ③流量と流砂量は1:1に対応しない。
- ④掃流砂の増加と日雨量とは明確な関係は見られない。
- ⑤掃流砂の増加には工事等による溪床等の攪乱(移動可能土砂量の増加への寄与)によるものが考えられる。
- ⑥粒度分布には砂防・治山堰堤への堆積による影響が考えられる。

- ⑦ハイドロフォンのパルス数をピット流砂計の観測結果を用いてキャリブレーションすることにより、水深をパラメータとして流砂量換算式を作成することが可能である。
- ⑧ハイドロフォン、濁度計、ピット流砂計、水位計を用いた流砂観測により、土砂生産形態、河道への土砂供給位置(土砂生産位置)の想定が可能である。

## 引用・参考文献

- 星野和彦・酒井哲也・水山高久・里深好文・小杉賢一郎・山下伸太郎・佐光洋一・野中理伸(2004): 流砂等計測システム(六甲住吉型)と観測事例、砂防学会誌、Vol.56,No.6,pp.27-32
- 木下篤彦・河野貴司・小菅尉多・土佐信一・塩野康浩・水山高久・小杉賢一郎(2011): 流砂量計測による住吉川の土砂動態に関する検討、平成23年度砂防学会研究発表会概要集
- 水山高久・松岡美和・野中理伸(2008): 流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測(音圧データの取得)、砂防学会誌、Vol.61,No.1,pp.35-38
- 中谷洋明(2008): ハイドロフォンシステムの流砂捕捉率に対する流量の影響に関する事例検討、砂防学会誌、Vol.61,No.4,pp.12-20
- 小田晃・長谷川祐治・水山高久・宮本邦明・野中理伸(2005): ハイドロフォンによる流砂量計測の水理模型実験への適用、砂防学会誌、Vol.58,No.2,pp.15-25

## 第5章 流域管理システム(WMS)の構築

本章では、第3章、第4章で整理した結果を踏まえ、六甲山系住吉川流域を対象にした「流域管理システム(WMS)」の構築について述べる。

### 5.1 流域管理システム(WMS)の概要

本研究で構築する「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。)(富田ら 2012)は、過去に筆者らが検討した「砂防施設計画策定支援システム: Computer-Aided Sabo Facilities Planning System(CASFPS)」(以降、CASFPSと称する。)(水山ら 1998)を基本に、これを改良する方法で進める。CASFPS は河床変動計算に重きを置くもので流水の運動方程式、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堰堤の諸元を組み込むことによって砂防堰堤の効果を評価するものである。CASFPS では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設定して計算するものとなっている。

流域管理システム(WMS)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、図5.1に示すように流出解析モデルによる流量と土砂流出計算モデルにより算出した谷から河道への流出土砂量を条件に、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による流出土砂量の低減効果や除石による流出土砂量の低減効果を検討できる河床変動計算モデルを統合して構築する。

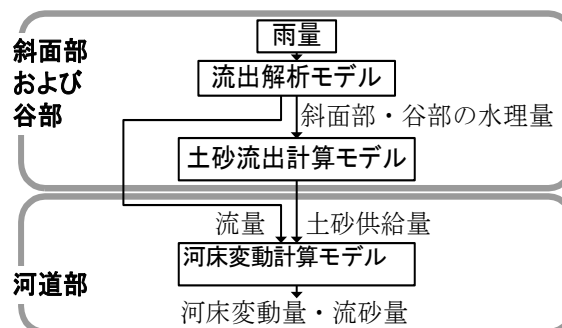


図5.1 流域管理システム(WMS)の構成

### 5.2 流出解析モデルの作成

流出解析モデルは、流域管理システム(WMS)(図5.1)のパーツとして、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普段流水のないゼロ次谷も流路として考慮し、また、設定された場の条件の下で降雨だけを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に損失雨量を内部的に評価できるモデルとなるよう検討する。なお、先の CASFPS モデルでも検討した六甲山系住吉川流域(流域面積; 11.16km<sup>2</sup>)を検討対象とする。住吉川では、斜面侵食の現地観測を2002(H14)年度以降、流砂観測を2003(H15)年度以降実施している。

本研究では、2004(H16)年10月20日前後のデータ(総雨量206mm)と2006(H18)年5月11日前後のデータ(総雨量110.5mm)を用いる。

### 5. 2. 1 既往モデル(CASFPS の流出解析モデル)による観測データの再現

CASFPS の流出解析モデルの検証データとして、西滝ヶ谷第二床固、白鶴堰堤(図5. 2)で観測した水位データを Manning 式にて流量に変換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。計算に用いる流出解析モデルは Kinematic Wave モデルである。計算結果(case-0)と観測データを図5. 3に示す。なお、流域区分は、ゼロ次谷は無視してひとつの斜面としてモデル化し、斜面から直接河道に流出するものとした(図5. 5に示す既往研究による区分方法)。表5. 1に示した計算条件において再現性が最も良好となった。中間流は上層のみであり、透水係数0. 002m/s、層厚0. 375m、初期損失雨量50mm、一次流出率0. 1となった。



図5. 2 観測位置図(住吉川流域)

表5. 1 既往モデルによる 2004(H16)年、2006(H18)年の再現計算条件

項目	記号	単位	値
雨量単位時間	$T$	秒	300
計算流路長単位	$\Delta x$	m	10
計算時間間隔	$\Delta t$	秒	5
中間流層厚	$D_{ps1}$	m	0.375
透水係数	$k_{s1}$	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

\* 中間流層厚さは空隙分の厚さ(空隙率0. 4)を加味している

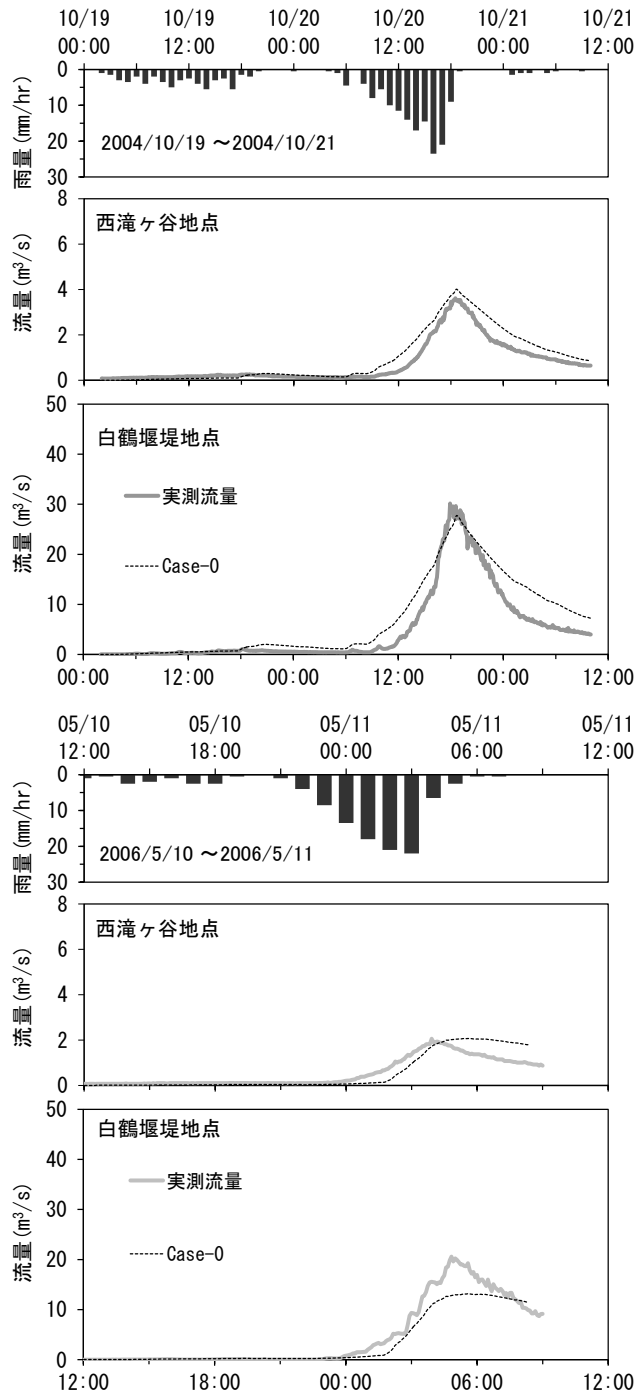


図5.3 2004(H16)年及び2006(H18)年出水時の計算結果

### 5.2.2 既往モデルの改良

山地流域では一般に、降雨・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降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)のパーツの次の段階、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、本研究では中間流層を上層と下層の2層とし、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をモデル化することを検討する(図5. 4)。また、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ようにゼロ次谷も考慮した細かい流域区分を行う(図5. 5)。その結果、区分された流域は136から2, 178に増加する。

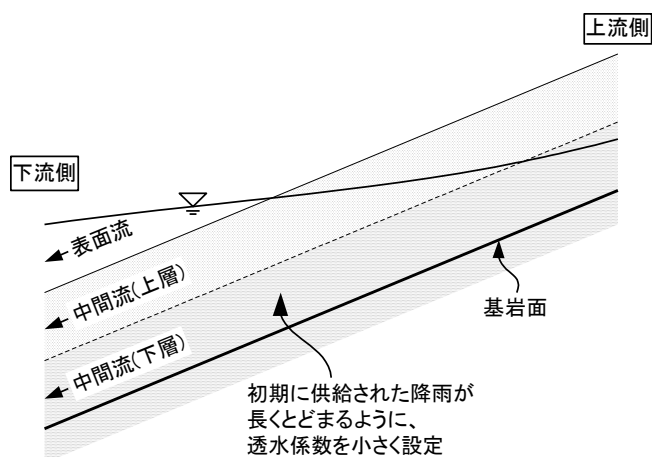


図5. 4 中間流層の2層化の概念図

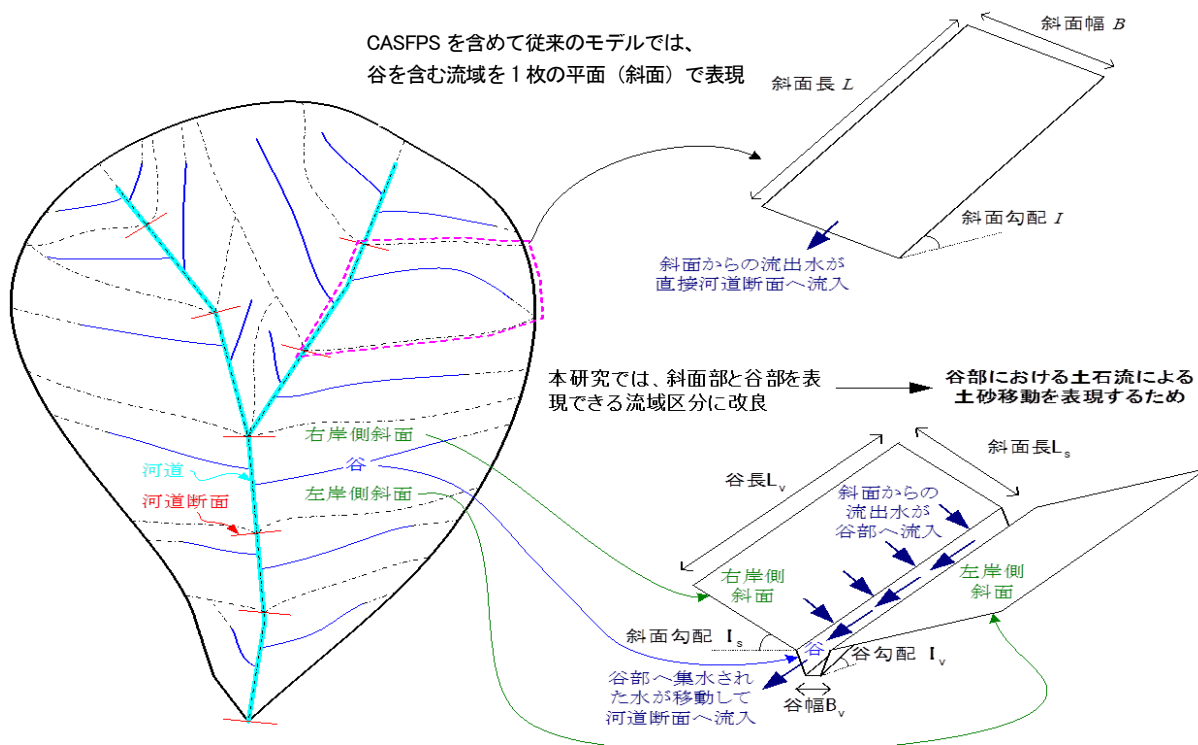


図5. 5 既往研究と本研究による流域区分の違い

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)を用いて流出計算を行う。水の移動の基礎式は斜面部と谷部に分割したものに設定する。

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できる。斜面部・谷部ともに縦断方向に10m 程度の間隔で分割して Lax-Wendroff 法を用いて差分解を求めるものとする。

### 基礎式

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

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

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、 $\gamma$ : 土層の有効空隙率(0.4)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。

### 5. 2. 3 既往モデルとの比較

5. 2. 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5. 1に示す計算条件で計算した(case-1)。結果を図5. 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。

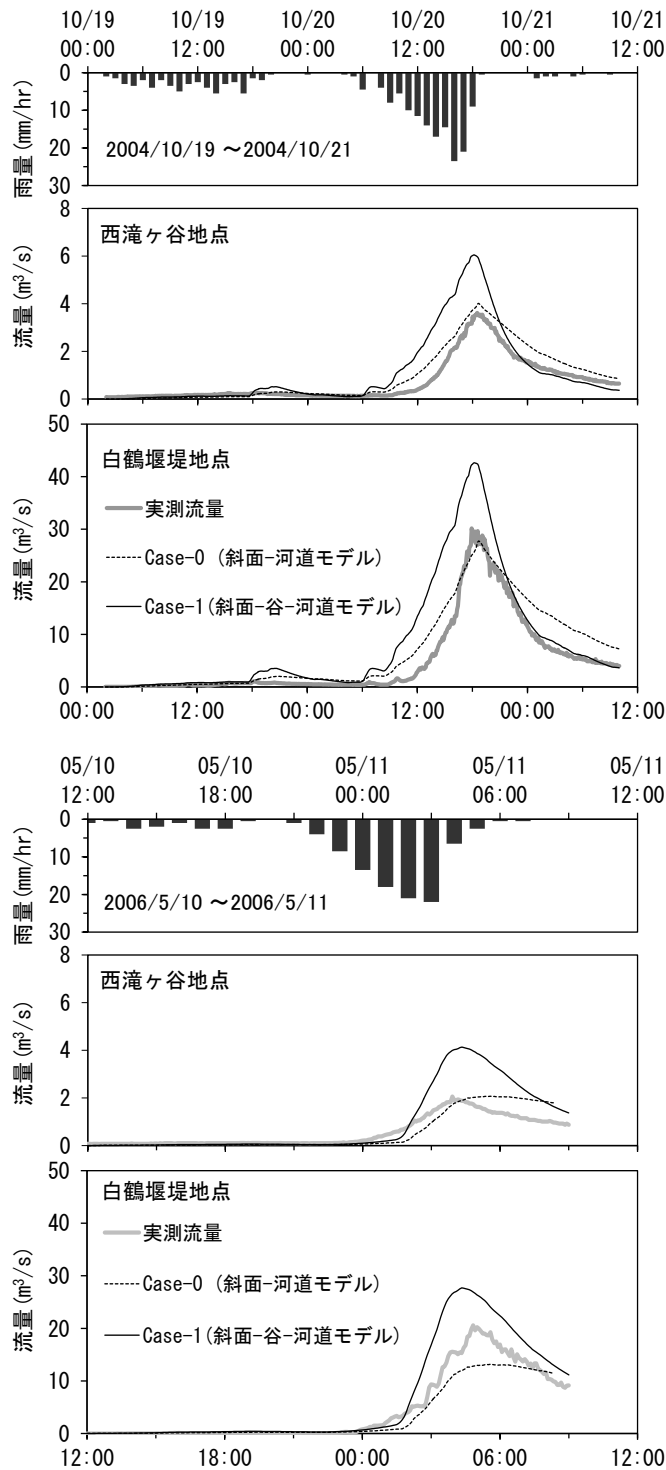


図5. 6 表5. 1の条件を用いた既往モデル(case-0)・新モデル(case-1)での計算結果



### 5. 2. 4 透水係数、中間流層厚が与える影響の検討

5. 2. 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を行う必要がある。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の可能性について検討するため、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する。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を、表5. 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う。

#### 1) 斜面部中間流上層の透水係数の変化

計算条件を表5. 2に、計算結果を図5. 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. 0008m/s 程度で観測値に最も近づいた。

表5. 2 斜面部中間流上層の透水係数を変化させた計算条件

項目		記号	単位	値	備考	
斜面部	上層	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
	中間流層厚	$D_{ps1}$	m	0.375		
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	$n_s$		0.4		
谷部	上層	透水係数	$k_{v1}$	m/s	0.0	0 値を与えて 谷部の中間 層が無い条 件とする
		中間流層厚	$D_{m1}$	m	0.0	
	下層	透水係数	$k_{v2}$	m/s	0.0	
		中間流層厚	$D_{m2}$	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		

\* 中間流層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率0.4)を加味している

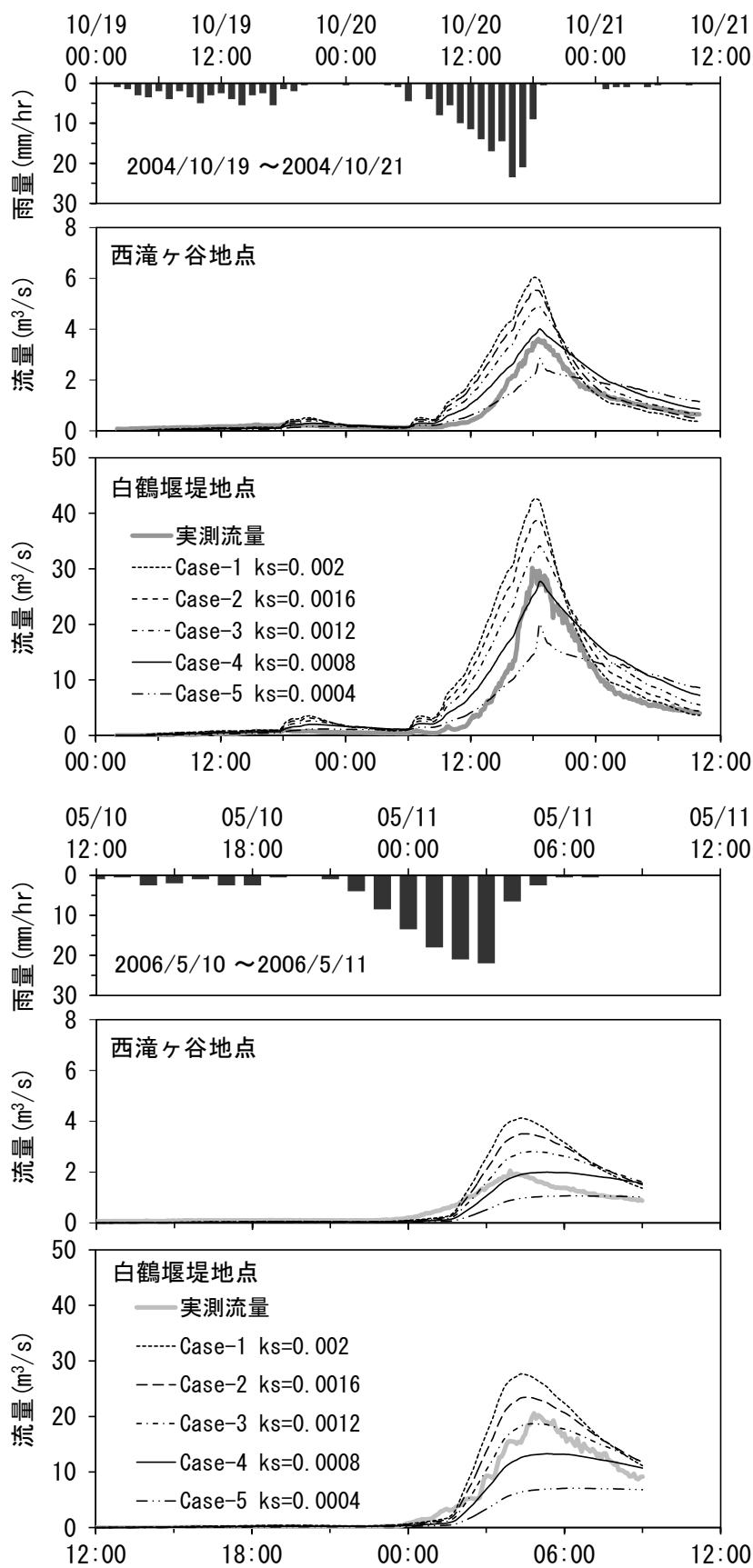


図5.7 表5.2の計算条件に基づく計算結果

2)斜面部中間流上層の層厚の変化

計算条件を表5. 3に、計算結果を図5. 8に示す。2004年10月については、中間流上層の層厚を0. 375m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. 375mより大きくしても流量はほとんど変化しない。2006(H18)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。

表5. 3 斜面部中間流上層の層厚を変化させた計算条件

		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	Case-4
					0.350	Case-6
					0.325	Case-7
					1.250	Case-8
	6.250				Case-9	
下層	透水係数	$k_{s0}$	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	$D_{ps0}$	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	0.0	0 値を与えて谷部の中間層が無い条件とする
		中間流層厚	$D_{pv1}$	m	0.0	
	下層	透水係数	$k_{v0}$	m/s	0.0	
		中間流層厚	$D_{pv0}$	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	

\* 中間流層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率 0.4)を加味している

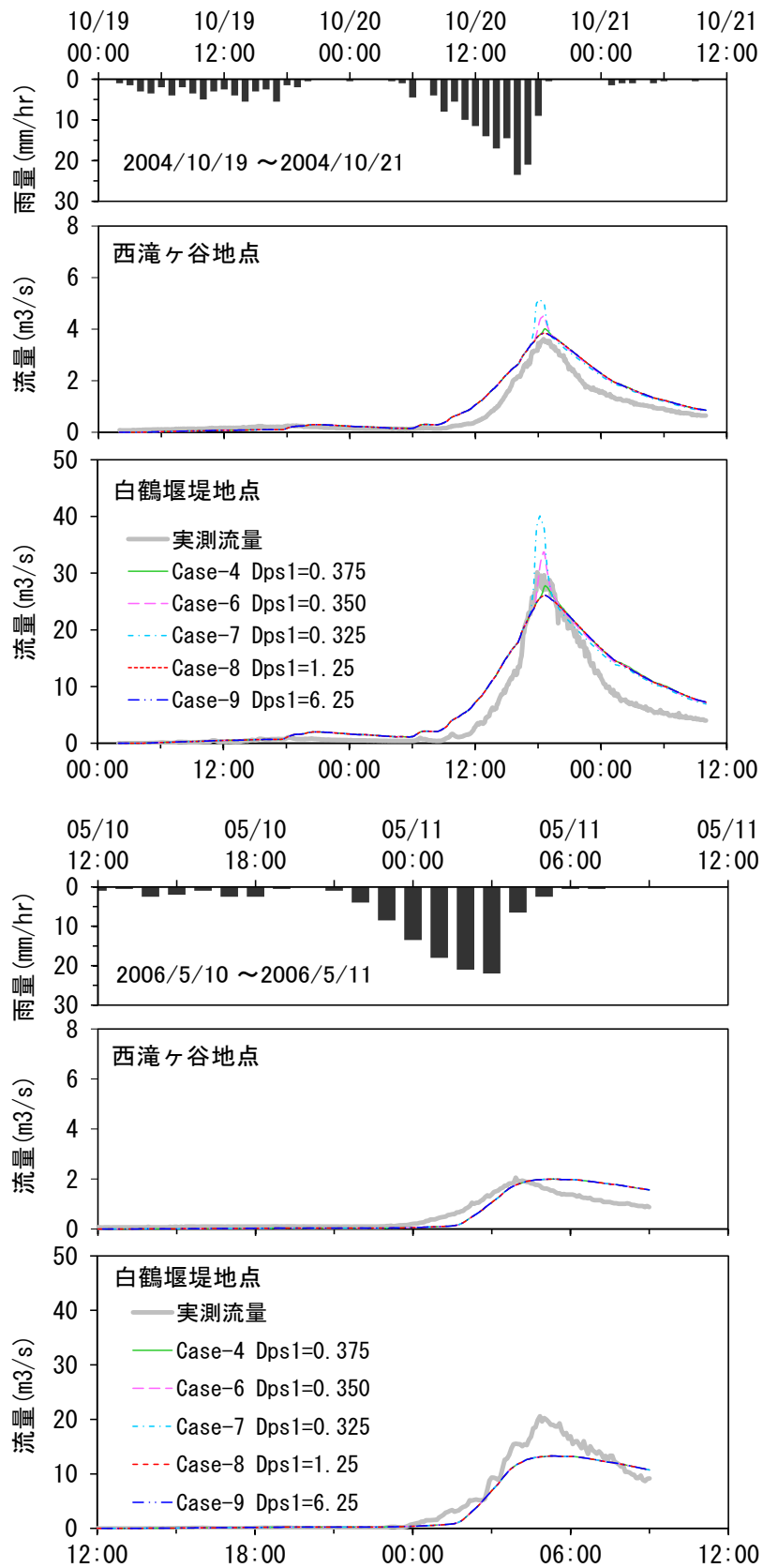


図5.8 表5.3の計算条件に基づく計算結果

### 3) 谷部中間流上層の透水係数の変化

計算条件を表5. 4に、計算結果を図5. 9に示す。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. 1m/s の範囲で変化させる。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(H18)年5月については出水のタイミングが遅れるが、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する。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あ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。

表5. 4 谷部中間流上層の透水係数を変化させた計算条件

	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	$D_{ms1}$	m	0.375	
	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	$D_{ms2}$	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	$D_{mv1}$	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		$D_{mv2}$	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		

\* 中間流層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率0.4)を加味している

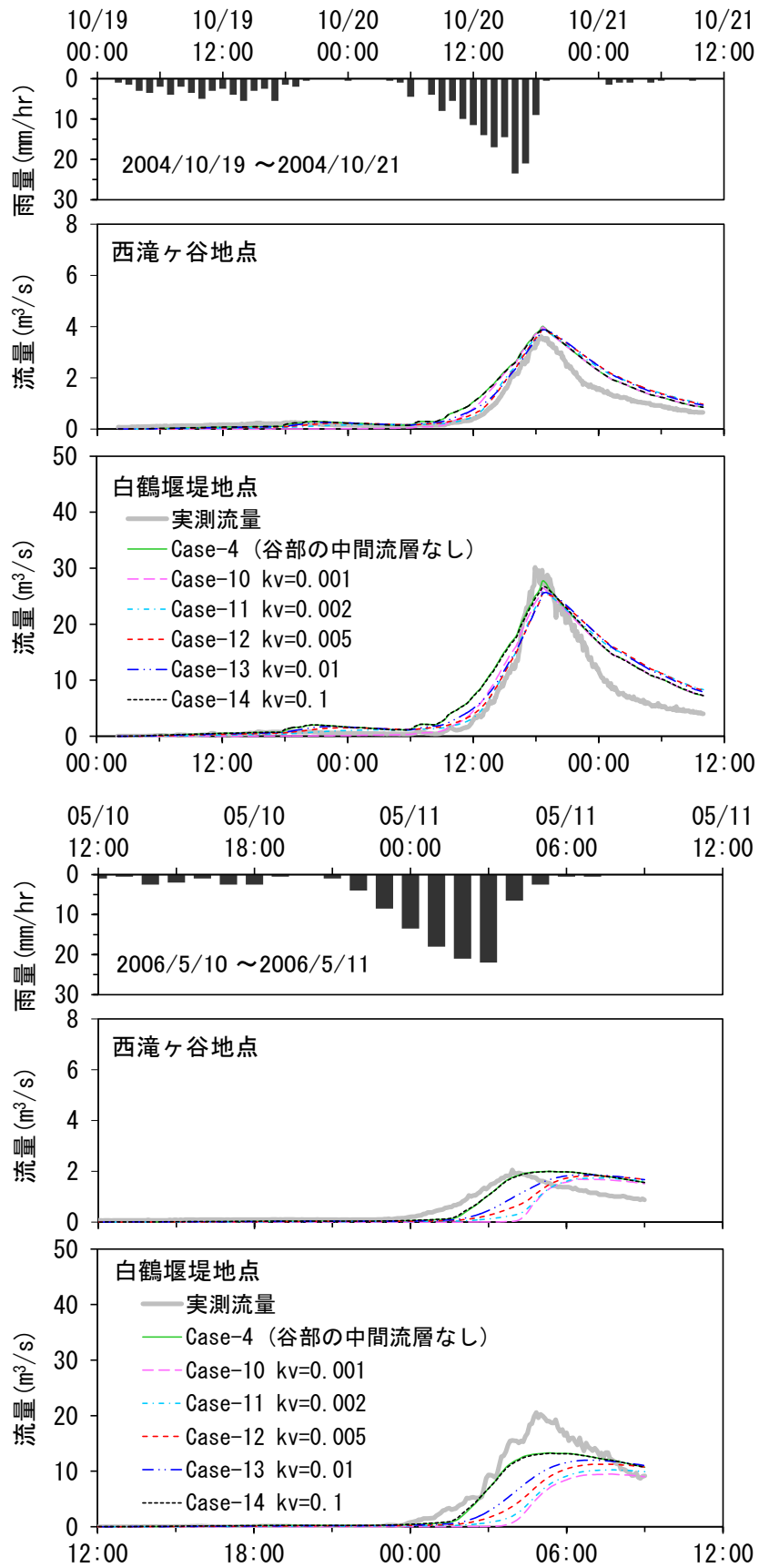


図5.9 表5.4の計算条件に基づく計算結果

#### 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のかを試行錯誤的に解析する。計算条件を表5. 5に、計算結果を図5. 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. 375mとする。

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(H16)年は10/20 6:00 まで、2006(H18)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. 00008m/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で行う。

表5. 5 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

		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	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		
表層	等価粗度	$n_s$		0.4		
谷部	上層	透水係数	$k_{v1}$	m/s	0.0	0 値を与えて谷部の中間層が無い条件とする
		中間流層厚	$D_{mv1}$	m	0.0	
	下層	透水係数	$k_{v2}$	m/s	0.0	
		中間流層厚	$D_{mv2}$	m	0.0	
	表層	等価粗度	$n_v$		0.4	

\* 中間流層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率0.4)を加味している

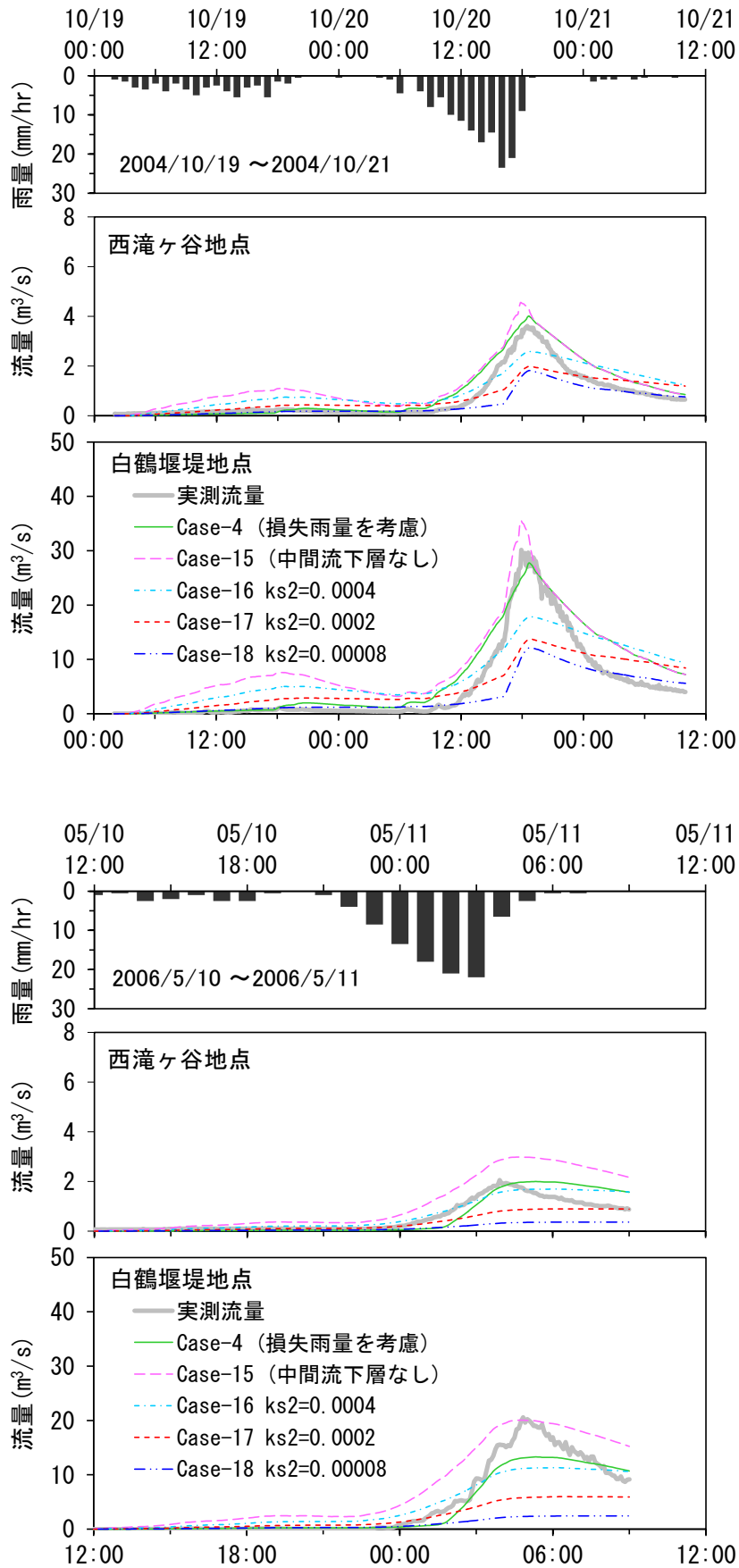


図5.10 表5.5の計算条件に基づく計算結果



5) 斜面部中間流下層の層厚の変化

上記 4) で中間流下層の層厚を0.375mとした条件では、降雨が中間流層下層に過大に貯留される現象となつたことが考えられたことから、層厚の条件を表5.6のように設定して計算する。計算結果を図5.11に示す。層厚を0.375m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なるよう変化し、層厚0.125mになると観測値に近づく。

表5.6 斜面部中間流下層の層厚の条件を変化させた計算条件

		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	Case-15
					0.00008	Case-18~20
		中間流層厚	$D_{ps2}$	m	0.0	Case-15
					0.375	Case-18
	0.250				Case-19	
0.125	Case-20					
表層	等価粗度	$n_s$		0.4		
谷部	上層	透水係数	$k_{v1}$	m/s	0.0	0 値を与えて谷部の中間層が無い条件とする
		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	

\* 中間流層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率0.4)を加味している

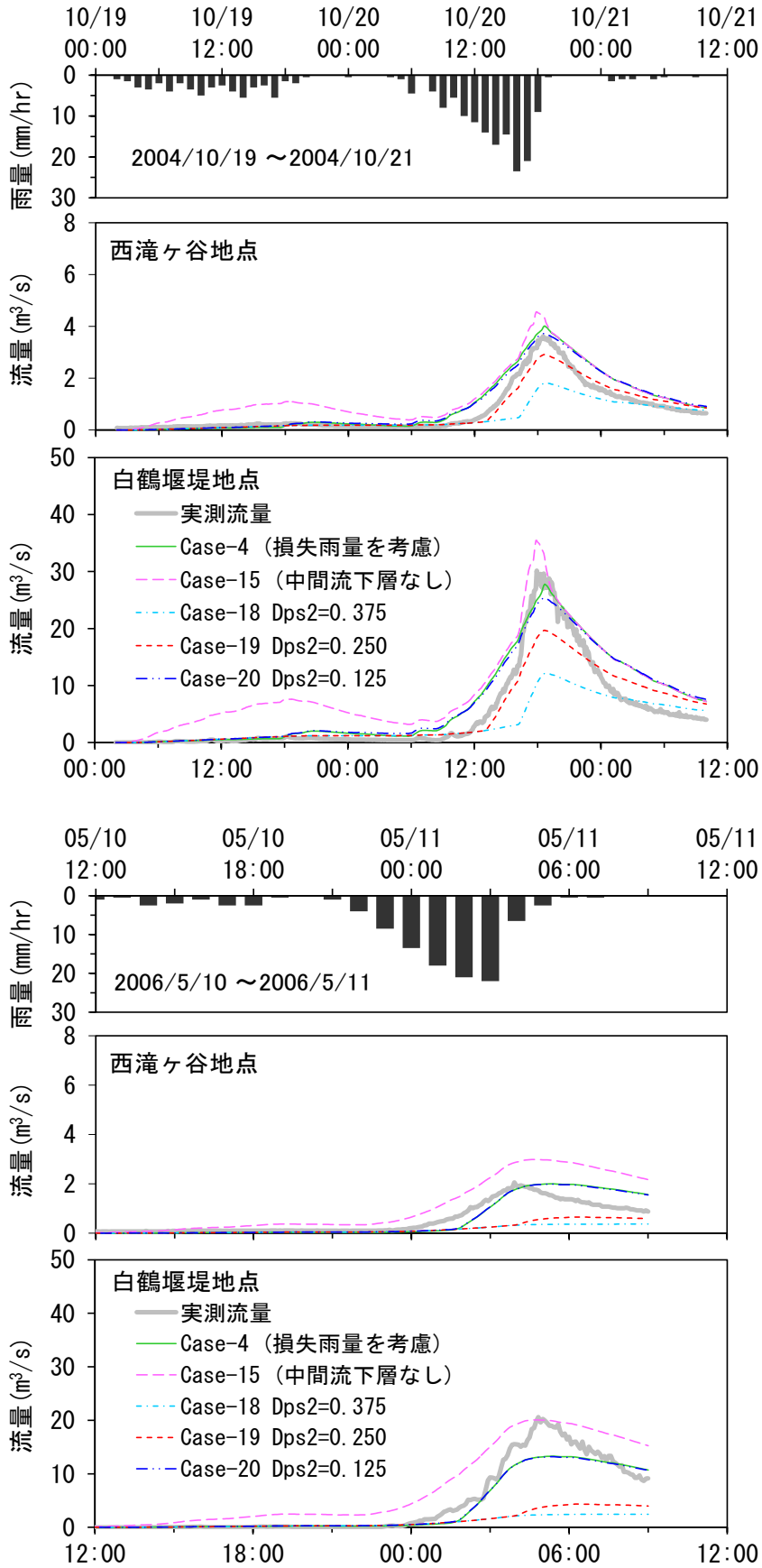


図5.11 表5.6の計算条件に基づく計算結果

## 5. 2. 5 結果

5. 2. 4 4) 及び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表現できることが可能であることがわかった。

斜面部中間流層の厚さは上層厚0. 375mと下層厚0. 125mを合わせて0. 5mが想定されるということになる。六甲砂防事務所と京都大学が六甲山系で検土丈とハンドオーガーを用いて測定した六甲山系の土層厚は、図5. 12に示すようにおおむね1. 0mである。中間流層厚が斜面の土層厚という点からみると、本研究で得た中間流層厚は小さい。これまでの検討において、図5. 11に示すように斜面部中間流下層厚を変化させると流出解析結果は大きく変化するが、図5. 8に示すように斜面部中間流上層厚を0. 375～6. 250mに変化させても流出解析結果に大きな変化はほとんどない。中間流上層厚の変化が解析結果に影響しないのは、対象とした雨量が小さく表面流がほとんど発生しない条件になっていることが考えられる。

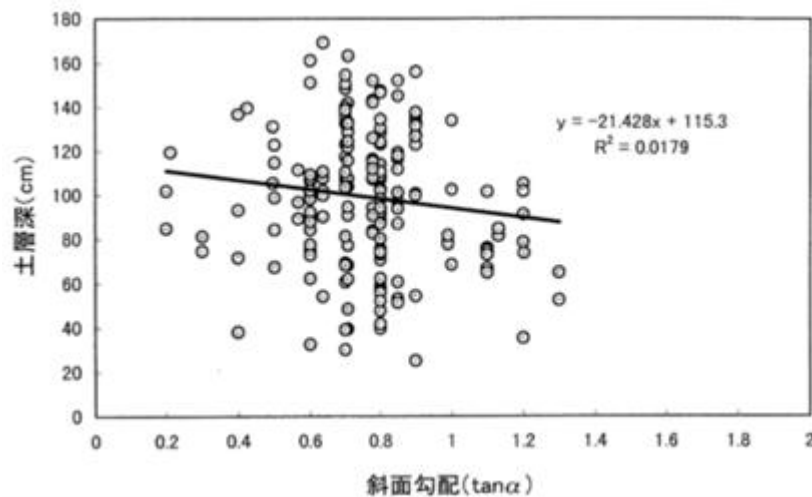


図5. 12 斜面勾配と土層深の関係

## 5. 3 土砂流出計算モデルの作成

### 5. 3. 1 土砂流出計算モデルの構成

土砂流出計算モデルの構成を図5. 13に示す。

土砂流出計算モデルは、斜面部及び谷部に移動可能な土砂量と粒度分布を与え、流出解析と同様に斜面部及び谷部の縦断方向の各分割において流砂量と移動可能土砂量の変化を算出する。

斜面部の土砂移動の連続式は(3)に、谷部の土砂移動の連続式は(4)に示す。

$$\frac{\partial V_{L_s}}{\partial t} + \frac{L_v}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_{L_s}}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_{L_v}}{\partial t} + \frac{B_v}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_{L_v}}{\partial y} = L_v \cdot q_{L_s} \quad (4)$$

ここに、 $V_{L_s}$ :斜面部の移動可能な土砂量、 $V_{L_v}$ :谷部の移動可能な土砂量、 $\lambda$ :空隙率、 $L_v$ :谷長、 $B_v$ :谷幅

$q_{L_s}$ : 斜面単位幅流砂量、 $q_{L_v}$ : 谷部単位幅流砂量である。

式(3)および(4)を解析する土砂流出計算モデルの構成は図5. 13に示すとおりである。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・河道内に堆積残存し、その後の出水で二次的に流出する。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。

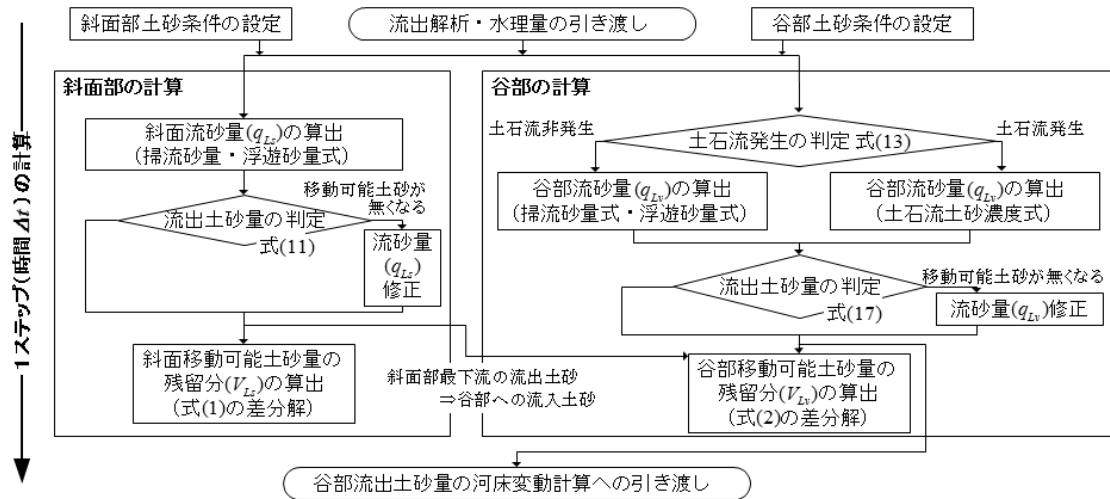


図5. 13 土砂流出計算モデルの構成

### 5. 3. 2 斜面部の土砂移動

#### 1) 斜面部土砂条件の設定

斜面部の移動可能土砂量の初期値は、図5. 14に示すように斜面部の堆積土砂の厚さ  $d_{Ls0}$  と斜面部の初期粒度分布を表す粒径別含有率  $f_j$  を与えることにより設定する。

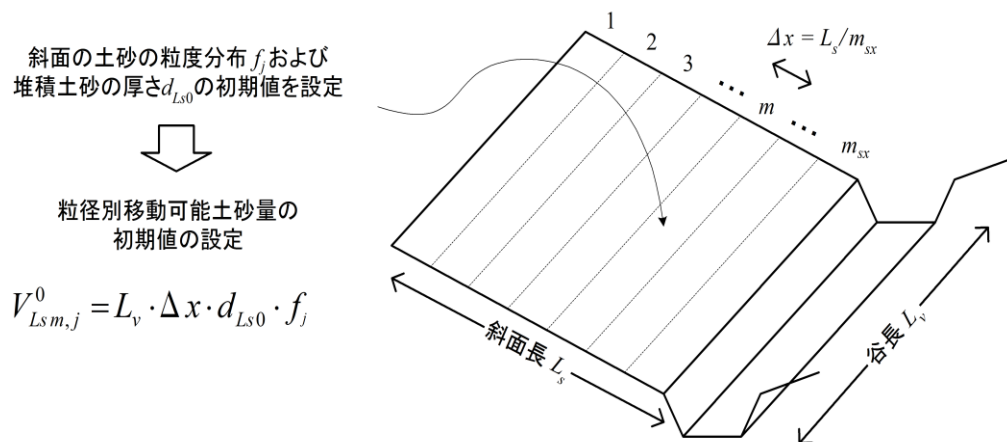


図5. 14 斜面部土砂条件の設定の概念図

## 2) 斜面流砂量の算出

侵食による土砂は掃流砂・浮遊砂の形態で移動する。図5. 14に示す各分割における流砂量を、CASFPS(水山ら 1998)で用いた芦田・高橋・水山の掃流砂量式(ATM式)(式6)(芦田ら 1978)、芦田・道上による浮遊砂量式(AMS式)(式7)(道上 1972)を用いて粒径別に算出する。

$$q_{Ls m, j}^n = q_{ATM} + q_{AMS} \quad (5)$$

$$q_{ATM} = 12 \cdot \sqrt{s \cdot g \cdot d_j^3} \cdot \tau_{*ej}^{3/2} \cdot \left(1 - 0.85 \cdot \frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*j}}\right) \cdot \left(1 - 0.92 \frac{u_{*cj}}{u_{*j}}\right) \cdot f_j \quad (6)$$

$$q_{AMS} = C_{Bj} \cdot \left[ \left(1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6}}\right) \cdot \Lambda_{1j} + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6}} \cdot \Lambda_{2j} \right] \cdot q \cdot f_j \quad (7)$$

式(6)において、 $s$ :土粒子の水中比重、 $g$ :重力加速度、 $d_j$ :粒径階 $j$ の代表粒径、 $\tau_{*ej}$ :粒径 $d_j$ の有効掃流力、 $\tau_{*cj}$ :粒径 $d_j$ の限界掃流力、 $\tau_{*j}$ :粒径 $d_j$ の掃流力、 $u_{*cj}$ :粒径 $d_j$ の限界摩擦速度、 $u_{*j}$ :粒径 $d_j$ の摩擦速度、 $f_j$ :粒径階 $j$ の含有率である。

限界掃流力 $\tau_{*cj}$ は、以下の修正エギアザロフ式(8)(芦田ら 1972)により算出する。

$$\tau_{*cj} = \begin{cases} 0.85 \cdot \tau_{*cm} & (d_j / d_m \leq 0.4) \\ \left[ \frac{\log_e 19}{\log_e (19 d_j / d_m)} \right] \cdot \frac{d_j}{d_m} \cdot \tau_{*cm} & (d_j / d_m > 0.4) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 $d_j$ :対象とする粒径、 $\tau_{*cm}$ :平均粒径 $d_m$ に対する限界掃流力であり、岩垣式を用いて算出する。

また、式(7)において、 $\kappa$ :カルマン定数、 $n$ :マニングの粗度係数、 $q$ :流量、 $h$ :水深である。 $C_{Bj}$ は粒径 $d_j$ の底面濃度であり、式(9)で計算される(芦田ら 1970)。

$$\begin{cases} C_{Bj} = 0.025 \cdot [g(\xi_0) / \xi_0 - G(\xi_0)] \\ g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \xi_0^2\right) \\ G(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{\xi_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi^2\right) d\xi \\ \xi_0 = w_{0j} / (0.75 \cdot u_*) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 $w_{0j}$ は粒径 $d_j$ の沈降速度であり、本研究ではRubey(1933)の式を用いて算出する。また、式(7)の $\Lambda_{1j}$ 、 $\Lambda_{2j}$ については式(10)より求める。

$$\begin{cases} A_{1j} = \left(\frac{a}{h-a}\right)^Z \cdot \int_{a/h}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^Z d\eta \\ A_{2j} = \left(\frac{a}{h-a}\right)^Z \cdot \int_{a/h}^1 \ln \eta \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^Z d\eta \\ Z = w_{0j} / (1.2 \cdot \kappa \cdot u) \\ a = 0.05 \cdot h \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 $u$ :流速、 $a$ :底面濃度  $C_{Bj}$ を与える基準面高さである。

### 3) 流出土砂量の判定

ここでは、図5. 13の各分割に存在する移動可能土砂量以上に土砂が流出しないことを条件として式(11)に示すように流砂量を修正する。

$$\begin{aligned} q_{Ls\ m,j}^n &> (\Delta x / \Delta t) \cdot V_{Ls\ m,j}^{n-1} + q_{Ls\ m,j}^n \text{ のとき} \\ q_{Ls\ m,j}^n &= (\Delta x / \Delta t) \cdot V_{Ls\ m,j}^{n-1} + q_{Ls\ m,j}^n \end{aligned} \quad (11)$$

### 4) 斜面移動可能土砂量の残留分の算出

連続式(3)を差分化した式(12)を用い、図5. 13の各分割から流出する土砂量と、その上流から流出してくる土砂量から、各分割に残留する移動可能土砂量を算出する。

$$V_{Ls\ m,j}^n = V_{Ls\ m,j}^{n-1} - \Delta t \cdot \frac{(q_{Ls\ m,j}^n - q_{Ls\ m-1,j}^n)}{\Delta x} \quad (12)$$

### 5) 斜面から谷への土砂流出

谷部には、斜面下端 ( $m = m_{sx}$ の地点) における流砂量  $q_{Ls\ m_{sx},j}^n$  が流出するものとする。

## 5. 3. 3 谷部の土砂移動

### 1) 谷部の土砂条件の設定

谷部の移動可能土砂量の初期値は、図5. 15に示すように、谷部の堆積土砂の厚さ  $d_{Lv0}$  と谷部の初期粒度分布を表す粒径別含有率  $f_j$  を与えることにより設定する。

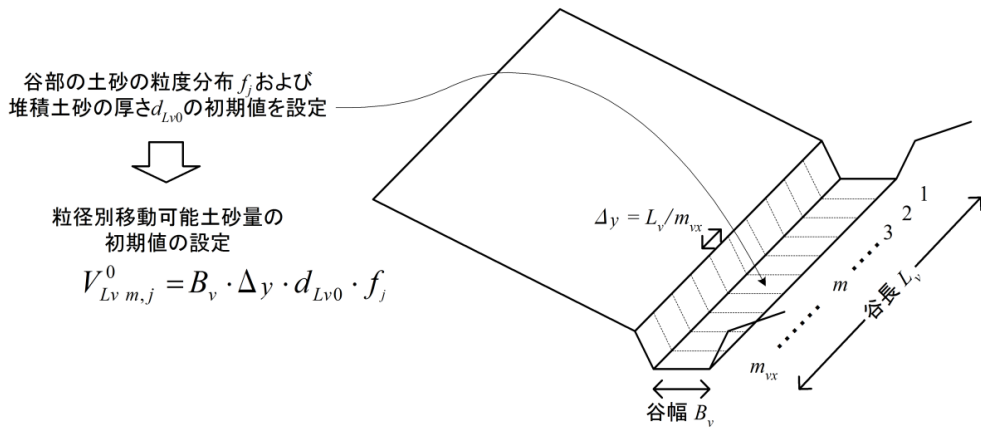


図5. 15 谷部土砂条件の設定の概念図

## 2) 土石流の発生・非発生の判定

土石流の発生・非発生は、土石流の発生条件に関する高橋（1977）の研究を参考に、流出解析により得られる谷部の表面流水深  $h_{v0}$  をもとに、式(13)が成立すれば土石流発生と判定し、成立しなければ土石流非発生と判定する。

$$I_v \geq \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho (1 + h_{v0}/d_m)} \tan \phi \quad (13)$$

ここに、 $I_v$ ：谷勾配、 $C_*$ ：堆積土砂濃度、 $\sigma$ ：砂礫の密度、 $\rho$ ：水の密度、 $h_{v0}$ ：谷部における表面流の水深、 $d_m$ ：谷部の平均粒径、 $\phi$ ：内部摩擦角である。

## 3) 谷部流砂量の算出

土石流非発生の場合：

土石流非発生の場合の谷部の流砂量は、図5. 15に示す各分割において、斜面部における取扱いと同様に芦田・高橋・水山の掃流砂量式(6)、芦田・道上による浮遊砂量式(7)を用いて算出する。

$$q_{Lv m, j}^n = q_{ATM} + q_{AM} \quad (14)$$

土石流発生の場合：

土石流が発生する場合の谷部の流砂量は、図5. 15に示す各分割において、高橋(1977)の土石流土砂濃度式(16)を用いて算出するものとし、次式により粒径別に算出する。

$$q_{Lv(m, n, j)} = \frac{C_d}{1 - C_d} q_{wv(m, n)} \cdot f_j \quad (15)$$

$$C_d = \frac{\rho \cdot I_v}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - I_v)} \quad (16)$$

ここに、 $C_d$ ：土石流土砂濃度、 $\sigma$ ：砂礫の密度、 $q_{wv(m, n)}$ ：谷部表面流の流量、 $\rho$ ：水の密度、 $\phi$ ：内部摩擦角である。

## 4) 流出土砂量の算定

図5. 15の各分割に存在する移動可能土砂量以上に土砂が流出しないことを条件として式(17)に示すように流砂量を修正する。

$$q_{Lv m, j}^n > (\Delta y / \Delta t) \cdot V_{Lv m, j}^{n-1} + q_{Lv m-1, j}^n + (\Delta y / B_v) \cdot q_{Ls m s, j}^n \text{ のとき} \\ q_{Lv m, j}^n = (\Delta y / \Delta t) \cdot V_{Lv m, j}^{n-1} + q_{Lv m-1, j}^n + (\Delta y / B_v) \cdot q_{Ls m s, j}^n \quad (17)$$

5) 谷部残留土砂量の算出

式(4)を差分化した式(18)を用い、図5. 15に示した各分割において、流出する土砂量と上流の分割から流出してくる土砂量とで各分割に残留する土砂量(移動可能土砂量)を算出する。

$$V_{Lv,m,j}^n = V_{Lv,m,j}^{n-1} - \Delta t \cdot \frac{(q_{Lv,m,j}^n - q_{Lv,m-1,j}^n)}{\Delta y} + \Delta t \cdot \frac{q_{Ls,m_{sx},j}^n}{B_v} \quad (18)$$

6) 谷部から河道部への流出土砂量

河道部には、斜面下端 ( $m = m_{vx}$ の地点) における流砂量  $q_{Lv,m_{sx},j}^n$  が流出するものとする。

## 5. 4 河床変動計算モデルの作成

### 5. 4. 1 計算の手順

図5. 16の計算手順に示すように、流出解析モデル(本章5. 2および富田ら 2012)で算出された流量と、本章2. に示した土砂流出計算モデルで算出された谷部から河道部への流出土砂量を用いて計算するモデルを作成する。このモデルは、砂防堰堤による水位や施設を通過する土砂の影響、堰堤の除石を組み込み、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である。

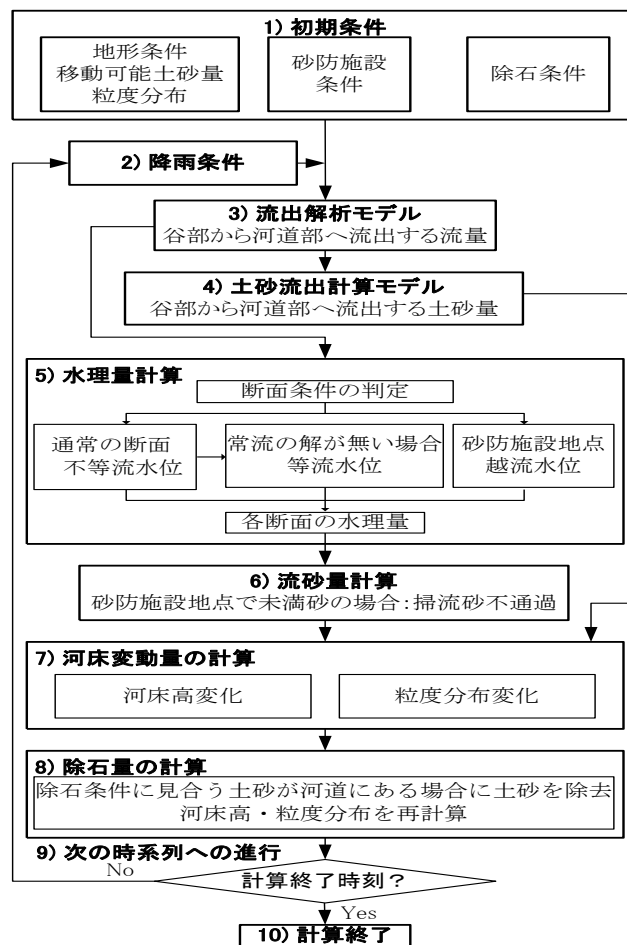


図5. 16 河床変動計算の手順



図5. 16に示した各項目の内容は次のとおりである。

1) 初期条件

地形条件として斜面地形・谷地形の設定(谷幅、斜面長など)、河道断面形状(標高、河幅など)を設定する。河道各断面における移動可能土砂量(侵食可能深さ)、粒度分布を設定する。砂防施設条件は、砂防堰堤ごとに水通し幅や水通し標高などの施設諸元を入力し、また除石量を入力する。

2) 降雨条件

解析条件となる降雨量を時系列で与える。

3) 流出解析モデル

本章5. 2および富田ら(2012)の流出解析モデルにより、斜面部→谷部→河道部への流量を算出する。

4) 土砂流出計算モデル

流出解析モデル(本章5. 2および富田ら 2012)を用いて得られた斜面部・谷部の流量を用いて、斜面部から谷部、谷部から河道部への流出土砂量(流砂量)を算出する(本章第2項)

5) 水理量計算

流出解析モデル(本章5. 2および富田ら 2012)で得た流量を用いて水面形を計算する。式(19)に示す不等流計算を基本とするが、常流区間で解が得られない場合には式(23)の等流計算により等流水位を算出する。砂防堰堤地点の断面は、砂防施設諸元から越流水位を算出する。

$$\text{不等流計算の基礎式} : \frac{d}{dx} \left( \frac{Q^2}{2gA^2} \right) + \frac{d(h+z)}{dx} + I_E = 0 \quad (19)$$

ここに、 $Q$ :流量、 $A$ :流水断面積、 $h$ :水深、 $z$ :河床位、 $I_E$ :エネルギー勾配、 $x$ :河道縦断距離である。

6) 流砂量計算

掃流砂量は芦田・高橋・水山式(6)、浮遊砂量は芦田・道上式(7)を用いて算出する。砂防施設地点については、堰堤未満砂の場合には掃流砂は通過せず浮遊砂のみが通過するものとする。

#### 7) 河床変動計算

式(20)に示す河床土砂の連続式を用いて河床変動を計算する。

$$\text{河床土砂の連続式} : \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_j q_{Bj} \cdot B \right) \right\} = 0 \quad (20)$$

ここに、 $A_z$ : 堆積土砂断面積、 $\lambda$ : 空隙率、 $q_{Bj}$ : 粒径  $d_j$  の単位幅流砂量、 $B$ : 河床幅、 $x$ : 河道縦断距離、 $t$ : 時刻(s)である。

#### 8) 除石量の計算

予め設定した除石量に相当する土砂量が河道にある場合に土砂を除去するものとし、堆積土砂の断面積を減少させて河床高、粒度分布を再計算する。

#### 9) 次の時系列への進行

全ての時系列について計算が終了していなければ、次の降雨条件データを読み込んで図5. 14中の2)~8)の計算を繰り返す。

#### 10) 計算の終了

全ての時系列について計算が終了していれば計算結果を出力して計算を終了する。

### 5. 4. 2 水面形計算

水面形計算は基本的には水山ら(1998)の手法に準じた手法を用いる。計算に当たっては、砂防堰堤の流出土砂量低減効果を評価するため、堰堤の有無を判定したうえで適用する計算方法を選定する。また、常流・射流が混在した流れを簡易に扱うため、下流の水位状況に応じて適用する計算方法を選定する。このための解析プログラムを次のように構築する。

#### 1) 砂防堰堤のある断面の判定

施設番号として  $i_{st}(i)$  の値を設定し、この値によって砂防堰堤のある断面かどうかを判定する。ここに、 $i$  は河道断面番号である。

$i_{st}(i) > 0$  の場合:

砂防堰堤のある河道断面であり、 $i_{st}(i)$  には施設番号が入力されている。

$i_{st}(i) = 0$  の場合:

砂防堰堤のない河道断面である。

## 2) 不等流計算による水深の算出

砂防堰堤のない河道断面では、基本的には不等流計算により水深を算出する。水深の算出は下流側から順に行い、下流側的水深算出結果をもとに上流側的水深を式(21)により算出する。

$$\begin{aligned} \frac{\alpha \cdot Q_{i_D}^2}{2 \cdot g \cdot A_{i_D}} + h_{i_D} + z_{i_D} + \frac{I_{E_{i_D}} \cdot \Delta x}{2} \\ = \frac{\alpha \cdot Q_i^2}{2 \cdot g \cdot A_i} + h_i + z_i - \frac{I_{E_i} \cdot \Delta x}{2} \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、添え字の  $i$  は計算対象の河道断面番号、 $i_D$  は下流側河道断面番号を表しており、 $Q$ : 流量、 $h$ : 水深、 $A$ : 流水断面積、 $z$ : 河床位、 $\alpha$ : エネルギー補正係数(本研究では 1 に設定)、 $I_E$  はエネルギー勾配でマンニングの抵抗則をもとに、式(22)より算出する。

$$I_{E_i} = \left\{ (n \cdot Q_i) / (A_i \cdot h_i^{2/3}) \right\}^2 \quad (22)$$

## 3) 常流の不等流計算の解がない場合の水深の算出

上記の 2)において解なしとなった場合には、等流水深を適用する。等流水深はマンニング式(23)を用いて算出する。

$$Q_i = \frac{1}{n} \cdot A_i \cdot h_i^{2/3} \cdot I_{D_i}^{1/2} \quad (23)$$

ここに、 $I_D$  は下流側断面との河床勾配である。

## 4) 砂防堰堤地点における水深の算出

堰堤が存在する  $i_{st}(i) > 0$  の断面  $i$  については、あらかじめ施設番号に対応して与えられた施設諸元をもとに、堰堤の越流水深  $h_{st}$  を算出する。不透過型の堰堤の場合は式(24)を用いて算出する。

$$Q_i = 2/15 \cdot C \cdot \sqrt{2g} \cdot \{A_{B_{st}} + 2(m_{st1} + m_{st2}) \cdot h_{st}\} \cdot h_{st}^{3/2} \quad (24)$$

ここに、 $C$ : 流量係数(0.6)、 $g$ : 重力加速度、 $B_{st}$ : 砂防堰堤の水通し幅、 $m_{st1}$ : 左岸側袖小口の勾配、 $m_{st2}$ : 右岸側袖小口の勾配である。

砂防堰堤地点の水深  $h_i$  は、砂防堰堤上流面側の河床高からの水深として、越流水深  $h_{st}$  をもとに以下のように算出する。

$$h_i = E_{st} + h_{st} - z_i \quad (25)$$

ここに、 $E_{st}$ : 砂防堰堤水通し標高である。なお、堰堤地点の流水断面積  $a_i$  エネルギー勾配  $I_{E_i}$  についても同様に堰堤上流面側の断面形状をもとに算出する。これは、後述する河床変動計算において、堰堤を通過する土砂の

流砂量を算出するための処理である。

### 5. 4. 3 河床変動計算

河床変動計算では、式(20)を上流側の断面との差分により離散化する。また、本研究では粒径階別の土砂収支を計算するため、差分式(26)によって各時刻の粒径別の土砂収支を計算し、その総和により河道断面積を算出する(式 27)。

$$\frac{A_{Zi,j}^{n+1} - A_{Zi,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \cdot \frac{B_i \cdot q_{B i,j}^n - B_{i-1} \cdot q_{B i-1,j}^n}{\Delta x} = 0 \quad (26)$$

$$A_{Zi}^{n+1} = \sum_j A_{Zi,j}^{n+1} \quad (27)$$

ここに、 $A_{Zi,j}^n$ :粒径  $j$  の土砂の河道堆積断面積、 $A_{Zi}^n$ :全粒径の河道堆積断面積、 $\Delta t$ :時間刻み、 $\Delta x$ :断面間の区間距離であり、 $n$  は時間刻みに対する添え字、 $i$  は断面番号である。

$q_B$  は流砂量であり、掃流砂量は式(6)の芦田・高橋・水山式を、浮遊砂量は式(7)の芦田・道上式を用いる。

砂防堰堤地点においては、施設上流側断面について算出された水理量をもとに流砂量を計算する。越流頂標高に河床高が達している場合には、掃流砂・浮遊砂とも通過し得るものと考えて通常の断面と同様に流砂量を与えるが、越流頂標高に河床高が達していない場合には、掃流砂が捕捉され浮遊砂が通過し得るものと考えて浮遊砂のみを流砂量として与える。

河床表面の粒度分布は、平野(1971)の交換層の考え方にに基づき、厚さ  $\delta$  の交換層を想定してそこでの粒度分布変化をもとに式(28)および式(29)により算出する。交換層の厚さ  $\delta$  は河床材料の最大粒径をもとに設定する。

河床上昇の場合：

$$f_j^{n+1} \cdot A_s^{n+1} = f_j^n \cdot A_s^n + (A_{Zi}^{n+1} - A_{Zi}^n) - f_j^n \cdot \{(A_z^{n+1} - A_z^n) - (A_s^{n+1} - A_s^n)\} \quad (28)$$

河床低下の場合：

$$f_j^{n+1} \cdot A_s^{n+1} = f_j^n \cdot A_s^n + (A_{Zi}^{n+1} - A_{Zi}^n) - f_0^n \cdot \{(A_z^{n+1} - A_z^n) - (A_s^{n+1} - A_s^n)\} \quad (29)$$

ここで、 $f_j^n$ :河床表面における粒径  $d_j$  の含有率、 $f_0^n$ :交換層より下における粒径  $d_j$  の含有率、 $A_s^n$ :河床表面から深さ  $\delta$  までの堆積断面積である。

### 5. 4. 4 粗度係数の取り扱い

粗度係数は土砂の流下形態を踏まえて設定するものとし、土砂濃度  $C$  に応じて水山ら(1984)の粗度係数、マニングの粗度係数を適用する。

$$C=q_B/(q+q_B)$$

$C > 0.2$ のとき:

土石流先端部の粗度係数 $n=0.1$ (水山ら 1984)を適用する

$0.02 < C \leq 0.2$ のとき:

土石流後続流の粗度係数 $n=0.06$ (水山ら 1984)を参考に、 $C=0.02$ のとき  $n=0.06$ 、 $C=0.2$ のとき  $n=0.1$ として、線形補完により算出した値を適用する。

$C \leq 0.02$ のとき:

山地流路に適用されるマンニングの粗度係数(0.03~0.05)(水理公式集)を適用する。

ここに、 $C$ :土砂濃度、 $q$ :流量、 $q_B$ :流砂量

## 5.5 検証計算

以上までに検討した土砂流出計算モデルと河床変動計算モデルについて検証を行うため、住吉川流域の観測データを用いて計算を行う。

### 5.5.1 土砂流出計算モデルの検証

#### 5.5.1.1 検証対象流域

斜面部から谷部への土砂流出を追跡するため、小渓流の末端で流出土砂量を観測している千丈谷第二堰堤付近(図5.17)のSE-9、SE-10流域の観測データを用いる。流域の概要と観測方法を第1章に、観測結果を表5.9、表5.10に示す。観測値は、ロードセルによる計測に不具合が生じていたため月1回の回収重量によるものとする。SE-9、SE-10流域はそれぞれ図5.5に示した本研究による流域区分による単位流域(左岸・右岸の斜面と谷部の1セット)であり、本研究で採用している最小の流域区分である。従来はひとつの斜面としていたものである。

#### 5.5.1.2 各パラメータの設定条件

検証対象期間は2008(H20)年12月~2010(H22)年2月とし、降雨条件は図5.18に示すように荒神山雨量観測所の雨量データを用いる。粒度分布条件は、図5.19に示す既往調査資料をもとに、斜面部は崩壊地平均の粒度分布、谷部には河床平均の粒度分布を適用する。透水係数等は流出解析モデルの検証計算結果(本章5.2.4および富田ら 2012)をもとに表5.7のように設定する。斜面部の等価粗度は kinematic-wave 法で用いられている表5.8(水理公式集 1999a)を参考に0.4とし、谷部の等価粗度はマンニングの粗度係数(水理公式集 1999b)を参考に0.03~0.1の範囲で設定する。斜面部、谷部の初期堆積厚は図5.12から1.0mとする。このほか計算に必要なパラメータは六甲砂防事務所の調査成果等をもとに設定した。

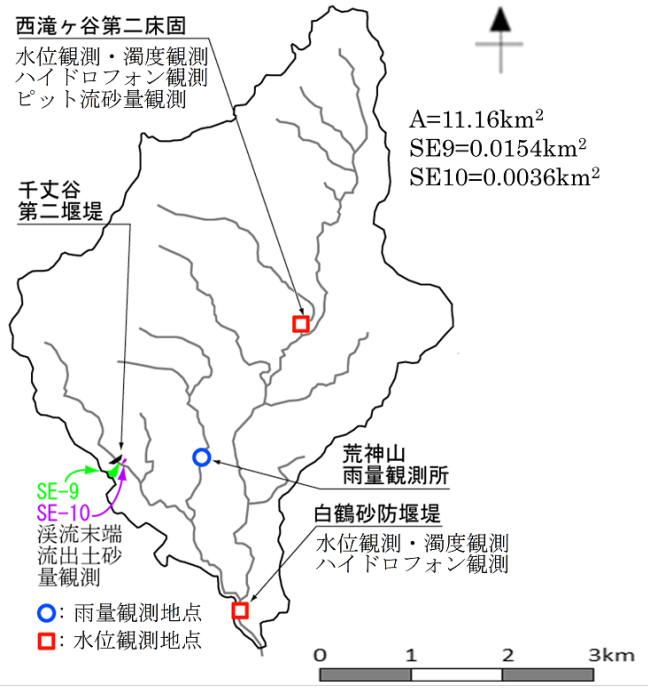


図5.17 住吉川における流砂量観測状況

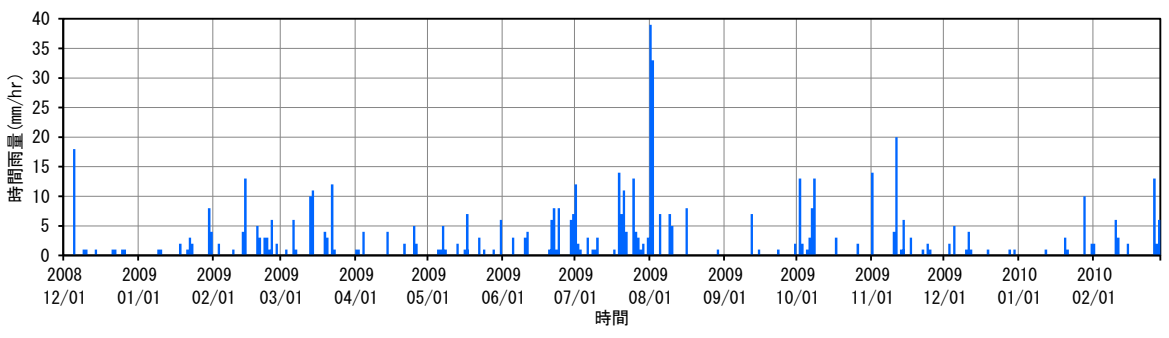


図5.18 検証に用いた時間雨量(六甲砂防事務所荒神山雨量観測所)

表5.7 土砂流出計算モデル検証の解析ケース

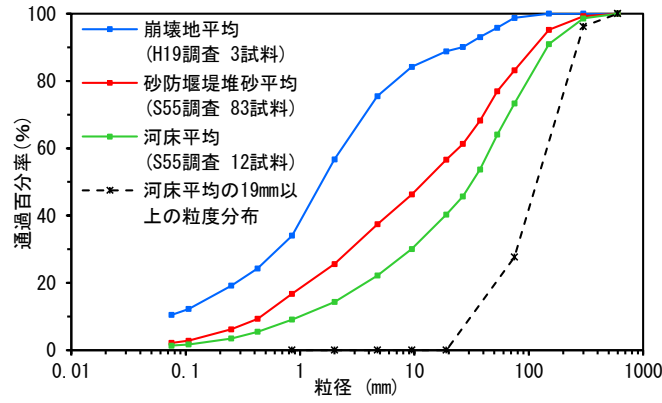
	項目	記号	単位	値	備考
斜面部	上層	透水係数	$k_{s1}$	m/s	0.0008
		中間流層厚	$D_{s1}$	m	0.375
	下層	透水係数	$k_{s2}$	m/s	0.00008
		中間流層厚	$D_{s2}$	m	0.125
	表層	等価粗度	$n_s$	0.4	
谷部	表層	等価粗度	$n_v$	0.1	CASE1
				0.06	CASE2
				0.04	CASE3
				0.03	CASE4

(本章 5.2.4 より作成) \* 中間層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率 0.4)を加味している

表5.8 土地利用形態と等価粗度係数nの標準値

土地利用形態	等価粗度 $n$ ( $m^{-1/3} \cdot s$ )
水田	2 (1~3)
山林	0.7 (0.4~0.8)
丘陵, 畑地, ゴルフ場, 公園	0.3 (0.2~0.4)
市街地	0.03 (0.01~0.1)

\* 平成 11 年版水理公式集より



粒径範囲 (mm)	代表粒径 (mm)	割合 (%)			
		斜面部 (H19調査 3試料)	砂防堰堤堆砂平均 (S55調査 83試料)	河床平均 (S55調査 12試料)	河床平均の19mm以上の粒度分布
0.075 ~ 0.85	0.25	34.0	16.8	9.1	0.0
0.85 ~ 2.00	1.30	22.7	8.8	5.2	0.0
2.00 ~ 4.75	3.08	18.8	11.8	7.9	0.0
4.75 ~ 9.50	6.72	8.7	8.9	7.9	0.0
9.50 ~ 19.00	13.4	4.6	10.3	10.2	0.0
19.00 ~ 75.00	37.7	9.9	26.6	33.0	55.3
75.00 ~ 300.00	150.0	1.3	16.0	25.3	42.4
300.00 ~ 600.00	424.3	0.0	0.8	1.4	2.3

図5.19 住吉川流域の崩壊土砂・河床材料の粒度分布

表5.9 SE-9 観測地点における流出土砂量の観測値と計算値 (m<sup>3</sup>)

観測期間	観測値 (単位面積土砂 湿潤重量 kgf/m <sup>3</sup> )	観測値 (対数)	計算値 CASE1(n=0.1)	計算値 CASE2(n=0.06)	計算値 CASE3(n=0.04)	計算値 CASE4(n=0.03)
2008.12~2009.01	2512.99	0.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.02~2009.03	272.73	0.0016	0.0000	0.0010	0.0010	0.0010
2009.04~2009.05	2987.01	0.0174	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.06~2009.07	9616.88	0.0559	0.2560	0.0080	0.0070	0.0070
2009.08	15363.64	0.0893	7.3690	2.1690	0.1240	0.0170
2009.09	4116.88	0.0239	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.10	7848.05	0.0462	0.0060	0.0070	0.0060	0.0060
2009.11	7616.88	0.0443	0.0040	0.0050	0.0050	0.0040
2009.12~2010.01	1909.09	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2010.02	5519.48	0.0321	0.0040	0.0050	0.0050	0.0050

表5.10 SE-10 観測地点における流出土砂量の観測値と計算値 (m<sup>3</sup>)

観測期間	観測値 (単位面積土砂 湿潤重量 kgf/m <sup>3</sup> )	観測値 (対数)	計算値 CASE1(n=0.1)	計算値 CASE2(n=0.06)	計算値 CASE3(n=0.04)	計算値 CASE4(n=0.03)
2008.12~2009.01	55.56	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.02~2009.03	55.56	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.04~2009.05	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.06~2009.07	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.08	1722.22	0.0023	0.4240	0.0020	0.0020	0.0020
2009.09	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.10	0.00	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010	0.0010
2009.11	277.78	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2009.12~2010.01	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2010.02	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

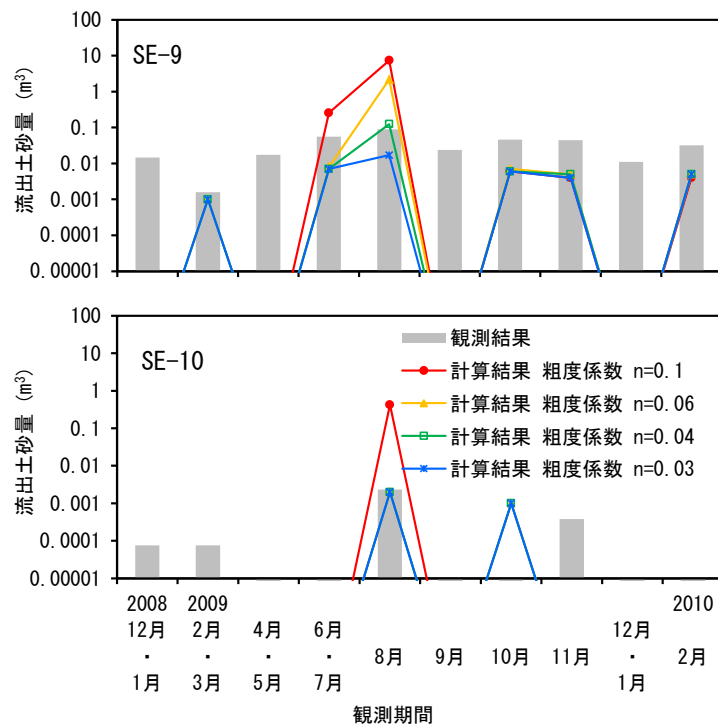


図5. 20 小溪流末端(SE)の流出土砂量観測の再現計算結果

### 5. 5. 1. 3 計算の実施と結果

計算結果と観測値を表5. 9、表5. 10および図5. 20に示す。いずれも流出土砂量を対数で示したものである。谷部の粗度係数  $n=0.04$  ( $0.03\sim0.06$ の範囲) で計算値と観測値がほぼ近づく結果となり、山地流路に適用されるマンニングの粗度係数の概略値(水理公式集)に相当している。

## 5. 5. 2 河床変動計算モデルの検証

### 5. 5. 2. 1 検証対象流域

検証対象とする流域は図5. 17に示す西滝ヶ谷第二床固地点より上流の流域( $1.48\text{km}^2$ )とし、検証対象とする流出土砂量は西滝ヶ谷第二床固地点のピット流砂計による観測データを用いる(第4章)。ピット流砂計は掃流砂観測の直接的な方法であり(第1章)、ピット底面にロードセルを設置すれば掃流砂が堆積したその重量を時系列で記録できる。本研究では毎正時から5分おきに整理したデータを用いる。

### 5. 5. 2. 2 各パラメータの設定条件

降雨条件は、流出解析モデルの検証対象と同じ2004(H16)年10月出水時、2006(H18)年5月出水時のものとする(本章5. 2. 1および富田ら 2012)。粒度分布条件は、図5. 19をもとに、斜面部には崩壊地平均の粒度分布、谷部および河道部には河床平均の粒度分布を適用し、砂防堰堤堆砂域については砂防堰堤堆砂平均の粒度分布を適用する。河床の交換層は15cmに設定し、交換層の粒度分布は河床平均粒度を適用した場合と19mm 以上に粗くした場合(図5. 19の点線)を設定する。透水係数、粗度係数等は流出解析モデルの検証計算結果(本章5. 2. 4および富田ら 2012)をもとに表5. 11のように設定する。ただし、図5. 20の土砂流出計算モデルの検証結果をもとに、谷部の等価粗度は0.04とする。河道の粗度係数は、水理公式集(土木学会、



1999b) を参考にマンニングの粗度係数を設定することとし、白鶴堰堤上流はほぼ自然流路に近いことを考慮して  $n=0.04$ 、下流は改修されているため  $n=0.03$  とする。

表5.11 河床変動計算モデル検証の解析条件

	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	0.00008
		中間流層厚	$D_{ps2}$	m	0.125
	表層	等価粗度	$n_s$		0.4
谷部	表層	等価粗度	$n_v$		0.04
河道	白鶴堰堤上流	マンニングの粗度係数	$n$		0.04
	白鶴堰堤下流	マンニングの粗度係数	$n$		0.03

(本章 5.2.4 より作成)

\* 中間流層の厚さは空隙分の厚さ(空隙率0.4)を加味している

### 5.5.2.3 計算の実施と結果

2004(H16)年10月出水および2006(H18)年5月出水時の計算結果と観測値を図5.21、図5.22に示す。交換層の粒度に河床平均粒度をそのまま適用した場合は観測値よりも計算値が大きくなった。交換層の粒度を19mm以上に大きくすると流出土砂量は観測値と計算値が近づく結果となった。

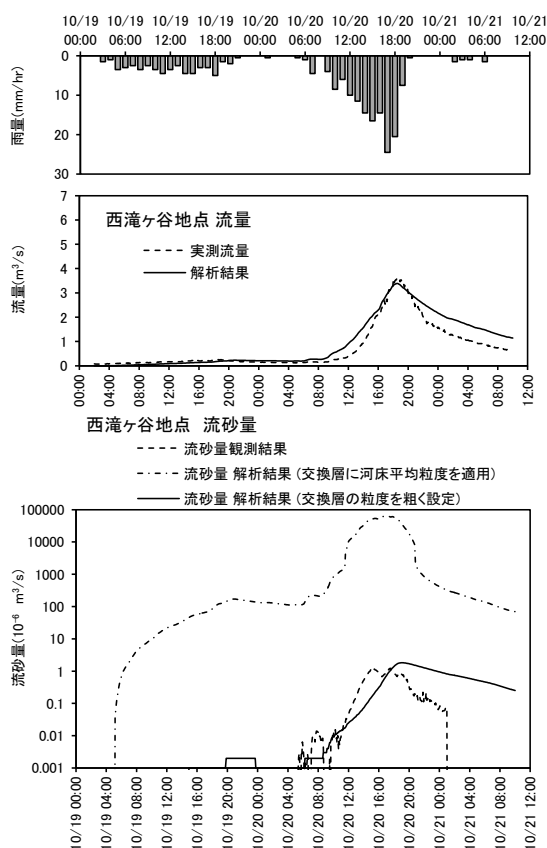


図5.21 西滝ヶ谷地点流砂量観測の再現計算結果(2004(H16)年10月出水)

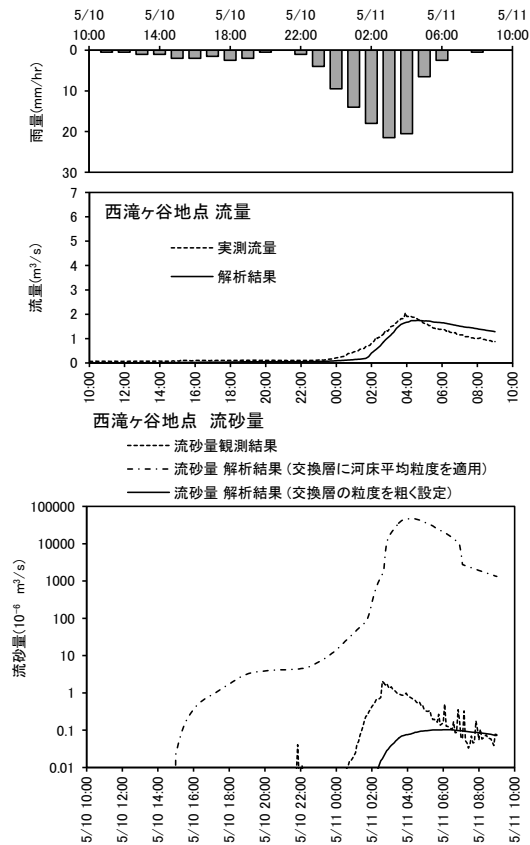


図5.22 西滝ヶ谷地点流砂量観測の再現計算結果(2006(H18)年5月出水)

## 5.6 検証計算結果のまとめと今後の課題

土砂流出計算モデル、河床変動計算モデルの検証計算からは次のことが整理できる。

- 1) 土砂流出計算モデルにより谷部への流出土砂量の観測データを再現するには、谷部の粗度係数を水理公式集により山地流路に適用されるマンニングの粗度係数程度 ( $n=0.03\sim0.06$ ) に設定する必要がある。
- 2) 河床変動計算モデルにより流砂量の観測データを再現するには、河床表層の交換層の粒度を実測よりも粗く設定する必要がある。

以上の条件が必要であったが、流出解析モデル(富田ら 2012)を含む一連の本研究で構築した流域管理システム(WMS)は、降雨・流出過程および土砂流出過程を概ね再現でき、本システムが流域の水・土砂の流出、河床変動の過程を一括して解析できることを示した。

なお、再現事例が限られており、たとえば森林区分ごとの特性(第3章)を反映させる検討を行っていない。また、今回の観測データでは、森林区分によって侵食土砂量と流出土砂量が低減する傾向にあるということ以外にたとえば流出応答等との関係性は見いだせず(第3章)、森林区分ごとの特性付与までは検討できなかった。今後、様々な条件下での適用性を検討していく必要がある。

## 引用・参考文献

- 芦田和男・道上正規(1970):浮遊砂に関する研究(1)―河床付近の濃度―, 京大防災研究所年報, 第13号 B, p.233-242
- 芦田和男・道上正規(1972):移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206号, p.59-69
- 芦田和男・高橋保・水山高久(1978):山地河川の掃流砂量に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.30, No.3, p.9-17
- 土木学会(1999a):水理公式集[平成 11 年版], p.40
- 土木学会(1999b):水理公式集[平成 11 年版], p.89
- 平野宗夫(1971):Armoring を伴う河床低下について, 土木学会論文集, 第 195 号, p.55-65
- 道上正規(1972):流砂と河床変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文
- 水山高久・上原信司(1984):土石流の水深と流速の観測結果の検討, 新砂防, Vol.37, No.4, p.23-26
- 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
- Rubey, W. W. (1933):Setting velocities of gravels, sand and silt particles, American J. of science, Vol.25, p.325-338
- 高橋保(1977):土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 20 号 B-2, p.405-435
- 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
- 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武蔵由育・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

## 第6章 流域管理システム(WMS)を用いた住吉川流域における砂防堰堤による流出土砂量の低減効果の評価事例

本章では、第5章で構築した流域管理システム(WMS)を用いて、住吉川流域において砂防堰堤の整備状況を変化させたシミュレーションを行い、砂防堰堤による流出土砂量の低減効果、除石による流出土砂量の低減効果について定量的に検討する。

### 6.1 計画規模降雨時の砂防堰堤による流出土砂量の低減効果の検討

計画規模降雨は、国土交通省六甲砂防事務所が想定している、1/200年確率、72時間雨量479.2mmとし、砂防堰堤は表6.1および図6.2に示すものを対象とする。砂防堰堤の整備状況は図6.1に示す砂防堰堤の整備の変化を踏まえて表6.2のように設定し、また、砂防堰堤の堆砂状況はそれぞれの砂防堰堤の整備段階において、堆砂がない場合(a)、満砂している場合(b)の2とおりの状況を設定する(表6.2)。砂防堰堤の現況の整備を示す Case-5 については、2004(H16)年度に六甲砂防事務所が取得した LP データをもとに河床高を想定して現況の堆砂状況(c)を想定する(表6.2)。図6.3には住吉川流域の河口からの縦断形状を示す。

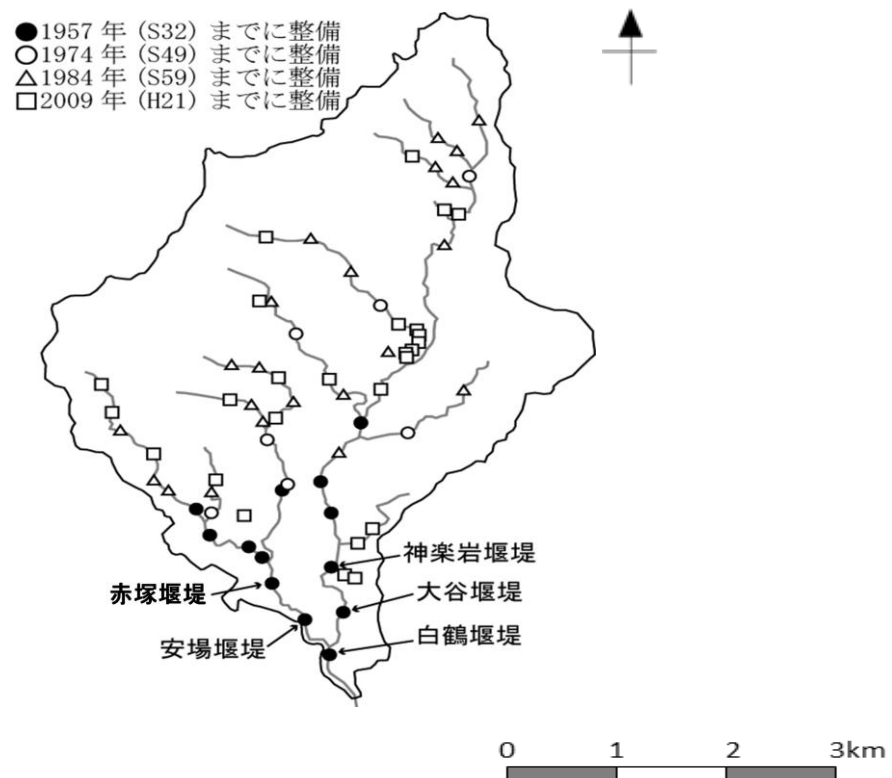


図6.1 住吉川流域の砂防堰堤位置図

(名称表記した砂防堰堤は、本章6.2で検討対象とした砂防堰堤)

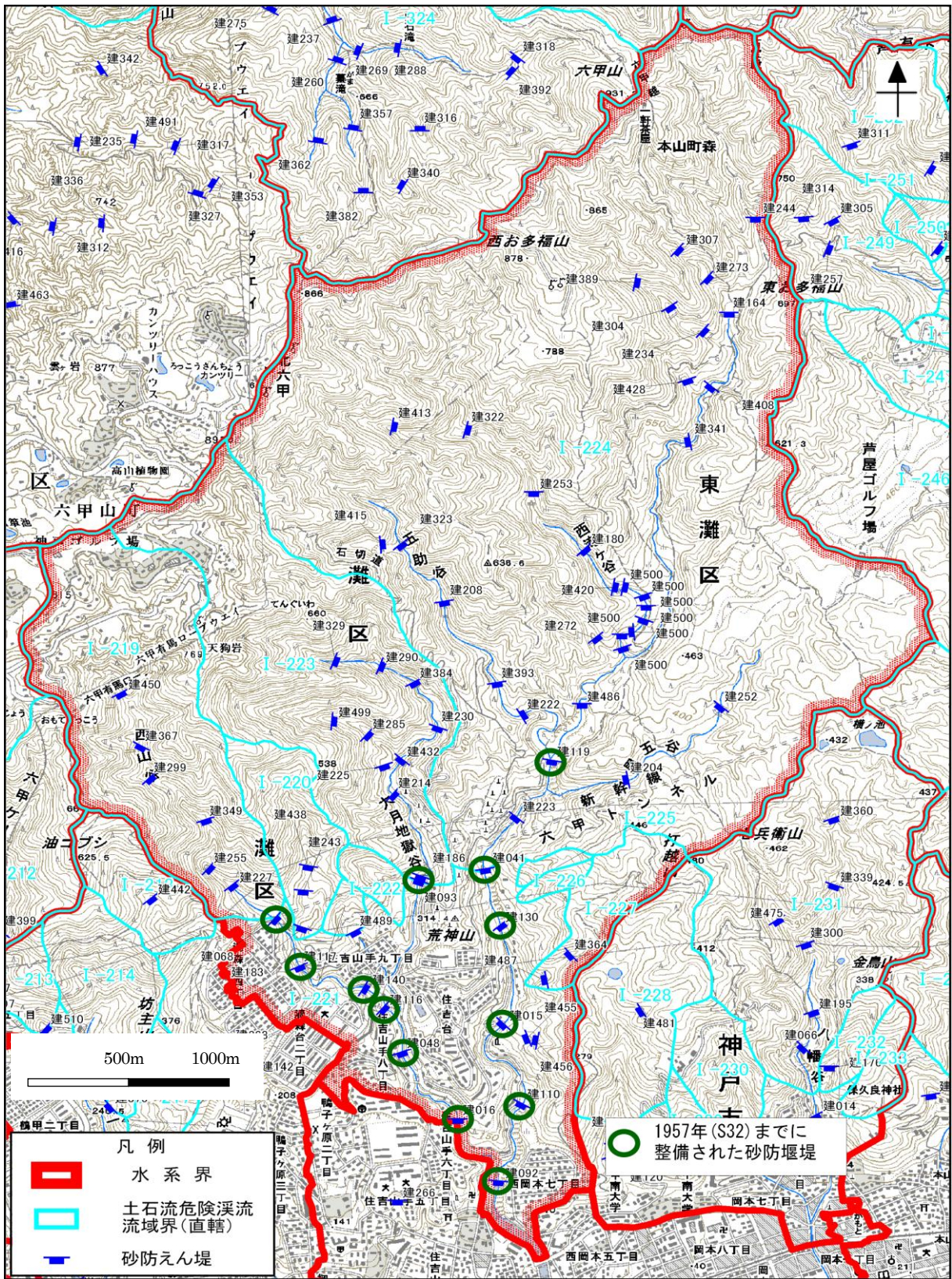


図6.2 1967(S32)年までに整備された砂防堰堤(住吉川流域)の位置

(六甲砂防事務所資料に加筆)

表6.1 住吉川流域の砂防堰堤の堆砂量および施設効果量

施設番号	堰堤名	竣工年	流域面積 (km <sup>2</sup> )	標高 (m)	堰堤諸元							現況堆砂量 (2004年) m <sup>3</sup>	施設効果量 m <sup>3</sup>
					貯砂容量 (m <sup>3</sup> )	堤高 (m)	堤長 (m)	水通し幅 (m)	現況溪床勾配 (1/n)	堆砂距離 (m)			
1	16 安場堰堤	s14	3.53	136	14,400	10	41	12	13.0	192	9,540	4,982	
2	15 神楽岩堰堤	s15	7.43	180	33,400	15	70	18	12.6	482	33,400	9,173	
3	48 赤塚堰堤	s16	3.1	176	20,000	13	42	12	11.0	371	8,250	14,546	
4	68 千丈谷堰堤	s21	1.18	302	36,000	16	51	10	6.7	236	5,510	18,015	
5	41 小峰ヶ原堰堤	s24	6.81	252	94,000	21	60	16	12.0	286	22,020	20,270	
6	92 白鶴堰堤	s25	11.04	102	3,600	6	60	36	22.1	223	3,600	6,916	
7	93 荒神山堰堤	s26	1.56	269	64,000	16	46	10	5.0	18	64,000	270	
8	110 大谷堰堤	s27	8.15	-	17,100	9	34	12	11.6	123	5,200	4,372	
9	116 西谷堰堤	s27	1.7	194	8,000	8	33	10	9.1	106	8,000	854	
10	117 寒天山堰堤	s27	1.6	268	8,500	10	34	8	7.0	163	2,940	2,468	
11	130 東谷堰堤	s29	7.4	203	19,000	13	24	8	10.0	253	11,160	12,614	
12	140 西谷上流堰堤	s30	2.1	215	16,000	12	47	8	10.0	90	16,000	726	
13	119 五助堰堤	s32	4.2	320	374,000	30	78	18	8.4	1,009	123,740	159,358	
14	164 本庄堰堤	s44	1	581	130,000	20	103	17	8.5	516	7,810	66,303	
15	180 水晶谷堰堤	s45	1.4	464	50,000	23	50	10	10.0	285	1,160	13,964	
16	183 大月谷堰堤	s45	0.3	300	16,000	17	46	5	8.4	269	710	10,389	
17	186 荒神山第二堰堤	s46	1.5	279	90,000	13.5	71	13	10.0	456	15,960	50,738	
18	204 黒五谷堰堤	s49	1.35	359	68,000	16	62.5	15	20.0	634	1,240	82,448	
19	208 五助谷堰堤	s49	0.9	466	86,000	28	50.5	7	7.0	251	3,250	14,213	
20	214 荒神山第三堰堤	s49	1	319	13,000	18	47.1	10	7.6	250	10,890	15,049	
21	222 五助上流堰堤	s50	0.92	355	23,000	14	64.5	10	9.0	207	4,182	7,159	
22	223 小峰ヶ原第二堰堤	s50	6.5	27	9,500	11	38	15	10.6	181	20	7,832	
23	225 大西谷堰堤	s50	0.25	340	4,300	13	36	5	5.4	174	1,330	4,246	
24	227 千丈谷第二堰堤	s50	0.81	334	12,600	15	55	8	4.8	125	4,800	5,026	
25	230 紅葉谷堰堤	s51	0.41	371	14,600	14	40	13	8.0	232	1,600	11,413	
26	234 田辺谷堰堤	s51	0.4	600	9,400	15	56	6	5.0	171	1,950	4,221	
27	243 大月谷第二堰堤	s51	0.3	323	4,300	11.5	42	6	7.0	118	1,880	2,582	
28	244 黒岩谷堰堤	s52	0.4	641	23,900	18	56	8	7.3	224	5,310	13,745	
29	255 千丈谷第三堰堤	s52	1	359	9,100	16	41	7	4.1	108	1,170	3,394	
30	252 黒五谷第二堰堤	s54	0.85	390	86,600	15	83	10	18.0	559	10,660	49,834	
31	253 水晶谷第二堰堤	s54	1.2	522	90,000	25	65.1	13	7.8	434	2,830	33,407	
32	272 五助第二堰堤	s54	0.1	403	16,000	17	55	10	6.3	203	940	6,909	
33	273 三条谷堰堤	s54	0.2	621	22,600	18	56	8	5.0	199	4,050	10,560	
34	285 大西谷第二堰堤	s55	0.27	376	4,600	15	30	6	4.0	39	40	637	
35	290 紅葉谷第二堰堤	s55	0.64	434	16,800	18	39.8	10	3.5	253	6,660	9,187	
36	299 千丈谷第四堰堤	s56	0.91	504	16,050	15	42	8	5.6	242	680	7,612	
37	304 田辺谷第二堰堤	s56	0.31	641	12,600	17	64	6	3.7	195	390	6,538	
38	307 三条谷第二堰堤	s57	0.17	661	11,830	17	44	6	3.3	110	1,060	2,166	
39	322 水晶谷第三堰堤	s58	0.92	585	57,630	25	63	8	6.0	454	4,300	28,294	
40	323 五助谷第二堰堤	s58	0.45	545	27,360	18	55	8	5.2	389	5,320	24,111	
41	329 紅葉谷第三堰堤	s59	0.18	506	9,200	16	45	6	4.1	132	150	5,981	
42	341 本庄第二堰堤	s59	1.62	500	64,100	17.5	49	16	8.3	252	3,200	14,673	
43	349 千丈谷第五堰堤	s60	0.91	431	23,500	20	34	7	4.7	183	310	10,519	
44	364 神楽岩上流堰堤	s61	0.18	289	8,910	15	52	6	5.9	172	1,050	4,584	
45	367 千丈谷第六堰堤	s62	0.63	534	15,164	14	49	8	5.8	209	280	6,325	
46	384 紅葉谷第四堰堤	H1	0.68	406	17,658	19	39	7	6.9	181	660	9,750	
47	389 田辺谷第三堰堤	H1	0.24	693	8,901	17	54	5	4.0	138	710	4,724	
48	393 五助上流第二堰堤	H1	0.81	391	32,745	18.5	58	8	8.1	347	6,710	18,556	
49	408 本庄第三堰堤	H3	1.37	542	108,562	20	87.5	15	10.3	412	1,260	54,863	
50	413 水晶谷第四堰堤	H4	0.14	662	21,567	23	53.5	6	4.4	201	420	9,093	
51	415 五助谷第三堰堤	H4	0.12	567	24,000	27.5	54	5	3.8	177	790	16,869	
52	420 西滝ヶ谷堰堤	H5	1.4	432	20,400	14.5	78	10	10.0	199	660	6,969	
53	428 本庄第四堰堤	H6	0.14	555	10,752	16	43.5	8	3.3	125	590	1,439	
54	432 荒神山第四堰堤	H6	0.79	343	31,797	19	63	10	7.5	234	3,720	16,664	
55	438 大月谷第三堰堤	H7	0.18	351	8,126	14.5	43	6	4.1	213	140	8,245	
56	450 千丈谷第七堰堤	H7	0.21	595	8,214	14.5	36	6	3.8	84	0	9,604	
57	455 十文字鋼製枠堰堤	H7	-	-	2,342	6	46	4	4.3	74	0	884	
58	456 十文字堰堤	H8	-	215	1,941	10	33	3	2.9	45	50	0	
59	486 五助第三堰堤	H9	3.93	347	83,309	22	75.8	15	10.0	393	3,730	49,631	
60	487 神楽岩第二堰堤	H9	0.19	257	25,159	20	85.7	4	4.1	156	750	13,720	
61	489 焼ヶ原堰堤	H10	0.04	269	9,667	14	101	6	2.9	83	0	3,381	
62	499 大西谷第三堰堤	H11	0.19	428	23,605	21.5	52.5	6	3.2	138	0	3,147	
63	500 西滝ヶ谷低ダム群	H11	-	-	7,111	5	24	8	9.0		6,670	7,697	
	合計				2,200,500						445,402	1,023,859	

(六甲砂防事務所資料に加筆)

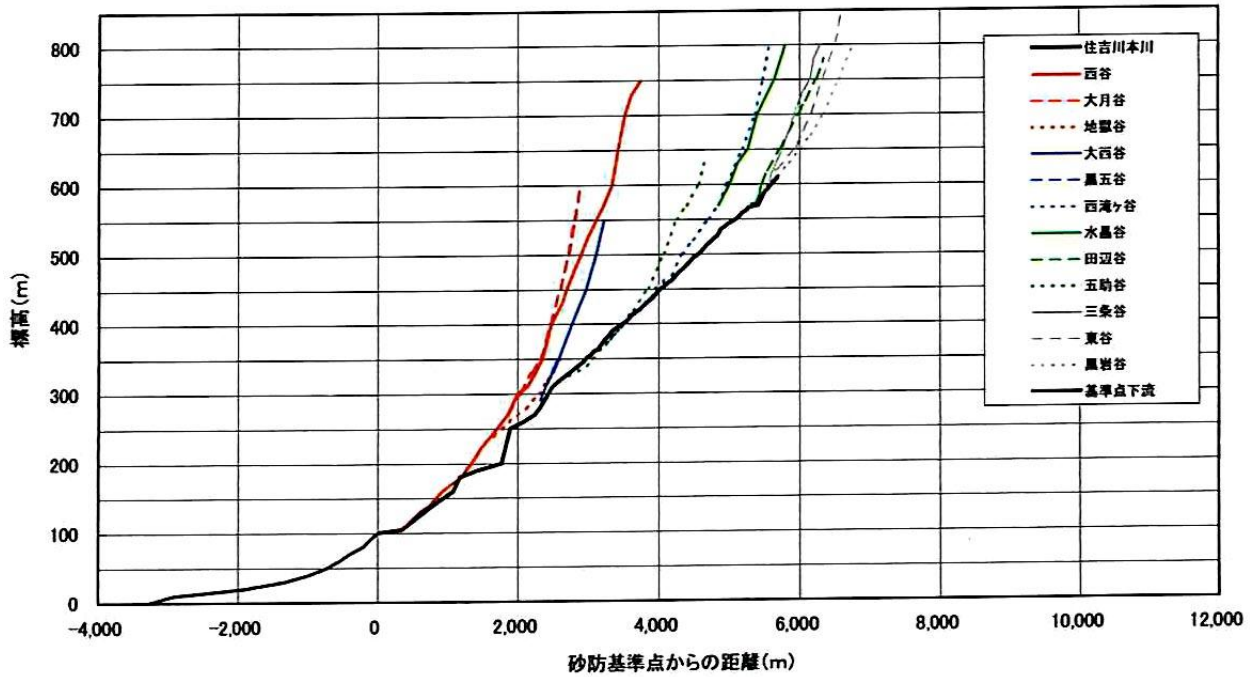


図6.3 住吉川流域の河口からの縦断形状

表6.2 解析ケースの設定

	施設整備状況(※1)	施設効果量(千 $m^3$ )(※2)	堆砂状況(※3)
Case-1	無施設	0	—
Case-2a	1957年(S32)	255	全容量が空の状態
Case-3a	1974年(S49)	508	
Case-4a	1984年(S59)	767	
Case-5a	2009年(H21)	1,024	
Case-2b	1957年(S32)	255	
Case-3b	1974年(S49)	508	満砂状態
Case-4b	1984年(S59)	767	
Case-5b	2009年(H21)	1,024	
Case-5c	2009年(H21)	1,024	現況堆砂状況

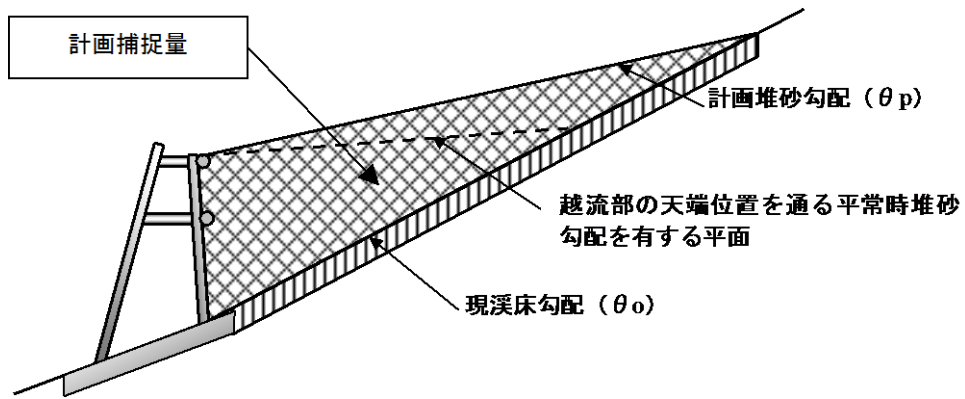
※1 表6.2より、各年までに整備された砂防堰堤

※2 施設効果量は、図6.2に基づき表6.2に算出したもの

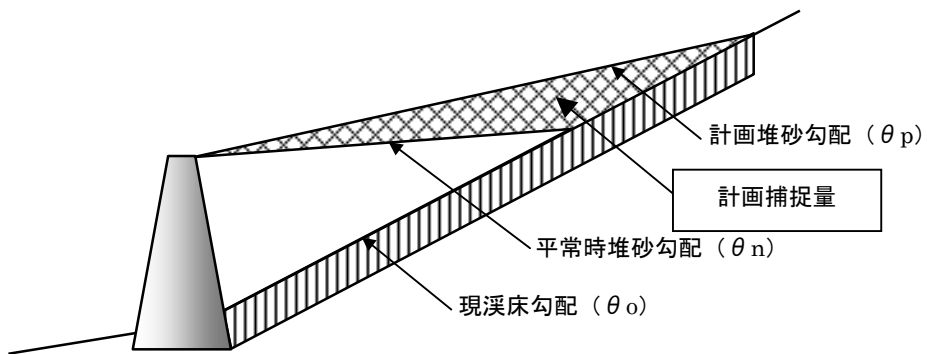
※3 現況堆砂量は、2004年LPデータから読み取ったもの(表6.2)

施設効果量は図6.4に示す計画捕捉量と堰堤の設置により現溪床勾配で抑制された量(流出抑制量)の合計値である。算出方法は国土技術政策総合研究所資料第364号に基づく。算出結果を表6.1に示す。また、全容量が空の状態とは、表6.1に示す砂防堰堤の貯砂容量が図6.4に示す平常時土砂が堆積する空間の容量をいうものとして、その容量が空の状態とした。

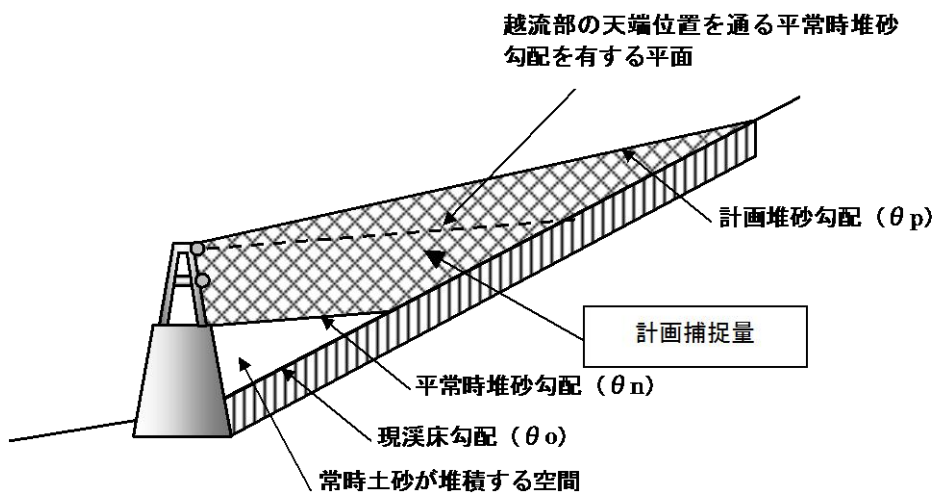
●透過型堰堤の場合



●不透過型堰堤の場合



●部分透過型の場合



(図は国総研資料第364号より引用)

図6.4 砂防堰堤の施設効果量の考え方



### 6. 1. 1 各パラメータの設定

1/200年確率の降雨波形は、「昭和13年災害」時の雨量を72時間雨量479. 2mm となるように引きのばして設定する(図6. 5)。透水係数、粗度係数等は、第5章の検証計算の結果を踏まえて表6. 3のように設定する。

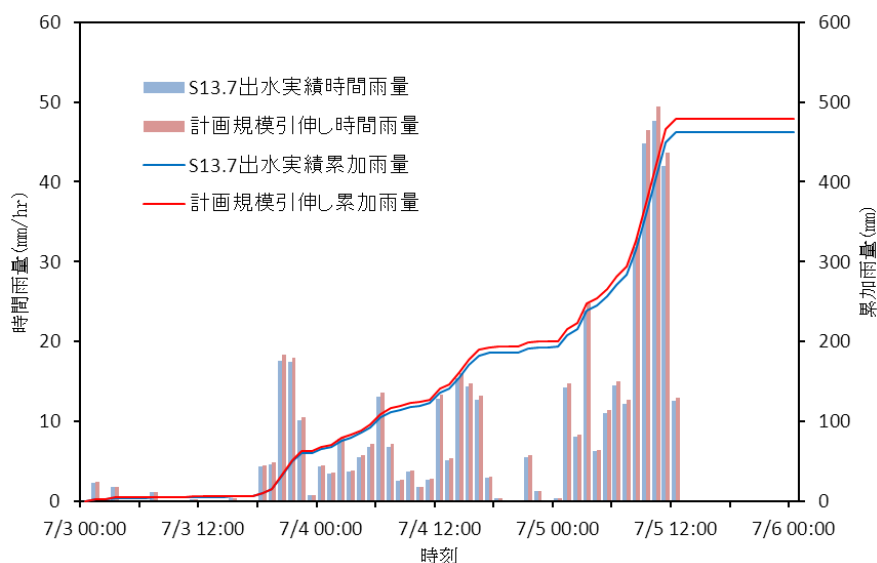


図6. 5 計画規模降雨波形

表6. 3 解析条件

		項目	記号	単位	値
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	0.00008
		中間流層厚	$D_{ps2}$	m	0.125
	表層	等価粗度係数	$n_s$		0.4
谷部	表層	等価粗度係数	$n_v$		0.04
河道部	白鶴堰堤上流	マンシングの粗度係数	$n$		0.04
	白鶴堰堤下流	マンシングの粗度係数	$n$		0.03

\* 中間流層厚は空隙分の厚さ(空隙率0.4)を加味している

### 6. 1. 2 流出土砂量の変化

計算の結果、表6. 2の無施設時(Case-1)の土砂収支は表6. 4のとおりとなった。斜面部から1, 036千 m<sup>3</sup>の土砂が流出するが、そのうち290千 m<sup>3</sup>は谷部に堆積し、さらに谷部から河道へ流出した746千 m<sup>3</sup>の土砂のうち488千 m<sup>3</sup>は砂防計画基準点より上流の河道に堆積する。最終的に砂防計画基準点から下流へ流出する土砂量は258千 m<sup>3</sup>となる、という計算結果である。

表6. 5に住吉川流域の現行の砂防計画の基本土砂量を示す。考え方や計算方法が異なっているので表6. 4の計算結果と単純には比較できないが、表6. 5の砂防計画の基本土砂量における計画流出土砂量1, 029千 m<sup>3</sup>は、表6. 4の計算値による斜面部からの流出土砂量1, 036千 m<sup>3</sup>とほぼ等しい。

表6.4 無施設時(CASE-1)の土砂収支の計算結果

項目	土砂量 (千m <sup>3</sup> )
斜面部からの流出土砂量	1,036
谷部における土砂量変化	290
谷部からの流出土砂量	746
砂防計画基準点上流河道の河床変動量	488
砂防計画基準点からの流出土砂量	258

表6.5 住吉川流域の砂防計画基本土砂量

項目	土砂量 (千m <sup>3</sup> )
計画生産土砂量	1,211
計画流出土砂量	1,029
計画許容流砂量	0
整備対象土砂量	1,029

(六甲砂防事務所資料より)

表6.2に示した各 Case の計算結果のうち、砂防計画基準点からの流出土砂量を図6.6に示す。また、図6.7に流出土砂量の時系列変化を示す。これらからは次のことが整理できる。

- ①無施設時(Case-1)の流出土砂量258千 m<sup>3</sup> に対して、砂防堰堤の各整備段階で堰堤に堆砂なしとした場合(Case-2a~5a)は29~45千 m<sup>3</sup>と算出された。これは無施設時の11~17%程度であり、流出土砂量は砂防堰堤の整備により大きく減少する。
- ②砂防堰堤の各整備段階で堰堤が満砂していた場合(Case-2b~5b)は、流出土砂量は127~135千 m<sup>3</sup>と算出された。これは無施設時の49~52%程度であり、砂防堰堤に堆砂がない場合と比較すると効果は小さい。
- ③現況の砂防堰堤整備状況・堆砂状況(Case-5)の場合は、流出土砂量は105千 m<sup>3</sup>と算出された。これは現況の砂防堰堤がすべて満砂していた場合(Case-5b)に近い。
- ④1957年までの砂防堰堤整備状況において、流出土砂量は無施設時から大きく減少した。しかし、その後は、砂防堰堤の整備が大きく進むものの流出土砂量に大きな変化はみられない。
- ⑤1957年までに整備された砂防堰堤の位置をみると(図6.2)、整備対象流域の下流である。流域下流において砂防堰堤の空き容量が確保されていることが流出土砂量を大きく減少させる効果を発揮していると考えられる。

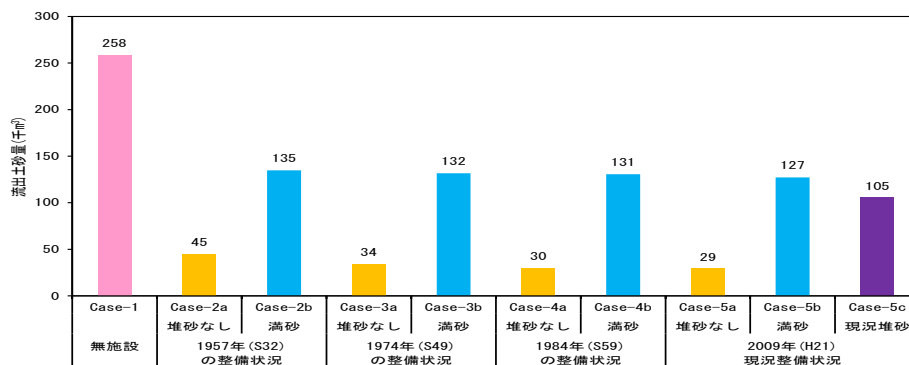


図6.6 砂防計画基準点からの流出土砂量の計算結果

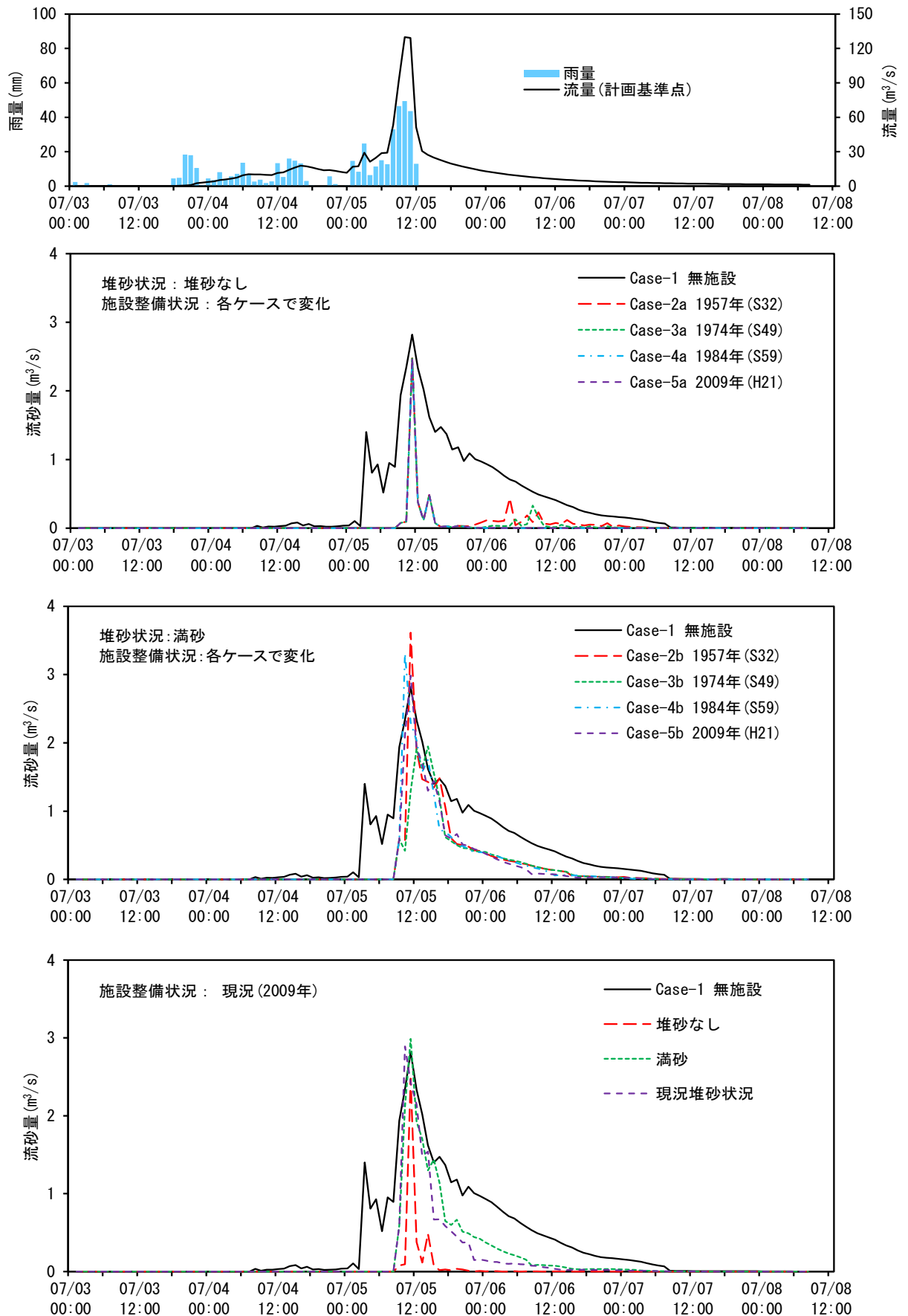


図6.7 砂防計画基準点からの流出土砂量の時系列変化(計画規模降雨 1/200年)

### 6. 1. 3 河床高の変化

無施設時(Case-1)、および現況施設状況で堆砂状況を変化させた場合(Case-5a~c)について、最大河床高と最大水位の計算結果の縦断図を図6. 8~6. 11に示す。

図6. 8の無施設時の場合、砂防計画基準点下流で河口から 1.2k~2.5kにおいて最大水位が堤防高を越えるが、図6. 9~6. 11では砂防計画基準点下流での河床上昇はなくなり、最大水位が堤防高を越える越える箇所はほぼなくなる。図6. 12に河口から1. 85k 地点および2. 5k 地点における河床高と水位の時系列変化を示す。これによると、河床上昇と水位上昇とは連動しており、砂防堰堤の整備による下流への流出土砂量の低減が氾濫防止に有効に機能していることがわかる。特に、図6. 9に示した現況施設の場合で堆砂がない場合には、河口付近を除けば氾濫箇所はほぼなく、現況施設において砂防堰堤に空き容量が確保されていれば、大規模出水時に土砂を捕捉することにより下流への効果が大きいことがわかる。

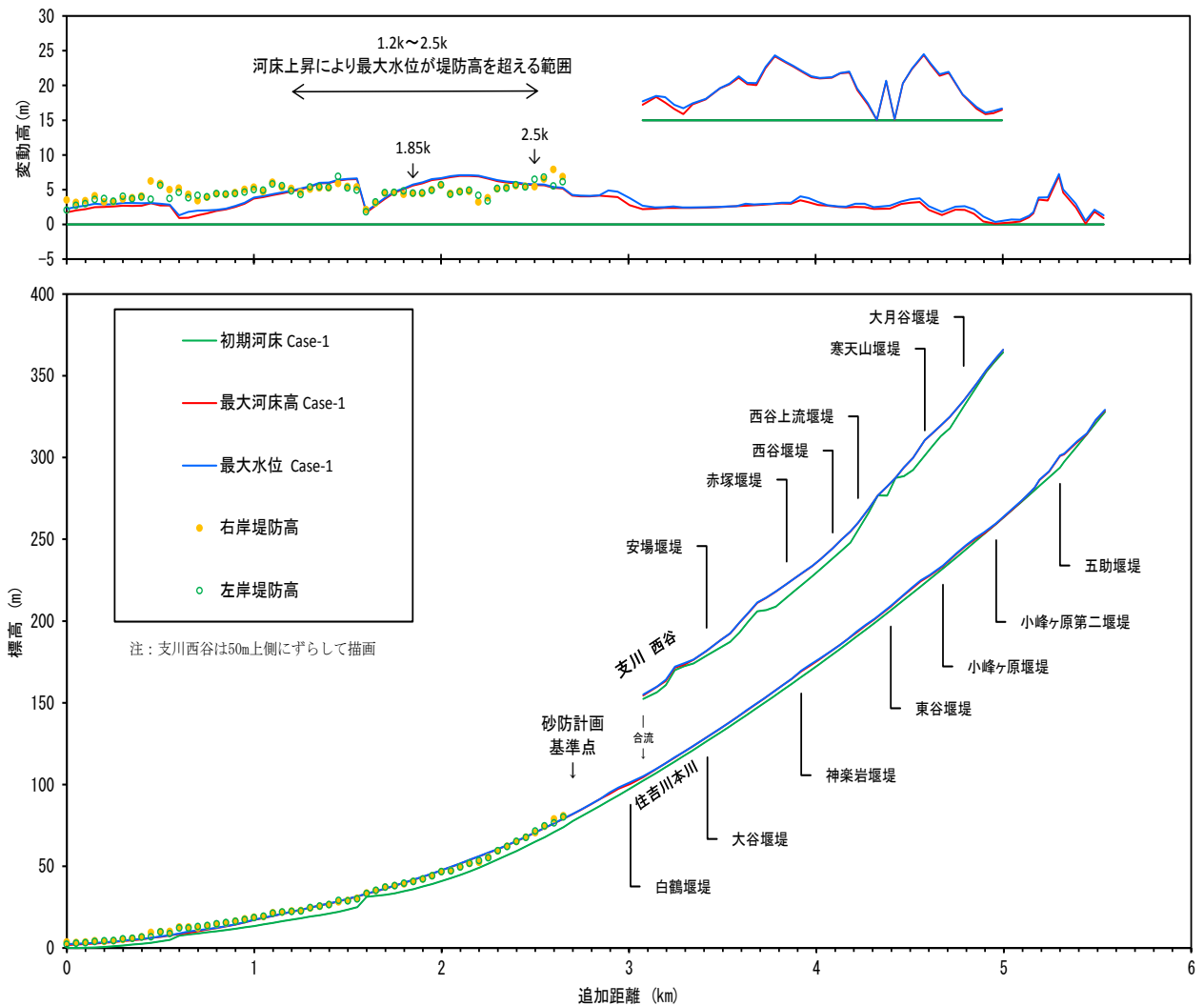


図6. 8 計画規模出水時の最大河床高および最大水位の計算結果の縦断図 (Case-1 無施設時、砂防計画基準点からの流出土砂量 258,000m<sup>3</sup>)

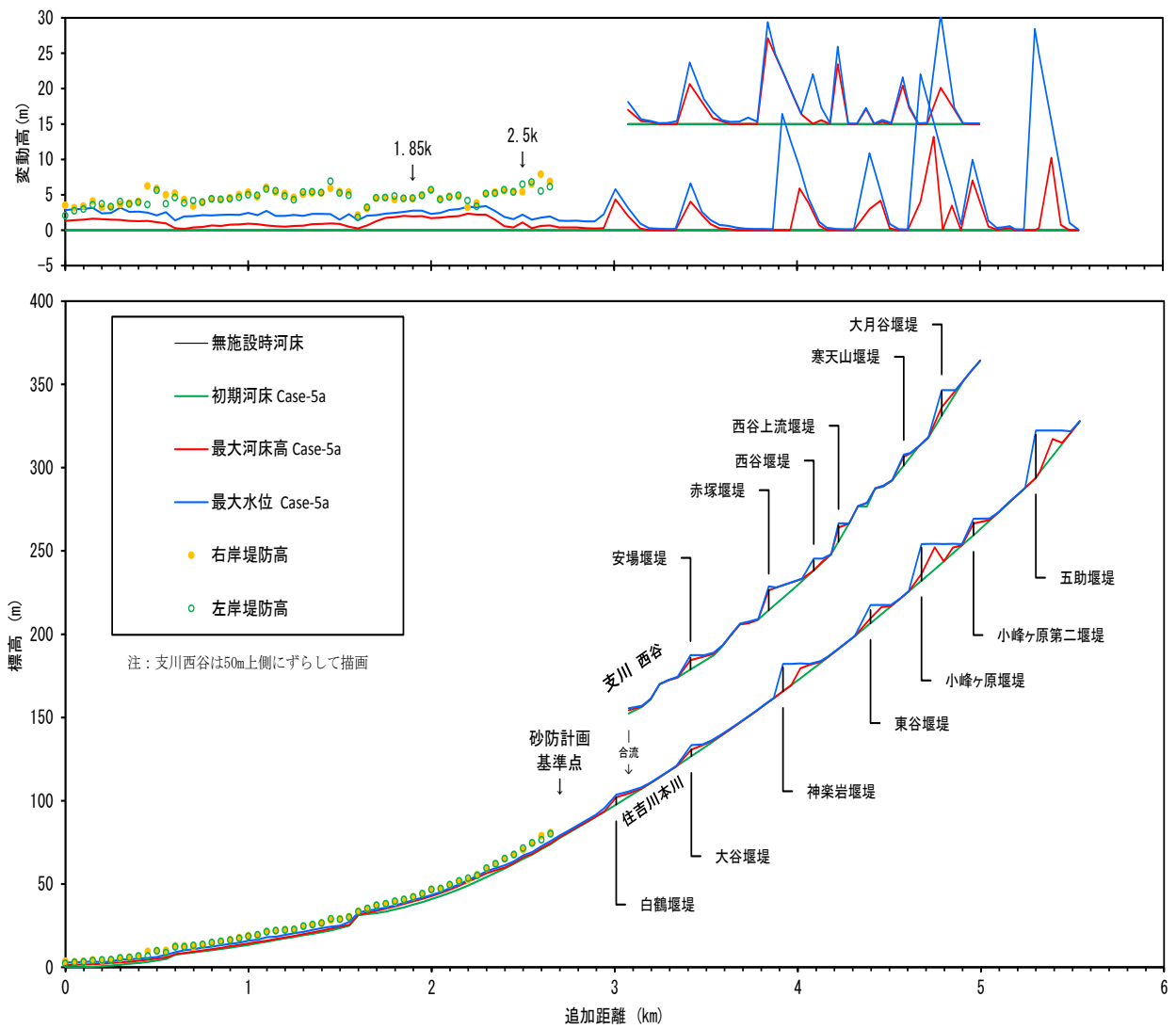


図6.9 計画規模出水時の最大河床高および最大水位の計算結果の縦断面図  
 (Case-5a 現況施設、堆砂なし、砂防計画基準点からの流出土砂量 29,000m<sup>3</sup>)

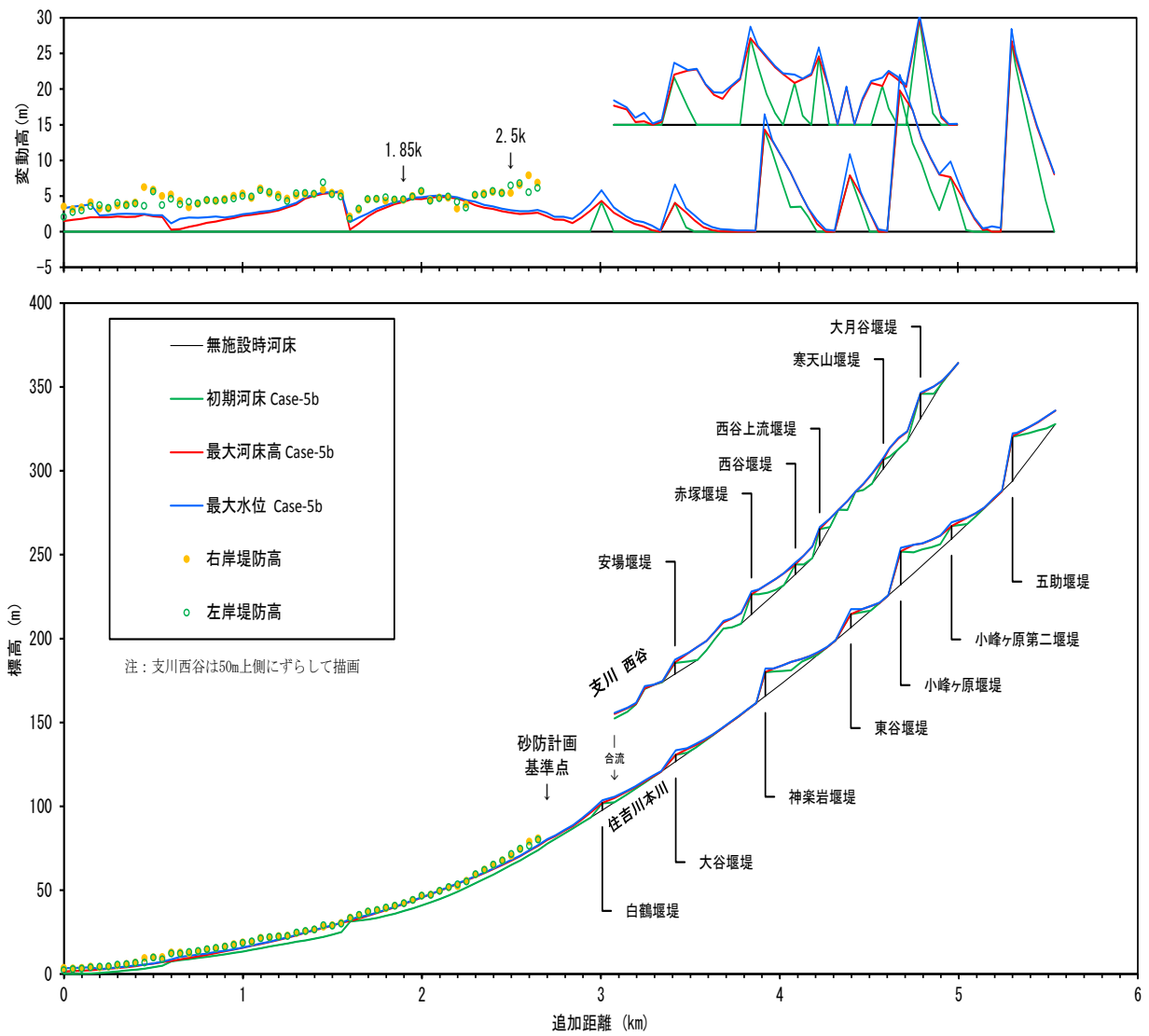


図6. 10 計画規模出水時の最大河床高および最大水位の計算結果の縦断面図  
 (Case-5b 現況施設、満砂、砂防計画基準点からの流出土砂量 127,000m<sup>3</sup>)

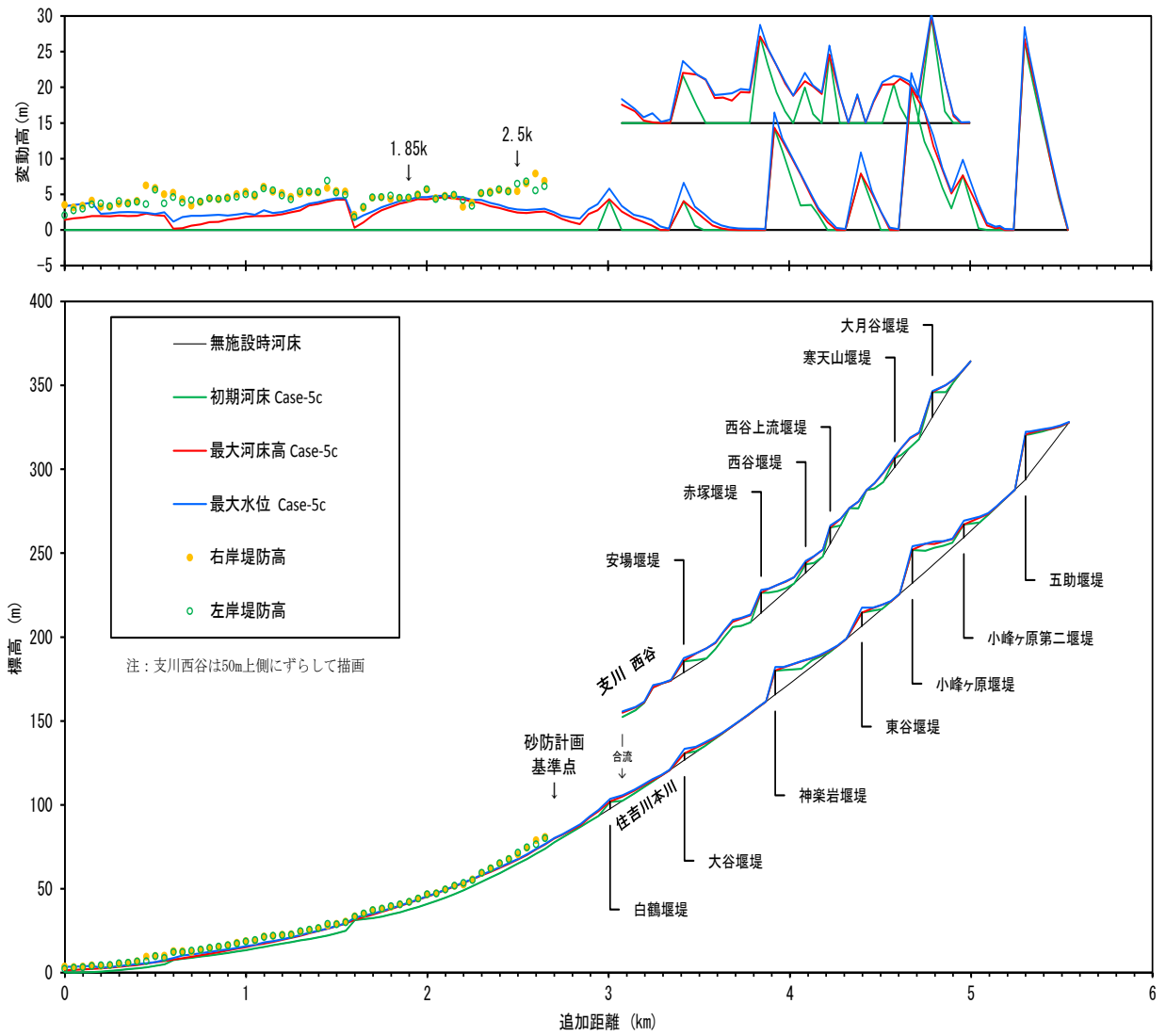


図6.11 計画規模出水時の最大河床高および最大水位の計算結果の縦断面図  
 (Case-5c 現況施設、現況堆砂、砂防計画基準点からの流出土砂量 105,000m<sup>3</sup>)

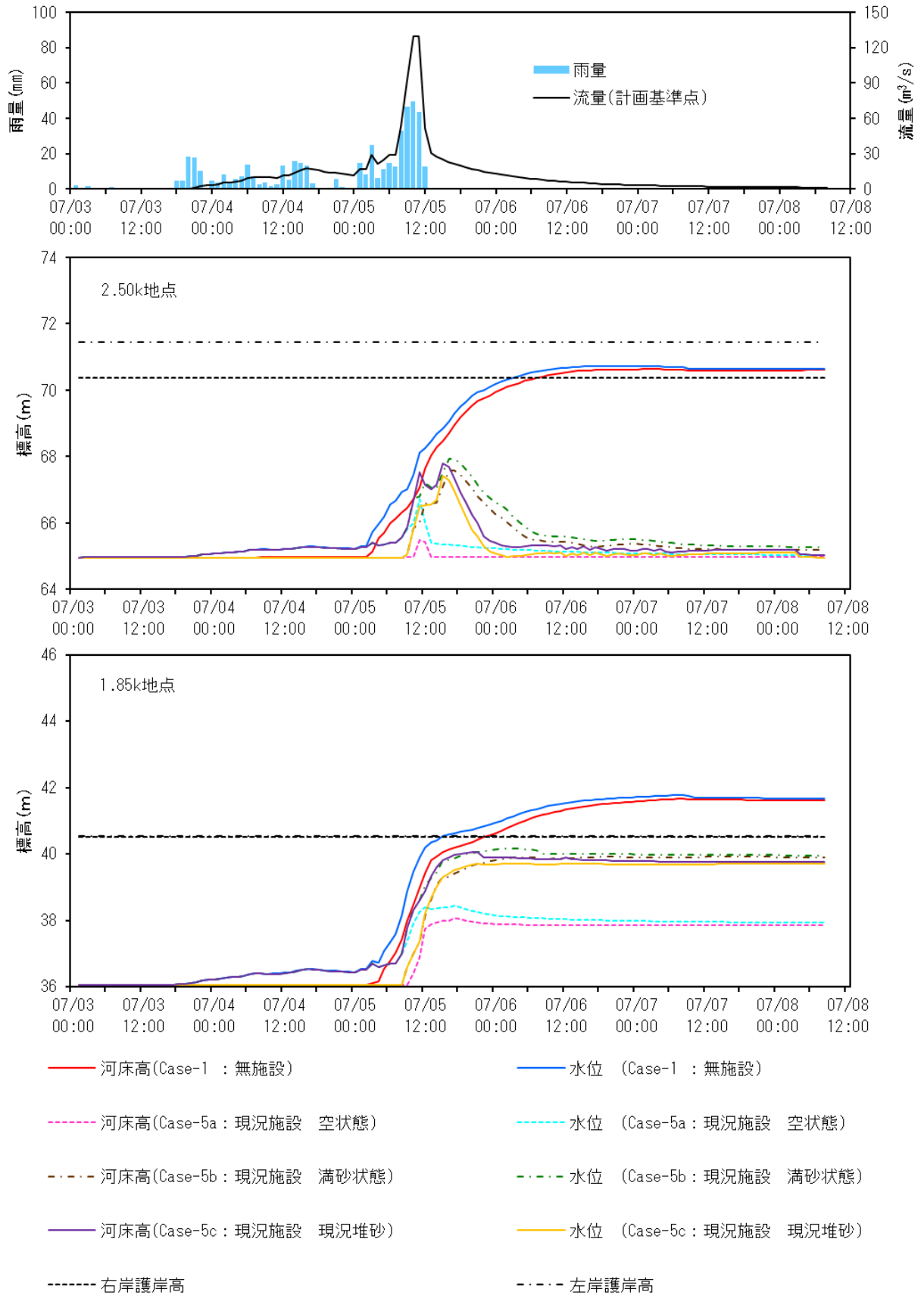


図6. 12 河床高と水位の時系列変化(河口から1.85k地点および2.50k地点)



## 6.2 除石による流出土砂量の低減効果の検討

本章6.1において、整備対象流域の下流、すなわち砂防計画基準点付近にある砂防堰堤の空き容量が確保されていることが砂防計画基準点から下流への流出土砂量の低減に有効という結果であった。

そこで、ここでは、10年後に計画規模降雨(1/200年確率、72時間雨量479.2mm)が発生すると想定して、それまでの10年間に砂防計画基準点直上流にある砂防堰堤の除石を計画的に行った場合の流出土砂量の低減効果について検討する。除石を行う砂防堰堤、毎年確保する空き容量は表6.6のように設定する。図6.13は除石対象施設として選定した砂防堰堤の位置を示す。

表6.6 解析条件

施設整備状況		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
除石条件：						
確保する 空容量 (千m <sup>3</sup> )	白鶴堰堤	-	-	3.6	3.6	3.6
	大谷堰堤	-	-	-	10.0	10.0
	安場堰堤	-	-	-	10.0	10.0
	神楽岩堰堤	-	-	-	-	20.0
	赤塚堰堤	-	-	-	-	20.0



図6.13 表6.6で除石対象施設として設定した砂防堰堤の位置

### 6.2.1 解析条件

10年間の降雨時系列は荒神山観測所(六甲砂防事務所)の2002(H14)～2011(H23)年間の時間雨量を使用する(図6.14)。この降雨を与えたあとに図6.5に示した計画規模降雨を波形を与えた場合の砂防計画基準点からの流出土砂量、砂防計画基準点下流における河床高の変化を把握する。除石については、年の変わり目において表6.6の条件を満たすように行うものとする。除石のモデルは、図6.15に示すように、所定の空き容量を

確保する範囲より高く堆積した部分の土砂を取り除くという考え方とし、堆積の断面積を減少させるものとする。  
その他の解析条件は、第5章の検証計算の結果を踏まえて表6.3とする。

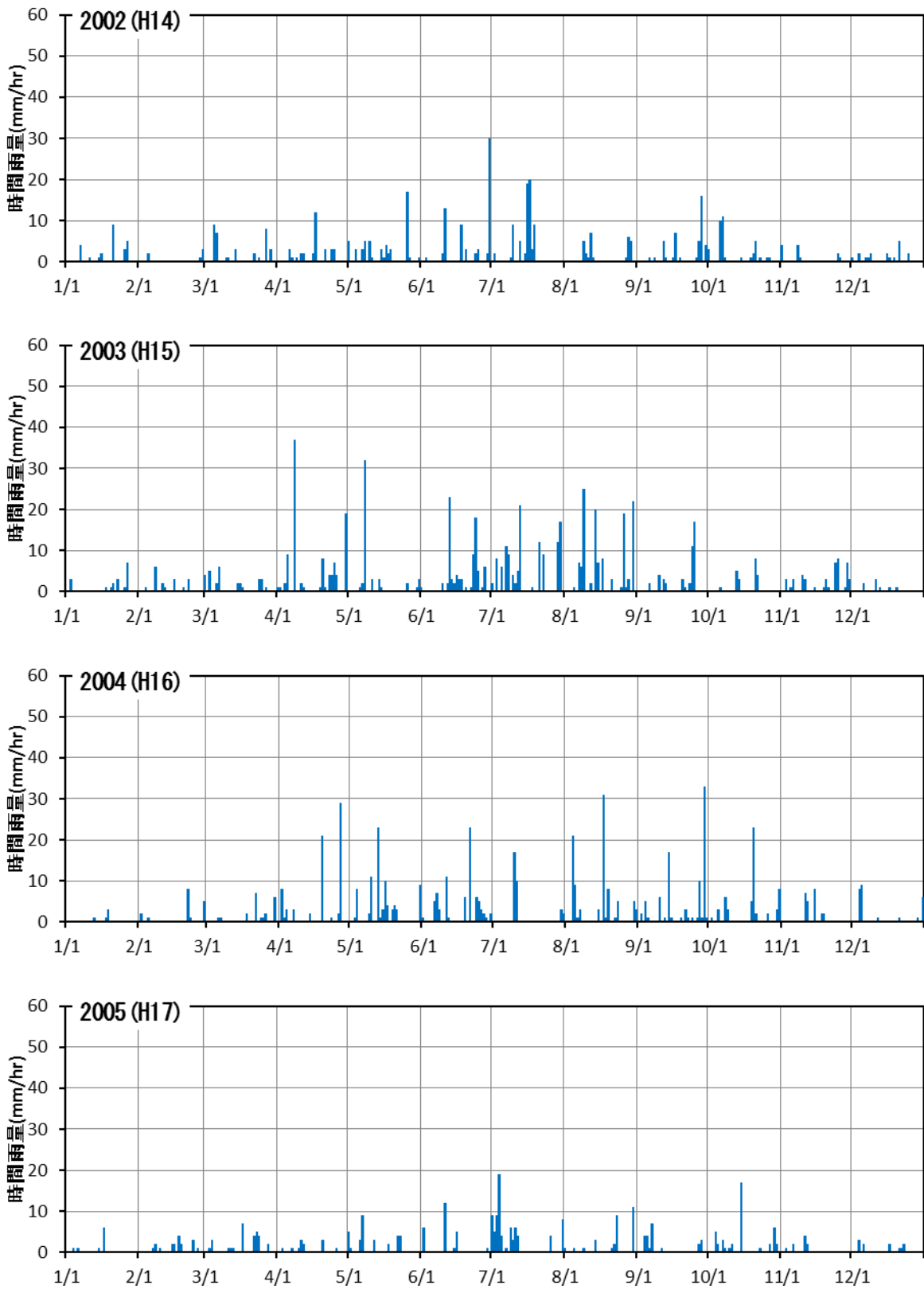


図6.14(1) 荒神山雨量観測所の時間雨量(2002(H14)年~2005(H17)年)

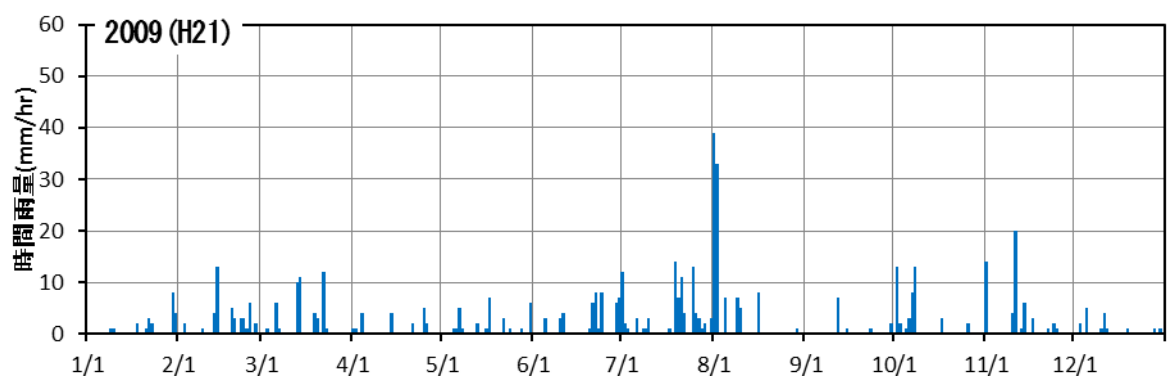
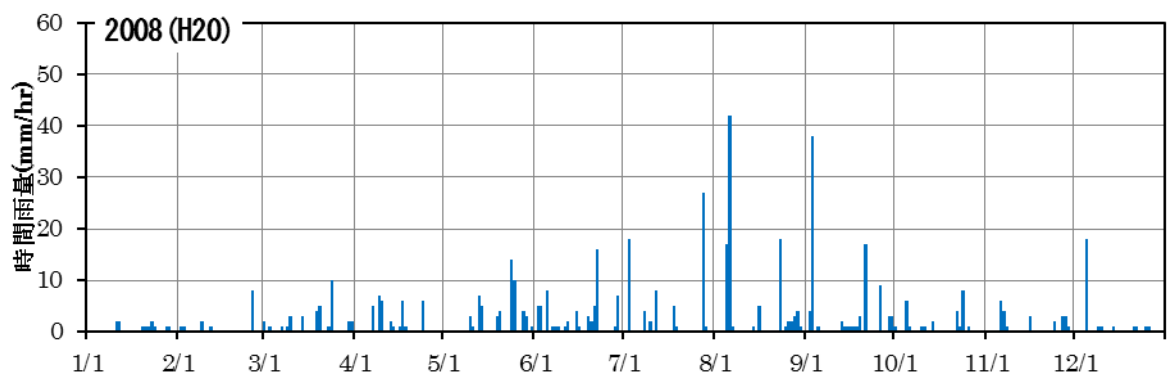
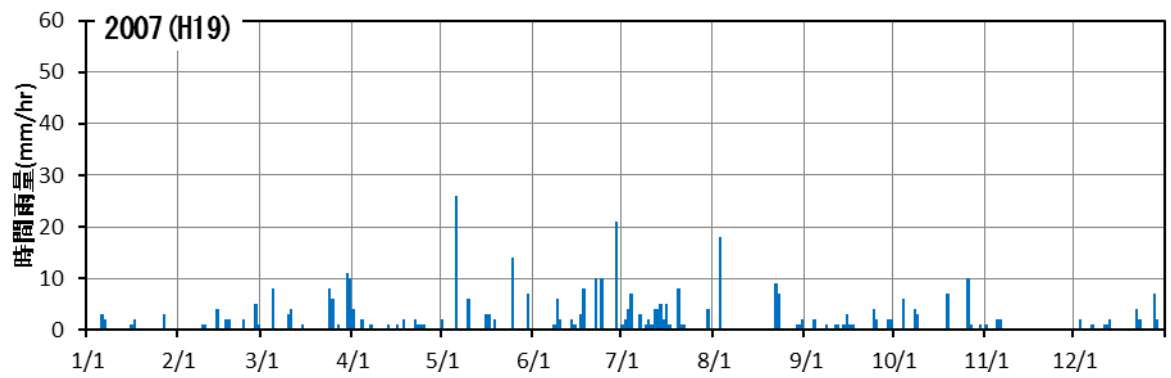
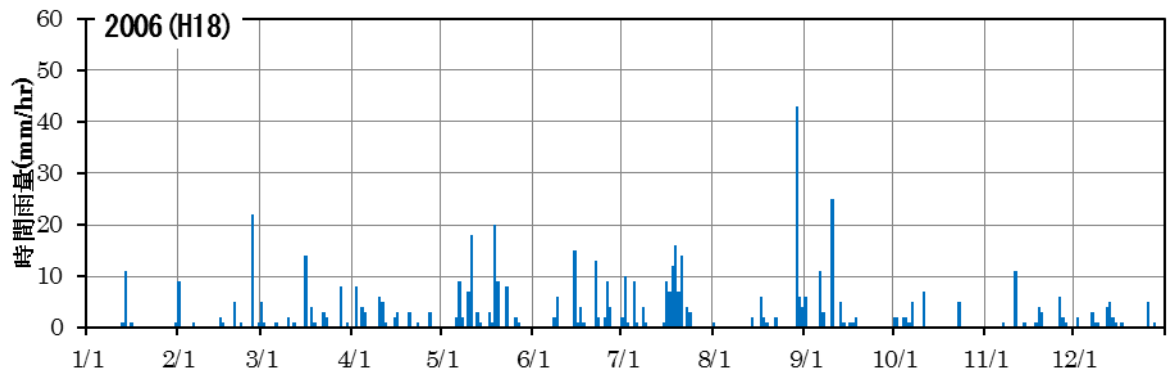


図6. 14(2) 荒神山雨量観測所の時間雨量(2006(H18)年~2009(H21)年)

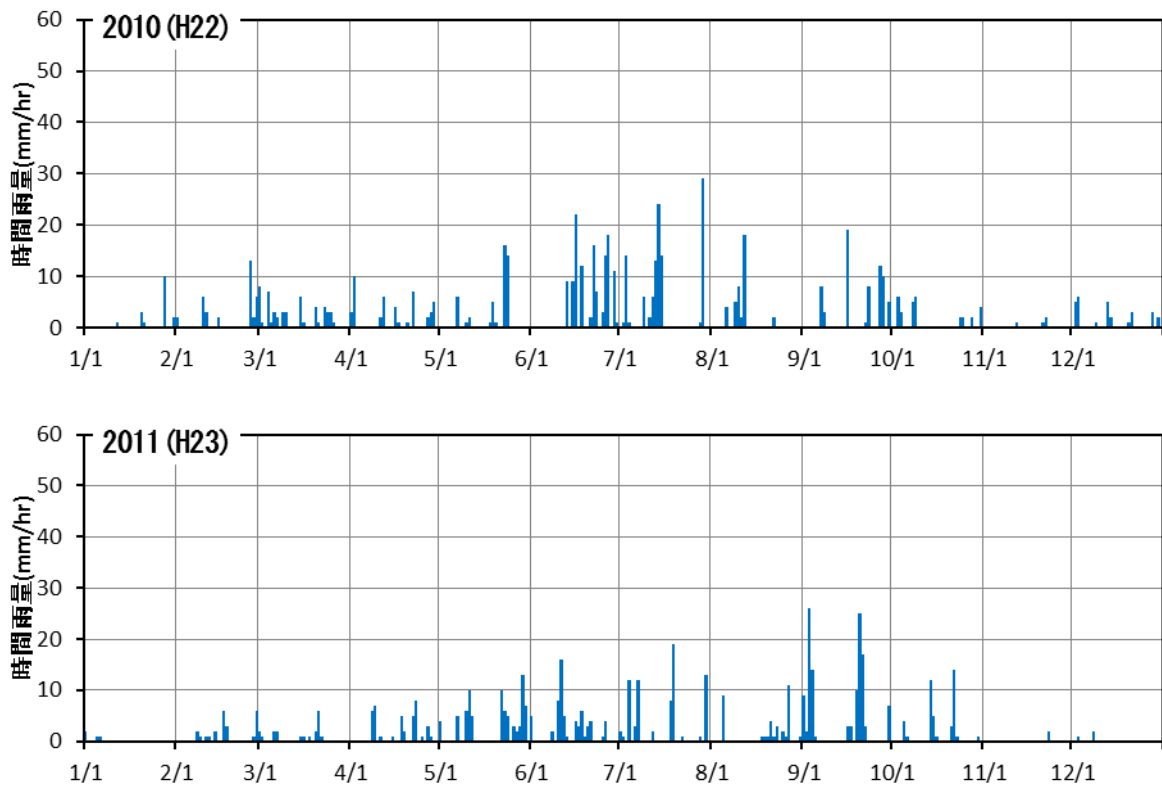


図6. 14 (3) 荒神山雨量観測所の時間雨量(2010(H22)年～2011(H23)年)

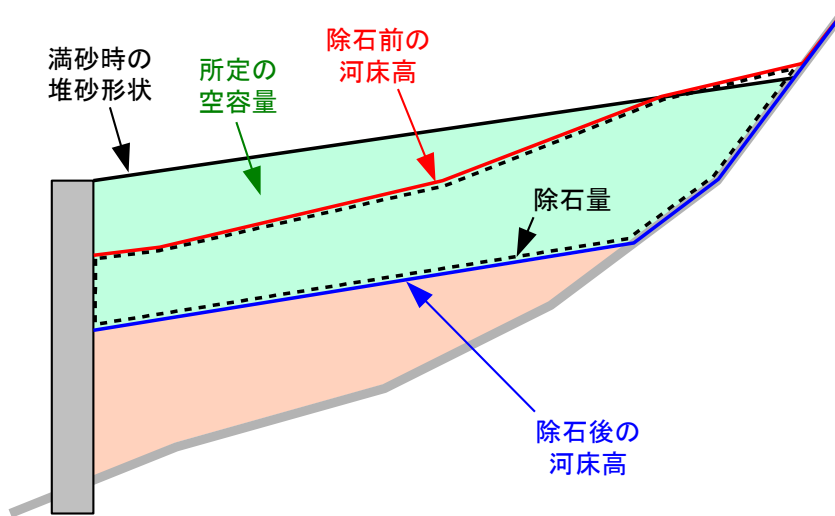


図6. 15 除石による河床高変化の概念図

### 6. 2. 2 計算結果

10年間の降雨を与えた場合の除石量は図6. 16のようになる。

除石量は1年目に大きく、2年目以降は少なくなる。これは、除石実施対象とした砂防堰堤が現況ではほぼ満砂状態であるため、1年目は表6. 6に示した容量を確保するために除石量が大きくなるが、2年目以降は堆砂の進行が小さいため除石量も小さくなるためである。

年平均の除石量は表6. 7のようになり、1年目には空き容量確保のために除石量は大きい、2年目以降の除

石量は小さくなる。住吉川の現況を条件としている Case-5 の場合においても2年目以降の平均除石量は1.1千 m<sup>3</sup> である。平常時の土砂流出が少ない場合には、大規模な出水で堆積した土砂を除去すれば平常時の除石は少なくてすむ。

表6. 7 年平均の除石量

項目	除石量(千m <sup>3</sup> )		
	Case-3	Case-4	Case-5
1年目の除石量	3.6	23.7	62.0
10年間の除石量	5.1	27.4	71.5
10年間の年平均除石量	0.5	2.7	7.1
2年目～10年目の年平均除石量	0.2	0.4	1.1

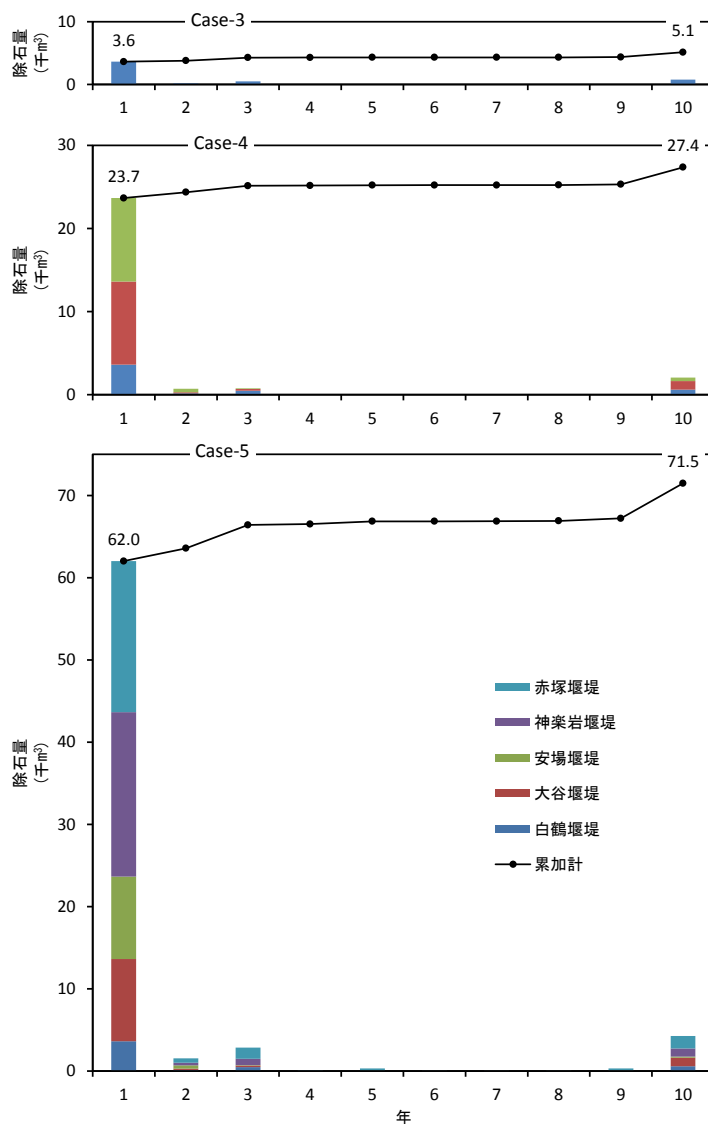


図6. 16 10年間の除石量

### 6. 2. 3 流出土砂量の変化

#### 1) 10年間の流出土砂量の変化

表6. 8に上記6. 2. 1で解析条件とした計画規模降雨発生前の10年間の土砂収支を示す。

10年間で河道へ流出する土砂量(谷部からの流出土砂量)は20. 9千 m<sup>3</sup>と算出された。無施設時(Case-1)では、砂防計画基準点上流の河道の河床変動量がマイナス(侵食)になり、58. 9千 m<sup>3</sup>の土砂が砂防計画基準点から下流へ流出すると算出された。現況施設状況で除石しないとした条件(Case-2)では、河道の侵食がなくなり供給土砂のすべてが砂防計画基準点上流に堆積して計画基準点から下流への流出土砂量は0となる。現況施設状況で除石を実施するとした条件(Case-3~5)の場合は、砂防計画基準点上流河道の河床変動量がマイナスとなり侵食されるが砂防計画基準点から下流への流出土砂量は0となる。

表6. 8 計画規模降雨発生前の10年間の土砂収支

項目		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
施設状況		無施設	現況施設			
除石条件： 確保する 空容量 (千m <sup>3</sup> )	白鶴堰堤	-	-	3.6	3.6	3.6
	大谷堰堤	-	-	-	10.0	10.0
	安場堰堤	-	-	-	10.0	10.0
	神楽岩堰堤	-	-	-	-	20.0
	赤塚堰堤	-	-	-	-	20.0
斜面部からの流出土砂量		21.8	21.8	21.8	21.8	21.8
谷部における土砂量変化		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
谷部からの流出土砂量		20.9	20.9	20.9	20.9	20.9
砂防計画基準点上流河道の河床変動量		-38.0	20.9	15.8	-6.5	-50.6
除石量				5.1	27.4	71.5
砂防計画基準点からの流出土砂量		58.9	0.0	0.0	0.0	0.0

単位：千m<sup>3</sup>

2) 計画規模出水時の流出土砂量の変化

10年間の降雨を経たあとの計画規模降雨時の土砂収支を表6. 9に、砂防計画基準点から下流への流出土砂量を図6. 17に示す。

無施設時(Case-1)の砂防計画基準点から下流への流出土砂量は249. 9千 $m^3$ と算出された。現況施設状況で除石をしないとした条件(Case-2)ではこれが110. 7千 $m^3$ と算出された。現況施設状況で除石を実施するとした条件(Case-3~5)の場合は、確保した空き容量と同程度に流出土砂量が減少すると算出された。

表6. 9 10年間の降雨を経た後の計画規模降雨時の土砂収支

項目		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
施設状況		無施設	現況施設			
除石条件： 確保する 空容量 (千 $m^3$ )	白鶴堰堤	-	-	3.6	3.6	3.6
	大谷堰堤	-	-	-	10.0	10.0
	安場堰堤	-	-	-	10.0	10.0
	神楽岩堰堤	-	-	-	-	20.0
	赤塚堰堤	-	-	-	-	20.0
	計	-	-	3.6	23.6	63.6
斜面部からの流出土砂量		1018.3	1018.3	1018.3	1018.3	1018.3
谷部における土砂量変化		285.5	285.5	285.5	285.5	285.5
谷部からの流出土砂量		732.8	732.8	732.8	732.8	732.8
砂防計画基準点上流河道の河床変動量		482.8	622.1	626.6	646.6	677.7
砂防計画基準点からの流出土砂量		249.9	110.7	106.2	86.1	55.0
Case-2との差				-4.5	-24.6	-55.7

単位：千 $m^3$

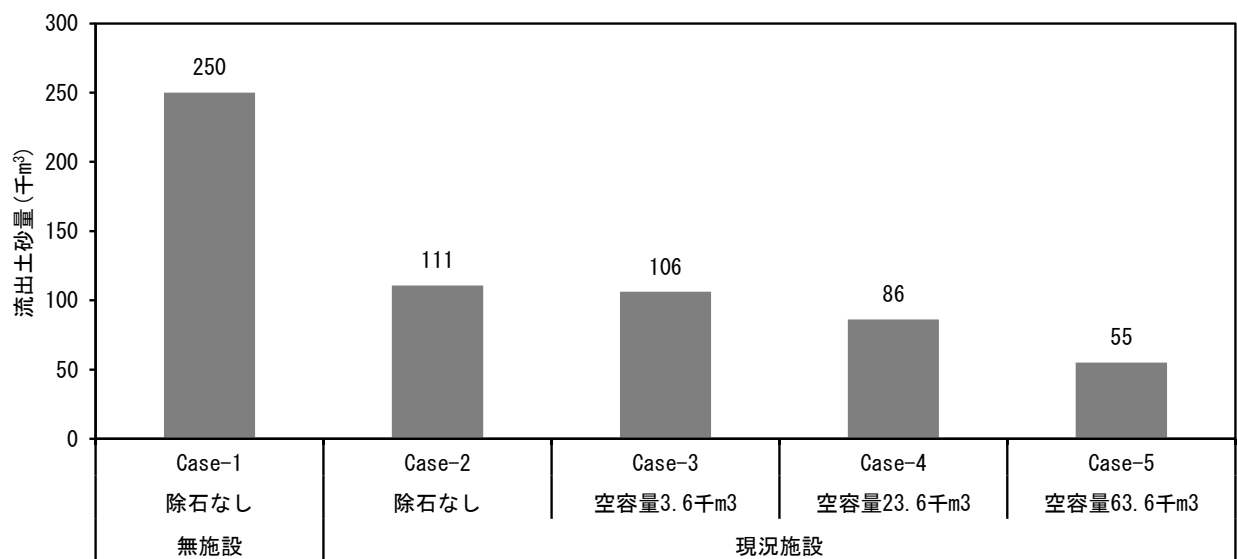


図6. 17 10年間の降雨を経た後の計画規模降雨時の流出土砂量の計算結果

### 6. 2. 4 河床高の変化

10年間の降雨を経たあとの計画規模降雨を想定して、表6. 6に示す施設状況と除石条件(Case-1~5)について、10年後の河床高、最大河床高および最大水位の縦断図を図6. 18~27に示す。図6. 19では、砂防計画基準点下流で河口から0. 0k~0. 45k および1. 2k~2. 5kにおいて最大水位が連続的に堤防高を越える範囲が生じる。この範囲の上流部である2. 50k、1. 85k地点と下流部である0. 45k、0. 25k 地点について、河床高の時系列変化を図6. 28~6. 29に示す。図6. 18~6. 27では、除石した場合の10年後の河床の空き容量が確保された部分に計画規模降雨時に土砂が堆積し、下流河道の河床上昇が減少している。除石量の増加に応じて下流河道の河床上昇が解消され、最大水位が堤防高を越える箇所が少なくなる。特に図6. 27(Case-5、現況施設、空き容量63. 6千 m<sup>3</sup> 確保)では、河口付近を除くと最大水位が堤防高を越える箇所はほぼ解消されており、現況施設状況において、除石により砂防堰堤の空き容量を確保することは下流の河床上昇を抑制する効果が大い。

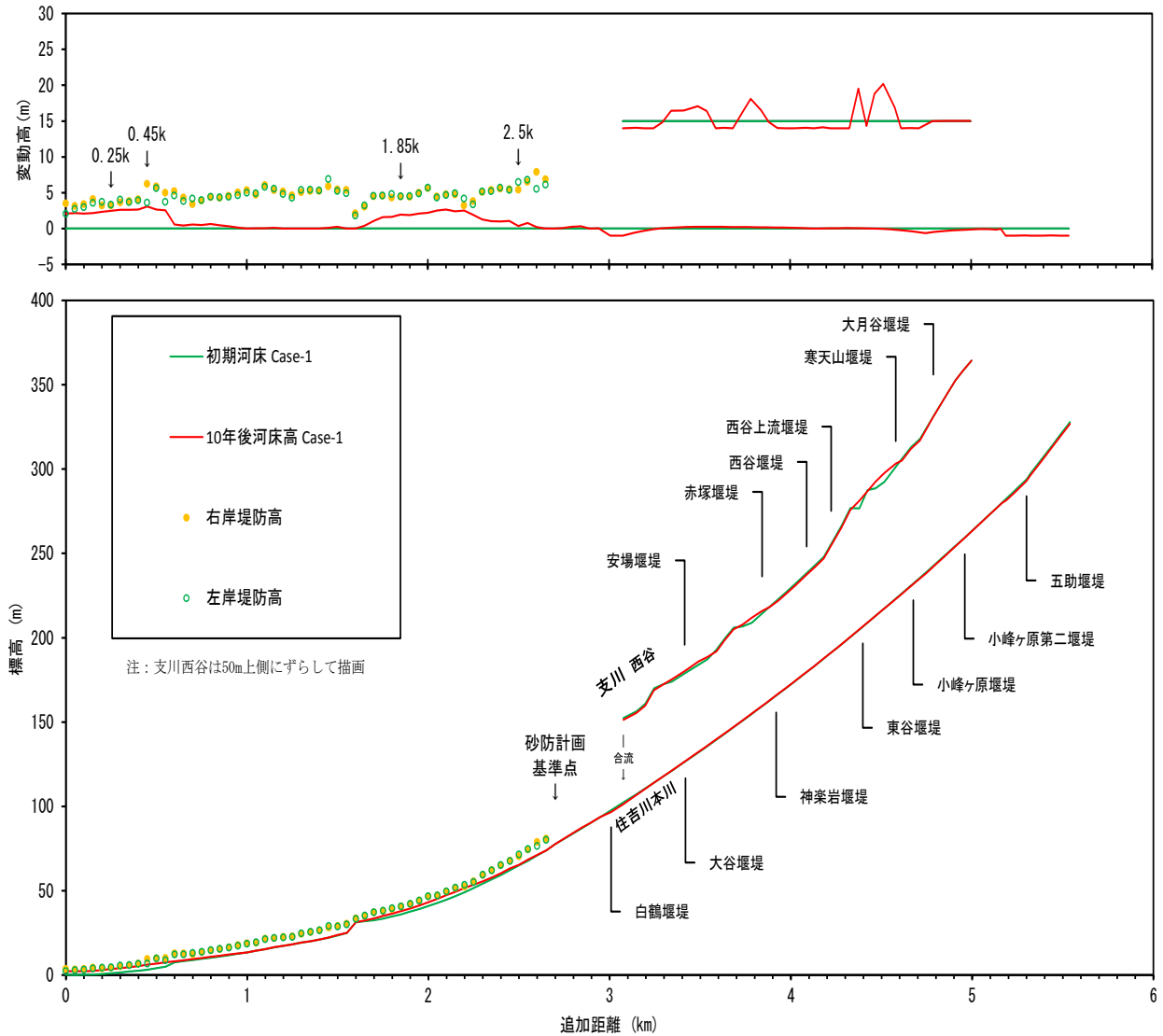


図6. 18 10年後の河床高変化の縦断図(Case-1 無施設時)



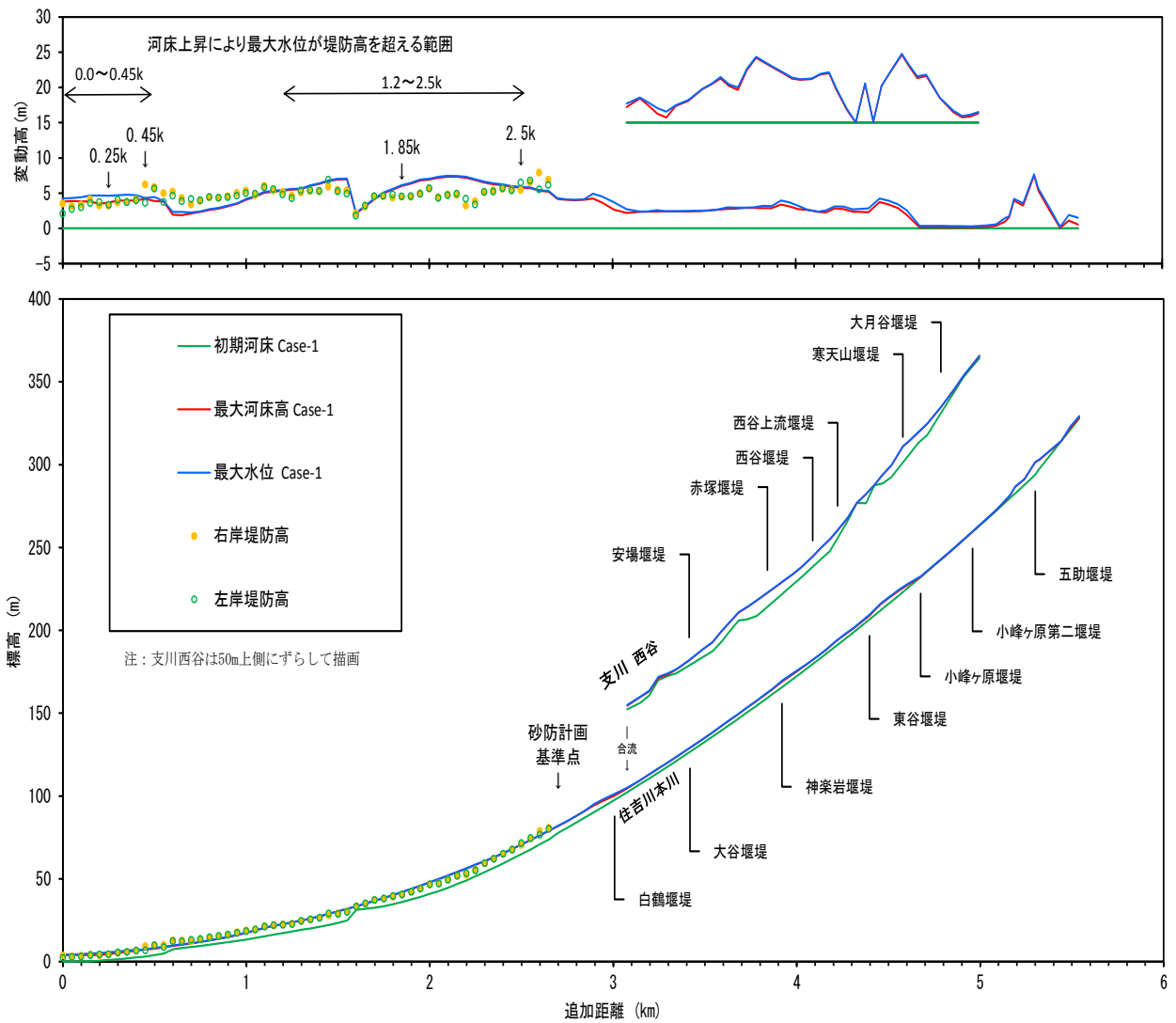


図6.19 計画規模降雨時の最大河床高および最大水位の計算結果縦断面図(Case-1 無施設時)

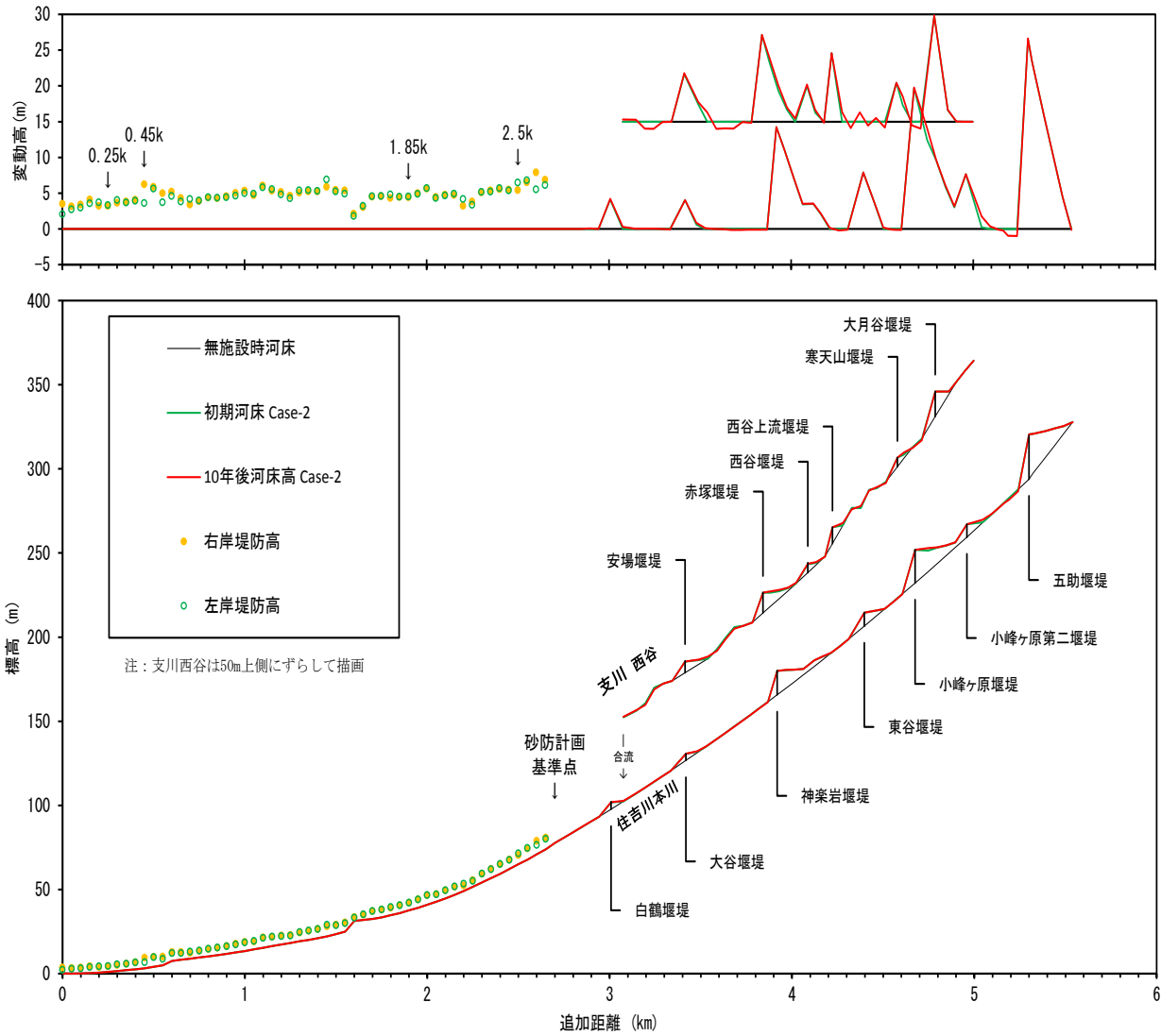


図6. 20 10年後の河床高変化の縦断図(Case-2 現況施設 除石しない)

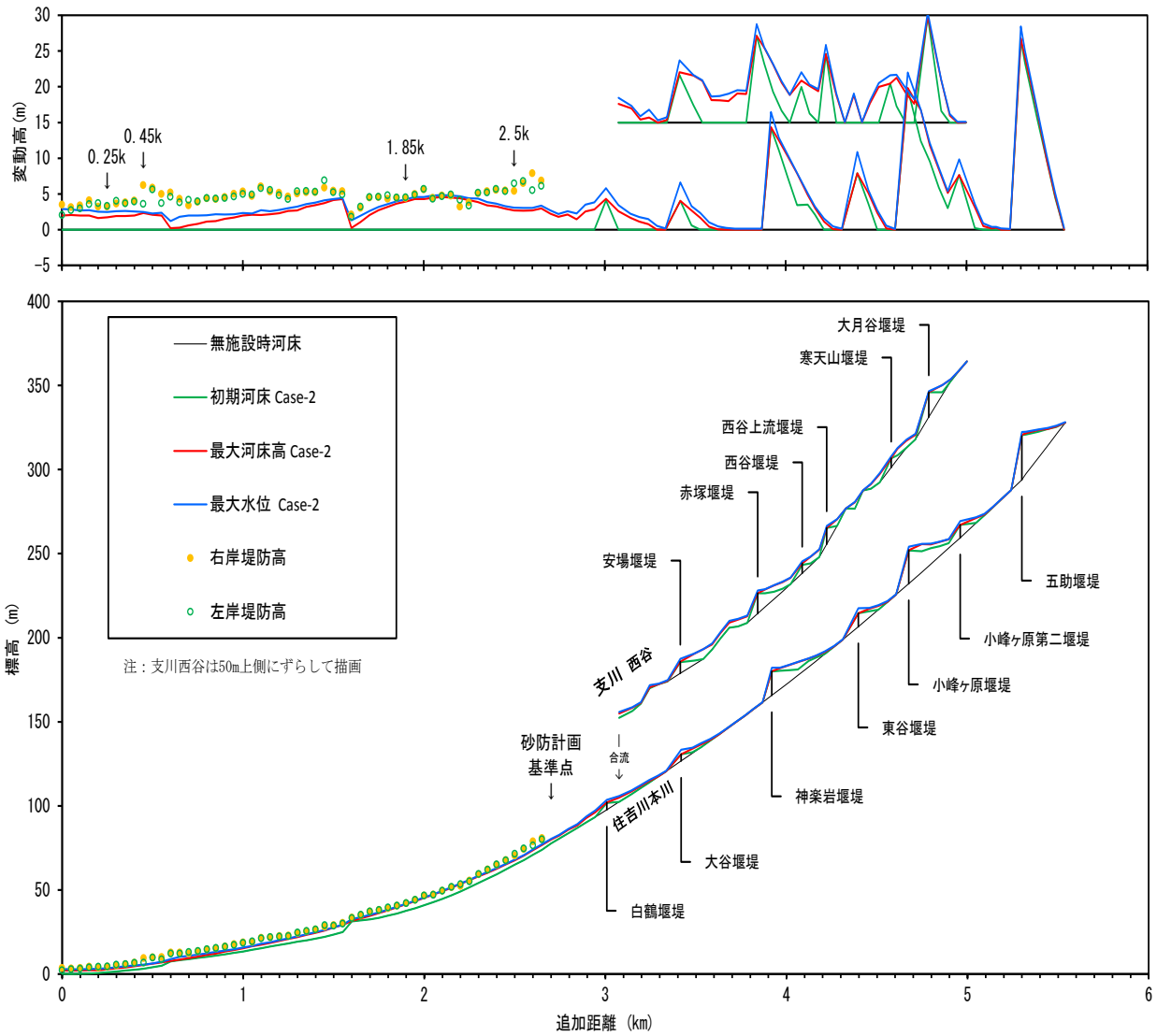


図6.21 計画規模降雨時の最大河床高および最大水位の縦断図(Case-2 現況施設 除石しない)

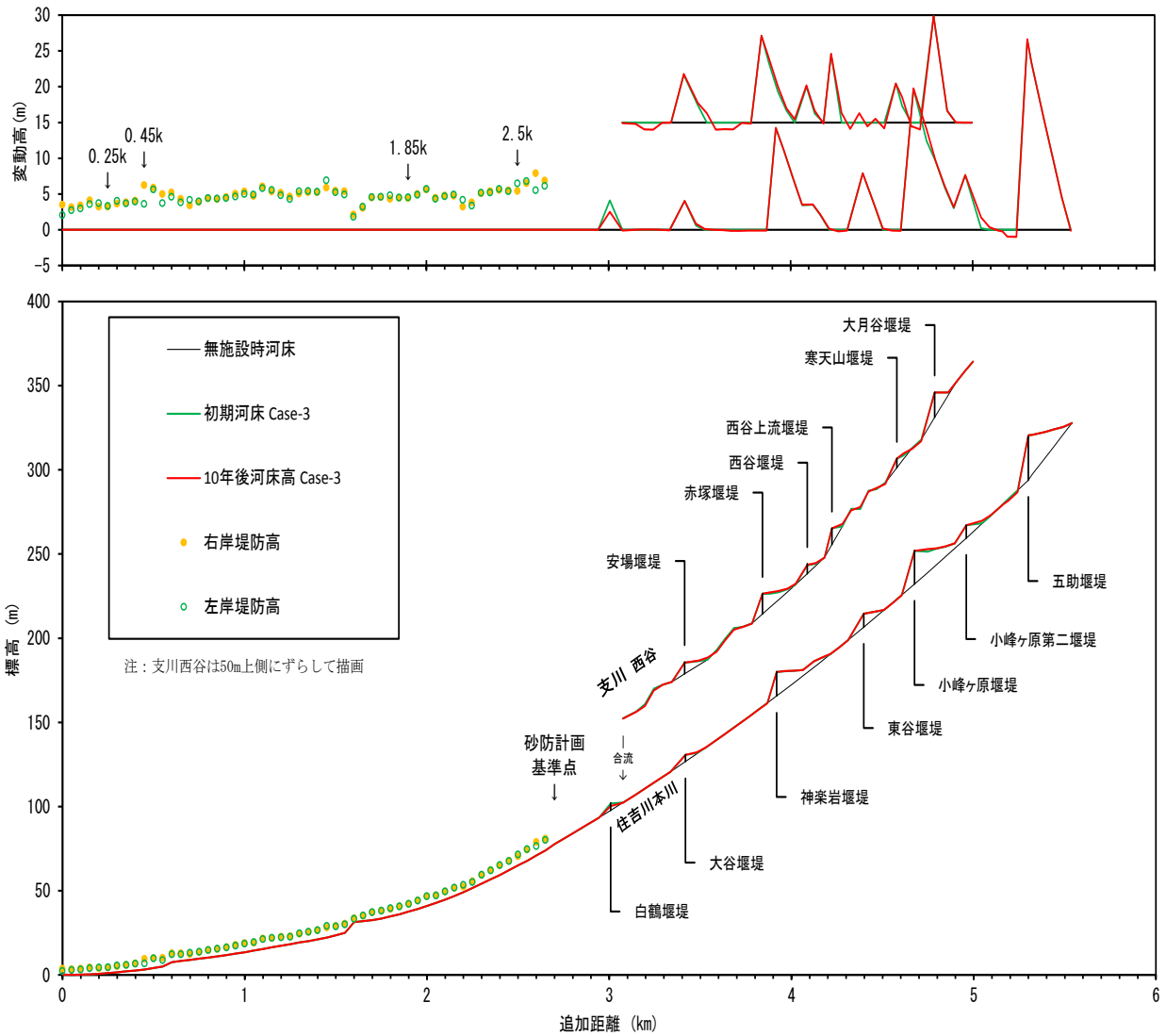


図6.22 10年後の河床高の変化の縦断面図(Case-3 現況施設 除石条件:空容量 $3.6 \text{ 千 m}^3$ 確保)

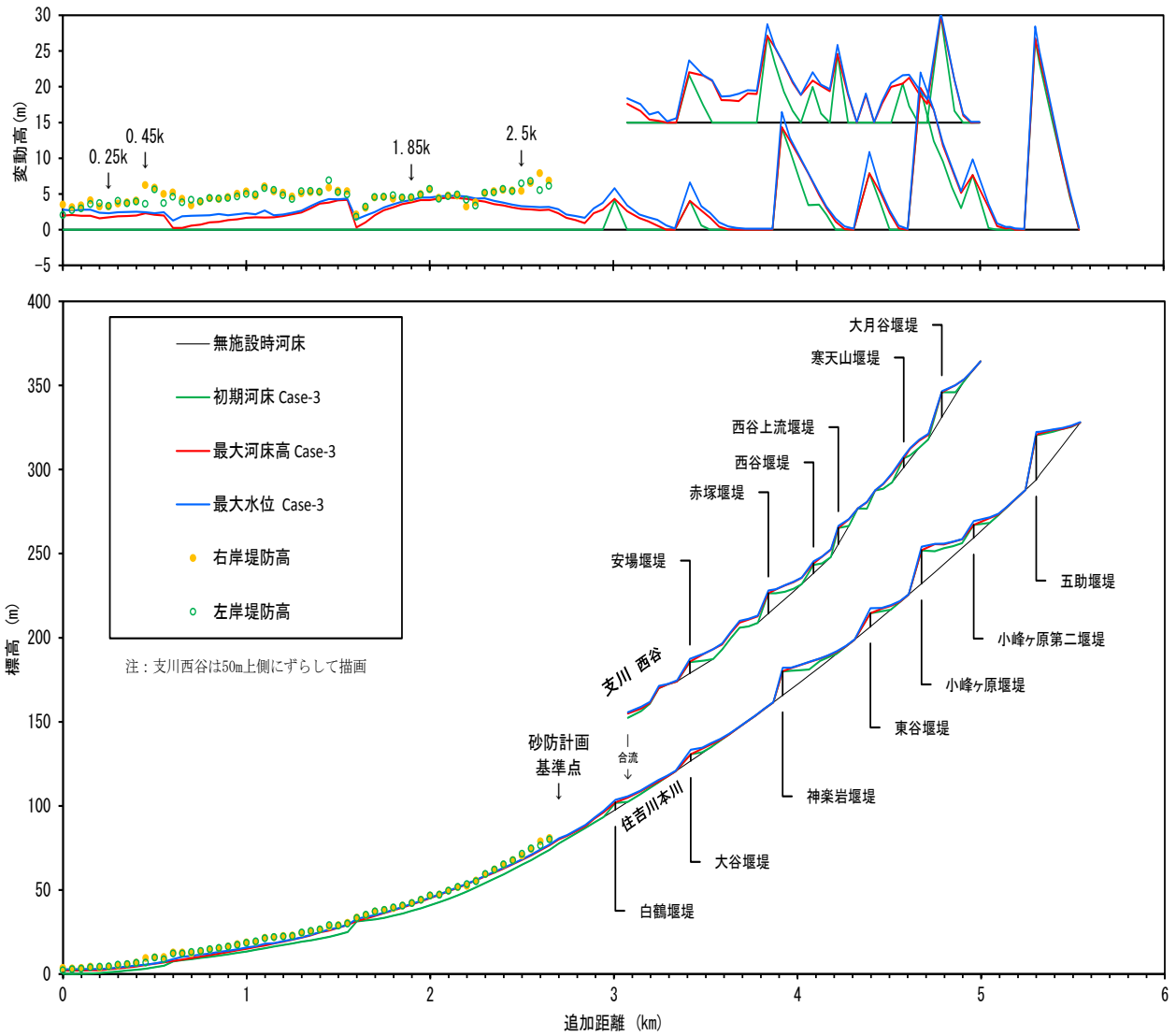


図6.23 計画規模降雨時の最大河床高および最大水位の縦断面図  
 (Case-3 現況施設 除石条件:空容量 3.6 千 m<sup>3</sup>確保)

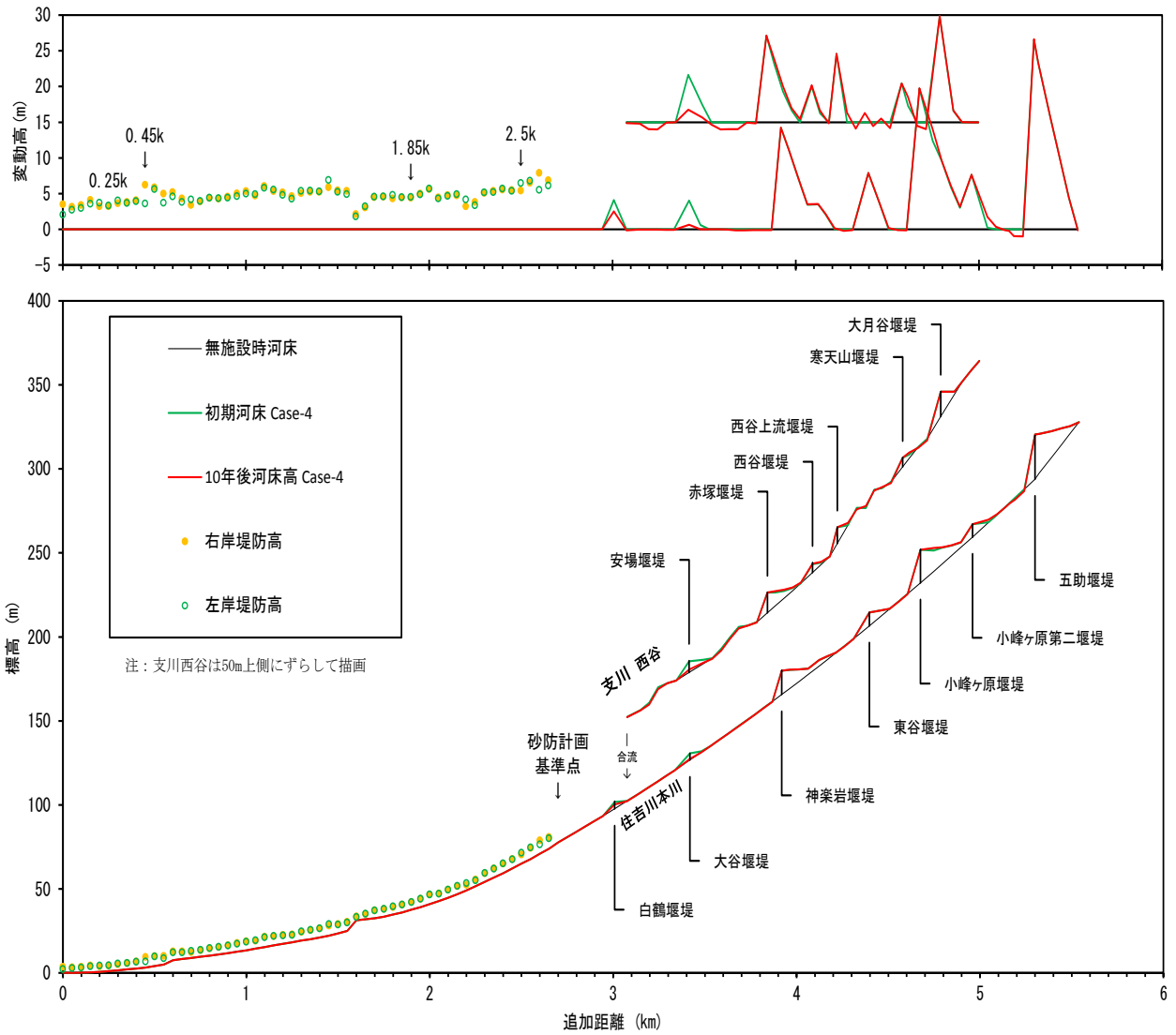


図6. 24 10年後の河床高の変化の縦断面図(Case-4 現況施設 除石条件:空容量 23.6 千 m<sup>3</sup>確保)

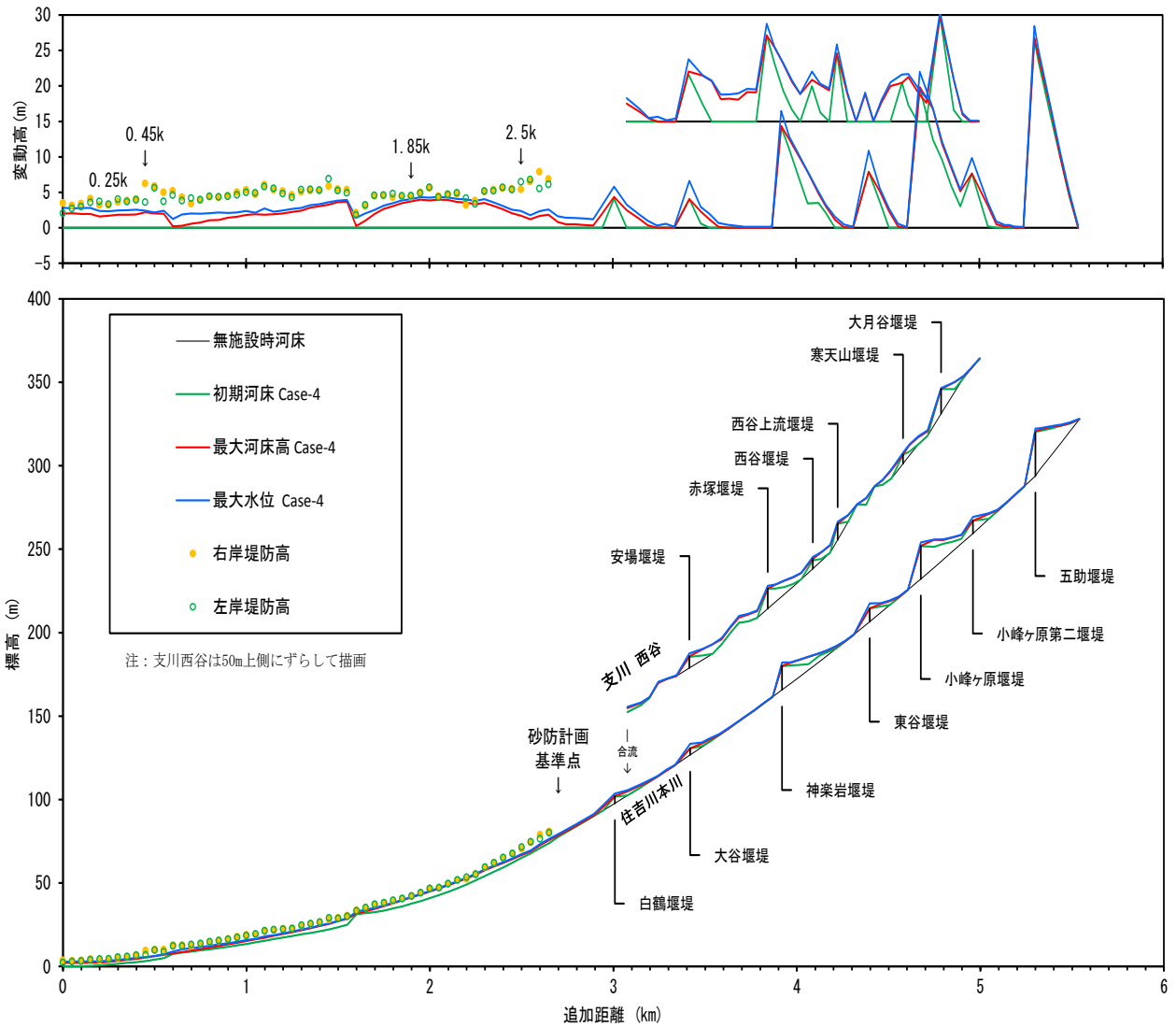


図6. 25 計画規模降雨時の最大河床高および最大水位の縦断図  
 (Case-4 現況施設 除石条件:空容量 23.6 千 m<sup>3</sup>確保)

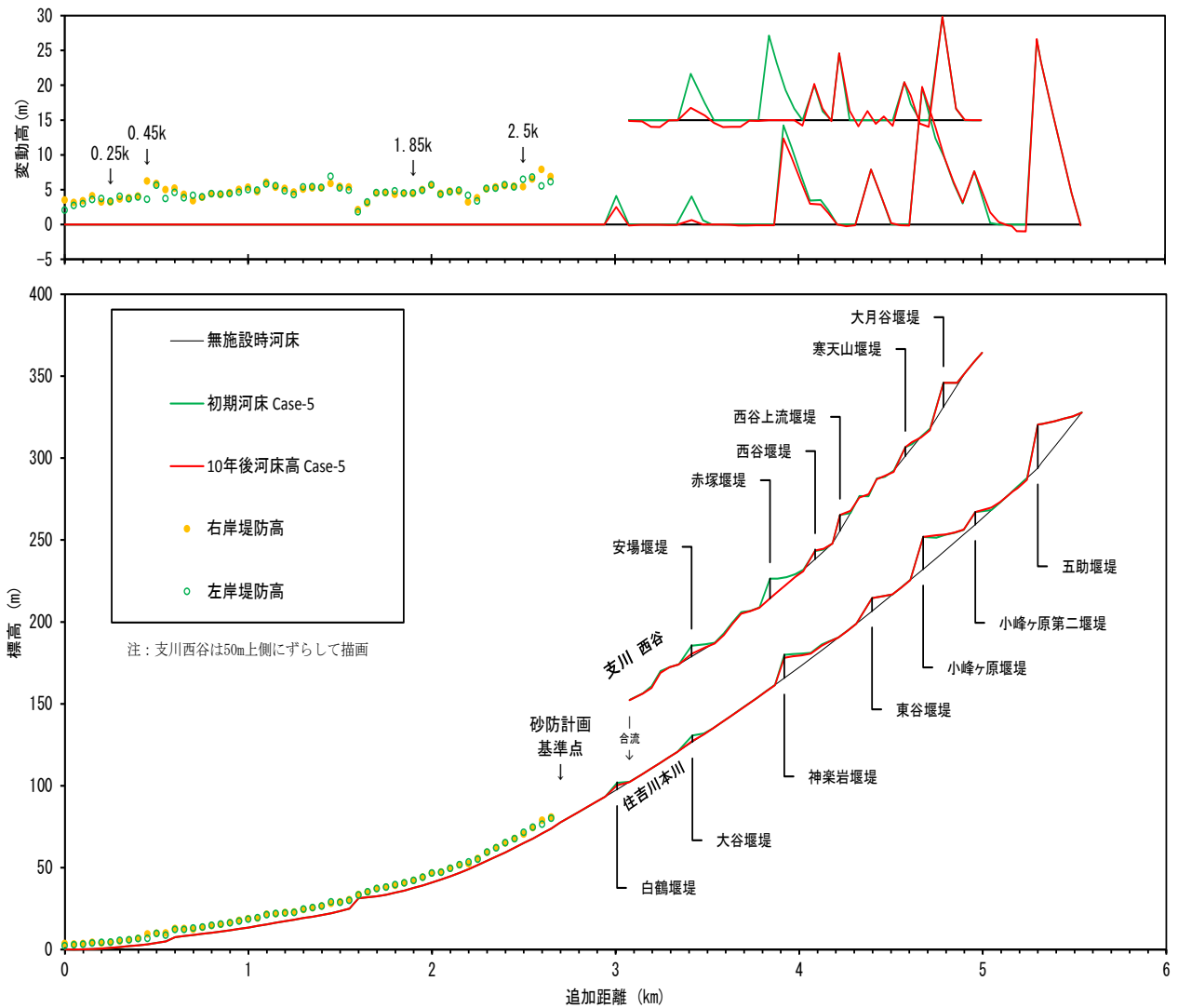


図6. 26 10年後の河床高の変化の縦断図(Case-5 現況施設 除石条件:空容量 63.6 千 m<sup>3</sup> 確保)



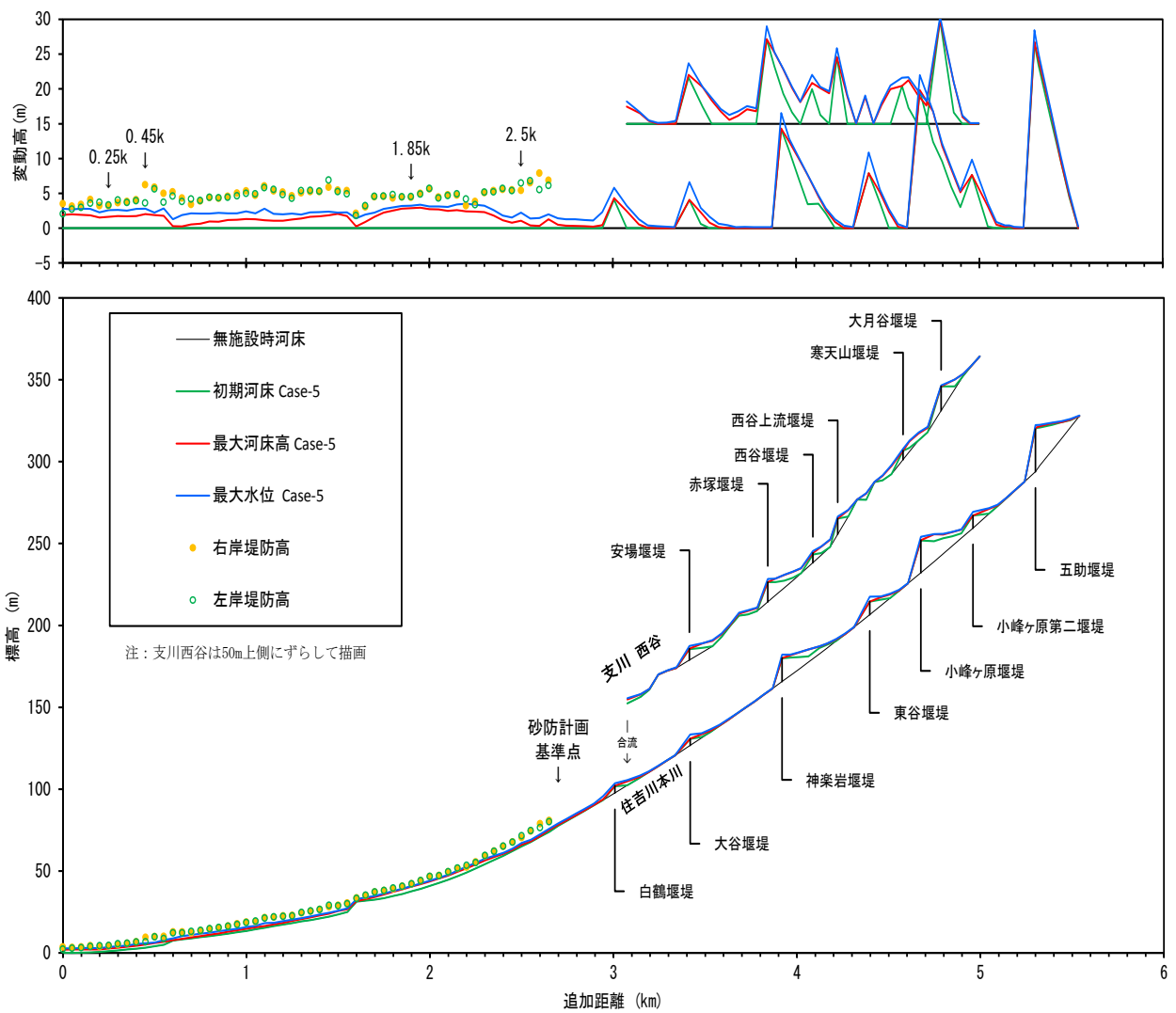


図6. 27 計画規模降雨時の最大河床高および最大水位の縦断図  
 (Case-5 現況施設 除石条件:空容量 63.6 千 m<sup>3</sup>確保)

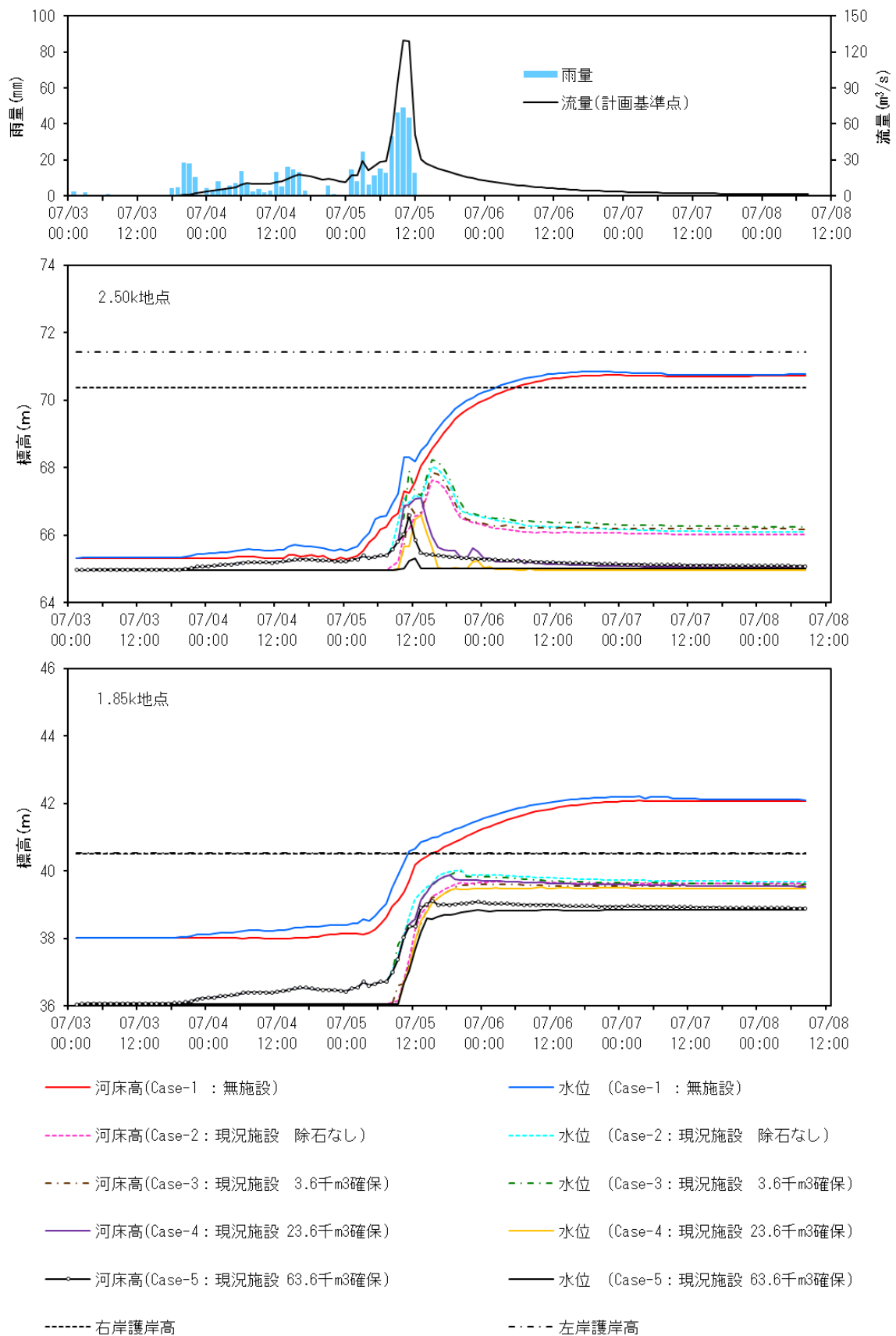


図6. 28 河床高と水位の時系列変化(2.5k 地点および 1.85k 地点)



### 6.3 まとめ

第5章において検討・構築した流域管理システム(WMS)を用いて、計画規模降雨時の砂防堰堤による流出土砂量の低減効果の検討と10年間の平常時の降雨を経て計画規模降雨が発生すると想定した場合の除石による流出土砂量の低減効果の検討を行った。

検討では、六甲山系住吉川流域において、砂防計画基準点から下流に流出することが想定されている流出土砂量を低減させるには砂防計画基準点付近の上流に空き容量が確保された砂防堰堤があること、砂防堰堤の整備が進展した現在の施設配置状況においては砂防堰堤の除石を行うだけでも流出土砂量を低減させていくことが可能であること、除石は砂防計画基準点付近の既設堰堤で実施することが有効である、という結果を得た。流域管理システム(WMS)の活用が砂防施設の配置の有効性の判断(砂防施設配置計画)や山地流域の土砂管理計画の検討に定量的に寄与できることを示した。

### 引用・参考文献

- 国土交通省国土技術政策総合研究所資料第364号(2007):砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編解説)
- 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
- 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武蔵由育・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・武蔵由育・鈴木伴征・水山高久(2013):流域管理システムの開発-流域管理システムを用いた砂防施設の流出土砂量低減効果の評価事例-,平成25年度砂防学会研究発表会概要集,p.A140-A141

## 第7章 山地流域の管理手法について

本章では、治山治水の意義、砂防事業の意義、および砂防施設の配置・機能に対する社会の要請が変化してきたことと、砂防事業がこれに対応してきた手法を示す。さらに、近年の山地流域の管理をめぐる社会の動きを整理し、これからの山地流域の管理のあり方について述べる。

### 7.1 治山治水の意義の捉え方

現在は治山治水の意義は、防災視点のみからの土砂災害対策、洪水氾濫防御と解されることが一般的であり、流域の水・土砂動態を制御するための施設を流域内に配置することが流域管理として認識されている。しかし、明治時代に制定された河川法(1896(M29)年)、砂防法(1896(M29)年)、森林法(1897(M30)年)の「治水三法」は、流域の乱開発を規制することを目的としたものであった(新谷 2003)。砂防法の原型となった「淀川水源砂防法」は、植生のはぎ取り・焼失と開墾を禁止し、開発によって山間地から土砂が流出することを予防することを目的としたものであった。この趣旨は現在も砂防法第2条に記されている。また、保安林(森林法)は、生産力の向上のために流域低湿地の水田化(干拓)を行うための渇水対策(渇水時の低水確保)を主体としていた(新谷 2003)。森林に洪水氾濫防御機能があるなどの森林万能論が展開されるようになったのは第二次世界大戦後に造林事業が国家政策の重要事項となってからである(新谷 2003)。

河川、砂防、森林の行政は、1929(S4)年民部省、1931(S6)年内務省所管となった。河川、砂防行政はその後現在の国土交通省所管となり、森林行政は現在の林野庁所管となった。

### 7.2 砂防事業の意義の捉え方

国土の7割が急峻な山地を占め、台風が常襲することなどから、日本では山地からの土砂流出によって生じる災害が発生してきた。土砂災害を生じさせる気象要因は豪雨、融雪、地震、火山噴火と様々である。また、土砂災害の発生形態も、土砂流出による河床上昇による沖積平野での広範囲に及ぶ河川氾濫、山麓を局所的に被災させる土石流・がけ崩れ・地すべり、天然ダムの決壊、地震動による斜面崩壊と様々である。

1960年代頃までの砂防事業は、開発と気象要因によってすでに荒廃していた流域で実施されていた。荒廃流域の復旧は、その流域に暮らす者でなくても誰にもその必要性・重要性は理解されやすい。しかし、荒廃流域が復旧し目にみえて植生に覆われるようになり、また、下流の河床が安定し沖積平野の利用が活発になると、土砂流出による河川氾濫は流域の人々には身近なものではなくなった。山麓で局所的に発生する土砂災害も、毎年どこかの地域で発生しているが、同じ場所で繰り返し発生する確率は低い。被災地も含めて人々が土砂災害が発生する危険性への認識を保ち続けること、その予防対策について同じレベルで理解することは難しくなっている。砂防の役割が防災の視点からのみ強調されて認識されることは、国土保全・流域保全における砂防の役割が人々に認識されにくくなり、人口の大小・有無でのみ砂防の意義が議論されてしまうおそれがある。

流域には、水・土砂動態がコントロールされ、生物多様性の保全など多様な機能が維持されることが望まれているのであるから、その一翼を担っている砂防は、流域の社会環境を踏まえて、山地流域の管理における意義・

役割を再度整理する必要がある。

### 7.3 砂防施設の配置と機能の捉え方

砂防施設は、土砂生産源となる荒廃地や崩壊地、土砂の流出経路となる沢筋を中心に配置される。かつては農林業を主体とする中山間地域における土砂流出防止が主体であった砂防事業は、高度経済成長期の都市近郊山麓の住宅地開発や、火山山麓の観光地開発等に伴い、直接的に住宅市街地や観光市街地を土砂災害から保全することが要請されるようになった。1990年代になると、企業・官公庁では週休2日制が定着するようになり、レジャー活動が一般化してくるようになると、山間地の砂防施設は溪流景観の一部としても認識されるようになる。

これに呼応して、砂防施設の配置と機能についても変化が求められた。土砂流出防止が主体であった頃には、土砂生産源である不安定斜面には、崩壊防止や土砂の流動化のおそれを低減するために山腹工事(山腹基礎工や緑化)を行い、山地河床には、溪床に堆積した土砂の二次移動を低減するために溪床勾配を緩和するよう小規模な砂防堰堤や床固工群を階段式に設置する工事を主体としてきた。さらに下流に流出する土砂に対しては、氾濫から市街地を直接的に保全するために、谷出口に比較的規模の大きな砂防堰堤を設置して堆砂空間を確保した。砂防事業に対し、谷出口から上流域での防災機能が最も重視されるようになると、谷出口における砂防堰堤による堆砂空間の確保を優先して実施した。

砂防施設が溪流環境の一部として認識されるようになると、溪流の縦断を分断しないよう魚道の設置や砂防堰堤のスリット化等を行ってきた。しかし、自然環境に配慮した手法はこれまで流域単位でその効果の評価を得ることは難しかった。それは、そもそも流域内での水・土砂動態を把握できていないことに起因しているが、この点については、流域管理システム(WMS)を用いた計算によりスリット化等による土砂移動への影響を定量的に判断できることで解消される。

### 7.4 山地流域の管理をめぐる近年の社会の動き

1995(H7)年1月に発生した阪神・淡路大震災では、初期の救助活動や長期の避難所生活・仮設住宅での生活を近所どうし、市民どうしの自主的な助け合いが支えた。行政に任せるだけでなく、また、行政の隙間を埋めようというこの活動の精神は後に被災地および全国で組織的なボランティア活動に発展した。そのひとつに、被災地では六甲山の緑の保全に関わる活動がある。活動の内容は様々で、組織も多様である。活動の内容には、林内遊歩道の清掃・ゴミ拾いといった特に技術を必要とせず誰でも参加できるものから、育苗・植樹・間伐といったような知識・技術が必要なものまでである。組織には、自治会・町内会という地域性の高いものから、同じ意志を持つ市民の集まり、企業のCSR活動の一環としているものなどであり、従来土地所有者と行政が行ってきっていた山地の管理は多様化してきている。六甲山では、たとえば、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所と協定などを締結して緑の保全活動を行っているボランティア団体は、市民団体23、企業20に及んでいる。これらの活動が継続して行われている背景には、組織構成員の高い意識はもとより、行政の山地保全・緑地保全に係わる施策があることと、官民による活動資金等の支援制度による。このことは、震災を機に、流域管理に行政・企業・住民が協働することが必要であることが改めて認識されたということでもある。また、継続した活動のためには、実施した活

動の成果(効果)を構成員のそれぞれが実感できることが必要であるといわれている。

兵庫県及び神戸市は、1995(H7)年6月に震災復興計画を策定し公表した。復興の柱のひとつに山地・市街地の緑地の保全がある。緑地保全とは、延焼防止や一時的な避難場所となるような緩衝地帯を形成しておくという意味と、地域のシンボルである六甲山の環境保全を意味している。そして、これを行政・企業・住民が協働で行う仕組みが盛り込まれている。市街地の中や市街地縁辺に緩衝地帯を設置する考え方は、特に六甲山麓では都市進展の過程で土砂災害などが多発していた(第2章)ことから、以前から存在していた考え方ではあったが、そのための行動はこれまでは行政主体で行っていた。しかし、企業・住民との協働という考え方でそのあり方が大きく変化した。これまでは福祉分野に多かったボランティア活動が、まちづくりや流域管理の分野にも広がった。そして、たとえば植樹を行った場合に、その後植栽木の生長状況の観測を行うなど、それぞれの組織が活動の成果と考えることを自ら調査して活動意欲を高めているケースもある。

一般に、山地では、市街地同様に多くの個人・企業の所有地があるものの、市街地の都市計画のように用途を定めた法制度がない。砂防法、森林法、自然公園法など個別の法律による利用規制はなされているが、流域管理の視点から見ると体系的でない。土地所有者、土地利用者、流域の住民、行政がよりよい流域管理に向けて協働する仕組みを法整備を含めて今後さらに充実させていく必要がある。

法整備によって行政側の体制が整い、かつ、住民の意識と行動に(良い)変化があらわれている事例を7. 4. 1に挙げる。

#### 7. 4. 1 「土砂法」による土砂災害警戒区域の設定と避難率の向上

「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(2000(H12)年 5 月 8 日法律第 57 号)(以降、「土砂法」という。)の施行により、都道府県知事によって土砂災害警戒区域と土砂災害特別警戒区域(通称イエローゾーンとレッドゾーン)が指定されてきている(第6条、第8条)。これは、急傾斜地の崩壊、土石流、地すべりが発生するおそれがある土地の区域を明らかにして、警戒避難体制の整備を行い、著しい土砂災害が発生するおそれがある土地の区域においては一定の開発行為を制限するほか、建築物の構造を規制するものである。警戒区域の指定があったときには、当該市町村長は市町村防災計画において当該警戒区域ごとに警戒避難体制の整備等を行う(第7条)。この法律では、土砂災害の防止のための施策を実施する砂防部局、市街地の開発行為や建築物の構造規制を行う都市計画部局等とが安全なまちづくりという点で連携している。

水野ら(2011)、国土技術政策総合研究所(2012)は、豪雨時に避難勧告あるいは避難指示が出された事例において、土砂災害警戒区域に指定されている地域とそうでない地域とで避難率に違いがあるかどうかを分析した。この結果、土砂災害警戒区域に指定されている地域のほうが避難率が高いことを示した。これは、土砂災害警戒区域の指定にあたっては、都道府県担当者から当該市町村及び住民に事前に十分な説明がなされることから、市町村の防災担当者も住民も豪雨時の対応について十分に認識できている(水野ら2011, 国総研 2012)ことが考えられている。

## 7.5 山地流域の管理における砂防の役割

山地流域に求められている機能は、六甲山の場合は次のようである。

- 土砂災害の防止
- 良好な都市環境、風致景観、生態系および種の多様性の保全・育成
- 都市のスプロール化の防止
- 健全なレクリエーションの場の提供

これは、防災施設の配置とその維持管理、適切な土地利用への誘導、自然環境の保全、といった流域の管理によって達成されるものである。これらの機能は、震災後に策定された砂防事業「六甲山系グリーンベルト」の施策目標であり、兵庫県および神戸市の震災復興計画にも位置づけられている。どの機能の達成・維持も、主体となる事業者の業務遂行はもとより、行政、企業、住民が協働していかなければ適切な流域管理は行えない(7.4)。

砂防事業者の主體的な役割が求められている「土砂災害の防止」については、流域管理という視点から砂防法第2条に基づく砂防指定地の指定とその土地での行為の規制、砂防施設\*の設置とその維持管理がある。砂防指定地では、治水上砂防のため制限されている行為がある。砂防指定地の管理者は各都道府県知事であり、制限される行為の内容は都道府県ごとに定められているが、土地の裸地化の防止のため樹木の皆伐や土地の改変及び土砂採取の禁止・制限や、砂防施設\*の機能維持のため砂防施設\*の占用を制限している場合が多い。砂防施設の設置は7.3に示した。治水砂防上何ら問題のない行為、むしろその行為が治水砂防上有益である場合には、その活動を砂防事業者や砂防指定地管理者が支援したり、事業者と行為者とが協働することで効果が増すことも考えられる。

砂防事業者・砂防指定地管理者は、砂防施設の配置・管理をより効果的に行うため、また、その効果を確認するために、流砂観測等により流域内の状況をよく観察することと、流域管理システム(WMS)のような仕組みで事業の効果を定量的に把握する必要がある。そして、流砂観測データの内容と事業効果が流域管理に関わる人々・組織間で共有されるならばより有効な流域管理の行動につながる。

すなわち、砂防事業者・砂防指定地管理者は流砂観測を行う。それを流域管理の関係者間で共有し、流域管理に関わる組織等が共通の管理方針のもと活動できる仕組み・制度をつくる。流砂観測データは流域管理のための基礎データであるので、そのデータを取得する砂防事業者・砂防指定地管理者は山地流域の管理の実施者であるとともに山地流域管理のコーディネータとなることが役割と考える。

\*砂防法では砂防堰堤等すべての砂防施設について「砂防設備」という呼称を用いるが、本研究での呼称の統一を図るため、ここでは「砂防施設」とした。



## 引用・参考文献

新谷 融(2003):流域自然緑地空間の保全技術としての治山・砂防、会計検査研究,No27,pp9-23

神戸市(1995):神戸市復興計画

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所 HP:<http://www.kkr.mlit.go.jp/rokko/>

水野正樹・富田陽子・桂真也・小山内信智・花田良太・安田武道(2012):災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析、砂防学会誌,,Vol.65,No3,pp29-34

日本の砂防総論(1):(社団法人)砂防学会、山海堂、1991年3月、pp.67-77

日本砂防史:(社団法人)全国治水砂防協会、石崎書店、昭和56年6月、pp17-126

岡本敦・富田陽子・水野正樹・林真一郎・西本晴男・石井靖雄・千葉伸一(2012):土砂災害警戒避難に関するデータ解析共同研究、国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書,国総研資料第 682 号、2012.3

砂防便覧(平成20年版):(社団法人)全国治水砂防協会、平成20年3月、pp50-104

## 第8章 結論

本研究では、流砂観測による水・土砂動態の定量的な把握が求められている背景と現状、および流砂観測手法の具体例を第1章、第2章で整理し、その観測データ(第3章、第4章)を用いて、降雨条件により斜面→谷部→河道へと水・土砂が流出する過程、流出した水を流量条件、流出土砂を供給土砂条件として砂防堰堤の諸元も組み込んで河床変動計算を行うモデルを第5章において「流域管理システム(WMS)」として構築した。特に流出解析においては、山地流域における土砂移動を追跡するため、土石流の発生・非発生を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とし、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モデルとした。構築したモデルを用いて、第6章において、六甲山系住吉川流域を対象に、計画規模降雨時の砂防堰堤の効果の検討、10年間の平常時の降雨を経て計画規模降雨が発生すると想定した場合の砂防堰堤の除石による効果について検討した。山地流域での水・土砂の移動を定量的に評価する本システム(WMS)は、砂防施設の種類と規模、配置の選定といった砂防施設の配置の有効性の判断(施設配置計画)および除石といった施設の維持管理計画を定量的に検討するうえで有益なツールとなり得ることを示した。

また、砂防事業者は、流域として望ましい土砂管理の視点から山地流域の管理に関わる者どうしのコーディネーターの役割を果たす必要があり、そのツールとしても本研究で構築した「流域管理システム(WMS)」が有効に機能することを第7章で提案した。

流域の土砂生産・土砂流出についてはこれまで、流域内のどこでどのくらいの量が生産されどのように流出するのかを想定することができなかつた。このため、砂防施設の設置位置の決定は工事の施工性(地盤や地形が砂防堰堤の設置に有利か否か?また、工事車両の通行が可能かどうか?など)に依る場合が多かつた。本研究による流域管理システム(WMS)は斜面→谷→河道の一連の水・土砂移動を砂防施設の整備状況とあわせて捉えることができる計算システムであり、本システム(WMS)を構成する計算モデルは対象流域の実測値に基づいてパラメータを設定していくので、その流域に最適な砂防施設の配置を検討し、また、設置した砂防施設の効果の評価するのに適している。すなわち、砂防施設を新たに設置する必要がある場合にはこれまでよりも適切に施設の設置位置、種類、規模を設定することが可能になり、既存の砂防施設を除石して流出土砂量を調節する(すなわち、管理)には特に計画基準点付近の施設の除石を計画的に行っていくことが有効であるといったような判断が定量的にできる。また、植樹や清掃などの市民団体等による山地流域での行為は、溪床等の攪乱や地形の改変を伴うことがないので土砂生産を生じさせることはなく、砂防施設の空き容量の確保に有益な砂防指定地の管理と位置づけることができる。毎年実施されている砂防施設や砂防指定地の巡視点検は、流砂観測データに影響を与える事象を把握するという観点からもその必要性・重要性がより明らかになる。

これまでの流砂観測でも明らかのように、同様の地質・地形であっても流砂状況は異なる。また、同じ流域であっても流砂状況は異なる。流砂観測を継続的に行うことが適切な砂防施設の配置や管理につながるといえる。

流砂観測に基づく定量的なデータとその活用(流域管理システム(WMS))は、砂防事業者のみならず山地流

域の管理にかかわるすべての関係者においてそれぞれの役割における目標設定と効果を判断する有効なツールであり、本研究で示した手順は全国の砂防工事が実施されているすべての山地流域での適用が十分に可能である。

## 謝 辞

1995(H7)年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震(M7.2, 最大震度7)は、阪神・淡路地域に当時戦後最大の災害をもたらしました。市街地では建物の倒壊や火災、土砂崩れにより6,000人以上の人々が亡くなり、30万人(最大時)以上の人々が避難生活を余儀なくされました。私は当時、神戸市東灘区に夫と娘(2歳)と暮らしていました。縦横の揺れの大きさと長さ(のちに、揺れの長さは11秒程度だったと知りました。)にそれまでに味わったことのない恐怖を感じました。私の住宅では、電気の仮復旧に約1週間、水道の復旧に約1ヶ月半、ガスの復旧に約2ヶ月半かかりました。周辺の住宅地の被災の程度が激しかったために他の地域よりも復旧に時間を要したとのことでした。東灘区は神戸市の中でも倒壊家屋が多かった地域で、死傷者数は最多でした。夜、娘を抱っこして、線香と花が供えられた以前は住宅地だった場所を歩いて仕事から帰宅していたことを今でも鮮明に思い出します。娘が通っていた私立保育園は幸い被災を免れました。保育園周辺は建物の被災が少なかったこともあり保育園が「避難所」となることもなく、ライフラインは途絶えた状態でしたがいつも通りに子供を夜遅くまで保育し、復旧・復興に奔走する親たちを支援してくれました。私はまた、被災地での生活の不便さに対していろいろな支援を多くの方々からいただきました。被災地において、激変した仕事の内容と生活の中で何とかやってこられたのは多くの方々のご支援のおかげであり、感謝してもしきれません。この気持ちは18年を経過した現在も少しも変わりません。

この地震動により、六甲山系には当初約450カ所の山腹崩壊が発生しました。この崩壊地の存在は、地域にとって震災からの復旧・復興に大きな脅威となりました。余震や降雨時に土砂流出源となっており、以前のような土砂災害を市街地にもたらすのではないかと住民をはじめ誰もが心配したのです。建設省近畿地方建設局河川部と六甲砂防工事事務所は、兵庫県、神戸市とともに、地域と六甲山系の復旧・復興計画の策定と実施に取り組みました。私は、地震発生後から1995(H7)年3月末までは河川部職員として、1995(H7)年4月から1998(H10)年3月末までは六甲砂防工事事務所職員として、この復旧・復興に携わる機会を得ました。復旧・復興の柱のひとつに、早くから「六甲山の防災と緑の保全」が兵庫県、神戸市からは示されていました。この概念は震災を機にはじめて示されたものではなく、神戸市では過去の度重なる土砂災害からの復興において常に柱のひとつになってきていたものでした。近畿地方建設局河川部と六甲砂防工事事務所は、土砂災害が発生しやすい市街地背後の流域・斜面を流域管理の視点から包括的に対応する「六甲山系グリーンベルト」施策を決定しました。この施策の特徴は、土砂災害が発生しやすい六甲山麓の流域・斜面を一連に「防砂の施設」として都市計画決定したことです。震災後の防災まちづくりの方向性を地域皆で共有して、住民・企業・行政等それぞれの立場・役割で流域管理を担っていくことにしたのです。震災後に阪神地域や全国で高まった市民や企業等によるボランティア活動の場としても期待が高まりました。なお、調査により、地震発生から1年を経過する頃には、六甲山の山腹崩壊の箇所は1,000カ所以上になっていました。地震動で発生した崩壊地がさらに拡大し、また、新たな崩壊地の発生を確認したのです。山地流域の状況が変化し続けていることを改めて認識しました。

流域管理において、その流域がどのような状態にあるのかをまず把握することが必要であり、それには、「流域の水・土砂動態を観測によって把握する」ことが必要であるということは従来から指摘されていたことでした。水・土砂が流域内でどのような動きをするのか(流域のどこでどのくらいの量の土砂が生産され、どのように流下するの

か)を実測して、その結果を、その動態を示す場所に応じた砂防施設の規模、内容(たとえば、透過型か不透過か)、また、管理(砂防堰堤の除石やボランテア等による森林保全活動など)計画に反映するという事です。

1998(H10)年7月、河川審議会総合土砂管理小委員会は、「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に基づき、土砂を流す砂防を推進する」ことを報告しました。山地溪流における水・土砂動態の観測を本格的に実施する道筋ができたのです。六甲砂防工事事務所は以降、住吉川だけではなく、六甲山系のほかの流域においても流砂観測を本格的に開始し、観測内容をさらに充実させ現在に至っています。

1997(H9)年に私は、京都大学大学院農学研究科水山高久先生のご指導をいただいて、流域の土砂流出に対する砂防堰堤の効果を評価する仕組みである「砂防施設計画策定支援システム(CASFPS)」を検討する機会を得ました。その後、流砂観測の方法について多くの方々により研究が進められ、その成果のもと、住吉川では多くの方々のご努力によりまして流砂観測データの蓄積が進みました。これらのデータを用いることで、今回住吉川について、「砂防施設計画策定支援システム(CASFPS)」の改良版である、「流域管理システム(WMS)」の開発検討に取りかかる機会を得たのです。

本研究は、流域管理システム(WMS)を構築することで流砂観測データを用いた砂防施設の配置計画・管理計画の策定の手法と流域管理の考え方について提案しました。山地溪流での流砂観測そのものがまだ歴史が浅く、観測方法や観測場所についてさらに研究が必要な状況にある現状では、この研究が流砂観測を活用するひとつの方向性を示したことで今後より一層の観測技術の進展と、観測データの蓄積による流域特性に応じた砂防施設配置計画の考え方や山地流域の管理についての議論が進めば幸いに思います。

最後になりましたが、六甲山系グリーンベルトの計画策定以降長年にわたりまして流砂観測の方法、流砂観測データの整理、解析モデルの作成全般にご指導くださいました京都大学大学院農学研究科 水山高久先生、流域管理の視点から関係機関との連携のあり方や都市計画につきましてご指導くださいました一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構砂防フロンティア研究所長 田畑茂清様、流域管理・砂防指定地管理につきましてご助言くださいました一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構理事長 森俊勇様に心から感謝申し上げます。

また、解析モデルでの計算を丁寧に実施してくださいました八千代エンジニアリング株式会社 武蔵由育様、鈴木判征様、井戸清雄様、(財)砂防フロンティア整備推進機構 宮 貴大様、住吉川での流砂観測を実施されそのデータをご提供くださいました国土交通省六甲砂防事務所の皆様、六甲山麓の土砂災害の歴史や植生の変遷に関する書籍・資料の収集で力を貸してくださいました砂防図書館の皆様、第2章の六甲山に関する図表の整理で力を貸してくださいました菊池ゆかり様に心から感謝申し上げます。