

# 鉄砲水の流出特性に関する研究

## STUDIES ON RUNOFF CHARACTERISTICS OF FLASH FLOOD

松田如水<sup>1</sup>・山越隆雄<sup>2</sup>・田村圭司<sup>3</sup>  
 Josui MATSUDA, Takao YAMAKOSHI and Keiji TAMURA

<sup>1</sup>正会員 工修 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)  
<sup>2</sup>正会員 農博 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)  
<sup>3</sup> 工修 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

Recently, in Japan, flash flood disasters by localized torrential rain have occurred frequently. We have analyzed the characteristics of river basin and river channel where flash floods actually occurred and showed that flash flood-prone torrents could be selected through the simple combination of indices which are basin constant number and river channel constant number. In addition, the results of simple numerical runoff simulation using kinematic routing have shown that localities of rainstorms and the shape of river systems, that is length/width ratio of drainage basin, could affect the height and keenness of peak discharge of flood hydrograph.

**Key Words :** flash flood, basin constant number, river channel constant number, runoff characteristics

### 1. はじめに

鉄砲水とは、山地や中山間地の河川などにおいて発生する非常に急激な出水・増水のことである。鉄砲水とされる事例では、極めて短時間のうちに災害現象が発生していることが特徴であり、多くは、洪水と土石流の遷移領域にあるような現象として捉えられる。このため、鉄砲水とは、図-1に示すように、土石流から低濃度の突発的な流れまでを含む領域での現象として考えている。

近年、鉄砲水として報道される災害は、多発傾向にあるものと考えられるが、当該現象の実態の把握は難しく、その知見は十分であるとは言い難い。これは、鉄砲水が継続時間の短い現象であり、発災は局所的である場合が多いことなどに起因する。氾濫を伴わない災害事例などでは、水位痕跡などは明瞭でないことも多く、災害後の実態の把握は難しい。鉄砲水による人的被害は、毎年のように発生しているが、特筆されるような事例を除いては、“急激な増水”とか“突然の濁流”などとして報道され、洪水や土石流の範疇として扱われることから、災害発生件数の実態把握も難しい状況にある。

これまでの知見では、鉄砲水の発生は、集中豪雨や天然ダムの決壊などに起因する<sup>1)</sup>と考えられている。しかし、鉄砲水の発生特性や発生機構などは、十分解明されていない。したがって、現状では、鉄砲水の予測が困難

であり、対策手法も十分に確立されていない。

本研究では、鉄砲水の発生特性と発生機構の把握を目的に、近年発生した鉄砲水災害の事例を整理し、その災害特性の概況について整理した。また、地形特性（流域特性・河道特性）の観点から、鉄砲水の発生しやすい流域（区間・地点）を評価できる可能性を示した。さらに、山地小流域での流出特性について整理し、鉄砲水の発生しやすい流出特性について、ある程度の知見を得ることができたため、本稿において報告する。

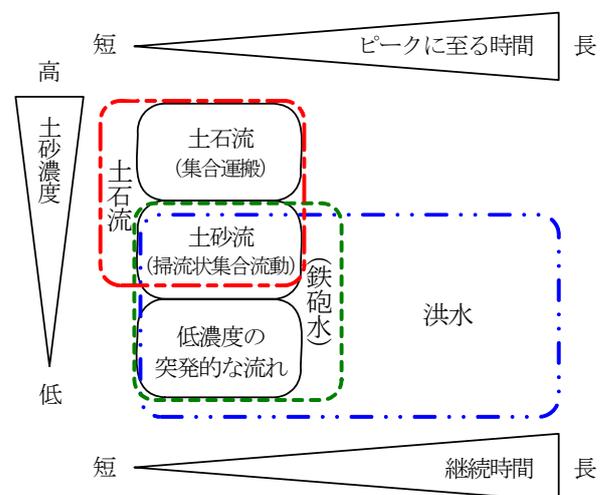


図-1 鉄砲水と洪水や土石流の関係模式図

## 2. 研究の方法

本研究では、現象の把握が比較的容易であると考えられる近年の災害事例（直近3ヵ年を中心に過去10年程度の鉄砲水として報道された災害事例、図-2）を抽出し、鉄砲水災害の概況について整理した。また、これらの事例を基に、地形特性と流出特性の分析を試み、地形特性の観点から鉄砲水の発生しやすい流域の評価を試みた。さらに、流出モデルによる数値実験の結果をふまえ、山地小流域での流出特性について整理し、鉄砲水の発生しやすい流出特性について考察する。

## 3. 鉄砲水災害の概況

近年発生した鉄砲水災害（直近3ヵ年を中心に過去10年程度の間）に鉄砲水として報道された災害事例）を図-2に示し、災害の概況を以下に簡潔に整理する。

ただし、図-2では、小規模洪水として扱うことが適切であると考えられる事例（櫛田川など）や、土石流として扱うことが適切であると考えられる事例（湯の坪川、炭屋川など）が一部含まれている。

### (1) 発災要因

鉄砲水として報道された事例を発災要因の観点から表-1に整理した。

鉄砲水の発生要因は、源流部の豪雨など直接的な流出現象と河道閉塞の形成・決壊など貯留を伴う流出現象に大別される<sup>4)</sup>。災害事例の多くは、源流部の豪雨など直接的な流出現象と考えられるものであり、短時間豪雨による急激な増水としての鉄砲水災害が発生している。

また、河道閉塞の形成・決壊など貯留を伴う流出現象と考えられる事例（白土川、芝原川など）も、少なからず発生しており、河岸崩壊などに伴う河道閉塞の形成・決壊のみならず、豪雨に伴うため池などの貯留施設の決壊による鉄砲水災害（奥畑川、鉄山川など）も発生している。なお、河道狭窄部の閉塞など流下断面の阻害によ

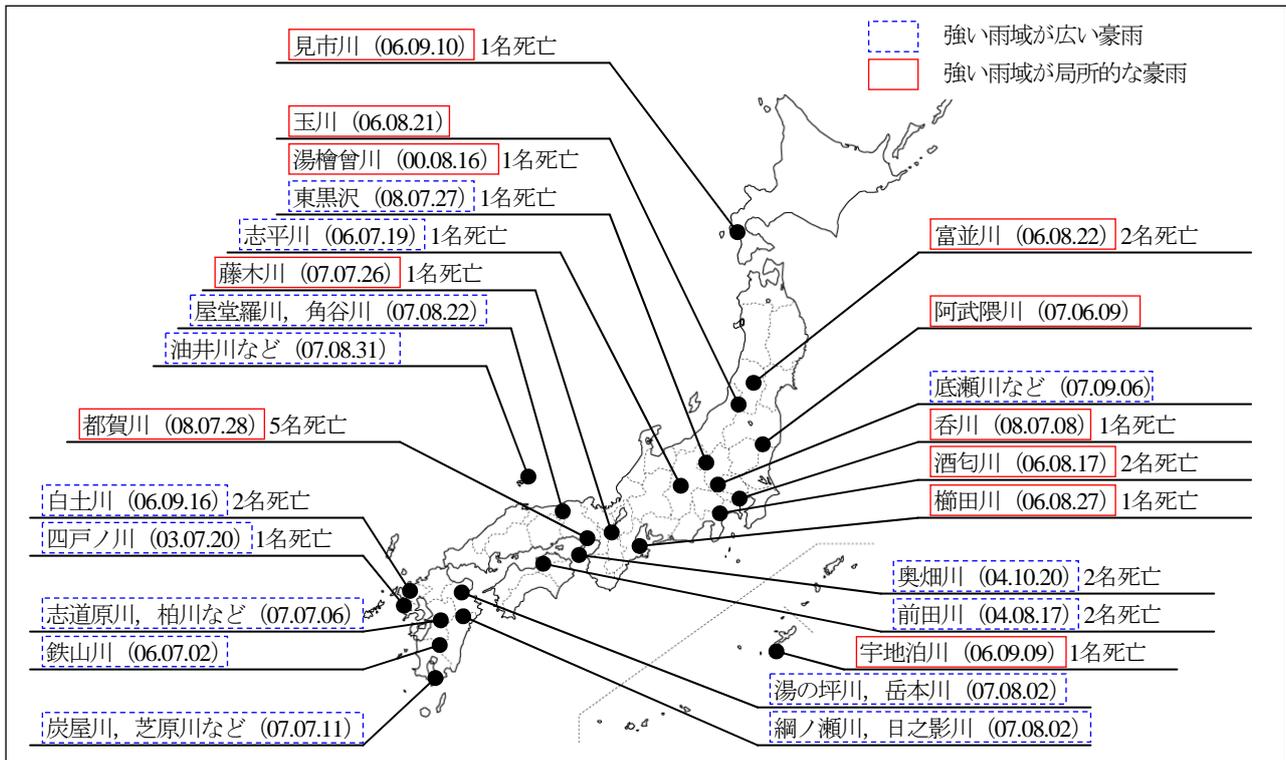


図-2 近年発生した鉄砲水災害

表-1 近年発生した鉄砲水災害の発災要因

要因	発災パターン
①源流部の豪雨など直接的な流出現象によるもの	短時間豪雨による急激な増水 土石流停止後の後続流による急激な増水
②河道閉塞等の形成・決壊など貯留を伴う流出現象によるもの	河道閉塞の形成・決壊による急激な増水 ため池などの貯留施設における決壊による急激な増水
③流下断面の阻害による増水・氾濫によるもの	橋梁部などの狭窄部における流木・土砂の閉塞・氾濫 勾配変化点などの土砂の堆積による河道の閉塞・氾濫

り氾濫した事例（湯の坪川，岳本川など）についても，鉄砲水として報道される場合がある．このような事例は，扇状地形での発生事例が多い．橋梁などの狭窄部の閉塞などを契機として，氾濫流が背後地の道路などを流路として流下し，河道から離れた場所に，突然，氾濫流が押し寄せてくる場合などである．

## (2) 鉄砲水を発生させた降雨

災害事例における流域での降雨域の分布状況は，強い雨域が広く，流域総降雨量も大きい豪雨と，強い雨域が局所的な豪雨に大別される（図-2）．

前者は，前線性豪雨など，ある程度まとまった雨域によるもので，災害形態は，いわゆる豪雨災害の様相を呈し，氾濫災害や土砂災害が同時生起するものが多い．

後者は，雷雨性豪雨など，降雨域での短時間の雨量強度は強いが，流域総降雨量は少ない局所的な雨域によるものが多く，発災地点では降雨が無いが，あっても小さい．このため，河道内の利用者や工事関係者などは急激な増水の危険を予想し難く，その結果，犠牲者となる例が多い．災害形態は典型的な鉄砲水災害の様相を呈する．

## (3) 鉄砲水の発生流域

鉄砲水災害の発生した流域（発災地点上流域）は，急峻な山地流域が多いが，流域が市街化されている丘陵地流域でも少なからず発生している（宇地泊川，呑川など）．河系模様は，一般的な河川に多いとされる樹枝状を示すものが多く，次いで，格子状を示すものが多い．本川と支川は直角に近い角度にて合流しているものが多く，樹枝状～格子状のやや細長い流域が多い．

## 4. 地形特性の分析・評価

### (1) 地形特性と流出特性の知見

流域の平面形状や縦断形状は，ハイドログラフの形状を強く制約すると考えられる．図-3に示すように，流域形状が円形に近く，短い区間に集中して大きな支川が合流する求心状の河川では，ハイドログラフの波形がシャープで，出水期間は短い．これに対し，流域形状が細長い河川では，ハイドログラフは緩やかであるが，出

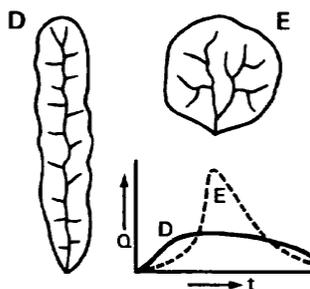


図-3 流域の平面形状とハイドログラフ<sup>5)</sup>

水期間が長くなるとされる<sup>3),4)</sup>．

### (2) 地形特性（流域特性・河道特性）の分析・評価

鉄砲水が発生しやすい地形特性（流域特性・河道特性）を分析するためには，流出特性を反映できる指標の導入が適切であると考えられる．このため，流出モデルの適用が可能な指標により，地形特性（流域特性・河道特性）の数量化を試みる．

鉄砲水のような急激な流出現象では，kinematic wave法（等価粗度法）が適用できる．kinematic wave法（等価粗度法）は，流域を幾つかの斜面と流路の組合せとして，流出過程を運動式と連続式を用いて水理学的に追跡するものであり，運動式は一般にManning式が適用され，解法は特性曲線法が用いられることが多い．当該手法では，地形特性は流域定数と河道定数によって表現される．流域定数は，流域等価粗度，流域平均斜面勾配により決定され，河道定数は，河道幅，河道粗度，河床勾配により決定される．

#### a) 基本式

特性曲線法による流域定数 ( $K_s, P_s$ ) と河道定数 ( $K_r, P_r$ ) は，Manning式を適用する．なお，河道定数 ( $K_r$ ) は簡略式を適用した．

$$\text{流域定数: } K_s = \left( \frac{N}{\sqrt{I}} \right)^{P_s} \quad P_s = 0.6 \quad (2.1)$$

$$\text{河道定数: } K_r = b^{0.4} \left( \frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{P_r} \quad P_r = 0.6 \quad (2.2)$$

ここに， $N$ ：流域等価粗度 ( $\text{s/m}^{1/3}$ )， $I$ ：流域平均斜面勾配， $b$ ：評価地点の河道平均幅 (m)， $n$ ：河道の粗度係数 ( $\text{s/m}^{1/3}$ )， $i$ ：河道勾配 (河床勾配) である．

なお，流域等価粗度は，表-2に示す標準値を採用し，流域の土地利用（地目）と面積率に応じて設定した．流域平均斜面勾配は，谷線法にて国土基本図 (1/5,000～1/10,000) や，地形図 (1/25,000) より設定した．河道幅は，評価地点の河道幅を採用した．河道の粗度係数は，評価地点が水位流量観測点など，粗度係数が設定されているものはこれを採用し，不明な場合は，河道の状況に応じた標準値<sup>6)</sup>に準じた．

表-2 地目別の流域等価粗度係数<sup>8)</sup>

地目	標準値
水田	2.0
山林	0.7
丘陵・放牧地・公園・ゴルフ場・畑地	0.3
市街地	0.03

#### b) 地形特性（流域特性・河道特性）の分析・評価

災害事例における流域定数 ( $K_s$ ) と河道定数 ( $K_r$ ) の適用結果を表-3に示す．なお，表-3では，災害事例のうち，土砂災害として扱われている事例を●で示した．

災害事例の多くが、山地や中山間地の河川で発生しているため、流域等価粗度 ( $N$ ) は0.7程度、流域平均斜面勾配 ( $I$ ) は0.5程度の値となるものが多く、流域定数 ( $Ks$ ) は1前後の値を示すものが多い結果となった。

発災区間 (地点) の河道幅は5~20mが多い。河道定数 ( $Kr$ ) が1以下の値を示すものは、河道幅が狭いものや、河道粗度が小さいもの、河床勾配が急な河川が多い。評価地点にて、河道定数 ( $Kr$ ) が、流域定数 ( $Ks$ ) より小さい値を示すものは、土砂の移動や河道のかく乱が顕著で、河道災害が発生するなど、土砂災害として扱われているものが多い。これに対して、河道定数 ( $Kr$ ) が、流域定数 ( $Ks$ ) より大きい値を示すものは、土砂の移動は少なく、河道内での急激な増水として扱われている。なお、酒匂川、櫛田川など中下流区間での発災事例では、発災区間の河道幅が広く、河床勾配が緩いため、他の事例と比較すると、河道定数 ( $Kr$ ) は、大きい値となった。

すなわち、評価地点において土砂災害とされた事例では、 $Ks/Kr > 1$ となるものが多く、土砂災害とされない事例は、 $Ks/Kr < 1$ となる結果が得られた。

図-5は、表-3をグラフ化したものである。 $Ks/Kr = 1$ を、土砂移動が顕著なグループと土砂移動が少ないグループの分離線として仮定した。図-5に示すAは土砂移動が顕著なグループであり、土石流に近い現象までが含まれている。Bは短時間の急激な増水の特徴とする土砂移動が少ないグループである。このうちB1は急峻な山地流域のグループであり、B2は源流域まで市街化された丘陵地流域のグループである。また、CはBに比べると水位の上昇がやや緩やかで、土砂移動も少なく、小規模洪水と表現しても良い現象を示すグループである。すなわち、左側にプロットされる事例は、土石流など、短時間に発生する災害の領域にあり、右側にプロットされる事例は、洪水など、ある程度の継続時間を有する災害の領域に相当するものと考えられる。ここで、現象が土石流に近い

と考えられる事例 (湯の坪川など) や、小規模洪水に近いと考えられる事例 (櫛田川など) ほど、分離線より離れた位置にプロットされる傾向にある。

なお、図-4は、河床勾配と河道幅にてプロットを試みたものであるが、これらの指標のみでは、図-5に示したAグループとBグループが重複し、また、B1とB2の区分ができないなど、各グループの分離性が良くない。

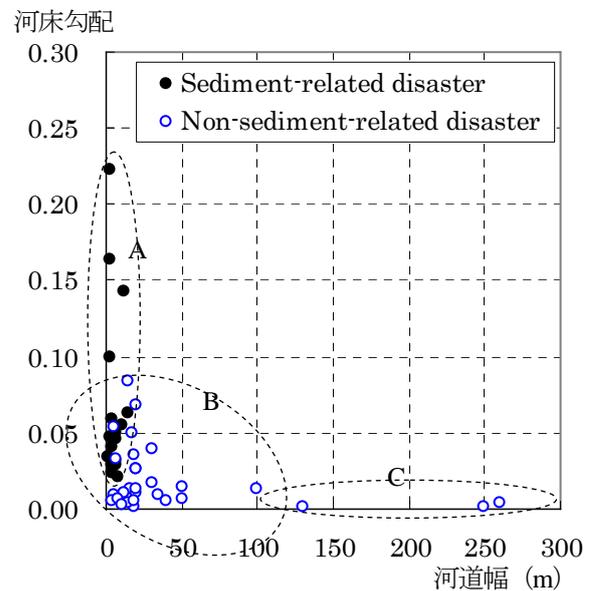


図-4 災害事例における河床勾配と河道幅

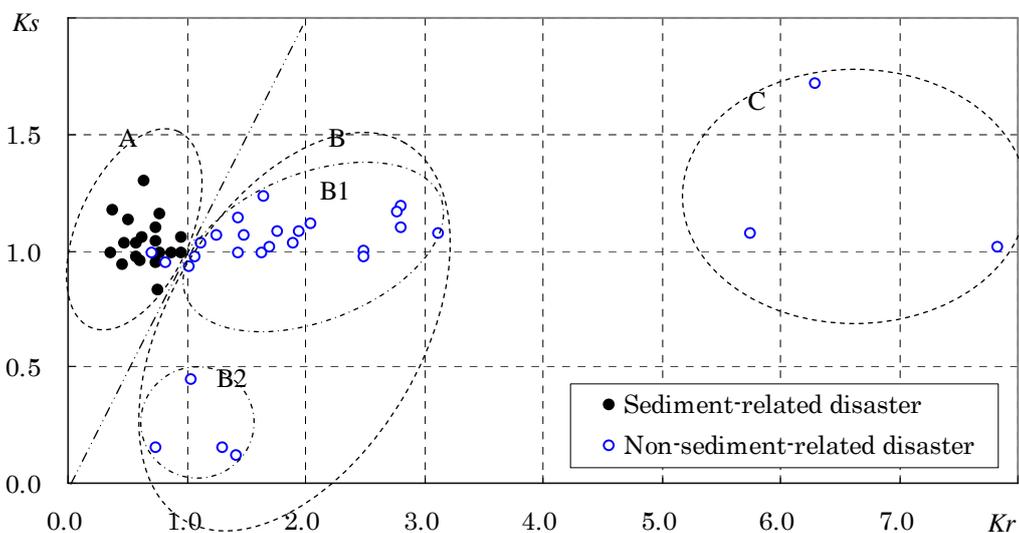


図-5 災害事例における流域定数 ( $Ks$ ) と河道定数 ( $Kr$ )

表-3 災害事例における流域定数と河道定数

河川名	流域諸元		評価地点の河道諸元			Ks	Kr	Ks/Kr	評価地点 災害状況
	流域勾配	流域平均 等価粗度	河床勾配	河道幅 (m)	粗度係数				
湯檜曾川 (全流域)	0.51 0.47	0.70 0.70	0.027 0.039	20 30	0.05 0.05	0.99 1.01	1.63 1.71	0.61 0.59	○ ○
四戸ノ川左支川	0.29	0.70	0.222	3	0.045	1.17	0.38	3.08	●
前田川	0.41	0.70	0.020	7.5	0.035	1.05	0.96	1.09	●
奥畑川	0.35	0.75	0.032	6	0.035	1.16	0.77	1.50	●
志平川	0.40	0.66	0.100	3	0.06	1.03	0.57	1.80	●
酒匂川 (全流域)	0.20 0.20	0.60 0.50	0.013 0.004	100 260	0.03 0.03	1.19 1.07	2.80 5.75	0.42 0.19	○ ○
玉川 (全流域)	0.50 0.39	0.70 0.70	0.014 0.007	50 50	0.04 0.04	1.00 1.07	2.49 3.12	0.40 0.34	○ ○
富並川 (全流域)	0.40 0.38	0.70 0.70	0.014 0.010	16.5 20	0.035 0.035	1.06 1.08	1.49 1.77	0.71 0.61	○ ○
櫛田川 (全流域)	0.24 0.24	1.20 0.50	0.001 0.001	130 250	0.03 0.03	1.72 1.01	6.29 7.84	0.27 0.13	○ ○
見市川 (全流域)	0.50 0.30	0.70 0.70	0.054 0.006	5 40	0.045 0.035	0.99 1.16	0.71 2.78	1.39 0.42	○ ○
白土川	0.26	0.50	0.164	3	0.035	0.99	0.36	2.76	●
鉄山川右支川	0.17	0.50	0.034	1	0.06	1.13	0.51	2.22	●
宇地泊川 (全流域)	0.05 0.05	0.01 0.01	0.033 0.010	7 12	0.03 0.03	0.15 0.15	0.74 1.31	0.21 0.12	○ ○
阿武隈川	0.24	0.70	0.013	20	0.035	1.23	1.65	0.75	○
柏川 (全流域)	0.52 0.52	0.70 0.70	0.055 0.026	10 20	0.04 0.04	0.98 0.98	1.10 1.44	0.89 0.69	● ○
志道原川	0.60	0.70	0.059	3.5	0.03	0.94	0.47	2.00	●
津留川	0.40	0.70	0.035	18	0.04	1.06	1.26	0.84	○
炭屋川	0.93	0.70	0.143	12	0.045	0.83	0.75	1.10	●
芝原川	0.54	0.70	0.041	3.5	0.035	0.97	0.58	1.68	●
藤木川	0.01	0.03	0.009	5	0.035	0.44	1.04	0.43	○
日之影川	0.54	0.70	0.009	35	0.04	0.97	2.49	0.39	○
綱ノ瀬川 (全流域)	0.51 0.45	0.70 0.70	0.063 0.017	14 30	0.04 0.04	0.99 1.03	0.95 1.90	1.04 0.54	● ○
湯の坪川	0.21	0.70	0.050	7	0.03	1.29	0.65	1.98	●
岳本川	0.45	0.70	0.047	3	0.03	1.03	0.47	2.17	●
屋堂羅川 (全流域)	0.57 0.51	0.70 0.65	0.033 0.029	4.5 6.5	0.03 0.03	0.96 0.95	0.62 0.75	1.55 1.26	● ●
角谷川	0.42	0.70	0.031	4.5	0.03	1.05	0.63	1.66	●
油井川 (全流域)	0.51	0.70	0.024	4	0.04	0.99	0.77	1.28	●
那久川 (全流域)	0.36	0.70	0.028	4	0.04	1.10	0.74	1.49	●
八尾川 (全流域)	0.27	0.60	0.002	18	0.035	1.09	2.81	0.39	○
中村川 (全流域)	0.38	0.65	0.005	4	0.035	1.03	1.12	0.92	○
都万川 (全流域)	0.38	0.70	0.004	14	0.035	1.08	1.96	0.55	○
重栖川 (全流域)	0.34	0.70	0.005	18	0.035	1.12	2.06	0.54	○
久見川 (全流域)	0.32	0.70	0.006	8	0.035	1.14	1.43	0.80	○
底瀬川 (全流域)	0.43	0.70	0.046	6	0.04	1.04	0.75	1.39	●
呑川	0.03	0.01	0.003	11	0.02	0.12	1.42	0.08	○
東黒沢 (全流域)	0.59 0.55	0.70 0.70	0.083 0.068	15 20	0.035 0.04	0.95 0.97	0.83 1.07	1.14 0.90	○ ○
都賀川	0.20	0.40	0.050	17.5	0.035	1.00	1.03	0.97	○

評価地点災害概況：●：Sediment-related disaster, ○Non-sediment-related disaster

## 5. 山地小流域における流出特性の考察

多くの災害事例は、源流部などの短時間豪雨による直接的な流出現象として捉えられる。発生流域は、樹枝状～格子状のやや細長い流域が多く、降雨域となった源流部は、急峻な地形に加え、露岩が多いなど、流出率が高いと考えられる事例も少なくない。

一般に、山地小流域では、流域勾配や流路勾配が急峻なため、ハイドログラフはシャープになりやすい。また、流域形状が細長い河川でも、短時間豪雨が偏在する場合などには、ハイドログラフはシャープになりやすい。kinematic wave としての流下区間が長い河川では、鋭い洪水波形になりやすく、山地小流域において短時間豪雨が発生した場合、鉄砲水と表現されるような急激な増水に繋がりがやすい。したがって、図-5による区分は、地形特性の観点から鉄砲水の発生しやすい流域（区間、地点）を評価できる可能性があるが、鉄砲水の発生しやすい流域を抽出するためには、局所的な豪雨の発生頻度や空間分布など降雨特性の観点からも整理する必要があるものと考えている。

参考として、山地小流域を想定し、表-4および図-6の条件にて、降雨分布や流域勾配や流路勾配を変化させた場合の仮想流域での流出計算結果の例を図-7に示す。

表-4 解析ケースの設定

Case	流域	流域勾配	主流路勾配	支川勾配	降雨域
Case1-1	A	I	a	1/40	上流域
Case1-2	A	I	a	1/40	下流域
Case1-3	A	II	b	1/80	上流域
Case1-4	A	II	b	1/80	下流域
Case1-5	A	I	a	1/40	全流域
Case1-6	A	II	b	1/80	全流域

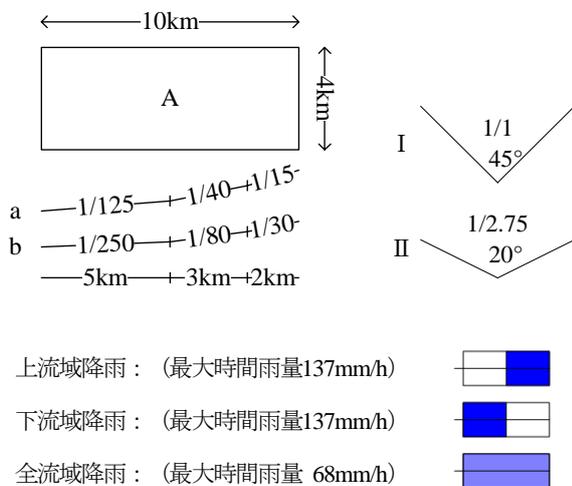


図-6 地形条件（流域条件・河道条件）と降雨条件の設定

流量 (m<sup>3</sup>/s)

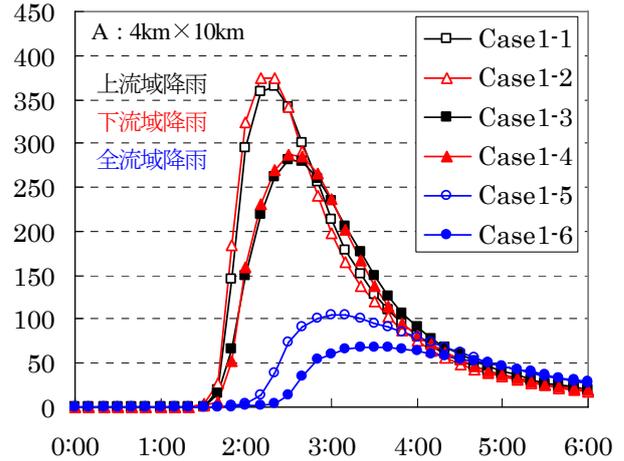


図-7 仮想流域における流出解析結果の例

## 6. 結論

鉄砲水の災害事例を整理し、地形特性の観点から鉄砲水の発生しやすい流域（区間、地点）を評価できる可能性を示した。一方、急流河川区間では、流域形状としては急な水位上昇が発生しにくいとされてきた細長い流域でも、短時間豪雨が偏在する場合には、ハイドログラフがシャープになる危険性を示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご指導、ご教示を頂いた京都大学水山高久教授に厚く御礼申し上げます。災害調査では、日本大学小田晃准教授、財）建設技術研究所の杉浦氏、長谷川氏にご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。災害関連資料の提供について、各関係官庁の方々にご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 水山高久, 鉄砲水の発生, 流下機構に関する研究, 1997.
- 2) 松田如水・山越隆雄・田村圭司・小田晃・長谷川祐治, 鉄砲水と表現される災害現象, 平成20年度砂防学会研究発表会概要集, 2008.
- 3) 鈴木隆介, 建設技術者のための地形図読図入門 3 段丘・丘陵・山地, 古今書院, 2000.
- 4) 吉川秀夫, 河川工学, 朝倉書店, 1980.
- 5) K. J. Gregory, D. E. Walling, Drainage Basin Form and Process - A geomorphological approach-, 1973.
- 6) 日本河川協会, 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説 調査編, 1997.

(2008. 9. 30受付)