

# 数値シミュレーションを用いた2005年9月6日広島県宮島で発生した 土石流災害防止策の検討

Study on preventing debris flow disaster occurred on September 6, 2005 in Miyajima,  
Hiroshima Prefecture applying numerical simulation

中谷加奈<sup>1</sup>・前田大介<sup>2</sup>・里深好文<sup>3</sup>・水山高久<sup>4</sup>

Kana Nakatani, Daisuke Maeda, Yoshifumi Satofuka and Takahisa Mizuyama

<sup>1</sup>日本学術振興会特別研究員 (PD) ・京都大学 農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

JSPS Research Fellow (PD), Kyoto University, Lab. of Erosion Control Engineering

<sup>2</sup>京都大学 修士課程 農学研究科 森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Graduate Student, Kyoto University, Lab. of Erosion Control Engineering

<sup>3</sup>立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>4</sup>京都大学教授 農学研究科 森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Professor, Kyoto University, Lab. of Erosion Control Engineering

We simulated a debris flow disaster that occurred on September 6, 2005 in Miyajima, Hiroshima Prefecture. In Miyajima historical heritage such as Itsukushima shrine exists. There was a failure at Mt.Misen and caused debris flow from upstream end. While debris flow flowing downstream to residence and heritage existing area, it was surveyed that erosion from riverbed also developed the debris flow volume. In this study, we consider the effective sabo works for this disaster applying GUI equipped simulator KANAKO. First, we simulated case without any sabo structures. Then we also simulated case with groundsill, and case with groundsill and sabo dam. The result showed that not only constructing sabo dam but also the construction of groundsill in the steep area is effective to prevent this kind of debris flow disaster.

**Key Words :** *debris flow, numerical simulation, historical heritage, Miyajima area, groundsill, sabo dam*

## 1. はじめに

2005年9月6日に広島県宮島白糸川で土石流が発生した。宮島には、平安時代から約1400年の歴史を持つ厳島神社(写真1)や大聖院などの史跡が存在し、日本だけでなく海外からの観光客も多く、歴史都市防災だけでなく経済的な視点からも、重要な地域といえるであろう。

本検討では、著者らが開発したGUIを実装した土石流数値シミュレーションシステム'Kanako 2D'<sup>1)</sup>を用いて、対策が全くなされていなかった場合の被害状況の推定、ならびに砂防堰堤や床止め工などの砂防構造物を用いて発生した災害を効果的に防止・軽減する手法について考察した。

## 2. 広島県宮島白糸川におけるシミュレーション

### (1) 災害概要

2005年9月6日22時頃、台風14号に伴う大雨によって広島県廿日市市宮島の駒ヶ林（標高509m）の標高400m付近で崩壊が起こり、土石流が発生した。崩壊によって発生した土石流は、白糸川に沿って約2600m流下し、流下に伴って河道上に存在した河床材料を侵食して発達しながら流動して、設置されていた2基の砂防堰堤を越流・破損した。既設の砂防施設の機能などにより、人的被害は少なかったものの、駒ヶ岳における有名な登山道の一つである大聖院ルート（写真2）は甚大な被害を受け、復旧には約3年の時を必要とした。また、下流域における宮島商店街や住宅地にも水や土砂が流入し、被害を及ぼした。人的被害は軽傷者1名、家屋被害は一部損壊9戸、床上浸水11戸、床下浸水34戸であった。



写真1 厳島神社



写真2 復旧した白糸川沿いの大聖院ルート（下流より望む）

### (2) 地形条件

崩壊土砂量は約18,000 m<sup>3</sup>と見積もられ<sup>2) -4)</sup>、これを元に供給ハイドログラフ・セディグラフを設定した。土石流が河道を侵食した土砂量は約13,000 m<sup>3</sup>と推定されており、これらは初期河床材料として河道上に、均等に与える。なお、いずれの土砂量も空隙込の量である。地形条件は国土地理院から公開されている電子国土のデータを元に作成した。図1に示すように、急勾配領域では一次元計算を実施して、住居や厳島神社などの存在する緩勾配領域においては二次元計算を実施した。一次元領域における川幅は、本検討では一律に15mと設定した。また、一次元領域の下端からの流域面積は約0.604 km<sup>2</sup>である。

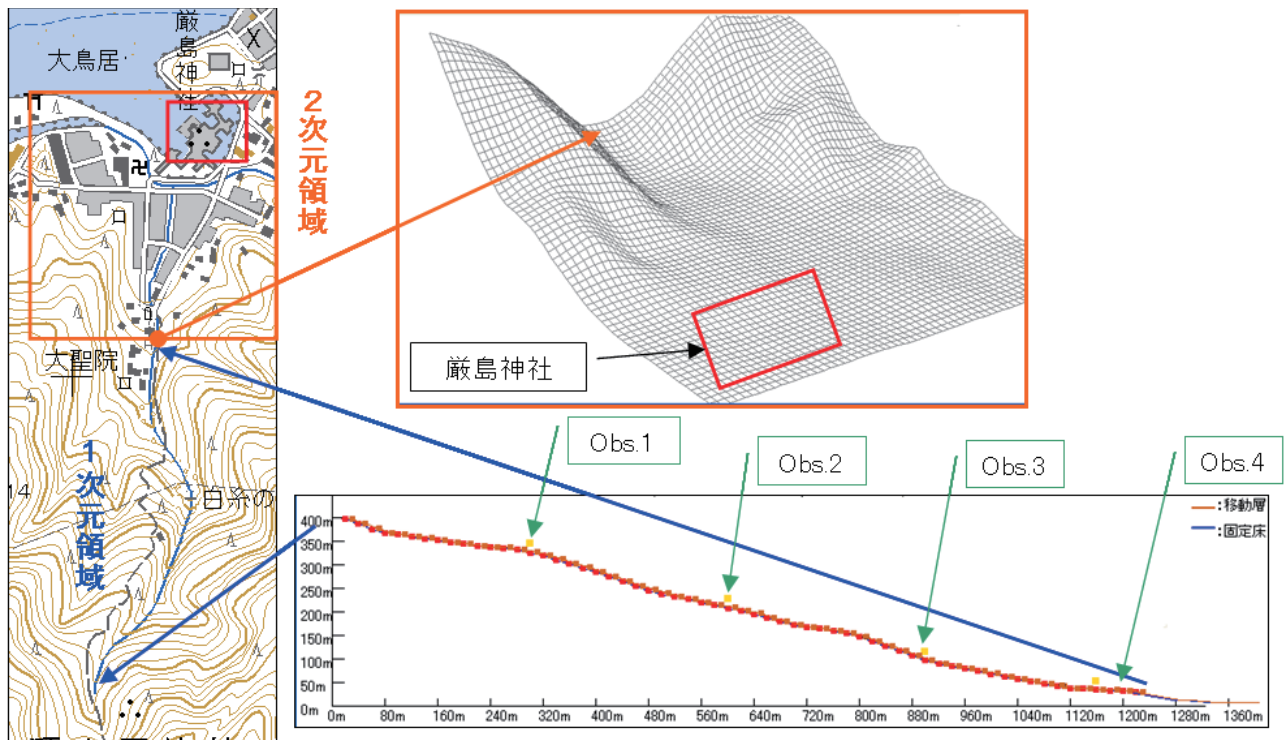


図1 宮島白糸川地形図（左図）と Kanako での1次元領域（右下図）2次元領域（右上図）の対応

なお、図1は宮島白糸川概要(図1左)とKanakoで表示される1次元領域(図1右上)、2次元領域(図1右下)における対応を示しており、一次元領域の下流端付近が大聖院、2次元領域の赤い長方形で囲まれた領域に巖島神社が位置する。

### (3) 供給ハイドログラフ

一次元領域の下流端勾配を元に、高橋らによる平衡土砂濃度式<sup>5)</sup>(1)を用いて、崩壊土砂量(18,000 m<sup>3</sup>)を輸送し得る土砂濃度と、総流量を算出した。土石流ピーク流量は、土石流総流量との関係式<sup>6)</sup>(2)、(3)から導出した。

平衡土砂濃度式；

$$Cd = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma$ :砂礫の密度(=2650 kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho$ :流体相の密度(=1180 kg/m<sup>3</sup>)、 $\phi$ :砂礫の内部摩擦角(=35°)、 $\theta$ :下流端から上流100mの平均河床勾配(=4.57°)、 $Cd$ :土石流濃度(0.30 ≤  $Cd$  ≤ 0.54、最大値は0.9C\*)、 $C^*$ :河床の容積濃度(=0.6)である。

土石流ピーク流量(平均的なピーク流量と土石流総流量の関係式)；

$$Q_{sp} = 0.01 \Sigma Q \quad (2)$$

$$\Sigma Q = \frac{Vdqp \cdot C^*}{Cd} \quad (3)$$

$Q_{SP}$ :土石流のピーク流量(m<sup>3</sup>/s)、 $\Sigma Q$ :土石流総流量(m<sup>3</sup>)、 $Vdqp$ :流出土砂量(空隙込み・m<sup>3</sup>)である。

上述した式より土石流濃度は0.30、総流量とピーク流量はそれぞれ36,000m<sup>3</sup>、360m<sup>3</sup>/sが算出された。これらより、ハイドログラフを200秒間継続する三角形のピークで供給する図2の様に設定した。また、200秒後から計算終了時の1800秒までは、上流端からは一切の水・土砂を供給しないものとした。

図2で設定した供給ハイドログラフにおける、水の総量は25,200m<sup>3</sup>であった。なお、土砂災害が発生する以前から、台風14号の中国地方接近に伴って、9月4日13時から7日7時までの期間、降雨が連続的に観測されていた。海堀らの報告<sup>2)</sup>から、災害当時の宮島町雨量観測所における2005年9月6日21時時点での1.5時間半減期実効雨量は54.99mmであり、そこに22時までの1時間雨量33mm/hが降ったことで土石流が発生したと報告されている。

### (4) その他の計算条件

数値計算に用いた各パラメータ値を表1に示す。小規模な流域であることから、土石流の流動継続時間は30分未満であると考えて、総計算時間は1800秒とした。なお、既設の砂防堰堤については、本検討では考慮しないものとした。

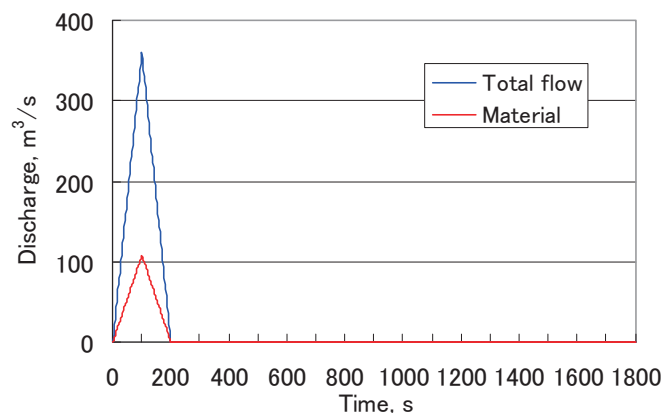


図2 宮島計算で用いた供給ハイドログラフ

表1 計算に用いたパラメータ

パラメータ	数値
計算時間(s)	1800
計算の時間間隔(s)	0.01
土砂の粒径(m)	0.55
砂礫の密度(kg/m <sup>3</sup> ) $\sigma$	2650
流体相密度(kg/m <sup>3</sup> ) $\rho$	1180
河床の容積濃度	0.60
重力加速度(m/s <sup>2</sup> )	9.8
侵食速度係数 <sup>6)</sup>	0.0007
堆積速度係数 <sup>6)</sup>	0.05
マンニングの粗度係数(s/m <sup>1/3</sup> )	0.03
1次元の計算点間隔(m)	20
1次元領域計算点個数	61
2次元の $x$ 計算点間隔(m)	8.47
2次元の $y$ 計算点間隔(m)	8.47
2次元平面の $x$ 方向計算点個数	60
2次元平面の $y$ 方向計算点個数	60

### 3. シミュレーション結果・考察

白糸川について次の表2に示す4ケースについて（無施設、一次元領域に床止め工を設置、一次元領域に砂防堰堤1基設置、一次元領域に床止め工を設置してかつ流域に砂防堰堤を設置）計算を実施した。床止め工とは局所洗掘や河床低下を防ぎ、河床の安定を目的として溪床に設置される横断構造物である（写真3）。不透過型砂防堰堤は、土砂を堰堤に捕捉することで、下流への土砂流出を防止する目的で主に山地河川に設置される砂防構造物である（写真4）。

床止め工を設置した条件下では、一次元領域において初期河床材料が無いものとした。また、不透過型砂防堰堤については、一次元領域の上流端から1150mの位置に高さ12.5mの堰堤を1基設置し、計算開始時に堰堤上流のポケットは空であると仮定して最も効果的に堰堤の土砂捕捉機能が発揮されるものとした。

結果から得られた一次元領域における流量や流砂量変化、ならびに二次元領域における河床位変化について考察する。図1中に示された観測点0bs.1-0bs.4における流量、ならびに流砂量を図3-図5に示す。

表2 検討したケース

Case	条件
Case1	無施設
Case2	床止め工（固定床）
Case3	不透過型砂防堰堤1基
Case4	床止め工（固定床） 不透過型砂防堰堤1基



写真3 床止め工の一例



写真4 不透過型砂防堰堤の一例

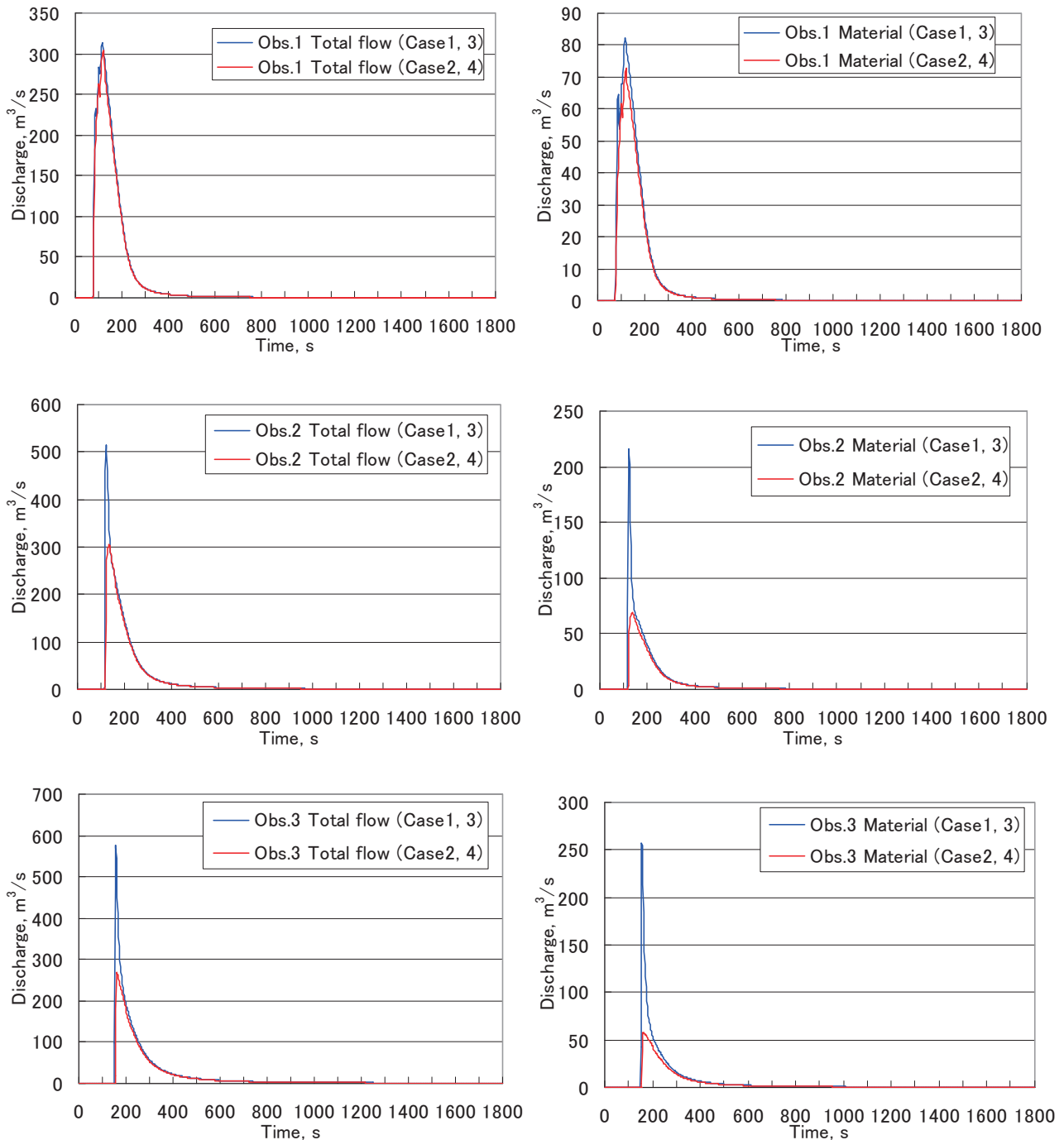


図3 Obs. 1–Obs. 3での総流量（左図）並びに流砂量（右図）

なお、文中には示していないが、既設の二基の砂防堰堤を設置した条件（災害発生時と同様の条件）下についても計算を実施している。一般的に土石流災害調査の困難さもあり、災害後の詳細な堆積厚や流動深のデータは計測されていないことが多い。しかし、本検討で対象とした宮島白糸川の土石流災害については、光本ら<sup>3)</sup>が谷出口付近の流動深を報告している。災害時と同様の条件下で行った計算結果の流動深については報告との照合を行っており、妥当な結果が得られている。

#### (1) 一次元領域における流量・流砂量

観測点Obs. 1–Obs. 3までの間は、初期河床材料ありのCase1とCase3、並びに床止め工設置のCase2とCase4の結果は同じであった。これは、堰堤を設置したのが一次元領域の下流付近であったために、初期河床材料の有無だけが上流域においては影響したことによる。また、Obs. 1では全ケースでそれほど総流量ならびに



流砂量の違いは見られないが、Obs. 2、Obs. 3へと流下するに伴って、初期河床材料ありのCase1とCase3では、侵食による流砂量増加にともなって、総流量も増加している。一方、床止め工を設置した条件であるCase2とCase4においては、Obs. 2、Obs. 3へと流下するに伴って流砂量が減少している。それに伴って、総流量についても同様の傾向がみられる。これは、土石流が流下していく際に、緩勾配領域において堆積が発生したためと考えられる。このように、同様の地形条件・供給ハイドログラフを設定した場合であっても、初期河床材料の有無によって流出流量、流砂量が異なることが示された。

図4、図5に示すのは一次元下流端付近のObs. 4における総流量、流砂量である。堰堤の効果が見られる観測点であり、二次元領域へ流出する総流量、流砂量を示す地点でもある。総流量の結果からは、Case1が最も総流量が大きく、次いでCase2、Case3と減少していき、Case4が最も総流量が少なかった。流砂量についても同様の傾向がみられるが、Case3の流砂量は少なく、Case4に至ってはほとんど流出土砂量がみられなかった。また、Obs. 3における総流量ならびに流砂量に着目すると、Obs. 3—Obs. 4では比較的緩い勾配の領域が存在するため、堰堤無しのCase1並びにCase2についても堆積が生じることによって、Obs. 4の値が大きく減少していることがわかる。

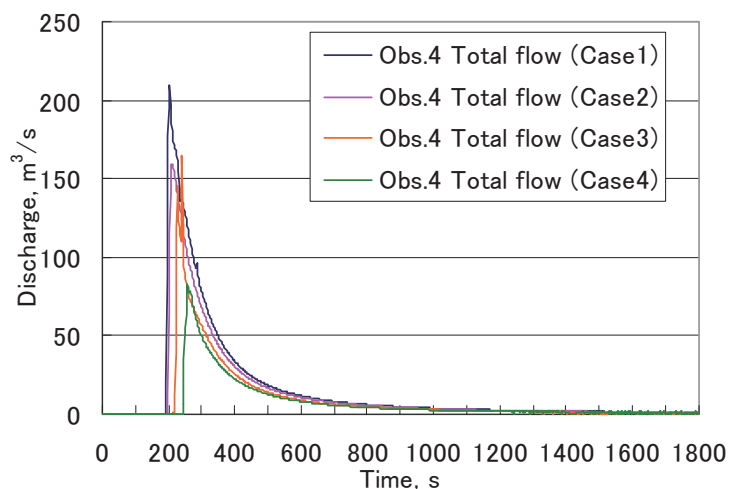


図4 Obs. 4における総流量

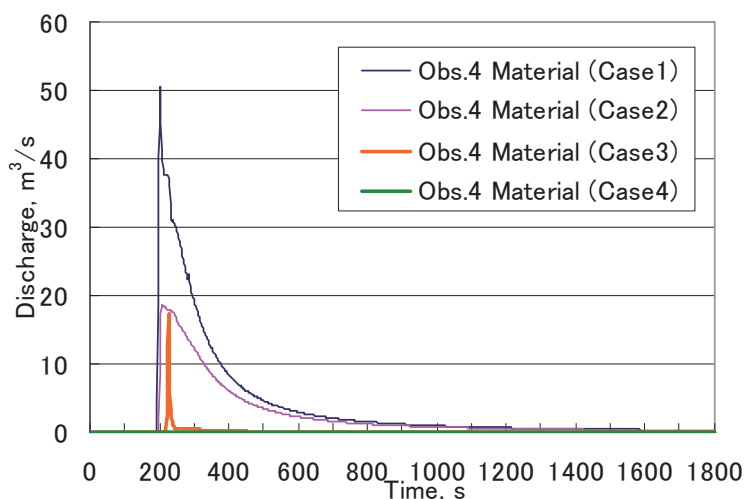


図5 Obs. 4における流砂量

Obs. 4での総流出土砂量はCase1は6,625 m<sup>3</sup>、Case2は4,097 m<sup>3</sup>、Case3は218 m<sup>3</sup>、Case4は0.02 m<sup>3</sup>であった。無施設のCase1を基準にすると、Case2は61.8%、Case3は3.2%、Case4は0.0003%にまで減少しており、今回仮定したような堰堤設置は効果的であること、並びに床止め工と併用すると土砂流出を抑えるには効果が更に上がることが示された。床止め工のみを設置した場合についても、侵食による土石流の発達を抑えることによって、流出土砂量が減少することから、効果がみられることが示された。

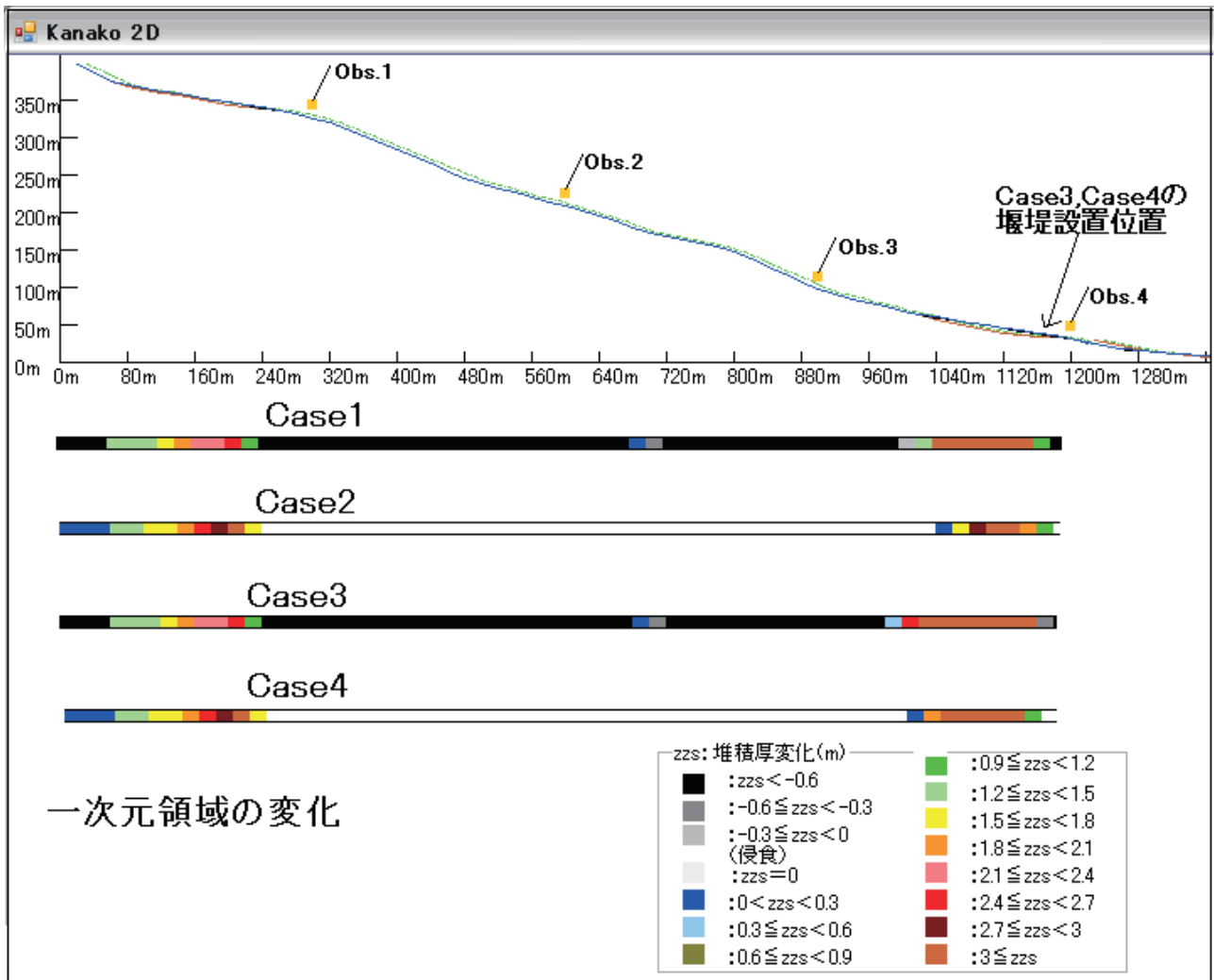


図6 一次元領域の河床位変化 (1795秒経過)

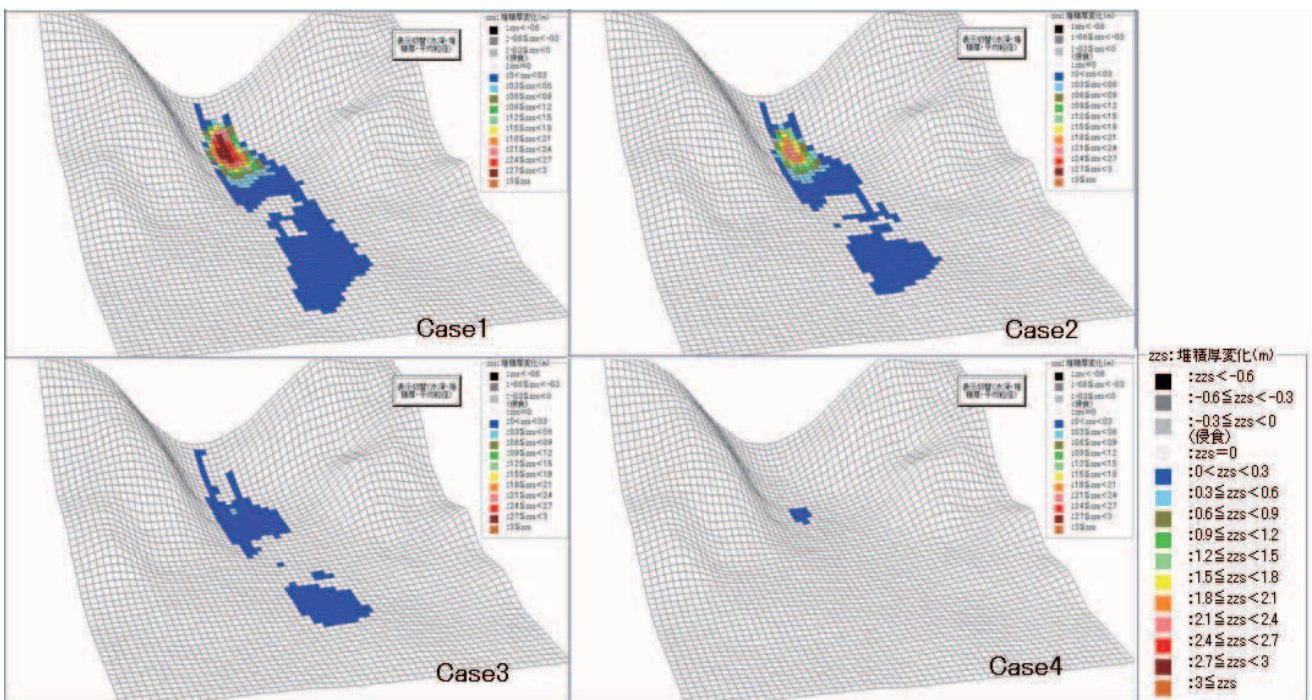


図7 二次元領域の河床位変化 (1795秒経過)

## (2) 河床位変化

図6、図7に計算終了時の一次元領域ならびに二次元領域の河床位変化を示す。一次元領域において、床止め工を設置しないCase1とCase3においては、勾配の急な領域で広範囲に侵食が発生している。侵食が発生した領域では、初期河床として与えた堆積厚0.7mがほぼ全て侵食されている。一方で、上流から80-240mの領域や1040mよりも下流側では、堰堤の有無に関わらず勾配が緩い影響から堆積が発生している。

また、二次元領域においては一次元領域からの流出土砂量と対応して、Case1で最も広い範囲で且つ大きな土砂堆積が見られ、Case2においてもCase1とほぼ同様の範囲であるが、堆積厚は小さくなっていた。Case3ではCase2と同様の範囲で土砂堆積が生じるが、その厚さは殆どは10cm以下であり厚いところでも45cmであり、Case4ではわずかな領域で堆積するだけでありその厚さも1cm以下と非常に小さい。

## 4. おわりに

計算結果からは、一次元領域を流下するに伴って、初期河床材料が存在する場合には土石流が発達していく過程がみられた。一方で、一次元領域の下流端付近においては、上流や中流の領域と比較して勾配が緩くなることで、無施設の場合でも流出流量・流砂量が減少して堆積が生じることも示された。一次元領域の下流端付近に不透過型砂防堰堤を設置すると有効であること、並びに河道内における侵食を抑える床止め工の設置と併用すると、宮島の白糸川で発生したような土石流による被害を防止・軽減する上では有効であることが示された。また、一次元領域全体における河床変動に着目すると、初期河床材料ありのCase3では堰堤の設置によって二次元領域への流出土砂量は大きく減少するものの、河道内において大きな侵食、堆積が広い領域で見られる。山地溪流においては河床変動が生じるのは一般的な現象であるが、本検討で対象とした史跡やハイキングコースとして名高い宮島・白糸川において、そのような河床変動が生じるのは好ましくないと考えられる。

住居などの存在する二次元領域についても、厳島神社には大きな堆積厚変化を生じないものの、無施設の場合や堰堤を設置しない場合においては、30cmから2m以上の河床位変化が生じる領域が広く発生した。堆積が発生した領域は、史跡ではなくても公園、住居、店などが存在しており、厳島神社なども含んだエリア全体を守るためには、この広い領域における防災を考える必要があるといえるであろう。このような二次元領域における大きな河床変動を抑えるためにも、土砂の流出及び発達を抑制するための床止め工、ならびに砂防堰堤を併用することが非常に効果的であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 中谷加奈, 和田孝志, 里深好文, 水山高久: GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 149-154, 2008.
- 2) 海堀正博, 浦真, 吉村正徳, 藤本英治: 2005 年 9 月 6 日に広島県宮島で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol. 58, No. 5, pp. 18-21, 2006.
- 3) 光本恵美, 鈴木盛久, 横山俊治: 2005 年 9 月 6 日広島県宮島白糸川で発生した土石流の堆積域での洪水位の推定, 日本応用地質学会中国四国支部平成 19 年度研究発表会論文集, pp. 73-78, 2007.
- 4) 光本恵美, 鈴木盛久, 横山俊治: 2005 年 9 月 6 日広島県宮島白糸川で発生した土石流の洪水位と流動方向の推定, 第 47 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 337-340, 2008.
- 5) 高橋保, 中川一: 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol. 44, No. 3, p. 12-19, 1991.
- 6) 国土交通省: 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編), 2007.