

メタバースを活用したハザード・マップの高度化に向けた 実践的取り組み ~iHazard map project~

三井共同建設コンサルタント株式会社 ○ 原田 紹臣
立命館大学工学部 里深 好文
京都大学名誉教授 水山 高久
大阪大学名誉教授 松井 保

論文要旨

近年、降雨予測や土砂災害発生予測技術に基づいた事前の災害リスクに関する詳細な情報の共有化や発信による災害リスクの軽減が求められている。これらを受けて、筆者らは多種の情報を集約させ、それらを目的に応じて組み合わせでわかりやすく配信する機能を有した枠組み (iHazard map プロジェクト) を提案している。本研究では、メタバース等のデジタル技術 (DX) を有効に活用した防災ハザード・マップの高度化を目的に、効果的な運用方法について着眼している。なお、住民への土砂災害に関する説明会において、筆者らが提案するメタバース等の技術を実践的に導入したところ、これらの有効性が確認された。

キーワード: デジタル・ツイン, 土石流, ハザード・マップ, メタバース, VR

まえがき

1992年に出版されたStephenson. Nの小説「Snow Crash¹⁾」で使用された「メタバース」(訳: もう一つの世界)は、現在、ネットワーク上に展開したVR世界の代名詞として、一般的に利用されるようになった^{2),3),4)}。なお、今後の技術革新や図-1に示すメタバース空間の分類⁵⁾等により、更なる発展が考えられる。特に、近年では衛星データによる地形情報⁶⁾やPLATEAU⁷⁾建物等の詳細な三次元モデル・データの普及に伴い、今後、更なるデジタル技術を活用したDXの推進が期待されている^{8),9),10)}。また、VR技術についても、ハード技術の向上等に伴って、新たに色々な工夫が提案されている^{11),12),13)}。一方、高度化された降雨予測¹⁴⁾や土砂災害発生予測技術に基づいた事前の災害リスクに対する詳細な情報(例えば、土砂災害警戒情報¹⁵⁾)の共有化によるソフト対策が求められている。

この様な背景の中、2020年7月に静岡県熱海市で発生した土石流(図-2)による甚大な被害^{16),17)}を受け、土石流等の土砂災害リスクが、全国の多くの一般住民において、特に注視するようになった。そのため、近年では、従来まで特に問題にならなかった防災ハザード・マップの礎となる土砂災害警戒区域等¹⁸⁾の指定に関する地元説明会において、従来までの説明会に使用していた二次元的に表現させた土砂災害警戒区域等の設定図(例えば、図-3)やハザード・マップに対して、詳細な現象の説明が求められるようになった。

そこで、筆者らはこれらの現象説明等における住民への災

害リスクの更なる理解向上に向けて、近年のメタバースに代表される可視化技術等を用いた円滑な説明を目的に、iHazardmapプロジェクトを推進している(図-4)。なお、

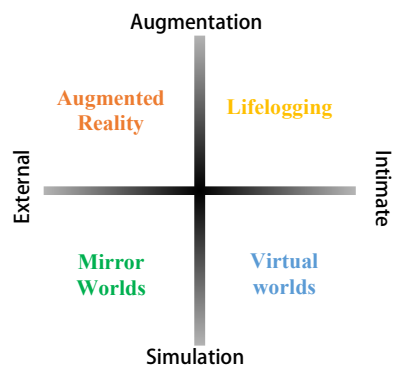


図-1 メタバース空間の分類(メタバース・ロードマップ⁵⁾)



図-2 令和3年7月 熱海市土石流被災地周辺空中写真¹⁹⁾

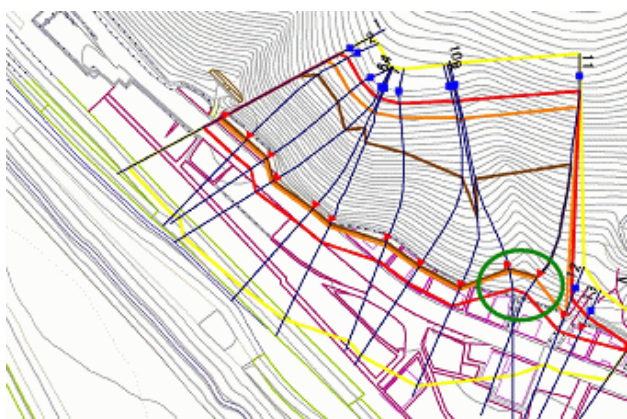


図-3 住民説明会に用いる土砂災害警戒区域等図の一例

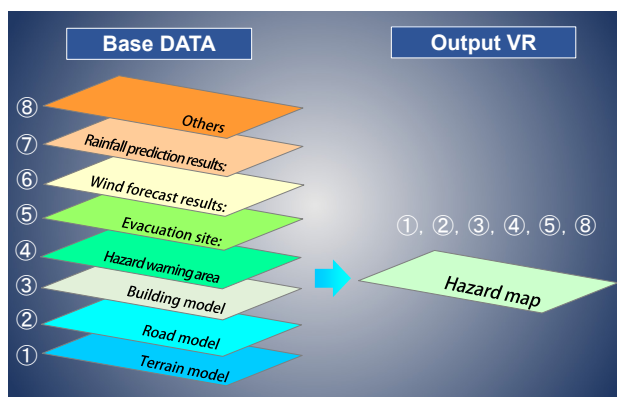


図-4 提案する iHazard map プロジェクト構成の一例

このiHazard mapプロジェクトは、図-4に示す土砂災害リスクの情報発信だけでなく、多種の情報（地形・建物情報、各気象予測結果、避難場所位置、道路情報）を集約させて、それらを目的に応じて組み合わせて、必要な情報をわかりやすく配信する機能を有した枠組みとしている。その際、従来の静的な情報（例えば、想定最大被害範囲の静止画）に対して、時間的な変動を考慮した動的なリスク情報（四次元化）を発信するための検討条件等についても議論する必要がある。

そこで、本研究では、多種のデジタル情報やメタバース技術を有効に活用したハザード・マップの四次元化に向けて、土石流流動予測において必要な境界条件（上流端に与える供給量の時間的な変化）の設定方法について、感度分析により検討する。最後に、提案する技術を活用した実践的な取り組みとともに、これらの導入効果について検証する。

1. 土石流の流動予測等に関する解析

住民に対して土砂災害等の危険性をわかりやすく伝えるためには、洪水や土石流による流動や氾濫範囲を予測して表現させることが重要である。その際、計算の負荷軽減のため、河道や溪流内の流動予測は一次元（準二次元）解析とし、氾濫域における流動予測は二次元（準三次元）解析で検討されることが一般的である^{20),21)}。以降に、本iHazard mapプロジェ

クトで用いる土石流の流動予測解析モデルやそれらの検討条件等を示す。

(1) 一次元解析モデルの概要

河道内等の流動層における流れの基礎方程式は、一様砂礫を対象とした一次元非定常流れ^{21),22)}を用いる。なお、流れの運動方程式、全流量の質量保存則、土石流中の砂礫の質量保存則及び河床の連続式は、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = i_b \quad (2)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} = i_b C^* \quad (3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (4)$$

ここに、 u は断面平均流速、 t は時間、 x は流下方向の距離、 g は重力加速度、 H は流動面標高、 τ_b は河床せん断応力、 ρ_m は流動層の密度、 h は流動深、 i_b は堆積物の侵食または堆積速度、 C は流動層における土砂濃度、 C^* は河床の堆積濃度、 z は河床高である²²⁾。また、河床せん断抵抗則、河床侵食速度式や平衡土砂濃度の違いについても影響が考えられるが、現段階においては十分な知見が得られていないので、従来の知見²²⁾をそのまま用いる。なお、以上の方程式を陽解法より解いている。

一般的に、土石流等の解析において、土砂災害特別警戒区域¹⁸⁾の検討に際して、現地条件より推定される最大流量（ピーク流量： m^3/s ）と総流量／土砂量（ Σm^3 ）等を参考に、上流端に供給する流入条件（洪水波形勾配：時間的変動）を設定する必要がある。以降に、この洪水波形勾配の違いが下流域の被害程度に与える影響について、感度分析により検討して考察する。

(2) 洪水波形勾配の違いが流出に与える影響の検討

上記までに示す一次元解析モデル²²⁾を用いて、図-5に示す設定した各CASEの流入ハイドログラフ（上流端の流入条件：CASE 1-1から1-7）を対象に検討し、下流域の最大流量（ Q_{max} ）を算出して評価する。なお、CASE 1-1 から1-4は上流端に与えるピーク流出量（ $Q_{0max} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ ）及び総流量（ $\Sigma V = 16,000 \text{ m}^3$ ）を一定とし、洪水波形勾配を任意に仮定して変化させている。また、CASE 1-5から1-7はCASE 1-2を基に最大流量（ピーク流出量）を変化させている。

解析条件としては、 $\Delta t = 0.001 \text{ s}$ 、 $\Delta x = 10.0 \text{ m}$ 、 $\rho_m = 1.1 \text{ kg/m}^3$ 、河床せん断抵抗及び河床侵食速度²²⁾を求める際に必要な一般的なマンギングの粗度係数を $0.05 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、土砂の粒径を 0.1 m と仮

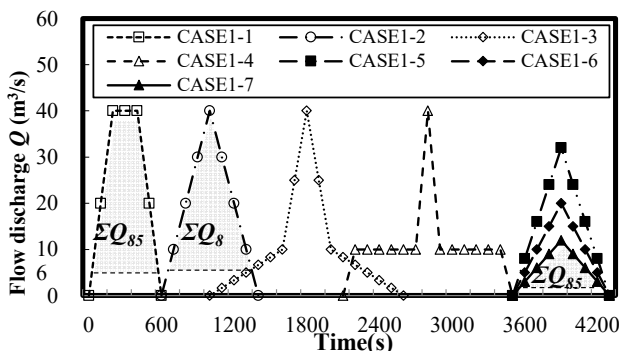


図-5 上流端に与える流入ハイドロ条件 (洪水波形勾配)

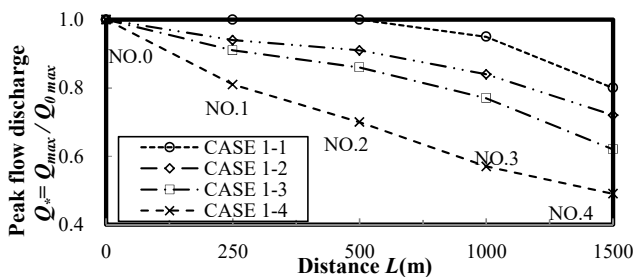


図-6 流下距離とピーク流出量との関係
(CASE 1-1, -2, -3, -4)

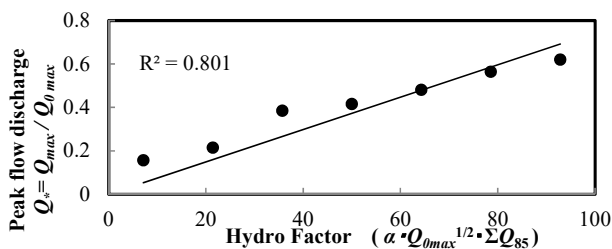


図-7 流入条件とピーク流出量との関係

定し、検討ケースとして、河道幅、流路勾配及び流動層中の土砂濃度をそれぞれ変化させて感度分析により検討する。

流入ハイドロ条件における波形勾配の違いが流出や流動に与える影響として、CASE 1-1から1-4を対象に流下距離(観測地点)のみを変化させて解析した結果(各観測地点におけるピーク流出量)を図-6に示す。ここで、縦軸の流量は最大ピーク流出量(流出最大ピーク流出量 $Q_{0max} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$)で除した無次元ピーク流出量 ($Q^* = Q_{max}/Q_{0max}$)として表現している。上流端から流出する洪水波形勾配が流下途中において徐々に変化し、最終的に下流域でのピーク流出量に影響を与えていることが分かった。特に、上端から500 mを超えた下流域においては、各地点における各CASEの無次元ピーク流出量の割合が、ある一定の割合で推移していることが分かった。なお、本稿では示さないが、勾配、河道幅及び土砂濃度のみをそれぞれ変化させた解析結果においても同様の傾向を示すことが分かった。

次に、CASE 1-1から1-7までの各流入条件の違いによる下

流への影響を比較するために、その他の条件を同じにして、それぞれの下流域でのピーク流出量を算出した。そして、計算された各ピーク流出量と各CASEのハイドログラフの特徴との分析により、次の相関式が得られた。

$$Q_{max} = \alpha \cdot Q_{0max}^\beta \cdot \Sigma Q_{85} \quad (5)$$

ここに、 Q_{max} は下流域におけるピーク流出量、 Q_{0max} は上流境界における流入条件の最大ピーク流出量(図-5)、 ΣQ_{85} は各解析結果を対象に感度分析により得られた指標であり、洪水流出量を時間で積分した全流量のうち各ピーク流出量の下部15%を減じた流量(各ピーク流出量の上部85%に相当する流量:図-5の着色部分)、 α 、 β は係数である。本検討において β を0.5とした場合、相関係数は0.8以上であった(図-7)。

なお、下流域での洪水流出の危険度を表す新たな指標として、次式を提案する。

$$F_H = \alpha \cdot Q_{0max}^{1/2} \cdot \Sigma Q_{85} \quad (6)$$

ここに、 F_H は提案するハイドロファクター(指標)であり、 α は1.0である。なお、本指標の数値が大きいほど下流域での洪水被害が大きくなることが予想される。

これらの結果より、下流域での被害予測において安全側で検討する場合の上流の境界条件として、提案する F_H が最大となる上流域における洪水波形勾配で設定することが望ましいと考えられる。ただし、今後、更に本指標について精査していく必要がある。

(3) 二次元解析モデルの概要

氾濫域における二次元的な場での x 方向(流下方向)における流水の運動方程式、 y 方向(横断方向)における流水の運動方程式(浅水流方程式)、流れの連続式、流砂の連続式及び河床の連続式は、それぞれ次のように表される²³⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i_b \quad (9)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = i_b C_s \quad (9)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (10)$$

ここに、 x は流下方向の距離、 y は横断方向の距離、 u は

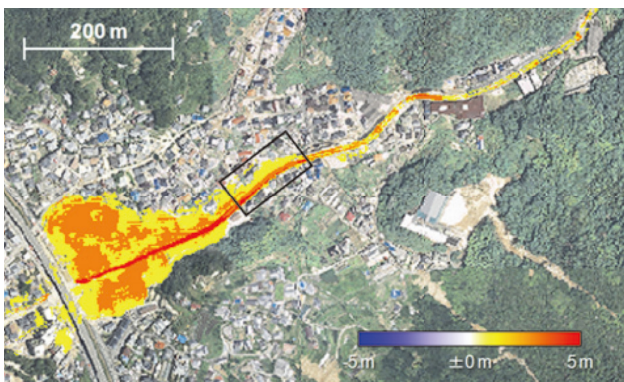


図-8 災害直後のLP計測による地盤高の差分値(上)²⁴⁾
と二次元数値解析結果による土砂堆積(下)²⁵⁾

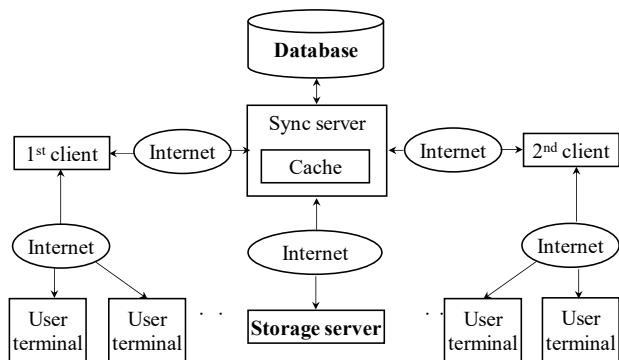


図-9 円滑なメタバース環境の構築に向けたシステム概要

x 方向の平均流速, v は y 方向の平均流速, t は時間, ρ は流動層の密度, p は圧力, ε は渦動粘性係数, τ_x, τ_y は x, y 方向の河床せん断力, h は流動深, g は重力加速度, z は河床高, C は流動層における土砂濃度, C^* は河床の堆積濃度, i_b は堆積物の侵食または堆積速度である²³⁾。なお, 河床せん断抵抗則は同様にマニング則を用いて算出し, 圧力に関しては静水圧近似を行っている。河床侵食速度については, 前述の一次元と同様に, 土砂濃度を用いた従来のモデル²²⁾をそのまま用いるものとする。

なお, 上記までの一次元及び二次元解析手法の妥当性について示すため, 近年に発生した土砂・洪水氾濫被害²⁴⁾を対象



図-10 使用する可視化(メタバース)ツールの例

に, 同様の計算モデルにより解析された結果²⁵⁾を図-8に示す。図-8に示すとおり, 災害直後にLP計測により把握された土砂の堆積状況²³⁾と解析結果²⁵⁾との比較より, 概ね再現性があると考えられる。しかしながら, 今後, 細粒成分が土砂の流動などに与える影響²⁸⁾等についても, 更なる改良が必要であると考えられる。

(4) クラウド上での複数のメタバース利用に向けた高度化

三次元の情報を相互に共有するための三次元仮想空間情報システム²⁶⁾の全体構成の概要を図-9に示す。図-9に示すとおり, 本システムは仮想空間情報を保有するデータベース等に接続された同期サーバを中心に, インターネット等の通信網を介して, 複数のクライアント装置が相互に通信が可能となる。さらに, 各クライアントには, ユーザが用いる情報処理端末を介して接続させる。なお, 各ユーザ端末は一般的なPCやスマートフォンのモバイル端末等が対象となり, 仮想空間を表示可能なディスプレイや可視化ツール(独立型VRデバイス:例えば, 図-10)と操作を行う入力装置である。これらにより, 表示される仮想空間に対して詳細な空間内のデータ取得や新たなデータの作成, 更新, 削除が可能となる。例えば, 仮想空間内で自らのアバターを操作して移動するとともに, 他のユーザのアバターとチャットやビデオ会議による円滑なコミュニケーションが可能となる。

2. 実践的取り組み事例

前述までに示した解析技術やメタバースに関するシステムを用いて, 図-11に示す土砂災害警戒区域¹⁸⁾(黄色:土砂災害警戒区域, 赤色:土砂災害特別警戒区域)に対して, 新たに動的に表現した土石流による土砂堆積範囲(氾濫範囲)を重ねあわせて, 住民へわかりやすく説明した取り組み事例を紹介する。なお, 前述までに示す解析モデルにより当該溪流で想定される土石流の流動や土砂の堆積範囲を予測した結果を, 仮想空間内でVR技術(動画)によりわかりやす

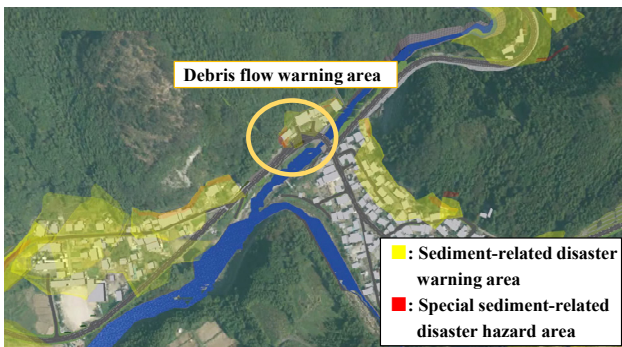


図-11 土石流解析及び可視化の対象箇所

く表現させた一例を図-12に示す。さらに、これらの流動を各視点場で複数の住民参加者が同時にリアルに体験させるため、図-10に示す可視化ツール(独立型VRデバイス)を併用した。

ここで、今回、導入したメタバース等を活用した可視化技術の有効性について評価するため、これらの土砂災害警戒区域の指定に向けた説明会へ参加した住民(30歳代から70歳代までの男女20名)に対して、土砂災害警戒区域等設定図(例えば、図-3)の理解度に関して、メタバースによる可視化の前後において、ヒアリングにより比較した結果を図-13に示す。図-13に示すとおり、土石流等のハザードに対して、可視化の体験前は理解者が約20%程度にあったにもかかわらず、体験後においては理解者が90%程度以上と顕著に増加することが分かった。なお、体験後においても未だ10%程度の理解が困難な回答者に、更にその理由についてヒアリングしたところ、その殆どは「土石流発生(例えば、土砂生産)メカニズムや原因に対する不明瞭な点」の指摘であった。なお、土石流や類似する鉄砲水の詳細な発生メカニズムについては、未解明な点も残されており^{22),23)}、住民に対して更に理解を深めるためには、これらの解明が重要であることが分かった。

なお、これらの実践的な取り組みにより、一般住民に対しての土石流等のハザードの説明において、メタバース等の活用が有効であることが示された。今後、予測技術や可視化技術の高度化による防災分野における更なるデジタル・ツイン技術の活用が期待される。

おわりに

本研究では、詳細な地形データに基づく土石流流動予測やメタバース等のデジタル技術(DX)を活用した防災ハザード・マップの高度化として取り組んでいる“iHazard map”プロジェクトを対象に、効果的な運用方法について提案した。本研究により得られた成果を以降に要約する。

1) 従来の二次元的な土砂災害ハザード・マップを近年の土石流流動予測技術を用いて時間的変化を考慮した四次元

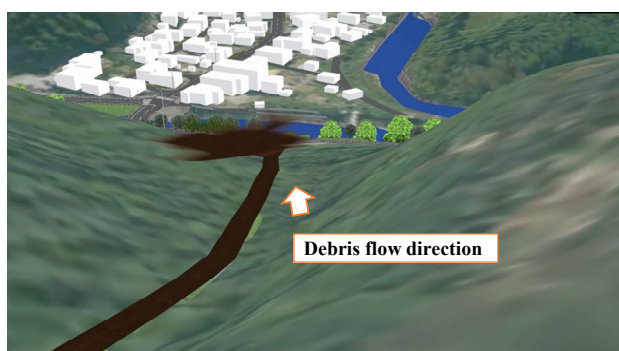
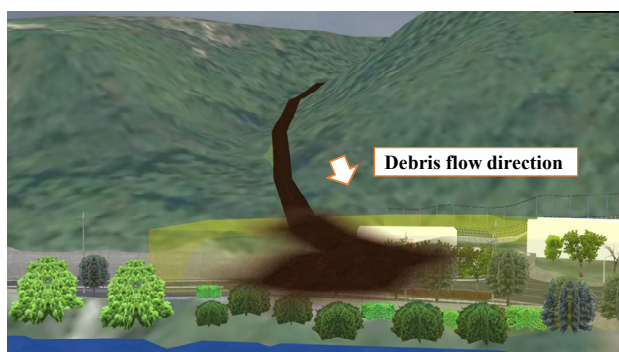
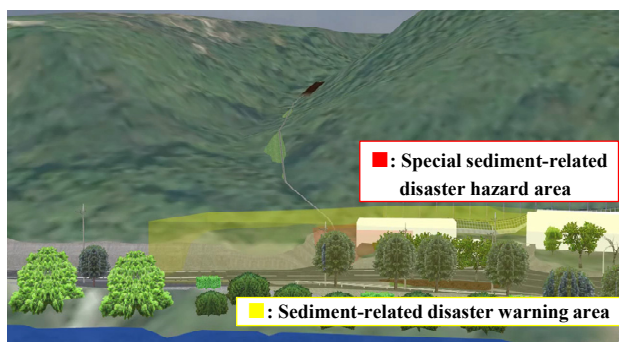


図-12 可視化結果(土石流シミュレーション結果:動画)

化へ高度化する際に設定する境界条件(流入条件)に関して、感度分析によりそれらの有効な設定方法について提案した。

2) 土砂災害警戒区域等指定の説明会において、これらの技術を試行的に用いて実践した。その際、導入効果について検証したところ、非常に良い結果が得られた。一方、更なるハザード・マップの一般住民への理解を深めるための今明らかにすべき検討課題が明確となった。

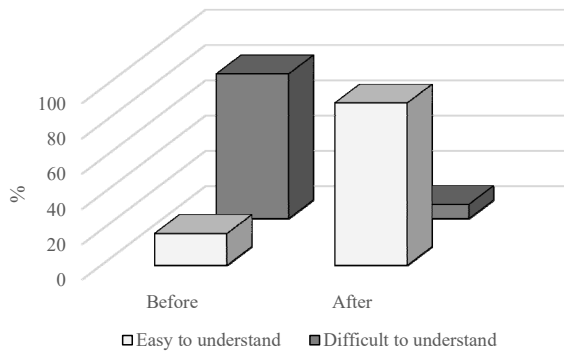


図-13 土砂災害警戒区域の理解に関するアンケート結果(可視化学習前後の比較,有効回答数:20名)

謝辞

本研究に際して,京都大学防災研究所 中谷加奈 教授,徳島大学 三上卓 客員准教授,(株)フォーラムエイト武井千雅子副社長にご助言を頂いた。なお,本研究の遂行に際して,公益社団法人 地盤工学会「斜面災害リスク軽減のための4D多層型ハザード・マップの構築とその利活用方法に関する研究委員会(代表:鳥居宣之)」からの支援を受けた。末筆ながら記して謝意を表す。

付録

- ・ iHazard map project : 動画説明資料 (DFHM 8, 2023より)



参考文献

- Stephenson, N.: Snow Crash, 576p., 1992.
- 服部 桂: VR 原論, 翔泳社, 368p., 2019.
- 舘 暲, 佐藤 誠, 廣瀬通隆: パーチャル・リアリティー学, 日本バーチャル・リアリティー学会, 408p., 2011.
- Lohmann, G: Volumetric image analysis, *Born Digital*, 216p., 2009.
- <http://metaverseroad map.org/>
- 原田紹臣, 石原孝雄, 筒井 健, 市川真弓: 仮想現実空間における高解像度衛星群による写真を活用した建物・地形モデルの適用性, 土木情報学シンポジウム, Vol. 42, pp.13-14, 2017.
- 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- 草野慎一: 水災害におけるリスクコミュニケーション,

河川, Vol.916, pp.3-8, 2017.

- 田中洋介: 国土交通省が推進するインフラ分野の DX, 建設マネジメント, Vol.529, pp.8-11, 2022.
- 大坂和博: インフラ DX を支える国家座標, 建設マネジメント, Vol.529, pp.29-32, 2022.
- 玄葉 誠, 原口哲之理, 青木宏文, 他: 大型 5 面立体視ドライビングシミュレータによる人間自動車系の研究, 自動車技術会 秋季大会, 2015.
- 清水駿太, 後藤秀典, 須長順行: ドライビングシミュレーションにおける走行, 交通, 道路構造のバーチャルリアリティ最適モデリングの考察, 交通工学研究発表会論文集, 4p., 2010.
- 福田知弘, 灘 英樹, 足立晴夫他: Structure from Motion により生成した三次元モデルを含む 都市空間 Virtual Reality の構築, 第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 日本建築学会, 2016.
- 黒田奈那他: 線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアナサンブル予測情報の更新履歴解析, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, Vol. 32, 2019.
- 寺田秀樹, 中谷洋明: 土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法, 国総研資料, No.5, 2001.
- 今泉文寿, 小山内信智, 他: 令和 3 年 7 月静岡県熱海市で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.74, No.5, pp.34-42, 2022.
- <https://www.youtube.com/watch?v=liXYKT3KgCY>
- 土砂災害防止法令の解説, 全国治水砂防協会, 2022.
- 国土地理院: 地図・空中写真閲覧サービス.
- 国土交通省: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル.
- 国土交通省: 河床変動計算を用いた土砂・洪水氾濫対策に関する 砂防施設配置検討の手引き(案).
- 高橋 保, 中川 一; 天然ダムの越流決壊によって形成される洪水・土石流のハイドログラフ, 水工学論文集, vol.37, pp.699-704, 1993.
- 里深 好文: 山地河川の変動とその制御に関する研究, 京都大学博士論文, 2001.
- 広島県: 土砂災害警戒区域等における検討事項, 平成 30 年 7 月豪雨により広島県で発生した土砂災害, 砂防学科誌, Vol.71, No.4, pp.49-60, 2018.
- 長谷川祐治, 中谷加奈, 里深好文他: 呉市天王地区で発生した土砂災害と土砂・洪水氾濫の検証, 土木学会論文集 B1, Vol.75, No.1, pp.324-331, 2019.
- <https://www.forum8.co.jp/>