

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~

原田 紹臣¹・藤本 将光²・里深 好文³・水山 高久⁴・松井 保⁵・武井 千雅子⁶

¹正会員 博士（工/農）三井共同建設コンサルタント株式会社（〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番）
E-mail: harada@mccnet.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 博士（農）立命館大学理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail: m-fuji@fc.ritsumeai.ac.jp

³正会員 博士（工）立命館大学理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail: satofuka@se.ritsumeai.ac.jp

⁴非会員 博士（農）京都大学名誉教授（〒606-8502 京都市左京区北白川追分町）
E-mail: mizuyama@kais.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 博士（工）大阪大学名誉教授（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
E-mail: geo_matsui@sky.plala.or.jp

⁶非会員 株式会社フォーラムエイト（〒108-6021 東京都港区港南2-15-1）
E-mail: chikako@forum8.co.jp

近年、降雨や土砂災害発生予測技術等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り、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て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・マップを対象に、効果的な運用方法について提案している。なお、一般住民がハザード・マップに求める要求について調査したところ「情報量」よりも「見やすさ」や「使いやすさ」が特に重要視されていることが分かった。さらに、住民への土砂災害に関する説明会においてこれらの提案する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。

Key Words: Debris flow, digital twin, hazard map, Metaverse, virtual reality

1. はじめに

1992年に出版された Neal Stephenson 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⁾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⁶⁾やPLATAEU⁷⁾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DX推進による新たな利活用が期待されている^{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⁾やそれらの情報を用いた土砂災害発生

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⁾）の共有化や発信が求められている。

このような背景の中、2020年7月に静岡県熱海市で発生した土石流（写真-1）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より、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で表現した警戒区域等の設定図（図-2）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。

これまで、ハザード・マップの運用に関して、片田ら²⁰⁾、森本・滝川²¹⁾、工藤ら²²⁾、財賀ら²³⁾の研究が報告さ

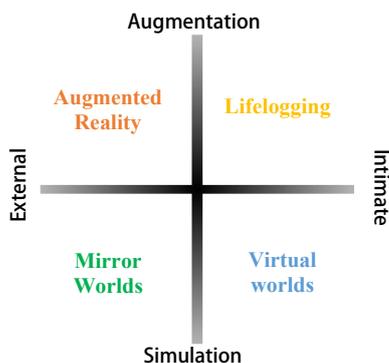


図-1 メタバース空間の分類 (メタバース・ロードマップ⁹⁾より)



写真-1 令和3年7月熱海市土石流被災地周辺空中写真¹⁸⁾

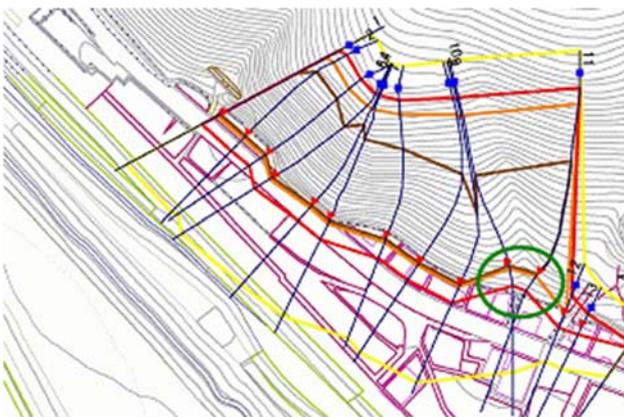


図-2 住民説明会に用いる土砂災害警戒区域等設定図の一例

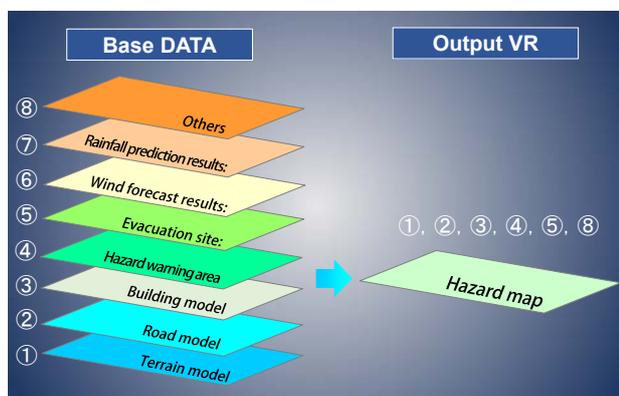


図-3 提案する iHazard map プロジェクト構成の一例

れており、住民におけるハザード・マップに関する認知の低さ、管理者（行政）と住民との間におけるソフト対策に関する理解の相違、ハザード・マップの更なる普及等が指摘されている。また、片田ら²⁰⁾、白土ら²⁴⁾は、ハザード・マップの様式や項目の情報量等について報告している。しかしながら、これらの研究の多くは、ハザード・マップにおける項目に関して、住民における関心度としてアンケート調査により間接的に調査されており、直接的にハザード・マップの様式サンプルをアンケート対象者に具体的に提示して調査されておらず、更なる検証が必要であると考えられる。

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、iHazard map プロジェクトを推進している（例えば、図-3）。なお、この iHazard map プロジェクトは、図-3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（例えば、地形・建物情報、各気象予測結果、避難場所位置）を集約させて、それらを目的に応じて組み合わせることで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、多量な情報を住民に対して効果的に示すための留意点や配慮事項について把握することは重要であると考えられる。また、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て動的に表現（四次元化）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・マップの高度化に向けて、先ず、一般住民がハザード・マップに求める要求について基礎的な調査や分析により整理する。さらに、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。

2. ハザード・マップの最適化に向けた分析

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・マップの高度化に向けて、ハザード・マップの様式等に関する直接的なアンケート調査等により、有効と考えられる情報量や表現方法等について考察する。なお、実施したアンケート調査の被験者（回答者）は、大阪府内の地方都市（ただし、山麓付近）において、土砂災害や洪水氾濫災害の防止に向けたワークショップへの参加者（有効回答数：47名）と、都市部の一般企業の従事者（有効回答数：30名；20歳から70歳までの男女比が

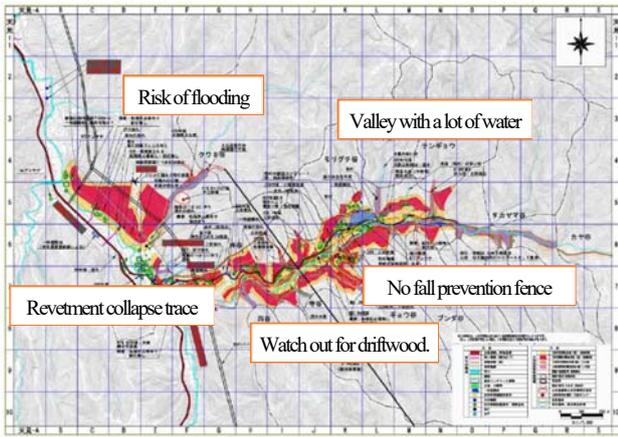
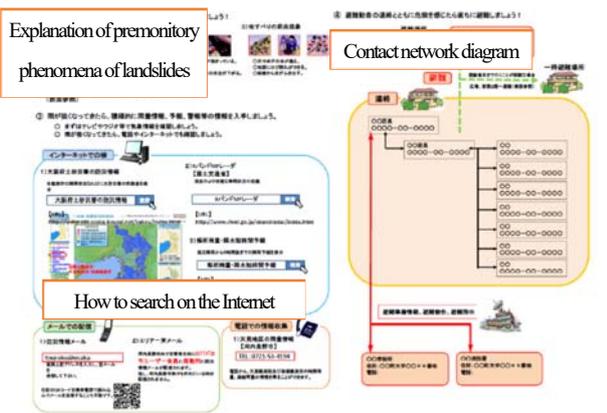


図-4 ハザード・マップのサンプルA (紙サイズ: A2, 両面)



ほぼ同じ割合)の二集団とした。また、分析に際しては、階層化意思決定法に一般的に用いられている AHP (Analysis Hierarchy Process) 分析手法²⁹⁾を用いる。なお、AHP 分析は評価基準と評価結果に対する定量的な分析により、最終的に総合的に有益と考えられる代替案を抽出することが可能な手法である。

アンケート調査に用いた土砂災害ハザード・マップの様式事例 (サンプル A から C まで) を、それぞれ図-4 から図-6 までに示す。なお、これらのハザード・マッ

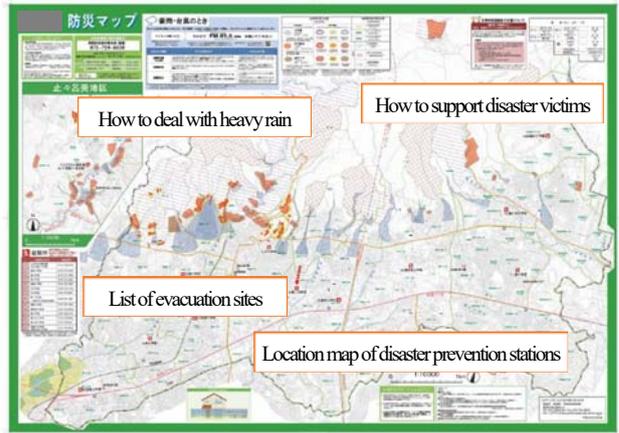


図-6 ハザード・マップのサンプルC (紙サイズ: A1)

表-1 ハザード・マップに関するアンケート調査結果に基づく AHP 分析²⁹⁾結果

	Item	Evaluation value
Evaluation criteria	Ease of use	0.43
	<u>Amount of information</u>	0.12
	Visibility	0.45
Ease of use	Sample-A	0.05
	Sample-B	0.06
	Sample-C	0.32
Amount of information	Sample-A	0.03
	Sample-B	0.02
	Sample-C	0.07
Visibility	Sample-A	0.06
	Sample-B	0.09
	Sample-C	0.30
<u>Comprehensive evaluation</u>	Sample-A	0.13
	Sample-B	0.17
	Sample-C	0.70



図-5 ハザード・マップのサンプルB (紙サイズ: A3)

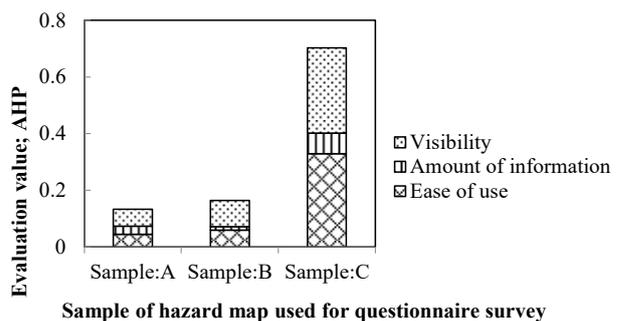


図-7 AHP分析²⁹⁾結果

プのサンプルについては、実際に他地域で住民へ配布されたものを引用している。また、アンケート調査の具体的な方法については、図-4 から図-6 までに示すハザード・マップのサンプルを各アンケート回答者に直接的に掲示し、ヒアリングにより得られた回答結果を AHP により分析している。

AHP 分析結果を表-1 及び図-7 に示す。ここで、ヒア

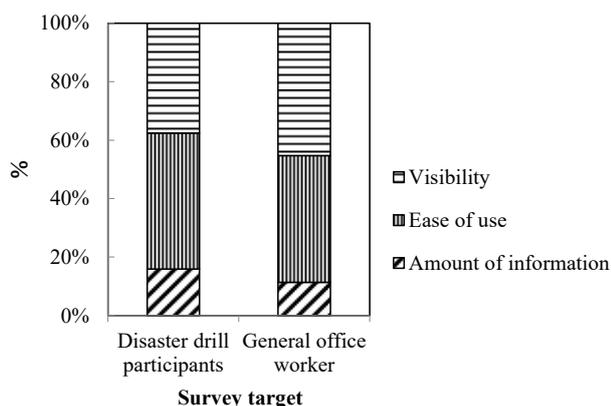


図-8 アンケート調査対象の違いによるハザード・マップに求める要望の違いの変化 (AHP分析の結果)

リングにおいて用いた評価基準（「見やすさ: visibility」「情報の多さ: amount of information」「使い易さ: easy of use」）の観点については、事前のアンケート調査（ただし、ワークショップ参加者）による自由回答結果を参考に設定したものである。表-1 及び図-7 に示すとおり、ハザード・マップにおける「情報量」と比較して「使いやすさ」や「見やすさ」に対して、特に重要視されていることがわかった。なお、図-6 に示す一般的な都市計画白図を背景図とした最小限に情報量を厳選された比較的に簡素なハザード・マップ C（ハザード、避難場所、官公庁の位置情報ならびに各連絡先等が記載）が今回の検討においては最も有効であることがわかった。一方、詳細に情報が記載された少し煩雑なサンプル A は、当初想定していた傾向と異なって低評価であった。

ここで、生活環境や防災意識レベル等の違いが分析結果に与える影響について懸念されるため、母集団（防災ワークショップへ参加する一般的に防災意識が高いと考えられる参加者と、一般企業への従事者との対比）の違いによる変化について比較した結果を図-8 に示す。図-8 に示すとおり、母集団の違いによる影響はあまり見られないことが確認された。

ここで、ハザード・マップに記載する情報の候補の一つとして考えられる緊急病院先（最寄りの緊急病院名や連絡先）に関する住民の認知程度について把握するため、ワークショップへの参加者を対象にヒアリングした。なお、その結果に対して数量化理論（Ⅱ類）²⁶⁾を用いて分析した結果を図-9 に示す。なお、数量化理論（Ⅱ類）の結果では、各因子の棒長や向きの違いが緊急病院先の認知程度との関係性を表している。図-9 に示すとおり、各因子の違いが緊急病院先の認知度に影響を与えていることがわかった。特に、回答者の居住地域（A～H 等）の違いにおいて、顕著に偏在傾向が見られた。この要因の一つとして、回答者の居住地域が地方都市のために緊急病院が点在しており、一部の住民が正確に最寄りの緊

Recognition of emergency hospital (+: recognition, -: non-recognition)

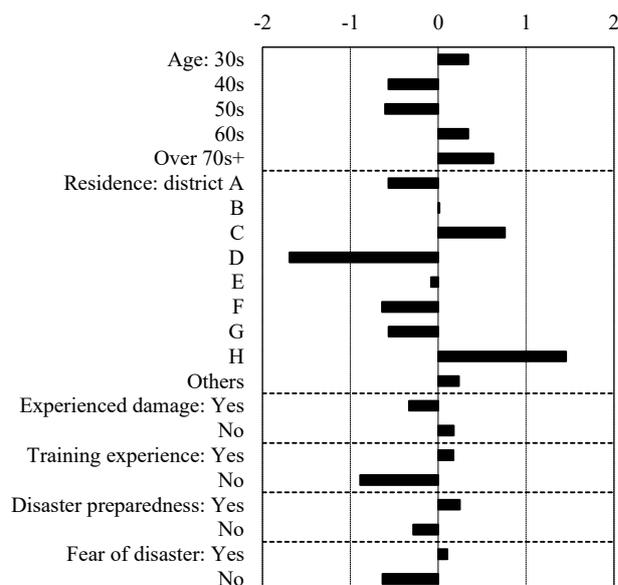


図-9 数量化理論（Ⅱ類）²⁶⁾による分析結果
(各因子と緊急病院先の認知度との関係性)

急病院先を把握していないことによるものと推測される。また、40歳や50歳代において非認知である傾向が見られ、ハザード・マップの情報を発信する年齢層の違いにも配慮し、提供する情報の内容に関して工夫していくことが重要であることが分かった。一方、被害を経験したことのある人が認知度が低く、一般的に推測される傾向と異なる興味深い結果が得られたため、今後、更なる検証が望まれる。

これらの結果より、ハザード・マップの情報発信に際して、生活環境や年齢等が異なる個人がそれぞれ求める情報について着眼するとともに、これらの多種の情報を「見やすく」かつ「使いやすい」工夫が、デジタル情報として発信する際に、特に重要であることがわかった。なお、本分析は従来までの紙面によるハザード・マップを用いた検討であり、今後、デジタル情報を活用したハザード・マップに対しても検証していくことが望まれる。

3. 土石流等の流動予測に関する解析

洪水や土石流等による被害範囲を予測することは重要である。その際、一般的に計算の負荷軽減より、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^{27),28)}。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^{28),29)}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²⁹⁾。また、河床せん断抵抗則、河床侵食速度式や平衡土砂濃度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²⁹⁾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。

ここで、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 ）と総流量や土砂量（ 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。そこで、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²⁹⁾を用いて、図-10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（ $Q_{0\max} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ ）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²⁹⁾を求める際に必要な一般的なマニングの粗度係数を $0.05 \text{ m}^{1/3}\text{s}$ 、土砂の粒径を 0.1 m と仮定し、検討ケースとして、河道幅、

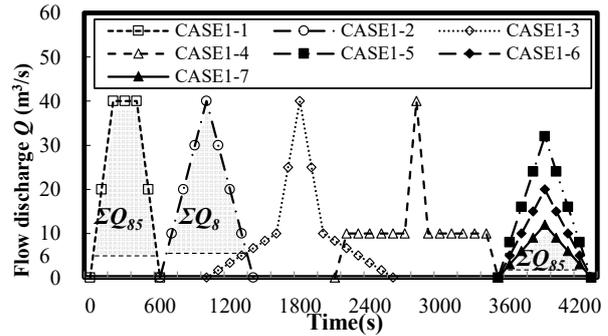


図-10 上流端に与える流入ハイドロ条件（洪水波形勾配の変化）

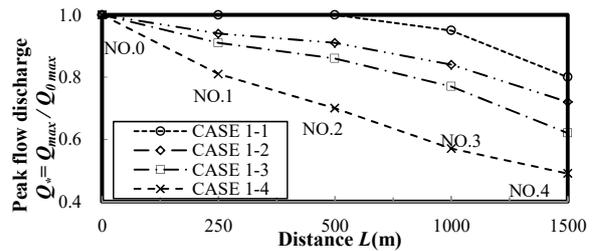


図-11 流下距離とピーク流出量との関係（CASE 1-1, -2, -3, -4）

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-11 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 $Q_{0\max} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ ）で除した無次元ピーク流出量（ $Q^* = Q_{\max} / Q_{0\max}$ ）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、各地点における各 CASE の無次元ピーク流出量の相対割合が、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。

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

ここに、 Q_{\max} は下流域におけるピーク流出量、 $Q_{0\max}$ は上流境界における流入条件の最大ピーク流出量（図-10）、 ΣQ_{85} は各解析結果を対象に感度分析により得られた指

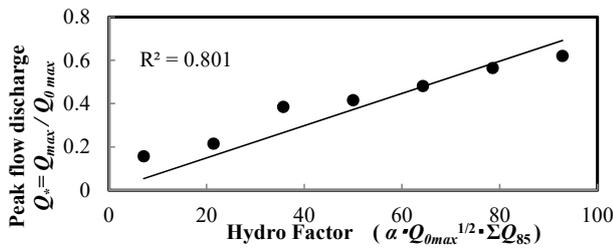


図-12 流入条件とピーク流出量との関係

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-10 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0.80以上であった（図-12）。

ここで、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、可能な限り提案する 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³⁰⁾。

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

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

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

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = i_b C_* \quad (10)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (11)$$

ここに、 x は流下方向の距離、 y は横断方向の距離、 u は x 方向の平均流速、 v は y 方向の平均流速、 t は時間、 ρ は

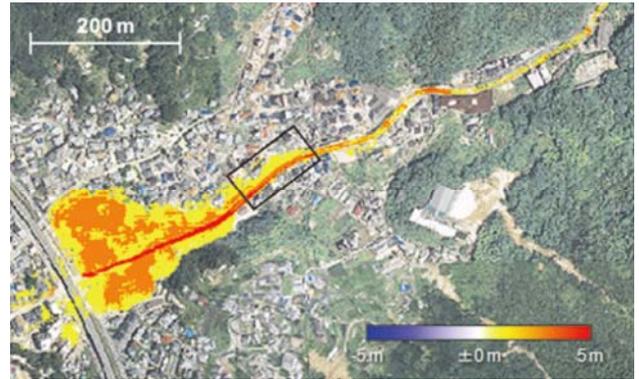
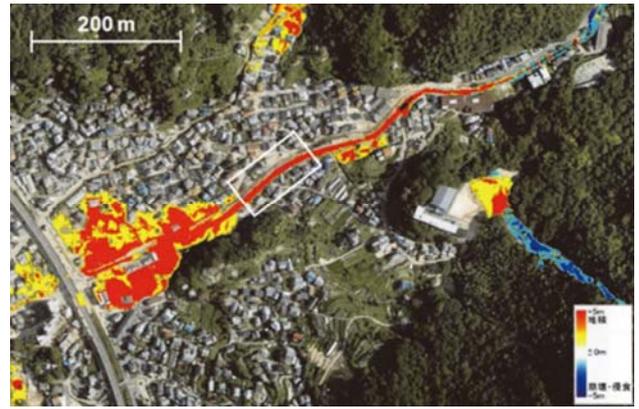


図-13 災害直後のLP計測による河床高の差分値（上）³¹⁾と二次元数値解析結果による土砂堆積（下）³²⁾

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³⁰⁾。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²⁹⁾をそのまま用いる。

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³¹⁾を対象に、同様の計算モデルにより解析された結果³²⁾を図-13に示す。図-13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³¹⁾と解析結果³²⁾との比較により、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、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

近年、現実空間では再現が困難であった事象（例えば、土石流による被災現象）に対して仮想空間内で表現し、これらの結果をユーザが体験できるメタバース環境の構

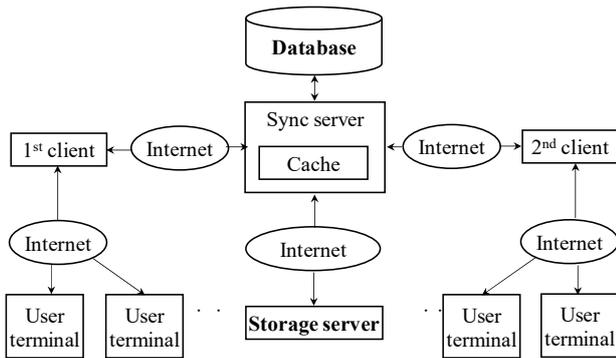


図-14 システムの全体構成図



写真-2 使用する可視化（メタバース）ツールの例

表-2 クライアントの処理情報の種類に対する分類

Data classification	Example
1	Building location information
2	Weather information: Large trees, temperature, atmospheric pressure
	Video conference shared data
3	Communication by chat function
	Video and audio web conferencing
	Location of the mobile avatar

築が可能となった^{13),33)}。一方、三次元データ活用による遠隔・非接触での情報の共有化（例えば、ダム見学会³⁴⁾）についても試行的に実施されるようになった。また、COVID-19の影響により、高機能な端末機器を用いたweb会議や遠隔地からの関係者会議による情報共有が望まれている⁹⁾。その際、インターネットを介した情報処理の負荷を軽減させた円滑なシステムの構築が望まれる。さらに、仮想空間情報を共有しながら、空間内の環境条件（例えば、気象条件）やユーザ間のコミュニケーションに関するデータを逐次に更新するとともに、相互に情報を共有できるシステムの構築が有効であると考えられる。これらの技術的な要求に対応するため、以降に、iHazard map運用において、複数のユーザが相互に情報を

円滑に共有が可能なメタバース環境に関するシステムの工夫を示す。

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の全体構成の概要を図-14に示す。図-14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、写真-2）とともに、操作を行う入力装置である。これにより、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。

各クライアントの役割としては、データベースが保有する仮想空間情報を取得し、これらをユーザ端末へ遅延無く配信させる。また、クライアントは各ユーザ端末からの要求の操作に応じて仮想空間情報の処理を行う必要があるため、直接処理が可能な主記憶装置等にモジュール化されたプログラムを構築する。その際、同期サーバは各クライアントからの要求を受信し、当該要求に応じてデータベースに保存されている情報を配信したり、各クライアントで処理した情報を受信して、データベース内の仮想空間情報を更新する機能を有している。

ここで、データベースには、三次元の仮想空間情報のデータ等を保存させるものとし、主に、地形や建物等のデータ、天候データ、アバターやその他のキャラクター、車両等の移動体のデータ、ユーザが作成した掲示場やチャット等のコミュニケーションに関わるデータが対象となる。これらの情報に対して、齟齬することなく円滑に処理するために表-2に示とおりに情報を分類し、処理情報を3つに区分して処理させる。第一データ分類は仮想空間内における地形や建物等の情報であり、時間に応じて変化させることが少ない情報である。第二分類は、仮想空間内における天気、温度、気圧等の天候情報やユーザ間でのビデオ会議で共有する資料等の定期的に変化する情報である。第三データ分類は仮想空間内におけるユーザ間のチャット・テキストデータやアバターの位置情報などであり、逐次的に変化するものを対象としている。さらに、各クライアントから情報を受信した場合、これらの第一から三データ分類に応じて、対応する処理方法のうちの一つを選択して確実に実行可能なシステムとして運用させる（図-15）。

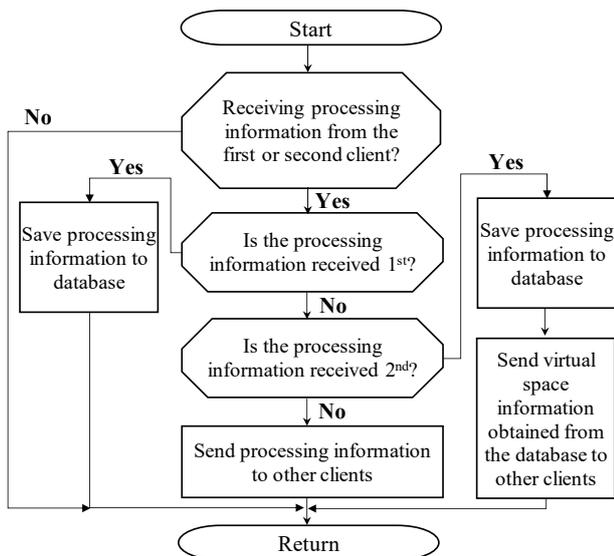


図-15 同期サーバにて実行される処理ルーチンの概要図



図-16 土石流解析（可視化）対象箇所

これらの工夫により、クラウド上において、複数のユーザ間で相互に情報を共有できるとともに、多大なデータ量のメタバースに関する仮想空間情報をリアルタイムに更新することが可能となる。さらに、インターネットを介した各ユーザの情報処理端末へ遅延することなく配信することが可能となる。これらの環境を構築することにより、今後、デジタルツイン技術を活用した更なる円滑な関係者協議の運営や、情報共有における高度化が期待される。

5. 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技術を用いて、図-16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、前述までに示す式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

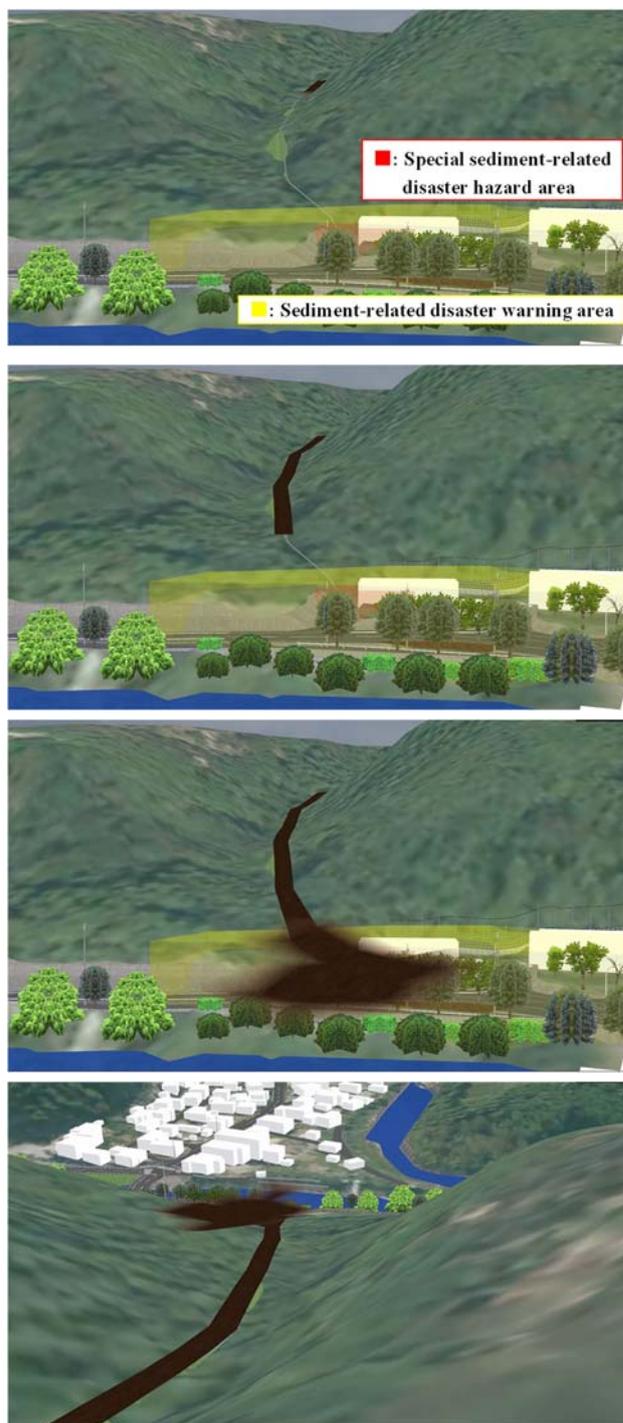


図-17 解析結果（土石流シミュレーション結果：動画）

範囲を予測した結果を、仮想空間内でVR技術によりわかりやすく可視化させて表現した結果（動画）の一例を図-17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、写真-2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

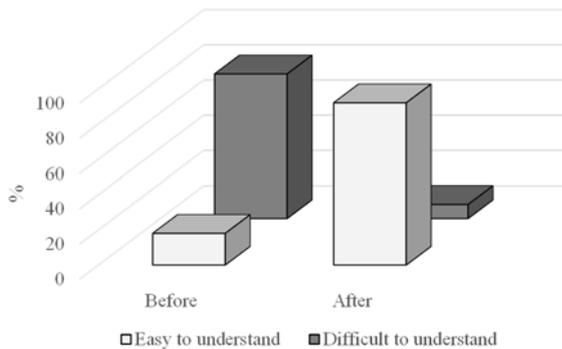


図-18 土砂災害警戒区域の理解に関するアンケート結果
(可視化学習前後の比較)

域等(例えば、図-1)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-18に示す。図-18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%程度以上と著しく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、更なる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^{29),30)}、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。

6. 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) 多種のデジタル情報を活用したハザード・マップの高度化に向けて、まず、一般住民がこれらに求める要求について把握するため、従来からの二次元的な紙面によるハザード・マップを用いてアンケート調査等により分析したところ、「情報量」よりも「見やすさ」や「使いやすさ」が特に重要視されている

ことが分かった。

- 2) 一方、同一の情報(例えば、緊急病院先)においても、生活環境や年齢の異なる個人毎に重要度が異なることが分かった。
- 3) 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設定方法について提案した。
- 4) 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。

謝辞: 本研究に際して、京都大学大学院農学研究科 中谷加奈 准教授、徳島大学 三上卓 客員准教授にご助言を頂いた。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)」及び一般財団法人災害科学研究所からの支援を受けた。末筆ながら記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Neal Stephenson: Snow Crash, 1992.
- 2) 服部 桂: VR原論, 翔泳社, 2019.
- 3) 舘 暲, 佐藤 誠, 廣瀬通隆: バーチャルリアリティ学, 日本バーチャルリアリティ学会, 2011.
- 4) Gabriele Lohmann: Volumetric image analysis, Born digital, 2009.
- 5) Accelerataion Studies Foundation; <http://metaverseroadmap.org/> (2022年12月20日閲覧)
- 6) 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.
- 7) 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (2022年12月20日閲覧)
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 玄葉 誠, 原口哲之理, 青木宏文, 田中貴紘: 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.
- 12) 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, 2010.

- 13) 福田知弘, 灘 英樹, 足立晴夫, 清水駿太, 武井千雅子: *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, 建築学会, 2016.
- 14) 黒田奈那, 山口弘誠, 中北英一: 線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のア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.
- 15) 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.
- 16) 今泉文寿, 小山内信智, 加藤真雄, 小池 優, 小杉賢一朗, 坂井佑介, 坂口 宏, 里深好文, 高山翔揮, 田中隆文, 西陽太郎: 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.
- 17) <https://www.youtube.com/watch?v=liXYKT3KgCY> (2022 年 12 月 20 日閲覧)
- 18) 土砂災害防止法令の解説 (改訂 3 版), 全国治水砂防協会, 2022.
- 19) 国土地理院: 地図・空中写真閲覧サービス (2022 年 12 月 20 日閲覧) .
- 20) 片田敏孝, 及川康, 杉山宗意: 一関市洪水ハザード・マップに対する住民の受容と評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 54, pp.88-89, 1999.
- 21) 森本剣太郎, 滝川清: 被害被災者の「防災・減災」意識調査とハザード・マップ策定への提言, 海洋開発論文集, Vol. 22, pp.205-210, 2010.
- 22) 工藤博之, 高橋迪夫, 石田智弥: 洪水ハザード・マップに対する住民の意識に関する一考察, 東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 228-229, 2000.
- 23) 財賀美希, 藤井俊久, 雁津佳英, 松見吉晴: 住民の洪水災害に対する防災意識の把握と向上化施策に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 67, pp.185-190, 2011.
- 24) 白土洋亮, 陳光齊, 善功企, 小松幸夫: ハザード・マップの活用状況に関する基礎調査, 西部支部研究発表会講演概要集, pp.376-377, 2004.
- 25) Thomas L Satty: A scalling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of mathematical psychology*, Vol.15, 1977, pp.234-281.
- 26) 大橋健一, 青山吉隆: 土木計画への数量化理論 II 類適用の信頼度に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 353, VI-2, 1985, pp.67-74.
- 27) 国土交通省: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル, 2017.
- 28) 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), 2018.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) 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.
- 32) 長谷川祐治・中谷加奈・荒木義則・海堀正博・里深好文: 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 (水工学), Vol.75, No.1, pp.324-331, 2019.
- 33) 房前和朋: 建設分野のメタバース・デジタルツインの活用, 建設マネジメント技術, Vol. 529, pp.51-55, 2022.
- 34) 菊地秀之, 柴田涼太郎: 3 次元データの活用による遠隔・非接触のダム見学, 建設マネジメント技術, Vol. 529, pp.25-26, 2022.

(Received December 31, 2022)
(Accepted January 31, 2023)

ADVANCES IN HAZARD MAPPING USING THE METAVERSE ~ The **iHazard map** Project ~

Norio HARADA, Masamitsu FUJIMOTO, Yoshifumi SATOFUKA, Takahisa MIZUYAMA, Tamotsu MATSUI and Chikako TAKEI

Today, it is essential to reduce the risk of disasters by sharing detailed information on rainfall and landslide disaster predictions. Thus, we developed a framework (the “iHazard map” project) that aggregates various types of information, combines types appropriately, and distributes them in an easy-to-understand manner. Here, we develop a disaster prevention hazard map using digital technology (DX) including the Metaverse. Citizens prioritized “ease of viewing” and “ease of use” over the “amount of information”. When we introduced our method in a briefing session on landslide disasters for citizens, feedback was very positive.