

京都市の地下空間を考慮した浸水解析

佐藤大介^{1*}・武田 誠²・村瀬将隆³・薮下大貴⁴

¹学生会員 中部大学大学院 工学研究科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

E-mail: tc19002-0130@sti.chubu.ac.jp

²正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

E-mail: mtakeda@sti.chubu.ac.jp

³学生会員 中部大学大学院 工学研究科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

⁴非会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 1-8-11)

近年, 日本の大都市では高度な都市化が進んでおり, 地下街, 地下鉄などの地下空間の利用が盛んに行われている. 一方, 長時間にわたり広範囲に降り続く雨により外水氾濫が多発している. このような水害が, 地下空間の発達した地域で発生すると, 人的被害, 交通被害のみならず, 地下鉄の使用不能による経済にも大きな被害を与えかねない. したがって, 外水氾濫時の地上および地下の浸水の様子を知ることは, 重要なことである. 本研究では, 地下空間の発達した都市として京都市に焦点を当て, 地下空間を考慮した氾濫解析を行うことで, 氾濫時の地表面, 地下空間の流水の様子を示すとともに, 止水板の有効性について示した. また, 50m 格子と 10m 格子を用いた解析結果の比較から, 破堤条件によっては範囲や値に差が生じ, 特に浸水域に大きな違いがみられたことから細かい計算格子を用いた解析が必要であることが示された.

Key Words : Underground space, Subway, Inundation, Kyoto City, Numerical analysis

1. はじめに

2015年の鬼怒川における破堤氾濫災害や2017年の九州北部豪雨, 2018年の西日本豪雨など, 近年, 大規模洪水氾濫による浸水被害が生じている. 地球温暖化に伴う気候変動を考慮すれば, さらに大きな外力による洪水災害の発生も懸念されることから, 大規模浸水に対する備えは十分に検討する必要がある.

また, 地下鉄・地下街などの地下空間が高度に発展している都市域で大規模浸水が生じれば, 非常に深刻な被害となることは容易に想像できる. 氾濫水は低い個所へと流れていくことから, ひとたび大規模浸水が生じ, その水が地下空間へ流れ込むことで, 人的被害, 経済被害, 地下鉄などの交通被害を生じさせるだけでなく, 地下鉄を伝って氾濫水が伝播し, 新たな浸水被害が生じる危険性もある. このような被害を想定し, 対策を講じるためには, まず, 大規模浸水における地下空間の浸水状況を明らかにすることが重要である.

尾崎ら¹⁾, 関根・河上²⁾など, 近年, 地下空間の浸水被害を扱った研究は盛んに行われている. これらの研究では, 大阪や東京に位置する地下街を対象に, 豪雨に伴う内水氾濫や避難シミュレーションを実施しており, 地下

空間の浸水特性や現実的な浸水対策, 避難対策の検討を報告している. さらに, 津波による地下浸水特性の評価³⁾, 内水モデルによる広域の洪水氾濫解析⁴⁾など, 広域浸水およびそれによる地下空間の浸水特性が議論されている. また, 本研究で着目している地下鉄の浸水を考慮した氾濫解析に関わる研究も, 関根・関根⁵⁾, 岡部ら⁶⁾により精力的に実施されている. 本研究も同じ目的を持って実施されており, 後述するように, 格子スケールの違いの解析結果に与える影響評価など, モデル化に関する検討が本研究の特徴といえる.

著者らは, これまで地下空間(地下街および地下鉄)を考慮した都市浸水の解析モデルを開発し, 名古屋⁷⁾, 大阪⁸⁾, 東京¹⁰⁾, 福岡¹¹⁾に適用してきた. 本研究では, 解析モデルの適用として京都市を対象とする. ここでは鴨川における京都市内の浸水特性を考察すること, 地下空間を対象とした浸水の特徴を明らかにすること, 氾濫解析における格子スケールの違いによる解析結果の違いを明らかにすることを目的とする.

2. 地下空間への流入を考慮した氾濫解析

(1) 解析モデルの概要

村瀬ら¹⁰⁾の研究では、河川の洪水流には1次元不定流モデルを、都市域の氾濫域にはデカルト座標の平面2次元不定流モデルを、地下鉄線路の流れにはスロットモデル¹¹⁾による1次元不定流モデルを適用し、地下街・地下鉄駅を1つのボックスとして連続式を考慮した水理計算を行っている。スロットモデルは管路における共存する管路流れ、開水路流れを解析するために、管路に仮想のスロットを設置した仮想断面を考え、管路流れを開水路流れとして解析するモデルである。また、河川と氾濫格子の間の堤防では越流現象を考慮し、水位が堤防高よりも高い状況下では自動的に越流流量を求めた。本研究では、戸田ら¹²⁾と同様に、仮定した越流流量を与える想定氾濫解析を行うことから、河川流は解かないものとした。解析モデルを以下に示す。

(2) 浸水解析

陸域における浸水解析には、以下に示す平面二次元の連続式および運動量方程式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -q_o \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(z_G + h)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(z_G + h)}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速(m/s)、 h は水深(m)、 M, N はそれぞれ x, y 方向の流量フラックス($M = uh$, $N = vh$)(m²/s)、 q_o は単位面積当たりの流出流量(m/s)であり、 $q_o = \sum q_n l_n / \Delta x \Delta y$ (q_n : 単位幅あたりの横流入流量(m²/s)、 l_n : 格子にある河川区分の長さ(m)、 $\Delta x \Delta y$: 格子の面積(m²))、 z_G は地盤高(m)、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力(Pa)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 g は重力加速度(m/s²)、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数(m²/s)であり、本研究では0とした。 x, y は平面の座標、 t は時間である。

底面のせん断応力は、マニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

本研究では、大規模浸水を対象とし、50mの幅を持つ計算格子で都市空間(地盤高)を表現している。なお、この格子は、5mメッシュの地盤高データを平均し、1つの格子の値としている。したがって、数m程度の地下空

間(地下街・地下鉄駅)の入口の浸水過程を詳細に表現することは難しいため、つぎの方法で地下空間の入口の流入流量を求めた。

地下空間の入口の情報(道路から歩道の段差($d2$)、歩道から地下空間の入口の段差($d3$)、止水板(溝)の高さ($d4$)、横幅(B))は、後述するように現地調査により求めた。予め5mメッシュ標高値より地下鉄の入口付近の地盤高($z1$)を求め、これを道路面とした。数値計算において氾濫水位(H)を求めた後で、入口の水深を以下の方法で求める。

$$h_{in} = H - (z1 + d2 + d3) \quad (6)$$

ただし、 h_{in} が計算された水深よりも大きい場合には、 h_{in} を水深に置き換えた。この値を用いて地下空間への流入流量を求めている。

(3) 地下空間のモデル化の概要

本研究では、地下街・地下鉄駅を一つのボックスとしてとらえ、線路を約50mの長さで分割して地下鉄線路の計算格子を設定した。氾濫水は複数ある地上の入口から地下街・地下鉄駅へ流入・流出し、地下街・地下鉄駅では地上からの流入・流出流量と鉄道線路への流入・流出流量を考慮して連続式により水の収支が計算される。また、地下街・地下鉄駅に繋がっている線路では流入・流出流量が考慮され、その他の線路では考慮せずに、スロットモデルを用いた一次元不定流解析で水の流れを表現した。さらに、乗換駅のように一つの駅に複数ある線路間の水の輸送も考慮している。

a) 地下街と地下鉄駅の水輸送

地下街・地下鉄駅の連続式には以下の式を用いた。

$$A_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \sum Q_e - \sum Q_o \quad (7)$$

ここで、 A_u は地下街・地下鉄駅の平面面積、 h_u は地下街・地下鉄駅の水深、 Q_e は地下空間への流入流量、 Q_o は線路への流入流量である。

地下空間の入口では、入口のステップにおける地下街・地下鉄駅の水深を $h_{in_u} = h_u + z_{bu} - (z1 + d2 + d3)$ (ここに、 h_u : 地下街・地下鉄駅の水深、 z_{bu} : 地下街・地下鉄駅の底面高) から求め、式(6)の h_{in} と h_{in_u} の大きい方を h_1 、小さい方を h_2 として以下の越流公式から流入流量 Q_e を求めている。なお、完全越流の流量係数 μ を 0.35、もぐり堰の流量係数 μ' を 0.91 とし、 B は入口の幅である。 h_{in} および h_{in_u} は図-2に示す。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_e = \mu B h_1 \sqrt{2gh_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_e = \mu' B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (8)$$

また、地下街・地下鉄駅と線路においても地下空間の入口と同様に、地下街・地下鉄駅の底面からの水深を求め、以下の式で Q_o を求める。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_o = \mu L h_1 \sqrt{2g h_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_o = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、地下街・地下鉄駅の水深 h_u 、地下街・地下鉄駅の底面高からみた線路の水深 $h_{s_u} = h_s + z_{bs} - z_u$ (h_s は線路の水深、 z_{bs} は地下鉄線路の底面高)の大きい方を h_1 、小さい方を h_2 とし、入口の周長を L 、完全越流の流量係数 μ を0.35、もぐり堰の流量係数 μ' を0.91とした。

b) 地下鉄線路

地下鉄トンネルではスロットモデル¹²⁾を導入し、次式を考慮している。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_o \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s Q_s}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial (h_s + z_{bs})}{\partial x} - \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \quad (11)$$

ここで、 A_s は流水断面積、 Q_s は流量、 q_o は単位幅横流入流量であり $q_o = Q_o / \Delta x_s$ 、 h_s は線路の水深、 U_s は流速、 n_s はマンニングの粗度計数、 R_s は径深である。

なお、スロット幅は $g A_{ss} / C^2$ から求めており、 A_{ss} は地下鉄の断面積、 C は満管時の波速(20m/sと仮定)である。

地下鉄の断面は、幅 7.75m、高さ 4.35m の矩形断面を想定している。本研究では乗換駅の水輸送も考慮している。乗換駅では、関連するすべての線路で式(9)の流量が計算される。また、地下鉄線路に侵入した氾濫水が、乗換駅で吹き出し地下街・地下鉄格子に氾濫水が浸入して別の路線へ浸水が生じることもモデル化している。

(4) 計算領域の設定

本研究の計算領域を図-1に示す。50mとして地盤高情報を整理している。考慮した地下街・地下鉄駅の面積および底面高と各駅の線路高は以下のように求めた。地下街・地下鉄駅の面積はWebにある数値地図¹⁴⁾より入手した。また、駅における地下鉄線路高を基礎として、縦 4.35m×横 7.75mの地下鉄断面があり、駅間の線路の平面線形はwebとGISを活用して求め、駅間の線路高は直線的に変化するとした。また、線路断面の天井の上 0.5mに地下街・地下鉄の底面高があると仮定した。なお、乗換駅では複数の底面高が現れるので、一番高い値を地下街・地下鉄駅の底面高とし、地下鉄線路とは周長 20mの入口で接続されているとみなしている。なお、このように、地下街・地下鉄駅を一つのボックスでモデル化していることから、今後、詳細化が必要と考える。

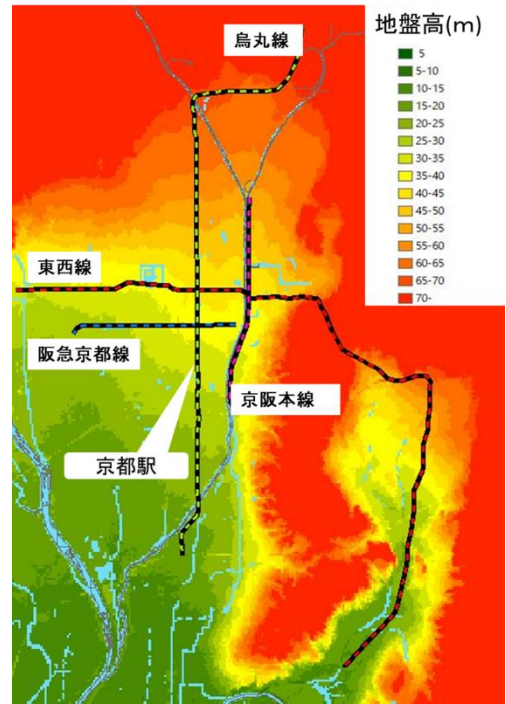


図-1 計算領域

表-1 京都市の地下鉄駅と出入口の個数

烏丸線	出入口	東西線	出入口	阪急京都線	出入口	京阪本線	出入口
国際会館	5	太秦天神川	4	西院	5	出町柳	7
松ヶ崎	2	西大路御池	4	大宮	7	神宮丸太町	4
北山	4	二条	3	烏丸	14	三条	14
北大路	6	二条城前	3	河原町	12	祇園四条	6
鞍馬口	2	烏丸御池	8			清水五条	5
今出川	5	京都市役所前	7			七条	6
丸太町	7	三条京阪	6				
烏丸御池	7	東山	2				
四条	4	蹴上	2				
五条	6	御陵	4				
京都	34	山科	7				
九条	4	東野	6	醍醐	3		
十条	3	柳辻	2	石田	4		
くいな橋	2	小野	2	六地藏	4		
					合計	41駅	242箇所

3. 京都市の地下空間の入口調査

京都市における地下空間を考慮した都市浸水解析を実施するために、平成30年7月26日、27日に、京都市にある地下鉄および地下街の入口の情報を調査した。表-1に対象とした駅を、図-2に入口で測定した諸量を示す。表-1から地下への入口の数は、京都駅が際立って多い。また、破堤地点よりも地盤高が低く、南下してくると考えられる氾濫水に対して、京都駅は北側に駅の入り口が多くある。したがって、仮に浸水が発生した場合浸水の様子にも影響を受けることはもちろんであるが、地表面から地下への水の流入は、京都駅からのものが最も多くなると考えられる。また、図-3で示した阪急京都線烏

丸駅と地下鉄烏丸線の四条駅は一つの駅とし、阪急京都線河原町駅は別の一つの駅として表現した。

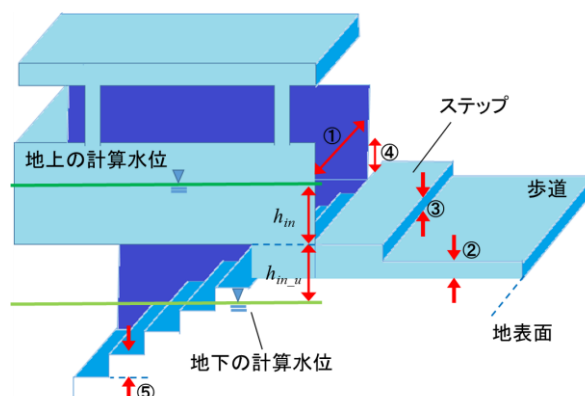
4. 計算条件および計算結果

(1) 計算条件

本研究では京都市の鴨川流域を対象に、鴨川の洪水が越流した場合の想定氾濫解析を実施する。このような研究を遂行するためには、鴨川の流域における流出解析および洪水流解析を実施して、河川断面の洪水に対する安全度を評価し、仮に危険が想定される場所の越流流量を求めて想定氾濫解析を実施することが望ましいが、本研究では、まず、地下鉄を有する京都市内の浸水特性を明らかにすることを目的とした。そこで、本研究では、戸田ら¹³⁾の研究と同様に、一定の越流流量(50m³/s)三条大橋～御池大橋間(約200m)の右岸側(図-4の越流箇所Ⅰ)から180分間流入させ、10時間の氾濫計算を実施した。また、越流箇所の違いによる浸水状況の比較を行うために、図-4に示した他2地点の越流箇所(越流箇所Ⅱと越流箇所Ⅲ)を想定し、氾濫計算を実施した。なお、越流箇所Ⅱと越流箇所Ⅲのその他の計算条件は同じである。

(2) 計算結果

計算結果として、越流発生から1時間後、5時間後、



調査項目	
地下入り口の場所確認	地下～駅構内の階段1段の高さ:⑤
入り口の幅(B):①	地下～駅構内の階段の段数
地表面から歩道までの高さ(d2):②	駅構内～ホームの階段1段の高さ
歩道からステップまでの高さ(d3):③	駅構内～ホームの階段の段数
止水板の高さ(d4):④	

図-2 入口の計測の諸量



図-3 特殊な駅のモデル化

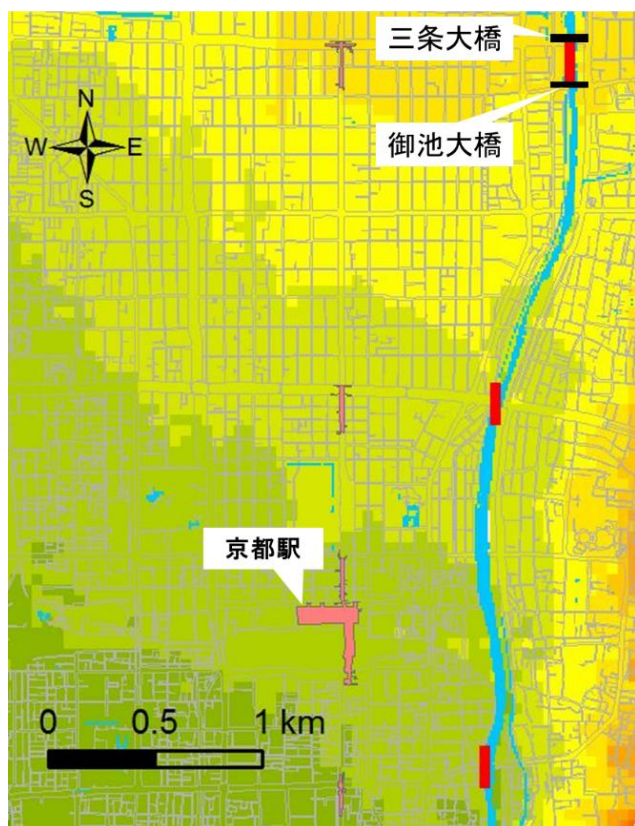


図-4 越流箇所

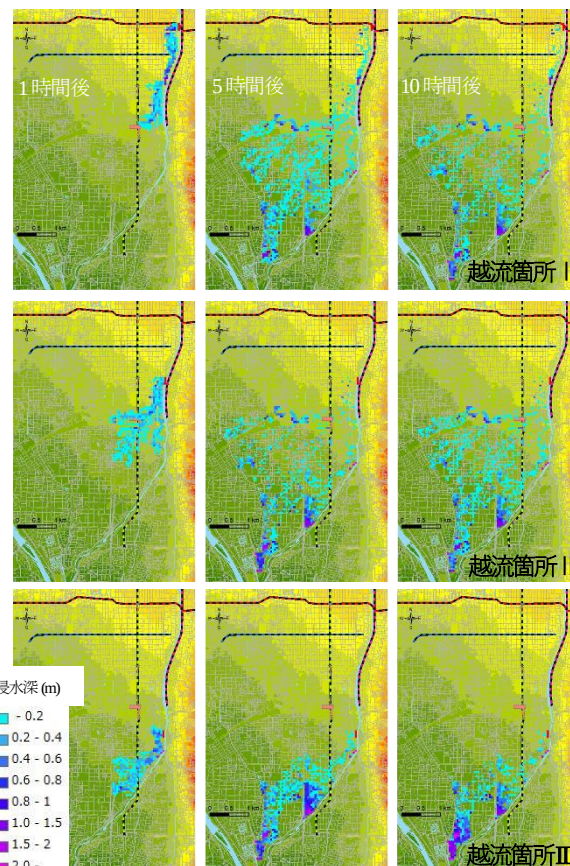


図-5 各時間ごとの浸水深

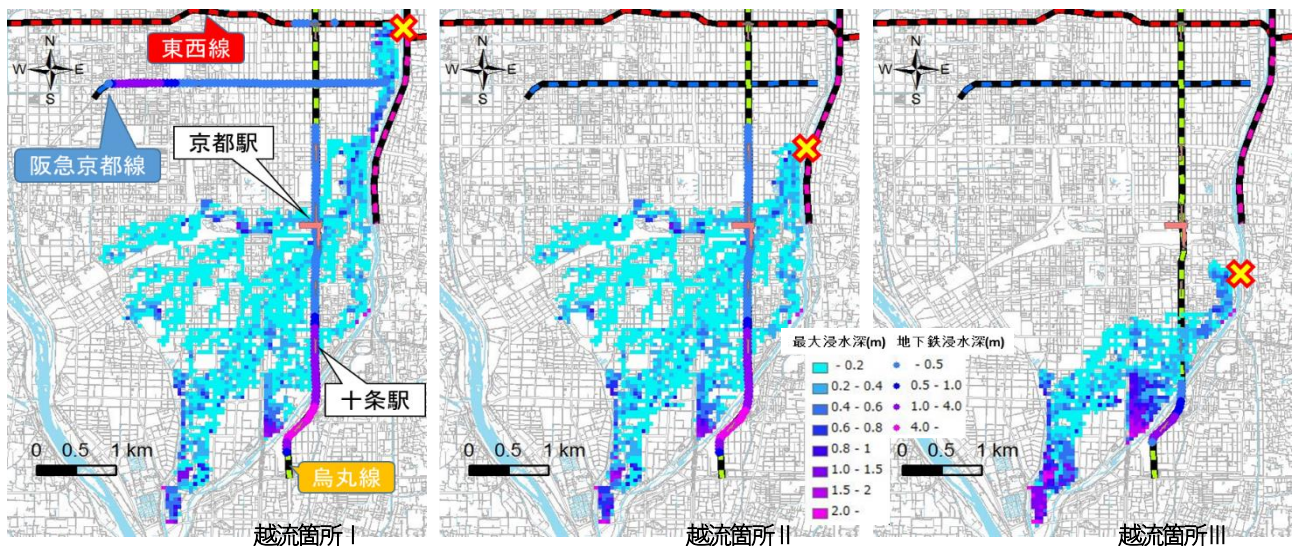


図-6 最大浸水深と地下浸水深の様子

10 時間後における浸水深を図-5 に、最大浸水深の分布と地下鉄の浸水の様子を図-6 に示す。これらの図から越流した氾濫水は鴨川沿いを南下し、越流箇所 I および越流箇所 II の条件では、京都駅北部で氾濫水が西側へ広がる様子が分かる。このことから、越水箇所 I と越水箇所 II の最大浸水深の分布は京都駅付近から南西で同様の結果となった。一方、越水箇所 III は、京都駅よりも南に位置しており、西側への浸水も大きくないことが分かる。このように越水箇所に伴う浸水の違いが明らかとなった。また、越水箇所 I と越水箇所 II に比べて、越水箇所 III の結果は、浸水深が深いことが分かる。これは、氾濫水の集中など地形とそれによる浸水特性に加え、地下への水の流入水量の違いが影響すると考えられる。ここで、図-6 にある地下浸水の様子をみれば、越水箇所 I では東西線、阪急京都線と烏丸線で浸水が生じ、阪急京都線と烏丸線の浸水が大きい。これは、地盤高の影響で、浸水域が破堤地点から西に広がるよりも南下する流量が多いことから東西線への流入量が抑えられ、烏丸線、阪急京都線への流入が増加したと考えられる。越水箇所 II では烏丸線のみが浸水している状況となっている。さらに、越水箇所 III では烏丸線のみ浸水となっており、その浸水の様子は越水箇所 II の結果より小さい。これらのことから、越水箇所の違いにより、地下空間の浸水の様子が大きく異なることが示された。ここで、越水箇所 I における、計算終了時の烏丸線の浸水の様子を図-7 に示す。本図から、本計算条件の場合、十条駅から南で地下浸水が生じていることが分かる。この様子は図-6 から理解できる。なお、越流箇所 I の計算結果は戸田ら¹³⁾の計算結果と比較した結果、地上の氾濫解析の格子サイズが異なることから完全に一致する結果とはならなかったが、地上の浸水の拡がりの様子および地下鉄の浸水の様子が同様であり、解析モデルの妥当性が確認できた。

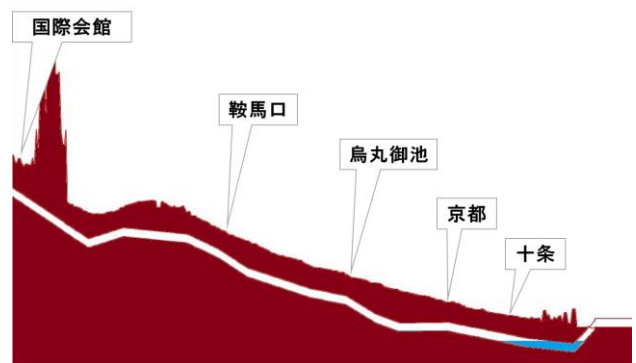


図-7 地下浸水の様子（越流箇所 I）

5. 止水板を考慮した数値実験

地下空間の入口にある止水板（現地調査の情報を使用（場所により50cm～1mの値））を考慮し、4. (1)と同様の計算条件を用いて、浸水解析を実施した。図-8に越流箇所毎の最大浸水深と地下鉄内の浸水の様子を示す。本図から、地下浸水が生じていることが分かるが、止水版を考慮していない図-6と比べると、越水箇所 I では、若干浸水域が広がっており、東西線および阪急京都線は地下鉄の浸水が発生していないことが分かる。計算における最大浸水深は、東西線付近では20cm以下、阪急京都線付近では約80cmほどであり、止水版があることによって浸水は発生しなかったと考えられる。また、表-2に、越水箇所 I における駅で生じた地下への流入水量を示す。本表から、烏丸線については京都駅以外からの流入がなくなり、京都駅においても流入流量が止水板無しの場合の約8%に減少していることが分かる。さらに、越水箇所 III の場合、止水版を設置することで地下浸水は発生しなかった。これらのことから、止水版の設置の重要性が改めて示された。

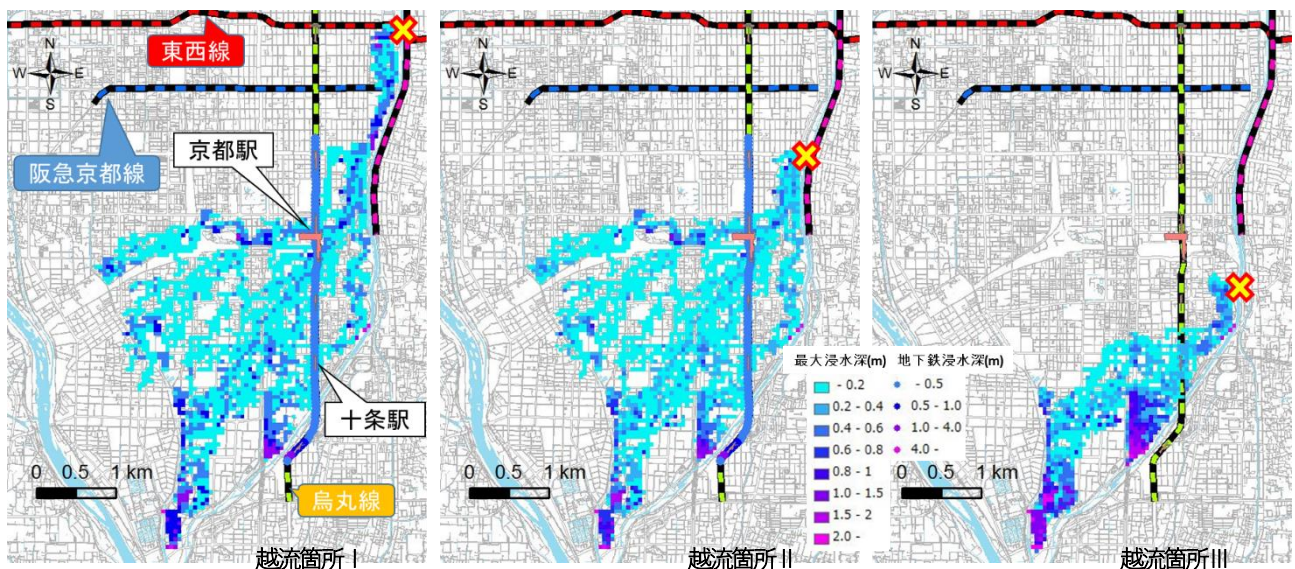


図-8 最大浸水深と地下浸水深の様子(止水版有り)

6. 格子スケールの影響評価

本研究では、河川から越水が生じ、それが都市域に広がる過程で地下街・地下鉄に流入する可能性があることから、それらの特徴を抽出する目的で数値解析的な検討を行っている。これまで議論してきた地上の氾濫解析では50mの分解能を持つ計算格子を用いており、道路に沿う流れの表現や地下空間の入口幅の数mのスケールからは解析精度が粗いといえる。そこで、ここでは、地表面の氾濫解析に10m格子を適用し、解析精度を上げて、地下空間を有する都市浸水解析に与える影響を検討する。計算条件は4。(1)と同様であり、越流箇所も同じ場所を設定した。越流箇所毎の最大浸水深の分布と計算終了時の地下鉄浸水の様子を図-9に示す。また、止水版を考慮した場合の同様の計算結果をを図-10に示す。図-9と図-7を比較すると、図-9の越流箇所Iと越流箇所IIの計算結果には、図-7でみられた京都駅北部から西側への氾濫水の拡がりが見えていない。その一方で、越流箇所IIIでは、図-7と図-9は同様の最大浸水深の分布を示している。また、地下浸水の様子をみれば、10m格子を用いて計算した方は東西線で浸水がみられず、阪急京都線と烏丸線では地下鉄の浸水エリアが大きくなっている。本研究の計算条件では、地表面氾濫解析の格子幅の違いにより、越流箇所によって、地表面の浸水深の分布と地下空間への水量に違いが生じた。また、10m格子を用いた場合でも、地下浸水に対する止水版の効果が示された。

7. おわりに

本研究では、京都市を対象に、大規模浸水における地下空間を有する都市の浸水について数値解析的な検討を

表-2 流入流量(m³) (越流箇所 I)

駅名	五条	京都	十条	京都市役所	河原町
止水版無し	2	60294	1417	800	10775
止水版有り	0	4890	0	0	0

行った。特に地下鉄の浸水による水の拡がりを定量的に明らかにした。本研究で得られた成果を以下に記す。

- 1) 洪水越流による都市浸水、地下への流入と地下鉄による浸水の拡がりを求める数値解析モデルを、京都市鴨川の洪水氾濫に適用した。解析結果は戸田ら¹³⁾の計算結果と同様であり、解析モデルの妥当性が示された。
- 2) 越流箇所が異なる場合の京都市の浸水特性を考察した。越流箇所Iおよび越流箇所IIの場合、鴨川右岸を南下した氾濫水は京都駅北部で西にも広がり、京都市の南西部へ広域に拡がること示された。越流箇所IIIでは、越流箇所Iおよび越流箇所IIと異なる拡がりをみせた。また、越流箇所Iでは、地下鉄東西線や阪急京都線、地下鉄烏丸線に地下浸水がみられた。一方、越流箇所IIと越流箇所IIIでは烏丸線に浸水がみられた。
- 3) 止水版が有る場合の計算結果では、止水版が無い場合に比べて地下空間の浸水が小さくなっており、止水版の効果が改めて示される結果となった。
- 4) 地表面の氾濫解析に用いる計算格子の影響を検討するため、10m格子を用いて同様の計算を行い、50m格子を用いた解析との比較を行った。その結果、越流箇所Iおよび越流箇所IIでは、10m格子を用いた解析結果では浸水が西側へ拡がらない様子となった。また、10m格子を用いた方が、地下空間への流入水量も多くなった。これら

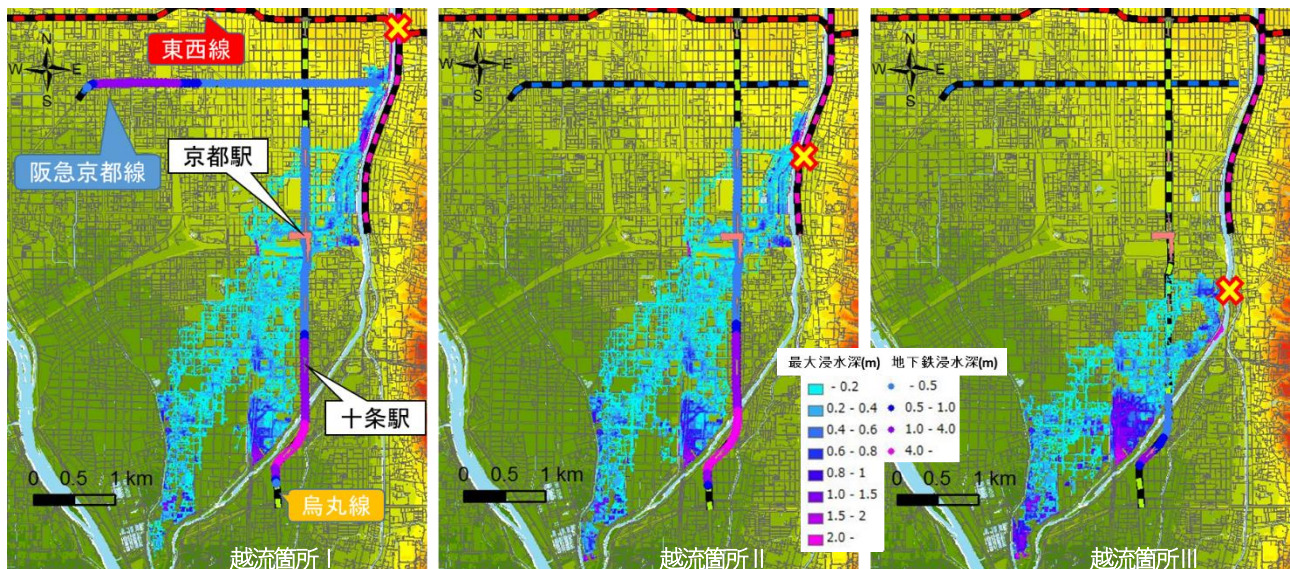


図-9 最大浸水深と地下浸水深の様子(10m 格子の場合、止水版無し)

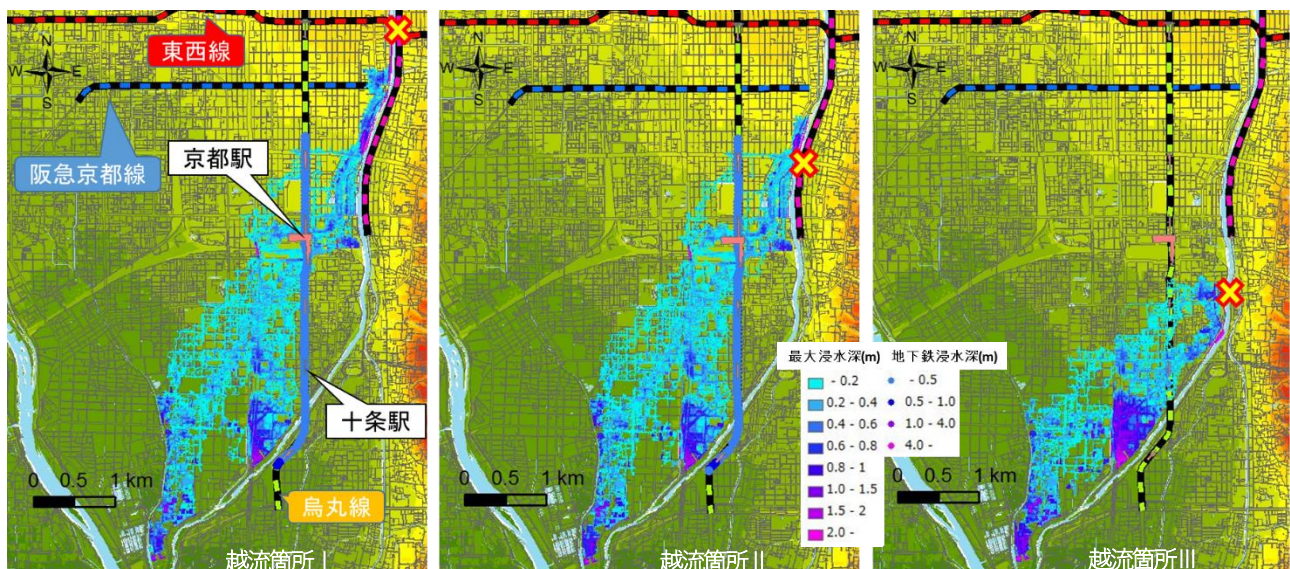


図-10 最大浸水深と地下浸水深の様子(10m 格子の場合、止水版有り)

は、微地形の効果が影響を与えたものとする。したがって、計算量の負荷というデメリットはあるが、地表面氾濫格子の大きさを小さくして、地上の氾濫の様子を適切に表現し、地下空間への流入水量を適切に見積もることは重要であるといえる。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) 尾崎平, 浅野統弘, 石垣泰輔, 戸田圭一：短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1417-I_1422, 2014.
- 2) 関根正人, 河上展久：都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析, 水工学論文

集, 第 47 巻, pp889-894, 2003.

- 3) 浅野統弘, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一：南海トラフ巨大地震による津波来襲時の大規模地下空間の浸水予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1435-I_1440, 2014.
- 4) 関根正人, 池田遼：東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1429-I_1434, 2014.
- 5) 関根正人, 関根貴広：東京都心部の地下空間への氾濫水の流入危険度とトンネル内の浸水域拡大過程に関する検討, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.72, I_1369-I_1374, 2016.
- 6) 岡部良治, 寺田光宏, 土井峻平, 石垣泰輔：外水氾濫における地下鉄軌道を伝播する氾濫水の挙動予測に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会, II-116, 2016.

- 7) 武田誠, 島田嘉樹, 川池健司, 松尾直規: 庄内川の想定破堤氾濫による地下空間への流入水量の検討, 第20回地下空間シンポジウム論文・報告集, pp155-164, 2015.
- 8) 武田 誠, 西田貢士郎, 村瀬将隆, 川池健司: 地下鉄を考慮した都市の浸水解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第21巻, pp.153-160, 2016.
- 9) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田 誠, 川池健司, 松尾直規: 地下鉄を考慮した名古屋と大阪の大規模浸水解析, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, I_1441-I_1446, 2017.
- 10) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田 誠, 川池健司: 洪水破堤による三大都市圏の浸水解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, pp.97-102, 第23巻, 2018.
- 11) 武田 誠, 村瀬将隆, 三木研弥, 中島勇介: 福岡市の地下空間を考慮した浸水解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第24巻, pp.18-26, 土木学会, 2019.
- 12) 渡辺政広, 江藤剛治, 室田明: 取付管の調圧効果を考慮した下水道管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, 第411号II-12, 1989.
- 13) 戸田圭一, 大八木亮, 井上和也, 間嶋信嗣: 都市水害時の地下空間の浸水過程について, 京都大学防災研究所年報第47号B, pp.293-302, 2004.
- 14) yahoo!地図 <https://map.yahoo.co.jp>

INUNDATION ANALYSIS CONSIDERING THE WATER BEHAVIOUR OF UNDERGROUND SPACE IN KYOTO CITY

Daisuke SATO, Makoto TAKEDA, Masataka MURASE and Daiki YABUSHITA

Recently, the risk and the countermeasures of the water disaster has been examined for the underground space in urban areas. In metropolitan areas subways and underground shopping centers are highly constructed. If large scale inundation occurs there, flood damage becomes serious in the underground space. In Kyoto city, which is the target area of this study, there is a risk of inundation due to the Kamogawa river flood, and Kyoto city has four subway line and underground shopping center mole. Moreover, in our study group, the urban inundation analysis model was developed with consideration of the analysis on the water behavior in the underground space and subway lines. In this study, the developed analysis model was applied to the inundation situations in Kyoto city. From this study, analysis results show the feature of the inundation in Kyoto city. Moreover, the effect of the water stop board at the entrance of the underground space are shown. In addition, in the inundation analysis, the analysis results using 10m grid are different from the analysis results using 50m grid, so the importance of detailed analysis is shown clearly.

想定最大降雨による内水氾濫時の地下街の 浸水危険度について

PLUVIAL FLOOD HAZARD OF UNDERGROUND SPACES BY EXTREME HEAVY RAINFALL

太田和樹¹・石垣泰輔²・尾崎 平³・戸田圭一⁴

Kazuki OTA, Taisuke ISHIGAKI, Taira OZAKI, Keiichi TODA

In recent years the number of occurrences of local downpours has increased. In the future, it is predicted that the occurrence frequency of local heavy rainfall increases. In an urban area, if such rain occurs, the inundation of underground space is induced. The influence of inundation damage to the underground space is affected by rainfall patterns. So, model rainfall with assumed maximum intensity and pattern of rainfall was made and the ground surface and underground space inundation were calculated by InfoWorks ICM. Safety of evacuation was tased by using the specific force per unit width, which is calculated with velocity and water depth. As a result, in the assumed maximum rainfall, inundation areas of 1 m or more depth observed on the ground. In the subway, flood depth more than 5 meters was seen. It was found that the difference of rainfall pattern affects safe evacuation from underground spaces.

Key Words : *underground space, extreme rainfall, safe evacuation, inundation ,flooded simulation*

1. はじめに

近年、局所的な短時間の集中豪雨が発生するようになった。例えば、福岡水害(福岡県, 1999 年)では、1 時間降雨量が 77mm, 4 時間の総降雨量は 128.5mm を記録した。福岡県において、床上浸水 1273 棟, 床下浸水 4890 棟などの被害が発生した。東海豪雨(愛知県, 2000 年)では、愛知県東海市で 1 時間降雨量は 97mm, 2 日間で 567mm を記録する豪雨となった。

一方、平成 20 年 8 月末豪雨(愛知県, 2008 年)では、愛知県岡崎市において 1 時間降雨量が 146.5mm を記録した。東海地方だけでなく日本各地で記録的な大雨となり、浸水害、土砂災害や停電が発生し、交通機関にも大きな影響が及んだ。平成 25 年 8 月 27 日(2013 年)には大阪府で集中豪雨により内水氾濫が生じた。大阪管区气象台(大阪市中央区)によると、1 時間に 77.5mm を記録した。これは大阪市の過去最大クラスに並ぶ記録的な降雨であった。床上・床下浸水が発生したほか、道路の冠水とい

った被害が発生し、交通機関にも影響が及んだ。また、大規模地下空間のある大阪市内では、人的被害はなかったが一部で地下への流入があった。

このように、短時間で下水道の能力を上回る降雨が発生した場合、内水氾濫が起こり、都市部では地下空間への浸水が懸念される。都市域では貴重なスペースを有効活用するために、ビル地下階や地下鉄・地下街といった地下空間の利用が発達している。さらに、地下空間を有する都市域では、内水氾濫によって生じた水が地下へ流入する恐れがある。実際に福岡水害では、御笠川が氾濫し福岡市内が浸水した。その結果、地下鉄や JR の運休、道路の冠水だけでなく、地下階に取り残された従業員が亡くなった。国内で初めて地下空間での人的被害が発生したため、地下空間の安全性が懸念されるようになった。

また、近年、局所的な短時間豪雨の発生回数や雨量の増加が確認されている。さらには、今後、局所的な短時間の集中豪雨の発生頻度が増えることや降雨量が増加することが予測されている。そのため、想定した降雨より

キーワード：地下空間、想定最大降雨、安全避難、内水氾濫、氾濫解析

¹学生会員 関西大学大学院理工学研究科 Student, Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, (E-mail:k187771@kansai-u.ac.jp)

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University.

³正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 Associate Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University.

⁴フェロー会員 京都大学大学院工学研究科教授 Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University.

も多い雨量となり、予想しない浸水被害にみまわれることがある。例えば、平成 29 年 7 月九州北部豪雨(九州北部地方, 2017 年)では、大分県日田市において内水ハザードマップの浸水区域でない地域でも浸水がみられた。今後、降雨量の増加が予測されていることから、このようなことがさらに起こる可能性がある。

そこで本研究では、大規模な地下空間を持つ大阪の海老江処理区を対象とし、複数の降雨形態を用いて内水氾濫解析を行った。本研究では内水氾濫の対象降雨として、国土交通省の想定(洪水, 内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法より作成した降雨データを用いる。浸水計算には、InfoWorks ICMを用いることで、下水管路網を考慮した解析を行い、地下空間の水深や流速を求めた。これらを用いて、単位幅比力を求め、地下空間の安全避難度評価を行った。この安全避難度評価とInfoWorks ICMの浸水解析から、想定最大規模の降雨が発生した場合の地下空間の浸水危険度評価について検討した。

2. 検討概要

(1) 対象地域の概要

本研究では、大阪市の海老江処理区を対象とする。海老江処理区は、大阪市内にある 12 の処理区の 1 つであり、北区の大部、福島区、此花区の一部の下水処理を担っている。下水処理場の計画処理区面積は 12.15km²、処理能力は 326000m³/day である。また、処理方式には嫌気好気活性汚泥法が採用されており、放流先は海老江処理区の北側を流れる新淀川や西側を流れる正連寺川となっている。処理区内には、北野抽水所、出入橋抽水所、天満堀川抽水所、そして海老江下水処理場の 4 つの抽水所及び処理場が存在する。それぞれの排水能力は、北野抽水所が 28m³/s、出入橋抽水所が 7m³/s、天満堀川抽水所が m³/s、そして海老江下水処理場が 60m³/s である。

この処理区内は東の地盤高は比較的高く、西に向かって低くなっていることがわかる。特に中央部に位置する梅田は、周辺部に比べて 1~2m ほど低くなっている。対象地域には大規模な地下空間が存在する。この大規模地下空間は、東西、南北方向にそれぞれ 1km 四方広がっており、日本を代表する繁華街の 1 つである。周辺には、百貨店やホテル、ショッピングモールやオフィスビルなどが立ち並んでいる。そのため、多くの人が利用し、人々の活動の拠点となっている。また、JR、阪急、阪神、大阪市営地下鉄といった鉄道が乗り入れており、地下街周辺に 7 つの駅が存在している。図 2 に対象となる路線図を示す。このうち、地上駅が 2 駅、地下駅が 5 駅となっている。また、この他にも海老江処理区には地下駅が

16 存在する。また、JR 東西線のように隣接する下水処理区と地下鉄を通じて繋がっている。

海老江処理区の地下空間には、ホワイティうめだ・ディアモール大阪・堂島地下センターといった 7 つの地下街が存在する。また、地下街周辺には地下駅が位置している。いずれの駅も大規模地下街と接続しており、氾濫水が地下に流入した場合、地下街から地下駅、地下駅から地下街のように氾濫水が移動する恐れがある。

本研究では、この梅田地下街と地下鉄の一部を対象に検討を行った。対象とした地下街を図 1 に、地下鉄路線を図 2 に示す。

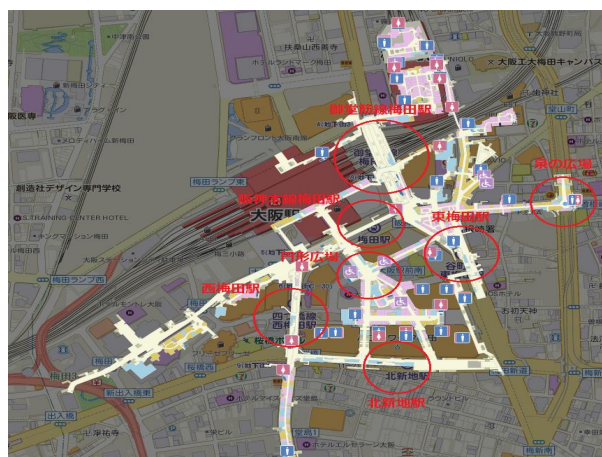


図 1 対象地下街の位置

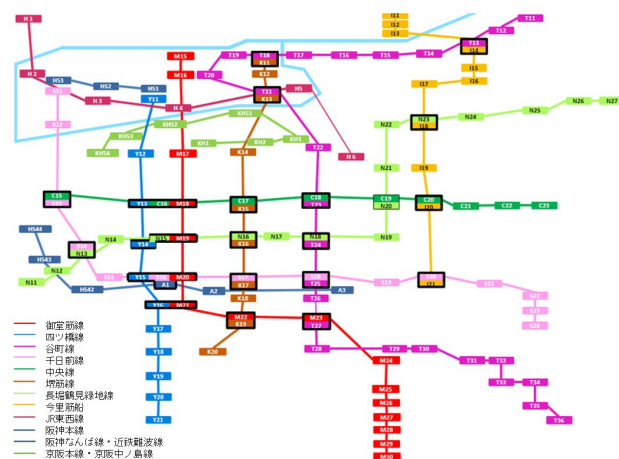


図 2 対象路線の路線図

(2) 外力の設定

森兼ら¹⁾によって短時間の集中豪雨による被害の危険性が明らかにされている。また、今後、局所的で短時間の集中豪雨は、発生頻度や降雨量の増加が予測されている。そこで本研究では、温暖化やヒートアイランド現象の影響により、今後起こりうる最大の短時間集中豪雨を想定したシミュレーションを行うために、短時間豪雨

のモデル降雨の作成を行った。モデル降雨の作成には、国土交通省 水管理・国土保全局の浸水想定(洪水, 内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法²⁾と黄ら³⁾によって作られたモデル降雨を用いた。国土交通省の浸水想定(洪水, 内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法²⁾をもとに対象地域における想定最大規模降雨を設定する。降雨量の設定にあたり、日本を降雨特性の似ている 15 の地域に分け、それぞれの地域において観測された最大の降雨量により設定する。地域区分を表 1 に示す。

表 1 地域区分(国土交通省水管理・国土保全局より)

⑧	近畿	三重県のうち、淀川水系に属する河川の流域、滋賀県(⑩に掲げる地域を除く。)、京都府のうち、淀川水系に属する河川の流域、大阪府、兵庫県のうち、明石川の河口点から、明石川水系に属する河川の流域及び加古川水系に属する河川の流域の東側を経て、大阪府との交会点に至る線以東の地域並びに明石川の河口点から南東に引いた線以東の島しょ部、奈良県のうち、淀川水系に属する河川の流域、大和川水系に属する河川の流域及び紀の川水系に属する河川の流域並びに和歌山県のうち、紀の川の河口点から、紀の川水系に属する河川の流域の南側を経て、奈良県との交会点に至る線以北の地域及び和歌山市の島しょ部	淀川、大和川、紀の川
---	----	--	------------

対象地域である海老江処理区は⑧の近畿に該当する。そのため、降雨量の設定には、⑧近畿における最大降雨量を用いる。次に、対象地域の面積と降雨継続時間、表 2 から想定最大規模降雨を算定する。

表 2 ⑧近畿の最大降雨量(国土交通省水管理・国土保全局より)

1 時間		2 時間		3 時間		6 時間	
面積	雨量	面積	雨量	面積	雨量	面積	雨量
1	147	1	225	1	305	1	471
32	130	32	225	32	305	32	471
64	105	64	198	64	267	64	413
127	99	127	155	127	207	128	334
255	91	255	133	255	187	255	289
509	78	509	117	510	160	510	222
763	68	763	106	765	141	765	203
1,018	62	1,014	98	1,015	133	1,019	184
1,521	56	1,521	88	1,521	120	1,526	171
2,027	52	2,027	78	2,032	110	2,031	170
3,044	47	3,047	71	3,040	91	3,035	162
4,063	44	4,063	67	4,066	83	4,047	154
5,081	42	5,080	62	5,084	78	5,060	146
6,099	39	6,097	58	6,098	73	6,074	139
7,113	36	7,112	55	7,101	71	7,089	136
8,126	33	8,128	51	8,119	68	8,111	133
12,177	26	12,180	42	12,177	60	12,178	115
14,179	23	14,179	38	14,179	56	14,179	107

海老江処理区は面積は 12.15km²、降雨継続時間は 1 時間とする。表 2 の面積において対象地域と一致するものがないため、一次補間法によって降雨量を求める。表 2 より、面積 1km²のとき降雨量 147mm、面積 32km²のとき降雨量 130mm であるから、面積 12.15km²のときの降雨量は、141mm となった。

次に、対象地域における最大降雨量から黄ら³⁾により作られたモデル降雨の引き伸ばしを行った。黄ら³⁾は、大阪市における降雨強度式から中央集中型の時間降雨 60mm のモデル降雨を作成している。この降雨全体を 2.3 倍し、引き伸ばしを行った。作成したモデル降雨を図 3

に示す。本研究では、降雨形態を変えて解析を行っていくために、中央集中型のハイトグラフをもとに前方集中型と後方集中型のハイトグラフも作成した。また、各降雨データは時間間隔 5 分、降雨継続時間 2 時間のハイトグラフである。最大の降雨強度は 345.6mm/h、2 時間の雨量は、198.0mm となった。これら 3 つのハイトグラフを用いて、内水氾濫の浸水解析を行った。

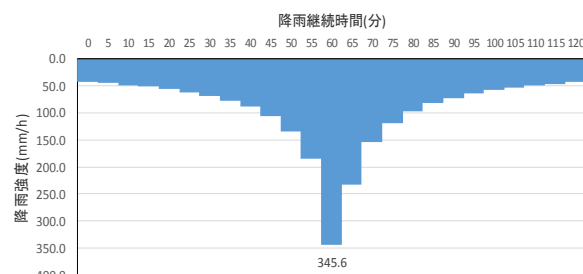


図 3 時間降雨 141mm、中央集中型のモデル降雨

3. 解析モデル

(1) 内水氾濫解析モデルの概要

内水氾濫は、下水道網の処理能力を上回る降雨が起きた際に、マンホール等から溢水が発生する。この現象を再現するために、下水道管路網を考慮できるモデルが必要である。本研究では、地下空間への氾濫水の流入量を計算するために InfoWorks ICM を用いた。InfoWorks ICM は、河川と下水道の統合解析を行うことができるシミュレーションソフトウェアである。下水道管路網を考慮し、地上の氾濫解析を行うことができる。なお、本研究では下水道管渠間の水のやり取りをモデル化した数値解析モデルと地表面の氾濫解析モデルを用いた。

下水道管渠間の水のやり取りに関しては、降雨損失考慮後の有効降雨が地表面を流れ、マンホールへ流入する量を算定する地表面流出モデルと、それにより算出された各マンホールでのハイドログラフを用いることによって管路の流れを解析できる下水道管路モデルで表される。本研究では、地表面流出モデルに単一線形貯留池モデルを用いた。

(2) 安全避難度評価

地下が浸水した際の危険度を評価する方法について説明する。地下空間は階段部分で流速が速く、通路部分で水深が高くなることから、これらを同時に評価する指標が必要となる。そこで大西ら⁴⁾の実験より、流体力だけでなく水深を加える単位幅比力が検討された。これは、水圧の影響を考慮して避難困難度を評価できる。そこで

本研究では、地下空間で安全に避難できるかを判断する手段として単位幅比力 M_0 を用いた。以下に式を示す。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (1)$$

u ：流速， h ：水深， g ：重力加速度 である。InfoWorks ICM 解析結果より得られた流速と水深を用いて評価する。ここで、それぞれの属性別の指標を表 3 に示す。本研究では、最も早く避難が困難となる高齢女性を対象とし、安全に避難できる限界である $0.08\text{m}^3/\text{m}$ 、自力での避難が困難となる $0.16\text{m}^3/\text{m}$ を用いて評価を行った。

表3 避難困難度指標

	非浸水時の 歩行速度 (m/s)	避難困難度指標 (単位幅比力)	
		安全避難限界 (m^3/m)	自力避難困難 (m^3/m)
成人男性	1.4	0.125	0.250
成人女性	1.1	0.100	0.200
高齢男性	1.1	0.100	0.200
高齢女性	0.8	0.080	0.160

(参考：歩行避難の困難度指標)

4. 解析結果

(1) 地上の浸水結果

下水道処理施設には、雨水を強制的に排除するためにポンプ場を設置している。しかし、排除能力を上回る雨が短時間に降った場合には、排水ポンプが機能を停止する恐れがある。本研究では排水ポンプの稼働時と停止時についての検討を行う。前述した3つの降雨形態を用いて、計6ケースを行った。いずれの場合も降雨開始を解析開始とし、12時間後まで解析を行った。

ポンプが停止している場合の地下街の浸水深の時間変化を図4、図5、図6に示す。図4より、前方集中型の場合、1時間後に対象地域のほぼ全域で浸水が見られる。2時間後にはさらに浸水が広がっている。特に、西側では浸水深が1mを超える場所もある。6時間経過すると東側の氾濫水は引いているが中央部と西側では残ったままである。12時間後も西側では依然として氾濫水が残っていた。図5より、中央集中型の場合、1時間後に処理区内で薄っすら氾濫水が見られる。2時間後浸水は全体に拡がり、浸水深が0.75mを超える箇所が多くなっている。処理区内の西側や中央部の一部で浸水深1mを超えている。3時間後には、東側の浸水深が浅くなっており、氾濫水が引き始めている。6時間後には東側の氾濫水はほぼ収束しているが、12時間経過しても西側では氾濫水が残り、0.5m前後の浸水深となっている。図6より、後方集中型の場合、1時間後に処理区内で0.01m程の浸水が見られる。2時間後には浸水面積・浸水深は増加し、阪急梅田駅付

近や処理区の西側では水深0.5mを超える場所もある。3時間後には、西側で浸水深が増している一方東側では、浸水面積が減少している。その後中央集中型と同様に、東側で氾濫水が収束するものの、西側で氾濫水が残っているという結果が得られた。

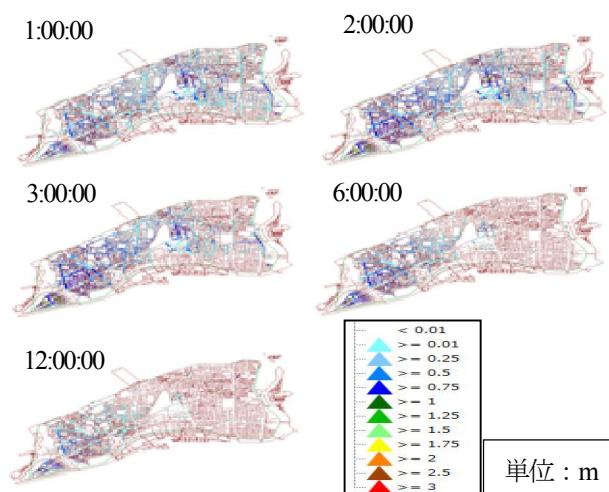


図4 地上の浸水結果(時間降雨 141mm 前方集中型)

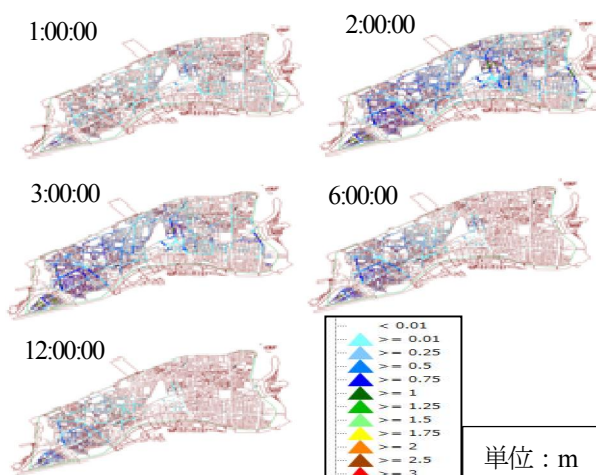


図5 地上の浸水結果(時間降雨 141mm 中央集中型)

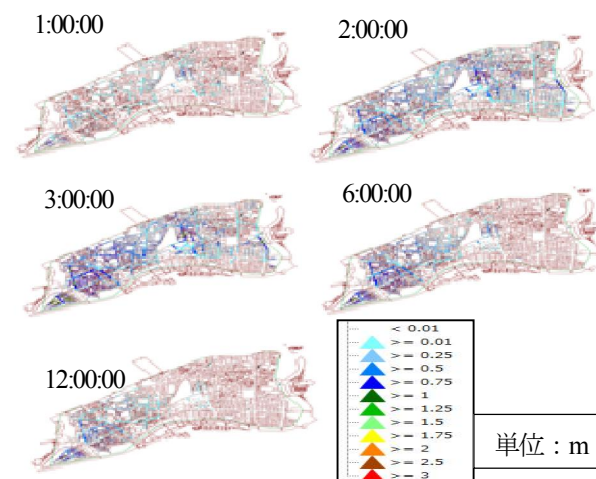


図6 地上の浸水結果(時間降雨 141mm 後方集中型)

(2) 地下の浸水結果

地下の浸水結果では、対象とした地下街と地下鉄における浸水深の結果を述べる。また、紙面の制約により、地下街、地下鉄それぞれ1つの箇所について示す。地下街は泉の広場、地下鉄は御堂筋線とする。

ポンプが停止している場合の地下街の浸水深の時間変化を図7、図8、図9に示す。図7より、前方集中型では1時間後には浸水し始める。その後、浸水深は上昇していき最大で約1.3mにまで達する。その後は、全ての地下街で浸水深は減少していき5時間後には1つの地下街を除き、1mほどに収束する。そのため、氾濫水は12時間経過後も残り続けることが分かる。図8より、中央集中型でも前方集中型と同様の浸水深の推移が見られた。前方集中型と異なるのは、浸水深と流入開始時刻である。1時間経過後から浸水が見られ、最大で約1.5mにまで浸水深が増加する。これは、前方集中型よりも大きな値となっており全ての地下街でこのような傾向が見られた。図9より、後方集中型でも、先に述べた2つの降雨形態と同じ浸水深の変化が見られた。氾濫水の流入は中央集中型よりも遅くなることが分かった。浸水深に関しては、中央集中型と同様の値となる。全ての降雨形態で地下街-2.1が他の地下街よりも浸水深が低くなっている。これは、地下街-2.1が離れた場所にあるためと考えられる。これらのことから、泉の広場において中央集中型、後方集中型での浸水深が最も大きな値となることが分かった。また、降雨形態によって氾濫水が流入する時間も異なり、降雨のピークが早いほど流入も早くなることも分かった。

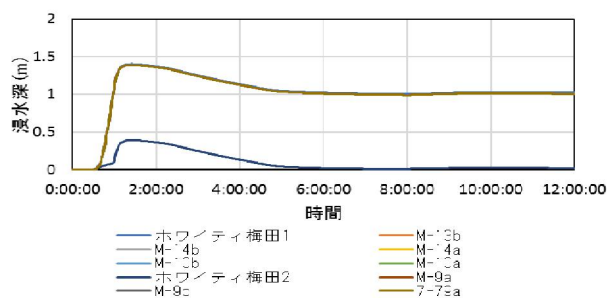


図7 浸水深の時間変化(泉の広場 前方集中型)

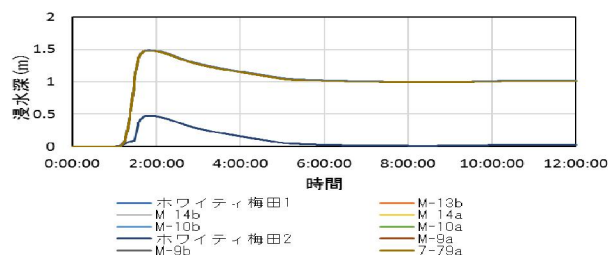


図8 浸水深の時間変化(泉の広場 中央集中型)

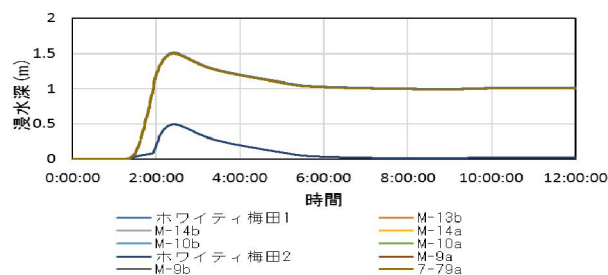


図9 浸水深の時間変化(泉の広場 後方集中型)

ポンプが停止している場合の地下鉄の最大浸水深の結果を図10、図11、図12に示す。図10より、前方集中型では、中津駅、梅田駅、淀屋橋駅、本町駅、心斎橋駅、なんば駅、大国町駅、動物園前駅で浸水が見られた。特に浸水深の大きな駅は中津駅、梅田駅、淀屋橋駅である。最大浸水深は、4mを超えていることが分かった。図11より、中央集中型でも前方集中型と同様の駅で浸水が見られた。最大浸水深は前方集中型とほとんど変わらない。図12より、後方集中型でも浸水が見られた駅は変わらず、また最大浸水深も同様の値となった。浸水が動物園前駅までしか見られなかったのは、隣駅である天王寺駅が比較的高い位置にあるためである。このため、氾濫水は動物園前駅までしか流入しなくなる。また、中津駅、梅田駅、淀屋橋駅での浸水深が大きくなるのは他の駅より地盤高の低い場所に存在するからである。隣接する駅が高く、梅田駅などの位置が低い場合氾濫水が溜まりやすくなり浸水深が高くなると考えられる。また、中津駅と西中島南方駅の間にトンネル坑口が存在するため、そこからの流入も考えられる。これらのことから、御堂筋線では地盤高の低い位置にある駅での浸水が見られた。天王寺駅は高い位置に駅があるため浸水の無いことが分かった。このため、天王寺駅より南にある駅でも浸水は見られない。

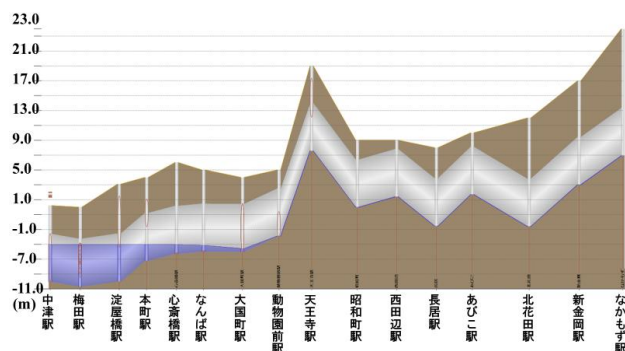


図10 最大浸水深(御堂筋線 前方集中型)

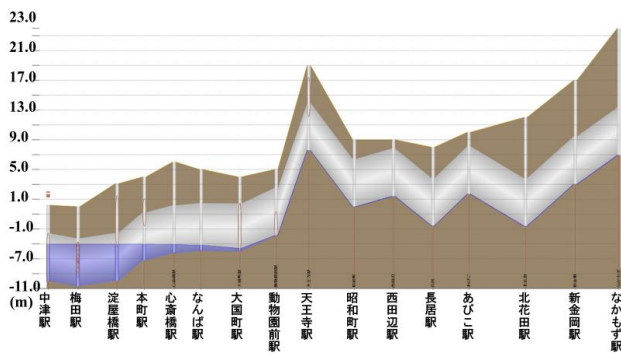


図 11 最大浸水深(御堂筋線 中央集中型)

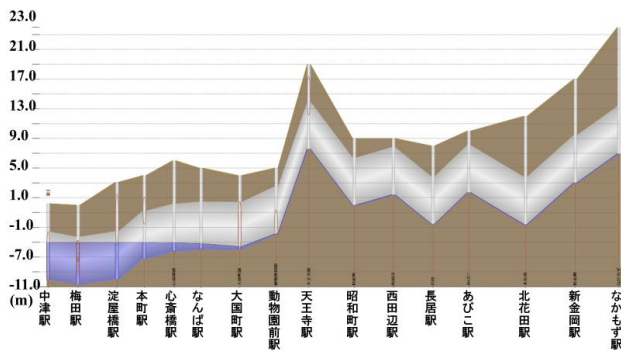


図 12 最大浸水深(御堂筋線 後方集中型)

(3) 安全避難度評価結果

ポンプが停止している場合の地下街の浸水深の時間変化を図 13, 図 14, 図 15 に示す。図 13 より, 前方集中型では, 全ての地下街で安全避難困難を上回ることが分かった。約 30 分後から単位幅比力の値が上昇し, すぐに安全に避難ができなくなり, 自力での避難も困難になる。1 時間ほど単位幅比力が上昇した後減少するが, 12 時間後まで自力避難限界を上回る値になる。このため, 長時間危険であることが言える。また, 地下街-2.1 では, 安全避難困難になるものの約 25 分であり, すぐに安全に避難が可能となる。また, 他の地下街よりも流入するまでの時間が遅くなっている。図 14 より, 中央集中型でも全ての地下街で安全避難困難を上回ることが分かった。さらに, ホワイティ梅田 2 を除く全ての地下街で自力避難限界も上回る値となった。約 1 時間後に単位幅比力の値が上昇し始めている。その後, 急激に増加していき 30 分以内に自力避難限界を上回る。ピークを過ぎた後は前方集中型のときと同様な値の推移が見られた。また, 12 時間経過後の単位幅比力の値は前方集中型とほとんど同じであった。しかし, 全体的に中央集中型での単位幅比力の値が前方集中型より高くなっている。地下街-2.1 において, 前方集中型よりも安全避難困難状態が 25 分ほど長く, 危険度が高くなっていることが分かった。図 15 より, 後方集中型でも全ての地下街で安全避難が困難となり, ホワイティ梅田 2 を除いた地下街で自

力避難が困難となっている。1 時間後から単位幅比力の値に変化が見られ, その 50 分後には, 自力避難限界を上回ることが分かった。また, 単位幅比力の値としては後方集中型が最も大きくなっている。地下街-2.1 において, 単位幅比力の最大値は全ての降雨形態の中で最も大きくなるが, 安全避難困難である時間は, 中央集中型より 5 分ほど短くなっている。これらの結果より, 想定される最大規模の降雨では, 泉の広場において, 自力避難限界となり危険となることが分かった。また, 降雨形態により危険度や危険となる時間が異なることも分かった。

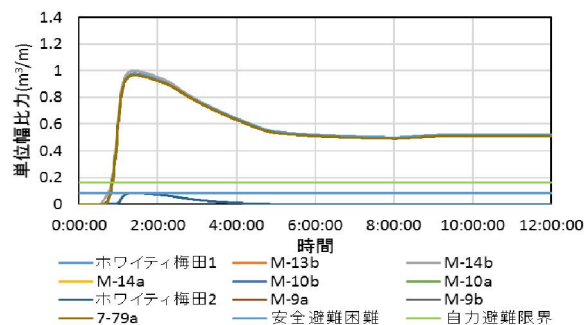


図 13 単位幅比力の時間変化(泉の広場 前方集中型)

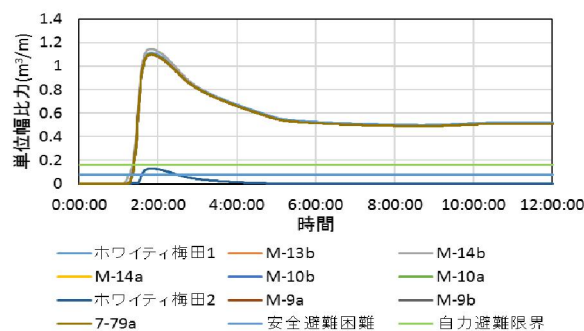


図 14 単位幅比力の時間変化(泉の広場 中央集中型)

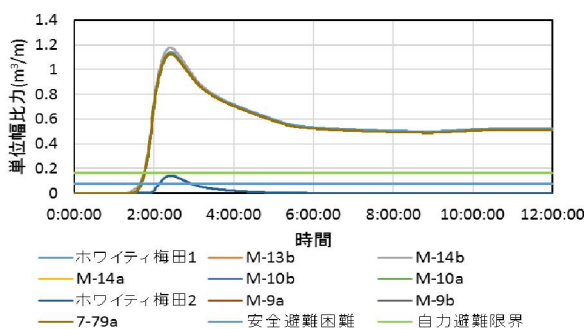


図 15 単位幅比力の時間変化(泉の広場 後方集中型)

ポンプが停止している場合の地下街の浸水深の時間変化を図 16, 図 17, 図 18 に示す。図 16 より, 前方集中型では, 中津駅, 梅田駅, 淀屋橋駅, 本町駅, 心斎橋駅, なんば

駅、大国町駅で単位幅比力の値が安全避難困難を上回った。さらに、大国町駅を除く各駅では、自力避難限界も上回ることが分かった。中津駅では、降雨開始15分後には単位幅比力の値が変化し始めている。次いで梅田駅となっている。両駅は50分後には、自力での避難が限界となっている。自力避難限界となる駅は12時間後も同様の状況となっている。しかし、大国町駅は、時間の経過によって安全避難困難を下回る。図17より、中央集中型でも前方集中型と同様の駅で安全避難困難、自力避難限界を超える値となった。しかし、中央集中型において、大国町駅では、12時間後も安全避難困難となっている。また、他の駅でも、前方集中型よりも高い値を取っている傾向にある。中津駅、梅田駅において、前方集中型よりも単位幅比力の値に変化が見られ始めるのは約35分遅くなっている。図18より、後方集中型でも他の降雨形態と同様の駅で危険性があると分かった。しかし、後方集中型において、大国町駅では時間が経過すると安全避難困難を下回るため危険箇所でなくなる。前方集中型よりも25分ほど早くに危険度が下がる。後方集中型でも単位幅比力の値に変化が見られるのは中津駅と梅田駅が早く、約1時間後に増加し始めている。また、他の降雨形態よりも単位幅比力の値が低くなる傾向が見られた。これらのことから、想定される最大の降雨において、御堂筋線では特に、中津駅、梅田駅、淀屋橋駅が危険となる。また、降雨形態による影響があることも分かった。

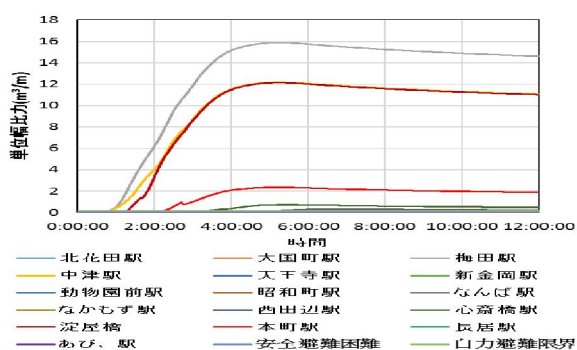


図16 単位幅比力の時間変化(御堂筋線 前方集中型)

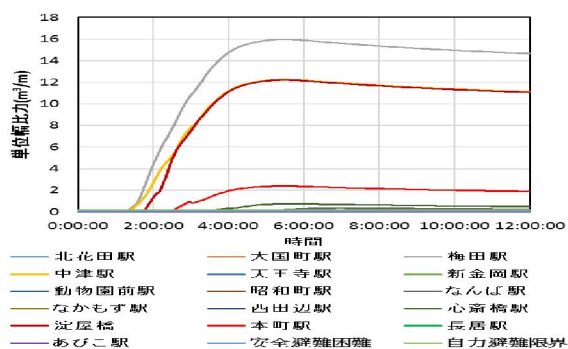


図17 単位幅比力の時間変化(御堂筋線 中央集中型)

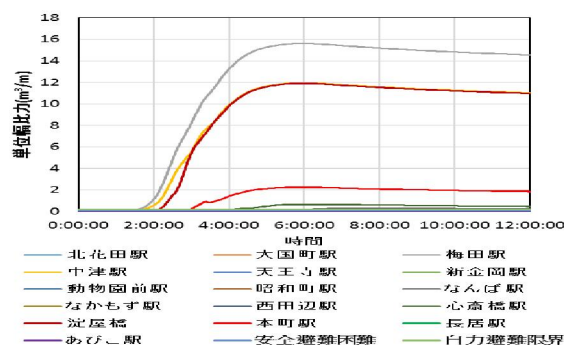


図18 単位幅比力の時間変化(御堂筋線 後方集中型)

5. おわりに

本研究では、大阪市の海老江処理区内にある地上と地下空間を対象とした内水氾濫解析を行った。気候変動などの影響を考慮し、今後対象地域で起こると予測される最大の1時間降雨量である141mmの降雨を外力とした。また、降雨形態の違いによる影響も考慮するため前方集中型、中央集中型、後方集中型の3つの降雨形態を用いて各降雨形態の地上と地下の解析を行ったその結果を用いて、地下街の安全避難評価を行い、想定最大の降雨や降雨形態の違いによる影響を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

地上の氾濫解析については、InfoWorks ICMを用いて、3つの降雨形態を対象として内水氾濫解析を行い、地上の浸水状況を把握した。前方集中型の場合、1時間後には、対象地域全域で浸水が見られた。中央集中型と後方集中型でも2時間後には、同様な浸水域となった。また、最大浸水深はそれぞれ1mを超えた。全ての降雨形態で6時間後には東側では収束し、12時間経過しても西側に氾濫水が残った。降雨のピークが早い時間にあると浸水するまでに時間がかからないことが分かった。そのため、降雨形態によって浸水開始から収束するまでの時間にずれが乗じることも分かった。

地下の氾濫解析については、地下街と地下鉄における氾濫水の広がり、任意地点での流速と水深を求めた。地下街では、泉の広場などで1mを超える浸水深が見られた。地下鉄では、御堂筋線の梅田駅や谷町線の天神橋筋六丁目駅などでの浸水深が大きくなることが分かった。JR東西線の御幣島駅などのような対象地域外に位置する駅でも浸水が及んでいることを確認した。また、降雨形態によって浸水深に違いが生じることが分かった。特に、中央集中型において浸水深の大きくなる傾向が見られた。

地下街と地下鉄の安全避難度評価については、単位幅

比力を用いて評価した。避難者属性は高齢女性とし、避難困難度指標を用いた。地下街では、泉の広場などが危険であることが分かった。長時間危険となる場所や短時間で安全になる場所など地下街によって差が見られた。地下鉄では、御堂筋線の梅田駅や谷町線の天神橋筋六丁目駅などが危険となることが分かった。降雨形態によって危険か安全か違う駅もあり、降雨形態によって危険性が異なるということが分かった。これにより、降雨形態の違いによって安全避難に影響することが分かった。避難が困難になる地下街や地下鉄が多い、つまり危険となりやすいのは中央集中型であることも分かった。

謝辞：最後に本研究を遂行するにあたり、多数の方々にお力添えを頂きました。ここで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森兼政行，石垣泰輔，尾崎平，戸田圭一：大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策，水工学論文集，第 55 巻，pp967-972，2011.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：浸水想定(洪水，内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法，2015.
- 3) 黄碧蕊，齋藤千夏，尾崎平，石垣泰輔，戸田圭一：極端気象下での地下街浸水時の安全避難について，土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集，第 23 巻，pp.103-112，2018.
- 4) 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：地下空間浸水時の避難困難度と利用者の水防意識について，水工学論文集，第 51 巻，pp559-564，2007.

幅の狭い地下通路における浸水時の危険性の 評価に関する実験的研究

岡本 隆明¹・戸田 圭一²・岡 宗佑³・當麻 泰史³

¹ 正会員 京都大学大学院工学研究科助教 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: okamoto.takaaki.8x@kyoto-u.ac.jp

² フェロー会員 京都大学大学院工学研究科教授 (同上)
E-mail: toda.keiichi.4z@kyoto-u.ac.jp

³ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (同上)

近年, 集中豪雨が増加傾向にあり都市部で内水氾濫が頻発している. 都市部では地上が氾濫すると地下空間に氾濫水が侵入し, 甚大な人的被害が生じる. これまで地下空間での避難対策については, 洪水シミュレーションを駆使した多くの既往研究がみられ様々な場で報告がなされている. しかしながら, 地下空間での避難や水難事故に関する研究は人がいない状態で氾濫流の水位, 流速を解析したものがほとんどで, 狭い通路内での人体による水深せき上げを考慮していない. 本研究では人型模型を用いて流水中の人体に掛かる力を水路幅を変化させて計測し, 特に狭い地下通路内での浸水時の漂流危険性について調べた. 実験データをもとに避難限界指標となる危険流速—水深判読図を作成した.

Key Words: narrow underground pass, drag force coefficient of human body, backwater rise, drowning risk

1. はじめに

近年, 集中豪雨が増加傾向にあり都市部で内水氾濫が頻発している. 都市部で氾濫が起きると地下空間に氾濫水が侵入し, 甚大な人的被害が生じる. これまで地下空間での避難対策については, 洪水シミュレーションを駆使した多くの既往研究がみられ様々な場で報告がなされている.

須賀ら(1994)¹⁾は水害避難を想定した水中歩行実験を行い, 歩行速度を測定し安全避難歩行領域を求めた. 藤田ら(2011)²⁾は洪水時の歩行避難限界を比較・整理し, さらに布を脚に巻き付けてバネばかりで引っ張ることで, 立位状態における転倒への抵抗限界値を評価した. 浅井ら(2009)³⁾は実物大階段模型と通路模型を用いて地下空間での避難体験実験を行い, 高齢者を含めた避難困難度の定量的な評価を行った. 北村・西田(2017)⁴⁾や著者らの既往研究(2019)⁵⁾では流水中で転倒することで人体にかかる抗力が増加し, 水難事故の危険性が増すことを指摘している.

しかしながら, しかしながら, これらの研究は十分に幅の広い流れ場を対象としているため, 狭い通路内での

人体による水深せき上げを考慮しておらず, 身体が水の流れをせき止めることでどのようにリスクが高まるかまでは明らかにされていない. そこで本研究では 1/6 スケールの人型模型を用いて流水中の人体に掛かる力を水路幅を変化させて計測し, 特に狭い地下通路内での浸水時の水難事故の危険性について調べた. さらに実験データをもとに避難限界指標となる危険流速—水深判読図を作成した.

2. 実験装置

本研究では図-1に示すように全長10m, 幅0.4m, 高さ0.50mの可変勾配型直線水路にて水路実験を実施した. x , y および z はそれぞれ, 流下方向, 鉛直方向および横断方向の座標軸である. $x=0$ は人体模型の立位時のかかと, 座位時の臀部の位置, $y=0$ は水路底面, $z=0$ は水路壁とした. H は水深である. 幅の狭い地下通路を想定し, 塩化ビニールボックスを用いて図-2に示すように水路幅を $B=0.2, 0.4\text{m}$ (実スケールで $B=1.2, 2.4\text{m}$)に変化させている.

著者らの既往研究⁵⁾の模型(1/10スケール)では低水深ケース(実スケールで $H=0.1\text{--}0.2\text{m}$)の水深が小さくなりすぎ

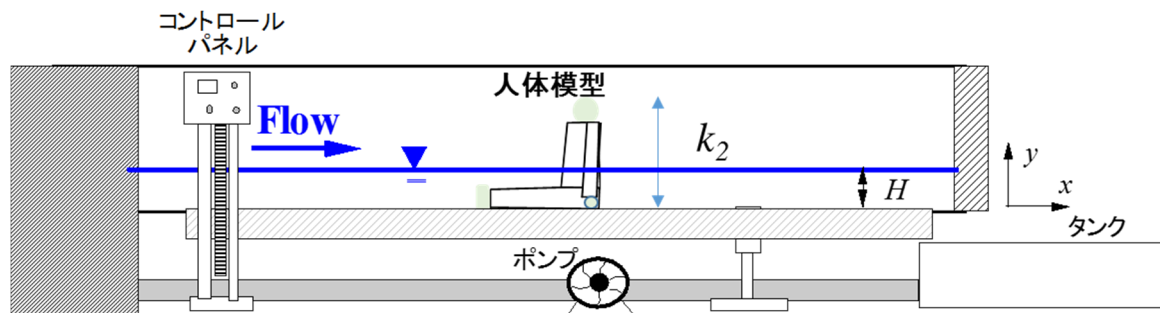
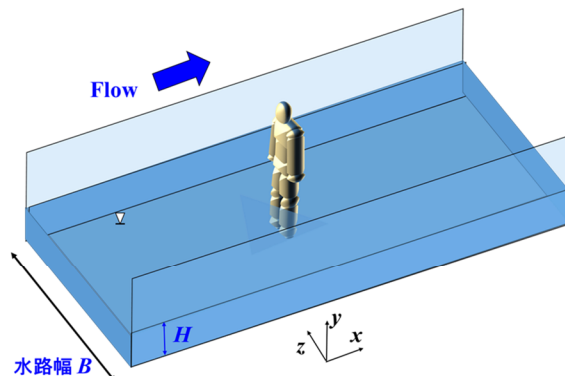
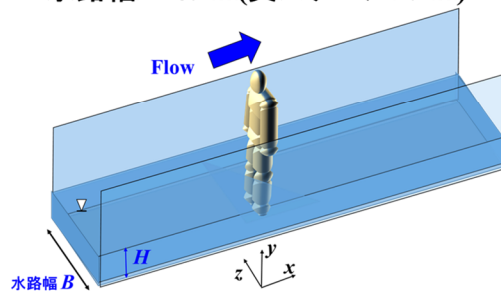


図-1 人体模型（1/6 スケール）を用いた水路実験



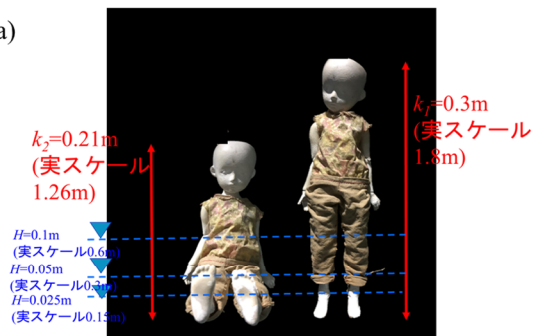
水路幅 $B=0.4\text{m}$ (実スケール 2.4m)



水路幅 $B=0.2\text{m}$ (実スケール 1.2m)

図-2 地下通路（1/6 スケール）の通路幅変化

(a)



(b)

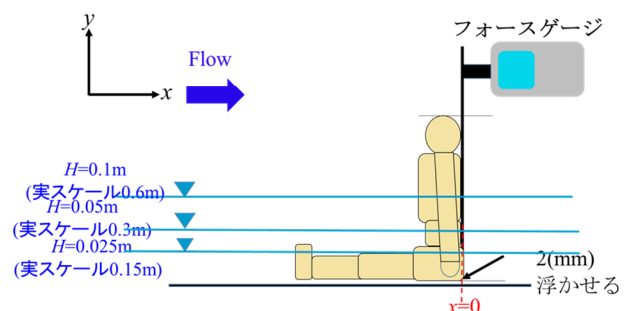


図-3 (a) 人体模型（1/6 スケール）の姿勢変化
(b) 人体に作用する流体力と座標

て実験をすることが困難なため、図-3に示すようにより大きな人体模型(1/6スケール)を用いた。人体模型の関節部分は可動で、流水による転倒を想定して立位と座位状態に変化させることが可能である。立位時の模型高さは $k=0.3\text{m}$ (実スケール身長 1.8m 、成人男性を想定)、座位時の模型高さ $k=0.21\text{m}$ (実スケール 1.26m)である。また着衣の影響を考慮して図-2(a)のように木綿で作成した服を着せて人体抗力の計測を行った。

流体力の計測にはフォースゲージ(分解能 $1/1000\text{N}$ 、日本電産シンガ製FGP-2)を用いた。PCに時系列データを記録して60秒間の平均値を計測値とした。サンプリングレートは 10Hz である。フォースゲージに支持棒を介して人体模型を取り付けており、模型が水流から受ける抗力 F は金属棒を中継してフォースゲージで計測される。抗力計測時に底面摩擦の影響をなくするため、図-3(b)のよ

うに人体模型を上から支柱によって吊り下げ、底面から 2mm 程度浮かした状態で固定した。

表-1 に実験条件を示す。水路幅、水深を系統変化させ多様な条件下で水路実験を行った。流水による転倒を想定して人体模型の姿勢を立位、座位状態に変化させている。人体模型は着衣状態とした。水路幅 $B=0.2, 0.4\text{m}$ (実スケールで $1.2, 2.4\text{m}$)の2通り、水深 $H=0.025\text{--}0.1\text{m}$ (実スケールで $0.15\text{--}0.6\text{m}$)、断面平均流速は $U_m=0.2\text{--}0.6\text{m/s}$ (実スケールで $0.49\text{--}1.47\text{m/s}$)に変化させている。

3. 流水中の転倒による人体抗力の変化

著者らの既往研究⁵⁾では通路幅が広いケースについて考察したが、実際の地下通路は幅が狭いケースもみられ、転落時に流れがせき止められて人体抗力も変化すると考

表-1 実験条件

実スケール			実験時のスケール			フルード数Fr	人体模型の姿勢
水路幅B (m)	流速 U_m (m/s)	水深H (m)	水路幅B (m)	流速 U_m (m/s)	水深H (m)		
2.4	1.22	0.15	0.4	0.50	0.025	1.01	座位, 立位
		0.30			0.05	0.71	座位, 立位
		0.45			0.075	0.58	座位, 立位
		0.60			0.1	0.51	座位, 立位
	1.84	0.15		0.75	0.025	1.52	座位, 立位
		0.30			0.05	1.07	座位, 立位
		0.45			0.075	0.87	座位, 立位
		0.60			0.1	0.76	座位, 立位
1.2	1.22	0.15	0.2	0.50	0.025	1.01	座位, 立位
		0.30			0.05	0.71	座位, 立位
		0.45			0.075	0.58	座位, 立位
		0.60			0.1	0.51	座位, 立位
	0.49	0.18,0.225,0.30		0.20	0.03,0.0375,0.05	0.37, 0.33,0.29	座位
	0.73	0.18,0.225,0.30		0.30	0.03,0.0375,0.05	0.55,0.49,0.43	座位
	0.98	0.18,0.225,0.30		0.40	0.03,0.0375,0.05	0.74,0.66,0.57	座位
	1.22	0.18,0.225,0.30		0.50	0.03,0.0375,0.05	0.92,0.82,0.71	座位
	1.47	0.18,0.225,0.30		0.60	0.03,0.0375,0.05	1.1,0.99,0.86	座位

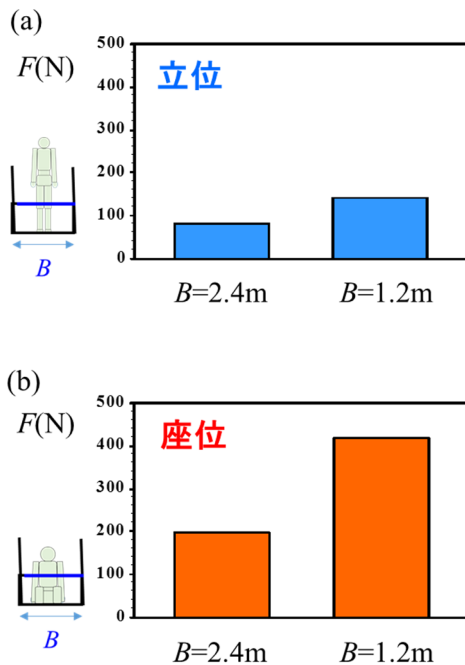


図-4 幅の狭い通路内で人体にかかる抗力の変化(通路幅の影響 $U_m=1.2\text{m/s}$, $H=0.3\text{m}$) (a)立位, (b)座位

えられる。本節では通路幅が狭いケースでの浸水時の人体にかかる抗力の変化について考察する。

図-4に通路幅の十分に広いケース($B=2.4\text{m}$)と狭いケース($B=1.2\text{m}$)の人体模型にかかる抗力値 $F(\text{N})$ を比較した。抗力値は実スケール換算している。人体模型設置前の断面平均流速は実スケール換算して $U_m=1.2\text{m/s}$ 、水深は $H=0.3\text{m}$ である。通路幅が狭いケースでは水路幅が十分に広いケースに比べて人体にかかる抗力が増加している。すなわち、通路幅が狭くなると広いケースに比べ、立位状態で人体抗力が1.7倍、座位状態では2.1倍となってい

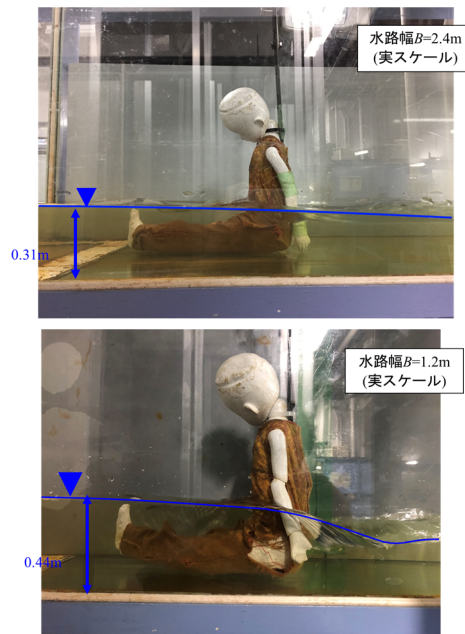


図-5 地下通路内での人体による水深せき上げ($U_m=1.2\text{m/s}$, $H=0.3\text{m}$)

る。紙幅の都合でここでは示していないが、この傾向は他の流速、水深のケースでもみられた。これは狭い通路では水流によって押し流される危険性が増すことを示している。通路幅の影響は座位ケースほど顕著にみられた。

図-5に通路幅の十分に広いケース($B=2.4\text{m}$)と狭いケース($B=1.2\text{m}$)での人体による水深上昇の様子を示す。図-6に人体模型周りの水深の流下方向分布 $H(x)$ を示す。人体模型設置前の断面平均流速は実スケール換算して $U_m=1.2\text{m/s}$ 、水深は $H=0.3\text{m}$ である。

通路幅の十分に広いケースでは人体による水深のせき上げはほとんどみられない。これに対して、通路幅が狭いケースでは人体が水の流れをせき止めることで水深が上昇し、座位状態では水深0.44mとなっている。図-4で通

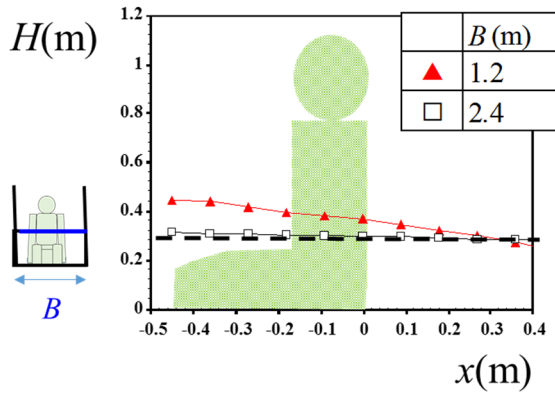


図-6 通路内でのせき上げによる水深の流下方向変化
($U_m=1.2\text{m/s}$, $H=0.3\text{m}$, 座位)

路幅が狭いケースで人体抗力が増加していたのは人体前面で水深が増加し、人体上流側と下流側の静水圧差から抗力が増加したためと考えられる。

4. 転倒したときの流水への抵抗力

次に、流水中で転倒した場合を想定して水難事故の危険流速を計算するために、座位状態の人間の流水への抵抗力を評価する。流水に対しての人間の抵抗力を静止摩擦力 S と同じとすると流水に流される限界状態は

$$F = S = \mu(Mg - F_b) \quad (1)$$

$$F_b = \rho g V_o \quad (2)$$

ここで μ : 人体と地面の静止摩擦係数, M : 人体の質量, g : 重力加速度, F_b : 人体模型に作用する浮力, V_o : 水中に水没した人体の体積である。式(1)の左辺の水流から受ける流体力が右辺の抵抗力 S と釣り合った時の流速を水難事故の危険流速として算出する。

後ろに手をついて踏ん張ることで抵抗力が大きくなる可能性も考えられるが、これまで検証はあまりされていない。立位状態の流れに対する抵抗力については藤田ら²⁾は布を脚に巻きつけてバネばかりで引っ張ることで汜濫流の流体力の疑似体験キットを作成して計測している。

本研究では座位状態で人間が地面に手をつくことで、流水に対しての抵抗力が増加するか、水がない状態で検証実験を行った。検証実験の模式図を図-7 に示す。長方形型の布の両端と電子はかりをロープで繋ぎ、座位状態の被験者の足裏に布を引っ掛けて後ろから引っ張り、被験者が滑り始めた時の抗力計の値を計測した。20代の5人の被験者に対して、被験者が手をつかない自然座位状態と後方の手をついて踏ん張った抵抗状態の計測を行い、滑り始める限界値がどれくらい変わるのかを比較

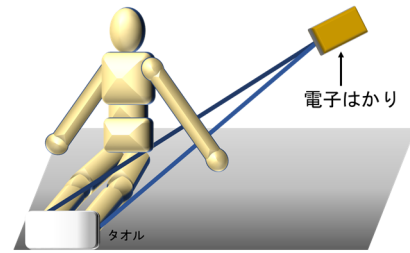


図-7 座位で手をついた状態での人体の流水への抵抗力の計測

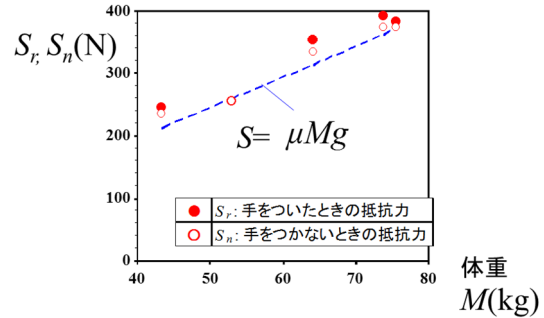


図-8 座位で手をついた状態での人体の流水へ抵抗力と静止摩擦力の比較

した。計測は全て同じ材質の床(静止摩擦係数 $\mu \approx 0.50$)で行い、また被験者が着用している服の材質の違いを無くすために、それぞれの被験者の腰に同一の布を巻いてから計測した。図-8 に静止摩擦力と後ろに手をついた状態の抵抗力 S_r を比較した。手をついた状態の抵抗力 S_r は体重に比例しており、静止摩擦力 S より少し増加している。個人差はあるが増加率は概ね 5-10%程度であった。手をついて抵抗することを考慮すると流水に流される限界状態では、以下の式となる。

$$F = S_r = \alpha S \quad (3)$$

手をついた場合は流水に対しての人間の抵抗力を静止摩擦力からの増加率は平均して 7%程度($\alpha=1.07$)として計算すればよいと考えられる。また手をついた状態の抵抗力 S_r は手をつかない状態の抵抗力 S_n より 3-5%大きい。

5. 幅の狭い通路内で水深せき上げを考慮した水難事故の危険水深、流速の評価

著者らの既往研究⁹⁾では模型スケールが小さく、低水深ケース(実スケールで $H=0.1-0.2\text{m}$)の水難事故の危険流速は評価できていない。そこで本研究では十分に通路幅が広いケース($B=2.4\text{m}$)について大きな模型(1/6スケール)を使って、低水深ケースの人体抗力係数を評価する。人体にかかる流体力 F は

$$F = 0.5\rho C_D U_m^2 A_x \quad (4)$$

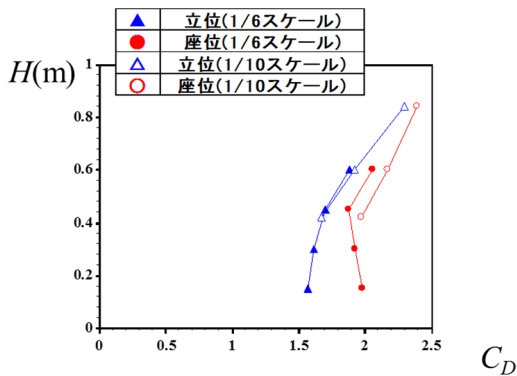


図-9 十分に幅が広いケース($B=2.4\text{m}$)での人体の抗力係数

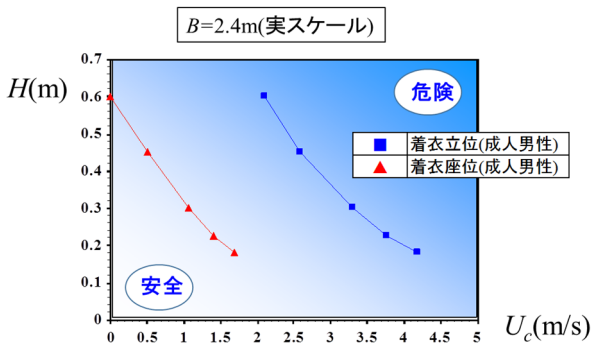


図-10 十分に幅が広い通路での水難事故に遭う危険水深と流速の判読図(成人男性を想定)

と表現される．ここで、 C_D ：抗力係数、 ρ ：水の密度、 $A_x(y)$ ：人体が水没している部分の x 方向の投影面積である．図-9に座位と立位ケースの人体模型の抗力係数の鉛直プロット $C_D(y)$ を示す．比較のため、著者らの既往研究⁹⁾の模型実験(1/10スケール)の結果も併示している．

着衣状態の立位ケースでは $C_D=1.6\sim1.9$ 、着衣状態の座位ケースでは $C_D=2.0$ となる．人体が転倒して座位状態になると人体の x 方向の投影面積が増すだけでなく、抗力係数も大きくなっている．模型スケールの違いによる人体の抗力係数の変化はあまりみられなかった．

低水深ケースの大人(体重 71kg を想定)が水難事故に遭う危険水深と流速の判読図を図-10に示す．図-9の抗力係数の鉛直プロットから内挿して抗力係数を求め、抗力と抵抗力のつり合い式(3)、(4)から水難事故危険流速(限界流速 U_c)を算出した．人体と水路床の静止摩擦係数は過去の事例より 0.7 で⁹⁾、立位では抵抗力は静止摩擦力 S と同じとし、座位では手をついた状態では抵抗力 S_r は静止摩擦力よりさらに 7% 増加するとしている．

低水深ケースでは、転倒してしまうと水深 0.225m では 1.4m/s 、水深 0.18m では 1.7m/s 程度の流速で水難事故に遭う危険性が高い．しかしながら、実際の狭い地下通路では図-4のように人体にかかる抗力が大きくなってより低い流速で流されてしまう可能性があり、通路幅の影

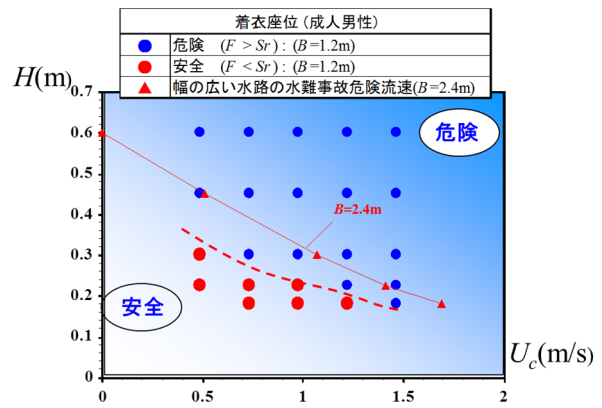


図-11 幅の狭い通路内($B=1.2\text{m}$)での水難事故危険水深・流速の判読図

響も調べる必要がある．

3節の結果から通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)では水深せき上げが起こり、人体にかかる抗力が増加することがわかった．著者らの既往研究⁹⁾では水深せき上げが起きない十分に幅の広い水路を対象としているため、通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)の水難事故の危険流速は評価できていない．

水深せき上げが起きるようなケースでの人体の抗力係数は断面平均流速によって変化するため、(4)節のように式(3)、(4)を使って水難事故の危険流速を評価することは困難である．

そこで本研究では通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)について断面平均流速を細かく系統変化させて人体抗力を計測し、各ケースについて式(3)の静止摩擦力を補正した流水抵抗力 S_r と F を比較して直接、水難事故の危険度を判定した．すなわち、計測した人体抗力の値が浮力を考慮した抵抗力よりも大きいと水難事故に遭う危険性が高いとした．

通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)の成人男性が水難事故に遭う水難事故の危険水深と流速の判読図を図-11に示す．図-4のような水深せき上げによって人体にかかる浮力の増加も考慮している．静止摩擦係数、座位時の抵抗力 S_r は前節と同じである．比較のため幅の広いケースの危険流速・水深(図-10)を併示している．水路幅が狭くなると十分に幅が広いケースの水難事故の危険流速よりも小さくなる．成人男性が転倒すると、水深 0.225m で流速 1.22m/s 、水深 0.18m で流速 1.47m/s 程度で水流によって押し流される危険性が高い．

これらの結果から幅の狭い地下通路では浸水時に、水深が上昇し、①人体にかかる抗力が増加すること、②水深上昇によって浮力が増加することの2つの要因から浅い水深、低流速でも水難事故が発生する危険性が増大することがわかった．

6. 結論

本研究では模型スケールの大きな人体模型を用いて水理実験を行い、幅の狭い地下通路を想定して、水路幅が狭いケースでの水深せき上げ、人体抗力の変化について考察した。さらに低水深ケースについて断面平均流速を細かく系統変化させて、幅の狭い地下通路での水難事故に遭う危険水深、流速を求めた。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 通路幅が狭くなると広いケースに比べ、立位状態で人体抗力が1.7倍、座位状態では2.1倍となった。通路幅が狭くなると人体抗力の増加がみられ、狭い水路では水流によって押し流される危険性が増すことがわかった。
- (2) 通路幅が狭いケースでは人体が水の流れをせき止めることで水深が上昇し、座位状態では水深が1.4倍になった。通路幅が狭いケースで人体抗力が増加するのは人体前面で水深が増加し、人体上流側と下流側の静水圧差から抗力が増加したと考えられる。
- (3) 人間が姿勢を変えることで、流水に対しての抵抗力が増加するかどうか検証実験を行った。後ろに手をつけて踏ん張った状態の抵抗力 S_r は静止摩擦力 S より少し増加しており、増加率は平均して 7%程度であった。
- (4) 座位で十分に水路幅が広いケースについて大きな模型(1/6 スケール)を使って、低水深ケース(実スケール $H=0.1-0.2\text{m}$)の人体抗力係数を評価した。着衣状態の立位ケースでは $C_D=1.6-1.9$ 、着衣状態の座位ケースでは $C_D=2.0$ となった。模型スケールの違いによる人体の抗力係数の変化はあまりみられなかった。

(5) 十分に水路幅が広いケースについて人体の抗力係数をもとに抗力と抵抗力のつり合い式を用いて、低水深条件下の水難事故危険流速 U_c を算出した。成人男性が転倒してしまうと水深 0.225m では 1.4m/s、水深 0.18m では 1.7m/s 程度の流速で水難事故に遭う危険性がある。

(6) 通路幅が狭いケースについて断面平均流速を細かく系統変化させて人体抗力を計測し、各ケースについて抵抗力と抗力のつり合い式から直接、水難事故の危険度を判定した。幅の狭い通路では水深がせき上げられ、上下流の水圧差から抗力が大きくなること、浮力が増加することの2つの理由から水難事故の危険流速がより小さくなる。成人男性が転倒すると、水深 0.225m で流速 1.22m/s、水深 0.18m で流速 1.47m/s 程度で水流によって押し流される危険性が高いことがわかった。

参考文献

- 1) 須賀堯三・上阪恒雄・白井勝二・高木茂知・浜口憲一郎：避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第38巻，pp.829-832，1994。
- 2) 藤田一郎，伊藤崇博：平成 21 年 8 月兵庫県佐用町河川災害における氾濫解析と避難行動判断基準に関する研究，河川技術論文集，第17巻，pp.431-436，2011。
- 3) 浅井良純，石垣泰輔，馬場康之，戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における，避難経路の安全性に関する検討，水工学論文集，第53巻，pp.859-864，2009。
- 4) 北村光司，西田佳史：河川の流水による子どもの流され状況の再現実験とライフジャケット着用の必要性に関する研究，日本子ども安全学会第四回大会資料，2017。
- 5) 岡本隆明・戸田圭一・當麻泰史・石垣泰輔：地下浸水時の人体に作用する流体力とその危険性に関する実験的研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第24巻，pp.150-155，2019。

EXPERIMENT STUDY ON DROWING ACCIDENT RISK IN FLOODED NARROW UNDERGROUND PASS

Takaaki OKAMOTO, Keiichi TODA, Sosuke OKA, Yasufumi TOUMA

The rainfall events cause flash floods and drowning accident occurs in an underground area. Therefore, it is very important to study the hydrodynamic force exerted on the human body in flood water. In this study, the flume experiments were conducted using a the human body model (1/6 scale). The drag force exerted on the human body was measured in a narrow channel which assumes the underground pass. The experiment data showed that the drag force exerted on the body in the narrow channel is 2 times larger than that in the wide channel. Also, the buoyancy force acting on the body increases due to the backwater rise. Consequently, the drowning accident risk increases even in a low velocity condition.

ジオラマタイプのミニチュア模型を用いた 水防災教育の実践

Education Activities on Water Related Disasters by Diorama Typed Miniature Model

戸田圭一⁽¹⁾・石垣泰輔⁽²⁾・安田誠宏⁽²⁾・馬場康之・中島隆介⁽³⁾

Keiichi TODA⁽¹⁾, Taisuke ISHIGAKI⁽²⁾, Tomohiro YASUDA⁽²⁾,
Yasuyuki BABA and Ryusuke NAKAJIMA⁽³⁾

(1) 京都大学経営管理大学院

(2) 関西大学環境都市工学部

(3) 国分西日本株式会社

(1) Graduate School of Management, Kyoto University, Japan

(2) Department of Civil, Environmental and Applied System Engineering, Kansai University, Japan

(3) KOKUBU NISHI-NIHON CORP., Japan

Synopsis

We made a diorama typed miniature model of urban area with river which can express urban inundation by river overflow, heavy rainfall and Tsunami. The miniature model includes underground space and underground storage pond. Using this model, we had a class on disaster prevention and reduction as a comprehensive school study for third and fourth grade students in three elementary schools, Kamitsu and Itami-Mimani elementary schools in Itami City, Hyogo Prefecture, and Nishitonda elementary school in Shirahama Town, Wakayama Prefecture, Japan. As a result, students could understand the flood mechanism and its countermeasures with interest. The miniature model introduced here can be an effective tool for education activities for students of elementary schools.

キーワード：水災害，ミニチュア模型，防災減災教育，小学校

Keywords: water related disasters, miniature model, disaster prevention and reduction education, elementary school

1. はじめに

学校、家庭、地域や職場などでの「防災教育」を普及させることは個々の、更には地域全体の防災力向上には不可欠である。しかし、現場からは「どのように防災教育を実施したらよいかわからない」というような声を聞くことが少なくない。効果的な防災教育プログラムの開発は急務である。

また市町村などの団体の防災意識の高さだけでなく、個々の防災意識の高さも重要である。それも、知識を植え付けるだけの防災教育だけでなく、実際に命が救われるための防災対策に結びつく防災教育が求められている。

今回、居住地や教育条件が異なる3つの小学校で、私達が開発してきたジオラマタイプのミニチュア模型を用いた水防災教育を実施した。一級河川による

外水氾濫による浸水想定域に位置する小学校の3年生と4年生、南海トラフ地震による津波浸水域に指定されている地域に位置する小学3年生、および、内水氾濫または外水氾濫による被害が予想される区域に位置する小学校の3年生を対象に行った。小学生に対し、ジオラマタイプのミニチュア模型を用いた防災教育を行い、どのように防災意識や防災知識が変化するかを事前アンケート、事後アンケートの結果、またその得点化により検討した。

2. 防災教育に関する従来の研究

小舘ら（2012）は、児童とその保護者を対象に、身近な災害などの防災意識調査を取り入れた教育プログラムを実践し、その教育効果を検討するとともに、児童と保護者間の防災意識の相違を明らかにしている。その結果、児童の関心の高い教育内容を児童が学ぶことで、これをきっかけとして家庭での防災意識の啓発や、防災備蓄状況の好転が図られる可能性が示された。

山岡ら（2012）は、広島県呉市の斜面住宅地を対象に、アンケート調査票、アンケートの結果およびオリジナルの防災学習パンフレットをコミュニケーションツールとして用い、住民の防災意識の現状を把握した。そして、防災意識の変化を促すことにより、その防災学習の効果を検討している。その結果、地区の実情に合わせた防災学習パンフレットによる学習方法は、指定避難場所や避難経路の検討、防災に関する家族との話し合いの頻度の向上につながる傾向が確認された。

黒崎ら（2011）は、継続的防災教育の有効性と持続性を検討するために、登壇者が群衆に向けて話す講演会型防災教育と、コミュニケーションをとりながら実施する参加型防災教育の2つの教育を実施した。ヒアリング調査結果を数量化することにより、防災教育を実施するうえで児童達とコミュニケーションを取りながら進めることにより防災教育の有用性が高められることを確認している。

また防災教育終了から1年以上経過すると防災に関する知識・意識がともに低下する。知識の低下は年齢が高いほど小さく、意識の低下は年齢に関わらず顕著な傾向が見られるが、地域によって差が見られ、比較的頻度の高い災害常襲区では災害のほとんど発生していない地区と比べると意識の低下は小さいことが確認された。

戸田ら（2014）は、小学校3年生を対象に、観察型装置（ジオラマタイプのミニチュア模型）と体験型装置（移動可能なドア模型）を用いて、防災教育推進校である小学校で水防災教育を行い、どのように

防災意識が変化するか検討した。防災教育を行う前と後でのアンケート結果から、観察型装置と体験型装置を用いた防災教育は効果的であることが確認された。それ以降、様々な小学校で同様の防災教育を行ってきている。また、ジオラマ模型を一部改良して、津波による浸水も表現できるようにしている。

3. ジオラマタイプのミニチュア模型による水防災教育効果に関する検討

2016年10月21日に兵庫県伊丹市神津小学校3年生42名（男子：22名、女子：20名）、4年生42名（男子：22名、女子：20名）、合計84名、2016年11月4日に和歌山県白浜町西富田小学校3年生の64名（男子：33名、女子：31名）、2016年11月24日に兵庫県伊丹市伊丹南小学校3年生193名（男子：104名、女子：89名）を対象に水防災教育を行った。ジオラマタイプのミニチュア模型を用いて水害が発生するメカニズム、被害、対策について説明するとともに、水没車を想定したドア模型を用いて避難体験実験を実施した。西富田小学校においては、ジオラマ模型とドア模型を用いた防災教育に加え、講義形式の防災教育もあわせて行った。

3.1 ジオラマ模型を用いた水防災教育（神津小学校）

（1）ジオラマ模型の概要

使用したジオラマ模型を Photo 1 に示す。ジオラマ模型の縮尺は概ね100分の1程度である。ジオラマ模型（縦 0.7m、横 1.0m、高さ 0.3m）は都市域を表現しており、都市の外側に河川と防波堤が設置されている。模型には移動用キャスター付きの脚（高さ 0.5m）があり、どこにでも運搬することができる。

模型の下に循環水槽容器を設け、循環ポンプによって容器内の水を循環させ、激しい雨を表現できるシャワータイプの降雨装置ならびにマンホールや外水氾濫用河川、津波氾濫用湛水槽の給排水装置に給水する仕組みになっている。



Photo 1 Georama typed miniature model



Photo 2 Education activity by use of georama model

再現可能な水災害だが、まず降雨散水装置を起動することにより豪雨による内水氾濫を表現することができる。また、マンホールの給排水装置を起動させると、マンホールから水が噴き出る。

河川の流路沿いの下流端に設置している河川水位調整ゲートによって河川の水位を調整することが可能になっており、水位を上げて河川の増水や堤防からの溢水による外水氾濫を表現できる。また、河川の左岸堤防の一部は取り外しが可能であり、それにより破堤による外水氾濫を表現することが可能になっている。

模型には河川の他に海や住宅街、車、公園、地下駐車場、雨水貯留施設も設置されている。地下駐車場の入り口にある止水板を外すことで、地下駐車場に雨水が流れ込む地下浸水を表現することができる。また河川の下流から雨水貯留施設へと水が流れる仕組みになっており、氾濫対策も表現している。

津波は、津波氾濫用湛水槽に水を貯め、防波堤を取り外すことにより発生させることができる。津波によって模型内にある住宅などの建物の一部や車が押し流される様子が表現できる。

(2) 水防災教育の内容

防災教育の様子をPhoto 2 に示す。ジオラマ模型を用いた実験と、実物大ドア模型を用いた水没車からの避難体験実験の2種類の実験を行った。3つの小学校とも2つのグループに分かれてもらい、講義時間の半分ずつでジオラマ模型とドア模型の2つの実験に参加してもらった。防災教育を行う1ヶ月ほど前に事前アンケートを実施し、実験後に事後アンケートを実施して効果の検討を行った。事前アンケート、事後アンケートの内容は以下のとおりである。

(事前アンケート)

- ① 雨がたくさん降ったときについての質問です。
①-1 マンホールや水路から雨水があふれることがあることをしていますか？ (はい・いいえ)

①-2 川の水が増えてあふれることがあることをしていますか？ (はい・いいえ)

①-3 地下鉄や地下街に雨水が入ってくることがあることを知っていますか？ (はい・いいえ)

② 地下に雨水をためる場所があることをしていますか？ (はい・いいえ)

③ 津波がどうやって起きるか知っていますか？ (はい・いいえ)

④ 家族と水の災害(例：洪水・津波)についての話をしたことがありますか？ (はい・いいえ)

⑤ 今までに水の災害を経験したことがありますか？ (はい・いいえ) あればどのような災害を経験しましたか？ (自由記述)

⑥ 家族や友達に水の災害を経験した人はいますか？ (はい・いいえ) いればどのような災害を経験しましたか？ (自由記述)

⑦-1 自分が住んでいる地域の水の災害時の避難場所がかいてある地図をしていますか？ (はい・いいえ)

⑦-2 また、その地図を見たことがありますか？ (はい・いいえ)

⑧ Photo 3のマークをみたことがありますか？ (はい・いいえ)



Photo 3 Tsunami evacuation sign

(事後アンケート)

① 内水氾濫(マンホールや水路から雨水があふれて起こる水の災害)についてわかりましたか？ (よくわかった・わかった・どちらでもない・あまりわからなかった・わからなかった)

② 外水氾濫(川の水があふれて起こる水の災害)についてわかりましたか？ (よくわかった・わかった・どちらでもない・あまりわからなかった・わからなかった)

③ 地下浸水(地下鉄や地下街に雨水が入ってくること)についてわかりましたか？ (よくわかった・わかった・どちらでもない・あまりわからなかった・わからなかった)

④ 雨水貯留施設(地下の雨水を貯める場所)の役割についてわかりましたか？ (よくわかった・わかった・どちらでもない・あまりわからなかった・わからなかった)

- ⑤ 津波（海の波に家や車が流される災害）についてわかりましたか？（よくわかった・わかった・どちらでもない・あまりわからなかった・わからなかった）
- ⑥ たくさん雨が降ることを危険だと思いましたか？（つよくおもう・すこしおもう・どちらでもない・あまりおもわない・まったくおもわない）
- ⑦ 家に帰って家族に今日の授業のことを話そうと思いますか？（つよくおもう・すこしおもう・どちらでもない・あまりおもわない・まったくおもわない）
- ⑧ テレビなどで見るより今日のような実験のほうがわかりやすいと思いますか？（つよくおもう・すこしおもう・どちらでもない・あまりおもわない・まったくおもわない）
- ⑨ 今日の授業は楽しかったですか？（すごくたのしかった・たのしかった・ふつう・あまりたのしくなかった・たのしくなかった）
- ⑩ Photo 3の看板の意味はわかりましたか？（よくわかった・わかった・どちらでもない・あまりわからなかった・わからなかった）
- ⑪ 模型を使ってわかったことを教えてください。
- ⑫ こんな模型だったらいいと思うことはありませんか？自由に書いてください。

次にジオラマ模型を用いた防災教育の手順を示す。

- 事前アンケート
- ジオラマ模型の説明
- 降雨による内水氾濫とマンホールから水が噴き出す現象の説明
- 河川堤防からの溢水と破堤による外水氾濫の説明
- 地下駐車場への浸水の説明
- 都市水害対策である止水板、雨水貯留施設の説明
- 津波の発生メカニズムや被害の説明
- 津波避難場所、津波避難ビルの説明
- ハザードマップの説明
- 事後アンケート

b)～h)については、ジオラマ模型を利用して水災害を再現しながら随時、実際に起こった水災害の写真を紹介しながら説明を行った。i)では、津波ハザードマップを見せ、また津波などの水災害はいつ発生するかはわからないため、旅行に行くときなども旅行先のハザードマップを確認するなどの事前の準備や、家族との「もしもの時の取り決め」が大事だということも説明した。

(3) アンケート結果と考察

(a) 事前アンケート結果と考察

Table 1 に事前アンケートの結果を示す。アンケー

Table 1 Questionnaire before experiment (Kamitsu)

No.	①-1	①-2	①-3	②	③	④	⑤	⑥	⑦-1	⑦-2	⑧
Yes	27	37	25	12	13	20	0	2	6	2	12
No	10	0	12	25	24	17	37	35	31	34	25
No answer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

ト項目は11問あり、「はい」「いいえ」の2択方式で⑤、⑥のみ一部記述式となっている。表では「はい」を「Yes」、「いいえ」を「No」で表現している。アンケートの質問内容は前述のとおりである。なお、この防災教育は3年生と4年生を対象に行ったが、小学3年生が他校との比較対象なので、ここでは小学3年生の結果のみ抜粋して示す。

質問①-2の外水氾濫の項目で「はい」と全員答えている。これは、神津小学校のすぐ近くに一級河川の猪名川が流れており、また小学校が猪名川の浸水想定域に属していることから外水氾濫について馴染みが深いためだと考えられる。一方、過去のデータより比較して質問⑧の「津波避難のマークを見たことがありますか？」の項目が比較的低い割合を占めている。この理由としては、神津小学校は兵庫県伊丹市にあり海に面しておらず、また南海トラフ地震の津波浸水域でなく海や津波に関してあまり馴染みがないためだと考えられる。

(b) 事後アンケート結果と考察

Table 2 に事後アンケートの結果を示す。アンケート項目は12問で、5択方式の質問10項目、記述式の質問2項目からなる。アンケートの質問内容は前述のとおりである。表では、理解度、感じ方の程度を、良い方から順に、「A」「B」「C」「D」「E」で表現している。

事前アンケートの中でも理解度が高かった、質問項目①の内水氾濫、②の外水氾濫、③の地下浸水の項目について、事後アンケートの中でも「よくわかった(A)」、「わかった(B)」と回答した児童が多くの割合を占めている。また従来は比較的理解度が上がらなかった雨水貯留施設に関する質問④に対しても、この小学校では高い理解度を示している。

Table 2 Questionnaire after experiment (Kamitsu)

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A	23	28	23	19	26	33	25	30	33	33
B	13	10	14	15	11	6	12	7	3	5
C	1	0	0	1	0	0	0	1	2	0
D	2	1	0	4	1	0	2	1	0	1
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
No answer	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0

これは兵庫県伊丹市にある伊丹空港の地下に雨水貯留施設があり、ジオラマ模型の説明の際に用いた資料でそれを紹介しており、児童にとっては馴染みがあったためだと考えられる。津波避難看板に関する項目に関しては、実験前は約30%の児童しか理解していなかったのに対して実験後はほとんどの児童がその標識の意味を理解した。また、質問項目⑦について、90%以上の児童が「強く思う (A)」、「思う (B)」と回答しており、ジオラマ模型を用いた実験をきちんと理解し、家族に話す意思を持っていることが窺われた。これらのことから、神津小学校3年生に対して、ジオラマ模型を用いた防災教育は有効であったということがわかる。

3.2 ジオラマ模型を用いた水防災教育（伊丹南小学校）

(1) ジオラマ模型と水防災教育の内容

兵庫県の伊丹南小学校でも同様に、神津小学校で用いたジオラマ模型を使用した。説明の流れも防災教育内容も、神津小学校と同じように実施した。

(2) アンケート結果と考察

(a) 事前アンケート結果と考察

Table 3 に事前アンケート結果を示す。神津小学校と比較すると、外水氾濫の項目①-2で「いいえ」と答えた児童が比較的多いことがわかる。同じ伊丹市内の小学校だが、伊丹南小学校は河川による浸水の可能性がさほど高くないため、外水氾濫に関する認識が神津小学校より低かったと考えられる。

また津波に関する質問項目⑧の「はい」が神津小学校と同様、比較的低い割合を占めている。伊丹南小学校も兵庫県伊丹市にあり、海に面しておらずまた南海トラフ地震の津波浸水域でなく海や津波に関してあまり馴染みがないためだと考えられる。

Table 3 Questionnaire before experiment
(Itami-Minami)

No.	①-1	①-2	①-3	②	③	④	⑤	⑥	⑦-1	⑦-2	⑧
Yes	129	167	94	66	94	78	7	21	47	33	59
No	62	24	97	125	97	113	184	170	144	156	130
No answer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2

(b) 事後アンケート結果と考察

Table 4 に事後アンケート結果を示す。事前アンケートの中でも理解度が高かった、質問①の内水氾濫、②の外水氾濫の項目について、事後アンケートの中でも「よくわかった (A)」、「わかった (B)」と答えた児童が多く割合を占めていることがわかる。

Table 4 Questionnaire after experiment (Itami-Minami)

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A	142	127	123	109	163	151	89	140	164	135
B	40	52	51	56	27	36	79	39	22	45
C	3	0	9	12	2	1	11	6	4	4
D	3	6	3	8	0	1	4	3	1	7
E	2	2	3	2	0	0	7	1	0	2
No answer	3	6	4	6	1	4	3	4	2	0

防災教育をとおして、より一層理解が深まったことが窺える。また、津波に関する質問⑤については、事前アンケートの質問③では半数以上の児童が知らないと答えていたが、事後アンケートを見ると80%以上の児童が高い理解を示しており、津波に関する理解にはかなりの効果が窺える。これらのことから、伊丹南小学校3年生に対しても、ジオラマ模型を用いた防災教育は有効であったということがわかる。

3.3 ジオラマ模型を用いた水防災教育（西富田小学校）

(1) ジオラマ模型と水防災教育の内容

和歌山の西富田小学校でも同様のジオラマ模型を使用した。説明の流れも同様である。水防災教育の様子をPhoto 4に示す。防災教育当日1カ月ほど前に事前アンケートに答えてもらった。当日は、3年生のA組33名と、B組31名に分かれて防災教育を行った。

B組にはまず、前述の2つの神津小学校・伊丹南小学校で行った防災教育と同様、ジオラマ模型を用いた観察型実験と簡易型ドア模型を用いた避難体験実験に参加してもらった。

A組についてはB組と同時進行で、講義型の防災教育を受けてもらった (Photo 5 参照)。講義型の防災教育では、授業時間の前半20分は普通の授業と同様に、座って防災教育を受けてもらった。なお授業ではパワーポイントを使用し、ジオラマ模型で再現できる水災害や減災対策について映像などを交えた授業とした。



Photo 4 Experiment class by use of georama model



Photo 5 Normal lecture class



Photo 6 Class by use of jigsaw puzzle

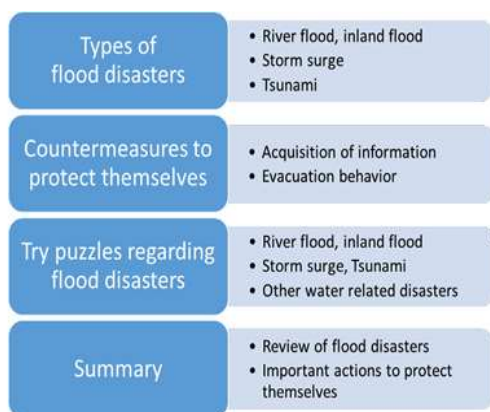


Fig.1 Contents of lecture typed class

そして授業時間の後半では、水災害に関する写真を用いたジグソーパズルを行ってもらった（Photo 6 参照）。全体の授業内容をFig.1に示す。

1コマ目の授業時間が終わったあとで事後のアンケートに答えてもらい、普段の防災教育を想定した講義型の防災教育後と模型を用いた防災教育後のアンケート結果から児童の理解度や感想を比べ、どちらが有効であるかを検討した。

その後、A組とB組が交代して、B組が講義型の防災教育、A組が2つの模型を用いた実験に参加した。そして最後に、A組とB組に通常の講義型の授業と模型を用いた授業との比較に関する最終アンケートを実施した。

(2) アンケート結果と考察

(a) 事前アンケート結果と考察

Table 5, Table 6 に事前アンケートの結果をまとめている。Table 5 は1コマ目に講義型の防災教育を行ったクラス（A組）、Table 6 は1コマ目に模型を用いた防災教育を行ったクラス（B組）の結果である。

全体の結果をみると、水害現象に関する質問の中で質問項目①-1の内水氾濫、質問項目①-2の外水氾濫の「はい」の割合が高くなっている。また津波看板に関する質問⑧でも約75%の児童が「はい」と答えている。西富田小学校がある和歌山県白浜町は南海トラフ地震による津波の浸水想定域であり、住民の津波に対する意識は高い。小学校の近くにある白良浜や三段壁などの観光地には津波避難場所へ誘導する看板や津波の危険性を示す看板が多く見られる。

Table 5 Questionnaire before experiment
(A Class, Lecture, Nishitonda)

No.	①-1	①-2	①-3	②	③	④	⑤	⑥	⑦-1	⑦-2	⑧
Yes	29	32	11	7	23	20	2	2	13	10	24
No	5	2	23	27	11	14	32	32	21	24	10
No answer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 6 Questionnaire before experiment
(B Class, Experiment, Nishitonda)

No.	①-1	①-2	①-3	②	③	④	⑤	⑥	⑦-1	⑦-2	⑧
Yes	28	30	17	8	24	25	4	1	9	8	28
No	6	4	17	26	10	9	30	33	25	26	6
No answer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

また質問③の津波の発生メカニズムを問う項目でも70%の児童が「はい」と回答していることから、和歌山県白浜町に住む小学3年生でも津波の意識は高いことがわかった。しかし、ハザードマップを知っている、また見たことがある児童が非常に少ないことから、津波に対する事前の準備が十分であるとはいえない。

(b) 事後アンケート結果と考察

Table 7, Table 8 に事後アンケートの結果をまとめている。Table 7, Table 8 は、それぞれA組、B組の結果である。A組の結果を見てみると、質問項目④の雨水貯留施設に関する項目がB組と比較すると少し低い結果となっている。これは映像や写真だけでなく、模型のように実際に目で見て体験する実験の方が児童にとって理解しやすいということもあるが、講義

Table 7 Questionnaire after experiment
(A Class, Lecture, Nishitonda)

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A	19	25	14	11	26	25	12	18	24	19
B	12	6	16	14	4	6	18	13	8	9
C	0	2	1	6	2	1	2	0	1	1
D	1	0	1	2	1	1	0	2	0	2
E	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
No answer	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2

Table 8 Questionnaire after experiment
(B Class, Experiment, Nishitonda)

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A	25	19	24	14	24	24	14	26	22	22
B	4	11	5	14	7	6	16	4	7	9
C	1	1	0	2	0	1	0	0	0	0
D	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
E	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
No answer	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

用資料に雨水貯留施設に関する資料・説明が含まれていなかったということが原因だと考えられる。これは今後の改善点である。

その他の項目を見てみると、A組とB組どちらも水害現象に関する項目で理解度が深まっていることがわかる。児童の感想を問う質問⑧、⑨でもどちらも「強く思う(A)」、「思う(B)」の割合が高くなっており、模型を用いなくても、通常の講義型の防災教育の中でジグソーパズルなどの防災グッズなどを用いることで児童が楽しく防災教育に参加することができるということが分かった。また質問⑦を見るとどちらの組もほとんどの児童が家族に今日の防災教育の話をするという回答しており、都市水害のメカニズムや危険性、水害対策を伝えるのに有効であるということがわかり、防災につながる自発的な行動を促すことにも有効であったことが確認できた。

授業の最後にとった最終アンケートの結果を紹介する。アンケートは模型を用いたものと講義型の防災教育、「どちらが楽しかったか」と「どちらがわかりやすかったか」を問う2択式の問いが2問と、全体の感想を問う自由記述式の1問からなる。A組、B組を合計した結果を示す。

「どちらが楽しかったか」は、「模型」が54名、「講義」が5名、「どちらも」が5名であった。

「どちらがわかりやすかったか」は、「模型」が45名、「講義」が14名、「どちらも」が5名であった。

どちらの質問項目からも、模型を用いた防災教育に参加した小学生は高い満足度を得たことがわかる。よって、ジオラマ模型を用いた防災教育は有効であ

るということが分かった。

3.4 点数化による水防災教育効果の検討

水防災教育効果を検討するために、事前アンケートと事後アンケートを利用した。事前アンケートと事後アンケートから、都市水害の知識と防災意識に関する問題を6問抜粋し、合計で6点満点として点数化を行った。事前アンケートでは、「知っている」と答えていれば1点、「知らない」と答えていたら0点とした。事後アンケートは、「よく分かった(A)」「分かった(B)」と答えていれば1点、それ以外を0点とした。

抜粋した6問は以下のとおりである。

(事前アンケート)

- ・マンホールや水路から雨水が溢れることがあることを知っていますか？
- ・川の水が増えて溢れることがあることを知っていますか？
- ・地下鉄や地下街に雨水が入ってくることがあることを知っていますか？
- ・地下に雨水を貯める場所があることを知っていますか？
- ・家族と水災害についての話をしたことがありますか？
- ・自分が住んでいる地域の水の災害時の避難場所が描いてある地図を知っていますか？

(事後アンケート)

- ・内水氾濫（マンホールや水路から雨水が溢れて起こる水害）についてわかりましたか？
- ・外水氾濫（川の水が増えて溢れて起こる水災害）についてわかりましたか？
- ・地下浸水（地下鉄や地下街に雨水が入ってくること）についてわかりましたか？
- ・雨水貯留施設（地下の雨水を貯める場所）の役割についてわかりましたか？
- ・たくさん雨が降ることを危険だと思いましたか？
- ・家に帰って家族に今日の授業のことを話そうと思いますか？

(1) 事前アンケートと事後アンケートの点数化（神戸小学校 3年生）

ここでは小学3年生を比較の対象としているので3年生の結果だけを抜き出し比較する。Fig.2に事前、事後アンケートの点数とその分布を示す。教育前でも6点満点の児童が5名いる。事前の平均点が3.43点と過去のデータと比較すると少し高い結果となっている。これは外水氾濫に関する認識度が高いことと近年ニュースなどで「ゲリラ豪雨」といった水災害に関する報道が多く、そのため水災害に関して注目が高まってきているためだと考えられる。

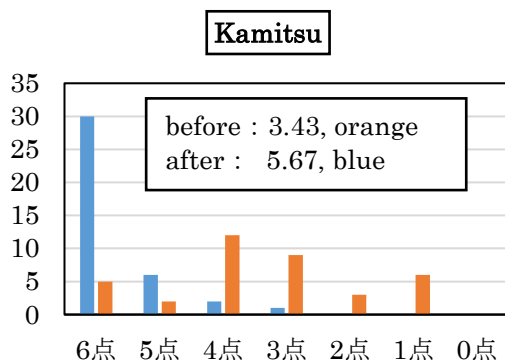


Fig.2 Change of points (Kamitsu)

教育前後での点数分布をみると、事前アンケートでは3点、4点の位置に人数が集まっていることが見てとれるが、事後アンケートでは6点、5点と順に多くの人数が集まっており、左肩上がりのグラフとなっている。これは防災教育効果が表れた結果と考えられる。

(2) 事前アンケートと事後アンケートの点数化(伊丹南小学校)

Fig.3に事前、事後アンケートの点数とその分布を示す。事前の平均点は3.03点であり、教育後を見ても6点満点の児童が70%弱と少し低い結果となった。これは193名という今までにはない大人数の児童を対象としたため、模型実験において全員がしっかり観察することが出来なかった可能性がある。この方法では、大人数を相手にしての教育は厳しいかもしれない。

教育前後での点数分布をみると、事後アンケートでは6点、5点と順に点数が多く集まっており、左肩上がりのグラフとなっている。このことから、防災教育効果は確実に得られていると考えられる。

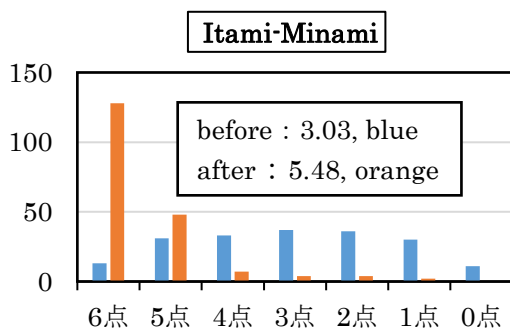


Fig. 3 Change of points (Itami-Minami)

(3) 事前アンケートと事後アンケートの点数化(西富田小学校)

Fig.4に1コマ目に講義型の防災教育を行ったA組の、Fig.5に1コマ目に模型を用いた防災教育を行ったB

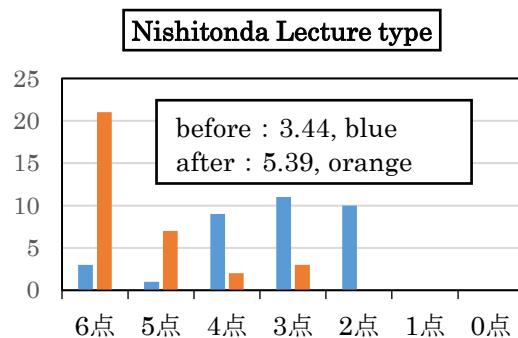


Fig.4 Change of points (Nishitonda),
Lecture type

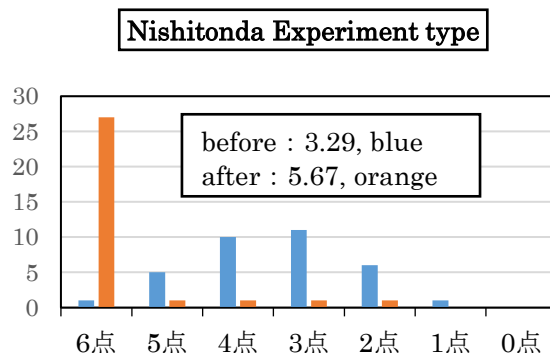


Fig.5 Change of points (Nishitonda),
Experiment type

組の事前、事後アンケートの点数とその分布をそれぞれ示す。教育前の段階では6点満点の児童は2組を合わせても4名しかおらず、2～4点に人数が集まっている。小学校が海の近くに位置するため津波の意識は高い傾向にあるが、付近に地下空間が存在しないことから、地下浸水の項目で「いいえ」と回答した児童が多かったためである。

事後アンケートではどちらの組も平均点が大きく上昇している。A組、B組ともに左肩上がりのグラフになっており、模型を用いた防災教育と講義型の防災教育、どちらも教育の効果が表れている。

しかしながら、6点満点の児童を講義型、体験型と比較すると、体験型が80%以上を占めているのに対して、講義型は約60%に留まっている。これは、前述したとおり、講義型で用いた講義資料に地下空間・雨水貯留施設の説明が入っていなかったことが影響していると考えられ、今後、講義型防災教育を行っていく際の改善点である。

(4) ジオラマ模型を用いた防災教育のまとめ

アンケートの記述式の項目の部分で、「こんな模型だったらいいなと思うことはありますか?」という質問がある。児童達の意見をまとめると、模型に入

間を使用するといいいのではないかという意見が非常に多かった。水災害について学習しながらも、模型の改善点を考察している。

また西富田小学校では、模型を用いる防災教育、講義型の防災教育との間には効果の差はあまり見られないという結果に至ったが、最終アンケートでは模型を用いる防災教育の方が楽しかったという意見が大半を占めていたことから、児童たちの関心や興味をひく効果もある模型を用いる防災教育が魅力的であるということが確認できた。また感想の部分でも、模型について書いている児童が多くいた。実際に目で見て危険性などを感じることで、児童たちの印象に残っているということがよみとれた。

4. おわりに

防災教育後に行ったアンケートや点数化により、ミニチュアのジオラマ模型を用いて防災教育を行うことで、水災害の種類や発生メカニズム、被害、防災対策を効果的に伝えることができるということが確認できた。

西富田小学校では、模型を用いない講義型の防災教育（ジグソーパズルを含む）でも同じように防災教育効果があるということがわかったが、児童達の感想から、模型を用いた授業の方がより楽しく参加でき、かつ興味がわくことも確認できた。

謝 辞

防災教育実施に際して、ご尽力、ご協力いただいた3つの小学校の関係者の皆様、ならびに関西大学環境都市工学部の学生の皆様に心より謝意を表する。

参考文献

- 小舘亮太・田中岳(2012)：児童とその保護者を対象にした防災意識の相違－意識調査を取り入れた防災教育プログラムの実践，土木学会論文集F6(安全問題)，Vol.68，No.2，pp.181-186.
- 黒崎ひろみ・中野晋・橋本誠・東雲礼華(2011)：地震・津波をテーマとした学校防災教育効果の持続と低下，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.401-405.
- 戸田圭一・石垣泰輔・岡本香奈・島田広昭(2014)：地下駐車場の浸水や地下調節池での雨水貯留を表現できる模型による水防災教育，土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集，19巻，pp.117-120.
- 山岡俊一・坂本淳・今田寛典(2012)：土砂災害に対する斜面地居住者の意識レベルを考慮した防災学習パンフレットによる防災教育に関する研究，土木学会論文集F6(安全問題)，Vol.68，No.2，pp.187-192.

(論文受理日：2017年6月13日)

小学校児童保護者を対象とした津波防災意識調査 —白浜町西富田小学校での調査—

Questionnaire Research on Disaster Prevention Consciousness of Tsunami Targeted at the Children's Parents of Nishi-Tonda Primary School in Shirahama Town

馬場康之・小田裕矢⁽¹⁾・石垣泰輔⁽²⁾・戸田圭一⁽³⁾

Yasuyuki BABA, Yuya ODA⁽¹⁾, Taisuke ISHIGAKI⁽²⁾ and Keiichi TODA⁽³⁾

(1) 株式会社LIXIL

(2) 関西大学環境都市工学部

(3) 京都大学経営管理大学院

(1) LIXIL Corporation, Japan

(2) Department of Civil, Environmental and Applied System Engineering, Kansai University, Japan

(3) Graduate School of Management, Kyoto University, Japan

Synopsis

This report shows questionnaire results on disaster prevention consciousness of Tsunami. The targeted area is the school district of Nishi-tonda primary school in Shirahama Town, Wakayama prefecture. This targeted area includes a possible inundation area due to a massive earthquake occur in the Nankai Trough, and the maximum inundation depth is up to 10 m deep.

The questionnaire survey conducted in all grades of Nishi-tonda primary school. Each family answered the questionnaire, and 221 answers in all returned (the collection rate is about 82 percent). The questionnaire has 26 questions regarding respondent's attribute, evacuation in the event of an earthquake, Nankai and Tonankai earthquakes, regional evacuation sites, gathering of information on disaster due to tsunami, and countermeasures on disaster mitigation. From the questionnaire results, it is found that public awareness of disaster prevention is potentially good, and some respondents recognize well that correct situational judgment for evacuation behaviors is important to ensure their safety in the event of an earthquake.

On the other hand, some respondents answered that they don't know well about the regional evacuation sites and tsunami hazard map. Survey results showed that requests on transmission of relevant information and dissemination of knowledge have a majority as the countermeasures against damage due to tsunami. Even though the publicity of relevant information and knowledge is modest way as the countermeasures, constant publicity activities are important to raise the public awareness of disaster prevention.

キーワード: 津波災害, 防災意識, アンケート調査, 小学校

Keywords: tsunami disaster, public awareness of disaster prevention, questionnaire survey, primary School

1. はじめに

著者らは、2015年度から和歌山県白浜町の西富田小学校において小学生（3年生）を対象に、ジオラマ模型と可搬式避難体験ドア模型を用いた水防災教育を実施している（戸田ら、2017）。地域全体の防災力向上において、学校での防災教育は重要な役割を持ち、加えて家庭や地域における防災意識は地域の自助、共助を促進する観点からも重要な位置を占める。ここでは、2017年度の児童を対象とした水防災教育と並行して実施された、全学年の保護者を対象とした津波防災意識調査結果について報告する。

和歌山県白浜町は紀伊半島の南西部、和歌山県の中南部に位置しており、南海トラフ地震および南海、東南海地震による津波の被害が想定されている（和歌山県、2013）。過去には1946年の昭和南海地震による被害を受けており、1960年に発生したチリ地震でも地震発生から約1日後に津波被害が発生している。西富田小学校は白浜町内の堅田、才野の両区を校区とし、児童数は350名前後である。Fig. 1は西富田小学校を含むエリアの津波ハザードマップ（白浜町ハザードマップ、富田地域）である。小学校の近くには安久川が流れ、その南側には富田川がある。ハザードマップでは、川沿いに津波が遡上し、氾濫の発生が想定されている。図中で点線に囲われたエリアと地区名はアンケート実施時に回答いただいた居住地区のおおよその位置を示している。

2. アンケート調査の概要

アンケート調査は、西富田小学校の全学年を対象とし、2017年11月に小学校を通じて各家庭向けのアンケートの配布、回収を行った。アンケートは全部で26の設問があり、地震発生時の避難行動や南海・東南海地震に伴う津波に関する設問、および地域の避難場所や情報収集の方法、防災対策に関する設問などから構成されている（付録参照）。アンケートの配布総数は269であり、回収した数は221（回収率82.2%）であった。Table 1にクラス別の回収率を示す。全26問と数多い設問にも関わらず、多くの方にご回答いただいた。

3. 単純集計結果

ここでは、アンケート調査の全26問に関する単純集計結果を示す。設問の多くは単一回答であるが、設問によっては複数の選択肢を回答したものもあり、以下の集計結果においてはそのような回答も全てそのまま使用する。

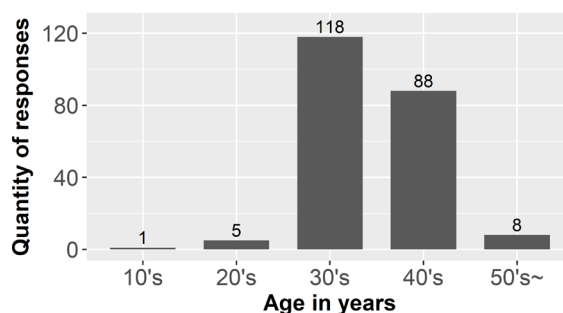


Fig. 2 Respondent age

Fig. 2は回答者の年齢の分布（設問1、回答数：220）であり、30代～40代の保護者の方にご回答いただいていることがわかる。

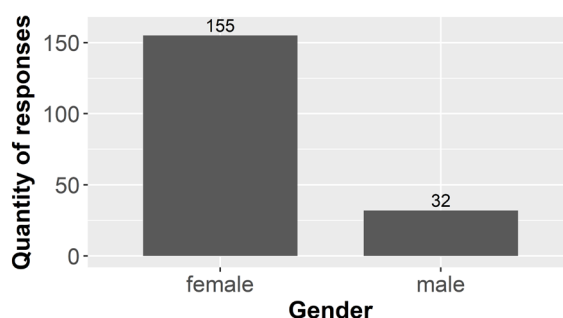


Fig. 3 Respondent gender

Fig. 3は回答者の性別の分布（設問2、回答数：187）であり、回答の多くは女性にご対応いただいていることがわかる。

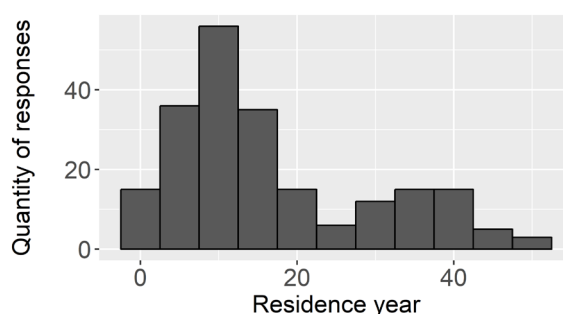


Fig. 4 Residence year of respondent

Fig. 4は居住年数の分布（設問3、回答数：213）である。10年前後の居住年数が多くを占めているが、30年以上にも一定数の回答数があり、20年付近を境とする二山の分布にも解釈することができる。

Fig. 5は居住地区別の回答数の分布（設問4、回答数：219）である。回答数の多いのはa:才野、b:堅田西、f:三橋・マーメイドタウン、i:オレンジランド・西越、次いでc:堅田東・五月丘であり、その他の地域は10名以下であった。次章のクロス集計においては、回答者数の多い4地区（a:才野、b:堅田西、f:三橋・マーメイドタウン、i:オレンジランド・西越）を対象

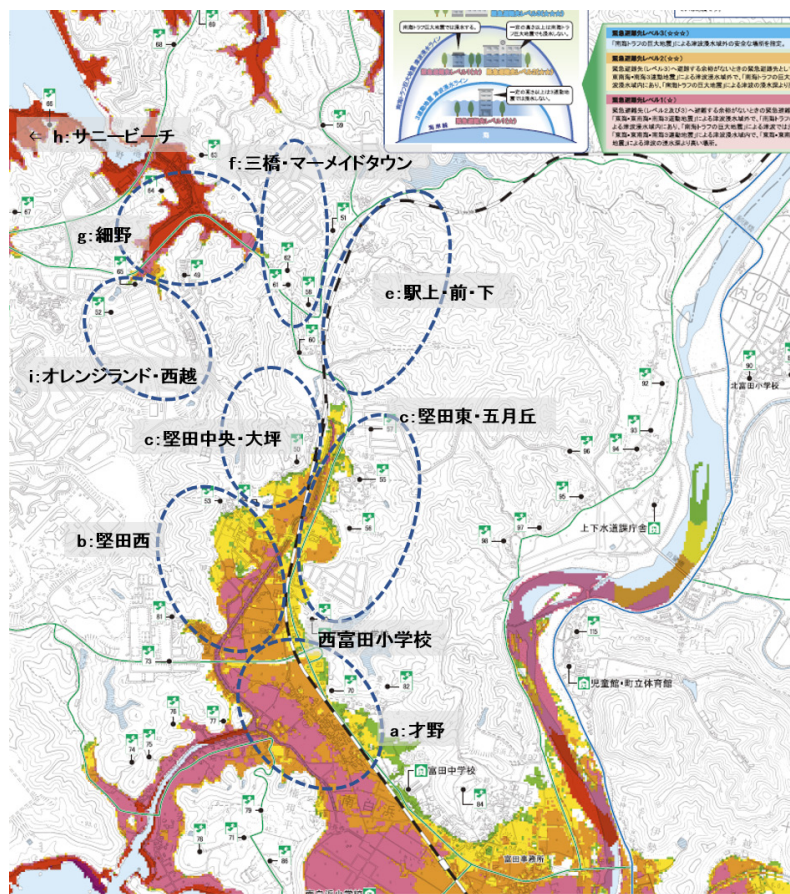


Fig. 1 Tsunami hazard map around Nishi-Tonda Primary School

Table 1 Collection rate of questionnaire

クラス	回収枚数/配布数	回収率
1A	18/19	94.74%
1B	14/15	93.33%
1C	11/14	78.57%
2A	13/15	86.67%
2B	12/17	70.59%
3A	15/20	75.00%
3B	18/22	81.82%
4A	18/19	94.74%
4B	14/15	93.33%
5A	11/14	78.57%
5B	13/15	86.67%
6A	12/17	70.59%
いずみA	15/20	75.00%
いずみB	18/22	81.82%
全体	221/269	82.16%

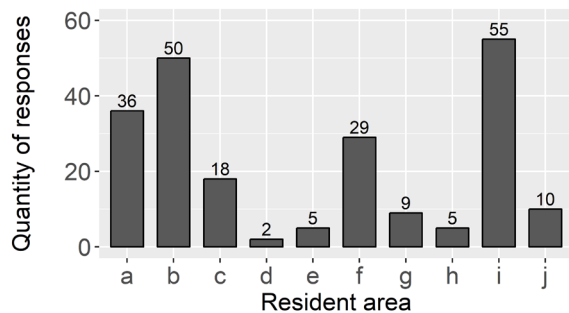


Fig. 5 Resident area of respondent

とする。

回答者の出身地に関する設問（設問5，回答数：204）では，160名以上が和歌山県出身と多数を占める結果となった．関西圏の大阪府が15名，兵庫県が5名となり，その他の地域（15都府県）については全て3名以下であった．

3.1 地震発生を仮定した場合の避難に関する設問

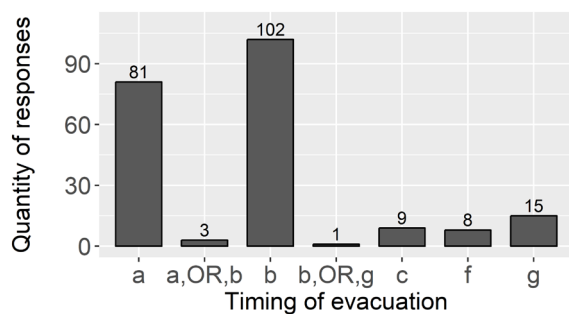


Fig. 6 Timing of evacuation in the event of an earthquake

Fig. 6は地震発生時の避難のタイミングに関する回答結果（設問6，回答数：219）である．本設問は単一回答の設問であるが，数は少ないながら複数回答が含まれていたため，単一回答，複数回答をそのまま集計している．避難のタイミングについては，a:すぐに避難，b:避難指示の放送後の2つの回答が大半を占める結果となった．その他（回答g）にも一定数の回答があり，「いる場所による」や「状況による」などのコメントが示されていた．全体の90%程度が地震発生後すぐ，または避難指示後に避難すると回答しており，避難に関する意識は高いと考えられる．

Fig. 7は地震発生時の避難場所に関する回答結果（設問7，回答数：219）である．本設問も単一回答の設問であるが，全体の10%程度が複数の回答であった．数としては多くないが，いくつかのパターンの複数回答が存在していることから，避難する場所に関して悩む部分（迷う部分）が少なくないことを示しているものと考えられる．悩みや迷いの要因の一つとして，地震が発生したときに，自分自身の居場

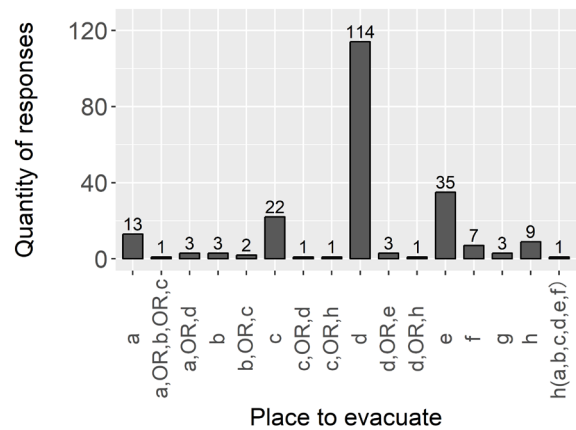


Fig. 7 Place to evacuate in the event of an earthquake

所によって避難場所が変わることが挙げられる．最も数の多い回答はd:海岸から離れた高い場所，次いでe:行政指定の避難場所，c:高い建物であり，適切な避難場所が選択されている．高い建物への回答数が少ないのは，周辺に高層の建物が無いという土地柄が影響している可能性がある．その他（回答h）では，「（高台にある）自宅」や「自宅裏にある山」，「家の近くの高い山」というコメントが示され，「高い場所」への避難が意識されていることがわかる．

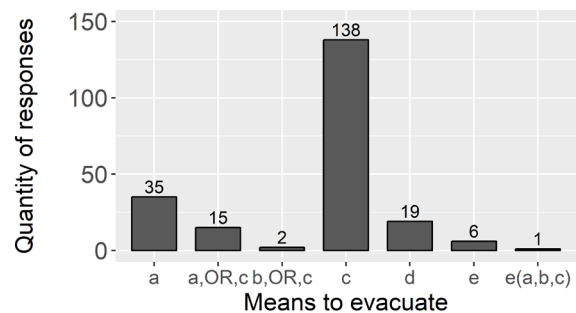


Fig. 8 Means to evacuate in the event of an earthquake

Fig. 8は地震発生時の避難手段に関する回答結果（設問8，回答数：216）である．本設問も単一回答の設問であるが，先の設問6，7と同様に複数回答が含まれている．避難手段については，徒歩での避難が最多で，次が自動車であるが，わからないという回答も10%程度であった．避難場所に関する設問7と同様に，発生時の状況に応じた対応となるため避難の手段を一つに絞り切れない（複数の手段が挙がる）結果になったと考えられる．

3.2 津波への意識に関する設問

Fig. 9は「津波を意識していますか」という設問に対する回答結果（設問9，回答数：220）である．a:常に意識している，b:どちらかと言うと意識しているという回答が全体の90%を占めており，津波への意識の高さがうかがえる結果となっている．

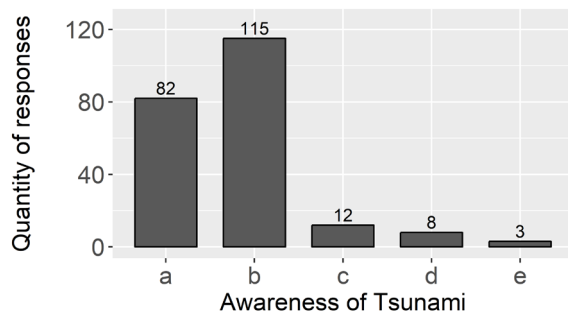


Fig. 9 Awareness of Tsunami

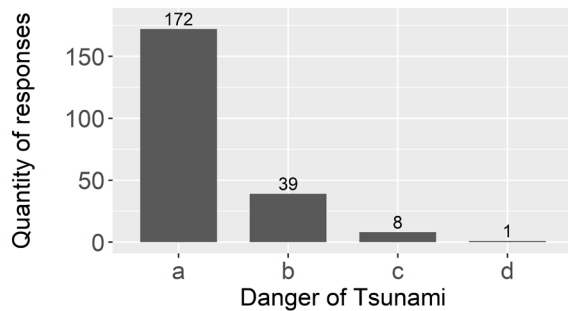


Fig. 10 Danger of Tsunami

Fig. 10は「津波による身の危険」に関する設問への回答結果（設問10，回答数：220）である。設問9と同様に，a:強く感じるが80%を超え，b:少し感じるの2つで全体の90%以上の回答を占めており，津波への意識の高さと同様に，津波による危険に対しても意識が高いと考えられる。

3.3 南海，東南海地震と地震に伴う津波に関する設問

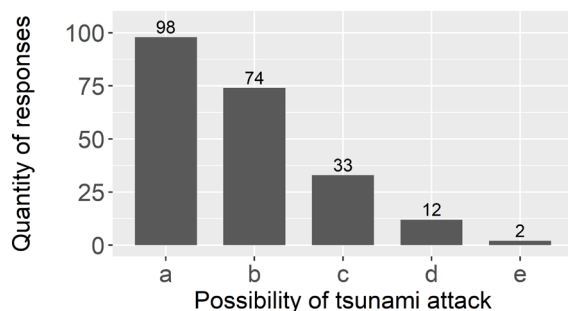


Fig. 11 Possibility of tsunami attack to resident area due to Nankai and Tonankai earthquakes

Fig. 11は「南海・東南海地震による津波来襲の可能性」に関する回答結果（設問11，回答数：219）である。a:来ることを知っている，b:おそらく来ると思うの2つの回答が多数を占めるが，約15%がc:あまり来るとは思わないと回答している。設問が「お住まいの地区に来るかどうか」を問う内容なので，居住地区を考慮した回答（高台にお住まいの回答者は津波が

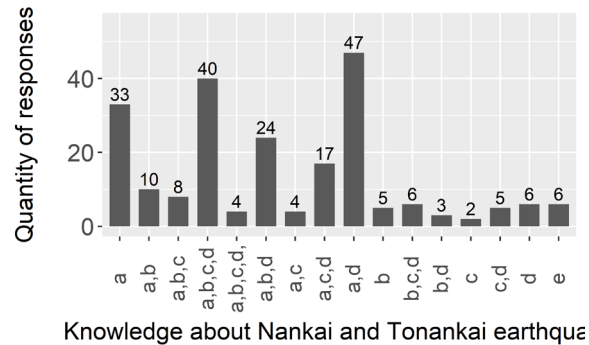


Fig. 12 Knowledge about Nankai and Tonankai earthquake

来るとは思っていない）が含まれていることが考えられる。

Fig. 12は「南海・東南海地震に関する知識」に関する設問（複数回答）への回答結果（設問12，回答数：220）である。aの発生確率が高いことを含む回答が多く，阪神大震災との関係性や津波の発生などについても認識が高いことがわかる。個別の回答数でもaが最多（188）で，次いでd:津波が発生する（152）と続くことから，南海・東南海地震および発生が予想されている津波に関する多くの情報を有していることがわかる。このことはe:わからないの回答が2.7%に留まっていることから裏付けられる。

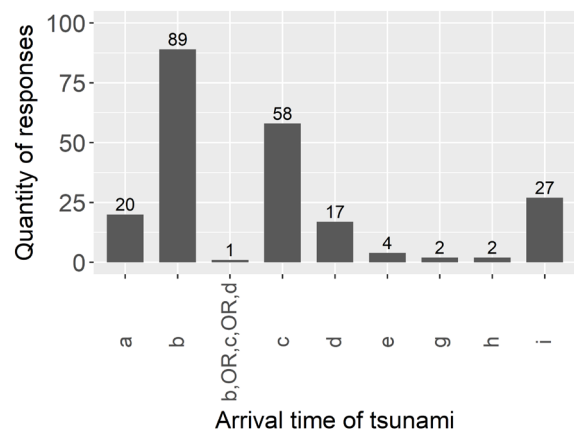


Fig. 13 Arrival time of tsunami after Nankai and Tonankai earthquakes occurrence

Fig. 13は「南海・東南海地震発生後の津波到達時間」に関する回答結果（設問13，回答数：220）である。居住地区への津波到達時間に関しては，10分未満の回答が約半数，10～20分の回答が約1/4を占めているが，i:わからないの回答も10%強存在する。ハザードマップでは1mの津波が6分程度で到達するとされており，多くの回答者が公表されている情報を正しく理解していることがわかる。また，わからないという回答の中には「居住地区」に津波が到達しない場合が含まれているものと思われる。

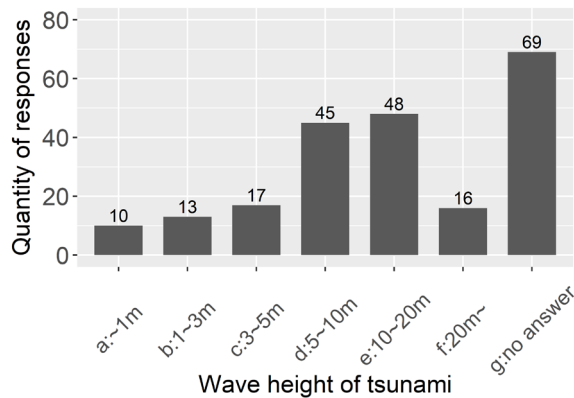


Fig. 14 Wave height of tsunami due to Nankai and Tonankai earthquakes

Fig. 14は「南海・東南海地震発生後に到達する津波高さ」に関する回答結果（設問14，回答数：218）である。ここでは、これまでの設問とは異なり、g:分からないという回答が多数（約30%）を占めている。本設問も居住地区に関するものであり、津波による浸水が想定されていない地域では「わからない」という回答になることが予想される。回答数の多いのが10m前後の津波高さであるのは、田辺湾周辺で予想される津波高は最大で15m程度とされていることによるものと思われる。

3.4 地域の津波対策や情報収集に関する設問

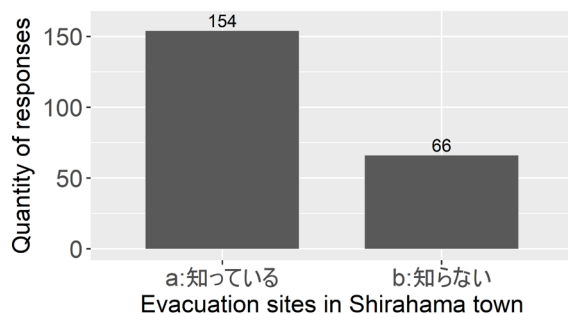


Fig. 15 Evacuation sites in Shirahama town

Fig. 15は「白浜町内の避難場所（位置）の認識」に関する回答結果（設問15，回答数：220）である。知っているという回答が多数を占めるものの、約30%が知らないというのは避難場所の周知に関して改善の余地があると考えられる。

Fig. 16は「津波ハザードマップの認識」に関する回答結果（設問16，回答数：219）である。a:見たことがあるが70%を超えているが、約30%の回答者がハザードマップを見ていないというのは、情報提供、周知の面で余地が残る。

Fig. 17は「津波避難訓練への参加」に関する回答結果（設問17，回答数：219）である。a:是非参加したい、およびb:都合が合えばの二つで約75%を占めるこ

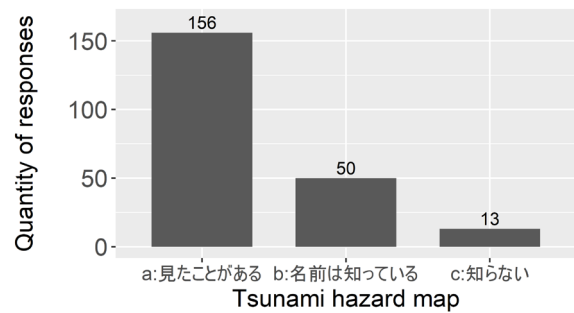


Fig. 16 Tsunami hazard map

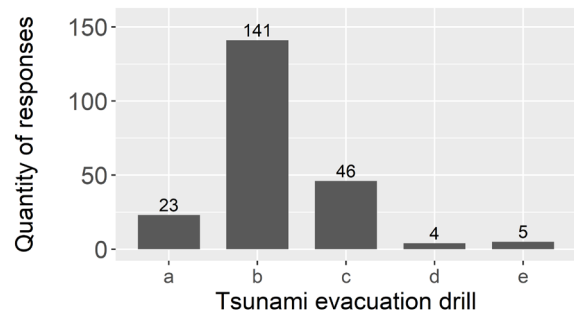


Fig. 17 Participation in tsunami evacuation drill

とから、訓練への潜在的な参加意思は高いと考えられる。c:どちらとも言えないという回答が20%程度存在しているが、これには居住地区（例えば、高台など）が影響しているものと思われる。

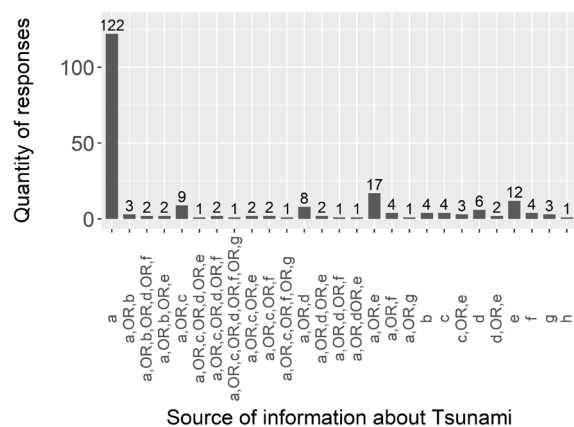


Fig. 18 Source of information about Tsunami

Fig. 18は「津波に関する情報源」に関する回答結果（設問18，回答数：220）である。この設問は単一回答であるが、複数の回答の組み合わせが最も多くなった。これは、情報ソースが複数あることを示していると考えられる。情報源としては、a:テレビが圧倒的に多く、80%以上（N=182）が選択している。次に多いのはe:インターネットを含む回答で約20%（n=42）であるが、インターネットのみという回答（n=12）は10%にも達していない。

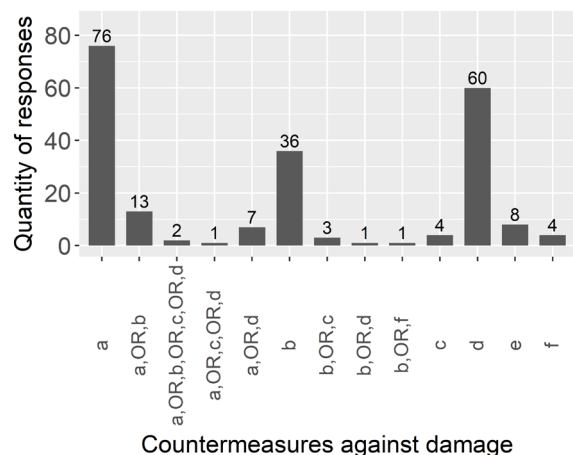


Fig. 19 Countermeasures against damage due to tsunami

Fig. 19は「津波被害を回避する方策」に関する回答結果（設問19，回答数：216）である。この設問は単一回答であるが、複数の回答の組み合わせが散見される。回答数が多いのはa:津波情報を伝える設備、d:知識の普及や教育体制、b:避難場所の整備の3つで、ハード面（避難場所など）よりも、ソフト面（情報、知識）に関する要望が多いことがうかがえる。またこの設問19に対しては、f:その他として「津波を受けない地域での生活を確保するように自治体に取り組む」、「住む場所を変える」、「日ごろからの訓練」、「避難道の整備」、「他の人に任せないで自分で守る」などのコメントが挙げられている。

3.5 地震、津波対策に関する全般的な設問

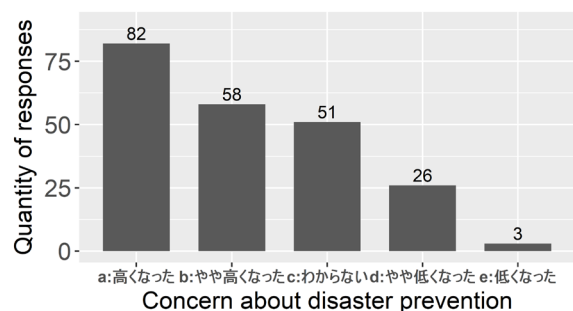


Fig. 20 Concern about disaster prevention on tsunami and earthquake

Fig. 20は「地震津波防災に対する関心」に関する回答結果（設問20，回答数：220）である。アンケートの実施時期は東日本大震災から6年以上を経過しているが、依然として関心の高さが認められる。一方、全体の35%はわからない、またはやや低くなったと回答しており、時間の経過とともに災害への意識が低下する様子も確認できる。

Fig. 21は「地震津波防災に対する関心」の具体例に関する回答結果（設問21，回答数：208）である。複

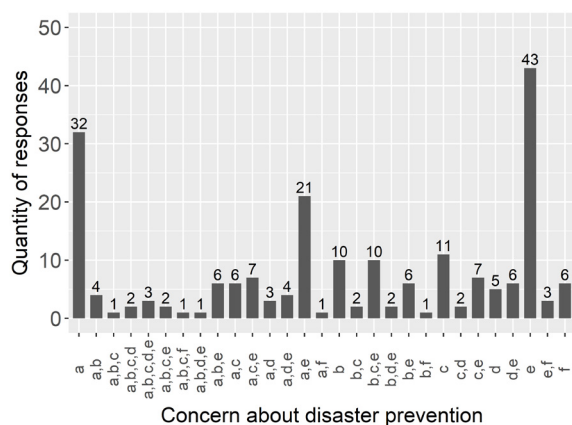


Fig. 21 Concern about disaster prevention on tsunami and earthquake (specific examples)

数回答であるため多くの回答に分かれているが、最も多く選択されたのはc:災害時の家族間の連絡方法の確認（n=121）で、a:自宅近くのハザードマップ（n=107）の2項目が回答者数の50%を超えている。b:家の中の危険箇所の点検、c:家具などの固定がともに約25%程度の回答数となり、家族や身の周りに関わる防災対策への関心の高さがうかがえる。

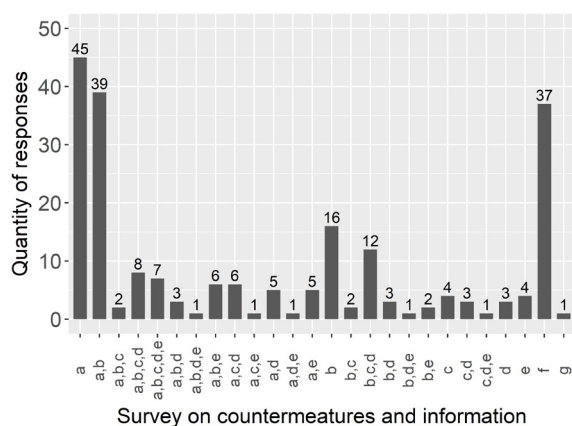


Fig. 22 Survey on countermeasures and information about disaster prevention

Fig. 22は過去に調べたことのある「防災対策や関連する情報」に関する回答結果（設問22，回答数：218）である。本設問も複数回答であるため、多くの組み合わせに回答が分かれている。その中で、f:調べていないという回答が約15%あるが、一定以上の情報がすでに流布されている結果とも受け取れる。調べたという回答の中では、a:避難場所（n=132）、b:ハザードマップ（n=102）が多くなっている。

Fig. 23は「家庭内での災害に関連する話の頻度」に関する回答結果（設問23，回答数：220）である。“する”か“しない”で分けると、するが80%、しないが20%となる。設問の“ときどき”と“たまに”が表す頻度が回答者の受け取り方で結果が左右されてしま

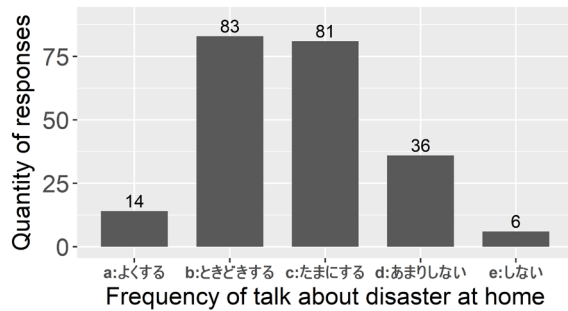


Fig. 23 Frequency of talk about disaster at home

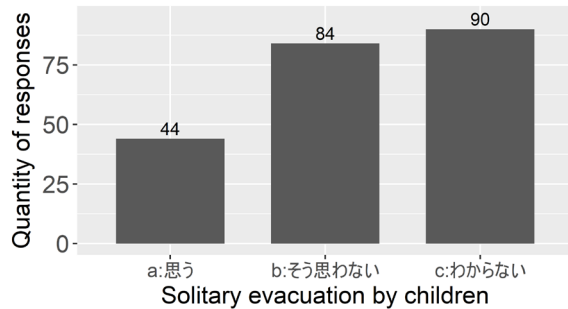


Fig. 24 Feasibility of solitary evacuation by children

うため、その頻度については不明な部分が残るものの、多くの家庭で何かの折りに災害に関する話題が挙がるという状況を示していると思われる。

Fig. 24は「子供だけの避難行動」に関する回答結果（設問24, 回答数: 218）である。子供自身による自己避難に関して、子供が自力で避難できると考える回答は約20%に留まっている。否定的な回答ができるという回答の倍となる一方で、わからないとする回答が最も多くなっている。本設問の回答には「実際の避難については状況次第」というコメントがあり、できる、できないの形で単純に回答できないことが背景にあると考えられる。

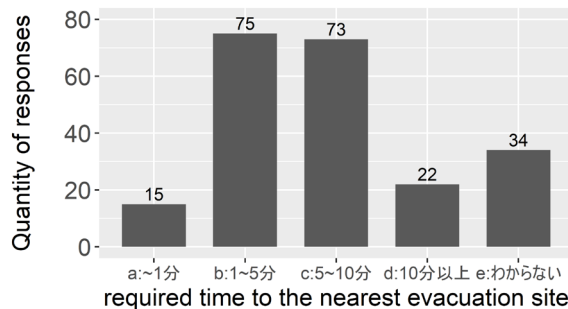


Fig. 25 Required time to the nearest evacuation site

Fig. 25は「最寄りの避難所までの所要時間」に関する回答結果（設問25, 回答数: 219）である。最寄りの避難場所までの所要時間に関しては、1~5分、5~10分と回答した数が同程度で、ともに約30%を占める。分からないという回答が約15%に達しているが、

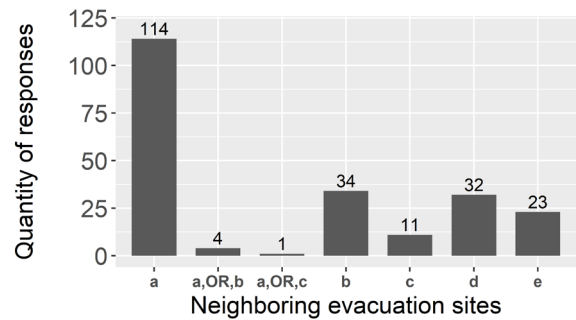


Fig. 26 Visit to neighboring evacuation sites

設問15（白浜町内の避難場所（位置）の認識）で知らないという回答が約30%であることを考え合わせると、分からないという回答が一定数に上るのはやむを得ない結果かと思われる。

Fig. 26は「最寄りの避難所に行ったことがあるか」という設問に対する回答結果（設問26, 回答数: 219）である。a:行ったことがあるが全体の50%を超えている。b:地図上での確認が15%程度、数は少ないながらc:集合場所として設定しているという回答もあった。行ったことがない、避難場所を知らないという回答は全体の25%程度であり、設問15で避難場所を知らないという回答（約30%）と同程度となっている。

以上、アンケート（全26問）に関する単純集計結果を個別に示した。津波への意識（設問9）や津波による危険性（設問10）の結果から、総じて津波および津波により引き起こされる災害に関する意識は高いものと思われる。避難のタイミングに関する設問（設問6）についても、「すぐに」、「避難指示の放送後すぐ」の回答が全体の90%に達していることから、意識の高さがうかがえる。

また、避難場所（設問7）、避難の手段（設問8）、情報源（設問18）は単一回答を求める設問にもかかわらず、複数の選択肢を挙げる回答者数が一定数以上見られた。このような回答に対応して、回答時に記述されたコメントには次のようなものが挙げられていた。

設問6:「地震が発生したら、いつ避難しますか?」に対して;

“場所による”, “居る場所による”, “状況を見て”, “高台の自宅へ” “その場が危険と感じたら”

設問8「地震が発生したら、どのような手段を用いて避難しますか?」に対して;

“ケースバイケース”, “場所による”, “状況を見て”, “走る”, “高台が近ければ徒歩, 遠ければ車”

本アンケートの設問では、居住地区への津波来襲

の可能性や到達時間、津波高さなどを質問しているが、上記のように避難行動やその手段など具体的な内容については地震発生時に居る場所やタイミングに応じた個別の対応となることもあり、設問のいくつかでは“わからない”など判断に迷うことをうかがわせる回答の多いものもあった。設問への回答を迷うものとしては、児童単独での避難に関する設問（設問24）も同様であり、できると思うという回答が約20%に留まり、できるとは思わない、わからないという回答がそれぞれ約40%を占めた。これも上記コメントと同様に、実際の避難行動はその場の状況判断が重要となるため、児童単独での避難を危惧する内容が反映された結果と言える。

4. クロス集計結果

前章のFig. 4に示すように、調査範囲内の居住年数は20年付近を境に二山の分布をしており、この地域に長くお住まいの方と相対的に最近からお住まいの方に大きく二分することができる。また、Fig. 5に示す居住地区については、回答数にバラツキが多いものの、回答数が20名以上として次の4地区（a:才野, b:堅田西, f:三橋・マーメイドタウン, i:オレンジランド・西越）がある。これらの地区はFig. 1の津波ハザードマップ上では、a:才野, b:堅田西は南海トラフの巨大地震を想定した津波のハザードマップで浸水する範囲を含み、f:三橋・マーメイドタウン, i:オレンジランド・西越は浸水するとされる範囲の少ないエリアである。

以下に示すクロス集計では、アンケートの回答結果のいくつかに対して、居住年数、居住地区（上記4地区）による差異の有無について検討する。ここで、居住年数は20年を区切りとし20年未満（n=149）と20年以上（n=64）の2つに分類する。なお、前章で示したように単一回答を求める設問においても複数の回答が記述されている場合がある。ここでは、複数の選択肢を記述した回答は省いてクロス集計を行う。

Fig. 27は、「津波を意識していますか」という設問に対する居住年数および居住地区別のクロス集計結果である。この設問は、単純集計（Fig. 9）においても90%以上が“意識をしている”と回答している。クロス集計結果についても、居住年数、居住地域間での回答の差はあまりみられない。強いて挙げれば、居住年数が20年未満のグループと、居住地区a, b（ともに津波のハザードマップで浸水する範囲を含む）の回答に“意識していない”や“わからない”という回答がやや多く含まれている。

Fig. 28は、「津波による身の危険」に関する設問に

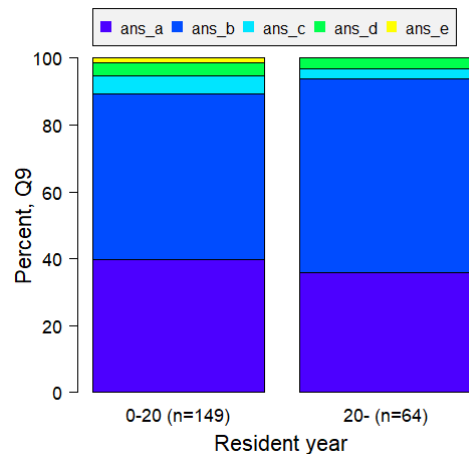


Fig. 27 Crosstabulation of Awareness of Tsunami and residence year and area

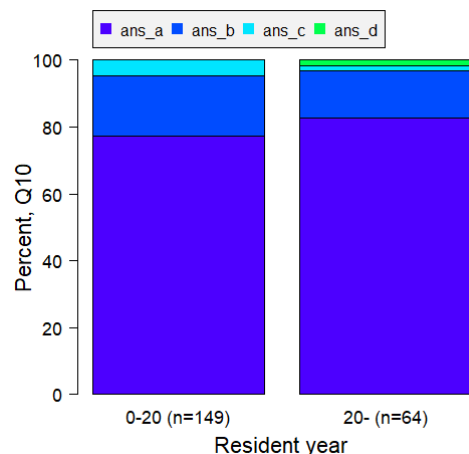
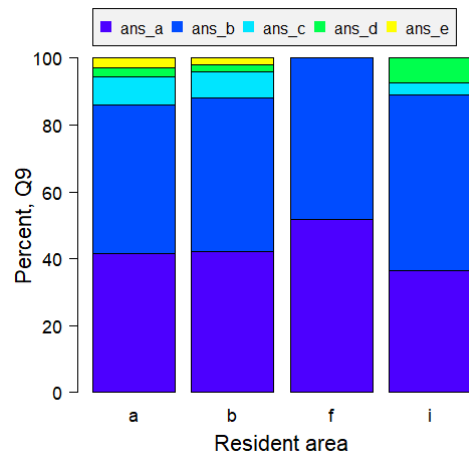


Fig. 28 Crosstabulation of Danger of Tsunami and residence year and area (continued)

に対する居住年数および居住地区別のクロス集計結果である。この結果においても、居住年数、居住地域間での回答の差はあまりみられない。

Fig. 29は、「南海・東南海地震による津波来襲の可

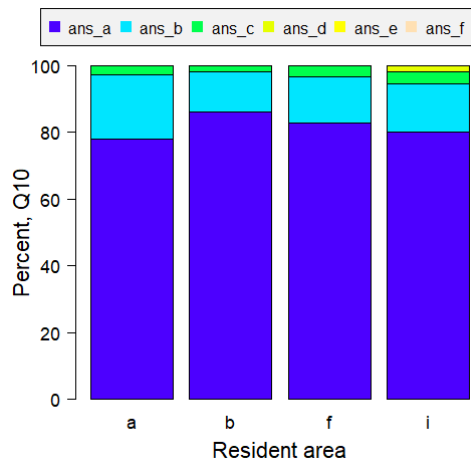


Fig. 28 Crosstabulation of danger of tsunami and residence year and area

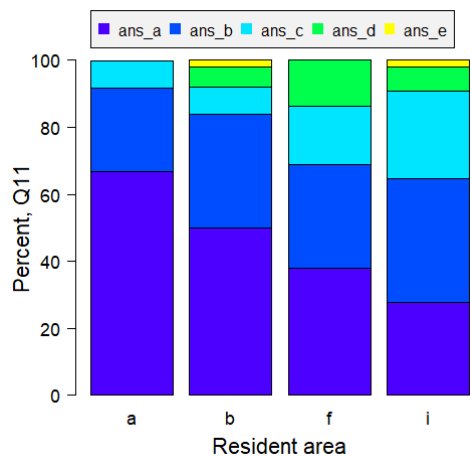
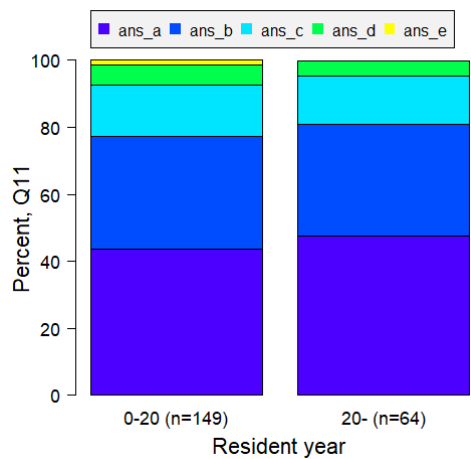
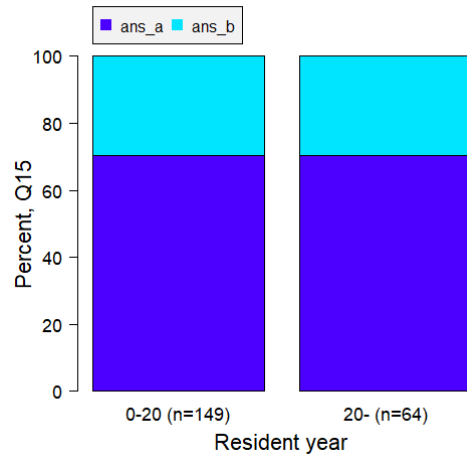


Fig. 29 Crosstabulation of possibility of tsunami attack to resident area and residence year and area

能性」に関する設問に対する居住年数および居住地区別のクロス集計結果である。この設問も、単純集計 (Fig. 11) においては80%程度が“来ることを知っている”, “おそらく来ると思う”と回答しているが、

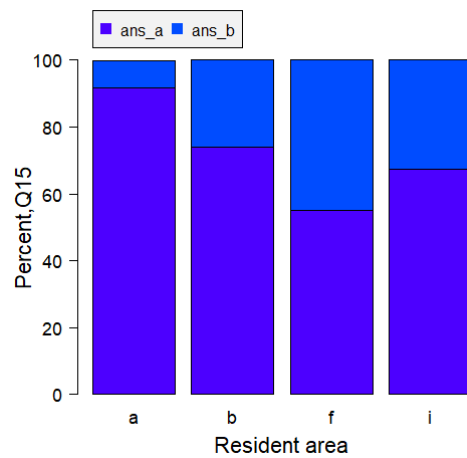


Fig. 30 Crosstabulation of Evacuation sites in Shirahama town and residence year and area

約15%は“あまり来るとは思わない”と回答している。本設問について、居住年数では回答割合に差はほとんど無いものの、居住地域別では選択肢a（来ることを知っている）とb（おそらく来ると思う）、およびc（あまり来るとは思わない）の回答割合に違いが見られる。Fig. 29下では居住地区がaからiに移るに従って選択肢aまたはbの割合が減り、逆に選択肢cの割合が増える傾向が見られる。津波ハザードマップ上で浸水の可能性が低いエリア（居住地区f, i）、すなわち高台や標高が相対的に高い地域では津波来襲の可能性が少ないと判断されていることをうかがわせる結果となっている。

Fig. 30は「白浜町内の避難場所（位置）の認識」に関する設問に対する居住年数および居住地区別のクロス集計結果である。避難場所の認識については、居住年数による変化はみられず、20年未満、20年以上のグループともに25%程度が「知らない」と回答している。居住地区別では、「南海・東南海地震による津波来襲の可能性」に関する設問 (Fig. 11) で津波

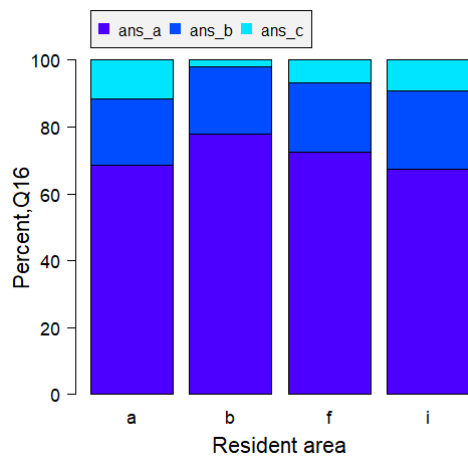
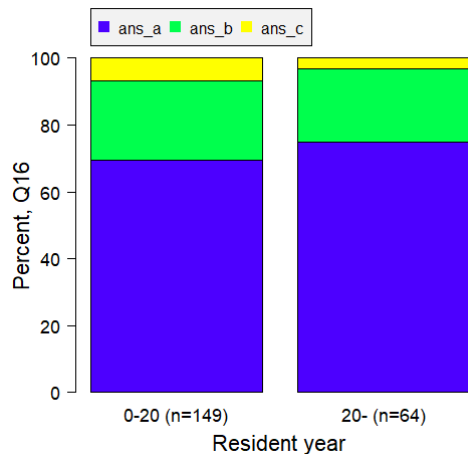


Fig. 31 Crosstabulation of Tsunami hazard map and residence year and area

への意識が高かった居住地区aでは、知っているという回答が90%を超える。その他の3地域では知らないという回答が30～40%程度あり、居住地区fでは知らないが40%程度に達している。ただし、アンケート内のコメントに「自宅が高い場所にあるので避難所には行かない」というものがあり、住んでいるエリアの標高が高いことも回答割合に関係している可能性がある。

Fig. 31は「津波ハザードマップの認識」に関する設問に対する居住年数および居住地区別のクロス集計結果である。居住年数による回答割合の差はあまりないが、年数が長い方が「見たことがある」という回答がやや多くなっている。この設問については居住地区間の差が大きくなり、いずれの居住地区でも見たことがあるという回答が60%以上を占める。一方、知らないという回答も一定以上あり、周知の徹底が必要かと思われる。

最後に、設問9「津波を意識していますか」と設問20「地震津波防災に対する関心」に関するクロス集

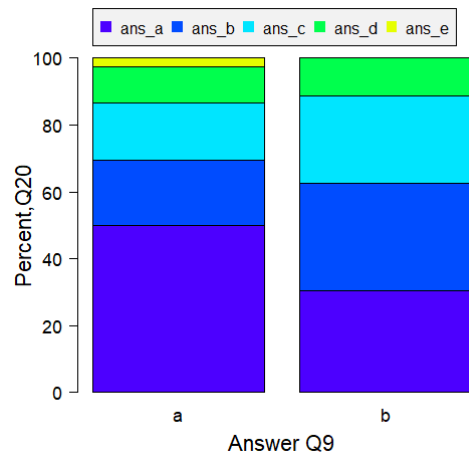


Fig. 32 Crosstabulation of Awareness of Tsunami and Concern about disaster prevention on tsunami and earthquake

計結果をFig. 32に示す。Fig. 32には、設問9で選択肢a（常に意識している、n=82）と選択肢b（どちらかという意識している、n=115）の回答に対して、設問20での回答割合を比較したものである。設問9（Fig. 9）で選択肢a（常に意識している）と回答したグループは防災対策への意識が高くなったと回答している割合が多い。設問9で選択肢bと回答したグループでは、防災対策の意識で高くなったと回答した割合が減るものの、やや高くなったとする割合は逆に多く、防災対策への意識が高くなった、または変わらないとする回答割合（設問20の選択肢a, bおよびc）はいずれも90%に近い。一方で、いずれのグループにおいても、全体の10%程度は防災対策への意識が低くなったと回答しており、時間の経過とともに災害への意識が低下する様子も確認できる。

5. おわりに

本報告では、児童を対象とした水防災教育と並行して実施された、全学年の保護者を対象とした津波防災意識調査（アンケート調査）の結果について単純集計結果およびクロス集計結果を示した。調査にご協力いただいた和歌山県白浜町の西富田小学校の校区は、南海トラフ地震発生時には10m程度の浸水深が想定されるエリアを含んでおり、西富田小学校は町が開設する避難場所に指定されている。加えて、校区内には数多くの初期避難場所（全て緊急避難先レベル3）も指定されている。

アンケート結果より、津波および津波による災害に対する意識は総じて高く、避難のタイミングも早い時期を選択する回答が多いことが確認された。このことは、対象域内における潜在的な防災意識が高

いことを示している。また、設問に対するコメントの中には、避難行動やその手段など具体的な内容については地震発生時に居る場所やタイミングに応じた状況判断が必要であることを指摘するものがあり、本アンケートへの回答に際しても実際の災害発生時を想定しながら真剣にご回答いただいていることがうかがえる（実際に想定するが故に迷う部分が多く、単一回答の設問にも複数の選択肢を回答する結果が多く見られた）。

一方で、近隣の避難場所を知らないという回答や、津波ハザードマップを見たことがないという回答が一定数存在した。このような基本的な情報はもれなく周知されることが望ましい。津波の被害を回避するための方策としてハード面（避難場所）よりも、ソフト面（情報、知識）に関する要望が多いことから、想定される災害および避難場所、経路などの情報を継続的に地道に周知徹底するための努力が必要である。

本アンケートのような調査から得られる避難意向、避難意図（例えば、設問6, Fig. 6）と、実際の避難行動には乖離があることが指摘されている（牛山, 2017）。被害の軽減につながる避難行動を如何に実行するかという議論の中で、その難しさや課題、今後に向けた方策についての議論、意見交換が行われている。避難の意識を実際の避難行動につなげることは上記参考文献内の議論においても示されている通り容易なことではないが、本調査結果で示された課題の克服を通じて、当該地域における津波被害軽減への一助としたい。

謝 辞

本報告で実施したアンケート調査にご協力いただきました、和歌山県白浜町立西富田小学校の関係者の皆さま、またアンケートにご回答いただいた皆さまにこの場を借りてお礼申し上げます。また、児童を対象とした防災教育の実施ならびにアンケート調査の集計、解析においては、関西大学環境都市工学部環境防災水工学研究室諸氏のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

牛山素行（2017）：『自然災害の避難学』構築を目指して、自然災害科学, Vol. 35, No. 4, pp. 293-327.
白浜町ハザードマップ・富田地域（2014）,
http://www.town.shirahama.wakayama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/11/tunami_map_02_tonda.pdf,
20180608確認。

http://www.town.shirahama.wakayama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/11/tunami_map_02_tonda.pdf,
20180608確認。

戸田圭一・石垣泰輔・安田誠宏・馬場康之・中島隆介（2017）：ジオラマタイプのミニチュア模型を用いた水防災教育の実践，京都大学防災研究所年報，第60号B, pp. 692-700.

和歌山県（2013）：津波浸水想定について，
http://www.town.shirahama.wakayama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/11/tunami_map_02_tonda.pdf,
20180608確認。

津波防災意識調査

京都大学防災研究所白浜海象観測所と関西大学環境都市工学部環境防水工学研究室では、津波防災意識調査を行っています。お手数ですが、以下の質問に対して該当する選択肢に○をしてください。

“統計的分析のために皆様の大まかな年齢や住所をお聞かせします。”

1. 年齢 a. 10代 b. 20代 c. 30代 d. 40代 e. 50代以上
2. 性別 a. 男 b. 女
3. 白浜町での居住年数をお教えてください () 年
4. お住いの地区をお教えください a. 才野 b. 堅田西 c. 堅田東・五月丘
d. 堅田中央・大坪 e. 駒上・前・下 f. 三橋・ヤマメイ・ドラクワ g. 細野 h. サニービーチ
i. オレンジランド・西越 j. その他 ()
5. ご出身の都道府県をお教えください ()

地震が発生したという仮定で質問します。

6. 地震が発生したら、いつ避難しますか？
a. すぐに避難する b. 避難指示の放送が流れたら避難する
c. 周りが避難し始めたら避難する d. 海面の変化を感じたら避難する
e. 津波が来るのが見えたら避難する f. わからない g. その他 ()
7. 地震が発生したら、どこに避難しますか？
a. 空地や運動場のような広い場所 b. 頑丈そうな建物 c. 高い建物
d. 海岸から離れた高い場所 e. 行政指定の避難場所 f. その場にとどまる
g. わからない h. その他 ()

8. 地震が発生したら、どのような手段を用いて避難しますか？

- a. 車 b. 自転車、バイク c. 徒歩 d. わからない e. その他 ()

津波に関する感覚について質問します。

9. 津波を意識していますか？
a. 常に意識している b. どちらかという意識している c. どちらともいえない
d. どちらかという意識していない e. まったく意識していない f. わからない

10. 津波というものに対して身の危険を感じますか？

- a. 強く感じる b. 少し感じる c. どちらともいえない d. あまり感じない
e. まったく感じない f. わからない

南海・東南海地震とそれに伴う津波について質問します。

11. 南海・東南海地震が発生した場合、お住いの地区に津波が来る可能性についてどのように思
いますか？
a. 来ることを知っている b. おそらく来ると思う c. あまり来るとは思わない
d. まったく来るとは思わない e. わからない

12. 南海・東南海地震について何か知っていますか？(複数回答可)

- a. 30年以内に発生する確率が高い b. 阪神大震災よりも地震の規模が大きい
c. 阪神大震災よりも被害の発生する範囲が広い d. 津波が発生する
e. 知らない f. その他 ()

13. 海・東南海地震が発生した場合、お住いの地区に津波が到達するまでの時間はどれくらいだ
と思いますか？

- a. 5分未満 b. 5分以上～10分未満 c. 10分以上～20分未満
d. 20分以上～30分未満 e. 30分以上～40分未満 f. 40分以上～50分未満
g. 50分以上～1時間未満 h. 1時間以上 i. わからない

14. 南海・東南海地震が発生した場合、お住いの地区に到達する津波の高さはどれくらいだと思
いますか？

- a. 1m未満 b. 1m以上～3m未満 c. 3m以上～5m未満 d. 5m以上～10m未満
e. 10m以上～20m未満 f. 20m以上 g. わからない

真→続く→

問い合わせ先 京都大学防災研究所白浜海象観測所 馬場康之・芹澤重厚 0738-42-5632
関西大学環境都市工学部 石垣泰輔 06-6368-0901

津波に関する情報や対策について質問します。

15. 白浜町が指定している避難場所の位置を知っていますか？
a. 知っている b. 知らない

16. 津波ハザードマップを知っていますか？

- a. 実際に見たことがある b. 名前だけ聞いたことがある c. 知らない

17. 津波に対する避難訓練があれば参加したいと思いますか？

- a. ぜひ参加したい b. 都合が合えば参加したい c. どちらともいえない
d. あまり参加したくない e. 参加したくない

18. あなたの津波に関する知識や情報は何かから一番得ましたか？

- a. テレビ b. ラジオ c. 新聞・雑誌 d. 市報・県報 e. インターネット
f. 学校 g. 家庭 h. その他 ()

19. 津波による被害を回避するために、一番大切だと思ふ対策は何ですか？

- a. 津波情報を伝える設備 b. 避難場所の設備 c. ハザードマップの作成・公表
d. 知識の普及や教育体制 e. わからない f. その他 ()

地震・津波防災対策について質問します。

20. 東日本大震災から6年以上経過しました。地震津波防災に対する関心はどうなりましたか？
a. 高くなった b. やや高くなった c. 変わらない d. やや低くなった e. 低くなった

21. たとえばどのようなことについての関心が高まりましたか？(複数回答可)

- a. 自宅近くのハザードマップ b. 家の中の危険箇所の点検 c. 家具などの固定
d. 自主防災組織の活動への関心 e. 災害時の家族間の連絡方法の確認
f. その他 ()

22. これまでに、以下の防災対策や情報を調べましたか？(複数回答可)

- a. 避難場所 b. 津波ハザードマップ c. 津波の到達波高 d. 津波の到達時間
e. 過去の津波被害 f. 調べていない g. その他 ()

23. 家族で地震・津波などの災害について話をされましたか？

- a. よくする b. ときどきする c. たまにする
d. あまりしない e. しない

24. 災害時、子供は避難所などへ自力で避難することができると思っていますか？

- a. 思う b. そう思わない c. わからない

25. 最寄の避難所まで行くのにどのくらいかかると思っていますか？

- a. 1分未満 b. 1分以上～5分未満 c. 5分以上～10分未満
d. 10分以上 f. わからない

26. 近くの避難所を確認したことがありますか？

- a. 行ったことがある b. ハザードマップで確認した c. 家族の集合場所に行っている
d. 行ったことがない e. 避難場所を知らない

アンケートにご協力ありがとうございました

(調査受理日：2018年6月13日)

Welcome to Kochi



Venue: Media no Mori 6F, Kochi University (2-5-1 Akeboro-cho, Kochi 780-8520, JAPAN)

3-minute walk from JR Asakura Station (Japan Railway Dosan Line)

1-minute walk from Asakura (Kochidaigakumae) Stop (Tosaden Tram)

1-minute walk from Asakura Kochidaigakumae Stop (Tosaden Bus)

Local Organizing Committee

Chair

Keiichi Toda (Kyoto Univ.)

Secretary General

Hao Zhang (Kochi Univ.)

Members

Haruo Yamaguchi (Kochi Univ.)	Hideaki Ichiura (Kochi Univ.)	Kohsuke Adachi (Kochi Univ.)
Kou Ikejima (Kochi Univ.)	Makoto Takeda (Chubu Univ.)	Masayuki Matsuoka (Kochi Univ.)
Mina Hori (Kochi Univ.)	Shushi Sato (Kochi Univ.)	Taira Ozaki (Kansai Univ.)
Taisuke Ishigaki (Kansai Univ.)	Taku Fujiwara (Kochi Univ.)	Tomoaki Ichie (Kochi Univ.)
Yasuyuki Baba (Kyoto Univ.)		

Secretariat

Laboratory of Hydrosience and Engineering, Faculty of Science and Technology, Kochi University

Tel & Fax: +81-88-844-8277 E-mail: zhang@kochi-u.ac.jp

URL: <https://www.kochi-u.ac.jp/ino-wbcs/event/UFM2019/>

The 2nd International Workshop on Urban Flood Management (UFM2019)

September 11, 2019
KOCHI, JAPAN



Co-organized by

Subcommittee on Disaster Research, Committee on Underground Space Research,
Japan Society of Civil Engineers

Center of Excellence for Development of Innovative Water and Biomass Cycle Systems,
Kochi University



PROGRAM

9:00-9:20	Registration
9:20-9:25	Opening Address <i>Katsutoshi Sakurai (President of Kochi University)</i>
9:25-9:35	Introduction of Committee on Underground Research, Japan Society of Civil Engineers <i>Yasuyuki Baba (Kyoto University)</i>
9:35-9:45	Introduction of Center of Excellence for Development of Innovative Water and Biomass Cycle Systems, Kochi University <i>Taku Fujiwara (Kochi University)</i>

Keynote Lecture

9:45-10:30	Urban flood management in China: challenge and coping strategy <i>Cheng Xiaotao (Expert Team Member of China National Disaster Reduction Committee)</i>
10:30-10:40	Break

Technical Session1 *Chair: Kenichiro Kobayashi (Kobe University)*

10:40-11:10	Experimental learning in primary school for disaster prevention with hydraulic urban model <i>Taisuke Ishigaki (Kansai University)</i>
11:10-11:40	Sponge city and urban flood management in Jinan City, China <i>Xu Zhongxue (Beijing Normal University)</i>
11:40-12:10	Evacuation analysis in flooding at multi-layer underground space <i>Keiichi Toda (Kyoto University)</i>

12:10-12:40 Lunch

12:40-13:10	Demonstration of Urban Flooding with Miniature City Model <i>Hao Zhang (Kochi University)</i>
-------------	---

Technical Session2 *Chair: Chieh-Hsuan Weng (National Cheng Kung University)*

13:20-13:45	High-resolution modelling techniques for urban flood and its applications for sponge-city evaluation <i>Hou Jingming (Xi'an University of Technology)</i>
13:45-14:10	Analysis model on urban inundation and its applications <i>Makoto Takeda (Chubu University)</i>
14:10-14:35	Practical application of image technology in urban hydrological monitoring <i>Qu Zhaoshong (Beijing Sinfotek Technology Co., Ltd)</i>
14:35-15:00	Flood inundation simulation and its uncertainty regulated by hydraulics and topography <i>Ryota Tsubaki (Nagoya University)</i>
15:00-15:25	Experimental study on drowning accident risk at irrigation channel and side ditch <i>Takaaki Okamoto (Kyoto University)</i>
15:25-15:35	Break

Technical Session3 *Chair: Shushi Sato (Kochi University)*

15:35-16:00	Urban water-logging early warning technology and its application <i>Wang Jing (China Institute of Water Resources & Hydropower Research)</i>
16:00-16:25	Assessment of flood damage in the river basins of Southeast Asia <i>Badri Bhakta Shrestha (University of Tokyo)</i>
16:25-16:50	Comprehensive measurement techniques of water flow, bedload and suspended sediment using Acoustic Doppler Current Profiler <i>Shoji Okada (National Institute of Technology, Kochi College)</i>
16:50-17:15	Management system with IOT sensors for flooding disasters in Tainan City <i>Chih-Wei Huang (National Cheng Kung University)</i>
17:15-17:40	Sediment-flood disasters caused by extreme heavy rain fall: a case study of rivers in Hiroshima prefecture during the heavy rain in July 2018 <i>Tatsuhiko Uchida (Hiroshima University)</i>

17:40-17:45	Closing Remarks <i>Keiichi Toda (Chair of UFM2019 and Professor of Kyoto University)</i>
-------------	--

19:00-21:00	Reception <i>Room Asuka, Kochi Kaikan (5-6-42 Hon-Machi, Kochi City)</i>
-------------	--