様式８

河川基金助成事業

「人的被害に関する洪水氾濫フラジリティカーブの構築」

助成番号：2021 - 5211 - 038

東京理科大学土木工学科
教授 二瓶　泰雄

2021 年度

1. はじめに

近年の記録的な豪雨の頻発化に伴い，毎年のように全国各地で甚大な被害が発生している．特に，人的被害の軽減は最重要課題であり，平成 30 年 7 月豪雨で 245 名，令和元年東日本台風で 107 名，令和 2 年 7 月豪雨で 84 名の死者・行方不明者が発生した [1~3]．平成 30 年 7 月豪雨は通称西日本豪雨とも呼ばれ，西日本を中心に広い範囲で記録的豪雨が頻発した．この豪雨により，平成最多の死者数を記録した．特に，岡山県倉敷市真備町では高梁川水系小田川とその支流の堤防が 8 か所決壊し，町内の約 3 割が浸水したことで 51 名の人的被害が発生した．その翌年には令和元年東日本台風が 10 月 12 日に伊豆半島から日本に上陸し，強い勢力を維持したまま東日本を通過し，東日本を中心に記録的な豪雨をもたらし [4]，全国 71 河川，142 箇所における河川堤防が決壊した．また，家屋の全壊約 3 千棟，半壊約 1 万 8 千棟，床上浸水約 2 万棟，床下浸水約 4 万棟となり，被害額は 1 兆 8600 億円と統計史上最大となった．この令和元年では，総被災建物数は 9 万 9 千棟，水害被害額は 2 兆 1500 億円と甚大な被害が発生した [5]．さらにその翌年には，令和 2 年 7 月豪雨が発生し，7 月 3～31 日にかけて梅雨前線の影響により，西日本から東北地方の広い範囲で記録的な大雨となった．特に，球磨川では流域全体に線状降水帯がかかり，越水・溢水が 32 箇所で発生し，50 名の人的被害が発生した [6]．上記 3 つの洪水における人的被害の詳細な調査が行われ，犠牲者の多くが高齢者であったこと，家屋内での死者の多くが一階で発見されたこと，浸水深 2m を下限値として人的被害が発生したことが明らかになった [7]．

これら近年の大規模な豪雨災害を受けて，ハード・ソフト一体となった流域治水プロジェクトが推進され，氾濫を防ぐのみならず，氾濫を減らし，被害も減少させるための防災・減災対策が進められている [8]．流域治水プロジェクトでは，従来の河川整備に加えて、流域の市町村などが実施する雨水貯留浸透施設の整備や災害危険区域の指定等による土地利用規制，利水ダムの事前放流等が進められている．また，気候変動を踏まえると，洪水氾濫発生時における人的・物的被害想定は極めて重要となってくる．

このうち人的被害に着目すると，人的被害の推定手法としては，LIFESim を始めとして欧米で開発された研究手法が多く，2005 年ハリケーン・カトリーナの被害などを中心に古い被害データが用いられることが多い [9] ~[11]．日本でも LIFESim の適用事例はあるものの [12]，欧米と日本では，降雨や地形，洪水氾濫特性が大きく異なるため，海外の人的被害推定手法を我が国の人的被害想定にそのまま適用することには限界がある．一方，津波分野においては，人的被害想定手法として津波の被害関数（フラジリティカーブ）が構築されており，浸水深と人的被害の関係性が定量的に示されている [13] ~[16]．しかしながら，人的被害と洪水氾濫状況の関係性は，未だ不明確なことが多く，定量的な人的被害リスクの評価を行うことができていないのが現状である．そのため，洪水氾濫における被害関数は皆無であり，「浸水深などの洪水指標」と「人的被害の程度」の関係性を「被災者の属性」別に明らかにし，被害関数を構築することは急務である．

本研究では，研究代表者が長年収集している近年の洪水氾濫災害における人的被害データと洪水氾濫状況の関係性を多角的に検討し，洪水人的被害関数を構築することを目的とする．ここでは，近年の洪水災害事例として，平成 30（2018）年 7 月豪雨（西日本豪雨），

令和元年（2019）年東日本台風，令和２年（2020）年７月豪雨を対象とする．これらの洪水氾濫時における死亡率（定義は後述）と洪水指標（浸水深，水位上昇速度，両者の乗算値），被災者の属性（年齢）の関係性を検討する．さらに，家屋内浸水状況及び避難リスクに関する実物スケールの室内実験を行い，浸水リスクの把握とそのリスク軽減策を検証する．

2. 洪水人的被害関数の算定方法

2.1 対象洪水災害

（1）各洪水における人的被害の概要

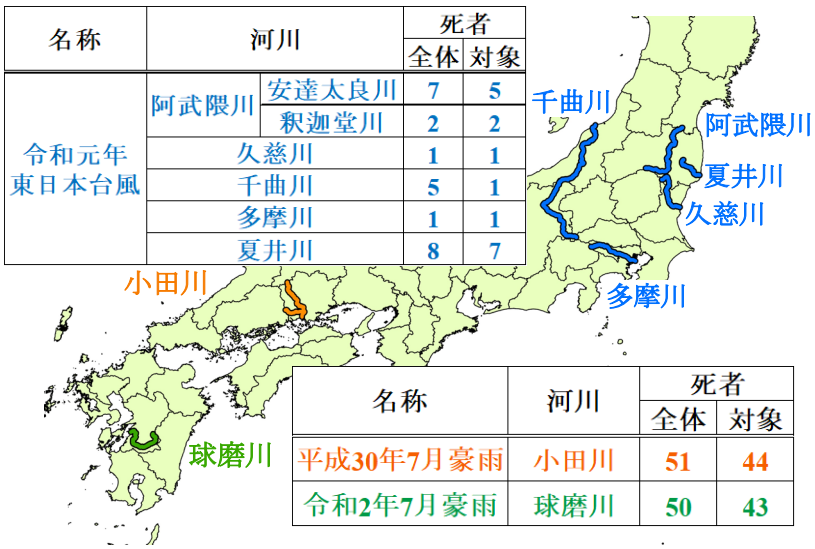
本研究における人的洪水被害関数を構築するに当たり，**表-1** に示すように，研究代表者が蓄積してきた洪水氾濫関連のデータを使用した．この洪水氾濫データのリストには，洪水氾濫災害毎に，河川名（水系名），氾濫解析に用いたモデル名（詳細は後述）を示している．対象河川は，**図-1** にも示すように，平成 30 年 7 月豪雨では高梁川水系小田川（岡山県），令和元年東日本台風では，信濃川水系千曲川（長野県），夏井川水系夏井川，阿武隈川水系安達太良川・釈迦堂川（いずれも福島県），多摩川水系平瀬川（神奈川県），久慈川水系久慈川（茨城県），令和 2 年 7 月豪雨では球磨川水系球磨川（熊本県）であり，合計 7 水系 8 河川を対象とする．

表-1　対象洪水リスト

年	発災日	名称	水系・河川	氾濫解析モデル
2018	2018/7/6-7	西日本豪雨	高梁川水系小田川	MIKE
2019	2019/10/12-13	台風19号（東日本台風）	信濃川水系千曲川	iRIC
			夏井川水系夏井川	iRIC
			阿武隈川水系安達太良川	iRIC
			阿武隈川水系釈迦堂川	iRIC
			多摩川水系平瀬川	iRIC
			久慈川水系久慈川	iRIC
2020	2020/7/4	R2年7月豪雨	球磨川水系球磨川	MIKE

対象洪水災害における河川位置と死者数を**図-1** に示す．ここでの死者数は，総数と，解析対象とする「屋内発見死者数」と「流失家屋の死者数」の和も記述している．人的被害情報については，洪水災害毎に行政公開資料やマスコミ報道，現地での聞き取りなどにより，死者氏名や年齢，住所，発見場所（屋内・屋外，屋内では建物階数）等を収集した結果を用いる．また，自宅の家屋における浸水深や流失有無に関しても現地調査により把握した[7), 17), 18)]．これらのデータを用いて，死者の中から屋内発見者や流失家屋の死者を判別し，集計している．本研究では，洪水氾濫時に屋外にいて流された事例などを除き，自

宅内にいたときに被害を受けた事例を対象とするために，解析対象を「屋内発見死者数」と「流失家屋の死者数」の和とした．



名称	河川		死者 全体	死者 対象
令和元年東日本台風	阿武隈川	安達太良川	7	5
		釈迦堂川	2	2
	久慈川		1	1
	千曲川		5	1
	多摩川		1	1
	夏井川		8	7

名称	河川	死者 全体	死者 対象
平成30年7月豪雨	小田川	51	44
令和2年7月豪雨	球磨川	50	43

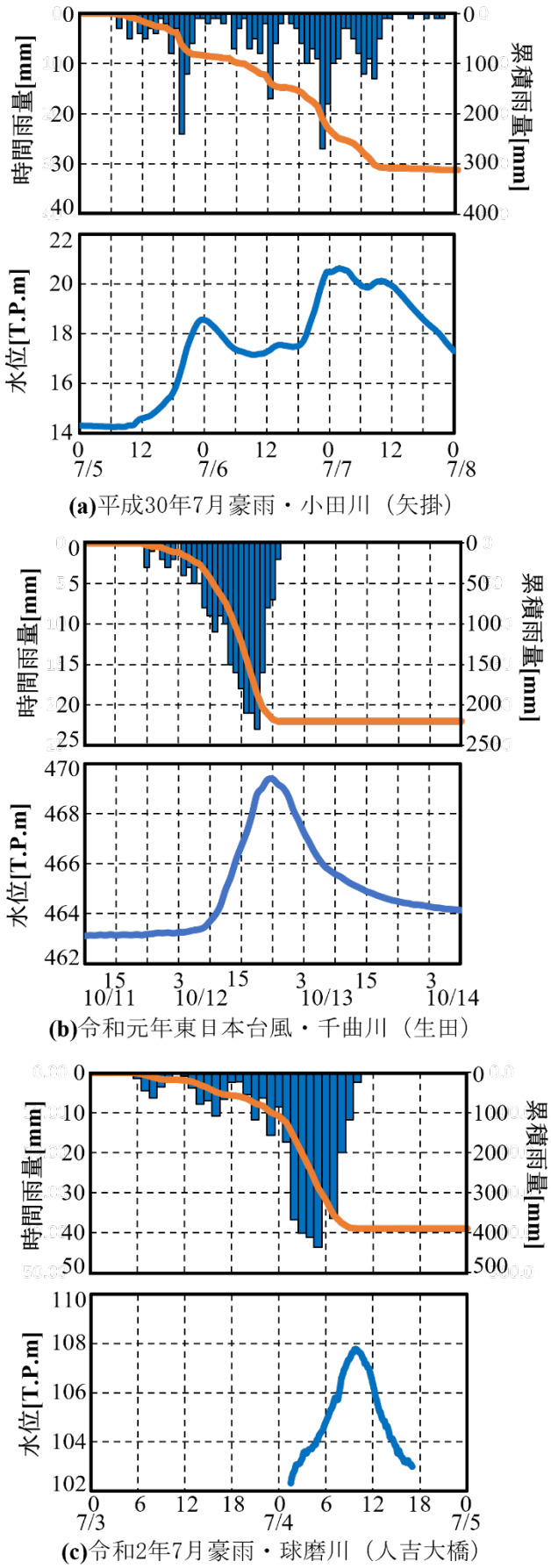
図-1　対象洪水災害の河川位置と死者発生状況の概要

（2）各洪水の降雨・河川水位状況

3 つの対象洪水災害における雨量と河川水位の状況を把握するために，時間雨量と河川水位の時間変化を**図-2** に示す．河川水位に関しては，平成 30 年 7 月豪雨では小田川・矢掛観測所（13.0kp），令和元年東日本台風では千曲川・生田観測所（108kp），令和 2 年 7 月豪雨では球磨川・人吉大橋（61.4kp）の観測値を例示している．また，時間雨量に関しては，小田川と千曲川では水位観測所と同じ地点のデータ，球磨川では解析雨量に基づく上流域の平均雨量をそれぞれ用いている．平成 30 年 7 月豪雨の小田川流域では，大きな降雨のピークが 2 度発生し（2018/7/5 夜，7/6 夜），数日にわたる降雨だった．それに伴って，矢掛観測所水位も 7/5 昼から上昇し，7/7 3:00 にピーク水位を迎えた．最初の堤防決壊発生が 7/7　0 時前後であり，水位のピークに近く，大半は夜間から浸水が始まった．

令和元年東日本台風では，千曲川の堤防決壊地点（57.5kp）上流に位置する生田観測所では，2019/10/11 夜から雨が降り始め，10/12　22 時ごろまで降雨が集中的に観測された．河川水位は，10/12 9:00 から上昇し，ピーク時刻は 10/12 21:00 となり，降雨のピークよりも遅れて水位ピークが現れていることが分かる．

令和 2 年 7 月豪雨では，降雨開始は 2020/7/3 午前中であり，降雨ピークは 7/4 5:00 に 43mm を記録した．この時は，流域全体を線状降水帯が覆っていた．河川水位は 7/4 1:00 頃から上昇が始まり，ピーク水位は 7/4 10:00 に 107.78[T.P.m]を記録し，その時の堤防越流水深は 2.18m に達した．洪水氾濫は，7/4 未明から始まったが，大半のエリアでは夜明け後と推測されている．



(a)平成30年7月豪雨・小田川（矢掛）

(b)令和元年東日本台風・千曲川（生田）

(c)令和2年7月豪雨・球磨川（人吉大橋）

図-2　対象洪水災害における時間雨量・水位の時間変化

2.2　被害関数の算定手順

(1)　フローチャート

人的被害に関する津波被害関数では，一般的に，エリア毎の死亡率及び津波指標（浸水深など）の平均値の相関関係を求めて，死亡率と津波指標の相関関係を算出している．一方，洪水氾濫災害では，人的被害数自体が，大規模な津波災害と比べて少ないことに加えて，局所的地形影響を受けて浸水深などの水理量（洪水指標）の空間変化が大きく，津波被害関数と同様の扱いは困難である．そこで，浸水エリアの建物一棟ずつの人口と水理量を算出し，得られたデータから，エリア毎ではなく，洪水指標別の死亡率を算定する．本研究における洪水人的被害関数を構築する際のフローチャートを**図-3** に示す．

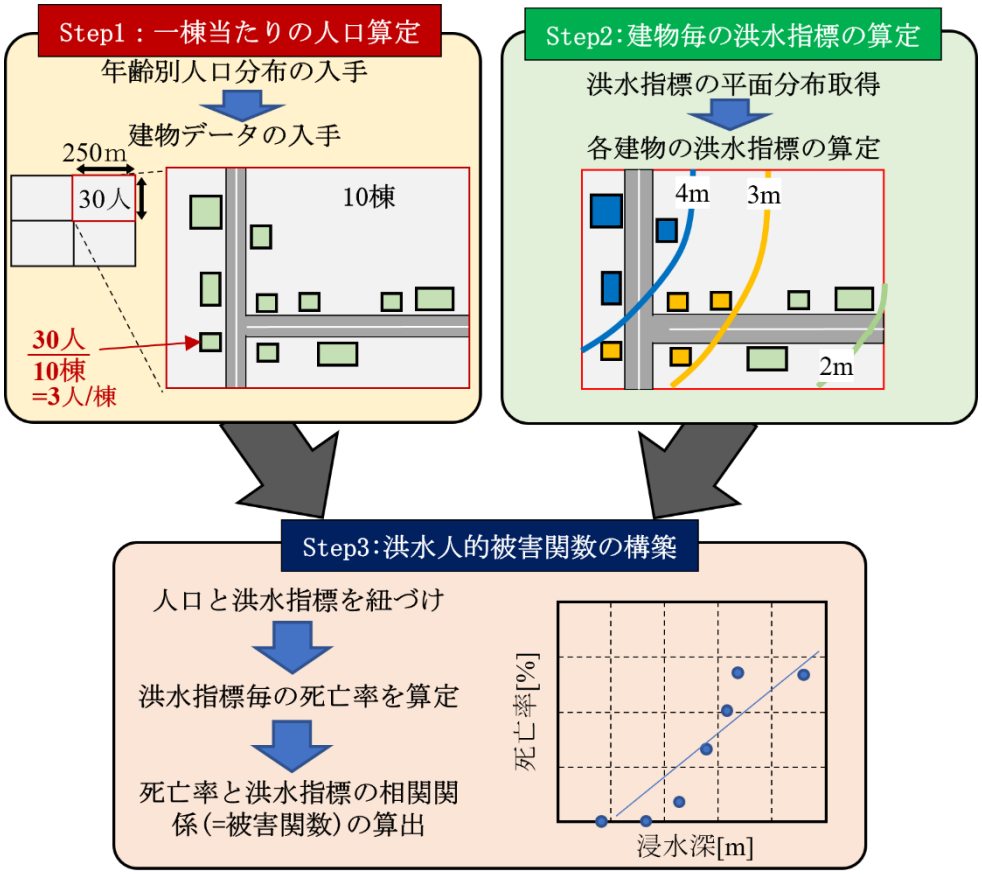


図-3　洪水人的被害関数の作成フロー

Step1 では，まず，人口データとしては，平成 27 年国勢調査より，対象エリアにおける年齢別人口分布（5 次メッシュ，約 250m，URL：https://www.e-stat.go.jp/gis）を入手する．この人口データは，0－14 歳，15－64 歳，65－74 歳，75 歳以上の区分で年齢が分けられており，ここでは，高齢者（65 歳以上）と若年者（64 歳以下）に分けて人口を整理する．次に，建物データとしては，国土地理院基盤地図情報（URL：https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php）から建物 GIS データを取得した．ここでは，建物外周線データをダウンロードし，建物データの重心をとり，それをポイントデータに変換し，建物一棟ずつの位置データを得る．上記の人口データ用の 250m メッシュにおける建物数を数え，メッシュ内の人口と建物数の比から建物

1 棟当たりの人口（=メッシュ内人口/メッシュ内建築物数）を割り当てる．例えば，**図-3** 中の例のように，あるメッシュ内の人口が 30 人，建物数が 10 棟の場合，建物 1 棟当たりの人口は 3 人／棟となる．

次に，Step2 では，建物毎の洪水指標を求めるため，現地観測もしくは数値解析により得られた洪水指標（浸水深など）の平面分布を整理する．特に，現地観測に基づく浸水深などの観測結果は，「点」のデータであるため，それらを空間的に内外挿して，「面」データに変換している．その結果に基づいて，建物一棟毎の洪水指標を求める．

最後の Step3 では，Step1，2 より，浸水域内の各建物における一棟当たりの人口と洪水指標を紐づけ，３つの豪雨災害毎に洪水指標別の人口を求める．次に，洪水指標毎の死者数と人口を除したものを死亡率として算出し，最後に死亡率と洪水指標の相関関係（＝被害関数）を求める．

(2) 用いる洪水指標と算出方法

本研究で用いる洪水データは，研究代表者が長年収集・蓄積している近年の洪水氾濫災害における人的被害データと洪水氾濫状況データを使用する．本研究で分析を行う洪水指標は，浸水深 h と水位上昇速度 dh/dt に加えて，この両者の乗算値 $h*dh/dt$ の 3 つとした．浸水深 h は溺れるか否か，水位上昇速度 dh/dt は垂直避難の困難度を表す指標となる．両者の積である乗算値 $h*dh/dt$ は，二つの指標の効果がより集約したものと想定される．以下では，浸水深と水位上昇速度の算出方法を示す．

浸水深は，氾濫域における洪水中のピーク水深であり，各洪水災害時において行われた洪水痕跡調査結果[7), 17), 18)]をベースとする．ここでは，多数の浸水深の点データから，面的な浸水深マップを算出する．具体的には，佐山・寶[19)]と同様に，まず，浸水位の点データを内挿して浸水位コンターを作成する．この内挿には，ArcGIS 10.3 の Natural Neighbor 内挿法を用いた．この得られた浸水位から DEM（数値標高モデル，5m 分解能）による標高データを差し引き，浸水深コンターを求める．

次に，水位上昇速度に関しては，氾濫シミュレーション結果から得られる浸水深の時間変化より求める．氾濫解析モデルとしては，**表-1** に示すように，河道部と氾濫域の解析を行う際には汎用水理モデル（MIKE by DHI）[20)]，氾濫解析のみの場合は iRIC Nays2D Flood[21)] を用いた．平成 30 年 7 月豪雨・小田川の氾濫シミュレーションでは，解析対象は小田川とその支川（高馬川，末政川等）及び氾濫域とするため，河道を一次元モデル，氾濫域を平面二次元モデルで解析する MIKE by DHI を用いた[22)]．ここでは，河道と氾濫域のやり取りは本間の越流公式を用いて，堤防決壊も考慮した越流量を与えている．同様に，令和 2 年 7 月豪雨・球磨川に関しても MIKE by DHI を用いて，河道には球磨川と支川（万江川，山田川，小川等）を考慮し，氾濫域は渡地区（52kp）よりも上流域を解析対象とした．小田川と球磨川の氾濫シミュレーションでは，河川における水位時系列変化や氾濫域の痕跡水位に合うように粗度係数をチューニングしている．一方，令和元年東日本台風では，iRIC Nays 2DFlood を使用し，解析対象は各河川の氾濫域のみである．ここでは，河川水位の実測値などから，河川からの越流量を求め，それを境界条件として氾濫シミュレーションを実施している．

氾濫シミュレーションより得られる水深の時間変化から時々刻々の水位上昇速度を算

出できるが，統一的に比較するために，水深の範囲を決める必要がある．対象家屋の浸水深がばらつく中で統一的に評価するために，水深 0.5m から 1.0m における水位上昇速度を対象とした．0.5m は一般的な家屋 1 階床高さである．家屋内の水深が 0.5m に達すると家具が浮き始め，垂直避難が困難になることが既往の研究により分かっているため，0.5m から 1.0m に達するまでの水位上昇速度を採用した．ただし，浸水深が 1m 未満の建物に関しては，水位上昇速度は一括して 0 とした．

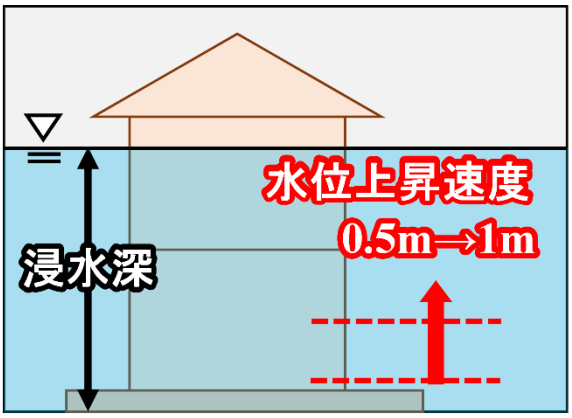


図-4　水位上昇速度の設定

iRIC Nays 2DFlood は iRIC ソフトウェアの平面 2 次元氾濫解析ソルバーである．シンプルな計算条件設定が特徴で，DEM の取り込みが比較的簡単であり，幅広い河川技術者に使われている．基礎方程式系は以下の通りである．

■連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=q+r \tag{1}$$

■運動方程式

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t}+\frac{\partial (hu^2)}{\partial x}+\frac{\partial (huv)}{\partial y}=-hg\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{\tau_x}{\rho}+D^x \tag{2a}$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t}+\frac{\partial (huv)}{\partial x}+\frac{\partial (hv^2)}{\partial y}=-hg\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{\tau_y}{\rho}+D^y \tag{2b}$$

ただし，

$$\frac{\tau_x}{\rho}=C_f u\sqrt{u^2+v^2} \quad \frac{\tau_y}{\rho}=C_f v\sqrt{u^2+v^2} \tag{3a}$$

$$D^x=\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_t\frac{\partial (vh)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\nu_t\frac{\partial (uh)}{\partial y}\right] \tag{3b}$$

$$D^y=\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_t\frac{\partial (vh)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\nu_t\frac{\partial (vh)}{\partial y}\right] \tag{3c}$$

ここで，h は水深，t は時間，u，v は x，y 方向流速，q は単位面積当たりのカルバート・樋

門・ポンプによる横流入量，r は雨量，g は重力加速度，H は水深，τ_x, τ_y は x, y 方向河床せん断力，C_f は壁面摩擦係数，v_t は渦動粘性係数，ρ は水の密度である．

一方 MIKE by DHI は，河道用一次元モデル（MIKE11）と氾濫域用の平面二次元モデル(MIKE21)に分けられる．一次元モデルの基礎式にも以下に示す．

■連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial X}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \tag{4}$$

■運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial(\frac{\partial Q^2}{A})}{\partial A}+gA\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{n^2 gQ|Q|}{AR^{\frac{4}{3}}}=0 \tag{5}$$

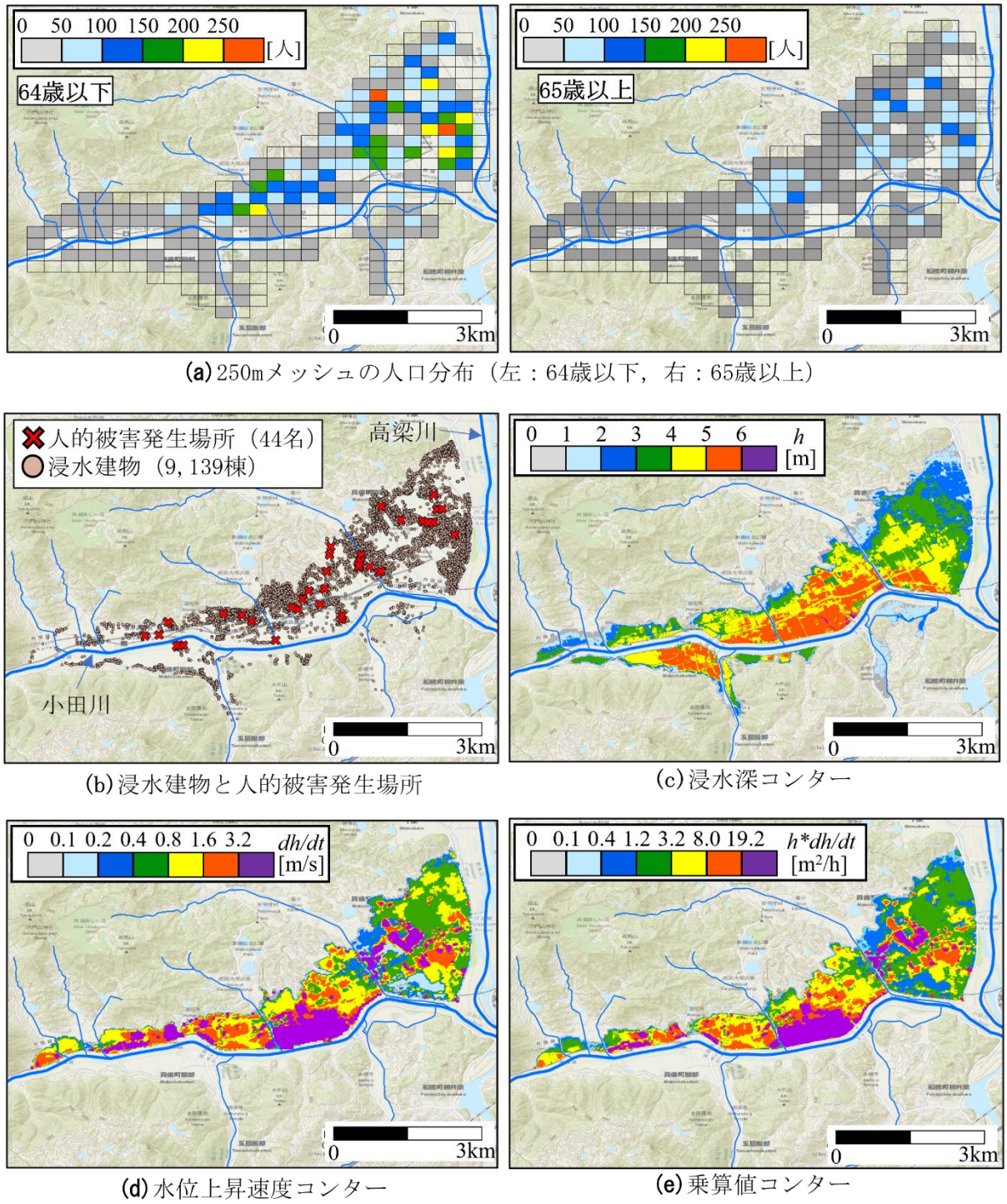
ここで，流下方向を X, Q は流量，A は断面積，q は単位長さ当たりの流入量，α はエネルギー補正係数，n はマニングの粗度係数，R は径深である．

3. 洪水人的被害関数に関する結果と考察

3.1 各洪水災害時の河川氾濫状況

洪水人的被害関数のベースとなる各洪水災害時における対象エリアの人口分布と浸水建物・人的被害マップ，洪水指標のコンターを**図-5，6，7** に示す．ここでは，平成 30 年 7 月豪雨・小田川（**図-5**）と令和元年東日本台風・千曲川中流域（**図-6**），令和 2 年 7 月豪雨・球磨川上流域（**図-7**）の分析結果を例示している．ここで人口分布に関しては 250m メッシュであり，3 つの洪水指標（浸水深 h，水位上昇速度 dh/dt，乗算値 $h*dh/dt$）に関しては 5m メッシュで表示している．また，図(b)には，浸水域の建物分布を点で，人的被害発生箇所を×印でそれぞれ図示している．なお，図中には屋内・流失家屋の死者数と浸水家屋棟数も示しており，これは対象河川流域全体の数であり，図示範囲のデータではないことに注意されたい．なお，水位上昇速度や乗算値は氾濫解析範囲しか図示しておらず，小田川では左岸側のみ，千曲川でも左岸側のみとなっていることに注意されたい．

まず，**図-5** に示す平成 30 年 7 月豪雨・小田川に着目する．人口分布としては，小田川近傍には少なく，小田川からやや離れたエリアに多い．同エリア東側の方が西側よりも人口は多い．人的被害は小田川左岸側（北側）の東西に広い範囲で発生している．洪水指標としては，浸水深コンターより，小田川の両岸において，東西の広い範囲で浸水が発生しており，特に左岸側では浸水深 5m を超える範囲が東西 3km，南北 1km にわたり生じている．この浸水深 5m は建物 2 階でも成人が立っていられないほどの深さである．水位上昇速度に関しては，3.2m/hour を超えるエリアが支川周辺（高馬川，末政川）に広範囲に広がっている．これは 1 時間で建物 1 階（3m）が水没するほどの水位上昇速度である．乗算値は上記の結果を反映した分布となっている．



(a) 250mメッシュの人口分布（左：64歳以下，右：65歳以上）

(b) 浸水建物と人的被害発生場所

(c) 浸水深コンター

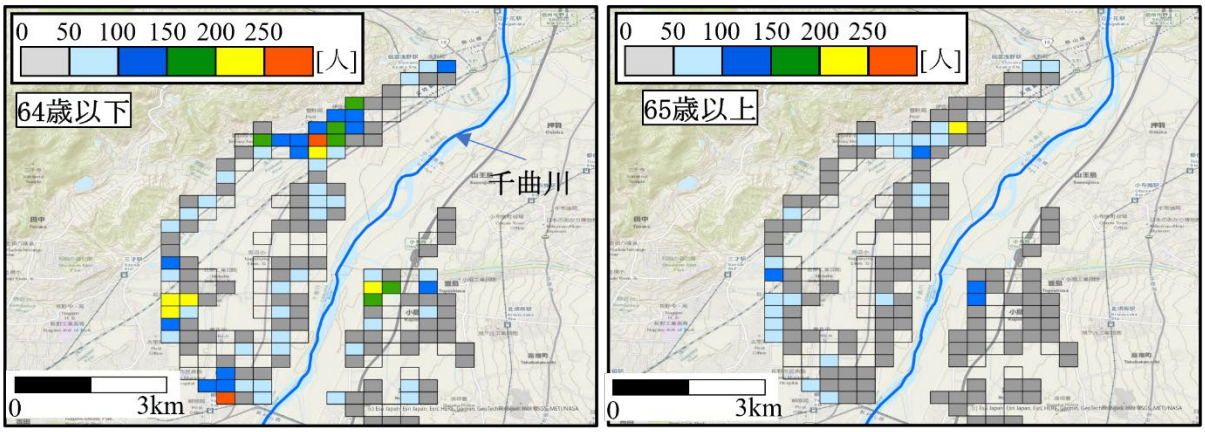
(d) 水位上昇速度コンター

(e) 乗算値コンター

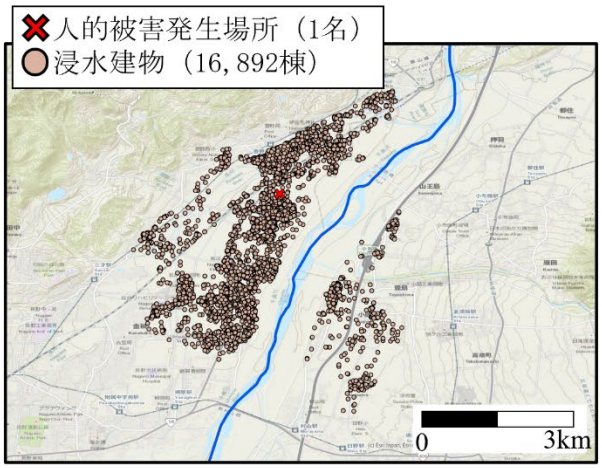
図-5　平成 30 年 7 月豪雨・小田川の分析結果

次に，令和元年東日本台風による千曲川の結果（**図-6**）に着目する．人口分布は，左岸側では，小田川と同様に千曲川沿いに少なく，ある程度離れたエリアに人口分布が集中している．右岸側では一部に人口集中エリアが河川沿い見られる．人的被害は，堤防決壊が見られた左岸側で 1 名発生した．浸水深も，決壊した左岸側で深くなっており，最大で 4m を超えているが，小田川と比べても全体的に浸水深は小さい．決壊はしていないが越水氾

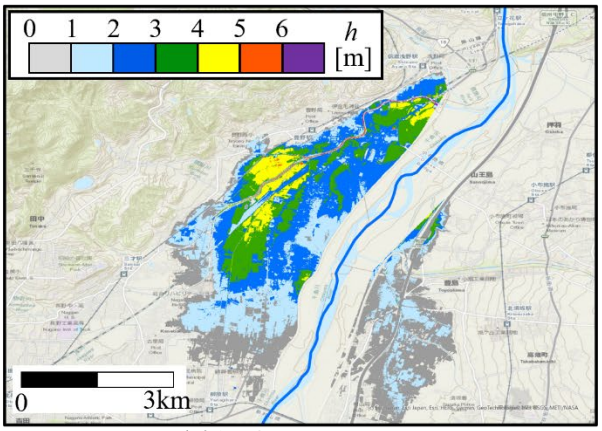
濫が生じた右岸側の浸水範囲や浸水深は左岸側と比べて小さく，堤防決壊の影響の大きさが伺える．水位上昇速度（左岸側のみ）は，河川から離れたエリアで大きくなっており，小田川同様に 3.2m/hour を超えるエリアが点在している．一般には堤防決壊地点近傍の方が水位上昇速度が大きくなるが，このエリアでは堤防決壊前に越水氾濫が生じていたため，浸水深 0.5m～1m の水位上昇速度は小さくなったものと考えられる．また，乗算値は，両指標が大きい浸水エリア北側で高い値となっている．



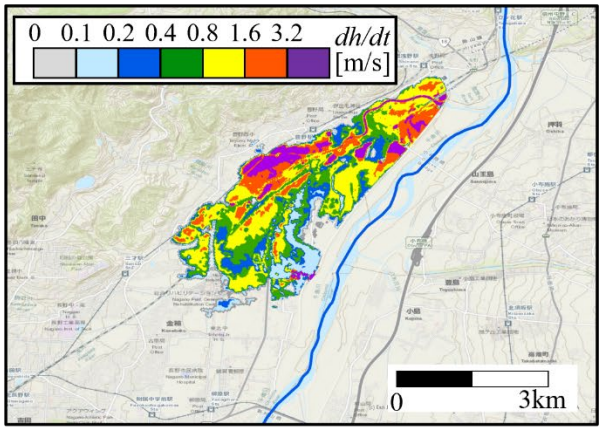
(a) 250mメッシュの人口分布（左：64歳以下，右：65歳以上）



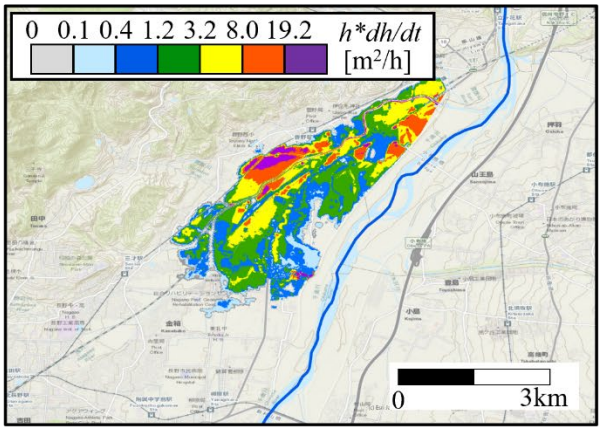
(b) 浸水建物と人的被害発生場所



(c) 浸水深コンター



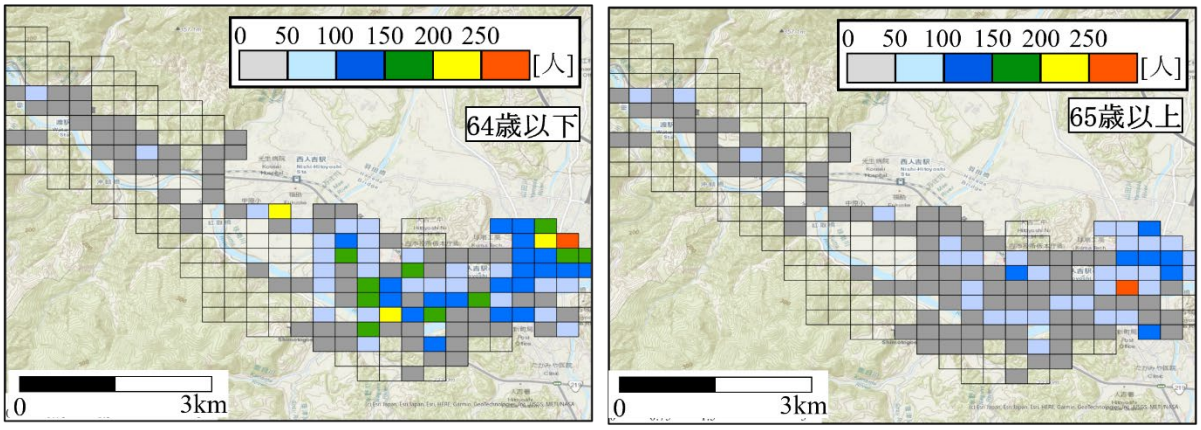
(d) 水位上昇速度コンター



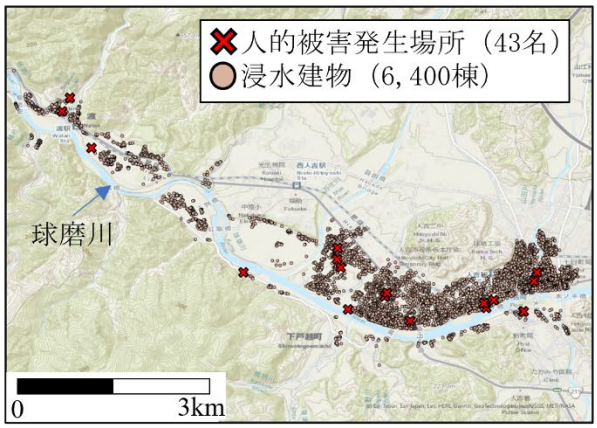
(e) 乗算値コンター

図-6　令和元年東日本台風・千曲川中流域の分析結果

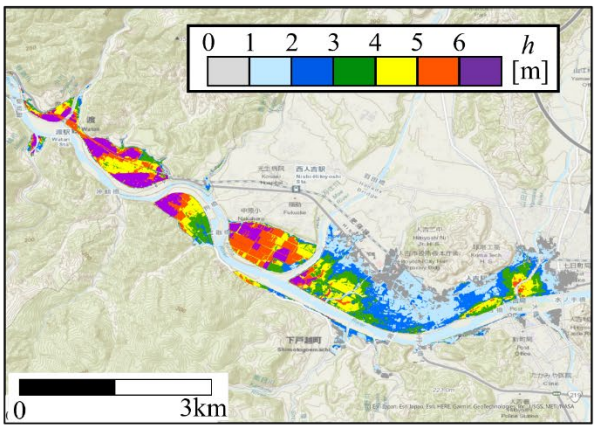
最後に，令和２年７月豪雨による球磨川上流域の氾濫分析結果を見てみると（**図-7**），人口分布は，右岸側の人吉市街地に集中している．人的被害は，人吉市街地だけでなく同エリアの広い範囲に分布している．浸水深は，図中の範囲では下流側の渡地区に向かうほど大きくなっている．これは渡地区（52kp）が球磨川中流河道の狭窄部に位置しており，その上流域で水位が高くなった結果である．水位上昇速度も浸水深と類似の分布が見られると共に，支川合流部でも大きくなっており，その傾向は，乗算値でクリアとなっている．



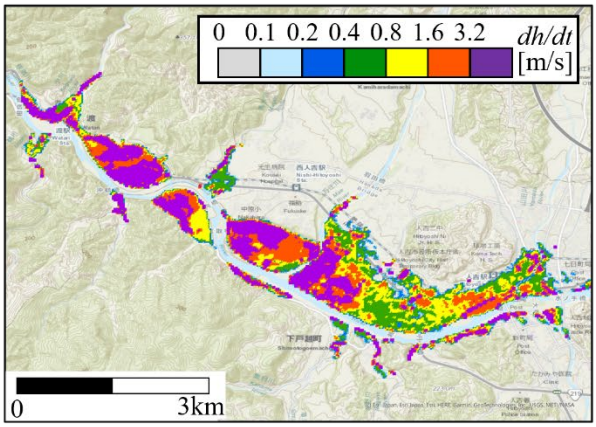
(a) 250mメッシュの人口分布（左：64歳以下，右：65歳以上）



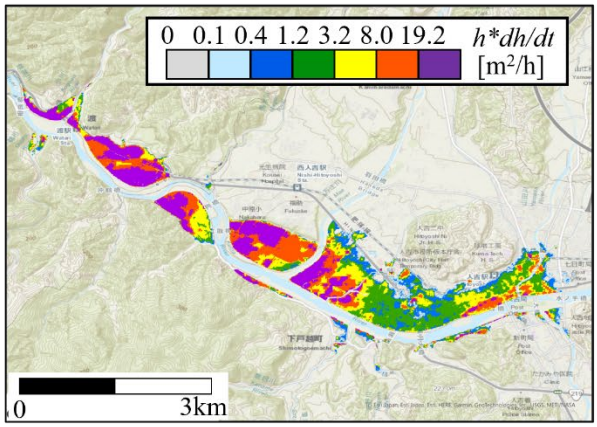
(b) 浸水建物と人的被害発生場所



(c) 浸水深コンター



(d) 水位上昇速度コンター



(e) 乗算値コンター

図-7　令和２年７月豪雨・球磨川上流域の分析結果

3.2　浸水深と水位上昇速度の関係

洪水指標である浸水深と水位上昇速度の特徴を確認するために，対象全建物における浸水深と水位上昇速度の相関図を**図-8** に示す．ここでは，洪水毎に色分けし，人的被害発生場所の結果も表示している．これより，全データでは，両者の間には正の相関が見られ，相関係数は 0.43 であった．人的被害が発生した建物に着目すると，浸水深に関する人的被害発生の下限値は 2m であり，既往の研究と同じとなっている [17), 18)]．一方，水位上昇速度の下限値に関しては，浸水深 2m では 0.5m/h であるが，浸水深が大きくなると下限値が低下し，浸水深 4m を超えると，0.1m/h 程度でも人的被害が発生したケースが存在する（同図中黒点線）．これは，水位上昇速度は垂直避難の難しさを示す指標であり，浸水深が垂直避難の通用しない大きさになるにつれて．水位上昇速度の下限値が小さくなるためと考えられる．また，二つの指標に下限値が認められたものの，人的被害発生データに関しては浸水深，水位上昇速度共にばらつきが大きい．そのため，二つの指標を考慮した指標（乗算値 *h*dh/dt*）も人的被害の危険度を示す指標として有用であると考え，3 つの洪水指標について被害関数を構築する．

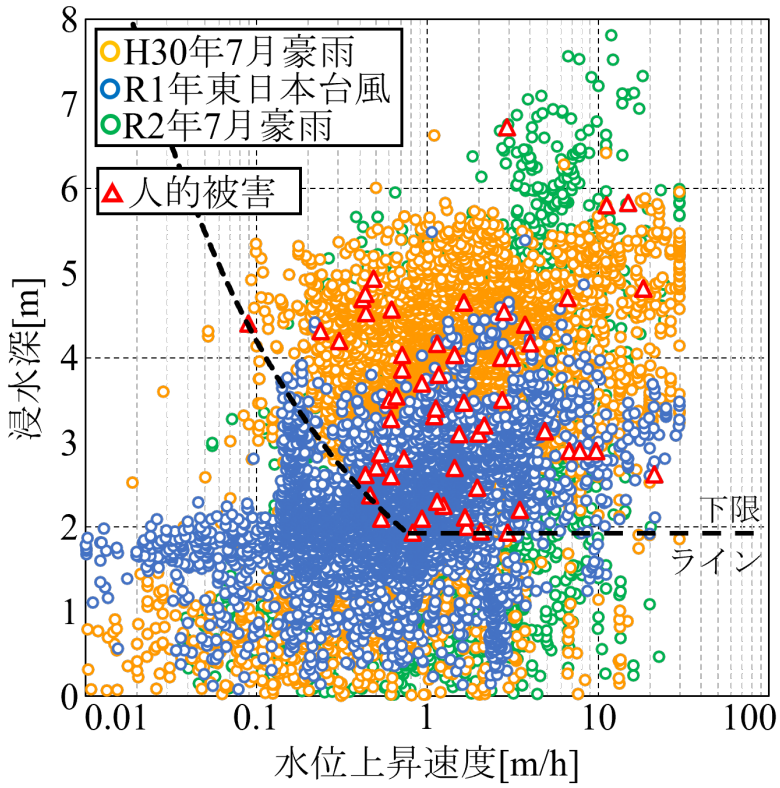


図-8　浸水深と水位上昇速度の関係（3 つの洪水災害の全建物を対象．図中の点線は，図から読み取れる人的被害発生範囲の下限値を表示）

3.3　洪水指標別の人口と死亡数，死亡率分布

洪水人的被害関数を構築する際に，当初は，浸水深などの洪水指標をいくつかに区分けし，その範囲の死亡率を求め，その結果の相関図を作成していた．この場合，洪水指標の区分けが主観的になりやすいこと，洪水指標が大きくなると含まれる人口も小さくなるた

め，死亡率の評価にばらつきが出やすいなどの課題があった．そこで，本手法の Step3 のプロセスにあたる，建物毎に人口と 3 つの洪水指標を割り当て，その後，建物数が同数となるように区分けした洪水指標毎の人口・死者数を集計した．その時に得られた洪水指標毎の人口と死者数・死亡率（生存率）の関係を**図-9，10，11** に示す．ここでは，65 歳以上（高齢者）と 64 歳以下（若年者）で区分し，浸水深・水位上昇速度・乗算値について図示している．また，死亡率は区分けされた洪水指標毎の死者数と人口の比から算定し，生存率は 100%から死亡率を引いている．なお，建物が同数となるように分けても人口は同一にはなっていないのは，一棟当たりの人口がエリアにより異なるためである．

まず，浸水深（**図-9**）に関して見ると，65 歳以上の場合には，浸水深が大きくなると，死者数が大きくなっている傾向が明確となっている．これは，建物数が同数となるように，浸水深の範囲を区分けしたためである．一方，64 歳以下でも，浸水深と共に死者数が増える，という傾向が見られるが，死者数自体が 65 歳以上と比べて小さいため，65 歳以上ほどの明確な傾向とはなっていない．また，両者ともに，既往研究で示されているように浸水深 2m 付近から死者が急増する傾向を捉えることができている．死亡率・生存率も概ね滑らかに変化しており，建物数が同数となるように集計した結果が現れている．

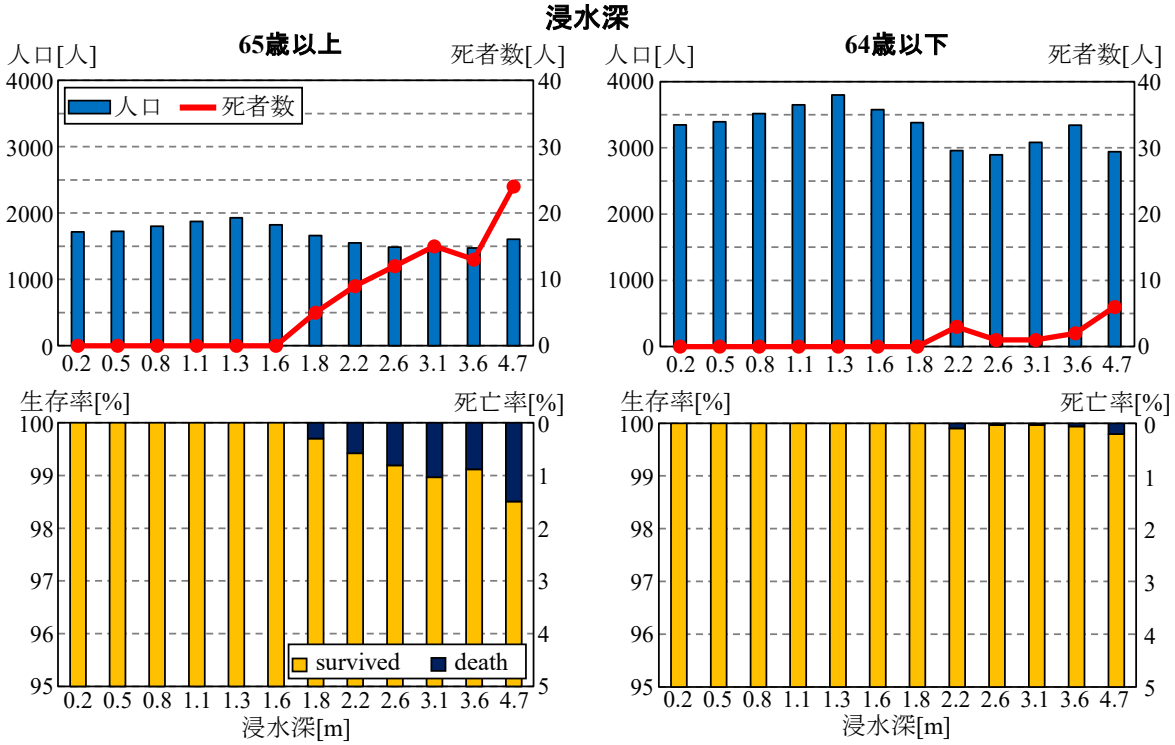


図-9　浸水深別の人口・死者数と死亡率・生存率

浸水深と同様に水位上昇速度においても，水位上昇速度毎の人口と死者数，死亡率・生存率の関係を分析した結果を**図-10** に示す．ここでは，浸水深の実測データはあるが，氾濫シミュレーションを実施していないエリアも解析対象に含んでいるため，浸水深と比べて水位上昇速度の方が人口が少なくなっていることに注意されたい．これより，65 歳以上では浸水深と比較してばらつきが多いが，緩やかに死者数や死亡率が上昇していることが

分かる．一方，小さい水位上昇速度でも人的被害が発生しており，これは浸水深の大きなエリアの人的被害者であった．64 歳以下の結果では，水位上昇速度の増大に伴う死亡率の増加は見られず，若年者に対して水位上昇速度は人的被害発生に大きく寄与していないことが示唆された．

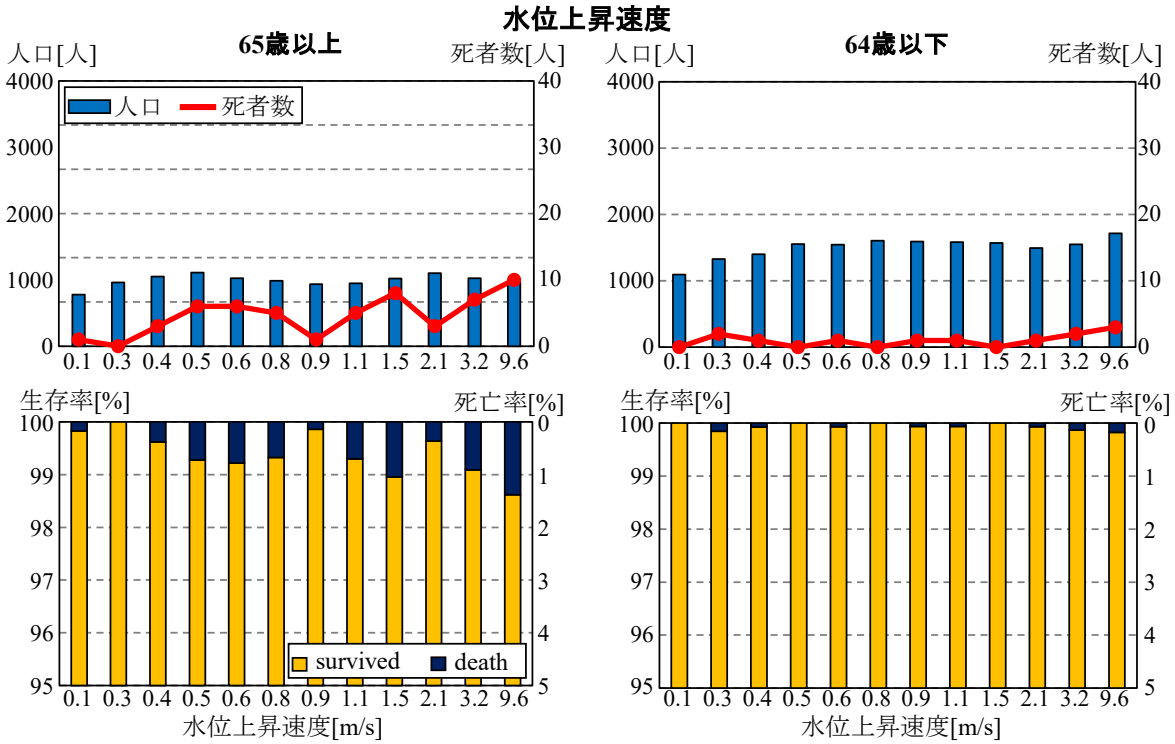


図-10　水位上昇速度別の人口・死者数と死亡率・生存率

次に，浸水深と水位上昇速度の積である乗算値毎の人口と死者数，死亡率・生存率分布を**図-11** に図示する．ここでのデータ数は，水位上昇速度と同じとなっている．これより，65 歳以上に関しては，多少のばらつきはあるものの，乗算値の増加に伴って死者数や死亡率が増加している傾向を捉えられている．また，65 歳以上では 3 つの洪水指標の中で最も大きい死亡率 1.8%を記録している．これは乗算値が人的被害のリスクが高まる地域を抽出するのに適した指標であることを示唆するものである．一方，64 歳以下では，他の指標と同様に明確な相関性は見られない．

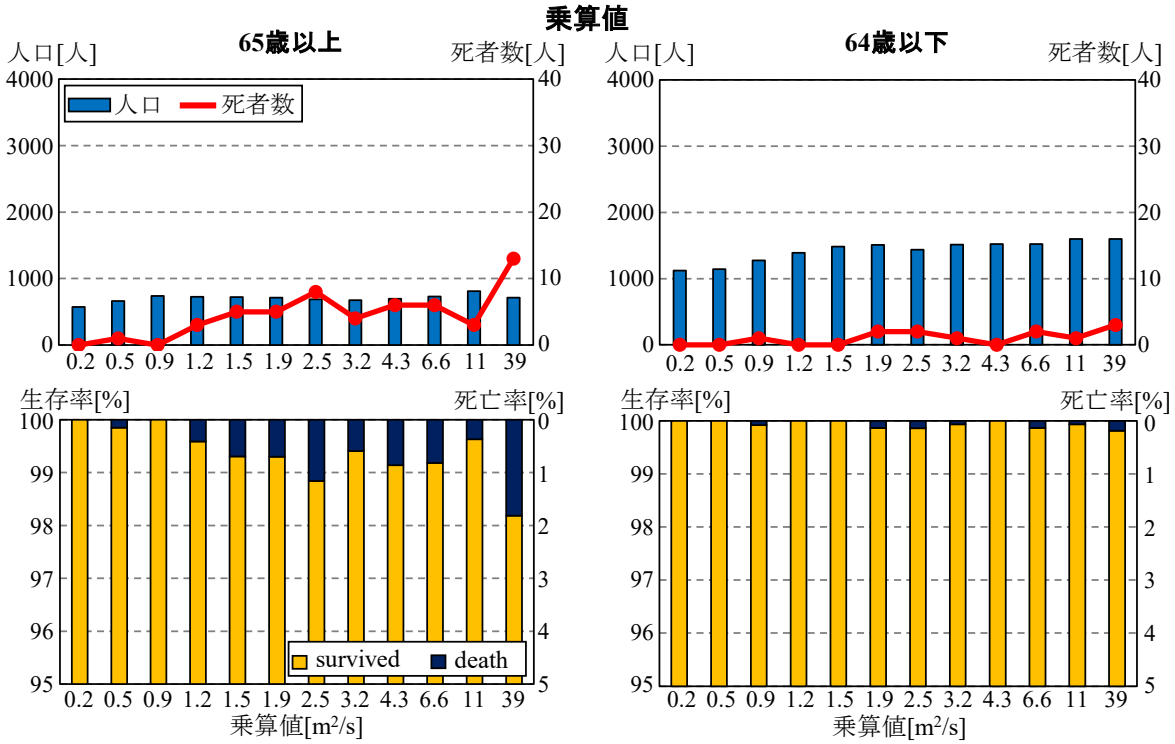


図-11　乗算値別の人口・死者数と死亡率・生存率

3.4　洪水人的被害関数の算定

図-9，10，11 から各洪水指標の洪水人的被害関数を求めるために，各洪水指標と死亡率の相関図を**図-12** に示す．ここでは，3 つの洪水指標共に，65 歳以上と 64 歳以下に分けており，水位上昇速度や乗算値は対数で表示している．また，各データに対して得られた近似式（浸水深：直線，他 2 つ：対数）や t 検定の結果（5%，10%有意水準を満たすかどうか）も図示している．これより，65 歳以上では，3 つの洪水指標共に，右肩上がりの関係が見られ，有意な線形の相関式が得られ（$p<0.05$），統計的に有意な被害関数が得られた．3 つの中でも浸水深では $R^2=0.90$ と高い結果となった．一方，64 歳以下では，乗算値の相関式のみ 10%有意水準を満たし（$p<0.10$），浸水深や水位上昇速度の相関式には統計的有意性は確認できなかった．

また，死亡率は高齢者が顕著であるので 65 歳以上の結果に注目すると，浸水深は 2m を超えると死亡率が急増し，5m では死亡率が 1.4%に達する．水位上昇速度は 0.1m/h でも死者が発生し，0.5m/h から死亡率が増え始めるが，そのばらつきは浸水深より大きい．乗算値の死亡率が急増するのは 1m²/h であり，これは浸水深 2m，水位上昇速度 0.5m/h の下限値に相当する．また，乗算値では死亡率の最大値は 1.8%と 3 つの指標で最も大きい．その上，上記の相関式の有意性から，乗算値は人的被害リスク抽出に適した指標と言える．

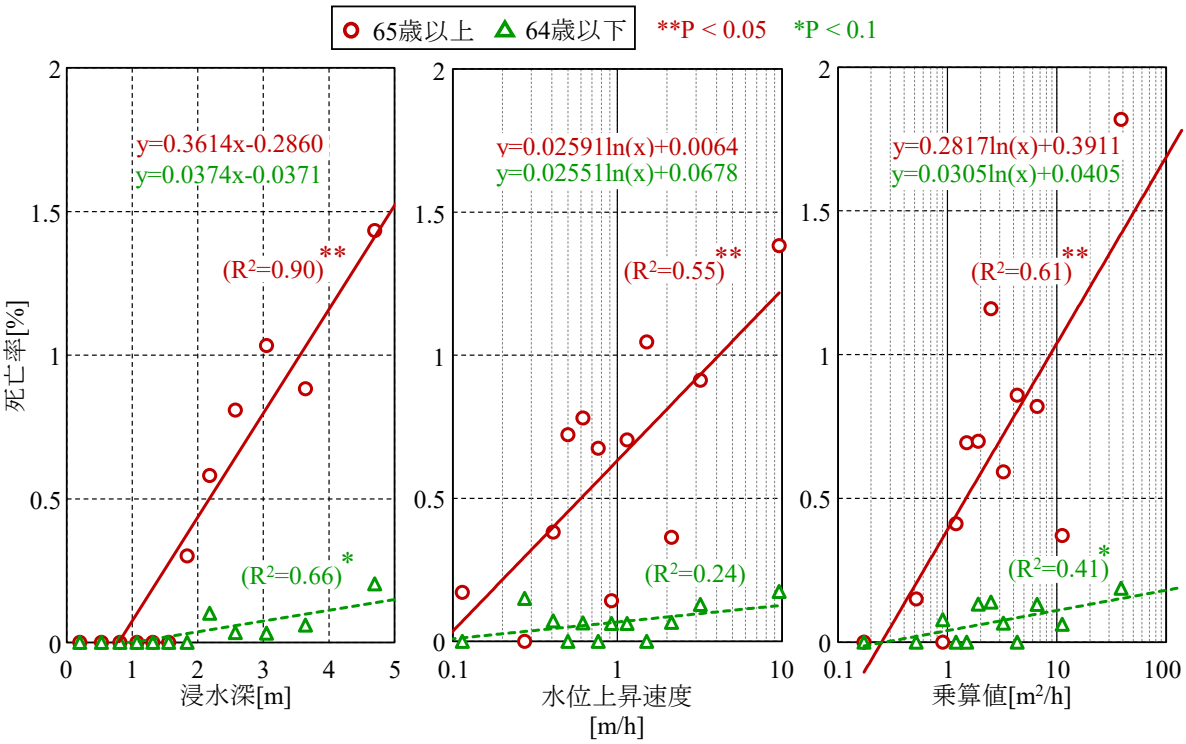


図-12　洪水人的被害関数の算定結果

3.5　洪水指標による死亡率算定

洪水指標の活用法の一例として，浸水深と乗算値から得られる死亡率コンターを**図-13**に示す．ここでは，令和２年７月豪雨・球磨川上流部の万江川合流点付近と令和元年東日本台風・久慈川の押川合流点付近の結果である．死亡率は，各洪水指標と死亡率の相関式（**図-12**）を用いて算出している．なお，図中には，人的被害発生場所を×印で表示している．

この図より，まず，球磨川上流域に着目すると，浸水深のケースでは，死亡率が 1%を超えているエリアが球磨川や万江川沿いに広がっているが，人的被害発生地点（図中白丸）では，死亡率は 0.2-0.4%程度となっており，このエリアでは相対的に低くなっている．一方，乗算値においても死亡率 1%のエリアが広範囲に分布しているが，人的被害発生地点では死亡率は 0.8-1.0%程度となっており，乗算値の方が浸水深よりも死亡率が高くなっている．この人的被害発生地点は球磨川からはやや離れ，浸水深は相対的に小さかったものの，万江川沿いであるため万江川からの氾濫による水位上昇速度が高かったため乗算値が大きくなっている．このため，ここでの人的被害は支川からの氾濫による水位上昇速度も影響していることが見られる．

同様に，久慈川・押川合流点に関しては，浸水深の場合には，合流点付近が高くなっているが，死亡率は全体的に 0.6%未満となっている．久慈川本川近傍の人的被害発生地点における死亡率は 0.4%程度である．一方，乗算値のケースでは，全体的に死亡率は向上しており，人的被害地点の死亡率も 0.6%台となっている．このエリアでは久慈川から越水氾濫が確認されており，このエリアがすり鉢状の地形であるがゆえに水位上昇速度も大きく，結果として乗算値の死亡率が浸水深の値よりも大きくなっている．このように，支

川合流部における高い人的被害リスクの評価には乗算値がより適切な指標であることが示唆された．

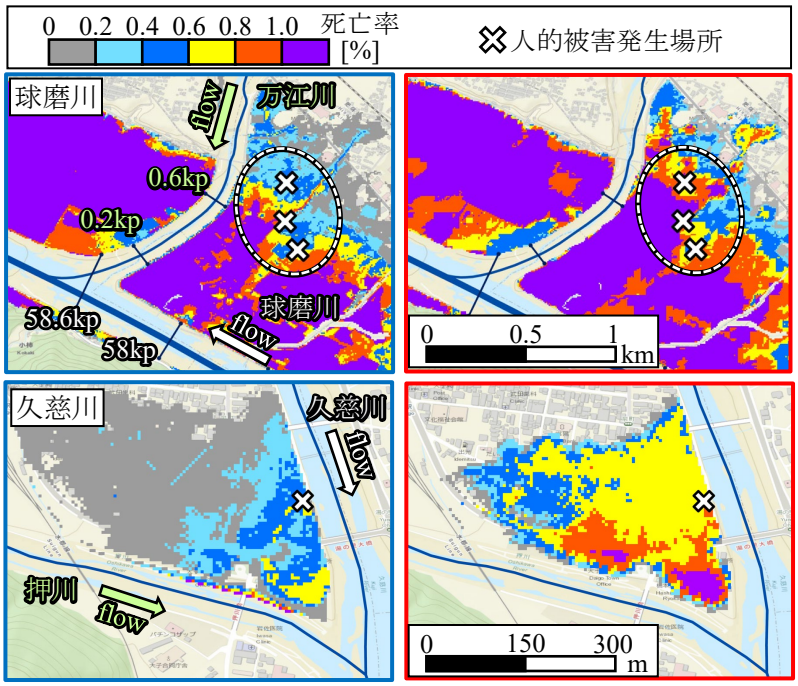


図-13　浸水深（左）と乗算値（右）による死亡率コンター
（上：球磨川・万江川合流点，下：久慈川・押川合流点）

3.6　洪水災害別の洪水人的被害関数の比較

洪水人的被害関数構築において対象とした，平成 30 年 7 月豪雨・令和元年東日本台風・令和 2 年 7 月豪雨の 3 つの洪水災害別に被害関数を比較する．洪水指標は浸水深とし，構築方法は上述した通りである．３つの洪水災害別の洪水人的被害関数を**図-14** に示す．ここでも，64 歳以下と 65 歳以上に分けて表示すると共に，近似式も図示している．なお，各洪水災害時にて，浸水深の分布が異なっているため，令和元年東日本台風では，浸水深は最大で約 3m となっていることに注意されたい．これより，64 歳以下と 65 歳以上では死亡率に大きな差があることは，全ての洪水災害で共通している．死者数が顕著な 65 歳以上に注目すると，いずれの洪水災害でも概ね浸水深と共に死亡率は大きくなっているが，そのばらつきは全体の結果（**図-12**）と比べて大きい．各洪水災害間の死亡率の大小関係は，令和元年東日本台風＜平成 30 年 7 月豪雨＜令和 2 年 7 月豪雨の順番となっていることが分かる．このように，洪水災害の間でも，同一の洪水指標でも死亡率が異なっていることが分かる．

このような洪水人的被害関数の差としては，雨の降り方と避難情報の伝達方法が挙げられる．令和元年東日本台風では数日前から超大型台風の来襲が伝えられ，気象庁・国交省や自治体，マスコミなどから避難に関する様々な情報が伝えられた．一方，平成 30 年 7 月豪雨と令和 2 年 7 月豪雨では線状降水帯が発生した．そのため，災害への備えも十分でない住民も多かった．避難率は，球磨川周辺の人吉市では 25%（令和 2 年 7 月豪雨），千曲川では 78%（令和元年東日本台風）と大きく異なった [23]．このような避難情報の呼びか

けや住民の備えの差が，避難率の差となり，結果として洪水人的被害関数の差を生み出したものと考えられる．

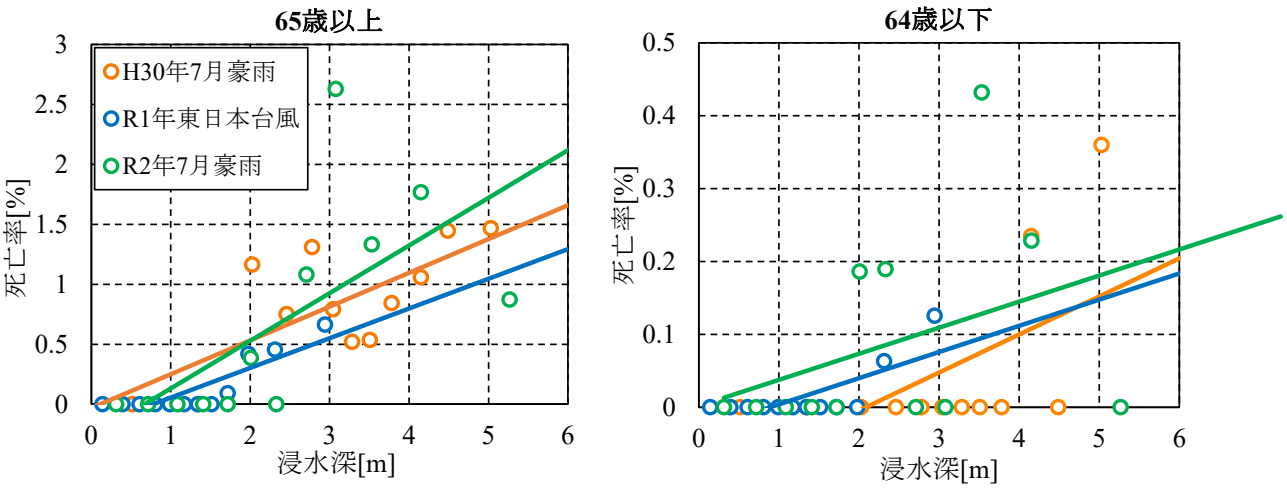


図-14　洪水災害別の洪水人的被害関数の比較（洪水指標：浸水深）

4.　洪水氾濫時の屋内浸水リスクの把握

4.1　はじめに

人的被害としては，屋内で発見される事例が多く，その大半は建物一階で見つかっている．この中には，平屋だけでなく，2 階以上の建物も含まれていることから，2 階への垂直避難すらできず逃げ遅れたものと考えられる．本章では，このような浸水時の避難リスクを明らかするために，実物大スケールの屋内浸水実験を行い，家具の転倒状況や避難の困難さを把握する．特に，屋内浸水時における避難実験について高齢者を想定して実施し，若年者と高齢者の避難困難度を実験により明らかにする．実験時の安全性の観点から，実際の高齢者に参加してもらうのではなく，市販の高齢者疑似体験セットを若年者が装着した「高齢者相当」の実験を行った．

4.2　実験方法

(1) 高齢者疑似体験セットの概要

本実験で用いた高齢者疑似体験セット（㈱三和製作所製）は，**図-15** に示す．これは，おもり（上半身，手首，足首）と関節用サポーター（膝，肘）で体全体の動きに負荷をかけると共に，前かがみ姿勢用のベルトで首と膝の距離を一定間隔以下で保ち，歩行運動に大きな制約を与えている．同製品には，視認性の制約を与える眼鏡等もあるが，本実験では用いない．本セット装着時の歩行状況の変化は不明であるので，予備実験として，若年者が水平歩行（50m）と上下歩行（階段上り下り，4 階分・35.4m）を行い，本セット装着有無による歩行時間の比較を行う．

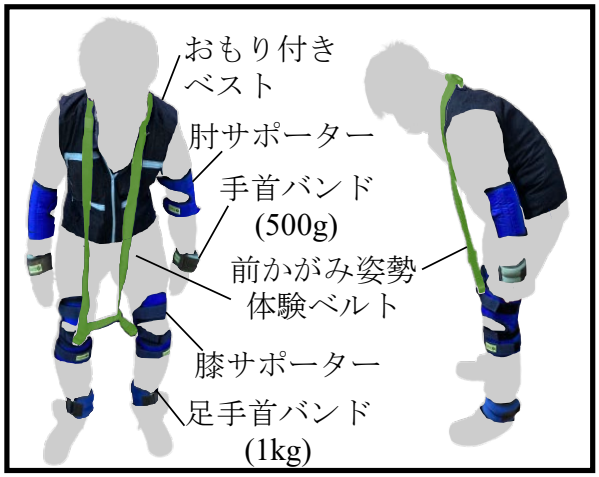


図-15　高齢者体験セットの概要正面(左)と側面(右)

(2)屋内浸水時避難実験の概要

屋内浸水時の実物大スケールの避難実験として，本学所有のコンクリート製水槽（幅 2.0m×長さ 6.0m×深さ 1.0m）内の家具を並べた部屋を設置し，ポンプ給水により浸水を再現した（**図-16**）．具体的には，上記水槽を 2 部屋に分け，片方部屋（3.7m×2.0m，約 4 畳半）に畳を敷き，その上に家具を置いた．ここでは，まず．家具転倒実験を行い，水表面には家具が散乱した．その後，避難実験として，水深 70cm と一定にした状態で，部屋の端（スタート）からドアを経て別の部屋の端（ゴール）までにかかる避難にかかる時間を測り，避難の様子を DV カメラ 3 台で記録した．被験者は 20 代学生（男性 8 名，女性 2 名）であり，前述の本セットを装着した．実験では昼間・夜間条件をセットし，後者はアイマスクを着用した．なお，避難時間の上限（=600s）を超えた場合，あるいは被験者が避難途中で辞退を申し出た場合，避難失敗とした．

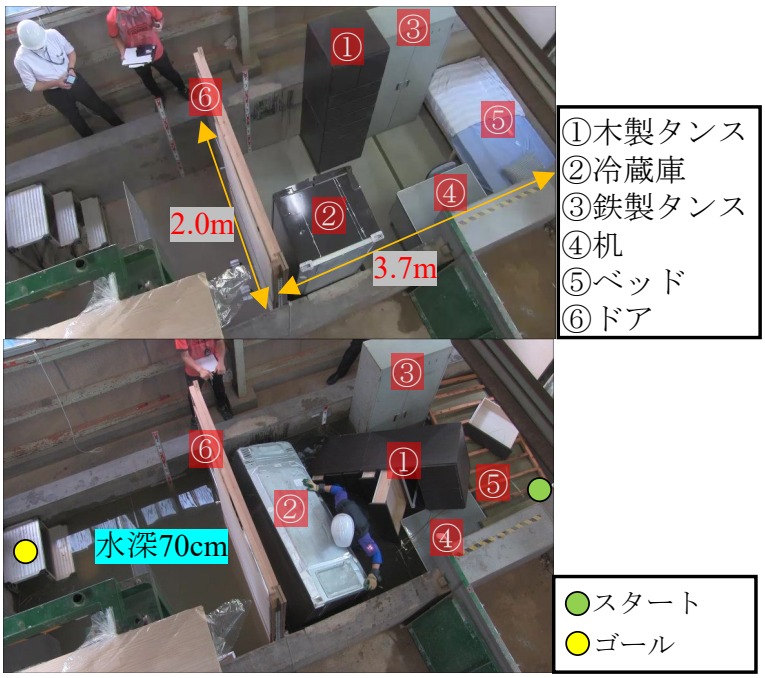


図-16　本実験前（上）と実験中（下）の様子

4.3　実験結果と考察

浸水時の家屋散乱状況下の避難実験により得られた避難時間として，昼夜条件の若年者・高齢者の結果の箱ひげ図を**図-17** に示す．図中には被験者数 n と避難失敗者数（割合）も表示する．これより，昼条件では，若年者の避難時間は 9～113s（平均値 40.6s，中央値 32s）であるのに対して，高齢者では 41～600s（平均値 196s，中央値 147s）となり，高齢者の歩行時間（平均値）は，若年者の 4.8 倍となった．同様に夜条件の若年者の避難時間（平均値）は 221s であり，昼条件の若年者の 5.4 倍と増加している．同じ夜条件の高齢者では，避難時間（平均値）は 289s と昼条件の高齢者の 1.5 倍とわずかな増加に留まる．

これら 4 ケース間の差異に関するマン・ホイットニーの U 検定を行ったところ（**表-2**），昼間の若年者 - 高齢者，若年者の昼間 - 夜間，昼間・若年者 - 夜間・高齢者の間には 5% 有意水準の差が認められた．一方，その他の高齢者の昼間 - 夜間，夜間の若年者 - 高齢者と，夜間・若年者 - 昼間・高齢者では，統計的に有意差が見られなかった．これより，昼条件の高齢者と若年者，若年者への昼夜の影響は，避難挙動に有意な影響を及ぼしているが，高齢者かつ夜間という 2 重の条件になっても，片方だけの影響も十分大きいので 2 つ条件が重なった影響は見られなかった．

上記の昼間の若年者・高齢者の避難時間における差異の要因を調べるために，若年者と高齢者の避難経路の一例を**図-18** に示す．黄色丸を開始点として，避難方向を矢印で示す．これより，若年者では，終了点のドアに向けて直線的に移動し，家具をスムーズに乗り越えた．一方，高齢者では開始 139s までは室内移動に時間を要し（赤矢印），その後，家具を乗り越えるのにも時間を要していた（緑矢印）．家具を乗り越える時間は，若年者では平均 8s（n=7），高齢者では平均 17s（n=6）であり，両者には有意差があった．このように高齢者の避難行動は若年者と比べた場合，家具を乗り越える際に多くの時間を要していることが示された．

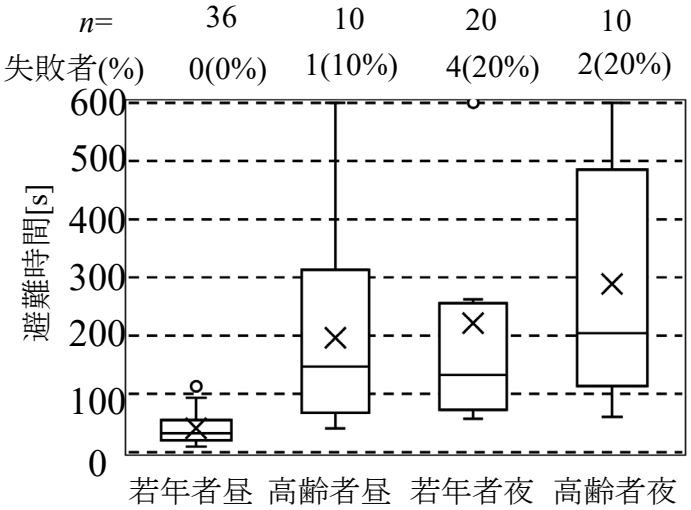


図-17　若年者と高齢者の避難時間（n：被験者数）

表-2　各ケースの避難時間に対する検定結果

	高齢者 昼間	若年者 夜間	高齢者 夜間
若年者 昼間	6.43×10^{-5} <0.05	3.14×10^{-7} <0.05	8.10×10^{-6} <0.05
高齢者 昼間		0.93>0.05	0.307>0.05
若年者 夜間			0.354>0.05

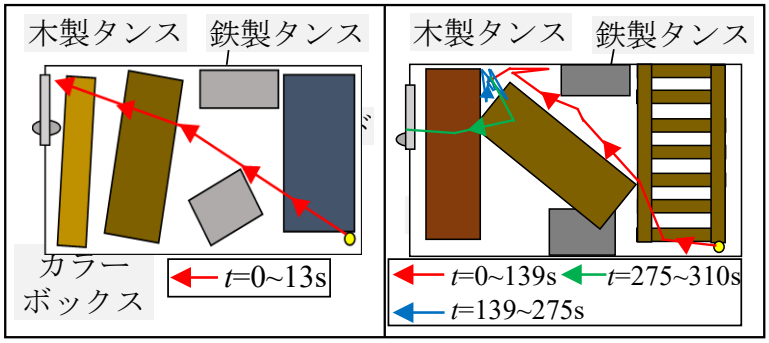


図-18　若者（左）と高齢者（右）の避難経路例（昼条件）

5.　まとめ

本研究で得られた主な結論は，以下の通りである．

（1）人的被害が発生した建物において浸水深と水位上昇速度の関係を分析したところ，両者に下限値が発見された．浸水深は 2m であり，水位上昇速度は浸水深に応じて変化する．二つの指標に下限値が認められたが，人的被害発生データに関しては浸水深，水位上昇速度共にばらつきが大きいため，二つの指標を考慮した指標（乗算値 $h*dh/dt$）も人的被害の危険度を示す指標として用いる．

（2）建物数が同数となるように区分けした洪水指標毎の人口・死者数を集計して，3 つの洪水指標（浸水深，水位上昇速度，乗算値）に関する洪水被害関数を構築した．その結果，65 歳以上では，3 つの洪水指標共に，右肩上がりの関係が見られ，有意な線形の相関式が得られた（$p<0.05$）．3 つの中でも浸水深では $R^2=0.90$ と高い結果となった．一方，64 歳以下では，乗算値の相関式のみ 10%有意水準を満たし（$p<0.10$），浸水深や水位上昇速度の相関式には有意性は確認できなかった．これより，乗算値は人的被害リスク抽出に適した指標の一つと言える．

（3）平成 30 年 7 月豪雨・令和元年東日本台風・令和 2 年 7 月豪雨の洪水人的被害関数を比較したところ，65 歳以上では浸水深 2m 以上で令和 2 年 7 月豪雨＞平成 30 年 7 月豪雨＞令和元年東日本台風の順に死亡率に大小関係があった．この差異の要因は，台風性の降雨パターンでは事前予測がある程度可能であり，避難への呼びかけや住民の備えも進むためと考えられる．

（４）屋内浸水リスクを把握するための実験結果より，浸水により多くの家具が散乱・浮遊し，屋内の避難を困難にしていることが明らかとなった．また，浸水時の避難に対して昼夜条件や属性（若年・高齢者)の影響を見たところ，夜間条件および高齢者の方が避難時間がかかることが統計的にも証明された．そのため，特に高齢者の早めの避難が改めて重要であることが示された．

参考文献

1) 内閣府：平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について（平成 31 年 1 月 9 日 17:00 現在），http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/310109_1700_h30typhoon7_01.pdf，pp.1-4，2019.
2) 内閣府：令和元年台風第 19 号等に係る被害状況等について（令和 2 年 4 月 10 日 9:00 現在），https://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19_45.pdf，pp.1-5，2020.
3) 内閣府：令和 2 年 7 月豪雨による被害状況等について（令和 3 年 1 月 7 日 14:00 現在），https://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/pdf/r20703_ooame_40.pdf，pp.1-10，2021.
4) 気象庁：台風第 19 号による大雨，暴風等，https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20191012/jyun_sokuji20191010-1013.pdf，pp.1-3，2019.
5) 国土交通省水管理・国土保全局：https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001359046.pdf，2020.
6) 土木工学水工学委員会 令和 2 年 7 月九州豪雨災害調査団：令和 2 年 7 月九州豪雨災害調査団報告書，pp.1-5，2021.
7) 尾形勇紀，堀田祥矢，伊藤毅彦，井上隆，太田皓陽，小野村史穂，二瓶泰雄：令和 2 年 7 月豪雨における球磨川流域の洪水氾濫・建物被災状況と人的被害の関係，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.77，No.2，pp.I_457-I_462，2021.
8) 国土交通省：流域治水プロジェクトについて，https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/index.html.
9) Aboelata, M. A., and Bowles, D. S., LIFESim: a model for estimating dam failure life loss, *ISSH -Stochastic Hydraulics 2005-*, pp.15-17, 2005.
10) Aboelata, M., and Bowles, D. S., LIFESim: A tool for estimating and reducing life-loss resulting from dam and levee failures. *Proc. Association of State Dam Safety Officials "Dam Safety*, pp.533-574, 2008.
11) Di Mauro, M., De Bruijn, K. M., & Meloni, M., Quantitative methods for estimating flood fatalities: towards the introduction of loss-of-life estimation in the assessment of flood risk. *Natural hazards*, *63*(2), 1083-1113, 2012.
12) 池内幸司，越智繁雄，安田吾郎，岡村次郎，青野正志：大規模水害時の氾濫形態の分析と死者数の想定，*土木学会論文集 B1 (水工学)，67*(3)，pp.133-144，2011.
13) Koshimura, S., Namegaya, Y., and Yanagisawa, H., Tsunami Fragility—A New Measure to Identify Tsunami Damage—. *Journal of Disaster Research*, *4*(6), pp.479-488, 2009.
14) Suppasri, A., Koshimura, S., and Imamura, F., Developing tsunami fragility curves based on the satellite remote sensing and the numerical modeling of the 2004 Indian Ocean tsunami in

Thailand. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *11*(1), pp.173-189, 2011.
15) Nanayakkara, K. I. U., and Dias, W. P. S., Fragility curves for structures under tsunami loading. *Natural Hazards*, *80*(1), pp.471-486, 2016.
16) 二瓶泰雄，前川俊明，大嶋李香，柳沢舞美：宮城県名取市沿岸部における津波被害関数の推定と海岸砂丘の減災効果, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.68, No.2, pp.I_276-I_280，2012.
17) Nihei, Y., Shinohara, A., Ohta, K., Maeno, S., Akoh, R., Akamatsu, Y., Komuro, T., Kataoka, T., Onomura, S., and Kaneko, R., Flooding Along Oda River Due to the Western Japan Heavy Rain in 2018, *J. Disaster Res.*, Vol.14, No.6, pp. 874-885, 2019.9.
18) 佐藤裕太，太田夏帆，鈴木利佳子，篠原麻太郎：家屋内浸水時の潜在リスクに関する実験的検討　～H30年西日本豪雨における倉敷市真備町の人的被害要因の解明に向けて～，土木学会論文集B1（水工学）,Vol.75，No.2，pp.I_1375-I_1380，2019.
19) 佐山敬洋，寶馨：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に伴う鬼怒川氾濫の浸水深分布推定，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.72，No.4，pp.I_1171-I_1176，2016.
20) MIKE Powered by DHI, https://www.mikepoweredbydhi.com/.
21) iRIC Software, https://i-ric.org/en/.
22) 篠原麻太郎，二瓶泰雄：2018年西日本豪雨における小田川の洪水氾濫プロセス，河川技術論文集，Vol.25，pp.327-332，2019.
23) 塚田文也，池内幸司：近年の日本の水害による死者の発生状況の分析と人的被害推計手法の構築，土木学会論文集B1（水工学），Vol.77，No.4，pp.I_1381-I_1386，2021.