

河川基金助成事業

「洪水氾濫時における車中死発生メカニズムの解明と 対策技術の検討」

助成番号：2020 - 5211 - 046

東京理科大学理工学部土木工学科
助教 小野村史穂

2020年度

1. はじめに

近年、毎年のように豪雨災害が多発している。過去 5 年間で発生した代表的な水害として、平成 27 年関東・東北豪雨、平成 28 年岩手豪雨、平成 29 年九州北部豪雨、平成 30 年西日本豪雨が挙げられる。2019 年も全国各地で豪雨災害が発生した。まず、8 月 28 日未明に佐賀県を中心に記録的短時間豪雨が発生し、佐賀県・福岡県・長崎県の 3 県では 8 月 28 日に大雨特別警報が発表され、死者は 4 名に達した。そのうち 3 名が車両利用時であることが分かっている。10 月 12 日に本州に上陸した台風 19 号では、1 都 12 県に大雨特別警報が発令され、140 カ所において堤防決壊が生じるなど甚大な豪雨災害となった。台風 19 号でも車両利用時に 24 名が亡くなったが、これは死者総数の約 3 割に上る。その約 2 週間後の 10 月 25 日には、台風 21 号と南岸低気圧により千葉県に記録的大雨が降り、死者は 13 名にのぼった。このうち車両利用時に亡くなった方は半数以上の 7 名である。2019 年の災害における人的被害の特徴の一つに、自動車に乗車中に亡くなる「車中死」が多いことが挙げられる。これだけの人的被害が発生した車両事故の要因を調べることは、極めて重要な課題である。この車中死の要因としては、道路のアンダーパスのような低地やくぼ地に進入して水没する事例だけでなく、何らかの移動中に洪水流により流される事例も多い。特に後者に関しては、いくつか先行研究があるが、いずれも模型自動車の室内実験が多く、現地の被災事例のデータ収集やその解析は限定的である。そこで本研究は、上記 3 つの豪雨における車中死の被害状況の一つずつ整理し、その要因と車両漂流条件を把握することを目的として現地調査、氾濫解析、模型実験を実施した。また、上記の結果を基に、車中死を防ぐ対策技術についても検討していく。

キーワード：豪雨、水害、洪水、人的被害、車両流失、車中死

2. 研究方法

2.1 被害情報の収集及び現地調査

車中死情報を入手するため、TV や新聞記事を中心に 2019 年に発生した佐賀豪雨と台風 19、21 号における車利用時の死者データ（年齢や場所等）を集めた。自動車事故の被害状況（進行経路、流された場所、漂着点、発見時刻）や洪水氾濫状況を把握するために現地調査を行った。調査地点数は、佐賀豪雨では 3 地点、台風 19 号では 1 地点、台風 21 号では 3 地点である。調査では、車両通行・漂着箇所とその周辺の測量や洪水痕跡、流向を計測した（図 2-1）。測量には RTK-GNSS（Trimble R10、Trimble 製）を用いた。

2.2 事故現場周辺の氾濫解析

現地調査のみでは自動車漂流条件に必要な流速データは得られないため、詳細な痕跡水位のデータを取得することのできた佐賀豪雨の事故現場（佐賀県武雄市）では iRIC（International River Interface Cooperative）による氾濫シミュレーションを行った。また台風 19 号の現場（栃木県足利市）では、入手したドライブレコーダーの動画を用い、画像解析から水深及び流速を求めた。



図 2-1 福岡県八女市で実施した現場計測の様子

2.3 自動車漂流条件に関する模型実験

自動車の漂流が始まる水理条件（水深と流速）を検討するため、1/10 スケールの模型車を用いた開水路実験を行った。図 2-2 に示すように、本学所有の大型水平開水路（長さ 20m、幅 1.0m、高さ 1.8m）を用い、水路内の流速や水深を制御しやすくするために、水路中央部（上流端から 13m）に越流堰（長さ 1.0m × 幅 1.0m × 高さ 0.25m）を設置し、堰上に模型車を置いて流水を発生させた。流量 Q は 0.020, 0.0025, 0.030m³/s の 3 ケースであり、各流量にて下流堰の高さを徐々に増やし、車が漂流するまで実験を行った。車体の向きは、流れに対して前向きと横向きの 2 ケースとした。模型車はラジコンカーのシトロエン 2CV を加工して作成しており、1/10 スケールの長さ 0.394m、幅 0.181m、高さ 0.165m、質量 0.56kg である。車体側面に標尺を張り付け、適宜読み取り車体上・下流の水深を求め、抗力 D と浮力 B 、摩擦力 F を求める。 F は、重力 W 、静止摩擦係数 μ を用いて、 $\mu(W-B)$ より算出する。

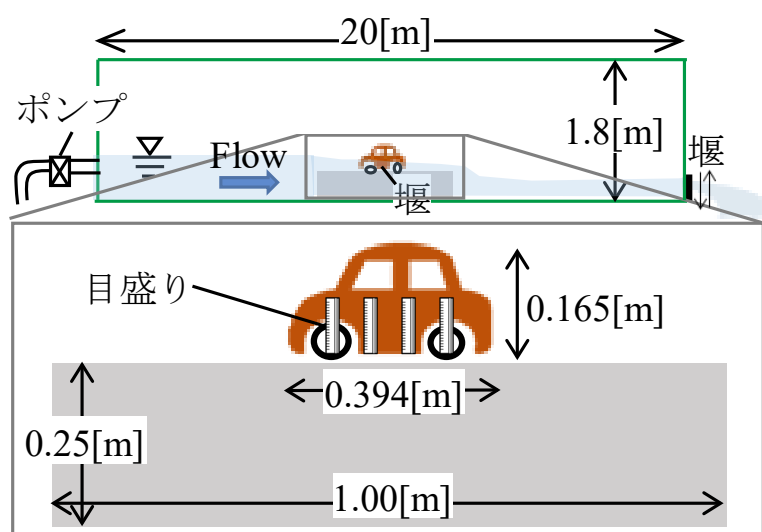


図 2-2 自動車漂流開水路実験の概要

3. 令和元年に発生した豪雨と被害の概要

3.1 佐賀豪雨

3.1.1 豪雨の概要

2019年8月27日から28日にかけて九州北部に秋雨前線による線状降水帯が停滞し、佐賀県では28日未明に1時間に100mmを超える記録的な大雨が降った（図3-3）。重大な水害に発展する可能性があることから、気象庁は、28日午前5時50分に佐賀県、福岡県、長崎県に対して大雨特別警報を発表した。28日の佐賀市の降水量は283mmであり、8月の降水量の平年値196.9mmと比較すると約1.4倍に上ることが分かる。

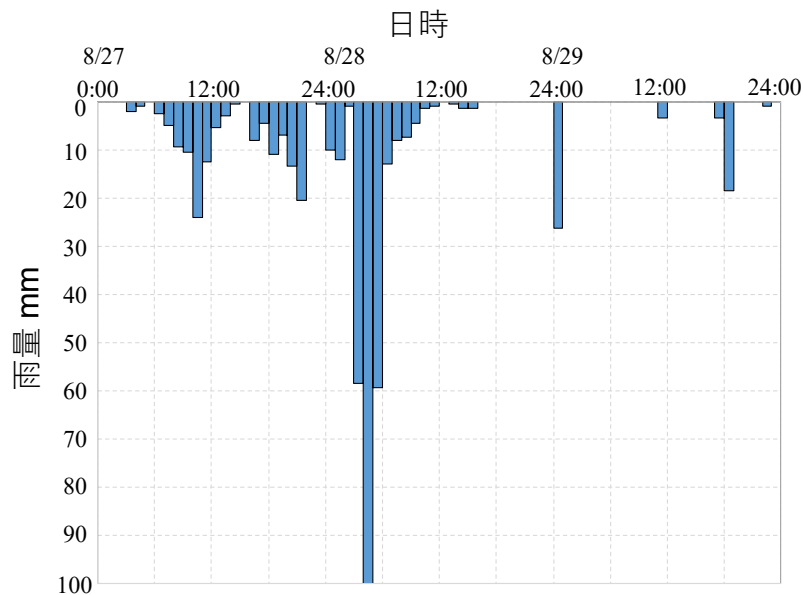


図3-3 佐賀市における雨量の変化

3.1.2 被害の概要

この雨による死者は佐賀県で3名、福岡県で1名であった。佐賀県の3名のうち1名は自宅で、他2名は車利用時に亡くなった。福岡県の1名の方も同じく車利用時に亡くなっている（表3-1）。

また、この大雨により佐賀県の六角川や牛津川が溢れ、家屋や田畑の浸水被害が相次いだ。また、内水氾濫によって病院の入院患者200人が孤立したほか、道路の冠水によって車の水没が相次ぎ、救助要請が多数寄せられた。交通機関にも影響し、JR九州や私鉄で運転を見合わせたほか、高速道路も一時、部分的に封鎖された。

表3-1 佐賀豪雨の人的被害状況

	総数		車両被害	
	死者	行方不明者	死者	行方不明者
都道府県				
佐賀県	3	1	2	0
福岡県	1	0	1	0
合計	4	1	3	0

車の利用時に被災した方の状況を、表 3-2 に示す。3 名のうち 2 名は早朝に仕事場との移動中であつたことが分かった。

表 3-2 佐賀豪雨 自動車利用時の人的被害状況

番号	県名	日時	場所	年齢	性別	移動目的	車種	河川
①	佐賀県	8月28日 早朝	武雄市	50代	女	仕事	不明	六角川
②	佐賀県	8月28日 5:15	武雄市	50代	男	仕事	軽自動車	武雄川
③	福岡県	8月28日 8:00	八女市	84	男	不明	軽自動車	辺春川

3.2 台風19号

3.2.1 豪雨の概要

2019 年 10 月 12 日に日本に上陸した台風 19 号は、13 日朝に福島県付近から太平洋に抜けるまで、各地に記録的な大雨をもたらした。この豪雨により各地で浸水や土砂崩れが発生し、河川が氾濫した。神奈川県箱根町では 48 時間の雨量が 1001mm に達し、観測史上最高を記録した。記録的な大雨を受け、12 日から 13 日にかけて、東京を流れる多摩川、福島県や宮城県を流れる阿武隈川、長野県を流れる千曲川など一級河川を含む河川が氾濫し、多くの地域で浸水した。観測対象地域である足利市の雨量データと渡良瀬川 28.5kp の水位データを図 3-4 に示す。

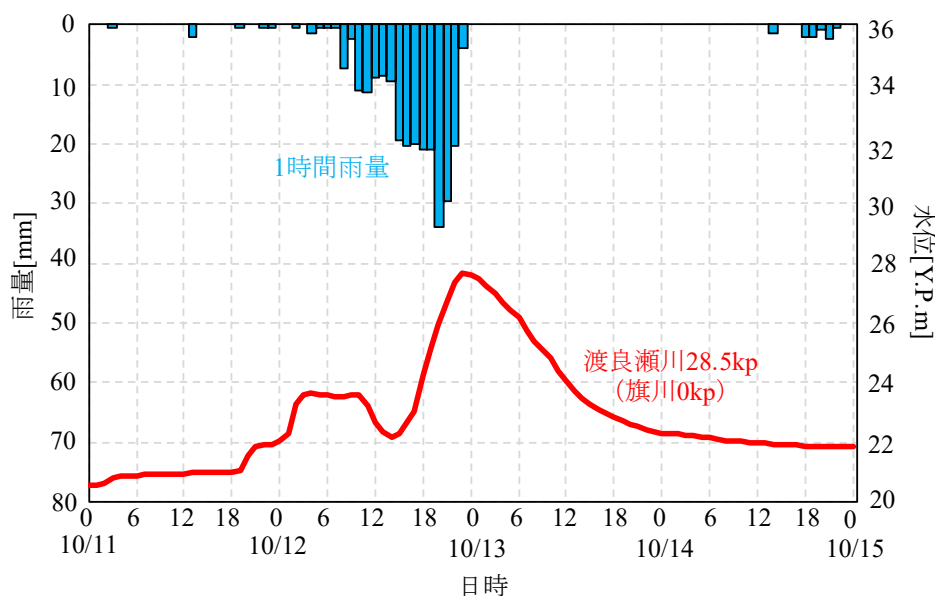


図 3-4 足利市の雨量と渡良瀬川 28.5kp の水位変化

3.2.2 被害の概要

この災害により 140 か所の堤防が決壊した。13 日朝の時点で計約 330 万世帯、計約 800 万人に避難指示、避難勧告が出された。13 日午前 10 時の時点で計約 21 万 3 千世帯において停電が続いていた。

この災害によって死者 93 名、行方不明者 3 名の被害が出た。93 名中 24 名が車利用時であることが分かっている（表 3-3）。さらに、表 3-4 に車利用時に被災した方の詳細を示す。

表 3-3 台風 19 号人の被害状況

	総数		車両被害	
	死者	行方不明者	死者	行方不明者
都道府県				
福島県	31	0	7	0
宮城県	19	1	5	0
神奈川県	16	1	4	0
長野県	5	0	2	0
埼玉県	4	0	1	0
群馬県	4	0	0	0
栃木県	4	0	3	0
岩手県	3	0	1	0
静岡県	3	0	1	0
茨城県	2	1	0	0
東京都	1	0	0	0
千葉県	1	0	0	0
合計	93	3	24	0

表 3-4 台風 19 号 自動車利用時の人的被害状況

番号	県名	日時	場所	年齢	性別	移動目的	河川
④	福島県	10月13日 14:39	郡山市	7	男	知人	黒石川
⑤	福島県	10月14日 07:30		36	女		
⑥	福島県	10月18日 10:20		10	男		
⑦	福島県	10月13日 10:10	白河市	65	男	不明	不明
⑧	福島県	10月13日 02:30	南相馬市	25	男	仕事	不明
⑨	福島県	10月14日 09:34	飯舘村	75	男	仕事	不明
⑩	福島県	10月21日 10:37	川内村	69	男	不明	不明
⑪	神奈川県	10月13日 8:00過ぎ	相模原市	39	女	親戚	串川
⑫	神奈川県	10月13日 8:00過ぎ		11	女		
⑬	神奈川県	10月14日 午前		49	男		
⑭	神奈川県	10月15日 8:00		8	男		
⑮	宮城県	不明	丸森町	54	女	不明	不明
⑯	宮城県	10月13日 夕方	大和町	58	女	不明	不明
⑰	宮城県	10月13日 9:15	蔵王町	61	男	不明	松川
⑱	宮城県	10月14日 6:30	栗原市	84	男	不明	北上川
⑲	宮城県			81	女		
⑳	栃木県	10月13日 3:10	足利市	85	女	避難	旗川
㉑	栃木県	10月13日 5:50	鹿沼市	47	男	不明	大芦川
㉒	栃木県	10月13日 6:30	鹿沼市	70	男	仕事	黒川
㉓	岩手県	10月13日 2:00	田野畑村	71	男	仕事	不明
㉔	長野県	10月13日	佐久市中込	81	男	避難	滑津川
㉕	長野県	10月12日 午後	佐久市	68	男	その他	谷川
㉖	埼玉県	10月12日 17:40	東松山	70	男	避難	都幾川
㉗	静岡県	10月13日 8:15	牧之原市	70代	男	不明	不明

3.3 台風21号

3.3.1 豪雨の概要

台風 21 号は日本には上陸していないが、日本列島に接近した 2019 年 10 月 25 日に大きな被害が出た。25 日は本州の南岸沿いを低気圧が東進した。台風 21 号は本州からは離れて進んだが、台風周辺の雨雲の元となる暖かく湿った空気が大量に流れ込んだ影響で四国や紀伊半島、関東や東北太平洋側に活発な雨雲がかかった。

特に記録的な大雨となったのが千葉県で、千葉県鴨川市で 1 時間に 85.5 ミリの猛烈な雨が降り、観測史上 1 位の大雨となった。また気象レーダーの解析で千葉県千葉市付近と八街市付近では 1 時間に約 100 ミリの猛烈な雨が降ったとみられ「記録的短時間大雨情報」が発表された。12 時間雨量は千葉縣市原市の牛久で 283.5 ミリ、佐倉市で 248.0 ミリとたった半日で平年 10 月のひと月分の雨量を越える雨が降った。千葉県では川の氾濫や浸水、道路の冠水など多くの被害が出た。

また福島県浪江町でも観測史上 1 位となる 62.0 ミリの非常に激しい雨を観測した。浪江町の 12 時間雨量

は 245.5 ミリと、ここでもたった半日で平年の 10 月のひと月の雨を上回る大雨となった。福島県を流れる夏井川では氾濫が発生した。観測対象地域である千葉市の雨量データと一宮川 13.4kp の水位変化を図 3-5 に示す。

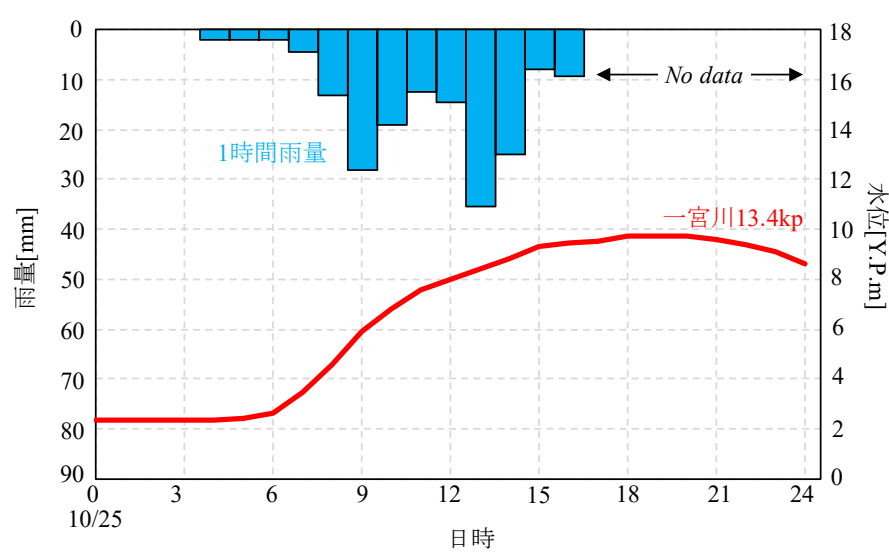


図 3-5 千葉市の雨量と一宮川 13.4kp の水位変化

2.3.2 被害の概要

この雨による死者は千葉県で 11 名、福島県で 2 名であった。千葉県の 11 名のうち 5 名は車利用時に亡くなった。福島県の 2 名も同じく車利用時に亡くなっている（表 3-5）。被害者の詳細を表 3-6 に示す。

表 3-5 台風 21 号の人的被害状況

	総数		車両被害	
	死者	行方不明者	死者	行方不明者
都道府県				
千葉県	11	0	5	0
福島県	2	0	2	0
合計	13	0	7	0

表 3-6 台風 21 号 自動車利用時の人的被害状況

番号	県名	日時	場所	年齢	性別	移動目的	近くの川
⑳	千葉県	10月25日 19:00	長柄町	54	男	家族	一宮川
㉑	千葉県	不明	長柄町	88	男	避難	一宮川
㉒	千葉県	10月25日 19:00	長南町	81	男	家族	三途側
㉓	千葉県	不明	長南町	91	男	不明	不明
㉔	千葉県	10月29日夜	佐倉市	80	男	不明	鹿島川
㉕	福島県	10月26日	相馬市	61	女	家族	不明
㉖	福島県	10月26日	相馬市	38	男	家族	不明

3.4 車中死の発生要因

人的被害状況の収集データに基づいて、3つの豪雨イベントにおける車中死33名の発生要因を分析した結果を図3-6に示す。ここでは、発生要因としては、洪水流で車体が流された「漂流」と低地・窪地に侵入した「水没」に加えて、河川などへ落ちた「転落」、「その他」に分けた。また、転落については、道路などが陥没したケースと、道路が冠水して運転方向を謝って河川や池などに転落したケースに分けている。図3-6より、車中死の大半と思われる水没はわずかに6名（全体の18%）と少なく、実際には漂流（10名、30%）と転落（浸水）（12名、36%）が顕著であることが明らかとなった。

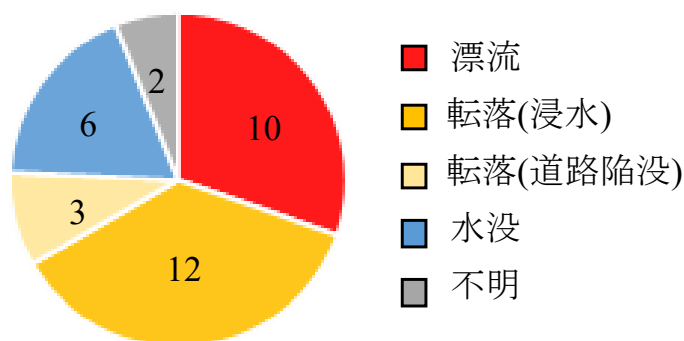


図3-6 2019年佐賀豪雨，台風19，21号における車中死発生要因

3.5 自動車漂流状況の現地調査と氾濫解析

ここでは、情報収集や現地観測から十分なデータを取得することのできた佐賀豪雨の事例②と台風19号の事例⑩の解析結果を報告する。

3.5.1 佐賀豪雨における車両事故事例②

表3-2の②の事例について、現地観測を実施した。本事例では、28日午前5時15分ごろ、武雄川近くの市道で車が水に流されたと110番があった。市道は当時大雨で冠水していた。同7時ごろ、流された軽乗用車が市道と武雄川の間の水田で発見され（図3-7）、車内から男性が救助されたが、搬送先の病院で死亡が確認された。現地調査では、事故現場周辺に残っていた氾濫流の痕跡から取得した水位を図3-8、被害者車両が直前に通行した道路の標高を図3-9、武雄川や支川の川幅や水深及び事故現場の位置を図3-10に示す。

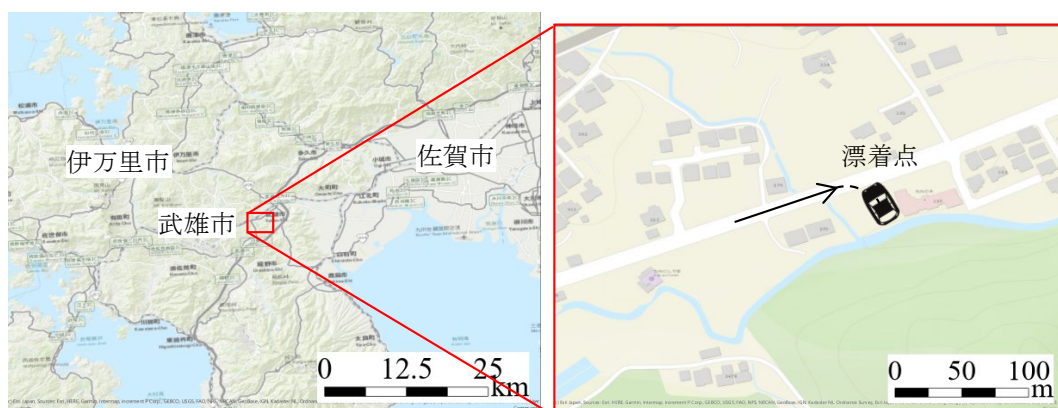


図3-7 佐賀豪雨における車両事故が発生した場所（表2-2の②）



図 3-8 佐賀豪雨事例②の現場観測から取得した痕跡水位

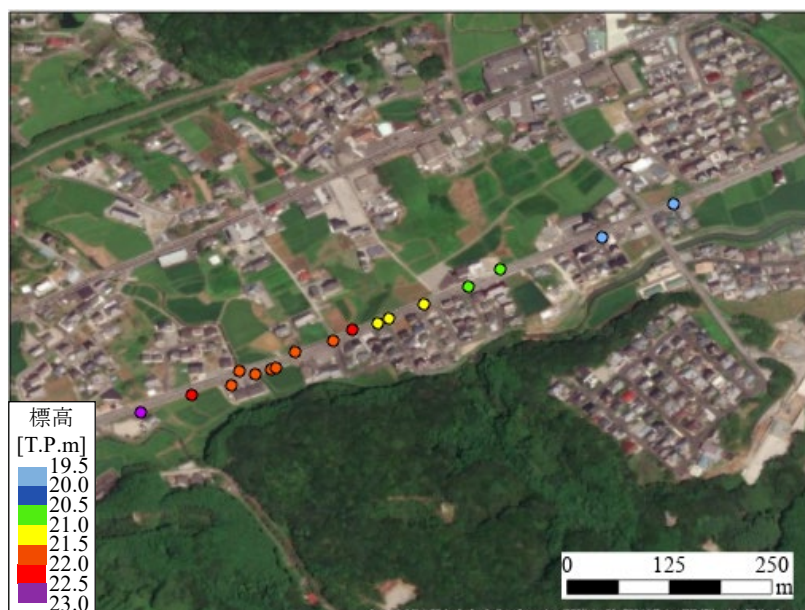


図 3-9 佐賀豪雨事例②の被害車両が直前に通行した道路の標高



図 3-10 武雄川と支川の川幅及び水深と、事故現場の位置

次に、現地観測によるデータを用いて、iRIC を用いた氾濫解析を行った（図 3-11）。入力値の流量は、洪水流出氾濫モデル（RRI）から算出している。被害車両が流された道路の縦断方向で、iRIC から得られた浸水深と流速（図 3-12）を、現地観測から得られた浸水深（図 3-13）と比較する。どちらも車が実際に流された場所（図中黄色の網掛け部分）で水深が 0.5m を超えるほど深くなっていたことが分かる。またシミュレーション結果から、流速も急激に大きくなり、1-2 m/s に達していた。

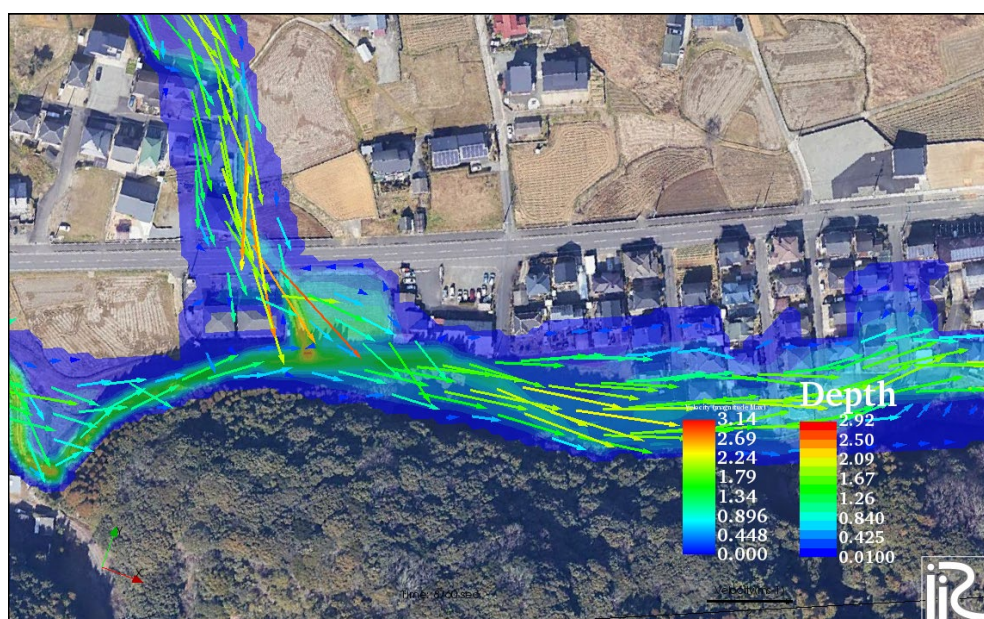


図 3-11 iRIC を用いた氾濫解析による浸水深と流速分布

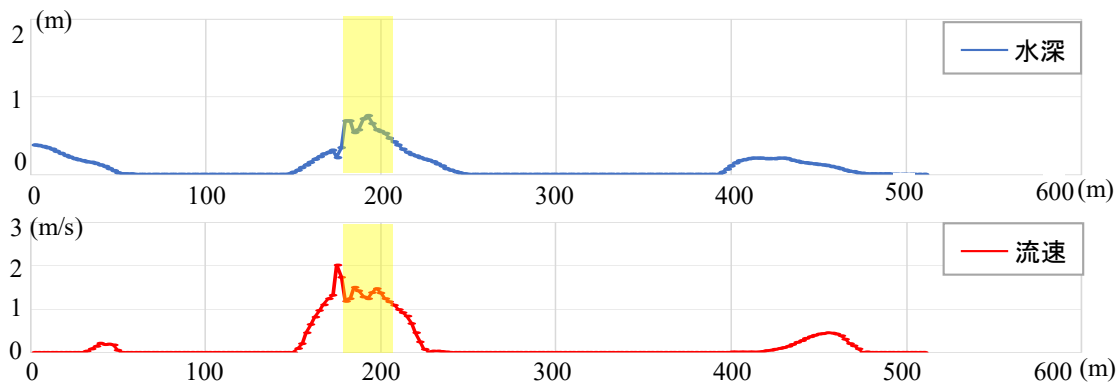


図 3-12 iRIC を用いて算出した道路縦断方向の浸水深（上段）と流速（下段）．黄色の網掛け部分は事故現場付近を示す．

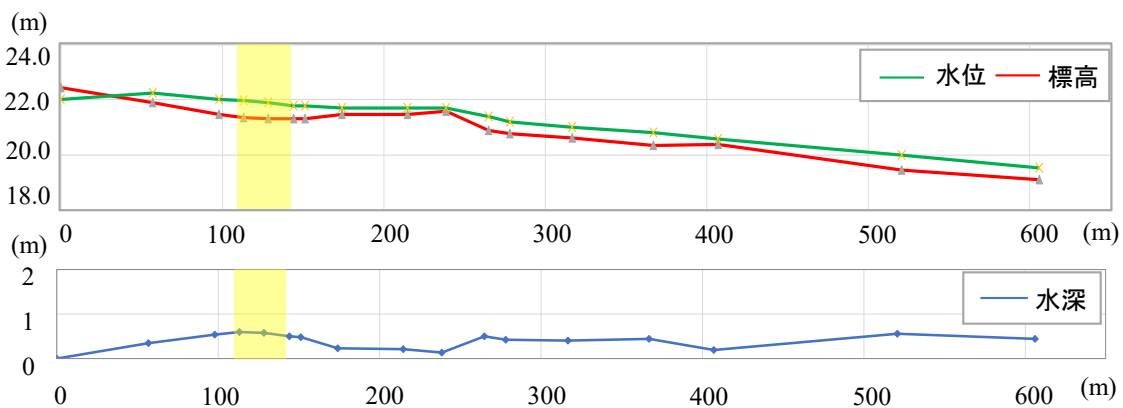


図 3-13 現地観測から得られた道路縦断方向の水位と標高（上段），及び浸水深（下段）．黄色の網掛け部分は事故現場付近を示す．

3.5.2 台風 19 号における車両事故事例⑩

自動車の漂流状況が詳細に残っていた事例として、台風 19 号（2019/10/12-13）における栃木県足利市出流川周辺における事故に着目する．現地地図及びドライブレコーダーから判明した自動車の通行経路を図 3-14 に示す．ドライブレコーダーの映像を確認すると、図中地点①の時点では道路は冠水していなかったが、地点②における周囲が田んぼに囲まれた道路を西に進むと冠水が発生し、出流川からの氾濫流を進行方向右側から受けた．その後、地点③にて車前方のバンパーを水位が越えると、氾濫流により車が進行方向左に流され、右にハンドルを切ったことも影響して車体は右回りに回転し、車体後方部から南側の田んぼに流されて、約 40m 移動して漂着した．地点③から漂着地点まで田んぼの稲が連続的に倒れていないため、車は浮遊しながら移動したと考えられる．また、ドライブレコーダーの画像から解析した自動車漂流時における水深は 0.3-0.4m、流速は約 1m/s となった．現地調査において、事故現場周辺に残っていた氾濫流の痕跡から推定した浸水深も 0.2-0.4m であり（図 3-15）、概ね一致していることが確認された．

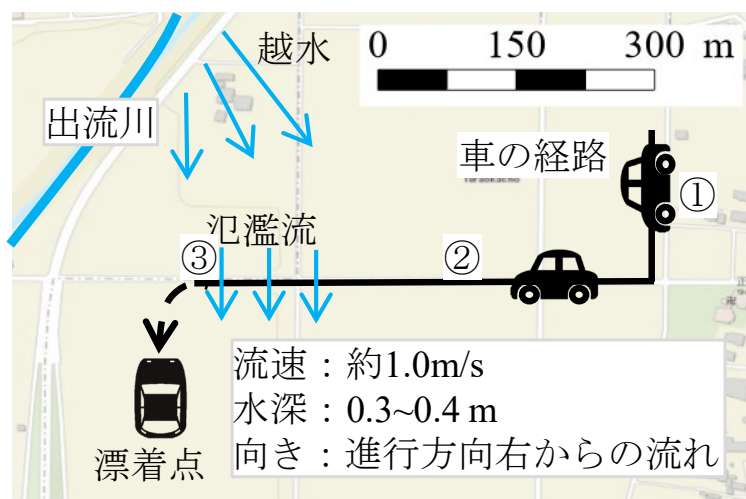


図 3-14 自動車漂流事故の事例（台風 19 号，足利市出流川）



図 3-15 台風 19 号②の現場観測から取得した浸水深

4. 模型自動車を用いた漂流実験

4.1 予備実験と諸条件

以下の式から求められるように、自動車にかかる抗力 D が摩擦力 F を上回る時 ($D > F$)、車両が流出し始める。

$$D = A * Cd * \frac{\rho V^2}{2}$$
$$F = \mu (Mg - f)$$

ここで、投影面積 A は、模型車両の最低地上高までのタイヤ部分の投影面積とそれ以上の車体部分の投影面積を足したものとして計算している。抗力係数 Cd は、押川ら(2011)や戸田ら (2012) の結果を参考にし、それぞれの水深における抗力係数を計算した。水の密度 ρ は 1000kg/m^3 、 M は模型車両の質量 kg 、重力加速度 g は 9.8067 m/s^2 を用いている。静止摩擦係数 μ は、事前に行った静止摩擦の実験から算出している。平板に模型自動車を置き、平板を 1 度ずつ傾けていき、静止できなくなる直前の角度 θ から算出している。横向き、前向きともに、 $\theta = 33$ 度で模型自動車は動いた。その結果、静止摩擦係数 μ は、0.62 となった。浮力 f についても別途実験を行って求めた。具体的には、水を張ったバケツに模型車両を 0.5cm ずつ沈めていき、バケツ全体の重さの変化から浮力を求めている。浮力 f と車両を沈めた水深 h の関係は、 $f = 1.95 \times h - 0.0351$ で線形近似できることが分かった。

4.2 車両流出実験

図 4-1、図 4-2 に、流れに対してそれぞれ横向き、前向きに設置した模型車両が漂流する様子を示す。流れに対して横向きに車両を設置した場合は、比較的軽い後輪から流れられ、流れに対して前向きになって漂流していくことが分かる。一方、最初から前向きに設置していた車両は、そのままの状態で行われていた。

実際の事故事例における自動車漂流条件を再現した模型実験で得られた自動車漂流時の力学バランス状況を図 4-3 に示す。ここでは、流量 $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ と固定し、下流堰を 1cm ずつ上げた時の車体上・下流の水深と抗力 D と摩擦力 F を示している。車体が横向き・前向き共に、下流堰高さが小さいと上・下流の水深差が大きい。模型車が置かれている越流堰全体では常流であり、車上流側でも常流であるが下流側の後流部分では射流となっている（限界水深 = 0.040m）。下流堰高さの増加と共に車体下流側が増加し、車体の漂流は横向きと前向きにて下流堰高さ = 20, 27cm で各々発生した。力学バランスとして、下流堰高さの増加と共に浮力が増加するため、結果として摩擦力が減少し抗力 $D > \text{摩擦力 } F$ となると車体は漂流した。ここで得られた重要な知見として、横向き車体は抗力が前向きの約 3 倍と漂流し易いこと、また、わずかな下流水深の変化が水面縦断形を大きく変えて急激に摩擦力が低下し、車漂流が生じてしまうことの 2 点が挙げられる。

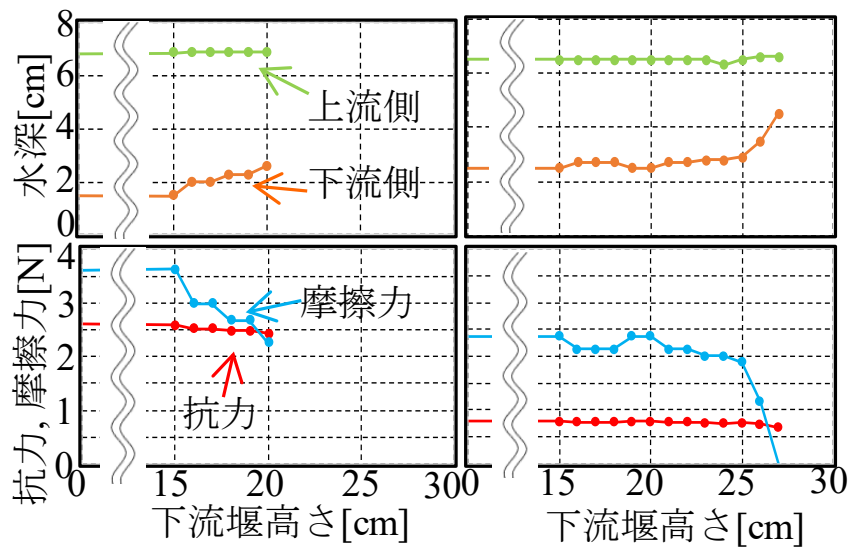
図 4-4 は本実験・観測、及び既往研究 (Martínez-Gomariz et al. 2018) により得られた車漂流の流速・水深の条件を示す。ここでは、実験結果をフルードの相似則に基づいて実物換算している。これより、車漂流限界は水深 0.3~0.4m、流速約 1m/s となっており、本研究と既往研究は概ね同範囲となっている。



図 4-1 車両漂流実験（横向き 流量：0.020m³/s, 下流堰：27cm）の様子.
左段は上から, 右段は横から撮影した動画の一部.



図 4-2 車両漂流実験（前向き 流量：0.020m³/s, 下流堰：27cm）の様子。
左段は上から，右段は横から撮影した動画の一部。



(a) 車体横向き

(b) 車体前向き

図 4-3 車体上流側の水深（上段）及び抵抗力・摩擦力（下段）と下流堰高さの関係
(模型実験, 流量 $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$)

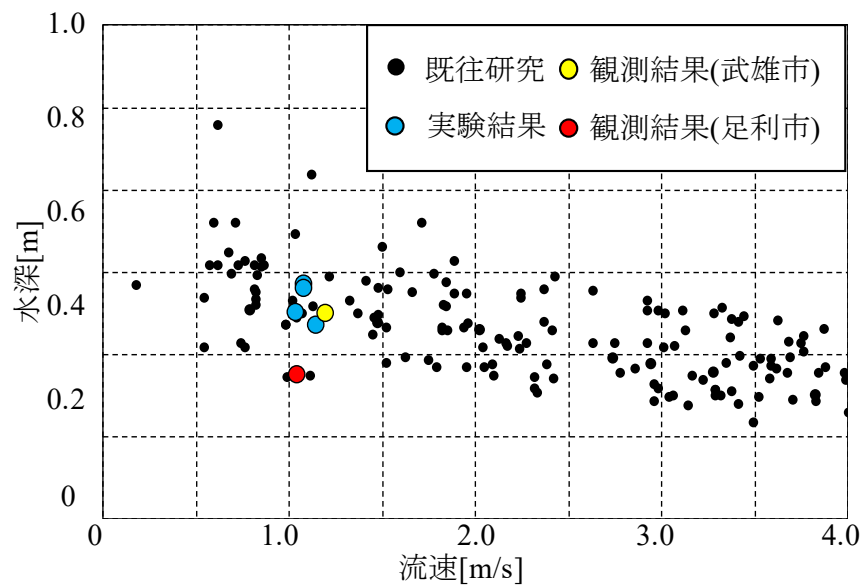


図 4-4 車漂流における流速と水深の条件

5. 車載型浸水深計測技術の検討

現地調査で確認された漂流発生箇所は概ね河川や水路のそばであり、大きな氾濫流速の発生が想定されるエリアであった。今回詳細に示した現地観測調査事例（佐賀豪雨②と台風 19 号②）はいずれも、氾濫流に対して車両横向きで流されており、模型実験における結果を踏まえても、流されやすい条件であったことが分かる。さらに実験から、下流側のわずかな水深の変化が浮力を増大し、漂流させてしまうことも明らかとなった。これらを踏まえると、今度の車中死を防止する対策として、浸水時に車両を取り巻く水深や流速の変化をモニタリングすることが挙げられる。

現在自動車には様々な環境センサが搭載され、そのデータを収集して共有するコネクテッドカーという概念が広まりつつあるが、水害時を想定した水深や流速の計測はなされていない。また、これまで情報交換をしてきた自動車製造や車両事故に関わる企業においても、車両浸水に対する対策は未検討であった。気候変動による極端な降水現象の増加が予測されている中、豪雨時の車中死は増える可能性があり、その対策を検討していくことは重要な課題と言える。

そこで、本研究では、車両周辺の水深を計測する技術として、小型で安価な超音波センサ（MB7389-100）と水位センサ（Grove）を検討した（図 5-1）。超音波センサは、空中にセンサ下向きに設置し、センサから 0.3 -5m の範囲にある水面の高さを 5mm 間隔で計測する。一方、水位センサは浸水すると 100mm の範囲を 5mm 解像度で計測する。これらのセンサをバケツに貯めた静水で検証したところ、どちらも十分な時空間解像度で計測できることが分かった。超音波センサの価格は¥12,100、水位センサの価格は¥1,100 といずれも入手可能な価格帯であり、車載型センサとして導入しやすいと言える。また、本実験結果から、車両の上流側と下流側の水位が車両漂流に繋がることを考慮すると、自動車の前方と後方、左右両側の 4 か所で水深を計測することが望ましく、複数台の導入が考えられる。今後は、実際に起きた車両漂流を想定し、より現実的な状況下（移動中や濁流、急変流）においても検証していく必要がある。

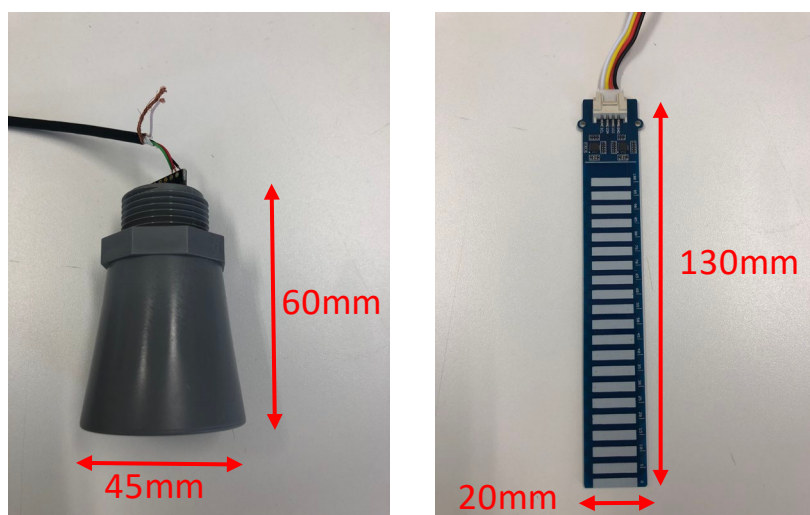


図 5-1 車載型として利用検討した小型水深センサ

6. まとめ

毎年のように全国各地で豪雨による水害が発生しており、2019年には3つの豪雨イベント（佐賀豪雨、台風19号、台風21号）が起こり、多くの方々が被災した。亡くなられた方のおおよそ3割は、車の移動中であり、その要因や車が浸水した際の車両流出条件を把握することは、防災の観点から重要な課題である。そこで、本研究では、実際に起こった車両事故に対して、情報収集、現地調査、氾濫解析を行い事故の状況を整理・把握するとともに、大型開水路において模型車両を用いた漂流実験を実施することで、車両が漂流し始める限界条件を明らかにした。

上記の3つの豪雨イベントでは、合計110名の方々が被害にあわれ、そのうち33名が車で移動中だったことが分かった。車中死が発生した要因を、漂流、水没、転落、その他に分け割合を調べたところ、転落と漂流がそれぞれ36%と30%と大半を占め、水没はわずか18%であった。模型車両による車両漂流実験では、流れに対して前向きより横向きに車両が位置しているとき、約3倍流されやすいことが分かった。また、車両下流側のわずかな水位の増加で、静止摩擦力が減少し、漂流し始めることが分かった。現地観測、氾濫解析、模型実験より得られた車漂流限界は、水深0.3~0.4m、流速約1m/sとほぼ一致しており、既往研究と比較しても概ね同範囲となることが分かった。これらの結果を基に、車中死を防ぐ対策として、車回りの水深や流速をモニタリングすることが考えられる。将来的に車載することを考慮すると、小型で安価な手法でモニタリングすることが現実的であり、現在入手できる超音波センサと水位センサを候補として検討した。

7. 参考文献

- ◆ 押川英夫，大島崇史，小松利光：冠水時の自動車通行の危険性に関する研究，河川技術論文集，第17巻，2011年7月
- ◆ 戸田圭一，石垣泰輔，尾崎平，西田知洋，高垣裕彦：氾濫時の車の漂流に関する水理実験，河川技術論文集，第18巻，2012年6月
- ◆ Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B. and Djordjević, S. (2018), Stability criteria for flooded vehicles: a state-of-the-art review. J Flood Risk Management, 11: S817-S826.