

## 実物大車両実験に基づく洪水氾濫時の車両漂流条件の解明

東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科  
東京都市大学 建築都市デザイン学部 都市工学科  
東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科  
九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系  
北見工業大学 工学部 地域未来デザイン工学科

二 瓶 泰 雄  
小野村 史 穂  
柏 田 仁  
川 尻 峻 三  
吉 川 泰 弘



# 実物大車両実験に基づく洪水氾濫時の車両漂流条件の解明

Study on vehicle-drift conditions under flood inundation  
based on full-scale vehicle experiments

二瓶 泰雄<sup>1</sup>・小野村史穂<sup>2</sup>・柏田 仁<sup>3</sup>・川尻 峻三<sup>4</sup>・吉川 泰弘<sup>5</sup>  
Yasuo NIHEI, Shiho ONOMURA, Jin KASHIWADA, Shunzo KAWAJIRI  
and Yasuhiro YOSHIKAWA

<sup>1</sup> 東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科 教授

<sup>2</sup> 東京都市大学 建築都市デザイン学部 都市工学科 准教授

<sup>3</sup> 東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科 助教

<sup>4</sup> 九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系 准教授

<sup>5</sup> 北見工業大学 工学部 地域未来デザイン工学科 教授

## 要 旨

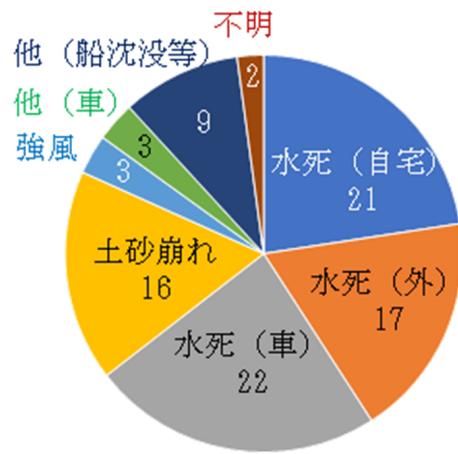
近年、豪雨災害が全国各地で頻発化し、水害時の車両利用による「車中死」は昨今の人的被害の特徴の一つと言える。本研究では、車中死の中でも車移動中に洪水氾濫流によって流される車両漂流（sliding）に着目し、実物の車両を用いた漂流実験を実施することで、車両漂流時の水理条件を明らかにすることを目的とする。ここでは、プロトタイプの小型乗用車を使用した洪水流実験データの再解析と車両引張試験という2つの実物大実験を通じて、洪水状態における車両の滑り不安定性を調査する。洪水流実験では、サイドブレーキの影響を調べた。その結果、サイドブレーキを作動させないと転がり摩擦係数が1オーダーも減少し、ブレーキをかけた状態よりもかなり低い流速でslidingしやすいことが明らかになった。引張実験では、転がり抵抗係数は初期には高いが、車両が加速するにつれて急速に低い定常値に移行することが実証された。さらに、車両の力のつり合い分析より、洪水によって引き起こされる振動が、車両の流失に先立つ下流への変位を引き起こすことが示された。この研究は、洪水時の洪水流と車両応答の動的相互作用を定量化した最初の本格的な研究となっている。

《キーワード：豪雨；洪水氾濫；車両漂流条件；実物大車両実験》

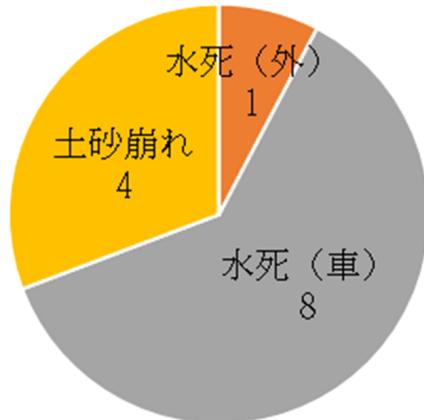
## 1. はじめに

### (1) 背景

近年、豪雨災害の多発により市街地等でも浸水被害が発生している。過去5年間で発生した顕著な豪雨災害は、平成30年7月豪雨（西日本豪雨）や令和元年東日本台風（台風19号）、令和2年7月豪雨が挙げられる。特に、令和元年東日本台風では、東日本を中心に17地点で総雨量500ミリを超え、多くの地点で3, 6, 12, 24時間降水量の観測史上1位の値を更新するなど記録的な大雨となった。また同年10月25日には千葉県、福島県を中心に総雨量200ミリを超える大雨となった。これにより、2019年度では、浸水面積約807km<sup>2</sup>、被災建物棟数約9.9万棟、被害総額2.15兆円と記録的被害となった。これらの豪雨災害における甚大な人的被害の特徴は、「建物内での被災」と「車で移動中の被害（車中死）」が挙げられる。豪雨災害による人的被害の特徴を図1-1に示す<sup>1)</sup>。令和元年東日本台風では、死者・行方不明者は93名に達した。このうち、車中死の数は22名にのぼり、屋外における水関連死者数の半数を占めた。令和元年10月25日豪雨では、死者数は13名に達し、そのうち車中死は8名であった。2023年7月に発生した秋田大雨においても、秋田市街地にて広範囲に内水・外水複合氾濫が発生すると共に、五城目町を流れる馬場目川近くでは、車が氾濫流により流され、男性1人が死亡した。2024年7月の秋田・山形豪雨では、最上川水系右支川の新田川において、警察車両を始め4台の車両が流失し、2名が亡くなった。これらを背景に、この「車中死」の被害は、近年の豪雨災害の人的被害の特徴の一つと言える。



(a) 令和元年東日本台風



(b) 令和元年10月25日の大雨

図1-1 近年の豪雨災害の人的被害状況

車中死の要因としては、①アンダーパスなどの低地の水没や②河川際の道路侵食・陥没に加えて、③移動中の車が氾濫流により漂流されるものがあるが、特に③の現象は複雑で不明な点が多い。車両の漂流に関する既往研究として、これまでに室内模型実験が多く実施されている。

## (2) 既往研究の整理

氾濫流により車がどのような条件で漂流するか、に関しては、これまで多くは室内における模型実験が国内・国外で検討されている。国内における模型実験の事例としては、押川ら<sup>2)</sup>、戸田ら<sup>3)</sup>、押川ら<sup>4)</sup>が挙げられる。これらの研究は、いずれも、開水路内に模型車両を設置し、車両流失時の流況や流体力を計測したものである。合わせて、抵抗係数 $C_D$ も算定している。具体的には、押川ら<sup>2)</sup>は小型車とSUV車を対象として、それぞれ $Re4.5 \times 10^4 \sim 22.5 \times 10^4$ ,  $12.0 \times 10^4 \sim 16.0 \times 10^4$ と与えて実験した結果、流速 $2.0\text{m/s}$ を超える場合には、小型車で水深 $0.3\text{m}$ 、SUV車では $0.6\text{m}$ 弱の水深で漂流した。戸田ら<sup>3)</sup>は、①サイドブレーキの有無、②車両の向き、③下流堰の有無の条件を変化させて模型実験を行った結果、氾濫流速が $2\text{m/s}$ を超え、かつ水深が $0.5\text{m}$ を超えると、小型車が漂流状態となることが示された。また、浮力の取り扱いとして、車両内の空隙部分の扱いが難しく、これが小型模型実験の限界であることが明らかとなった。さらに、押川ら<sup>4)</sup>は、流向を考慮した室内模型実験を実施した結果、流れの横断する向きに車が向いている場合、流速 $3\text{m}$ 、水深 $25\text{cm}$ でも漂流が生じることが示された。また、室内実験ではないが、車両漂流シミュレーションの実施例もいくつかある<sup>1), 5)</sup>。遊佐ら<sup>1)</sup>は、令和元年東日本台風により発生した車中死の事例について、車中死発生時の洪水氾濫状況や車両流失条件を解明するために、旗川流域にて河川流・氾濫流シミュレーションを実施した。その結果、氾濫流は越水地点から南西方向に進み、車中死被害地点にて急激な流速・水深増加が確認された。また、同地点では、車両流失評価指標 $D-F$ が $0$ となる時刻が実際の被災データとほぼ一致した。また、車両流失危険マップを作製したところ、流失地点は限定的であり、扇状地の地形や鉄道盛土等の影響を受けた浸水深分布と概ね一致する結果となった。川中ら<sup>5)</sup>は、車周りの平面二次元浅水流解析を実施した結果、漂流タイミングについては模型実験よりも速くなつたが、これは模型の形状によっては流れの状況次第で水中に潜りこんでしまうため、揚力がダウンフォースとして作用するためであると示された。国外の論文としては、過去の様々な自動車漂流実験のレポートをレビューし比較したMartínez-Gomariz et al.<sup>6)</sup>が有名である、この中には、我が国の研究者<sup>2)~4)</sup>によって実験も含まれている。収集された模型実験の研究結果（漂流限界水深・流速の関係）を整理したが、既往研究毎に、車漂流発生時の流速・水深の関係は一致していなかった。

上記の模型実験では、流れのみならず様々な相似則を満足させることができないため、実車両を用いた実物大実験が望ましい<sup>6)</sup>。また、既存の実験では、静止している車両を対象としてタイヤを固定した形で実験を行っているが、実際の車両流失では移動中に発生しておりブレーキをかけずにタイヤが固定されていない状況の知見を蓄積することが必須である。特に、タイヤ固定の有無により大きき変化するタイヤと路面間における転がり摩擦を再検討する必要がある。これらの課題に対して、実物大実験が行われ始めている<sup>7)~9)</sup>。Kramer et al.<sup>7)</sup>は先駆的に実物大実験を実施し、1種類の車両に関するfloatingが発生する水深を特定したが、sliding instabilityは検討されていない。Smith et al.<sup>8)</sup>は、大規模水路に3種類の実車両を設置し、様々な水深条件下における車両の引張試験を行ったが、Kramer et al.<sup>7)</sup>と同じく静的条件下のfloating instabilityのみに注目していた。Al-Qadami et al.<sup>9)</sup>は、 $10 \times 12\text{m}$ の平面水槽に1種類の車両を設置し、静的条件に加えて、世界で初めて動的条件の実験を行い、実車両に作用する抗力、重力、浮力、摩擦力等を求めるなど貴重な成果を示した。ここでも浮遊限界水深を求めるなどfloating instabilityは検討されたが、sliding instabilityの発生条件の検討は行われていない。このように、実物大実験は緒に就いたばかりであり、今後、多くの実物大実験を実施してデータを蓄積すると共に、sliding instabilityの研究を進めることが大きな課題である。

## (2) 目的

このような背景を鑑みて、著者らの研究グループでは、前年度に実車両を用いた実物大洪水流実験を2023年に屋外開水路を用いて実施した<sup>10)</sup>。ここでは、車両は静的条件でブレーキ有無を設定して、洪水流中のslidingの発生条件を調べた。しかしながら、ここでは、非常に数多くのセンサやビデオカメラを設置し膨大な計測データを得たが、それらのごく一部しか検討できていないことや、車両の力学バランスの検討が不十分であり、特に転がり摩擦の検討が行われていないことが大きな課題であった。本研究では、前年度に引き続き、ブレーキの有無に着目して実車両のsliding instabilityを明らかにすることを目的とする。そのため、同じ洪水流実験のデータの再解析に加えて実車両の引張実験を行った。以下では、洪水流の実験結果をデータ解析し、車両周辺の流況や車両流失前後の車両挙動を明らかにすると共に、車両に作用する流体力や転がり摩擦抵抗係数を算出する。また、引張実験結果より、車両移動時の転がり摩擦係数を求める。両実験結果を合わせて、実車両のslidingの発生条件やそれに対するブレーキの影響を明らかにする。

## 2. 研究方法

### 2.1 洪水流実験の概要

#### (1) 水路の概要

実車両洪水流実験は、北見工業大学・オホーツク地域創生研究パークが所有・管理する屋外大規模開水路で行われた。この水路は、図2-1に示すように長さ70mであり、様々な河川流下の大規模実験で用いられている。開水路の上流側と下流側にそれぞれ2つの貯水槽を設置し、実験用の水を貯留・循環している。下流の貯水槽から上流の貯水槽に送水するために、洪水氾濫時の排水用に用いられるポンプ車（国土交通省北海道開発局北見河川事務所の協力）を2台設置した。ポンプ車1台に付き4台のポンプが備え付けられており、ポンプ車及びポンプと繋がるホースは、図2-1のように配置された。かつては上流側には一つの貯水槽しか存在しなかったが、70mを超えるホース管長の摩擦損失を少しでも減らすために、貯留槽一つを新規に設置し、ポンプ流量の増加を図った。ポンプ容量は8台合わせて最大で約1 [m<sup>3</sup>/s]である<sup>10)</sup>。

本水路の縦断勾配や横断形状、水路床・側壁性状は、実験目的に合わせてある程度自由に変えられるようになっている。本実験では車両を上流向きに設置するため、水路幅を流下方向に2.00 [m]で一定としたが、その他の項目は上流区間・テスト区間・下流区間の3つに分けて設定した。上流貯留槽1と接続する上流区間（水路上流端からの流下距離 $X = 0 - 16.0 [m]$ ）では、水路床勾配 $i_0$ を1/100とし、水路床にコンクリートブロック（高さ0.06m）を敷き詰め、側壁は鋼板（高さ1.57 m）を設置し、横断形状は矩形とした。水路床のブロックは当初より付設されたものであり、粗度として大きなブロックの付設により水深増加が期待されるため、そのまま活用した。テスト区間（ $X = 16.0 - 28.2 [m]$ ）では、車両を上流向きに設置し、車両周辺の流況を計測すると共に、流失する車両挙動も計測する。そのため、実際の道路を想定して、水路床にアスファルト舗装を施し、水路床勾配を水平（=0）とした。また、側壁は流入部と同じ鋼板（高さ0.80 m）を設置し、ここでも横断面形は矩形とした。テスト区間よりも下流区間（ $X = 28.2 - 70 [m]$ ）では、勾配1/100であり、水路床は鋼板、側面は土水路をブルーシートでカバーしている。横断形状は台形断面である。

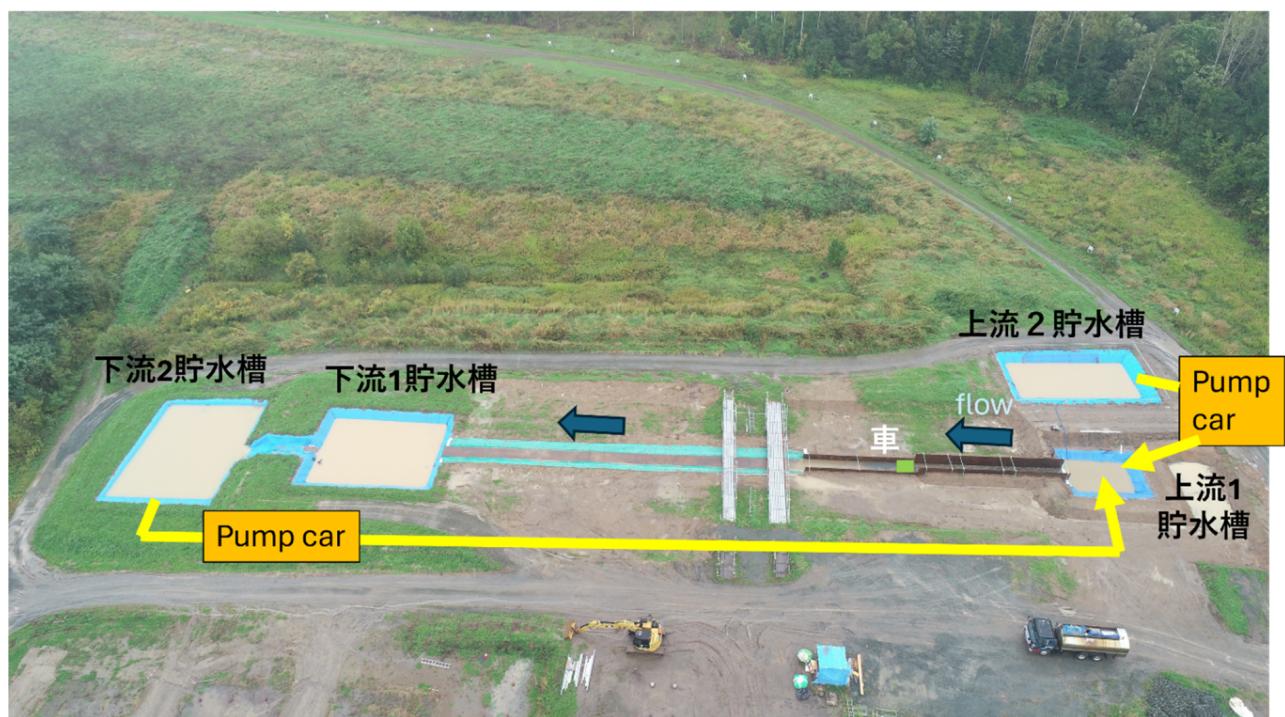


図2-1 屋外実験水路の全体図

## (2) 車両条件

実物大実験を行う上で用いた実車両は、入手可能な車両の中で最も軽量な車両としてミライースX(ダイハツ製)を用いた。この車の形状は図2-2に示すとおりであり、寸法は表2-1に示すように、全長3.395m、幅1.475m、高さ1.50m、最低地上高は0.155mである。車両重量は730kgである。本車両は、AR&R<sup>11)</sup>によると、長さ、質量より小型車両に分類される。また、既存の実物大実験で用いられた車両と比べても小さい方となる。この車両を車体前方が上流向きとなるように設置し、車両先頭がテスト区間上流端(X=16m)に来るようセットした。また、車両の設置作業には、クレーン作業車を用いて車両を釣り上げて水路内に入れ、設置位置の微調整は、ギアをニュートラルにして複数名の人が手で押して行った。この際、車両側面と側壁鋼板との距離を0.26–0.27mとなるようにした。ガソリン流出による水質汚染を防ぐためにガソリンを入れない形で実験を行った。車内には人は乗らず、ギアはドライブ、サイドブレーキの有・無で実験を行った。



図2-2 実験に用いた車両

表2-1 洪水流・引張実験で用いる実車両条件

実験	Model	質量 [kg]	長さ L[m]	幅 B[m]	高さ H[m]	最低地上高 z <sub>c</sub> [m]
洪水流	ダイハツ ミライース X	730	3.395	1.475	1.50	0.155
引張	スズキ WAGON R	750	3.395	1.475	1.65	0.15
	トヨタ Voxy	1600	4.71	1.735	1.825	0.16

### (3) 実験条件

本実験では、流量の調節度合いや車のハンドブレーキの有無を変えて3ケースを実施した。具体的な条件や実験時間を表2-2に示す。本実験は、ポンプ車を借用しているため、予備日を含めて2日間で実験を行う必要があり、実験は2023/10/19に実施した。また、各ケースの実験設定条件に加えて、最終的に車両が流失したケースも明示しており、各ケースは8分間程度実施した。各ケースでは、流量を徐々に増やし、車両流失が発生するか、もしくは発生しないことを確認するまで実施した。本実験では、Case1, 2では車のハンドブレーキを解除し、Case3ではハンドブレーキをかけて行った。各ケースでは、徐々に流量を増やすために、使用するポンプ台数Nやポンプの出力を変えており、各ポンプの出力 $P_w[\%]$ と、全8台の総出力 $P_t[\%]$  ( $= N * P_w / 8$ ) を表示している。Case 1では、ポンプ使用台数を8台中7台とし、ここでは、最初のケースであったので、各ポンプの出力 $P_w[\%]$ を50% (Case1-1)，その後に80% (Case1-2) にした結果、車は流失した。次に、車両を再セットして行ったCase2では、ポンプ使用台数Nは7台のままでし、Case1を参考に、各ポンプの出力 $P_w[\%]$ を60% (Case2-1) から5%ずつ増加させ、最終的には75%で車は流失した (Case2-4)。サイドブレーキを用いたCase3では、Case2を参考に、N=7,  $P_w=70\%$ から始めて (Case3-1), 85% (Case3-4) まで増加させ、その後、全台数 (N=8),  $P_w=85\%$ から100% (Case3-8) まで増加させた。その結果、Case 3ではいずれのケースでも車両流失は生じなかった。

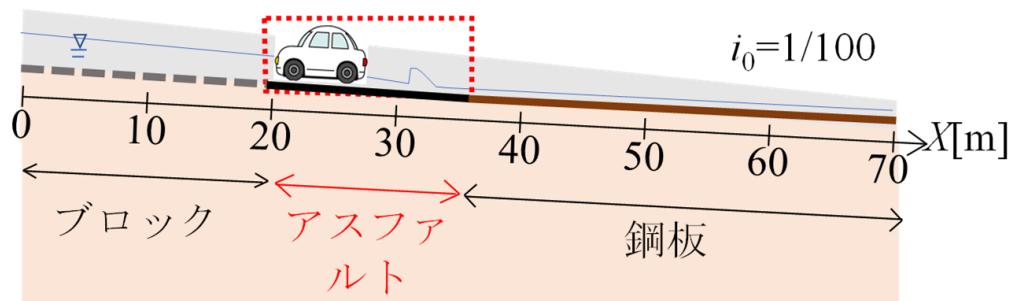
表2-2 洪水流実験の条件

Case	brake	ポンプ数N	出力 $P_w[\%]$	全出力 $P_t[\%]$	流失有無	Time(JST)
1	1	No	50	43.8		10:01:30 - 10:09:30
	2		80	70.0	✓	10:09:30 - 10:17:00
2	1	7	60	52.5		10:48:00 - 10:56:30
	2		65	56.9		10:56:30 - 11:03:40
	3		70	61.3		11:03:40 - 11:11:40
	4		75	65.6	✓	11:11:40 - 11:19:30
	1	Yes	70	61.3		11:37:30 - 11:45:00
3	2		75	65.6		11:45:00 - 11:52:30
	3		80	70.0		11:52:30 - 12:00:00
	4		85	74.4		12:00:00 - 12:08:00
	5		85	85.0		12:08:00 - 12:15:50
	6		90	90.0		12:15:50 - 12:23:15
	7		95	95.0		12:23:15 - 12:32:00
	8		100	100.0		12:32:00 - 12:39:00

#### (4) 計測項目・方法

計測項目は、水深（水位）と流速、流量、車体加速度であり、各機器の設置位置を図2-3に示す。水深・水位の縦断分布を計測するために、自記式水位計（HOBO U-20ウォーターレベルロガー、Onset社製）を水路中央部の縦断方向に10台設置した（地点名を上流からO1, O2, O3と命名）。さらに、車体回りに8台、車内に2台設置した。水位計設置においては、動圧の影響を軽減するため、塩ビパイプ内に水位計をインシュロックで固定し、パイプ開口部が水路流下方向と直交するようにおいた。流速鉛直分布の計測には、V-ADCP1台（Teledyne RD Instruments製）を車両下流側に設置した。車体下の流れも把握するため、電磁流速計3台（Compact-EM, JFEアドバンテック（株）製）を、水路床に穴を開けて埋め込み、鉛直上向きに立てて設置した。加速度計（ペンダントGロガー、Onset製）は車体加速度を計測し、車両の移動状況や速度等を測定できるため、車内前方、中央、後方3か所に設置した（図2-4）。また、上流端から11.3mの断面にて直読タイプの電磁流速計（LP-40、（株）ケネック製）を用いて流量観測も行った（図2-5）。また、ビデオカメラを計6台設置し、車両挙動を車両の上流・下流及び側面から撮影した。ビデオカメラの一部は、流速横断分布・流量観測用にも設置した。流量は複数の方法で計測したが、ここでは、直読式電磁流速計の結果を用いる。

縦断面図



平面図

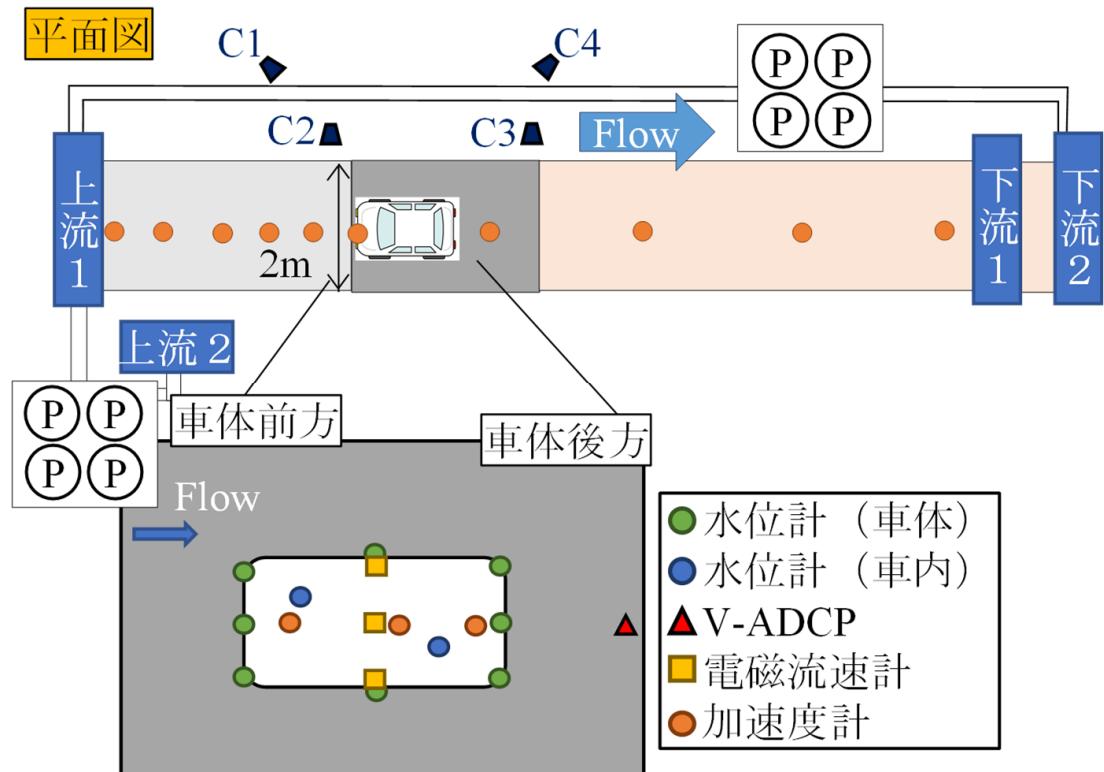


図2-3 実験水路の平面図・縦断面図



図2-4 車体内の3箇所に設置した加速度計



図2-5 電磁流速計（LP-40）による流量計測の様子

## 2.2 引張実験の概要

実車両の転がり摩擦を直接的に検討するために、実車両を用いた引張実験を行った。ここでは、図2-6に示すように、実際の道路上に実車両を設置する。この車両前面下部のフックに荷重計を付け、それをロープと繋いで人力で引っ張った。車両の引張方向は、洪水流実験と同様にfront direction ( $0^\circ$ ) とし、車の移動前から車両後方に10m移動するまで車両を引っ張る。用いる車両は表2-1に示すように、スズキ WAGON Rとトヨタ Voxyであり、前者は洪水流で用いたダイハツ ミライースXと同じ小型車両であり、後者は大型車両である<sup>11)</sup>。本来、洪水流と同じ車種を用いるべきであったが、引張実験用に準備できなかったので、上記の2車種を用いた。実験実施日は2024年10月7日である。その他の実験条件を表2-3にまとめて示す。実験を行う道路条件としては、著者らが所属する東京理科大学野田キャンパス内における2か所のアスファルト舗装道路とし、舗装時期が比較的新しいもの（2019年）と古いもの（1967年）の2か所を設定した。また、道路面の濡れ具合がタイヤの転がり摩擦に影響を与えることが想定されるため、ここでは、Smith et al.<sup>8)</sup>と同様に、アスファルト表面のdryとwet条件を設定した。実験日は晴天であったので路面は乾いており、その状況をdry条件として先に実験を実施し、その後、このdry路面上に水をまきwet条件とした。本実験は人力で実車両を引っ張るため、個人差が生じることが予想される。そのため、実験に参加する人数を5人として、個人差による不確実性を最小限となるよ

うに配慮した。このように、2種類の車両、道路条件の4つの組合せ (old/dry, new/dry, old/wet, new/wet) を設定し、各ケースに5名の実験者で実施した。

計測項目は、車両に作用する引張力と、時々刻々移動する車両位置である。引張力の計測には、荷重計 (TLP-10KNB, (株)東京測器研究所製) を用い、これをデータロガー (UCAM-550A, (株)共和電業) に繋ぎ、1s間隔の連続計測を行った。用いた荷重計は計測範囲が10kN、計測精度が10Nであり、本実験でも求められる性能は最低限満足している。また、移動する車両位置の時系列変化に関しては、 $X'=0\text{--}10\text{m}$  の範囲に1m毎に目印を設け、目視で車両通過時刻を1m毎に確認し、その結果を記録した。

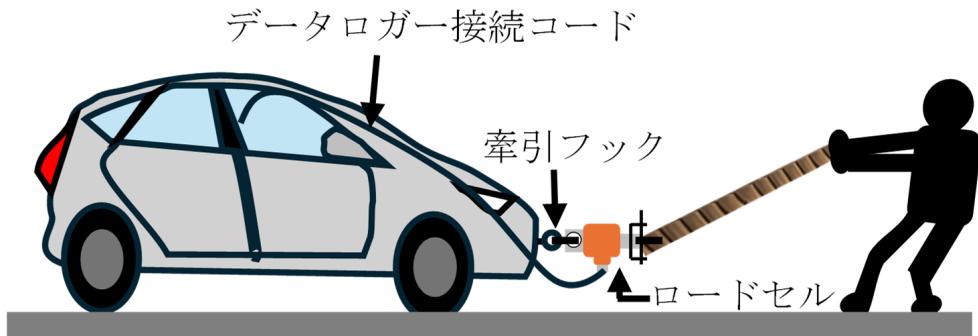


図2-6 車両引張実験の概要

表2-3 引張実験の条件

車両 数	舗装 時期	濡れ程 度	実験者数	ブレーキ
2	New	Dry	5	No
	Old	Wet		

### 3. 結果と考察

#### 3.1 洪水流実験

##### (1) 流量の推定

ポンプ出力変更直後や車両流失したケースでは、流れの定常性が保たれておらず、流量計測結果にも影響が現れている可能性がある。また、流速計を手で固定しているため、棒に大きな力が作用する大流量時には流速計測の誤差が生じる可能性がある。そのため、流量計測値の妥当性を確認するために、水深 $h$ と流量 $Q$ の $H$ - $Q$ 式を図3-1(a)に示す。ここで水深としては、車両の影響を受けない最上流地点(Stn. O1)の結果を採用する。事前に全14ケースの結果に対して $H$ - $Q$ 式を作製したところ、明らかに外れているデータ(Case1-2, 2-4, 3-7, 3-8)が見られたので、それらを除外したケースで得られた $H$ - $Q$ 式の二次関数の近似式を図示している。これより、 $H$ - $Q$ 式は概ね実験値と一致しており、本水路における本計測範囲内の $H$ - $Q$ 式として妥当であると言える。ここで除外されたケースのうち、Case1-2と2-4は、車両が流失したケースであり、これらのケースでは定常期間が流量計測時間と一致していないことが $H$ - $Q$ 式から外れた要因である。また、本実験内では大きなポンプ出力となったCase3-7, 3-8では、水深・流量共に大きく、流速計測の誤差に起因して流量の誤差が生じたものと考えられる。そのため、以下では、外れているケース(Case1-2, 2-4, 3-7, 3-8)では、 $H$ - $Q$ 式と水深計測値から各ケースの流量を算出した結果を用いる。

このようにして得られた流量とポンプ出力 $P_t$ の相関関係を図3-1(b)に示す。ここでは二次関数の近似式も図示する。これより、ポンプ出力 $P_t$ と共に流量は増加している様子が伺える。ただし、ポンプ出力 $P_t$ が90%を超えると、流量は概ね頭打ちとなっていた。これらはCase3-6以降のケースであった。この要因としては、大流量のケースでは水槽内の水が減少したことと、水路側面の止水が十分でなく水漏れが発生したことが挙げられる。

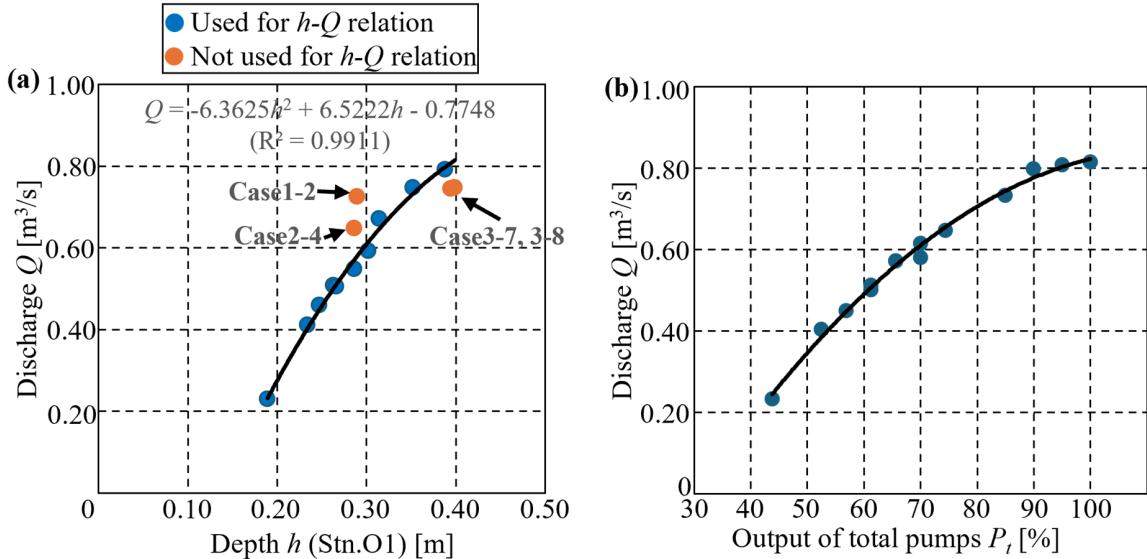


図3-1 洪水流実験における $H$ - $Q$ 式(a)とポンプ出力と流量の相関関係(b)

## (2) 水位縦断分布特性

洪水流実験時における基本的な流況を把握するため、車体周辺の水位縦断分布を図3-2に示す。ここでは、Case 2-1, 2-2, 2-3, 2-4の結果を例示する。この水位の基準面は、水路上流端の底面に設定している。図中には、限界水深 $h_c$  ( $=\sqrt[3]{q^2/g}$ ,  $q$ : 単位幅流量) と等流水深 $h_0$  ( $=\left(n^2 q^2 / i_0\right)^{3/10}$ ,  $n$ : マニングの粗度係数) も一緒に図示している。なお、等流水深 $h_0$ は水路床勾配がついている上流区間のみ示しており、この区間のマニングの粗度係数 $n$ は、実験値との整合性を考慮して、 $n=0.035[m^{-1/3}s]$ と与えた。これより、全ケースにおいて車両上流側では、 $h > h_0 > h_c$ となっており、常流でM1の水面形となっていた。車両直下では、水深が急激に減少して $h > h_c$ となり、水深の浅い射流となり、それが車体下流側まで続き、 $X=26m$ 付近で跳水が発生し、その下流では再び常流となった。この流況は、全ケースで確認された。また、車両上流側における水位の堰上げ効果は共通して見られるが、流量が大きくなるCase 2-3や2-4ではそのような傾向は明確に見られる。また、水路側面から観察したところ、車両上流端での水深は最低地上高を上回っているが、その直下の前輪のタイヤ部分では最低地上高を下回る水深となっており、その状況は車体下流側まで続いていた。

本実験では、水路幅 (=2.0m) に比べて車両幅 (=1.475m) の占める割合が74%と大きく、車体の下を潜り込む鉛直二次元流れが主となり、車体側面と水路側壁間の幅も狭いことから車体側面を回り込む三次元的な挙動は顕著ではない。そのため、本実験における水面形はゲート周辺における背水曲線と類似している。Case 2-1～2-4では限界水深 $h_c$ が最低地上高を上回っていたため、車両上流側では常流、車両直下と下流側では射流となり、結果として急変流が生じたものと考えられる。

また、本実験の範囲では、車両周辺において上流側を除いて車両側面・下流側は浸水しておらず、車体全体の浮力は生じていないものと見なせる。同様に、揚力に関しても無視して問題なく、本実験では、抗力のみが作用しているものと考えられる。さらに、車内に設置した水位計データより、実験の全期間中、車内の浸水も生じていなかった。

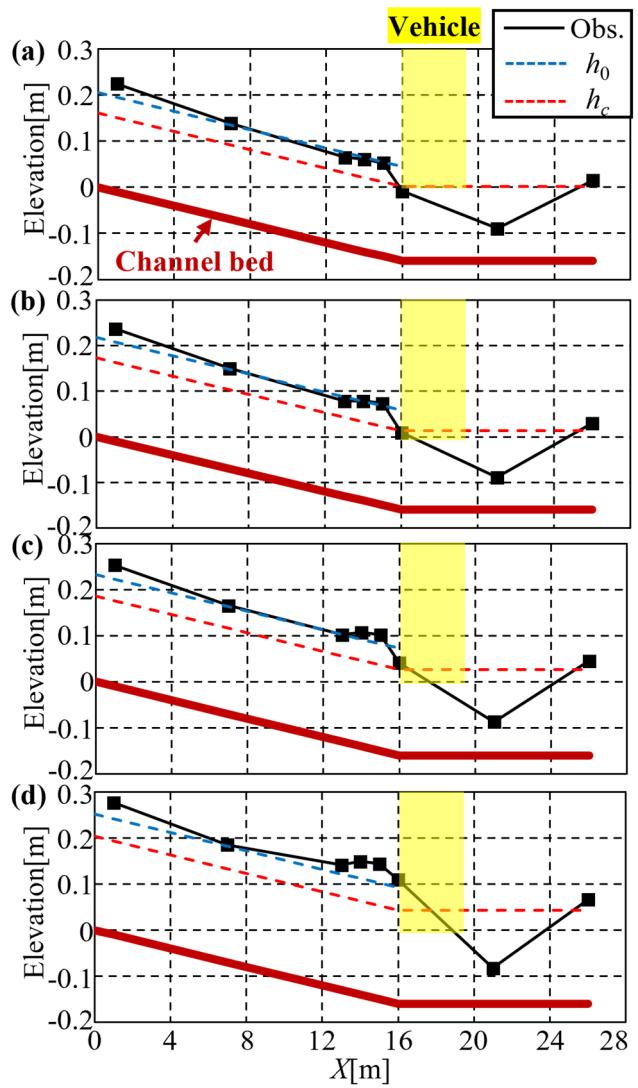


図3-2 車両周辺の水位縦断分布

### (3) 転がり摩擦係数の算出

本実験における車両のsliding stabilityをまとめるために、車両への接近流条件を整理する。そこで、前節に示した水位縦断分布を参考として、車両の堰上げの影響が小さく、等流水深に近いStn.O3の結果を選定し、全ケースにおける水深 $h$ と断面平均流速 $V$ ,  $Fr$ を図3-3に示す。ここでは、単位幅流量 $q$ と限界水深 $h_c$ も合わせて表示する。これより、単位幅流量 $q$ は $0.11\sim 0.41\text{m}^2/\text{s}$ であり、大半は $0.20\text{m}^2/\text{s}$ を超えていた。車両漂流したCase1-2と2-4における $q$ はそれぞれ $0.291$ ,  $0.287\text{ m}^2/\text{s}$ とほぼ同程度であった。また、Case3-3以降の $q$ は、Case1-2と2-4の値を上回っていた。次に、限界水深 $h_c$ は、 $0.11\sim 0.26\text{m}$ となり、Case1-1を除いたケースでは車両の最低地上高( $=0.155\text{m}$ )を超えていた。平均水深 $h$ は $0.16\sim 0.47\text{m}$ となり、全て限界水深より大きくなっていた。また、平均水深は単位幅流量 $q$ と共に増加していた。この水深を用いて得られた断面平均流速 $V$ は $0.74\sim 1.10\text{m/s}$ となっており、平均水深とは異なり流量 $q$ とは比例関係にはなっていない。これは、車両による水位の堰上げがStn.O3にも含まれているためである。平均水深と断面平均流速から求められる $Fr$ は $0.41\sim 0.76$ となっており、車両上流側は常流となっていた。Case1-2, 2-4における平均水深(断面平均流速)はそれぞれ $0.289\text{m}$  ( $1.10\text{m/s}$ ),  $0.294\text{m}$  ( $1.06\text{m/s}$ )であった。

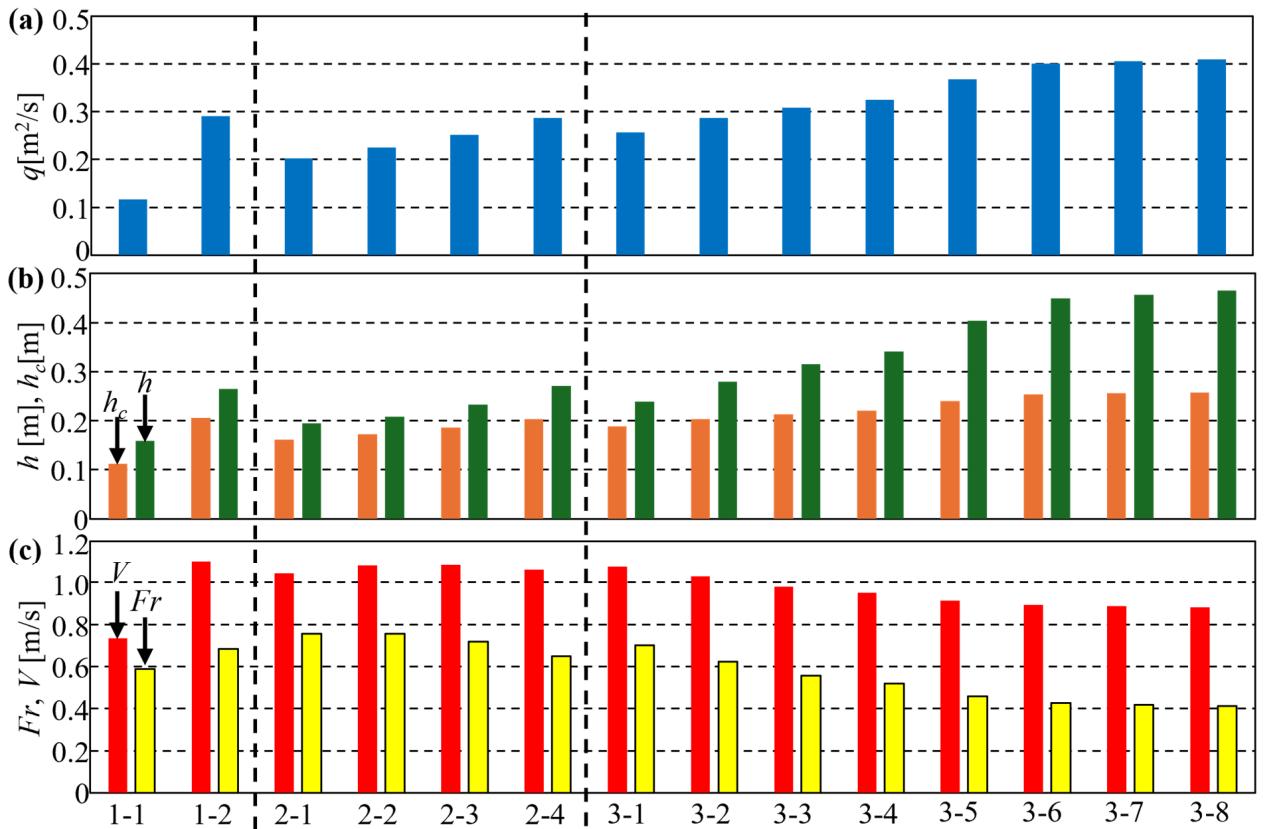


図3-3 単位幅流量  $q$  (a), 水深  $h$  と 限界水深  $h_c$  (b), 断面平均流速  $V$  と  $Fr$  (c)

これらの結果に基づいて、ブレーキ無のCase1, 2では転がり摩擦係数やブレーキ有のCase3では静止摩擦係数をそれぞれ算出した。ここでは、力のつり合いより、流失したケースとしていないケースに分けて、次式より転がり摩擦係数や静止摩擦係数を求めた。

$$\mu > \frac{\rho A_w C_D \frac{V^2}{2}}{Mg} \quad \text{or} \quad \mu \leq \frac{\rho A_w C_D \frac{V^2}{2}}{Mg} \quad \text{流失無or有} \quad (1)$$

ここで、本実験の水位縦断形より、車両に作用する揚力や浮力を無視している。図3-4は得られた転がり摩擦係数 $\mu_R$ や静止摩擦係数 $\mu_s$ を示す。これより、車両が漂流したCase1-2, 2-4における転がり摩擦係数はそれぞれ0.0250と0.0242となった。これらの値は他のCase1, 2における $\mu_R$ を上回り、洪水流実験における整合した結果が得られた。一方、ブレーキ有のCase3では車両漂流が発生しなかつたため、得られた静止摩擦係数の結果としては、少なくとも $\mu_s > 0.038$ となった。一般的には、静止摩擦係数は0.30<sup>[2)</sup>と報告されており、本実験ではこれらの値よりも1オーダー小さかったため、ブレーキ有では車両漂流が発生しなかつたものと考えられる。

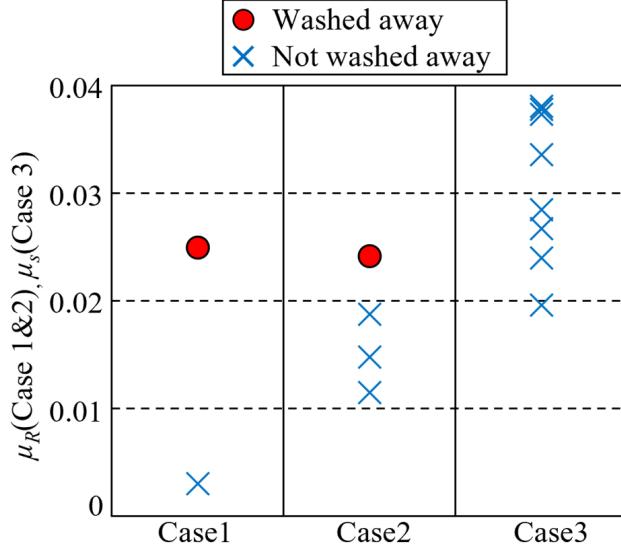


図3-4 転がり摩擦係数 $\mu_R$ (Case1, 2)と静止摩擦係数 $\mu_s$ (Case 3)

#### (4) 洪水流中の車両挙動

洪水流を受けている車両挙動に明らかにするために、流失前後における車両の振動特性に注目して、車両の加速度変動強度 $a_{RMS}$ の時系列変化を図3-5に示す。この加速度変動強度 $a_{RMS}$ として、洪水流実験開始前からの加速度の変化量( $\Delta a_x$ ,  $\Delta a_y$ ,  $\Delta a_z$ )のRMS値を求めた。図中では、3か所の加速度計データ(図2-4)を平均した生データと1分間の移動平均値を表示している。なお、ここでは、Case 2を例として、各ケースの区切り時間と車両流失時間も図示している。これより、加速度変動強度 $a_{RMS}$ は、ポンプ出力の増加と共に大きくなっている。特に、車両流失前後でも非常に大きくなっている。洪水流により車両は明瞭に振動していることが明らかとなった。この様子はビデオ動画からも確認されており、連続的な振動というよりも、間欠的に揺れている様子が確認された。車両の振動としては、風による空気力学的な振動は電車を中心に多く研究されているものの、洪水流由来の自動車の振動については過去に研究事例が無く、実車両実験ならではの発見と言える。ブレーキを掛けない車両に関しては、漂流前に大きく振動し、少しづつ流れの方向に流され、その後、大きく流下させられる、という流失モードが新しく発見された。

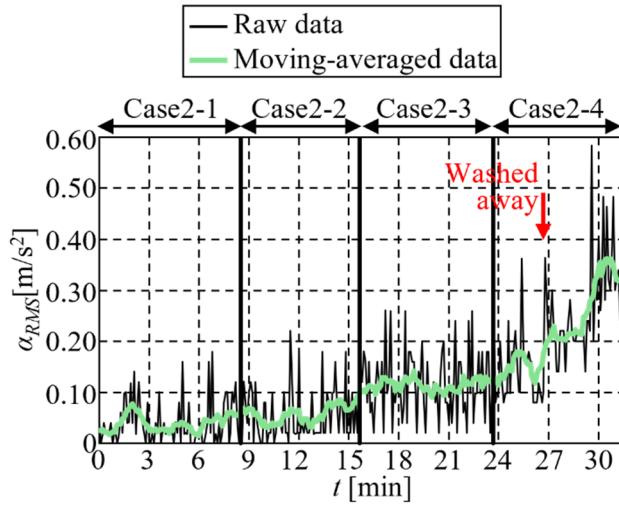


図3-5 Case 2における加速度変動強度 $\alpha_{RMS}$ の時間変化

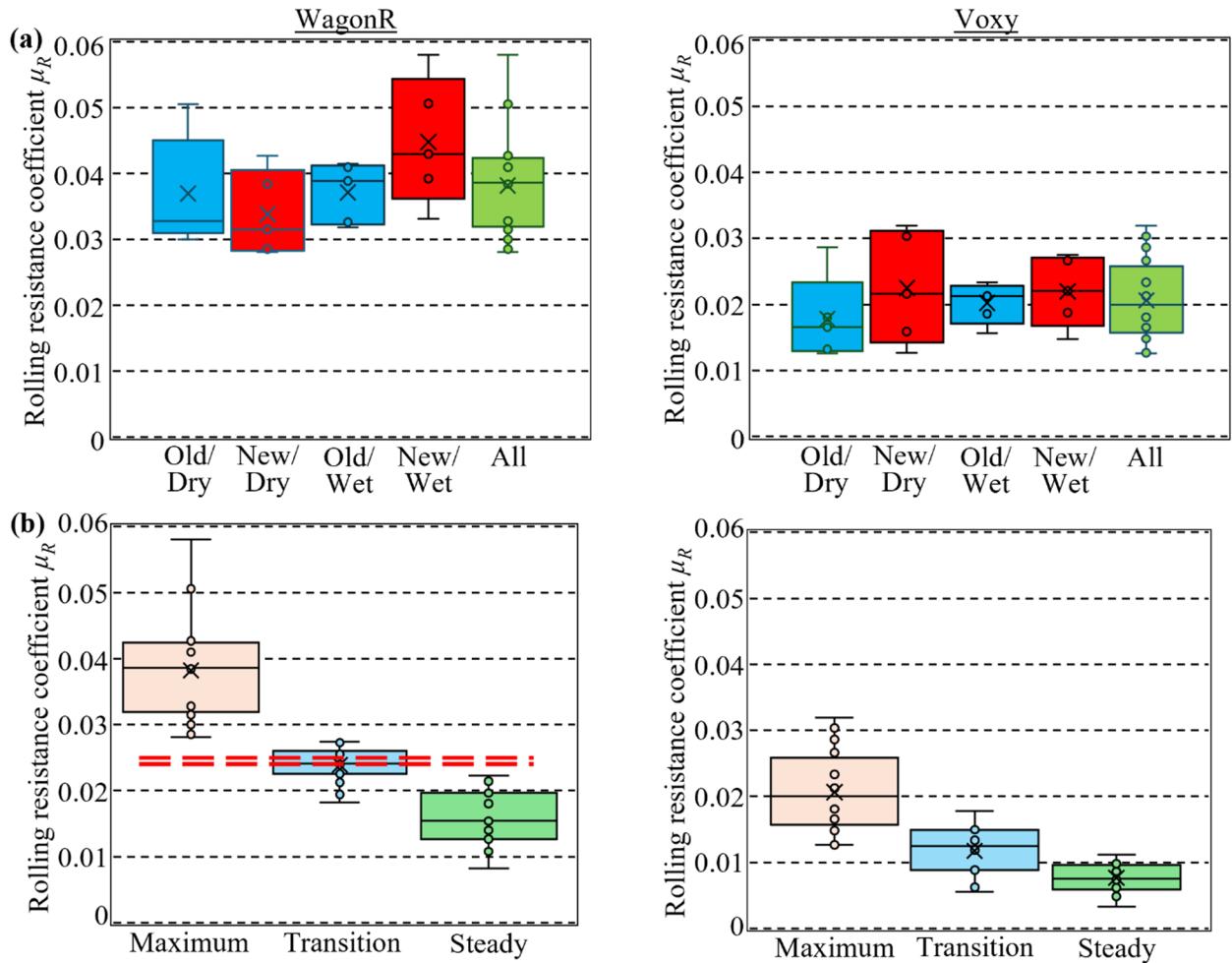


図3-6 引張実験による転がり摩擦係数 $\mu_R$ の箱ひげ図 (WagonR and Voxy). 赤点線は洪水流実験結果 (Case1-2, 2-4) を示す.

### 3.2 引張実験結果

引張実験により得られた転がり摩擦係数 $\mu_R$ の結果を取りまとめたものを図3-6に示す. ここでは, 上述した引張力のばらつきを考慮するために, 2つの車種毎に路面条件 (old/newとdry/wet) の組合せか

らなる4ケース及び全データの $\mu_R$ に関する箱ひげ図を図示している。各box中には、5名の実験協力者の結果を示している。これより、まず、各車種の全データに関する $\mu_R$ の平均値±標準偏差は、WagonRとVoxyにおいて、それぞれ $0.0382 \pm 0.0081$ ,  $0.0206 \pm 0.0060$ となっており、全体としてWagonRの $\mu_R$ が大きい傾向であった。各車種に対する全データの差異があるかについてt検定を行った結果、両者には統計的な有意差が見られた ( $p < 0.01$ )。また、路面条件の影響を調べたところ、まず、WagonRに関しては、old/dry, new/dry, old/wet, new/wetのケースにて、 $0.0370 \pm 0.0084$ ,  $0.0338 \pm 0.0065$ ,  $0.0372 \pm 0.0046$ ,  $0.0448 \pm 0.0097$ となった。ケース間で統計的な有意差はなかった ( $p > 0.05$ )。Voxyについては、old/dry, new/dry, old/wet, new/wetのケースにおいて、各々 $0.0178 \pm 0.0064$ ,  $0.0225 \pm 0.0085$ ,  $0.0202 \pm 0.0031$ ,  $0.0220 \pm 0.0054$ であった。これらの車種でも、ケース間の統計的有意差は見られなかった ( $p > 0.05$ )。このように、本実験の範囲で路面条件が転がり摩擦係数に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

次に、転がり摩擦係数 $\mu_R$ の時間変化があったことを参考に、 $\mu_R$ の最大値、遷移区間、定常時における箱ひげ図を図3-6(b)に示す。ここで、 $\mu_R$ の最大値は $t=0$ 、定常時は $t=4s$ 以降の平均値とし、遷移区間はその間の $t=1\text{--}3s$ の平均値としている ( $t$ : 移動開始からの時間)。また、図中には、洪水流により得られた車両流失時 (Case1-2と2-4) における $\mu_R$ の結果も車種が近いWagonRの図にのみ表示している。これより、両車種ともに、 $\mu_R$ の大小関係は、最大値>遷移区間>定常時となっている。また、定常時の $\mu_R$ は、最大値の約4割であった。洪水流実験の $\mu_R$ は、最大値と定常値の間にあり、概ね遷移区間の範疇に入っていた。

### 3.3 滑り限界評価

上記の実験結果に基づいて、slidingに関する限界基準を表す水深 $h$ と流量 $V$ の関係図を図3-7に示す。ここでは、洪水流実験で用いられたミライースXを対象として、抗力 $F_D$ と摩擦抵抗力 $F_R$ が等しいとして得られる水深 $h$ と流量 $V$ の関係式を図化している。また、ブレーキ無では転がり摩擦係数 (=0.0242)、ブレーキ有では静止摩擦係数として一般的な0.30を与えていた。既存の限界条件として、Shand et al.<sup>11)</sup>により提案されたAR&R基準のうち小型車両の結果を図示している。さらに、洪水流実験のCase1と2の実験結果で得られた $h$ と $V$ も表示している。これより、まず、Case1と2の実験結果に関しては、流失しなかったケースではブレーキ無の結果は限界基準を下回り、流失したCase1-2と2-4のみ限界基準を上回っている。また、ブレーキの有無では、滑り限界条件が大きく変化しており、ブレーキ無の方がより小さい流速で限界基準となっていることが分かる。具体的には、水深0.30mでは、ハンドブレーキ無・有では、滑り限界時の流速は0.97, 3.42m/s、水深0.40mではそれぞれ0.78, 2.74m/sとなっている。このように、同一水深時の流速の基準は、ハンドブレーキ無では有と比べて約0.3倍となっていた。さらに、AR&Rの基準はブレーキ無の限界基準と概ね一致している。このことから、ブレーキをかけていないとタイヤと路面の摩擦力を大幅に減少させ、移動中に洪水氾濫流に流される危険性が非常に高いことが分かる。

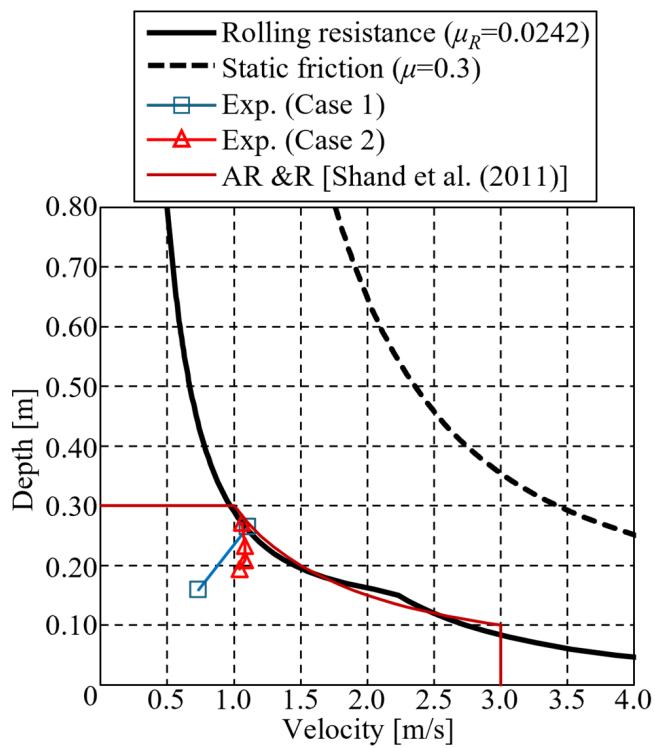


図3-7 ブレーキ有無によるsliding限界基準（ミライースX）

## 4. 結論

本研究では、実車両を用いた洪水流・引張実験を行い、動的条件に着目して、ハンドブレーキの有無が限界基準に及ぼす影響を明らかにした。そこで得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 洪水流実験において実物車両にfront directionから洪水流を当てた所、ブレーキ無のケースでは車両は2回流失したが、ブレーキ有のケースでは流失しなかった。この流失したときの流速・水深は概ね同条件であり、得られた転がり摩擦係数 $\mu_R$ もほぼ同じ値となった。これらの転がり摩擦係数 $\mu_R$ は、ブレーキをかけたときの静止摩擦係数よりも1オーダー小さく、ブレーキを掛けないと、かけた場合と比べて同一水深でもより小さな流速条件で流失することが定量的に明らかとなった。
- 2) 実車両の引張実験を行って転がり摩擦係数 $\mu_R$ の特性を調べた所、転がり摩擦係数 $\mu_R$ は車両の移動開始初期に最大となり、遷移区間を経て、定常値となった。 $\mu_R$ の定常値は初期の最大値の約40%程度であった。この結果を洪水流実験の結果を比べたところ、流失時の転がり摩擦係数 $\mu_R$ は、同じ小型車両のWagonRにおける遷移区間の $\mu_R$ の範囲に入ることが明らかとなった。
- 3) 洪水流実験より、車両は洪水流により振動しており、流量と共に振動が増加した。また、流失直前には、車両は徐々に下流側に移動し、その後、流失したことが明らかとなった。
- 4) 以上より、車両運転中に洪水流に出くわした場合は、タイヤをロックするために、ハンドブレーキをかけることでslidingを防ぐ効果が期待できる。ただし、洪水氾濫が今後進行することが見込まれる場合には水位上昇が予想され、結果として車両はslidingしなくともfloatingする可能性が高いことに留意する必要がある。もしくは、floatingする前に、水位が上がると浮力が増加するため、結果として洪水流への抵抗力が減少して、slidingが発生する可能性があることも注意すべきである。これらの科学的な知見は大変貴重であり、今後の洪水氾濫時における車両流失被害の軽減に大きく貢献できると期待できる。

## 謝辞

本研究における実験では、北見工業大学が管理するオホツク地域創生パーク内の屋外開水路をお借りした。また、屋外開水路の実験時において通水を行うためのポンプ車を、国土交通省北海道開発局北見河川事務所にお借りした。開水路の整備および実験の遂行には、美幌貨物自動車株式会社の宇野保氏にご尽力頂いた。東京理科大学創域理工学部社会基盤工学科水理研究室学生には、実験準備・実施やデータ解析等にご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 遊佐望海, 槍澤菜々子, 太田皓陽, 伊藤毅彦, 尾形勇紀, 小野村史穂, 二瓶泰雄：平面二次元氾濫解析に基づく車中死発生時の洪水氾濫・車両流失状況の検討, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.77, No.2, pp.I\_1441-I\_1446, 2021.
- 2) 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, Vol.17, pp.461-466, 2011.
- 3) 戸田圭一, 石垣泰輔, 尾崎平, 高垣裕彦, 西田知洋：氾濫時の車の漂流に関する模型実験, 京都大学防災研究所年報, Vol.55, B, pp.493-499, 2012.
- 4) 押川英夫, 大島崇史, 橋本彰博, 大串浩一郎, 小松利光：流向を考慮した洪水氾濫時の自動車走行の危険性に関する研究, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.74, No.4, pp.I\_1519-I\_1524, 2018.
- 5) 川中龍児, 米山望, 石垣泰輔：水災害時の車両漂流シミュレーションに関する研究, 土木学会論文集A2（応用力学）, Vol.72, No.2, pp.I\_557-I\_564, 2016.
- 6) Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2018). Stability criteria for flooded vehicles: a state-of-the-art review. Journal of Flood Risk Management, 11, S817-S826. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12381>

- 7) Kramer M, Terheiden K, Wieprecht S (2016) Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings. *Int J Disaster Risk Reduct* 17:77–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.04.003>.
- 8) Smith, G. P., Modra, B. D., & Felder, S. (2019). Full - scale testing of stability curves for vehicles in flood waters. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S2), e12527
- 9) Al-Qadami, E. H. H., Mustaffa, Z., Shah, S. M. H., Matínez-Gomariz, E., & Yusof, K. W. (2022). Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions. *Natural hazards*, 1–24.
- 10) Kawajiri, S., Hikichi, S., Kondo, K., Kagamihara, S., Abe, Y., & Koizumi, K. (2023). Observation of pier inclination caused by scouring phenomenon of foundation ground using a large-scale open channel and development of its monitoring system. *International Journal of Civil Engineering*, 21(9), 1477–1493.
- 11) Shand T.D., Cox R.J., Blacka M.J. & Smith G.P. Australian rainfall and runoff (AR&R). Revision project 10: appropriate safety criteria for vehicles. Report Number: P10/S2/020, 2011.
- 12) Keller R.J. & Mitsch B. Safety aspects of the design of roadways as floodways. Research Report No. 69. Urban Water Research Association of Australia, 1993, 41.