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		瓶	泰	雄
東京理科大学	創域理工学部	社会基盤工学科	小野	予村	史	穂
東京理科大学	創域理工学部	社会基盤工学科	柏	田		仁
九州工業大学大	、学院 工学研究	究院 建設社会工学研究系	Ш	尻	峻	Ξ
北見工業大学	工学部 地域未	未デザイン工学科	吉][[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¹・小野村史穂²・柏田 仁³・川尻 峻三⁴・吉川 泰弘⁵ Yasuo NIHEI, Shiho ONOMURA, Jin KASHIWADA, Shunzo KAWAJIRI and Yasuhiro YOSHIKAWA

'博(工)	東京理科大学	創域理工学部	社会基盤工学科	教授
²博 (理)	東京理科大学	創域理工学部	社会基盤工学科	嘱託特別講師
³博(工)	東京理科大学	創域理工学部	社会基盤工学科	助教
⁴博(工)	九州工業大学ナ	、学院 工学研究	咒院 建設社会工学	全研究系 准教授
5博(工)	北見工業大学	工学部 地域未	ミ来デザイン工学科	4 准教授

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. 2022年度の模型実験,数値解析,過去の実車両実験データの解析結果に続 き、2023年度は、実車両を実験で漂流させられるよう実験方法を見直し、車両 は小型のものを選定し、車体への流体力を増加させるため、水路幅を狭め、上 流水槽を追加設置した. その結果,一定の条件下で車両漂流を再現することに 成功した.具体的には、ハンドブレーキをかけていない条件では車両が漂流し たが、ハンドブレーキをかけているときは車が漂流せず、ハンドブレーキの有 無が車漂流発生の有無に大きな影響を与えていることが示された.漂流発生時 の流速は0.858m/s,水深は0.296mであり、既往の模型実験結果よりもやや小さ めの値となった.この要因を検討するために、車両タイヤと路面間の摩擦係数 を求めたところ0.024~0.042と一般的な値よりも1オーダー小さい結果となっ た. これにはハンドブレーキ無しの状況が大きく関与していることが示唆され た.

《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807km²,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¹⁰.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.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.



-22 -

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 で国内・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²、戸田ら³、押川ら⁴ 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cpも算定している.具体的には、押川ら²⁾は小型車とSUV 車を対象として、それぞれRe4.5×10⁴~22.5×10⁴、12.0×10⁴~16.0×10⁴と与えて実験した結果、流速 2.0m/sを超える場合には、小型車で水深0.3m、SUV車では0.6m弱の水深で漂流した. 戸田ら³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2m/sを超え、かつ水深が0.5m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"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3m,水深25cm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^{1)、5)}. 遊佐ら¹⁾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⁵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 実験よりも速くなったが、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.⁰が有名である、この中には、我が 国の研究者²⁾⁻⁴⁾による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.

上記のように模型実験のみでは、相似則の問題や実際の複雑な車の形状・重量分布の再現性に課題が あるため、模型実験結果が実車両の漂流判定や車両周辺の流況をどこまで再現できているか不明である. それゆえ、実物の車両を用いた氾濫流に対する漂流条件の検討が強く望まれている.

本研究室の田島⁷は、国内で初めて2021年度に屋外水路を用いて実車両の漂流実験(以後,前回実験 と呼ぶ)を実施したが、車両は漂流せずに実験を終えた.本研究では、同じ屋外水路を用いて、田島⁷⁷ の水理条件・車両条件を検討し直し、車両の漂流を再現できるよう工夫を施す.

(2) 目的

本研究では、車中死の中でも車移動中の洪水氾濫流による車両漂流に着目し、実物の車両を用いた洪 水氾濫流中の車両漂流実験・数値解析を実施し、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.本研究の核となる実車両実験は、北見工業大学・オホーツク地域創生研究パークの屋外開水路を使 用し、上記で述べたように田島"の実験を踏まえて、車両漂流を再現する.

本研究では、①模型実験、②数値解析、③実車両実験を3年間にわたり実施する.研究体制と本研究の全体像は図1-2に示すとおりであり、各年度の予定を表1-1に示す.2022年度は、田島"の実験データ

解析を含めつつ,①模型実験と②数値解析に取り組み,その成果を報告した.それらの結果を踏まえ, 2023年度は計画通り,③実車両を用いた車両漂流実験を実施した.ここでは,その結果を報告する.



図1-2 本研究の全体像

表1-1 各年度の研究予定

	1年目	2年目	3年目
①模型実験	基礎的検討	同左	不足データの取得
②数值解析	予備計算	実験の精度検証	漂流実験実施・解析,漂流
③実車両実験	水路整備	漂流実験実施	条件の取りまとめ

2. 実車両実験の方法

(1) 前回実験からの改善点

2021年度の田島"の実車両漂流実験では、車両を漂流させることができなかったため、2023年度の実 験では、車両、水路、実験条件を見直し、工夫を施した.車両の漂流は、車両に作用する流体力と、車 両と底面の間の摩擦力のバランスで決まる.このため、本実験では、摩擦力減少のための車両軽量化と 流体力増加のための流速と水深の積である単位幅流量の増加、の2点について検討した.

まず、車両としては、前回実験では、コルト(三菱、全長3.9[m]×幅1.68[m]、質量1010[kg])を用 いたが、本実験では、入手可能な中で最も軽かった車両名ミライースエックス(ダイハツ、全長 3.95[m]×幅1.475[m]、質量730[kg])を用いた(図2-1).質量はおよそ3/4となっている.



図2-1 実験に用いた車両

単位幅流量の増加については、借用可能なポンプ台数・容量は前回実験と同じであることを前提に考 える必要があった.借用するポンプ車は2台で、各ポンプ車に4台のポンプ、合計8台のポンプを使用で きる.検討の結果、前回実験では車の向きを流れに対して横向きとして水路幅を広げたが、今回の実験 では流れと平行かつ上流向きに設置し(図2-1)、水路幅を5.0m(前回)から2.0m(本実験)に縮小した. また、前回実験では、上流側の水槽1つ(図2-2中の上流1)に対して、最下流の水槽(図2-2中の下流2) から2台のポンプ車(各4台のポンプを搭載)で水を汲み上げ、水路に水を流していた.一方、今回の実 験では、上流側の水槽を1つ増設し(図2-2中の上流2)、下流水槽から上流水槽に繋いでいた2台のポン プ車のうち1台を上流側の2つの水槽に接続した.このようにポンプ車を配置することにより、同じポン プ性能でも、ホース管長を減らし損失水頭を大幅に減少させることが期待でき、結果としてポンプ流量 の増加を期待した(図2-2).





図2-2 屋外実験水路(上:全体図,下:上流側のみの拡大図)

(2) 実験水路の詳細

本実験では、北見工業大学・オホーツク地域創生研究パークの屋外開水路を用いた. 図2-3の断面図 に示す通り、長さ70mであり、本実験用に幅2.00m、水路壁の高さ0.60m、勾配1/100の開水路を整備した. 実際に整備した水路の様子は、図2-4に示す. 底面状況として、上流区間20mではブロック(高さ 0.06m、粗度係数0.0261[m^{-1/3}s])、車両を設置する中流区間15mはアスファルト、下流区間35mは鋼板で ある. 縦断面図





図2-3 実験水路の平面図・縦断面図



(a) 手前が貯水槽上流1, 奥側が増設した貯水槽上流2



(b) 水路中間地点から上流側の様子



(c)水路中間地点から下流側の様子 図2-4 実際に整備した水路状況

(3) 実験条件

図2-3の縦断面図に示すように、車両は、上流から20mのアスファルト区間に上流向きに設置した. 実験は、合計3ケースを実施し、各ケースでポンプの出力を段階的に上げていった.実験時のポンプ稼 働状況(稼働台数と出力)は、表2-1に示す通りである.ポンプ出力は、Case1-1、1-2では各々50、80%、 Case2-1、2-2、2-3、2-4では60、65、70、75%である.Case3-1から3-8までは、ポンプ7台で70、75、 80、85%まで出力を増やし、その後、ポンプ8台に増やして85、90、95、100%と増加させた.また、 Case1、2では、車のハンドブレーキ(サイドブレーキともいう)を解除した状態で実験を行い、Case3 では、ハンドブレーキをかけて行った.

Case	ハンド ブレ ーキ	計測 時間	稼働 ポンプ 台数	ポンプ 出力[%]
1-1, 1-2	無	$ \begin{array}{r} 10:01:30 \\ \sim 10:17:00 \end{array} $	7	50~80
2-1~2-4	無	10:48:00 ~11:19:30	7	60~75
3-1~3-8	有	$ \begin{array}{r} 11:37:00 \\ \sim 12:39:00 \end{array} $	7~8	70~100

表2-1 実験条件

(4) 計測項目・方法

計測項目は、表2-2に示すように、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11台設置した(図2-3 平面図 橙色丸点+車体下 1点).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(図2-5).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(図2-6).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(図2-3 平面図 橙色四角点、図 2-7).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2-8).また、上流端から15m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2-9).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.観測時の機器の測定間隔は表2-2に示す通りである.

機器	製品名	会社名	台数	設定 時間[s]
水位計	U-20	Onset社	21	5
超音波 流速計	V-ADCP	Teledyne RD Instrument社	1	10
電磁 流速計	Compact -EM	JFEアドバ ンテック(株)	3	1
加速度 計	ペン ダント Gロガー	Onset社	3	6
ビデオ カメラ	Pana sonic他	Panasonic他	6	

表2-2 用いた測器と設定条件



図2-5 水位計設置の様子(赤枠)



図2-6 V-ADCP設置の様子(赤枠)



図2-7 電磁流速計Compact-EM設置の様子(実験中は車体下となる)



図2-8 車体前方ダッシュボード上に設置した加速度計



図2-9 電磁流速計(LP-40)による流量計測の様子

3. 実験結果と考察

(1) 車漂流発生状況

図3-1に、漂流実験の様子を示す.本実験で実施した3ケースのうち、ハンドブレーキを解除した Case1-2, 2-4において車が漂流した. Case1-1や2-1~2-3のポンプ出力では漂流しなかったため、これ らの結果より、漂流発生前と後の水理条件が得られたことになる.また、ハンドブレーキをかけた Case3では、ポンプの出力を最大にしても、車は全く動かなかった.これより、本実験における水理条 件下では、ハンドブレーキ有では車の漂流は発生しておらず、ハンドブレーキの有無が車漂流に重要な 影響を与えていることが示唆された.



図3-1 実験時の流れの様子

(2) 実験時の基本的な流況

次に、実験時の流況や車漂流時の基本的な状況を把握するために、Case1とCase2における車体周辺の 水位縦断分布を図3-2に示す.ここでの水位の基準面は、水路床下流端の底面としている.また、Case1 では1-1、1-2の結果、Case2では図化の関係上2-3,2-4の結果のみを表示する.図中には、Case1-2、2-4 の限界水深も図示している.これより、いずれのケースでも、車体上流側では水位・水深が高く常流と なり、車体直下で浅い水深で射流となり、それが車体下流側まで続き、X=25m付近で跳水が発生し、そ の下流では常流となっている.車体上流側の水位上昇は、車による堰上げ効果である.一方、車体上流 側から側面にかけて急激な水位低下が生じ、これは元々の水路幅に対して車体幅が多くを占めていたた め、車体幅により見かけ上の水路幅が減少したことに伴う急変流が発生したものと考えられる.図3-3 に示すように、車体上流から下流にかけての急な流れの変化は目視でも確認された.このような流況を 踏まえると、車体に浮力が作用していたとは考え難い.



(b) Case 2 図3-2 車両周辺の水位縦断分布



(a) 車体上流側(常流)の様子



(b) 車体と水路側壁間(急変流)の様子



(c)車体下流側(射流)の様子 図3-3車体上流側から下流にかけての流況

Case1,2における流量と単位幅流量,流速,水深をまとめた結果を図3-4に示す.ここでは,各ケースにおける時間平均値を図示している.これより,Case1-1よりCase1-2の方が,全項目共に増加しており,同様な傾向は,Case2-1,2-2,2-3,2-4でも確認されており,これはポンプ出力の増加と対応している.特に車両漂流時の流況としては,Case1-2では単位幅流量0.336*m²/s,流速1.119*m/s,水深0.301m,Case2-4では単位幅流量0.254*m²/s,流速0.858*m/s,水深0.296mとなっている.漂流時の単位幅流量などはCase1-2よりもCase2-4の方がやや小さい.これはポンプ出力自体の違いに加えて,Case1-1から1-2ではポンプ出力を50%から80%に大きく増加させたが,Case2ではポンプ出力を5%ずつ上げており,Case1ではポンプ出力の上げ幅が大きいために,車両漂流時の水理条件の推定が粗くなっていると考えられる.



(3) 漂流開始後の車両漂流速度

Case1-2とCase2-4において、車両が漂流を開始したときの車両漂流速度と流下距離の関係を図3-5に 示す. Case1-2では、水路に沿って平行移動するように下流側へ約8m流された後、設置していたポール に衝突して停止した. 停止直前の車両漂流速度は0.49m/sである. Case2-4では、6m程度下流側に流さ れた後に、側壁に接触しながら停止したため、側壁に接触するまでの結果を示しており、停止直前の漂 流速度は0.42m/sであった. どちらのケースにおいても、漂流開始した後の車の速度は距離と共に増加 し、加速しながら流されていることが分かる. Case1-2とCase2-4の水路内の平均流速は、それぞれ 1.12m/s、0.86m/sであったことを踏まえると、この実験で計測された車両漂流速度は最大で水流の44~ 49%であった. 戸田ら³は車がいったん漂流し出すと漂流速度が流れ場の平均流速の60~70%程度にな ると示している. 本実験では、車の漂流区間が短かったため、漂流速度の増加途中で計測が終了したこ とが、若干小さくなった要因と考えられる.





(4) 漂流条件の検討

車漂流条件を検討するために, Martínez-Gomariz et al.⁶のとりまとめと同様に, 模型実験結果で一般 に整理されている漂流発生時の水位と流速の関係図に,本研究の実験結果をプロットしたものを図3-6 に示す.ここでは, Casel, 206ケースの結果と共に, 押川ら²⁾の漂流条件の結果も図示する.これより, 本実験では,車両が漂流しなかったケースより漂流したケースの方が,既往研究の漂流条件に近づいて いるが,既往研究よりはやや小さめの流速と水深で車両の漂流が開始している.これは模型実験と実物 車両実験の差や考慮している水流の迎角の違いを反映しているものと考えられるが,実際の車両が漂流 する水理条件の下限値を把握する重要な結果を得たといえる.



図3-6 車両の危険度判別流速-水深図

そこで,漂流時の流体力と摩擦力を力のバランスを評価する.流体力(抗力)は一般に次式で表される.

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A U^2 \tag{1}$$

ここで、 ρ :水の密度、 C_D :抗力係数 (=2.0)、A:投影面積、U:接近流速であり、実験結果を代入すると、流出時の抗力は、Case1-2では298.5N、Case2-4では171.1Nであった.次に、摩擦力は以下に記すとおりである.

$$F_W = \mu M g \tag{2}$$

ここで、µは摩擦係数、Mは車体質量(=730kg)である.車漂流開始時に、摩擦力と流体力が釣り合っていたとすると、ハンドブレーキ無における静止摩擦係数はCase1-2では0.042、Case2-4では0.024となった.一般的に使われている摩擦係数は0.3であるので⁸⁰、本実験結果は約1/10の摩擦係数となった.これはハンドブレーキをかけていないため、摩擦係数も小さくなったと考えられる.このような実際の 摩擦係数を算出できたのも実物車両を用いたためであり、漂流発生条件算定における実物大実験の重要性が示唆された.

4. 結論

2年目(2023年度)は、1年目(2022年度)までの研究成果を踏まえて、実物車両を用いた漂流実験の 実験方法を検討し直し、実験車両の小型化、実験水路幅の減少、上流側への水槽の増設、ポンプ車の移 動等の工夫を施した結果、一定の条件下が車両の漂流を再現することに成功した.既往研究の多くが模 型実験に基づく中で、実物車両を用いた漂流実験は、国内外で前例がなく、洪水氾濫時の車両漂流リス クを把握する上で、貴重なデータを取得することができた.本実験から得られた主要な結果を以下に 示す.

- (1) ハンドブレーキを解除した車両を上流向きに設置した2つの実験ケースで,車両が漂流した.一方, ハンドブレーキをかけた実験ケースでは,水路のポンプ出力を最大にしても車が漂流せず,ハン ドブレーキの有無が,車漂流発生に大きな影響を与えていることが示唆された.
- (2) 車両の漂流が発生した時の流速と水深の関係は、2つのケースで1.12m/sと0.301m、0.858m/sと 0.296mとなっており、既往研究の模型実験により報告されている結果よりもやや小さめの値で漂 流していることが分かった.
- (3) 模型実験と本実験との差としては、考慮している水流の迎角による違いによる影響も考えられるが、 模型実験と実車両実験の差を反映している可能性もある.本研究から車両タイヤと路面間の静止摩 擦係数を求めたところ、0.024~0.042と一般的な値よりも1オーダー小さい結果となった.

参考文献

- ・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/ jfr3.12262
- 7) 田島優人:洪水氾濫流中における車両周辺の流況特性に関する実車両実験,令和3年度東京理科大 学理工学部土木工学科学士請求論文,2022.
- 8) 江守一郎:新版 自動車事故工学,技術書院, 261p., 1993.