

都市水害時の地下駐車場への浸水と水没車の 漂流挙動に関する研究

EXPERIMENT STUDY ON FLOATING CONDITION OF CAR IN FLOODED UNDERGROUND PARKING

大西 孝弘¹・岡本 隆明²・戸田 圭一³・石垣 泰輔⁴

Takahiro Onishi^{1*}, Takaaki OKAMOTO², Keiichi TODA³ and Taisuke ISHIGAKI⁴

Flood flow causes heavy damage to people and property. In Nagasaki flood in 1982, flooded cars damage to the structures. Therefore, it is very important to study car behaviors on flooded roads. In this study, flume experiments were conducted using two types of model cars. The experimental data obtained for the small-scale model cars were used to determine the incipient velocity for flooded cars. We also measured the drag force exerted on the cars in flood roads. The results revealed the relationship between depth and velocity and produced a limit of stability for flooded vehicles. These results can be used as preliminary assessment to define the hazards to cars on flooded roads.

Key Words : urban flooding, flooded car, vehicle instability, incipient velocity, drag force, floating car velocity, flume experiment

1. はじめに

近年，計画規模を超える集中豪雨が増加傾向にあり各地で内水氾濫が頻発している．特に都市部では限られた土地を有効利用するために地下構造物が多く存在する．例えば，大阪梅田には広大な地下街が広がっており，JR大阪駅の南側だけで10ヶ所以上の地下駐車場がある¹⁾．ひとたび地上が氾濫すると氾濫水が浸入し自動車の水没し，流され甚大な被害が生じると予測される²⁾．そのため氾濫時にどの程度の流速で車が流され始めるか，その後どのような漂流速度で流されるかは防災上きわめて重要であるが，定量的かつ科学的な検証は十分に進んでいない．本研究では車模型を用いた水路実験をもとにそれらを明らかにする．

氾濫時の車の漂流限界については，いくつかの先行研究がみられる．Shuら(2011)³⁾は3種類の車模型（小型乗用車2種とSUV車1種）を用いて水路実験を実施して車が流され始める限界流速を求め，フルードの相似側から実物値に換算して車の漂流限界を求めている．Xiaら(2011)⁴⁾

は3種類の車模型を用いて通水実験を行い，車が部分的に水没した状態と全水没した状態での漂流限界流速を求めた．押川ら(2011)⁵⁾は2種類の車模型を流れに対して90度の向きに固定して通水し，車に作用する流体力を分力計によって計測した．得られた抗力係数をもとに，実際の条件下での車の漂流限界を求めている．戸田ら(2012)⁶⁾は水深・流速を変化させた水路実験から直接車の漂流限界を求め，限界時における水平方向の力の釣り合いから抗力係数を水深の関数として算出し，押川らと同様に実際の条件下での車の漂流限界を求めた．ただし，これらの研究では車の重心位置の違いによる漂流形態の変化や回転挙動は考慮していない．実物車では車の重心位置によって車の浮き上がる部分や水没体積が変化し，車の安定性や漂流限界流速は大きく変化すると考えられる．

そこで本研究では車模型を設置して，2種類の水路実験を行った．①車模型を固定支持して，電子ばかりを用いて車にかかる抗力を直接計測し抗力係数を正確に算出した．②漂流に関する水路実験では流水中で支持開放した車について，漂流経路を高速カメラにより撮影して統

キーワード：都市氾濫，漂流車，車の安定性，漂流限界速度，抗力，漂流速度，水路実験

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, (E-mail: onishi.takahiro.33u@st.kyoto-u.ac.jp)

²正会員 京都大学大学院工学研究科助教 Assistant professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University

³正会員 京都大学大学院工学研究科教授 Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University

⁴正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学部教授 Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

表-1 漂流限界実験条件（上：セダン型，下：SUV型）

水深	車高	相対水深	セダン型				
$H(\text{cm})$	$k(\text{cm})$	H/k	$U_m(\text{cm/s})$	Re	Fr	向き(度)	ブレーキの有無
2.0	8.0	0.25	22.5	4500	0.51	0, 90, 180	ブレーキは3種類
			31.25	6250	0.71	0, 90, 180	
			45	9000	1.02	0, 90, 180	
			60	12000	1.36	0, 90, 180	
			75	15000	1.69	0, 90, 180	
4.0		0.50	10	4000	0.16	0, 90, 180	ブレーキは3種類
			20	8000	0.32	0, 90, 180	
			30	12000	0.48	0, 90, 180	
			40	16000	0.64	0, 90, 180	

水深	車高	相対水深	SUV型				
$H(\text{cm})$	$k(\text{cm})$	H/k	$U_m(\text{cm/s})$	Re	Fr	向き(度)	ブレーキの有無
2.0	9.0	0.22	22.5	4500	0.51	0, 90, 180	ブレーキは3種類
			31.25	6250	0.71	0, 90, 180	
			45	9000	1.02	0, 90, 180	
			60	12000	1.36	0, 90, 180	
			75	15000	1.69	0, 90, 180	
4.0		0.44	10	4000	0.16	0, 90, 180	ブレーキは3種類
			20	8000	0.32	0, 90, 180	
			30	12000	0.48	0, 90, 180	
			40	16000	0.64	0, 90, 180	

ブレーキはブレーキ無、サイドブレーキ(後輪固定)、全輪固定パーキング

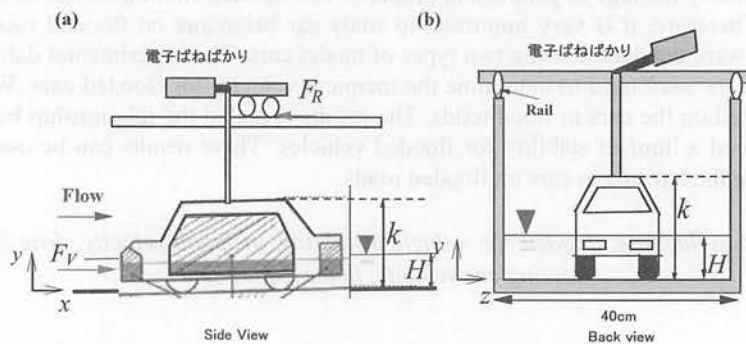


図-1 車にかかる抗力計測実験装置

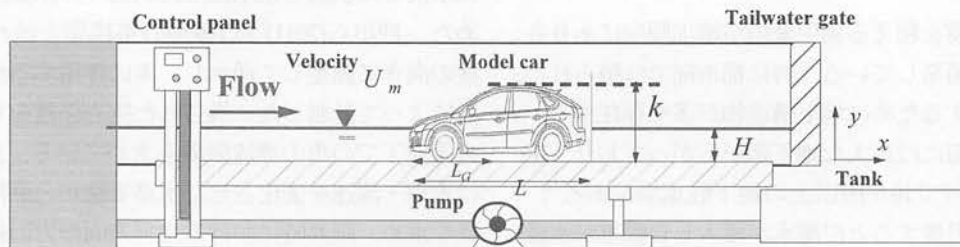


図-2 車の漂流限界実験装置

計的に解析した。これらの結果を岡崎豪雨(2008年)を想定した大阪市梅田地区の地下駐車場の氾濫解析結果に適用したところ、地下駐車場入口で車が漂流する危険なケースが見出された。

2. 実験装置

(1) 車にかかる抗力計測実験

図-1に抗力計測実験装置図を示す。実験に用いた水路は全長10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型水路であり、等流状態になるように水路勾配を変化させている。 x , y および z は、それぞれ流下方向、垂直方向および横断方向である。 H は全水深、 k は車模型の高さである。垂直

方向の原点($y=0$)は水路底面とした。図のように水路上部にレール(アルミ製)と台車を取り付け、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。車模型(プラスチック製)はSUV型車(1/18)とセダン型小型自動車(1/18)を用いた。流水中の車が動き出すと電子ばねばかりで台車を引っ張り、車にかかる流体力 F_V を計測した。車にかかる全抗力 F は電子ばねばかり(分解能1/100kgf)で計測した台車にかかる流体力 F_V と台車の滑車とレールの間にかかる静止摩擦力 F_R の和から算出した。相対水深は $H/k=0.25, 0.5$ (半水没), 1.0 (全水没状態)を含めて3通りに変化させた。各ケースについて流れに対する車模型の角度(0度, 90度, 180度)や断面平均流速 U_m も $U_m=20-100(\text{cm/s})$ 系統的に変化させて様々な条件下で実験を行った。

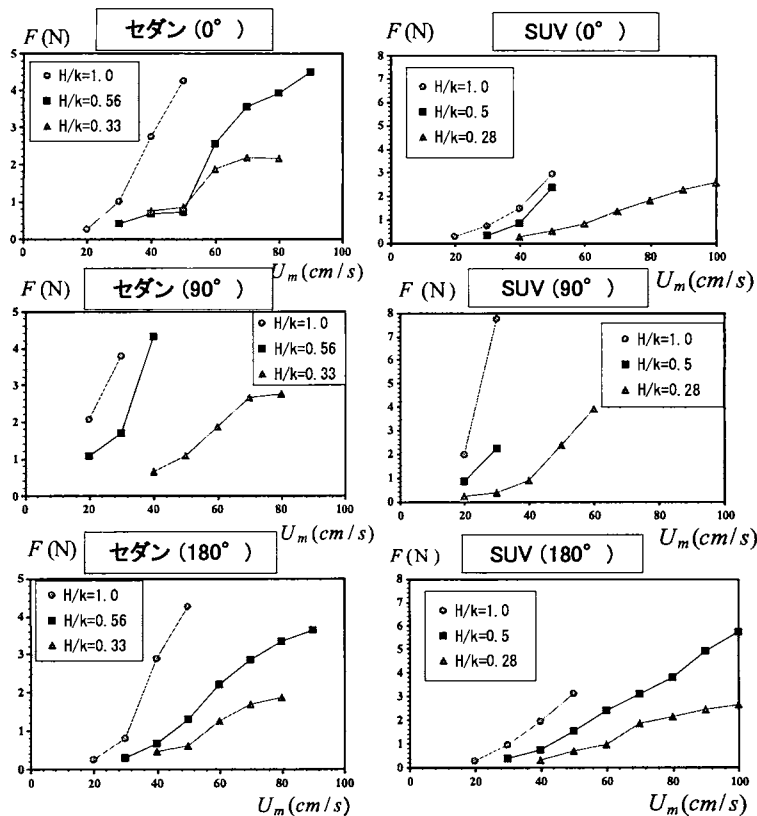


図-3 車にかかる抗力

(2) 車の漂流限界実験

図-2 に車の漂流限界実験装置図を示す。車の漂流限界実験には2種類の車模型 SUV 型車(1/18)とセダン型小型自動車(1/18)を使用した。漂流限界流速 U_c の計算値と実験値の比較を容易にするため、本実験では空隙率 $p=0$ の木製車模型を用いた(水没時に車内に水が浸入しない)。セダン型模型(トヨタクラウンロイヤル)は重さ 248g、長さ $L=26\text{cm}$ 、幅 $b=9.6\text{cm}$ 、高さ $k=8.0\text{cm}$ 、重心位置は前方から $L_G=0.44L$ 、底面から $k_G=0.41k$ 、SUV 模型(トヨタエスティマ)は重さ 275g、長さ $L=25.5\text{cm}$ 、幅 $b=9.6\text{cm}$ 、高さ $k=9.0\text{cm}$ 、重心位置は前方から $L_G=0.45L$ 、底面から $k_G=0.44k$ である。実物との関係をわかりやすくするために、おもりをつけて補正を行い、実物とのみかけの密度の比率が1となるようにした。また車模型の重心位置も実物車と同じ位置になるように調整している。車模型のタイヤと水路底面の静止摩擦係数 μ は 0.744 (SUV 型車)、0.713 (セダン型) で、濡れたアスファルトと車のタイヤの静止摩擦係数が 0.5-0.6 なので同程度と考えられる。車の漂流限界実験では車模型を水路の中心線上に設置した後、模型が流されない程度の流量を設定して水を流し始め、流されないことを確認すると流量を増やし、同じことを繰り返して漂流限界流速 U_c を評価した。その後、

漂流限界を超えた流量を通水し、車が流され始めるとストップウォッチとビデオカメラを用い、車の漂流速度 U_d を算出した。

表-1に車の漂流実験の水力条件(SUV型車、セダン型自動車)を示す。 $Re \equiv U_m H / \nu$ はレイノルズ数、 $Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$ はフルード数である。実験は①ブレーキの有無、②流れに対する車模型の角度、③断面平均流速 U_m 、④相対水深 H/k の4つの条件を変化させて実施した。①のサイドブレーキは車模型の後輪をガムテープで固定することで再現した。全ブレーキ(パーキング状態)は車模型の全輪をガムテープで固定している。②の車の向きは水の流れに対して0度、90度、180度の3パターンで実験を行った。

3. 漂流限界を求める際の抗力係数の算出

図-3 にセダン型と SUV 型車模型にかかる抗力値 $F(N)$ の断面平均流速 U_m による変化を示す。断面平均流速 U_m が大きくなると抗力値が増加する傾向がみられる。0度と180度では車の投影面積 A_x が同じなので、設置角度による抗力値の変化はあまりみられない。車の設置角度を90度になると車の投影面積 A_x が大きいため、車模型にかかる抗力値 $F(N)$ が0度と180度のケースに比べて大きくなっている。本研究では車にかかる流体力 F を計

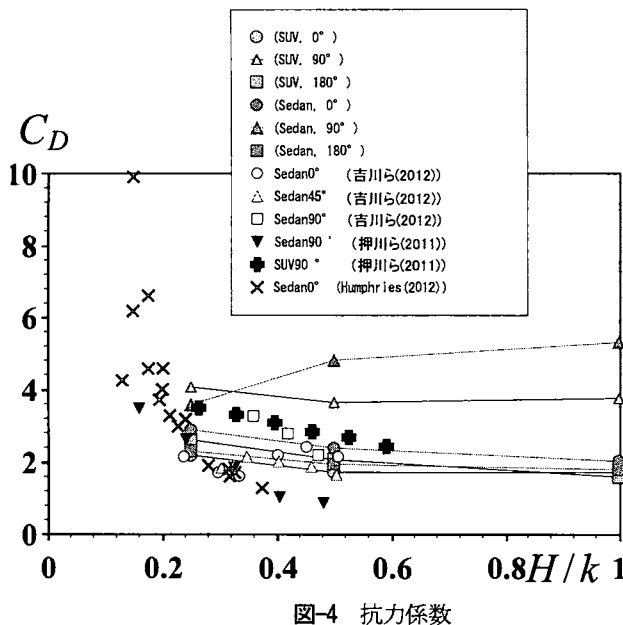


図-4 抗力係数

測しているため、抗力係数 C_D を直接計算することが可能である。

$$F = 0.5\rho C_D U_m^2 A_x \quad (1)$$

と表現される。ここで、 ρ ：水の密度、 U_m ：断面平均流速、 A_x ：x方向の車が水没している投影面積である。図-4に実験値をもとに算出したセダン型とSUV型車模型の抗力係数 C_D を示す。横軸に相対水深 H/k (k は車の高さ)、縦軸に抗力係数をとっている。比較のため他研究者の結果(吉川ら(2012)⁷⁾、押川ら(2011)⁹⁾、Humphries(2012)⁸⁾を併示した。本実験の抗力係数の値は他研究者の結果と同オーダー($C_D=2.0\sim4.0$)になった。また他研究者と同様に相対水深 H/k が小さくなると抗力係数が増加する傾向がみられた。車の設置角度0度と180度のケースでは抗力係数 C_D の値に大きな差はみられない。これに対して、車の設置角度90度のケースでは抗力係数 C_D の値が0度と180度のケースより大きい。

4. 車の漂流限界実験と漂流形態変化

本章では Shu ら(2011)³⁾と同様に車模型を水路に設置し、水深・流速を変化させた実験から直接、車の漂流限界を求める。図-5にセダン型とSUV型車の漂流限界流速 U_c の相対水深 H/k による変化を示す。相対水深 H/k が大きくなると、漂流限界流速 U_c が減少する傾向がみられる。これは相対水深 H/k が大きくなると、車模型の水没体積が増加し車の受ける浮力が大きくなり、車輪と底面の静止摩擦力が減少したためだと考えられる。セダン型車模型では $H/k>0.5$ のケースで、SUV型車模型では $H/k>0.44$

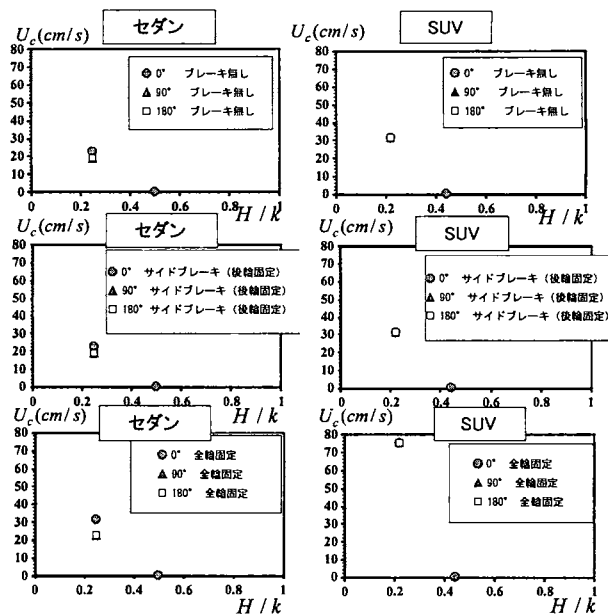


図-5 車の漂流限界速度

表-2 漂流時の車の挙動 (セダン型)

水深 $H(\text{cm})$	相対水深 H/k	セダン型			
		$U_m(\text{cm/s})$	向き(度)	車の状態	$\alpha(\text{度})$
2.0	0.25	22.5	0	後輪が浮く	1.87
		31.25	0	後輪が浮く	5.36
		45	0	後輪が浮く	5.36
		60	0	全輪浮く	-
		75	0	全輪浮く	-
4.0	0.50	10	0	全輪浮く	-
		20	0	全輪浮く	-
		30	0	全輪浮く	-
		40	0	全輪浮く	-
2.0	0.25	18.75	90	後輪が浮く	1.87
		22.5	90	後輪が浮く	1.87
		31.25	90	後輪が浮く	3.67
		45	90	全輪浮く	-
		60	90	全輪浮く	-
		75	90	全輪浮く	-
2.0	0.25	18.75	180	後輪が浮く	1.87
		22.5	180	全輪浮く	-
		31.25	180	全輪浮く	-
		45	180	全輪浮く	-
		60	180	全輪浮く	-
		75	180	全輪浮く	-

のケースで車の全輪が浮いてしまうため、車の漂流限界速度 $U_c=0(\text{cm/s})$ となる。

表-2に漂流時のセダン型とSUV型車の挙動をまとめた。挙動としては、①全輪路床に接地したまま流れる②後輪のみ浮いて流れる③全輪浮いて流れるの3種類と、回転運動をするというものが見られた(図-6)。回転運動については後に詳しく述べる。また、同一の水理条件($U_m=45(\text{cm/s})$ 、 $H/k=0.25$)で比較してみると、車の設置角度0度のケースでは後輪が浮き上がるが車の設置角度180度のケースでは全輪が浮くというケースもあった。これは、車の重心は車の前部にあり、前部は後部に比べ重いためである。

図-7にセダン型とSUV型の漂流車の移流速度 U_d を示す。車模型の設置角度は0度である。設置角度0度の

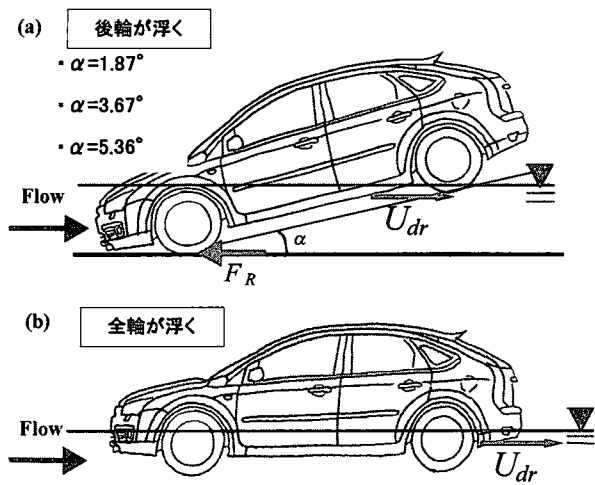


図-6 車の漂流形態の変化

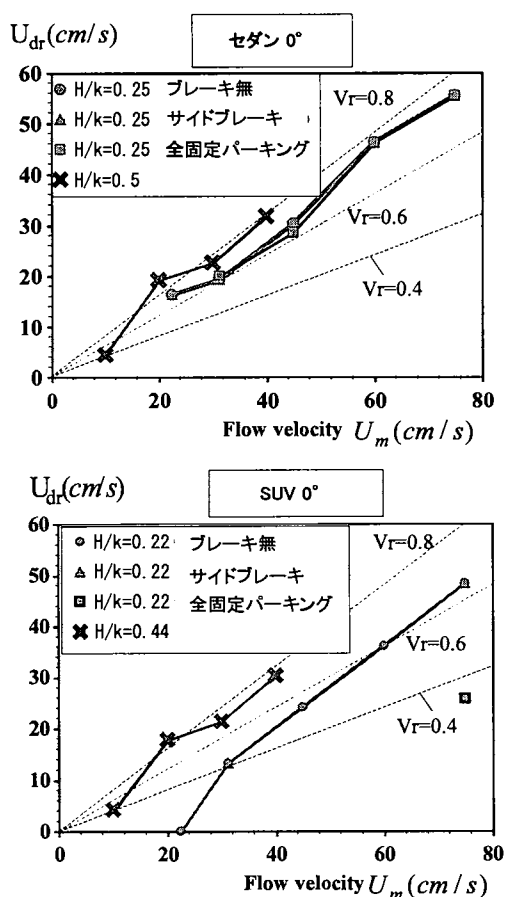


図-7 漂流限界を超えた状態の車の漂流速度

ケースでは車模型は漂流時に流下方向にまっすぐ流されるため、1m 区間を過ぎる時間を計測して移流速度を算出した。本研究では「車の漂流速度が水流の流速に対してどの程度の大きさをもっているか」を示すパラメータ V_r を次のように定義する。

$$V_r = \frac{U_{dr}}{U_m} = \frac{\text{漂流速度}}{\text{周囲の流水の速度}} \quad (2)$$

相対水深が小さく、漂流限界をわずかに超えるようなケース(SUV 型, $H/k=0.22$, $U_m=31.25(\text{cm/s})$)では $V_r=0.42$ であ

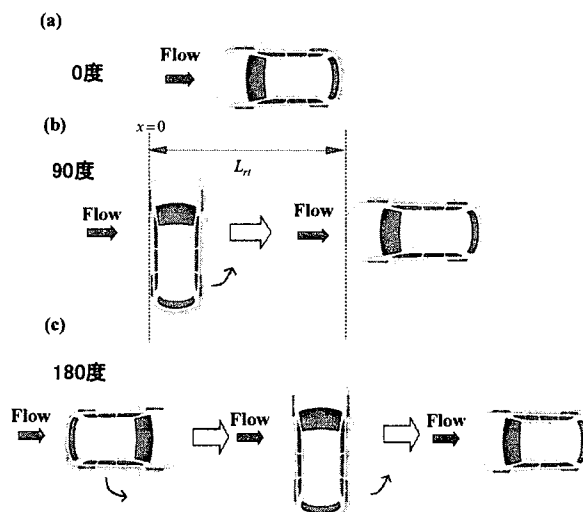


図-8 漂流車の回転挙動

った。このことから、車の漂流速度は水流の速度 U_m と比較して小さく、流されながらも摩擦抵抗が十分に働いていることがわかる。そして、水流の速度が増加するにつれ、車の漂流速度も増加して $V_r=0.64$ となった。

相対水深 H/k が大きなケース(SUV 型, $H/k=0.44$)では漂流車の移流速度が増加している($V_r=0.76$)。これは水深の低いケースでは車の後輪が浮き上がり前輪のみが接地した状態で移流され、前輪部で底面摩擦力が働いたためと思われる(図-6)。このようなケースでは漂流車の移流速度 U_{Δ} はサイドブレーキ(後輪)の影響を受けない。水深が増加すると(セダン型: $H/k=0.5$, SUV 型: $H/k=0.44$)全輪が浮いた状態で漂流する。全輪が浮いた状態で漂流するため、漂流車の移流速度 U_{Δ} はサイドブレーキや全ブレーキの影響を受けない。

一方、車模型の設置角度が90度や180度のケースでは車は重心を軸に回転して水流に対しての角度が0度になった状態で漂流する(図-8)のが観察された。車模型の設置角度が90度のケースではx方向の車の投影面積 A_x が大きいいため、車の漂流時には水流の受ける断面積が一番小さくなるように回転する(風見鶏効果⁹⁾)。また本研究で用いた車模型は実物車に合わせて、重心位置が車の前方にくるように調整しているため、車模型の設置角度が180度のケースでも、車は重心を軸に回転して水流に対しての角度が0度になった状態で漂流する。このため、車模型の設置角度が90度や180度のケースの車の漂流速度 U_{Δ} は0度のケースと同じになる。

5. 漂流限界の実現象への適用

(1) 漂流限界速度を釣り合い式より求める方法

3章で得られた抗力係数をもとに押川ら⁹⁾の方法に従

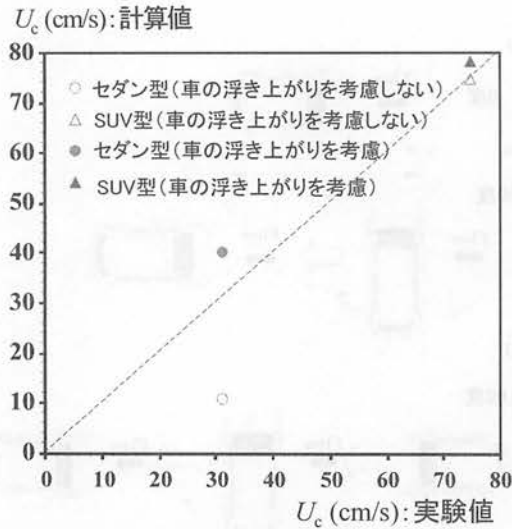


図-9 車の漂流限界速度の実験値と計算値の比較

い、車の漂流限界の計算値を算出し、4節の実験値と比較する。水路床と水平な方向に関して、漂流限界状態では流体力 F と摩擦力 S の間で以下の釣り合い式が成立する。

$$F = S = \mu(Mg - F_b - L) \quad (3)$$

ここで μ : 車模型の静止摩擦係数, M : 車模型の質量, g : 重力加速度, F_b : 車模型に作用する浮力, L : 車模型に作用する揚力である。浮力 F_b は

$$F_b = \rho g V(1 - p) \quad (4)$$

ここで ρ : 水の密度, V : 水中に水没した車の体積, p : 車の空隙率(=車の空隙部分の体積/車のみかけの体積)である。式(1), (3), (4)を用いて漂流限界速度 U_c を算出するにあたり、特に考慮すべきものは、 μ と V である。静止摩擦係数 μ は水路底面を濡らした状態で車模型を設置して、電子ばねばかりをゆっくり引き、車が動き出すときの張力を読み取るという実験を別途行ってその値を求めた。セダン型と SUV 型車の体積 V は、水槽とメスシリンダーを用いて体積 V と水深 H との関係求めた。4章の実験で用いた車模型の空隙率 p は 0 である。抗力係数 C_D は 3 章の実験値を用いる。押川ら(2011)⁹⁾の結果をみても揚力係数は抗力係数よりも 1 オーダー小さな値を示していることから本研究では、揚力 L については考慮しないこととした。

(2) 漂流限界速度の計算値と実験値の比較

図-9 にセダン型と SUV 型の車の漂流限界速度 U_c の計算値(空隙率 $p=0$, 車の積載重量 $M=0$)と実験値を比較した(人が乗っていない停車車両を想定)。車模型の設置角度は 0 度である。 $H=2(\text{cm})$ のケース(セダン型 :

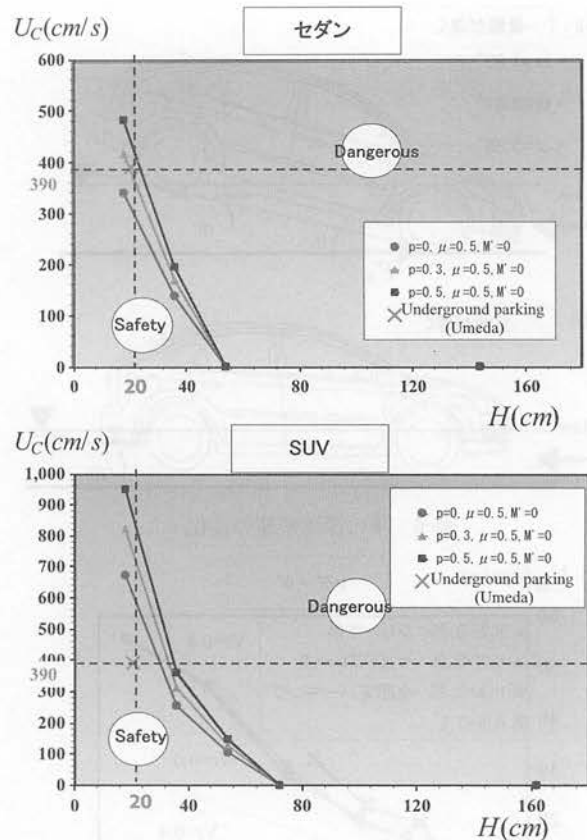


図-10 地下駐車場浸水時の車の漂流限界判読図
(実現スケール)

$HA=0.25$)では計算値と比較して、実験値の U_c が大きくなっている。

これは漂流限界流速 U_c を計算する過程で図-6 に示すような車の後輪の浮き上がりを考慮していないためだと考えられる。本研究で用いた車模型は重心位置が車の前方にあるため、相対水深 HA が増加すると車の後輪が浮き上がり、前輪のみが接地する状態になる。このような状態では車の水没体積 V が減少し、車にかかる浮力も小さくなる。式(4)から浮力 F_b が減少すると車は漂流しにくくなるため、車の漂流限界流速 U_c の実験値が計算値に比べて大きくなったのではないかと推測される。また図-6 のように車の後輪が浮き上がり、前面が下がった状態では流体力が作用する面積 A_x は大きくなると考えられる。 α を考慮して、車の水没体積 V と流体力が作用する面積 A_x を変化させて、漂流限界流速 U_c を計算すると、実験値と一致した。

図-9に車の後輪の浮き上がり角度 α を考慮して算出したセダン型とSUV型の車の漂流限界速度 U_c の計算値(車の積載重量 $M=0$)と実験値を比較する。車模型の設置角度は0度である。セダン型とSUV型の車の両ケースにおいて漂流限界速度 U_c の実験値と計算値の良好な一致がみられた。

実スケールの漂流判読図に組み込んだ結果を図-10に

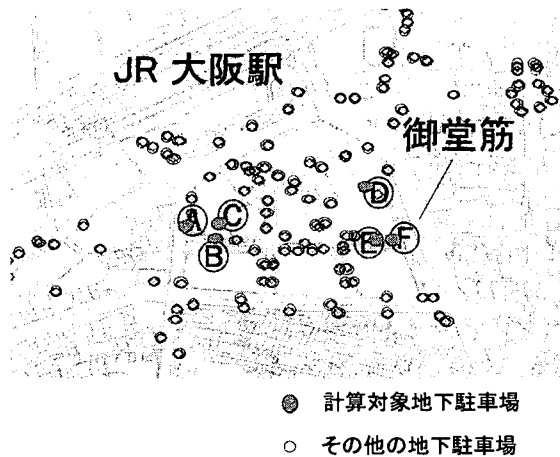


図-11 地下駐車場の分布

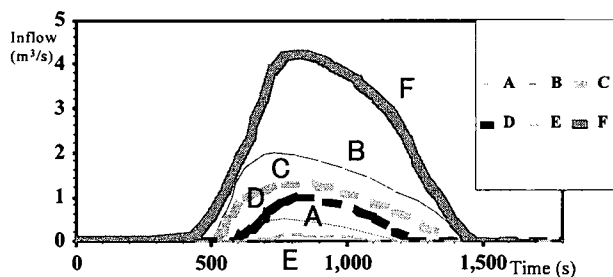


図-12 地下駐車場への流入量

示す。実スケールへの換算にはフルード相似則を用いた。水路実験では計算値との比較を容易にするため、空隙率 $p=0$ の車模型を用いている。実現象に適用時には車内への浸水も考えられるため、 $p=0, 0.3, 0.5$ の3通りに変化させている。

(3) 漂流限界の実現象への適用

次に理論的に求めた漂流限界速度に関する実スケールでの判読図を森本ら(2014)¹⁰の岡崎豪雨時の大阪梅田地区地下駐車場の氾濫解析結果と組み合わせて車の漂流の危険性を具体的に評価する。

岡崎豪雨(時間雨量 146.5mm)を想定した場合の地下駐車場への氾濫水の流入を調べると、対象とした梅田地区(図-11)にある全ての地下駐車場に流入することが分かった。各駐車場への時間経過による流入量を示したグラフが図-12 である。本研究でピックアップした駐車場は流入量が大きく、最も大きな浸水被害が予測される図中のFの駐車場である。進入路の勾配を5%，粗度係数 n を0.02 と設定し、等流状態を仮定して Manning 式を用いると駐車場 F には岡崎豪雨において水深 0.2m、流速 3.9m/s で水が流れ込む。また Manning 式を用いて求めた水深と流速を本研究で作成した漂流判読図(図-10)に組み込み、セダン・SUV 両方の漂流限界を評価する。図-10 から SUV 型ではこのケースでは流れないことが分かる。しか

し、セダン型では空隙比 $p=0.03$ では、このケースでは流されてしまうことが分かる。今回のケースでは SUV 型は流されなかったが、さらに雨量が多いケースでは、漂流してしまうケースも十分考えられ、そのケースにおいては

1. 地下駐車場の出入り口付近でゴム板などを用いて浸水を防ぐ、
2. 地下駐車場に人が入らないようにする、
3. 駐車場内にいる人に対して車を使わずアクセス道以外から避難するように指示するなどの対応が必要である。

このように、氾濫解析結果と本研究で作成された判読図を組み合わせることで、本研究で取り上げた梅田駐車場以外でも、特定の地域での車の漂流危険性について評価することができる。

6. おわりに

本研究では地下駐車場浸水時の水没車の漂流挙動について調べるために、2種類の水路実験(車にかかる抗力計測実験と車の漂流実験)を行った。車に作用する流体力の抗力係数を直接評価し、水深の関数として求めた。その係数をもとに実事象での車の漂流限界を求めた。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 抗力計測実験で得られた抗力係数をもとにつりあい式から算出した車の漂流限界の計算値と、水路実験からダイレクトに求めた漂流限界を比較した。実験値と計算値で良好な一致が得られたため、実際の状況下での車の漂流限界指標を氾濫流の水深・流速の関数として表現できることが確認された。

(2) 既往研究で考慮されていない、車の重心位置による流水中の車の安定性の変化についても考察し、車の後輪のみが浮き上がると漂流限界の流速値は大きく変化することがわかった。

(3) 車の漂流挙動について考察し、重心位置によって漂流挙動は大きく異なることがわかった。さらに車の設置角度が90度のケースでは水流の受ける断面積が一番小さくなるように回転し、水流に対しての角度が0度になった状態で漂流することがわかった。漂流車の衝突力や衝突した時に発生する二次災害については今後の課題としたい。

(4) これらの結果を岡崎豪雨(2008年)を想定した大阪市梅田地区の地下駐車場の氾濫解析結果に適用したところ、地下駐車場入口で車が漂流する可能性のある危険なケースが見出された。

今後、実物大の車両を用いて漂流実験する際の課題として水没車の回転挙動を考慮した広いスペースを確保して実験する必要がある。またエンジンを搭載した車両で実験するので、水中漏電に注意することが考えられる。

謝辞：本研究は一般財団法人防災研究協会若手研究者研究助成金（大規模氾濫時の水没車に作用する流体力特性と漂流メカニズムの実験的解明、代表：岡本隆明）の研究助成の下で行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋祐樹・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：浸水した大規模地下駐車場からの避難に関する検討，土木学会論文集 F2(地下空間研究), Vol.69, No.1, pp.1-10, 2013.
- 2) 高橋和雄，高橋裕：クルマ社会と水害 ー長崎豪雨災害は訴えるー，九州大学出版会，1987.
- 3) Shu, C., Xia, J., Falconer, R.A. and Lin, B. : Incipient velocity for partially submerged vehicles in flood waters, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.49, No.6, pp.709-717, 2011.
- 4) Xia, J., Teo, F.Y., Lin, B. and Falconer, R.A Formula of incipient velocity for flooded vehicles, *Nat. Hazards*, Vol.58, pp.1-14, 2011.
- 5) 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，土木学会水工学委員会河川部会，pp.461-466, 2011.

- 6) 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，河川技術論文集，第 18 巻，pp.499-504, 2012.
- 7) 吉川雅志，高垣裕彦，石垣泰輔，戸田圭一，尾崎平：水災害時の水没車に作用する流体力と抗力係数に関する実験，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.
- 8) Humphries, N.J. : Controlling debris flow in urban floods, A Project Report submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of MEng of Loughborough University, 2012.
- 9) おとなのための紙飛行機研究所のブログ <http://sagapaperglider.blog.fc2.com/blog-entry-783.html>.
- 10) 森本陽介，石垣泰輔，尾崎平，戸田圭一：内水氾濫時における地下駐車場への浸水に伴う水没車の漂流について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 19 巻，土木学会，pp.121-124, 2014.