

氾濫時の水没車の漂流挙動に関する実験的研究

Experiment Study on Floating Condition of Car in Flood Water

大西孝弘⁽¹⁾・岡本隆明⁽¹⁾・戸田圭一⁽¹⁾・石垣泰輔⁽²⁾

Takahiro ONISHI⁽¹⁾, Takaaki OKAMOTO⁽¹⁾, Keiichi TODA⁽¹⁾ and Taisuke ISHIGAKI⁽²⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) 関西大学環境都市工学部

(1) Graduate School Engineering, Kyoto University, Japan

(2) Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Japan

Synopsis

During a flood, it is often not the water itself, which causes heavy damage to people and property. In Nagasaki flood in 1982, flooded cars brought damage to the structures and lost of lives. Therefore, it is very important to study car behaviors on flooded roads. In this study, flume experiments were conducted using two types of small-scale model cars. The experimental data obtained for the 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.

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

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

1. はじめに

東日本大震災や長崎大水害時のような都市域にまで達しうる大規模な津波・洪水氾濫が発生すると多くの車両が浸水・漂流し甚大な被害が生じる。このような氾濫時の自動車避難のリスクが改めて認識されつつある。大規模な津波・洪水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。

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)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)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)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、車模型に作用する流体力を三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)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

Table1 Hydraulic condition (Left : Sedan, Right : SUV)

Depth H (cm)	Height k (cm)	Depth ratio H/k	Sedan				
			U_m (cm/s)	Re	Fr	Direction($^\circ$)	With or without Brake
2.0	8.0	0.25	22.5	4500	0.51	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			31.25	6250	0.71	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			45	9000	1.02	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			60	12000	1.36	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			75	15000	1.69	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
4.0	8.0	0.50	10	4000	0.16	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			20	8000	0.32	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			30	12000	0.48	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			40	16000	0.64	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake

Depth H (cm)	Height k (cm)	Depth ratio H/k	SUV型				
			U_m (cm/s)	Re	Fr	Direction($^\circ$)	With or without Brake
2.0	9.0	0.22	22.5	4500	0.51	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			31.25	6250	0.71	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			45	9000	1.02	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			60	12000	1.36	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			75	15000	1.69	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
4.0	9.0	0.44	10	4000	0.16	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			20	8000	0.32	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			30	12000	0.48	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake
			40	16000	0.64	0, 90, 180	Without brake, emergency brake and Parking brake

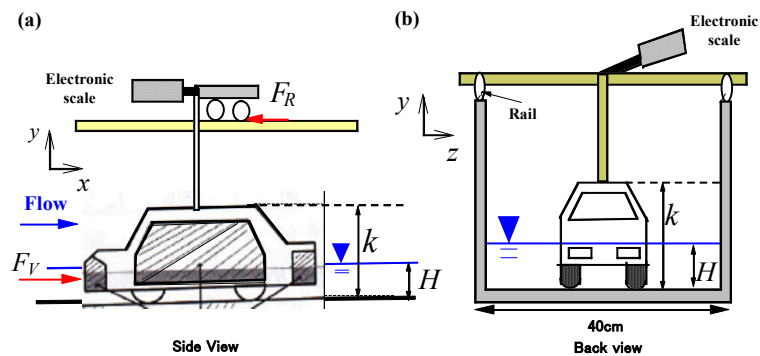


Fig.1 Experimental setup(Drag force Measurement)

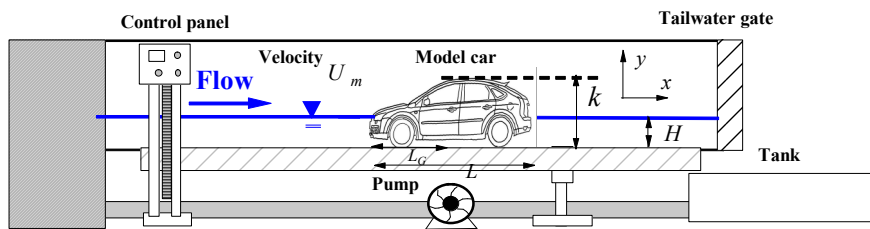


Fig.2 Experimental setup(Flooded car)

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。

そこで本研究では重心位置・密度を実物車と同じになるように調整した車模型を用いて水理実験を行い氾濫時の車の漂流限界を求める。また、車にかかる抗力を計測して、車の抗力係数を算出し、得られた抗力係数を用いて理論的に漂流限界速度を求め、実験値と比べることで、漂流の危険性を把握すると

ともに理論的アプローチの有用性を検討する。

2. 実験装置

2.1 車にかかる抗力計測実験

Fig.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、鉛直

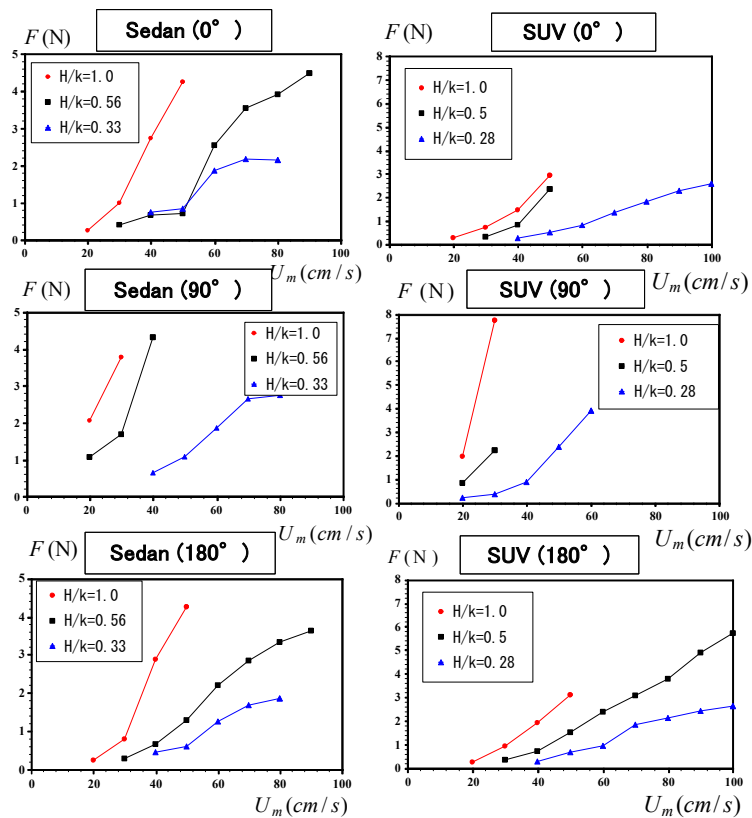


Fig.3 Drag force exerted on car

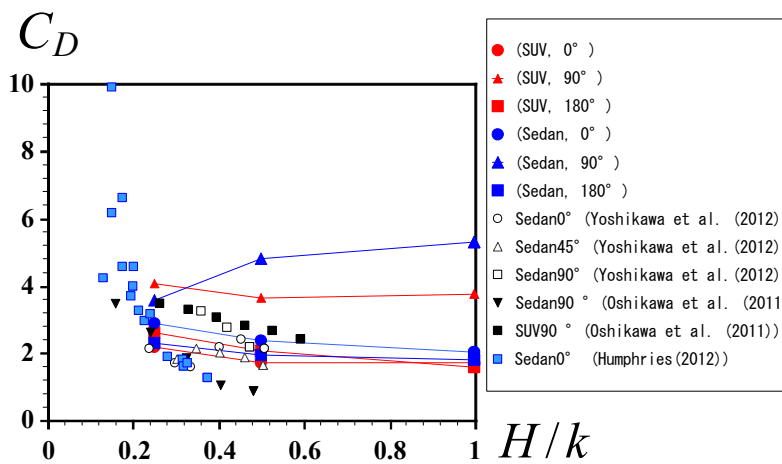


Fig.4 Drag force coefficient

方向および横断方向である。 H は水深、 k は車模型の高さである。鉛直方向の原点($y=0$)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(1/16)を用いた。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 $U_m=20-100$ (cm/s)で系統的に変化させて様々な条件下で実験を行った。

2.2 車の漂流限界実験

Fig.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

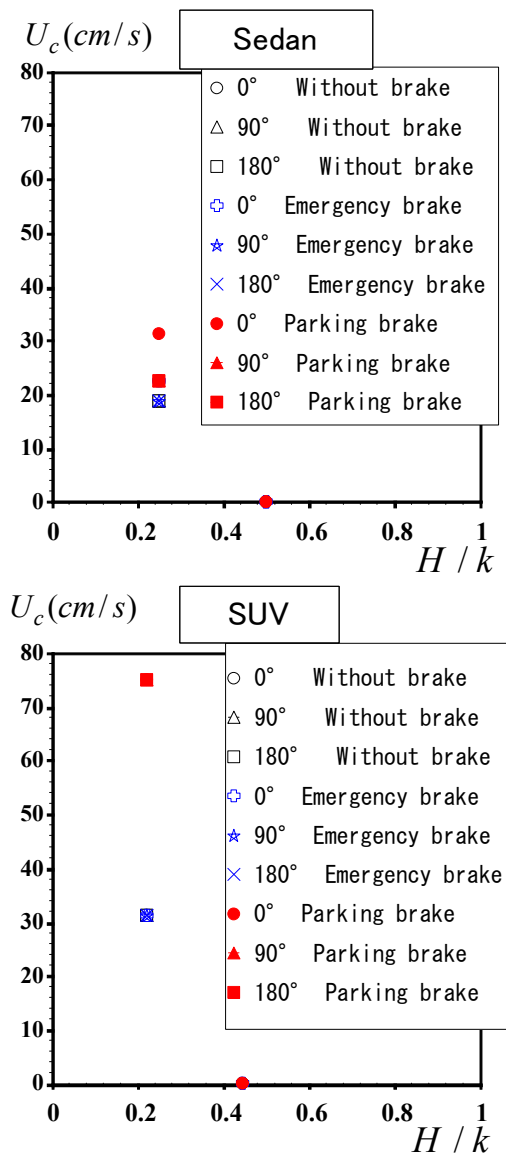


Fig.5 Incipient velocity for flooded car

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。セダン型模型は重さ 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 $L_G=0.44L$, SUV 模型は重さ 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 $L_G=0.45L$ 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_{dr} を算出した。

Table1 に車の漂流実験の水理条件(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

Fig.3 にセダン型と SUV 型車模型にかかる抗力値 $F(\text{N})$ 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 度にするると車の投影面積 A_x が大きいため、車模型にかかる抗力値 $F(\text{N})$ 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。車にかかる流体力 F は

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

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。Fig.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), 押川ら(2011), Humphries(2012))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($C_D=2.0-4.0$)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。

Table2 Floating condition of flooded car(Sedan)

Depth H (cm)	Depth ratio H/k	Sedan			
		U _m (cm/s)	Direction(°)	Floating motion	Angle(°)
2.0	0.25	22.5	0	Rear axle floating	1.87
		31.25	0	Rear axle floating	5.36
		45	0	Rear axle floating	5.36
		60	0	Front and Rear axles floating	-
		75	0	Front and Rear axles floating	-
4.0	0.50	10	0	Front and Rear axles floating	-
		20	0	Front and Rear axles floating	-
		30	0	Front and Rear axles floating	-
		40	0	Front and Rear axles floating	-
2.0	0.25	18.75	90	Rear axle floating	1.87
		22.5	90	Rear axle floating	1.87
		31.25	90	Rear axle floating	3.67
		45	90	Front and Rear axles floating	-
		60	90	Front and Rear axles floating	-
2.0	0.25	18.75	180	Rear axle floating	1.87
		22.5	180	Front and Rear axles floating	-
		31.25	180	Front and Rear axles floating	-
		45	180	Front and Rear axles floating	-
		60	180	Front and Rear axles floating	-
75	180	Front and Rear axles floating	-		

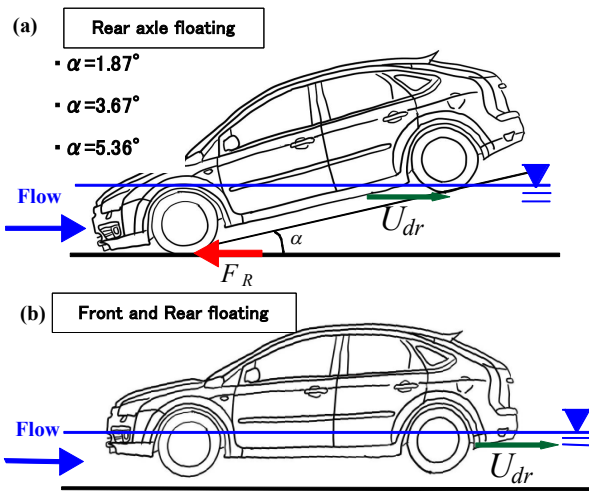


Fig.6 Floating motion of flooded car

4. 車の漂流限界実験と漂流形態変化

本章では Shu ら(2011)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。Fig.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 $H/k > 0.44$ 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。

Table 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のが見られた(Fig.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。

Fig.7 にセダン型と SUV 型の漂流車の移流速度 U_{dr} を示す。車模型の設置角度は 0 度である。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。

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

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($H/k = 0.22$)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くためだと思われる(Fig.6)。このようなケースでは漂流車の移流速度 U_{dr} はサイドブレーキ(後輪)の影響は受けない。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

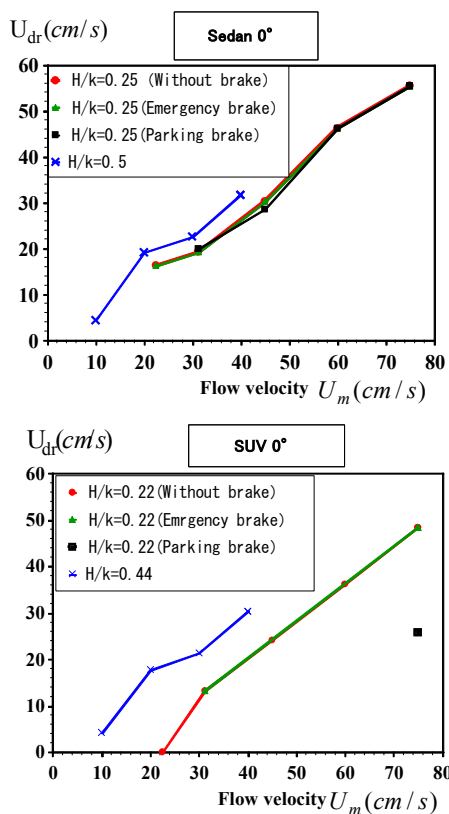


Fig.7 Floating car velocity

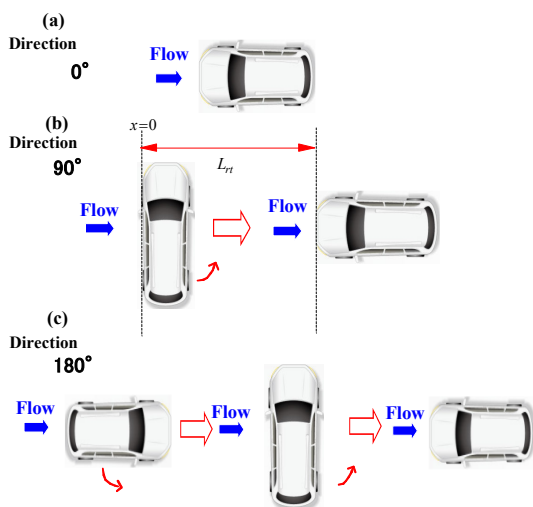


Fig.8 Rotating motion of floated car

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_{dr} はサイドブレーキや全ブレーキの影響は受けない。

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 (Fig.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⁷⁾)。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_{dr} 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

5.1 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の方法に従い、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 との関係を求めた。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)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。

5.2 漂流限界速度の計算値と実験値の比較

Fig.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。車模型の設置角度は0度, 90度である。 $H=2(\text{cm})$ のケース (セダン型 : $H/k=0.25$) 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 Fig.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

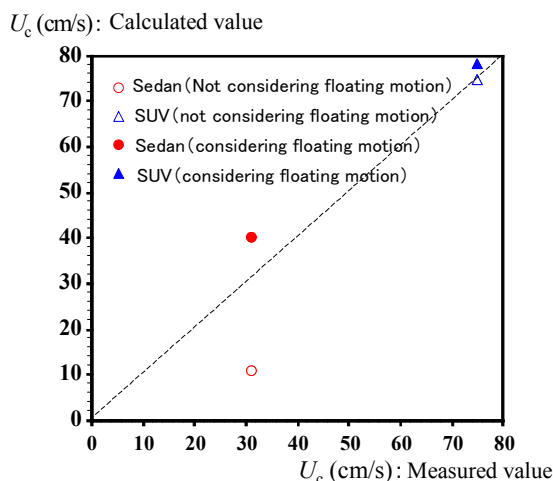


Fig.9 Comparison between measured incipient velocity and calculated incipient velocity

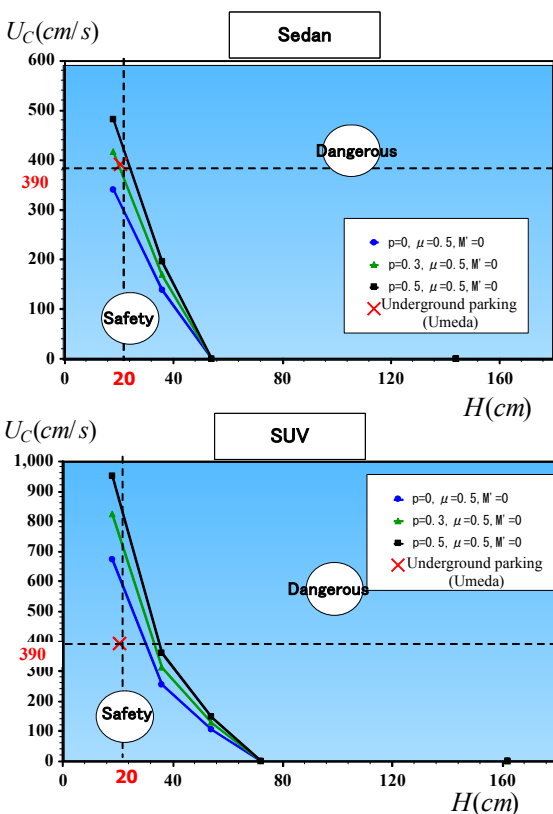


Fig.10 Incipient velocity for flooded car (Real scale)

位置が車の前方にあるため、相対水深 H/k 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 Fig.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 は大きくなると思われる。

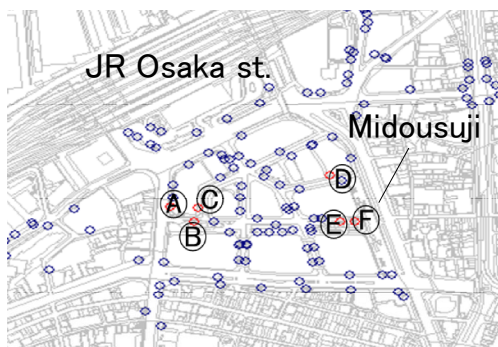


Fig.11 Underground parking (Osaka station)

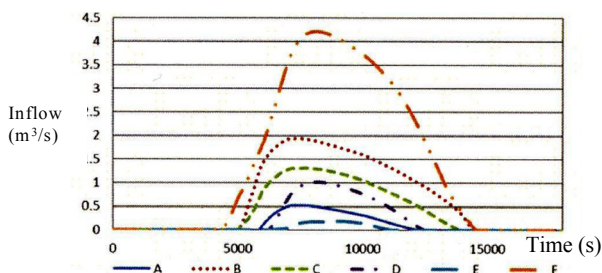


Fig.12 Inflow into underground parking (Osaka station)

Fig.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、90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。

5.3 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)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。

実スケールの漂流判読図に組み込んだ結果を Fig.10 に示す。実スケールへの換算にはフルード相似則を用いた。

岡崎豪雨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(Fig.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 Fig.12 である。本研究でピックアップした駐車場は図中の 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流入量が最大するとき水深 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(Fig.10)に組み込み、セダン・SUV 両方の漂流限界を評価する。Fig.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 $p=0, 0.3$ 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出入り口の通行を制限する必要がある。

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) 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。

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。

参考文献

- 宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター
http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/event/2013/0726_open/image/leaflet/rocket-2.pdf
- 押川英夫. 大島崇史. 小松利光(2011): 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.
- 高橋和雄. 高橋裕(1987): クルマ社会と水害 一長崎豪雨災害は訴える一, 九州大学出版会.
- 戸田圭一. 石垣泰輔. 尾崎平. 高垣裕彦. 西田知洋(2012): 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.
- 森本陽介. 石垣泰輔. 尾崎平. 戸田圭一(2014): 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.
- 吉川雅志. 高垣裕彦. 石垣泰輔. 戸田圭一. 尾崎平(2012): 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.
- Humphries, N.J.(2012): Controlling debris flow in urban floods, A Project Report submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of MEng of Loughborough University.
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R.A. and Lin, B. (2011): Incipient velocity for partially submerged vehicles in flood waters, *Journal of Hydraulic Research.*, Vol.49, No.6, pp.709-717.
- Xia, J., Teo, F.Y., Lin, B. and Falconer, R.A (2011): Formula of incipient velocity for flooded vehicles, *Nat. Hazards.*, Vol.58, pp.1-14.

(論文受理日：2014年6月11日)