

時間変化を考慮した地下駐車場内での車の 漂流挙動に関する実験的研究

EXPERIMENT STUDY ON FLOATING VEHICLE MOTION VARIED WITH TIME IN FLOODED UNDERGROUND PARKING

鈴木 隆太^{1*}・岡本 隆明²・戸田 圭一³・石垣 泰輔⁴

Ryuta SUZUKI^{1*}, Takaaki OKAMOTO², Keiichi TODA³, Taisuke ISHIGAKI⁴

In recent years, severe rainstorms have induced heavy damage to Japanese cities. The water flood attacked the urban area and the flooded cars expanded the human damages (Nagasaki in 1982). Therefore, it is very important to investigate the floating behavior of cars on flooded roads. In this study, two kinds of flume experiments were conducted using two types of model cars (SUV type car and Sedan type car). First, we recorded the floating behavior of the flooded car in underground parking model (1/64 scale). Second, we measured the time series of the drag force exerted on the model cars (1/18 scale) in unsteady flow by using Force gage. The results revealed that the drag force increases rapidly during an early stage because of the hydrostatic pressure difference.

Key Words : *flood in underground parking, unsteady flow, incipient velocity, floating vehicle motion, flume experiment*

1. はじめに

近年, 地球温暖化の影響により局地的集中豪雨が増加している。都市部では豪雨時に下水処理能力を超えると, 内水氾濫が発生する¹⁾。特に都市域には広大な地下街が広がっており, ひとたび地上が氾濫すると氾濫水は地下空間に集中して浸入し, 自動車が水没し流され甚大な被害が生じると予測される。そのため氾濫時の地下空間内部の漂流危険箇所や車同士の漂流衝突被害を把握することは防災上きわめて重要であるが, 定量的な検証は十分に進んでいない。定量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地下駐車場浸水実験と水路実験を行い, それらを明らかにする。

地下空間への浸水実験については, 井上ら(2003)²⁾は京都市の御池地下街を対象として, 模型実験を行い地下空間内部での浸水過程について実験的に考察した。氾濫時の車の漂流限界については, 押川ら(2011)³⁾は車模型を流

れに対して90度の向きに固定し車に作用する抗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。Costaら(2014)⁴⁾は2種類(SUV, セダン)の車模型を用いて通水実験を行い, 射流時と常流時で漂流限界が大きく異なることを示した。著者らのグループ(2015)⁵⁾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, 車の重心位置の違いによる漂流形態の変化や回転挙動を考慮して実際の条件下での車の漂流限界を求めた。

本研究では車模型を用いた地下駐車場模型を用いた浸水実験と水路実験を行った。本研究では①地下駐車場模型を用いて浸水実験を行った。アクセス道から通水し車模型の漂流挙動を高速カメラにより撮影して統計的に解析し, 漂流危険箇所を評価した。

キーワード: 地下駐車場浸水, 非定常な流れ, 漂流限界流速, 車の漂流挙動, 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(suzuki.ryuta.62n@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フェロー会員 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

表-1 地下駐車場浸水実験条件 (1/64 スケール)

	流量 Q (l/s)	最大水深 H_f (cm)	最大流速 U_m (cm/s)	駐車場構造	支柱
Case1	0.24	1.8	41.8	多層型	なし
Case2	0.24	2.3	72.3	多層型	あり

表-2 水深が非定常変化する流れ場での抗力計測実験条件 (1/18 スケール)

流量 Q (l/s)	水深 H (cm)	断面平均流速 U_m (cm/s)	スロープ	Re	Fr
2.5	2.7	23	0.1	5290	0.48
3.3	3.3	25	0.1	5750	0.53
4.0	3.4	29	0.1	8700	0.53
5.0	3.5	36	0.1	11880	0.63
6.0	3.7	41	0.1	14760	0.69
7.0	3.9	45	0.1	17550	0.73
8.0	4.0	50	0.1	21500	0.77

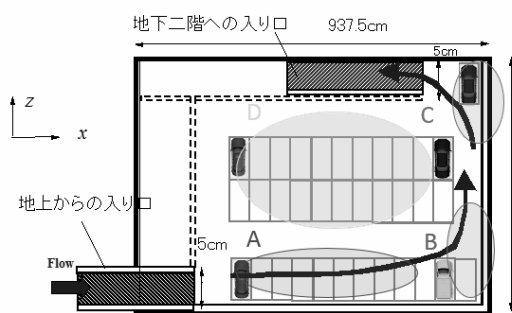


図-1 地下駐車場模型(1/64)の浸水実験

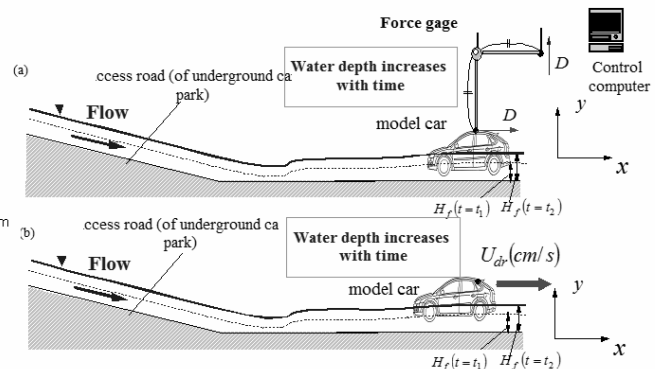


図-2(a) 非定常な流れ場での車(1/18)にかかる抗力計測実験装置

(b) 非定常な流れ場での漂流車の移流速度の計測

2. 実験装置

(1) 地下駐車場模型を用いた浸水実験

図-1 は浸水実験を用いた地下駐車場模型(塩ビ製: 1/64 スケール: 937.5cm×625cm(実スケールに換算すると 60m×40m))を示す。図のように地下駐車場の入り口と地下2階への入り口には 1/10 スロープのアクセス道を設置した。本研究では地下駐車場が地下2階構造(多層構造)を想定している。また地下駐車場に支柱がある場合とない場合に分けて実験し、支柱の影響についても調べた。駐車場に停車している車模型としてプラスチックミニカー(セダン型: 1/64 長さ $L=7.3$ cm, 幅 $b=2.7$ cm 高さ $k=2.3$ cm)を用いた。本実験で用いた車模型は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。梅田地下駐車場の氾濫解析結果をもとに流入流量を決定した。本実験の流入流量($Q=0.3$ l/s, 実スケールに換算すると $Q=10000$ l/s)は非常に微小な流量なのでマイクロポンプを用いて流量設定している。アクセス道から氾濫水を流入させ、氾濫流によって駐車場に停車し

ている車がどのように漂流するかをビデオカメラで撮影して調べた。本研究では定常状態に達したときの氾濫流の水深をポイントゲージで計測した。表-1 に地下駐車場浸水実験の水理条件を示す。

(2) 氾濫流水深が時間変化する流れ場での車にかかる抗力計測、漂流実験

地下駐車場内の氾濫水の流れ場は時間的に変化しており、瞬間的に増加した流体力が車の漂流の重要なトリガーとなるケースも考えられる。そこで水路実験を行って車の抗力と漂流挙動の時間変化について調べた。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-2(a) のように通水していない状態から一定流入流量で通水することで、水没車にかかる抗力の時間変化について調べた。水路上流に長さ 50cm, 勾配 0.1 の地下駐車場のアクセス道模型(1/18 スケール)を設置し、車模型は下流側で底面から 2mm 程度浮かした状態で固定支持

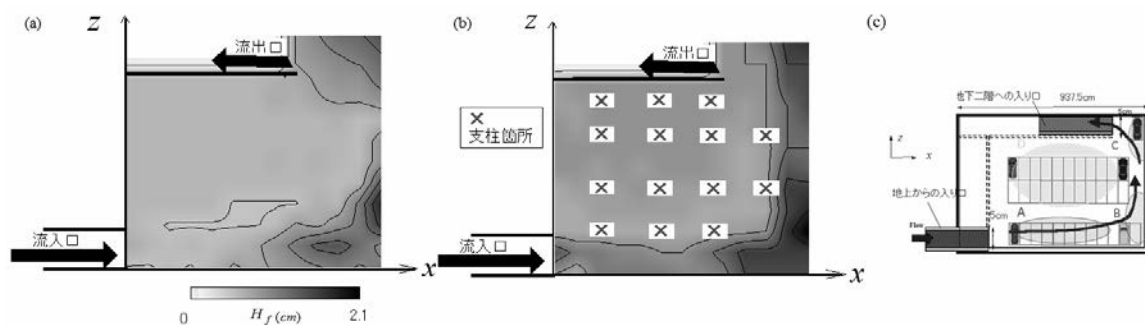


図-3 地下駐車場内の氾濫流水深の水平面コンター (a) 多層型駐車場(支柱無し), (b) 多層型駐車場(支柱有り)

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。腕の長さが等しい L 型アームに鉄棒をつけてベアリング支持している。アームの一端と車模型の中心を接続した。もう一端は図のようにデジタルプッシュプルゲージで支持している。車の受ける流体力をアームを介してデジタルプッシュプルゲージ(分解能 1/1000N)で 120 秒間計測した。デジタルプッシュプルゲージはパソコンに接続することで、車模型にかかる抗力の時系列データ(サンプリングレート 20Hz)を得ることができる。

また図-2(b)のように水没車の漂流挙動の動画解析も行った。地下駐車場のアクセス道模型の下流側に車模型(固定支持していない)を設置し、通水していない状態から一定流入流量で通水した。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。本実験では浸水体積率 $p=0$ 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 $L_G=0.44L$, 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 $L_G=0.45L$ である。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 となるようにおもりで調整した。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。

氾濫流水深が増加して車が流され始めるとビデオカメラを用い、マーカー追跡することで車の漂流速度の瞬間値 $U_d(t)$ を算出した。またビデオカメラの画像から氾濫流水深の瞬間値 $H_f(t)$ を算出した。表-2 に非定常な流れ場での漂流速度動画解析、抗力計測の水理条件を示す。

3. 地下駐車場模型の浸水実験

東海豪雨級の雨によって淀川が氾濫したときを想定した梅田地下駐車場の氾濫解析結果をもとに流入流量を決

定している。地上からのアクセス道から浸入した氾濫水によって駐車している車模型の漂流挙動を動画撮影した。本研究のような多層型の地下駐車場では時間とともに氾濫流水深が増加するが、地上からのアクセス道からの流入量と地下 2 階へのアクセス道からの流出量が同じになると氾濫流水深は変化しなくなる。

図-3 に定常状態に達したときの支柱無しケースと支柱有りケースの氾濫流水深 H_f の水平面コンターを示す。水深計測時には駐車場内に車模型を設置していない。

支柱無しケースでは地下からのアクセス道付近 (A) で高速流が駐車場内に流れ込むのがみられたが、氾濫流水深は小さい。地上からの高速流が壁にぶつかる領域 (B) では氾濫流水深が大きくなるのがみられた。地下 2 階へのアクセス道の付近 (C) でも同様に氾濫流が壁にぶつかり、氾濫流水深が大きくなっている。

氾濫流は図-3(c)のように氾濫流は地上から反時計回りに回りこむように地下 1 階を通り、地下 2 階に流れ込むため、地下駐車場の内側領域 (D) では氾濫流水深は小さい。

一方、支柱有りケースでも支柱無しケースと同様の傾向がみられ、壁付近の領域 (B, C) では氾濫流水深が大きくなっている。支柱無しケースと比べると支柱が占める体積分、全体的に氾濫流水深 H_f が大きくなっている。

次に地下駐車場内に車を設置した時の氾濫被害について考察する。図-4 は支柱無しケースにおける地下駐車場内の水没車の漂流挙動のスナップショットである。図-3(c)に示す領域(A, B, C)で氾濫水による車被害が大きかったことがわかった。地上からのアクセス道近く (A: 図-4(a)) では氾濫流が駐車車両に到達した瞬間に車が漂流するのが観察された。氾濫流が駐車車両に到達した瞬間には車両の下流側には氾濫水が存在しないため、上流側と下流側の静水圧差が大きくなったためだと考えられる。この領域 (A) に複数台の車を設置して実験すると、1 台目の車は漂流するが、2 台目の車は漂流しないため漂流衝突するのがみられた。(A) では時間が経過して氾濫流水深が増加すると車の漂流はみられなくなった。

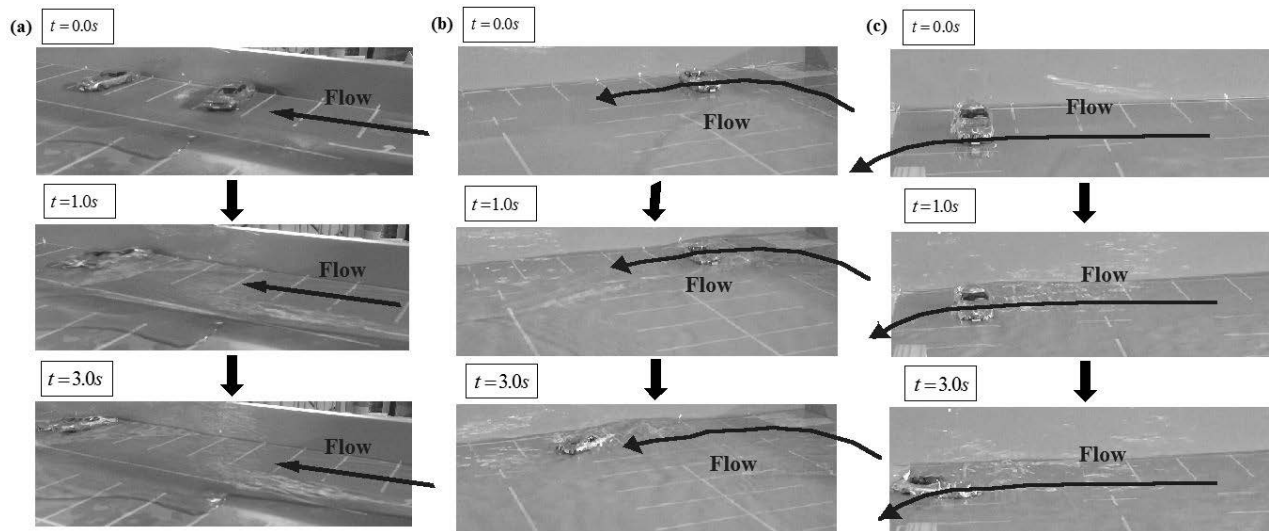


図-4 多層型駐車場(支柱無し)(a)地上からのアクセス道付近(A), (b)壁付近(B), (c)地下2階へのアクセス道付近(C)

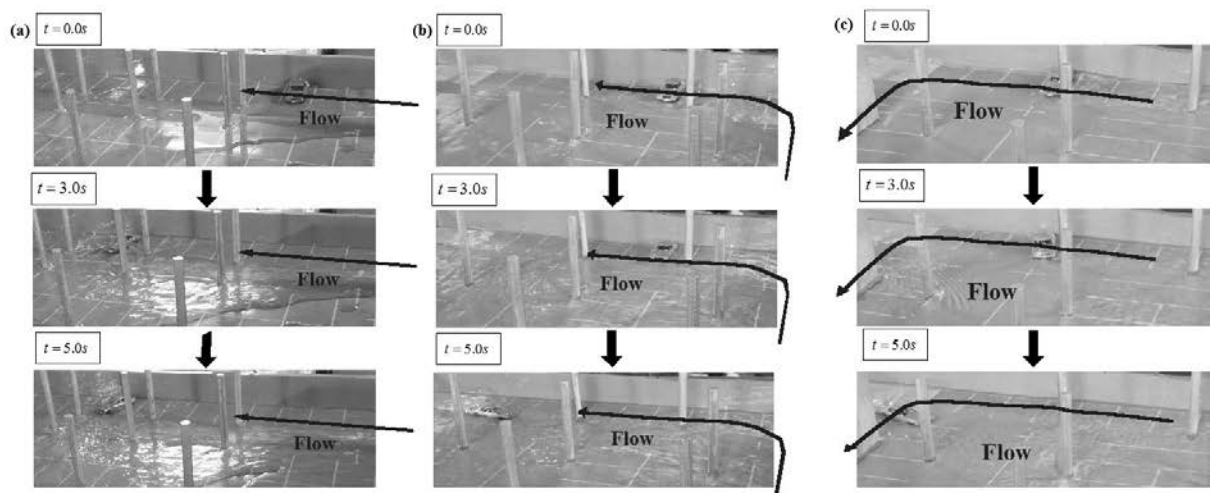


図-5 多層型駐車場(支柱有り)(a)地上からのアクセス道付近(A), (b)壁付近(B), (c)地下2階へのアクセス道付近(C)

これに対して、地上からの高速流が壁にぶつかる領域 (B) では氾濫流が駐車車両に到達した瞬間には車は漂流しないが、氾濫流水深が大きくなるとともに駐車車両が漂流し、反時計周りに漂流するのがみられた。地下2階へのアクセス道の付近 (C) でも同様に氾濫流水深が大きくなるとともに駐車車両が漂流する。特に (C) では地下2階へのアクセス道に漂流した車が流れ込んで落ちていくのがみられた。壁付近の領域 (B, C) に複数台の車を設置して実験すると、2台の車は浮力で同時に浮いて漂流するため漂流衝突はみられなかった。

図-5 は支柱有りケースにおける地下駐車場内の水没車の漂流挙動のスナップショットである。支柱有りケースでは地上からのアクセス道近く (A: 図-5(a)) で駐車車両が支柱無しケースよりも長い距離流されているのが観察される。これは支柱の影響でアクセス道からの氾濫

流の速度が大きくなったためだと考えられる。

また支柱有りケースでは支柱の影響で氾濫流が地下駐車場の内側領域 (D) に流れ込まないため壁付近の領域 (B, C) では漂流するまでの時間が短くなるのがみられた。

4. 氾濫流水深の時間変化を考慮した水没車の漂流挙動

前節のアクセス道付近 (A) で観察されたように通水初期に高速流によって車が漂流し、水深が増加すると漂流しなくなるケースが考えられる。本節では氾濫流水深が時間変化するときの水没車の漂流挙動について考察する。

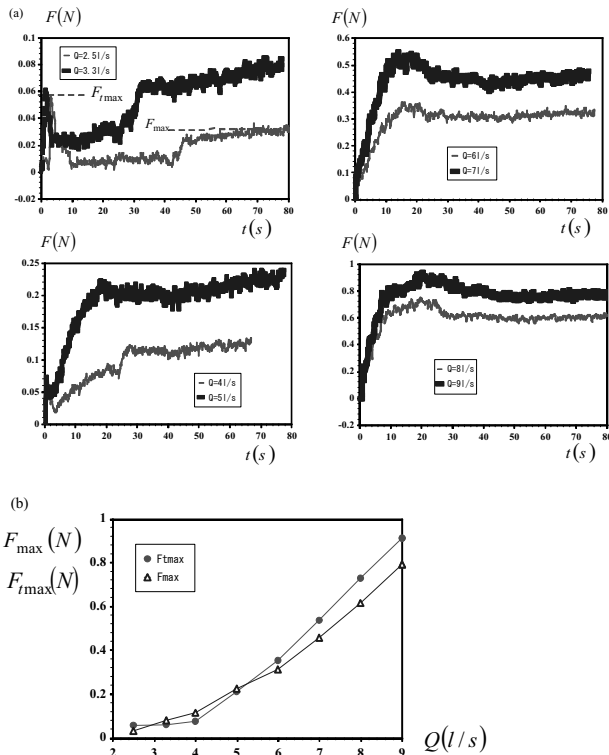


図-6 (a)車にかかる抗力の時系列変化 (b)車にかかる抗力の最大値と通水初期の抗力の最大値の比較

図-6(a)に氾濫流の水深が時間変化する流れ場での車(セダン型)に作用する抗力 $F(t)$ の時系列データを示す。 $Q=2.5 \text{ l/s}$ (実スケールに換算して $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$) のケースでは $t=3.0 \text{ s}$ において抗力は急激に増大しピーク値 $F_{\max}$ をとる。これは氾濫流が車に到達したときの車の下流側の氾濫水深は 0 なので、圧力差によって車にかかる抗力が増加していると考えられる。 $t=3.0 \text{ s}$ では抗力値は一度低下した後、緩やかに増加し $t=60 \text{ s}$ ではほぼ一定値 $F_{\max}$ に達する。これは氾濫流水深が増加し一定になったためである。これは図-4(a)や図-5(a)の結果と対応しており、通水初期に抗力が急激に増大することで水没車が漂流する可能性が考えられる。

流量を増加させたケースでも同様に通水初期に抗力が急激に増加する傾向がみられるが、流量の小さいケース ($Q=2.5 \text{ l/s}, 3.3 \text{ l/s}$) ほど顕著にはみられなかった。

図-6(b)に通水流量を変化させた各ケースの通水初期の抗力の最大値 $F_{\max}$ と定常状態に達したときの抗力の最大値 $F_{\max}$ を比較した。流量の小さいケース ($Q=2.5 \text{ l/s}, 3.3 \text{ l/s}$ (実スケールに換算して $3.3, 4.5 \text{ m}^3/\text{s}$)) では氾濫流到達時の抗力最大値 $F_{\max}$ が定常時の抗力最大値より大きくなっている。これに対して、流量の大きなケースでは $F_{\max}$ と $F_{\max}$ で流量の小さなケースほど差はみられない。

図-7 に氾濫流の水深が時間変化する流れ場での車(セダン型: $Q=3.3 \text{ l/s}$) の漂流車の移流速度の時系列変化 $U_d(t)$ を示す。車の漂流速度はマーカー追跡することで算出し

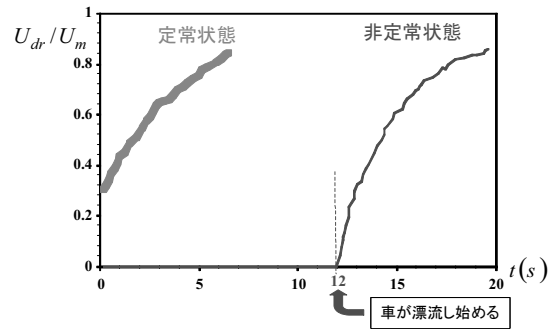


図-7 漂流車の移流速度の時系列変化

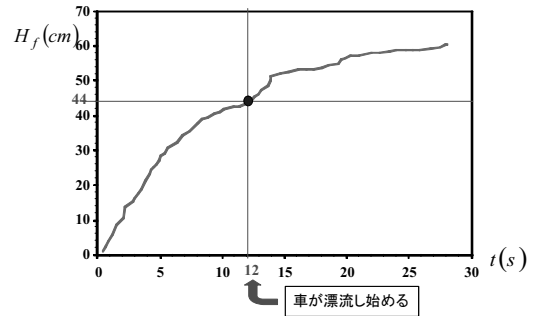


図-8 氾濫流水深の時系列変化

た。また図-7 には氾濫流の非定常性の影響について考察するために、定常状態(氾濫流水深が最大値 $H_f = 3.3 \text{ cm}$ に達した状態)の後に漂流させたときの漂流車の移流速度の時系列変化も併示している。値は氾濫流水深が最大値に達したときの断面平均流速 U_m で無次元化している。図-8 に図-7 と同時刻の氾濫流水深の時間変化 $H_f(t)$ を示す。 $t=12 \text{ s}$ に車の上流側の氾濫流水深が $H_f = 2.45 \text{ cm}$ (実スケールに換算して 44 cm) に達するとセダン型車が漂流し始めている。 $t=19 \text{ s}$ に漂流車の移流速度は最大値に達し、移流速度の最大値は $U_d/U_m = 0.9$ となった。

定常状態で漂流させた場合は初期状態で移流速度 $U_d/U_m = 0.3$ で、 $t=6.5 \text{ s}$ で漂流車の移流速度は最大値に達する。

図-9 に氾濫流水深が経時変化する流れ場での漂流車の移流速度の最大値 $U_{dr, \max}$ を示す。車の漂流最大速度は流量が増加すると大きくなっているが、同一の流量で比較してセダン型より SUV 型の方が漂流速度が大きくなる傾向が得られた。これは SUV 型車の方が流下方向の投影面積が大きいためだと考えられる。

図-10 に氾濫流水深が経時変化する流れ場での漂流判読図を示す。横軸の限界氾濫流水深 H は車が漂流し始めたときの氾濫流水深とした。定常状態の判読図は著者らのグループ(2015)⁹⁾のデータを用いた。

氾濫流水深が経時変化する流れ場では図-6 で考察したように通水初期に水压差によって車が漂流するため、定常状態のみを考慮した漂流判読図よりも同一の水深のケースで比較すると漂流限界速度 U_c が小さくなってい

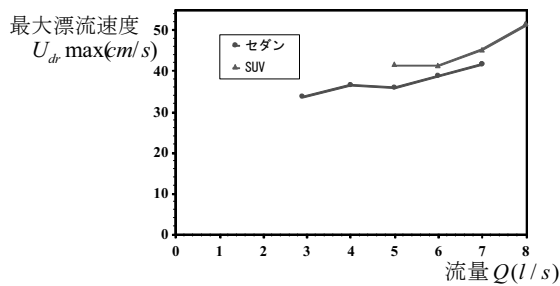


図-9 漂流車の移流速度の最大値

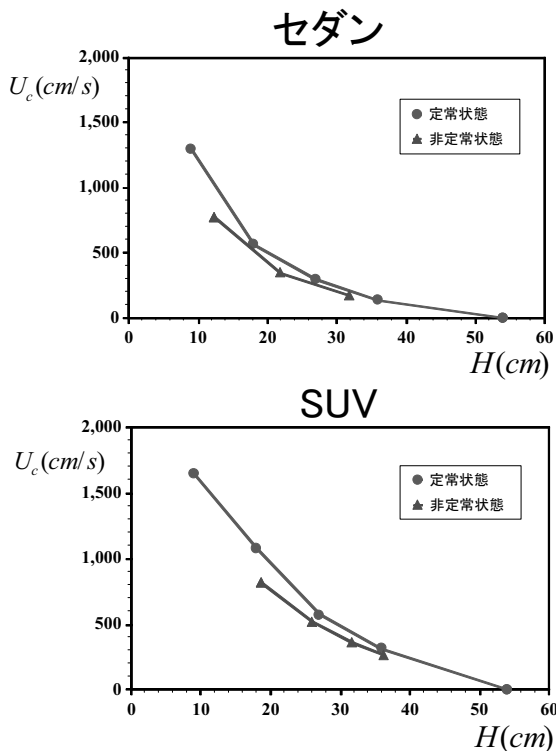


図-10 車の漂流限界判読図（実スケール）

る。

車種の影響について考察すると $Q=5.0\text{l/s}$ (実スケールに換算して $6.9\text{m}^3/\text{s}$) のケースではセダン型は $H_f=0.68\text{cm}$ (実スケールに換算して 12cm)、SUV 型車模型では氾濫流水深 H_f が $H_f=2.0\text{cm}$ (実スケールに換算して 36cm) で車模型が漂流し始めており、セダン型車模型の方が漂流しやすいことがわかる。

5. 結論

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、3種類の模型実験を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 地下駐車場模型を用いて氾濫流の挙動と駐車車両の漂流挙動について調べた。浸水流量は淀川外水氾濫

時を想定して設定した。地下駐車場が多層構造であるケースには地上からのアクセス道の下流側では氾濫流到達時に駐車車両の漂流するのがみられた。

- 2) 壁側の領域では氾濫流到達時には漂流しないが、時間とともに氾濫流水深が大きくなり、浮力によって車が漂流するのがみられた。支柱の影響により氾濫被害が大きくなるのがみられた。
- 3) 実際の氾濫流を想定して氾濫流水深が経時変化する流れ場で水没車にかかる抗力を計測した。氾濫流の車への到達時には車の前後の圧力差から車にかかる抗力が瞬間的に増加することがわかった。このことから氾濫流の流量が小さいケースでも氾濫流到達時に車が漂流する可能性が示唆された。本研究では氾濫流水深が経時変化する流れ場を考慮した漂流判読図を作成した。非定常時には定常状態のみを考慮した漂流判読図よりも同一の水深のケースで比較すると漂流限界速度 U_c が小さくなっている。
- 4) 漂流時の車をマーカー追跡し、水没車の漂流速度の時間変化を調べた。水没車の漂流速度は時間とともに増大し、最終的に周辺の水流速度の 90-95% に達することがわかった。

謝辞：本研究は公益財団法人関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団研究助成金（助成金番号2014R103, 都市水害時の氾濫水の挙動と水没車の漂流被害予測に関する実験的研究，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) 高橋和雄，高橋裕：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，1987。
- 2) 井上和也，戸田圭一，川池健司，栗山健作，大八木亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報，第45号B，pp.174-184, 2002
- 3) 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
- 4) Costa, G.S., Ishigaki, T., Morimoto, Y., Ozaki, T., Toda, K.: Drifting Condition of Motor Vehicle and Road Configuration during Flood, *Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, Vietnam*, 2014
- 5) 大西隆弘・岡本隆明・戸田圭一・石垣泰輔：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第20巻，土木学会・地下空間研究委員会，pp.147-154, 2015。