

氾濫時の車の漂流に関する水理実験

EXPERIMENT STUDY ON FLOATING CAR IN FLOODING

戸田圭一¹・石垣泰輔²・尾崎平³・西田知洋⁴・高垣裕彦⁵

Keiichi TODA, Taisuke ISHIGAKI, Taira OZAKI, Tomohiro NISHIDA and Yasuhiko TAKAGAKI

¹正会員 Ph.D. 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 博(工) 関西大学教授 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-35)

³正会員 博(工) 関西大学助教 環境都市工学部都市システム工学科 (同上)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁵正会員 独立行政法人 鉄道・運輸機構 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

In urban flooding, cars are floated and flushed away, which may cause heavy damage on cars and buildings or lose driver's life. In Nagasaki flood in 1982, many people died by car related accidents. It is very important to study car behaviors in flooding. Here, we studied the critical incipient condition and the subsequent floating condition experimentally, using the 1/10 and 1/18 scale car models. We also obtained the drag coefficient of partially submerged cars in the flooding flow. On the base of experimental results, we could draw the diagram of critical incipient condition of real car by flow velocity and water depth. According to the diagram, sedan typed cars are likely to be floated if the flow velocity exceeds 2m/s and the water depth exceeds 0.5m.

Key Words : urban flooding, partially submerged car, incipient motion, hydraulic experiment, drag force, floating car velocity

1. はじめに

1982年の長崎大水害時¹⁾のように、大規模な洪水氾濫時には車が流され、水難事故を含めて被害が甚大なものとなる。気候変動の下、極端な降雨事象が増大しており、神戸や長崎といった急傾斜地を含む斜面都市では、今後、洪水氾濫時の車に関係する被害の発生に十分注意を払っておかなければならない。都市域での洪水氾濫時に、どの程度の流れの状態が車が流され始めるか、またその後どのような漂流速度で流されるかは防災上、重要な情報であり、本研究は車模型を用いた水理実験をもとにそれらを明らかにしようとするものである。

車の漂流限界については、いくつかの先行研究がなされている。押川ら²⁾は、縮尺1/24の2種類の車模型(小型乗用車とSUV車)を水路に固定して通水し、流れに直角な方向の車模型に作用する流体力を三分力計によって計測し、水深毎の抗力係数、揚力係数を算出している。そして得られた係数をもとに、実際の条件下での車の漂流限界を、路面の静止摩擦係数、車の空隙率、乗車人員による重量補正を考慮したうえで水平方向の車に作用する力の釣り合いから求めている。一方、Shuら³⁾は、急に発

生する洪水流で車が流される事象を念頭におき、3種類の車模型(小型自動車、小型トラック、ワンボックスカー、いずれも縮尺1/18)を用いて水路で通水実験を実施し、流れと平行に設置された車が流され始める限界を求め、若干の補正を含めてその値を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。ただしShuらは急に車が流される事態を想定しており、車の空隙への氾濫流の浸入は考慮していない。

先行研究を踏まえ、ここでは、Shuらと押川らの手法を双方取り入れた形で車の漂流限界を求める。すなわち、Shuらと同様に車模型(縮尺1/10のセダン型小型自動車と縮尺1/18のミニバン(救急車))を設置して水理実験を行い、水深、流速を変化させた実験から直接、車模型の漂流限界を求める。そして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する。その後、実験で得られた抗力係数をもとに、押川らの方法に従い、実際の状況下での車の漂流限界を氾濫流の水深、流速の関数として表現する。なお、車の設置方向は基本的に流れの方向とする。そして得られた漂流限界指標の従来の氾濫解析結果への適用を図る。さらに漂流限界を超えた際の車模型の漂流速度を求めて実物値に換算し、氾濫流の流速との関係についても整理する。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内に設置された、幅1mの階段水路の下流3mの水平部と、それに続く、側面ブロック積みで延長部で、長さの合計10mの水平水路である(図-1参照)。

この水路の中央部分に写真-1に示す実物の1/10のセダンの車模型、写真-2に示す実物の1/18のミニバンの車模型を設置し、流水実験を行った。セダン模型の車種はスバルインプレッサ、ミニバンは救急車タイプのニッサンエルグランドである。セダン模型は重さ1215.5g、長さ0.47m、幅0.20m、高さ0.15mであり、ミニバン模型は重さ384.2g、長さ0.26m、幅0.10m、高さ0.12mである。模型の重さについては、実物との関係を分かりやすくするために、おもりをつけて補正を行い、実物との見かけの密度の比率が1となるようにした。ミニバンは補正の必要がなかったが、セダン模型の重さは1350gに調整した。

実験の手順について述べる。まず水路に整流板、車模型、ビデオカメラを設置し、カメラの映りをよくするために斜め前方から照明を当て、明るさの調節を行った。ビデオカメラは、模型の上方から流れ方向に沿って3台設置し、また模型前方にも1台設置した。さらに車模型の斜め前方からも1台の水カメラで撮影を行った。

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状態を見出した。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水路床に書かれた目盛(模型の設置箇所から下流に1m, 2m, 3mの地点)を模型が通過する時間を、ストップウォッチを用いて測定するとともにビデオ撮影を行い、漂流速度を求めた。実験での車の様子を写真-3に示す。

実験は、①サイドブレーキの有無、②車の向き、③下流端の堰の有無、の3つの条件を変化させて実施した。①のサイドブレーキは模型のタイヤをガムテープで固定

することで表現した。②の車の向きは水の流れ方向に対して0°、45°、90°の3パターンで実験を行った。③は下流端に堰を設け、水深を上げることで流速と水深の関係を変化させた。実験では堰の有無に対してあらかじめ水路の水深と流量の関係を求めておき、計測した流量をもとに水深を得た後、水深と流量から流速(断面平均流速)を算出した。これらのケースと漂流限界値を表-1に示す。表には、フルードの相似側に従い、実物値に換算した値もあわせて示す。車の幅を代表長として求めたレイノルズ数 Re は $2.9 \times 10^4 \sim 12.6 \times 10^4$ の範囲にあり、これはShuらの実験と同程度である。

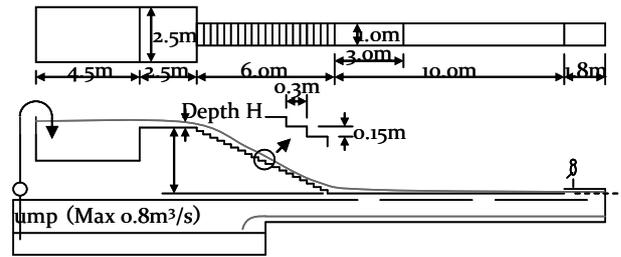
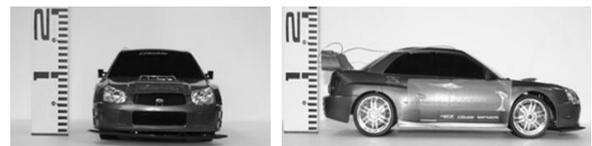


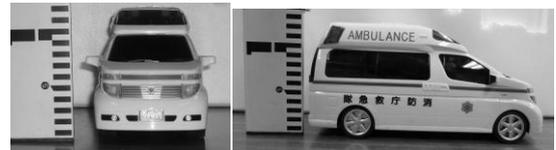
図-1 実験に用いた水路



(a) 正面

(b) 側面

写真-1 セダン模型 (縮尺1/10)



(a) 正面

(b) 側面

写真-2 ミニバン(救急車)模型 (縮尺1/18)

表-1 実験ケースと漂流限界条件

ケース	ブレーキの有無	向き(角度)	堰の有無	漂流限界条件 (括弧内の値は実物換算値)			
				セダン (縮尺1/10)		ミニバン (縮尺1/18)	
				流速(m/s)	水深(m)	流速 (m/s)	水深(m)
A	有り	0	無し	0.63 (2.00)	0.041 (0.41)	0.55 (2.35)	0.035 (0.63)
B-1	無し	0	無し	0.50 (1.57)	0.030 (0.30)	0.41 (1.74)	0.024 (0.43)
B-2	無し	90	無し	0.63 (2.00)	0.041 (0.41)	0.51 (2.16)	0.032 (0.57)
B-3	無し	45	無し	0.57 (1.80)	0.036 (0.36)	0.52 (2.19)	0.032 (0.57)
A'	有り	0	有り	0.38 (1.20)	0.069 (0.69)	0.37 (1.57)	0.067 (1.21)
B-1'	無し	0	有り	0.33 (1.05)	0.051 (0.51)	0.29 (1.24)	0.039 (0.70)

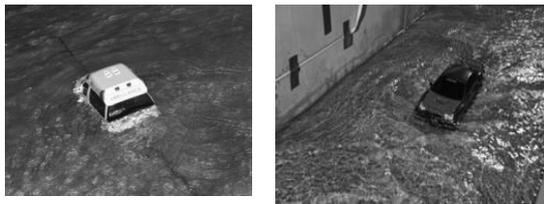


写真-3 実験時の車の様子



図-2 車模型に働く力

表-2 各条件での静止摩擦係数

模型	角度 (°)	サイドブレーキ	静止摩擦係数
セダン	0	無し	0.073
	0	有り	0.26
	90	無し	0.565
ミニバン (救急車)	0	無し	0.1
	0	有り	0.42
	90	無し	0.65

3. 漂流限界を求める際の抗力係数の算出

漂流限界については、実験での車模型にかかる水平方向の力の釣り合いから車に作用する流体力の抗力係数を車模型の車種、車模型の向きごとに水深の関数として求め、その係数をもとに実際の車の漂流限界を求めることを試みる。なお、車の方向は流れと0°、90°の角度のものを取りあげる。

実験において、車模型に作用する力は図-2のようになっており、このうち水路床と水平な方向に関して、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。

$$F = S = \mu(Mg - F_b - L) \quad (1)$$

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

$$F_b = \rho g V \quad (2)$$

と表わされる。ここに ρ : 水の密度、 V : 水中に水没している車模型の正味の体積である。また流体力 F は、抗

力係数 C_d を用いて、

$$F = 0.5\rho C_d U^2 A_x \quad (3)$$

と表現される。ここに U : 流速、 A_x : 流れに直角な方向の、車が水没している投影面積である。

(1)-(3)式より C_d を算定するにあたり、とくに考慮すべきものは、 μ と V である。 μ は、濡れたコンクリート面にばねばかりをつけた車模型を設置して、ばねばかりをゆっくり引き、模型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。各条件での μ の値を表-2に示す。 V は、車模型の内部構造から空隙を調べ、図-3に示すような V と水深 h (高さ) との関係を求めた。また揚力 L については、今回の実験方法ではそれを求めることができず、また押川ら²⁾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、ここでは、 L は考えないこととした。

このようにして車模型2種の抗力係数を算出した結果を図-4に示す。横軸に h/k (k は車模型の全高)、縦軸に抗力係数をとっている。図には参考として、押川らの Re の最も大きいケースでの抗力係数もあわせて示している。今回、流れと90°の方向の実験は、1ケースだけであるが、押川らの結果と比較するとほぼ同様かやや下回る値となっている。流れ方向(0°)の抗力係数は、両車種とも90°のものを下回る結果となっているが、流れに対する形状抵抗を考えれば妥当な結果と言えよう。なおセダン型の抗力係数は、 h/k が増えると値がかなり小さくなる。これは車模型が浮力の影響でかなり移動しやすくなったためと推察される。次章で、流れ方向に対する車の漂流限界の実現象への適用を考える際に、図に示すような、実

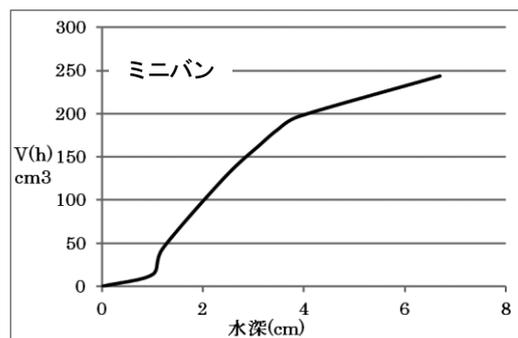
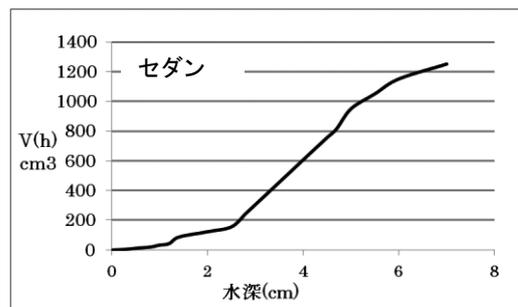


図-3 車模型の正味の体積と水深 (高さ) との関係

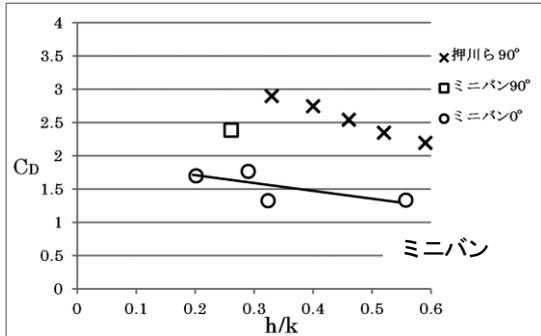
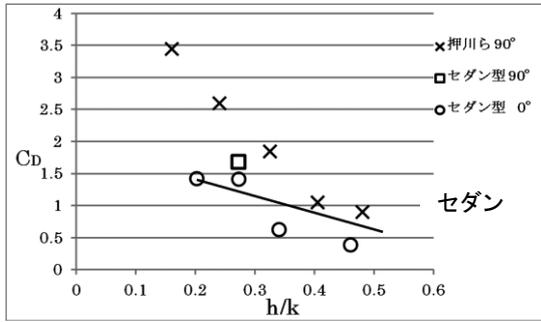


図-4 水深と抗力係数との関係

験結果を線形近似した関係式を用いる。ただしセダン型の適用範囲は、車の浮遊状況を考慮して $h/k < 0.5$ とする。

4. 漂流限界の実現象への適用

(1) 適用にあたっての留意点

実際の車について、流れ方向に設置された車の漂流限界を求めるには、前章で得られた抗力係数をもとに、(1)-(3)式から限界状態での水深と流速の関係を得ることができるが、ここで留意すべき点はいくつかある。

一つには、実物の車の静止摩擦係数 μ の評価である。この値は模型値と同じとは必ずしも言えず、過去の調査事例などに基づいて、その値を推定せざるを得ない。

二つ目は、車の空隙による正味の浮力の評価である。図-5に示すように水が車のエンジン部などの内部に入ると、その部分の浮力が減少することとなる。車模型では模型を精査してこの空隙部分を算出したが、模型は実物の車の空隙まで正しく再現しておらず、模型での空隙値を実物に適用できない。Shuら³⁾は、大きな流速で車が流されることを想定し、車の空隙による浮力減少を考慮していないが、例えば、車の重さを1tonとし、車のドアのノブより下の車の形を直方体とみなし、その底面積を仮に 8m^2 とすれば、水に浸かる部分の高さが 0.125m で車の重量と浮力が釣りあうこととなる。この高さは小さすぎると考えられ、車の内部に、ある程度水が入り込むと考えるのが妥当であろう。そこで、ここでは押川ら²⁾の考えに従い、車の空隙率 p (水没している車に水が入り込む空隙部分の体積 V_p /水没している車の見かけの体積 V_0)を導入し、 V を以下の式で表現する。

$$V = (1-p)V_0 \quad (4)$$

p は明らかに水深(高さ)の関数であるが、ここでは簡単のために一定値として取り扱う。

三つ目は、乗客や荷物の積載による重量の増加である。これも押川ら²⁾にならない、追加質量を M' として、(1)式の車の質量 M に M' を加えて評価する。

(2) 漂流限界判読図の作成

上記の点を考慮して、横軸に流速、縦軸に水深をとり、氾濫時の実物車の漂流限界状態を判読できる図を作成した。今回の実験で得られた抗力係数をもとに漂流限界を算出している。なお車が漂流しやすい条件として、車が流れと平行に設置されている場合を対象としている。

図-6は、押川ら²⁾が求めた判読図と同じ μ, p, M' の条件で、漂流限界を算出した結果である。参考までに押川らの結果もあわせて示している。押川らは、流れに直角な方向に設置された車しか扱っておらず、また車の種類も今回とは異なるので単純な比較はできないが、セダン型の場合には、押川らの結果とほぼ同程度の値となっている。ミニバン型(救急車)は、押川らの値を下回る値となっている。この場合は、車の設置方向の違いによる影響が大きいようである。得られた限界曲線の流速、水深

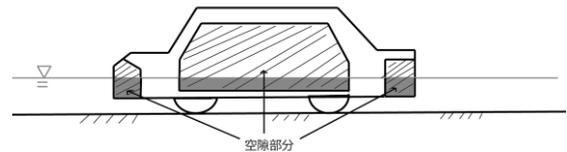


図-5 車の空隙部分

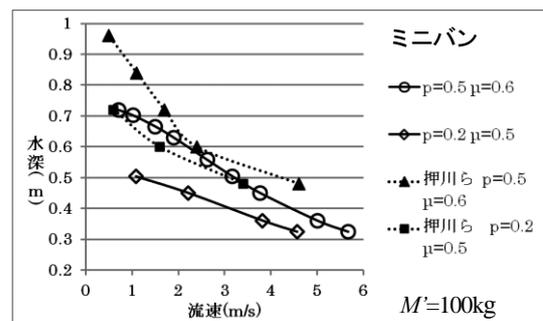
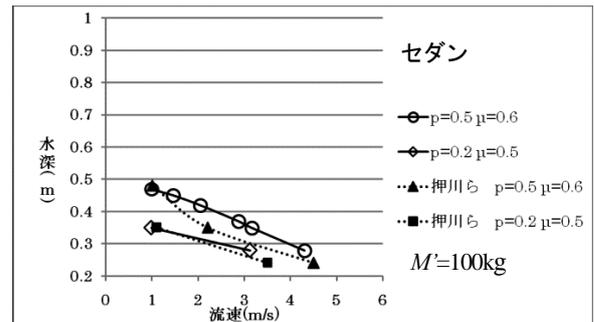


図-6 漂流限界判読図(押川らの条件に準拠)

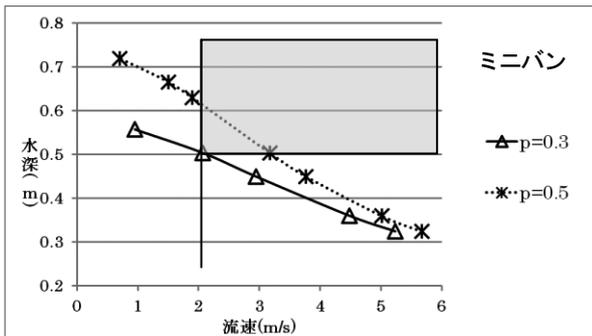
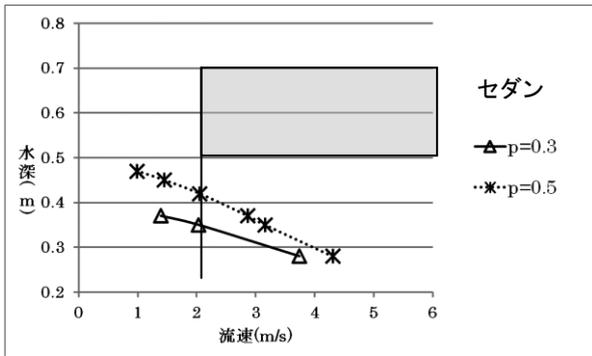


図-7 漂流限界判読図 ($\mu=0.6, p=0.3, 0.5, M'=100\text{kg}$)

の関係を見る限り、ある程度現実的な範囲にあるので、概ね妥当ではないかと判断される。

μ, p, M' のパラメータを変化させて感度分析的な検討を行うと、押川らの結果と同様、これらのパラメータの値が増加するにつれて漂流限界を示す曲線は右上に移動する、すなわち漂流しにくくなる。またその変化は、とくに p の変化に対して敏感である。またミニバン型は、セダン型の小型車よりも漂流しづらい。

$\mu=0.6, p=0.3, 0.5, M'=100\text{kg}$ の条件での危険判読図を図-7に示す。図より、 $U > 2.0\text{m/s}$ 、かつ $h > 0.5\text{m}$ の範囲では車が漂流しだす危険性が高くなる。とくにセダン型の車では明らかに漂流すると考えられる。これは、 $p=0$ を仮定しているShuら³⁾の小型自動車、小型トラックの漂流限界の結果とも一致している。また流れの方向は異なるものの、押川らの小型自動車の結果も同様の結果を示している。

(3) 氾濫解析結果への適用

得られた危険判読図を、大都市域での外水氾濫解析結果に適用し、氾濫した道路上で車が漂流するような現象が起こる可能性があるかどうかを検討してみる。

尾崎ら⁴⁾は、京都市内で御池大橋地点から鴨川が最大 $100\text{m}^3/\text{s}$ 溢れるという外水氾濫を想定したときの市内道路での氾濫流の様子を氾濫解析により調べている。図-8に示す解析対象区域は、南北方向におよそ1/200の勾配を有している。今回、氾濫水の流速ならびに水深の分布を再整理した。その結果、対象領域の多くの道路で、流



図-8 京都市内の解析対象区域

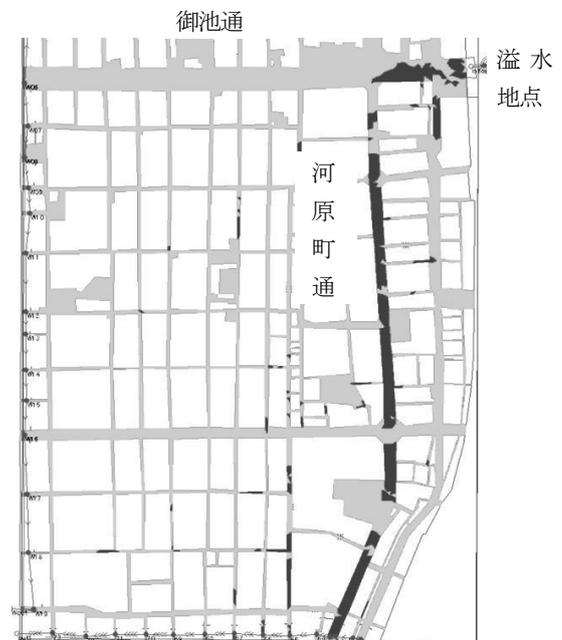


図-9 $U > 2.0\text{m/s}$ 、かつ $h > 0.5\text{m}$ の氾濫流の発生箇所

速 U が 1.0m/s を超える箇所が現れた。 U が 2.0m/s を超える区間も含まれている。このうち、図-9の黒く塗られた箇所は、 $U > 2.0\text{m/s}$ 、かつ $h > 0.5\text{m}$ の氾濫流が発生する、車の漂流にとって明らかに危険と考えられる箇所である。市内の東西方向の幹線道路である御池通の溢水地点近傍、そして南北に走る幹線道路の河原町通の広い区間が該当する。

なお、図-7の判読図よりわかるとおり、ここで示した流速、水深の組み合わせの条件以外でも車の漂流限界を超える場合があることから、さらに広い範囲で車が漂流する可能性があることに注意が必要である。また、このような氾濫で車が漂流した後は、漂流車が衝突して重なり合うような危険性も予想される。

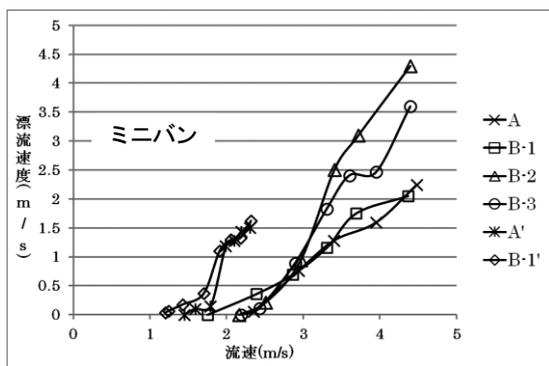
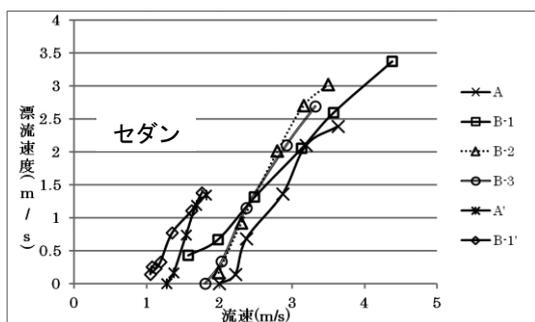


図-10 流れ場の流速と漂流速度との関係

5. いったん漂流したあとの車の漂流速度

図-10にセダン型、ミニバン型それぞれの模型の漂流実験結果を示す。横軸に流れ場の平均流速を、縦軸に車の漂流速度を実物換算した値で示している。

両者とも、堰が設置されて水深が大きいケース（A', B-1'）では、車は小さな平均流速で漂流し始める。またサイドブレーキがあるケース（A, A'）では、堰の有無にかかわらず、漂流し始めのときは、漂流速度は小さい傾向にあるものの、流れ場の平均流速が大きくなるにつれて、サイドブレーキのない場合（B-1, B-1'）との差はほとんどなくなる。

セダン型では、最初の車の方向の影響はほとんどみられないが、ミニバン型では90°（B-2）、45°（B-3）のときの漂流速度が0°（B-1）のときより大きくなっており、方向によるばらつきが見られる。セダン型の車の漂流速度は、流れ場の流速が大きくなるにつれて、概ね、その60～70%程度になる。

6. おわりに

車模型が漂流する限界となる条件を実験的に見出した。その後、漂流限界を超えた条件での車模型の漂流速度を

計測した。車に作用する流体力の抗力係数を、水深の関数として求め、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) 流れに直角な方向の車の抗力係数については、押川らの結果とほぼ同様かやや下回る値が得られた。また流れに平行な方向の抗力係数は直角方向のそれを下回る値となった。

(2) 得られた抗力係数をもとに実物に換算した漂流限界判読図を作成すると、氾濫流の流速が2m/sを超え、かつ水深が0.5mを超えるとセダン型の小型自動車が漂流する危険な状態になることが明らかとなった。また判読図の結果を、過去に実施した京都市域での氾濫解析結果に適用したところ、車の漂流に関する危険箇所が見出された。

(3) 漂流実験より、セダン型の車の漂流速度は、流れ場の流速が大きくなるにつれて、その60～70%程度になる。

なお、馬場ら⁹⁾が実物大の車模型を用いた避難体験実験で指摘しているように、地上からの水深が75～80cmで、水圧のためにセダン型の小型車の運転席からの避難が困難となる。流速が小さくても水深が大きくなると、車の漂流とは別のかたちで水難事故にあう危険性があることにも心しておかねばならない。

謝辞：本研究を実施するにあたり、実験で協力いただいた京都大学防災研究所技術室の吉田義則氏、（株）上田メカニクスの谷美智成氏、ならびに関西大学環境都市工学部環境防災水工学研究室の学生達に心から謝意を表します。

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) 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.
- 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) 尾崎平, 森兼政行, 石垣泰輔, 戸田圭一: 市街地外水氾濫解析への分布型解析モデルの適用性 - 模型実験と数値解析結果の比較 -, 下水道協会誌, Vol.47, No.575, pp.93-102, 2010.
- 5) 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一, 中川一: 水没した自動車からの避難に関する実験的研究, 水工学論文集第53巻, 土木学会水工学委員会, pp.853-858, 2009.

(2012. 4. 5受付)