

京都大学工学部
 京都大学大学院工学研究科
 京都大学大学院工学研究科

学生員 ○大西孝弘
 正会員 岡本隆明
 正会員 戸田圭一

1. はじめに

近年、発生頻度を増している豪雨氾濫で車が漂流、流失してしまうという被害が報告されている。よって、本研究では、車の漂流限界速度を実験的、理論的手法の双方から求め、その妥当性を確認した後、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作成する。そして、実河川における氾濫解析結果と組み合わせ具体的な地域での車の漂流の危険性を評価する。

2. 実験手法および水理条件

車にかかる抗力を計測する実験装置図を図-1 に示す。実験水路として、全長 10m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型水路を用いた。H は水深、k は車模型の高さである。図のように台車と電子ばねばかりを用いて車にかかる抗力を計測した。車模型は SUV 車(1/18)とセダン型小型車(1/16)を用いた。水理条件は、水深 H は SUV 型：4cm~14cm、セダン型：3cm~9cm とし、断面平均流速は SUV 型、セダン型ともに 20cm/s~100cm/s に変化させた。また、車模型は流れに対して 0 度、90 度、180 度に設置して実験を行った。この実験で求めた抗力をもとに次式を用いて抗力係数 C_D を求めた。

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

ここで、F：流体力、 ρ ：水の密度、 U_m ：断面平均流速、 A_x ：流れに垂直な方向の車の水没している投影面積である。 C_D を水深 H の関数として求めた。次に、底面摩擦力と抗力のつり合い式を用いて水深ごとの漂流限界速度 U_c を求めた。

$$F = \mu(Mg - F_b) = 0.5\rho C_D U_c^2 A_x \quad (2)$$

$$F_b = \rho gV(1 - p) \quad (3)$$

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、V：水中に水没した車の体積、p：車の空隙率である。

次に、実験的に漂流限界速度 U_c を求める実験装置を図-2 に示す。実験水路は上と同じものを用いた。水理条件は SUV 型、セダン型ともに水深 2cm~4cm、流速 10cm/s~75cm/s である。車模型は流れに対して 0 度、90 度、180 度に設置した。また、ブレーキの有無に関しては①ブレーキなし②サイドブレーキ③全ブレーキの 3 種類行った。水理条件を表-1 に示す。実験の際ブレーキに関しては、サイドブレーキは後輪をテープで固定し、全ブレーキは全輪をテープで固定した。

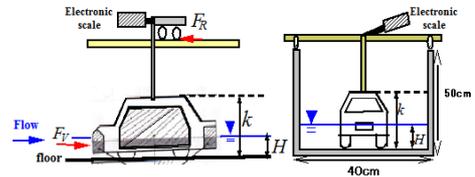


図-1 実験装置図(抗力計測)

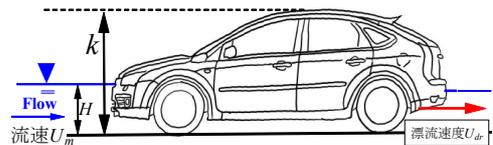


図-2 実験装置図(漂流限界)

表-1 水理条件

<SUV型>

水深 H(cm)	相対水深 H/k	Series 1				Series 2				Series 3			
		向き	U_m (cm/s)	Re	Fr	向き	U_m (cm/s)	Re	Fr	向き	U_m (cm/s)	Re	Fr
2.0	0.1	0	22.5	31500	0.19	90	22.5	31500	0.19	180	22.5	31500	0.19
		0	31.25	43750	0.27	90	31.25	43750	0.27	180	31.25	43750	0.27
		0	45	63000	0.38	90	45	63000	0.38	180	45	63000	0.38
		0	60	84000	0.51	90	60	84000	0.51	180	60	84000	0.51
4.0	0.46	0	75	105000	0.64	90	75	105000	0.64	180	75	105000	0.64
		0	10	7000	0.12								
		0	20	14000	0.24								
		0	30	21000	0.36								
		0	40	28000	0.48								

<セダン型>

水深 H(cm)	相対水深 H/k	Series 1				Series 2				Series 3			
		向き	U_m (cm/s)	Re	Fr	向き	U_m (cm/s)	Re	Fr	向き	U_m (cm/s)	Re	Fr
2.0	0.1	0	22.5	20250	0.24	90	16.25	14625	0.17	180	16.25	14625	0.17
		0	31.25	28125	0.33	90	18.75	16875	0.20	180	18.75	16875	0.20
		0	45	40500	0.48	90	22.5	20250	0.24	180	22.5	20250	0.24
		0	60	54000	0.64	90	31.25	28125	0.33	180	31.25	28125	0.33
4.0	0.38	0	75	67500	0.80	90	45	40500	0.48	180	45	40500	0.48
		0	10	5000	0.14	90	60	54000	0.64	180	60	54000	0.64
		0	20	10000	0.29	90	75	67500	0.80	180	75	67500	0.80
		0	30	15000	0.43								
		0	40	20000	0.57								

3. 実験結果

実験値から算出した抗力係数を図-3 に示す。図-3 には比較のため他研究者の結果も併示した。本研究の抗力係数の値は他の研究者の結果と同じオーダーに($C_D=2.0-4.0$)になった。また、2 種類の車の流れに対する角度が 0 度の漂流限界速度の実験結果を図-4 に示す。比較のため図-3 の抗力係数から算出した U_c の計算値も併示している。この図からも分かるように本研究において、理論的に求めた漂流限界速度と実験的に求めた漂流限界速度は、浮力よりも流れの影響が大きい場合において、概ね一致してお

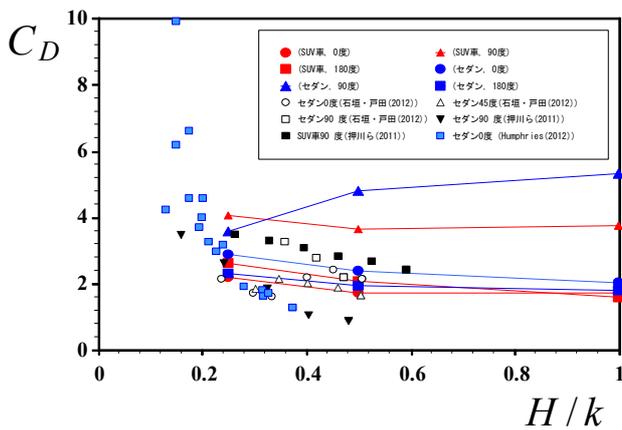


図-3 抗力係数

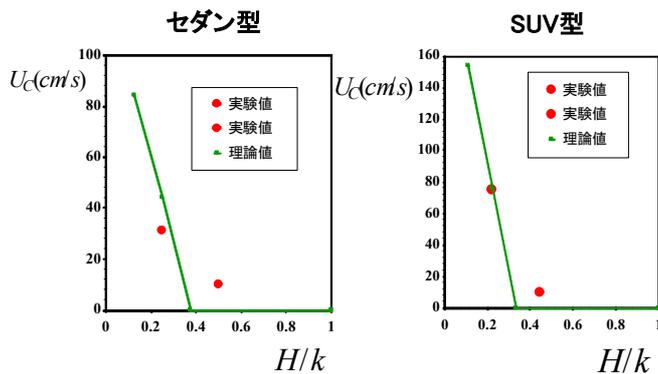


図-4 漂流限界速度の実験値と理論値 比較

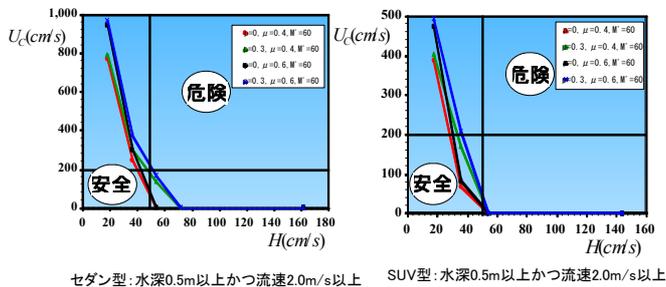


図-5 漂流限界判読図

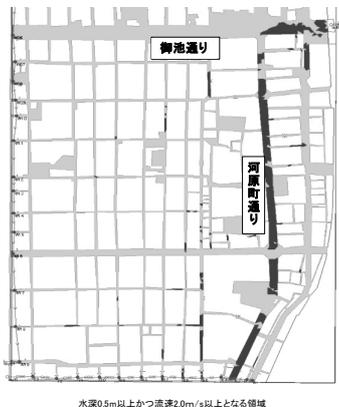


図-6 氾濫解析結果での漂流可能性

り、理論的アプローチの妥当性が確認された。

また車の漂流実験の際に見られた漂流車の興味深い挙動が2つあり、1つ目は漂流する際に後輪

または全輪が浮くという現象である。これは、車の重心位置が前方にあるためである。後輪が浮くケースでは水没体積が減り、浮力が減少するため漂流限界速度 U_c は大きくなる。2つ目は90度、180度で漂流限界を越えた車は回転して0度に戻るという現象である。これは、風見鶏効果と重心が前にあるためであると考えられる。ここで風見鶏効果とは、物体が受ける抵抗の少ないほうへと方向を変えするという効果である²⁾。

4. 漂流限界の実現象への適用

図-5 には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示す。実スケールへの換算にはフルード相似則を用いた。図-5より空隙率 p 、静止摩擦係数 μ がどの程度の値をとると、この氾濫では流されてしまうか、つまりどの程度水が車に浸入したり、路面とタイヤの間の摩擦係数の値がいくらであると流されてしまうかを読み取ることができる。また、この氾濫ではセダン型の方がSUV型よりも流されやすいことも分かる。

次に、図-5に示す判読図を実河川の氾濫解析結果と組み合わせて具体的な地域での車の漂流の危険性を評価する。ここでは、尾崎ら³⁾の氾濫解析結果を用いて鴨川が御池大橋から最大で $100\text{m}^3/\text{s}$ で溢れる外水氾濫を想定する。図-6に対象地域の水深 0.5m 以上かつ流速 2.0m/s 以上となる領域を黒色で示した。黒色の領域では車が漂流する危険性が高いことが分かる。

このように、実河川の氾濫解析結果と組み合わせることで、氾濫が起きたとき車が漂流、流失してしまうのを事前に予測することができる。

5. おわりに

本研究では、冠水時の自動車通行の危険性を評価するために模型実験による水理実験を行った。その結果セダン型とSUV型を比べるとセダン型の方が流されやすいことがわかった。今後の課題としては、本研究ではSUV型とセダン型の2種類のみ扱っているため今後はより多くの種類の車について漂流限界を求めていくことが考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 宇宙航空開発研究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
- 3) 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