

水没した自動車からの避難の難しさ（その 2）

馬場康之・石垣泰輔*・戸田圭一

* 関西大学環境都市工学部

要 旨

本報では、自動車水没時におけるスライドドアを通じた避難行動について、実物大の自動車模型を用いた避難体験実験、およびスライドドアを開けるために必要となる力の計測結果について報告するものである。内水氾濫時に、氾濫水が地下駐車場や道路・鉄道下のアンダーパスに浸入した際には、車から人が脱出できない事態が発生し、場合によっては人的被害が発生することもある。本実験で用いた自動車模型は、軽自動車のワンボックスタイプである。避難体験実験では運転席ドア（横開き）とスライドドアからの避難に関する体験実験を被験者の協力を得て行い、スライドドアについては開けるために必要な力の計測をロードセル、手動ウィンチを用いて行った。本実験においては、スライドドアからの避難が困難になる水深条件は、先だって行われたセダンタイプの自動車を用いた実験結果とほぼ同等であることが示された。

キーワード：都市水害、水没車、避難実験、実物大模型、スライド式ドア

1. はじめに

近年、降雨強度の強い雨が局地的に降る事例が散見されるようになり、雨水の排水能力を上回る降雨により短時間のうちに内水氾濫の被害が発生することがある。特に、都市域は急速な都市化に伴う土地利用形態の変化により、雨水の流出がより早期に、かつ規模が大きくなる傾向のあることが指摘されている。その結果、都市化以前と比べて内水氾濫発生の危険性も増大することとなり、氾濫の発生時には周辺よりも相対的に低い場所で浸水被害が発生し、自動車が水没する事故が何件か報告されている。

先の報告（馬場ら、2009、2010）では、セダンタイプの自動車模型を用いて行われた避難体験実験、および自動車水没時の安全な避難行動についての考察を行った。ここでは、浸水時のスライドドアからの避難行動に関する避難体験実験、さらにはスライドドアを開ける際に必要となる力の計測に関する実験結果について報告する。

なお、本実験においても、車体の水没状況（水没初期はエンジン等のある重い方向に傾くなど）や車内の浸水状況によって、ドアの内外から作用する水圧の状況が変化することについては考慮しておらず、

ドアの外側から作用する水圧のみを想定している。

2. 実験装置および方法

実験に用いた実物大の自動車模型の概要を **Fig. 1**, **Photo 1** に示す。装置は小型のワンボックスタイプの自動車と浸水状況を再現するための水槽（図中赤枠内）および給排水設備から構成され、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ている。

実験装置に使用された自動車は5ドアの小型のワンボックスカー（長さ3.4m、幅1.5m）であり、床面に固定されている。水槽（長さ6.0m、幅1.5m）は自動車の運転席側に設置されており、浸水深は床面から最大1mまでの間で設定できる。

水槽内の水深は、水槽の一部に設置された角落しの高さを変えることで調節され、角落としから越流した水は低水槽を経て、ポンプにより再び模型に循環される。水を循環した状態で実験を行うことにより、ドアを開けた際に多量の水が自動車内部に流れ込んで、水槽側の水深が大きく低下して、ドアに作用する水圧が急激に変化することを最小限に抑えている。

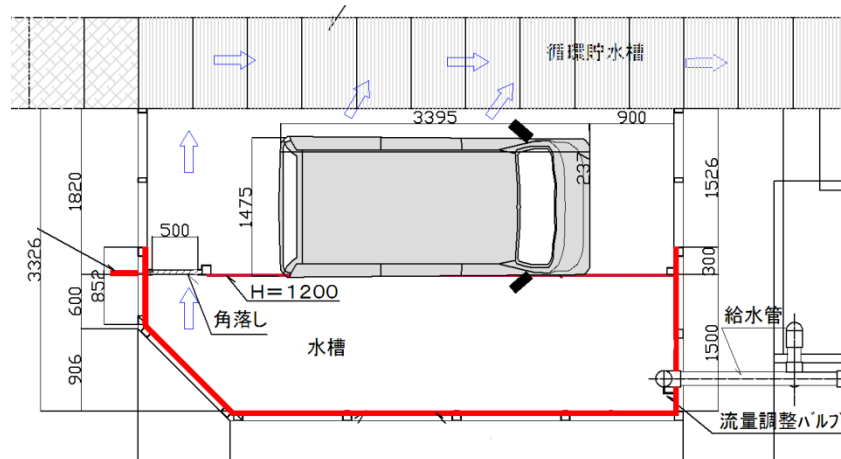


Fig. 1 Experimental set-up

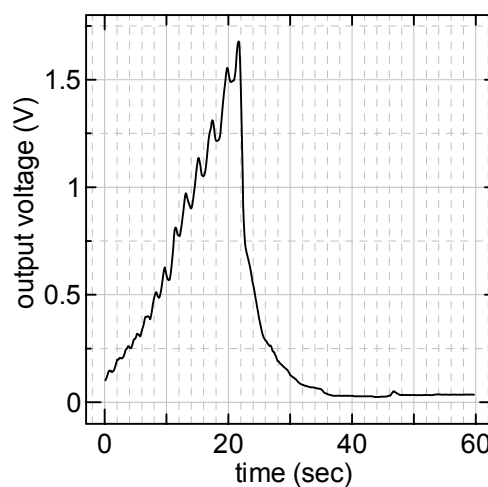


Fig. 2 Measurement result of pulling force



Photo 1 Real scale car model

避難体験実験では、水槽内の水深を所定の条件に設定した後、被験者が一人ずつ自動車模型に乗り込み、運転席ドアまたはスライドドアを通じて車外(水槽側)へ移動する。実験時には、車外への移動の可・不可の判定、および実験開始から身体が車外に出るまでに要した時間(避難所要時間)の計測を行った。

ドアから車外に出ることができた被験者数の全被験者数に対する割合を避難成功率として、実験条件毎に整理した。また避難所要時間の計測は、担当者を決めて計測されており、同一の計測条件が確保されるよう配慮した。

本実験では、スライドドアを開ける際に必要となる力の計測も行った。力の計測には、ロードセル、手動式ウィンチを用いた。ロードセルからの出力電圧と力の関係については、ばねばかりを用いた検定実験を事前に行った。**Fig. 2**は力の計測結果の一例である。手動式ウィンチを使用しているため、ドアを引く力が段階的に増加している。実験中、ドアが開いた時点を複数名により確認し、ドアが開いた時点と計測値が最大値となるタイミングがほぼ対応することがわかっている。

3. 自動車からの避難体験実験

スライドドアからの避難体験実験は、2010年8月3日、4日に行われた。被験者数は全27名であり、男性



Photo 2 Evacuation experiment (sliding door)

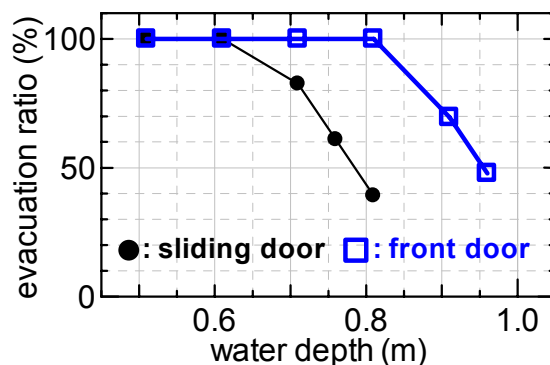
23名、女性4名であり、そのほとんどが大学生である（平均年齢：男性25.6 歳、女性21.7 歳）。実験（Photo 2）では、運転席ドア（一般的な横開き）とスライドドアの両方において、ドアを通じての車外への避難行動の可否について実験を行った。水深条件は、以下の通りである。なお、本実験では女性の被験者数が少数であるので、以下で示す実験結果では男性のみの結果を示す。

運転席ドア：0.51m, 0.61m, 0.71m, 0.81m, 0.91m, 0.96m（6段階）

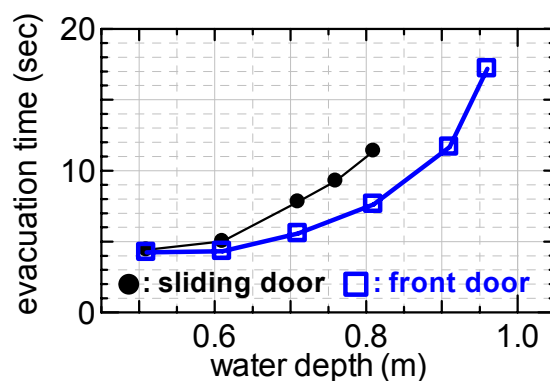
スライドドア：0.51m, 0.61m, 0.71m, 0.76m, 0.81m（5段階）

※水深は、床面を基準とする※

Fig. 3には、避難成功率と避難に要した時間と水深条件の関係をそれぞれ示す。避難成功率は、ドアを開けて避難できた被験者数を全被験者数で除したものであり、所要時間は避難開始から自動車の外に完全に出るまでの時間である。車外の水深の上昇に伴って、避難成功率の減少、避難に要する時間の増加が確認できる。また、運転席ドアとスライドドアの



(a) evacuation rate through the front door and sliding door



(b) evacuation time through the front door and sliding door

Fig. 3 Experimental result of evacuation

結果（避難成功率）を比較すると、スライドドアからの避難は運転席ドアからの避難よりもより困難であることがわかる。本実験装置では、運転席ドアの面積がスライドドアよりも小さく、水深に応じてドアに作用する水圧が相対的に小さいことが、両者の実験結果の違いを生む要因の一つである。

もう一点、運転席ドアとスライドドアの大きな違いは、ドアの開き方が挙げられる。一般的な横開きのドアは、回転軸周りにドアが回転することで開閉し、浸水時の避難行動においてはドアに作用する水圧と正反対の方向（外向き）に力を加えてドアを開け始めることになる。一方、スライドドアは自動車側面をレールに沿って、ほぼ平行に移動する。ただし、開け始めの段階では、ドアが後方に移動するとともにドアが外向きに移動する。スライドドアの開き始めの移動軌跡を示したものがFig. 4である。Fig. 4では、自動車右側のスライドドアの移動軌跡を上から見た様子を示しており、黒色実線はドアの初期位置、青色実線はドアが車体に沿って平行移動に移る位置を示している。黒色と赤色の丸印は、ドアの前端、後端の移動軌跡を示しており、図中灰色の破線はドアの開き始めのごく初期の段階におけるドアの

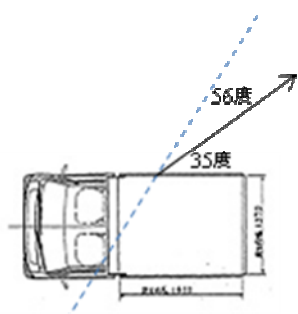
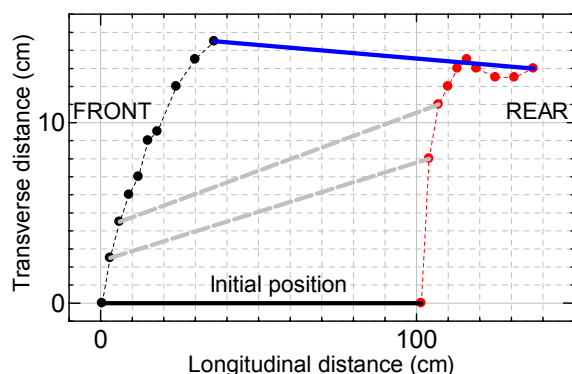


Fig. 4 Movement track of the sliding door (top view)

位置を示している。図から、スライドドアは開き始めの段階で10数cm程度外側に移動することがわかる。特に、スライドドア後端が外側に移動する割合は前端よりも大きく、本実験装置では後端部は最大56度（図中横軸から反時計まわり）の角度で移動することが確認されている。スライドドアが外側に膨らむ動きは、ドアに作用する水圧に逆らう方向となる。従って、ドアを開ける初期段階において、十分な外向きの力により水圧に対抗し、ドアを外側に移動させることができなければ、スライドドアを開けることができなくなる。

避難体験実験結果より、運転席ドアでは床面からの水深が80cmを超えた段階、スライドドアでは水深が60cmを超えた段階で避難成功率が減少、すなわちドアを通じて車外に避難できない被験者が存在することが示された。ドア下端までの高さが床面から31cmであるので、スライドドアではドアが30cm程度水没すると避難行動が徐々に難しくなる状況を確認できる。この結果は前報で示されたセダントタイプの自動車からの避難体験実験とほぼ同等である。運転席ドアについては、床面から80cm程度、ドア下端から50cm程度で避難行動が難しくなっている。

ただし、上で示した実験結果は成人男性（ほとんどが20代の大学生）によるものであり、女性の被験者や年少者、高齢者が避難する状況を考え合わせると、避難が困難となる水深条件は本実験結果よりも小さくなることが予想される。

4. スライドドアを開ける力の計測結果

浸水時のスライドドアを開けるために必要となる力を、ロードセル、手動式ウィンチ等を用いて計測した。スライドドアを引く位置は、スライドドア後端中央、ドアを移動させるためのレールと同じ高さである。また、力の計測時は、車体に対して35度開いた角度でスライドドアを引いて計測し、計測された力の最大値を、ドアを開けるために必要な力として整理した。

実験時の水深条件、計測された力などをTable 1に示す。計測された値（単位：kgf）は、車体後方35度方向の力であるので、①側方向き、②自動車後方向きの成分をそれぞれ求めている。

ドアに作用する水圧に対して働くのは側方向き（外向き）の成分であり、それらの力の大きさはTable 1に示す通りである。これら側方成分の力とドアに作用する静水圧の割合は、水深が小さいケースを除くと4割弱～5割弱程度（38～48%）となる。これをセダントタイプの自動車を対象に行われた実験（馬場ら、2010）と比較すると、セダントタイプの自動車の前部ドアを開けるために必要な力は作用する水圧の4割を少し下回る程度（38～39%）であるので、スライドドアを開ける際にはセダントタイプのドアの場合よりもより大きな割合の力が必要になることがわかる。

ここで、スライドドアの開き方に着目すると、開き始めの段階では後方に移動すると同時に側方に膨らむ方向（外向き）にもドアが移動し（Fig. 4参照）、ドア全体が10数cm外側に移動した後、車体に沿って後方に移動する。このように、スライドドアは開き始めの段階にガイドレールに沿って外向きにも移動する。スライドドアに作用する水圧はドアに直角に外側から内向きに作用するので、ドアの移動軌跡においてドアが外側に移動する段階、すなわちドアの開き始めの段階において水圧に対抗してドアを開けるための力が必要となる。

スライドドアを後方に移動させる際、ドアを外側に押し出す力はガイドレールから受ける反力が挙げられる。ガイドレールから受ける反力の大きさは次のように推定することができる。ドアを後方に移動させる力は、ガイドレール上においてレールに沿う向きとレールに直交する向きに分解することができる。分解された力のうち、レールに直交する方向の力の大きさは、スライドドアがレールから受ける反力に相当し、その力の側方成分（外向き）がドアを外向きに押し出す力に相当すると考えられる。

Fig. 4に示すスライドドアの移動軌跡から、スライドドアは前端に比べて後端が開き始めの段階で大き

Table 1 Experimental results of pulling force

	P		①	①÷P	②	②-2	②-3	①+②-3	(①+②-3) ÷P
水深 (m)	全水圧 (kgf)	計測値 (kgf)	側方 成分	水圧との 比	後方 成分	レール 直交成分	側方 成分	側方 合計	水圧との 比
0.47	11.86	2.26	1.29	0.109	1.85	1.53	0.86	2.15	0.181
0.57	31.64	17.44	10.01	0.316	14.29	11.85	6.62	16.63	0.526
0.66	57.76	39.03	22.39	0.388	31.97	26.51	14.82	37.21	0.644
0.67	61.15	40.86	23.43	0.383	33.47	27.75	15.51	38.95	0.637
0.74	87.69	60.82	34.88	0.398	49.82	41.30	23.10	57.98	0.661
0.77	100.57	84.00	48.18	0.479	68.81	57.04	31.90	80.08	0.796
0.84	133.35	110.06	63.13	0.473	90.16	74.74	41.80	104.92	0.787

く移動すること、また車体に対する移動軌跡の角度も前後で異なる様子が確認できる。先に示したように、スライドドアが外側へ移動する際の車体に対する最大の角度は56度（Fig. 4、図中横軸から反時計まわり）である。ドアの移動軌跡、すなわちガイドレールの車体に対する角度が大きいくほど、ドアがレールから受ける反力が大きくなる。この反力の側方成分がドアを外向きに押し出す力となり得るので、以下ではガイドレールが車体に対して56度の角度を持つ場合について実験データを整理する。

自動車後方向き成分（ドアを後ろに引く力、Table1 ②）が、車体に対して56度の角度を持つガイドレールに沿って外向きに移動する際（ドアの開き始め、Fig.4参照）、②-1レールに沿う成分と②-2レールに直交する成分に分解される（注：②-1はTable1には示していない）。このレールに直交する成分はドアがレールから受ける反力となり、その側方成分（外向き成分）がTable1の②-3となる。本実験では、車体に対して35度後方にドアを引いた場合に、ドアを開けるために必要となる力を計測しており、ドアを側方（外向き）に引く力としてはTable1の①と②-3の2つが挙げられる。仮に、この2つの力の合計が水圧に対してドアを外向きに移動させるものと考えたと、合計の力はドアに作用すると推定される水圧の65～80%に達することがわかる。

一方、水深の小さい条件（水深0.47m）では、ドアに作用する全水圧よりもかなり小さい力でスライドドアが開く結果となった。水深の小さい条件では、ドアに作用する水圧が小さいために、ドアを開ける動作の支障にはなりにくい状況が考えられる。しかしながら、水深が0.1m上昇するだけでドアを開けるために必要と想定される力は全水圧の50%以上に急

激に増加するので、水没時の早い段階での避難行動が重要であることを示している。

5. おわりに

本報告は、水没した自動車のスライドドアからの避難行動に関して、被験者による避難体験実験結果と、スライドドアを開ける際に必要となる力の計測結果についてまとめたものである。得られた主要な知見は以下のとおりである。

（1）運転席ドアからの避難行動は、床面からの水深が0.8m程度になると避難が困難になることが示された。この結果は、先に行われたセダントタイプの自動車を使った実験結果に比べて、避難が困難になる水深条件がやや大きい結果となった。これは、本実験で使用した自動車の運転席ドアが、セダントタイプの自動車の運転席ドアに対して面積が小さく、作用する全水圧が小さかったためと考えられる。

（2）スライドドアからの避難行動は、床面からの水深が0.6m程度になると困難になり始まるとの結果が得られた。この水深条件は、運転席ドアからの避難よりも低く、セダントタイプの自動車を用いた実験結果とほぼ同等の条件である。スライドドアと一般的なドア（横開き）では、開閉の機構が大きく異なることが一因と考えられるが、水没時にスライドドアを開けるためにはより大きな力が必要と考えられることが、力の計測結果から得られている。

（3）スライドドアを開けるために必要となる力の計測では、手動のウィンチを用いて、車体に対して35度の方向にドアを引き、計測された最大の力を、ドアを開けるために必要な力とした。スライドドアは、開き始めの段階においてガイドレールに沿って

斜め後方に移動するので、水圧に逆らってドアを外向きに移動させる力としてドアがレールから受ける反力の側方成分（外向き成分）も考慮して実験結果を整理した。その結果、スライドドアに作用する全水圧に対して、ドアを開けるためには全水圧の65～80%程度の力を要することが示された。この結果は、セダンタイプの自動車模型を使って計測された同様の実験結果（全水圧に対して約40%の力が必要）に比して大きな割合となっており、スライドドアからの避難行動が、一般的な横開きのドアに対して容易なものではないことを示している。

なお、本実験ではスライドドアの下半分が主に水没した条件で実験を行っている。実験中、主にドアの下半分に作用する水圧のために、ドアがねじれた状態で開閉している様子が確認されている（後端のガイドレールがスライドドア中央の高さにあるため）。また、体験実験に参加した被験者から、水深条件が大きいときにドアがガイドレール上を滑らかに動かないという感想があった。他の被験者からは、スライドドアはドアを移動させる方向（後向き）と水圧に対してドアを押す方向（外向き）が異なるので、一般的な横開きのドアに対して開けづらい（力をかけづらい）という感想もあった。

このようにスライドドアの開閉機構の特殊性もあるので、ドアを開けるために必要となる力とドアに作用する全水圧との関係については検討の余地が残るが、スライドドアを通じての避難行動は一般的な

横開きのドアに比べて同等以上に困難になる可能性が本実験結果から示された。

なお、浸水時には、自動車のパワーウィンドウなどが正常に動作しなくなることが実験で確認されている（JAFユーザーテスト, 2010）。ドアが開かない状況では、窓からの避難が次の行動として大切になるが、開かない状況も想定されるので、窓を割るためのハンマーや類似の先端の堅いものなどの準備が必要となる。

謝 辞

体験実験に被験者として参加していただいた方々、またデータの計測・整理に協力いただいた根来悠司君（当時関西大学学生）、高橋祐樹君（関西大学大学院）に感謝の意を表します。

参考文献

- 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一, 中川 一 (2009) : 水没した自動車からの避難に関する体験実験, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第14巻, pp.159-164.
- 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一 (2010) : 水没した自動車からの避難の難しさ, 京都大学防災研究所年報, 第53号B-2, pp. 553-559.
- JAFユーザーテスト (2010) : 冠水時と水没時, 車はどうなる, JAFMate, 第48巻, 第5号, pp.22-25.

Difficulty of Evacuation Behavior from a Submerged Vehicle (2)

Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI* and Keiichi TODA

* Faculty of Environment and Urban Engineering, Kansai University

Synopsis

Many cities in Japan are located in alluvial plains, and the vulnerability of urbanized areas to flood disaster is highlighted by flood attack due to heavy rainfall or typhoon. Low-lying areas like "bowl-shaped" depression and underpasses under highway and railroad bridges are prone to floods. The underpasses are common sites of accidents of submerged vehicles, and severe damage including human damage occasionally occurs under flooding conditions. We have shown some experimental results of evacuation tests from a submerged vehicle and discussed the limit for safety evacuation though the doors of vehicle. This time, we executed the additional experiment using a vehicle with slide typed door. From the experiment, it is found that the difficulty of evacuation is almost same for both open typed door and slide typed one.

Keywords: urban flood, submerged vehicle, evacuation experiment, real scale model, slide typed door