

水没した自動車からの避難に関する体験実験 (その2)

EVACUATION TESTS FROM A SUBMERGED VEHICLE

馬場 康之^{1*}・石垣 泰輔²・戸田 圭一³

This paper shows some experimental results of evacuation tests from a submerged vehicle and discussed the limit for safety evacuation through the doors of vehicle. As a background to the experiments and discussion, the vulnerability of urbanized areas to flood disaster is highlighted by flood attack due to heavy rainfall or typhoon in recent years. The underpasses and underground parkings are common sites of accidents of submerged vehicles, and severe damage including human damage occasionally occurs under flooding conditions. In the present paper, evacuation tests with real-scale car model have been conducted as well as the measurement of the required power to open a slide typed door. It is found from the experiment results that the difficulty of evacuation through the slide typed door is almost same as through the open typed door in the previous experiments.

Key Words : urban flood, submerged vehicle, evacuation experiment, slide typed door

1. はじめに

降雨強度の強い雨が局地的に降る頻度が増加し，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の発生する事例が近年多くみられる．特に，急速な都市化が進行した地域では，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とな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，内水氾濫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報告されるに至っている．

先の報告¹⁾では，セダント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が行われている．本報告では，浸水時におけるスライドドアを通じた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．

本実験では，後部にスライドドアを有する小型のワンボックスタイプの自動車を実物大模型として使用した．自動車は床面に固定されており，前回の実験（セダントタイプ）と同様に，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）や車内の浸水状態によっ

て，ドアの内外から作用する水圧の状況が変化する状況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自動車模型の概要を図-1，写真1に示す．実験装置は小型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．ポンプを用いて水を循環した状態で実験を行うのは，ドアを開けた際に多量の水が自動車内部に流れ込み，水槽側の水深が大きく低下する結果，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るためである．

キーワード：都市水害，水没車，避難実験，スライド式ドア

¹正会員 京大防災研 白浜海象観測所（〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2347-6），E-mail: baba.yasuyuki.7z@kyoto-u.ac.jp

²正会員 関西大学環境都市工学部（〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35）

³正会員 京都大学防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

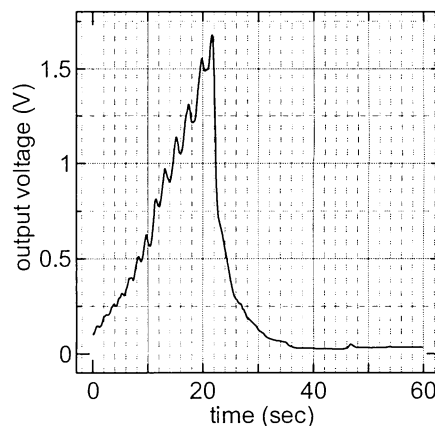
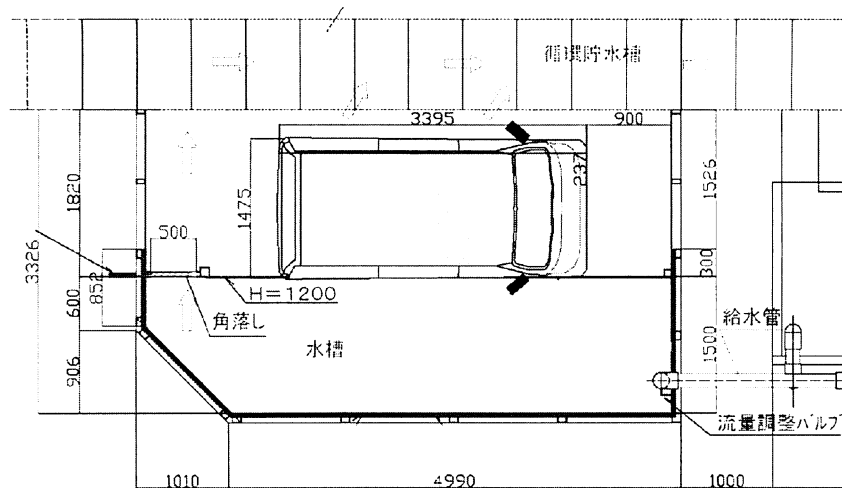


写真1 実物大自動車模型

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。実験時の計測内容は、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）の二つである。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。図-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. スライドドアからの避難体験実験

(1) 2010年8月の実験結果

2010年8月の実験は、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（写真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

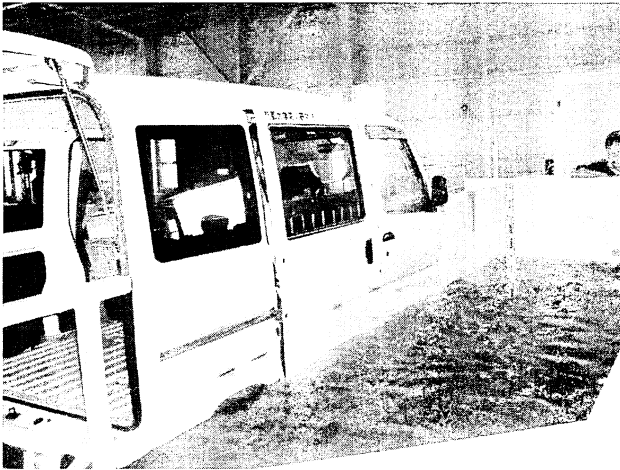
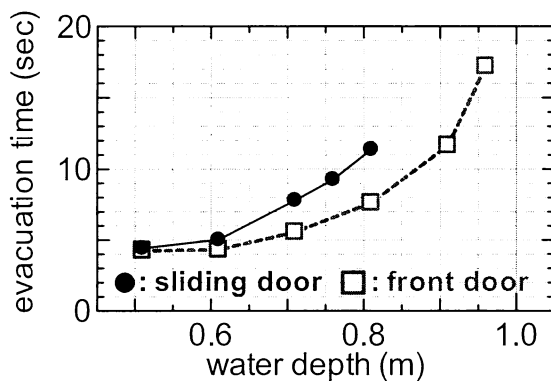
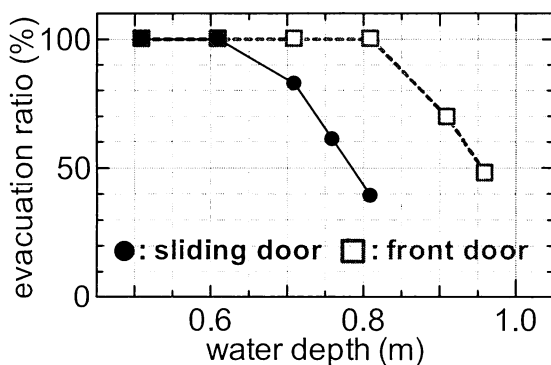


写真2 避難体験実験の様子



(a) 避難に要した時間



(b) 避難成功率

図-3 避難所要時間と避難成功率 (2010年)

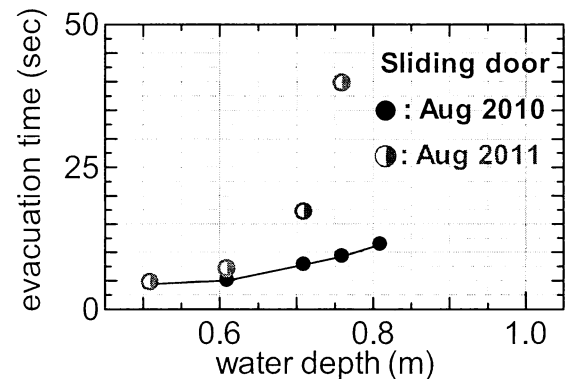
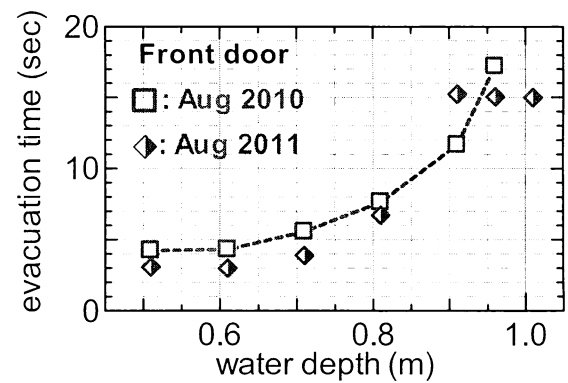


図4 避難所要時間の比較 (2010年, 2011年)

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※

図-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。

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0.6m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。

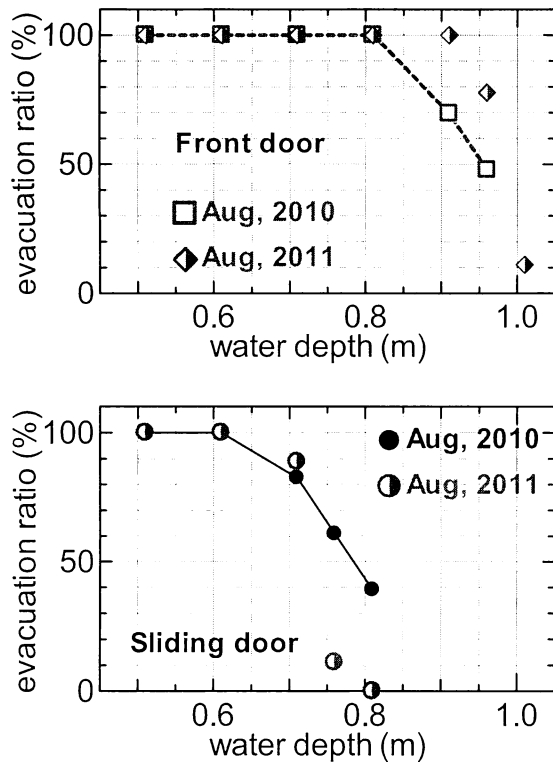


図-5 避難成功率の比較（2010年，2011年）

(2) 2011年8月の実験結果

2011年8月の実験は、2011年8月2日に実施された。被験者数は全9名（全て男性）と少ないものの、2010年と同じ内容の体験実験が行われており、両者の実験結果の比較を通じて、避難が困難になる状況について検討する。

図-4、図-5は、2010年の結果（図-3）に2011年の実験結果を重ねてプロットしたものである。実験が行われた時期および被験者間の個別差のためか、2回の実験結果にはある程度の差が確認できる。前部ドアからの避難体験実験結果は、避難が困難になる状況（床面からの水深が0.8～0.9m）において2010年と2011年の結果に差がみられるが、実験結果は同様の傾向を示していると思われる。

一方、スライドドアからの避難体験実験結果では、避難成功率、所要時間の両方において実験結果の差が顕著となっている。2011年の結果は、2010年と比べて避難成功率が急激に減少し、避難に要する時間が大きく増大している。これは2011年の実験では、設定された条件が被験者にとってはドアを開けることができる上限に近く、最終的にドアを開けることはできたものの、開けるためにより長い時間がかかったことを示している。2011年の実験は被験者数が少なく、避難が困難になる状況では1名しか車外に出ない場合もあり、実験結果を評価するためのサンプル数を十分に確保できなかったものの、避難が厳しい状況下での結果が得られている。

スライドドアの実験における避難成功率の結果において、成功率が減少し始める水深が床面からの水深が約

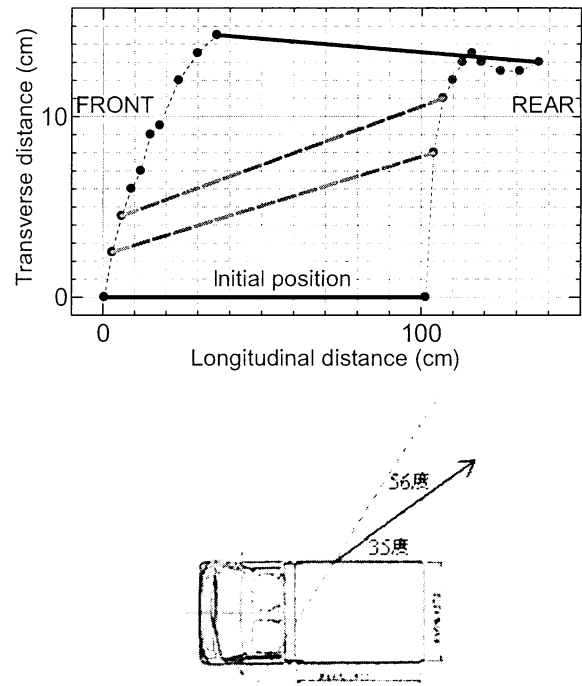


図-6 スライドドア（右側面）の移動軌跡（平面図）

0.6cmを超えた段階であるのは2010年および2011年も同じであり、その水深以上になると避難成功率が大きく減少する傾向も同じである。この結果から、本実験模型においては、床面からの水深が0.6cmを上回るようになるとスライドドアからの避難行動が難しくなり始めると推測される。

(3) ドアの開き方の違いに関する考察

運転席ドアとスライドドアの大きな違いは、ドアの開き方である。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図-6である。図-6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、図中下部の実線はドアの初期位置、上部の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。FRONT、REARと示された丸印は、ドアの前端、後端の移動軌跡を示しており、図中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確認されている。スライドドアが

表1 スライドドアを開ける際に必要となる力

	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

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。

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結果を表1に示す。避難行動が難しいと予想される水深（床面から0.74m）の場合に、ドアを開けるために必要な力は60.8kgfという結果となった（計測時にドアを引く方向は車体に対して35度開いた方向、図-6）。また、この時、スライドドアに作用する全水圧はドアの浸水状況から87.7kgfと推算されている。この時、ドアを引く力の側方成分（ドアを外向きに押し出す力、表1の①）は34.9kgfとなり、全水圧に対する割合は約40%である。先に示した避難体験実験では、水深が0.6mを超えると避難成功率が減少する結果となった。そのような水深の条件（床面から0.66m）においても、ドアを外側に押し出す力（表1の①）とドアに作用する全水圧の割合は約40%であり、大きく変化していない。水深が大きい場合を含めると、ドアを外側に押し出す力（表1の①）とドアに作用する全水圧の割合は40%弱～50%弱である。

スライドドアの移動は図-6に示す通り、ドアの前と後でやや異なる動きとなるが、車体側面に設けられたレールに沿って移動する。図-6に示す通り、スライドドアは開き始めの段階には車体に対してある角度を持って（斜め後方に）移動する。ある程度ドアが側方に移動した後、車体と並行に移動するようになる。スライドドアが開き始めの段階において、レールに沿って斜め後方に移動する際、ドアを後方に引く力（表1の②）はレールに沿う成分と直交する成分（表1の②-2）に分解される。レー

ルと直交する成分は、ドアがレールから受ける反力となるので、反力の側方成分（外向き成分、表1の②-3）はスライドドアを外側に押し出す力となる。床面からの水深が0.74mの場合、反力の側方成分は23.1kgfとなるので、スライドドアを外側に押し出す力の合計は58.0kgfとなる。この合力の全水圧に対する割合は66%程度となり、水深が0.6m台の計測結果においても同程度である。セダントタイプの自動車を対象に行われた実験結果³⁾では、ドアを開けるに必要となる力がドアに作用する全水圧の40%弱であることを考えると、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。

また、ここで示した避難体験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. おわりに

本報告は、実物大の自動車模型を用いて、水没した自動車のスライドドアからの避難体験実験を行い、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示したものである。主な結果は以下の通りである。

（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いためと考えられる。

(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めるとの結果が得られた。この水深条件は、前述の運転席ドアからの避難の場合よりも低く、セダン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ため単純な比較は難しいが、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なることから、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。避難行動が難しくなると予想される水深（床面から0.74m）の場合、ドアを開けるためにはスライドドアに作用する全水圧の66%程度の力を要することが示された。水深がさらに大きい場合には、80%程度の力を要する結果も得られており、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が想像される。

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）、高垣裕彦君（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

- 1) 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.159-164，2009.
- 2) 馬場康之，石垣泰輔，戸田圭一：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. 553-559，2010.