

座位姿勢における水圧が作用する 自動車ドアからの避難に関する体験実験

馬場 康之¹・石垣 泰輔²・戸田 圭一³

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所流域災害研究センター白浜海象観測所
(〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)

E-mail: baba@uh31.dpri.kyoto-u.ac.jp

²正会員 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 3-3-35)

E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

³フェロー会員 京都大学大学院教授 経営管理研究部 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: toda.keiichi.4z@kyoto-u.ac.jp

本研究は、水没や浸水時に水圧が作用するドアからの避難体験実験結果を整理したものである。実験では自動車からの避難行動を想定し、実物大の自動車模型の前部ドア、および自動車の前部ドアに見立てたドア模型を使用した。体験者は自動車の車内に座っている状況（座位）で実験を行っている。

ここでは、20 代前半の成人男性および小学校 3 年生、4 年生を対象として行われた体験実験の結果を用いた。年代により、ドアを開ける上限となる水深条件は異なるものの、浸水深の増加に伴いドアを開けることができる人数が急に少なくなる状況は同じであった。浸水深とドアを開けることができる体験者の割合との関係は、ロジスティック曲線で表現でき、避難成功率と浸水深の関係や、避難成功率の低下傾向が急変する水深条件などを検討することができた。

Key Words: urban flood, submerged vehicle, evacuation through the doors, real scale model

1. はじめに

近年、台風や前線に伴う豪雨の発生や短時間に大雨が降る事例は枚挙に暇がない。豪雨による浸水の発生も報告されており、浸水発生時に冠水した道路で自動車が水没する事例も多く発生している。

最近の事例として、2018 年の西日本豪雨、2019 年の台風 19 号来襲時の被害が挙げられる。2019 年の台風 19 号による集中豪雨による被害では、自動車車内での犠牲者の割合が高いという報告も出されている¹⁾。

2020 年の 7 月豪雨時には兵庫県芦屋のアンダーパスでの自動車の立ち往生や、隣国の韓国では地下の車道での死亡事故が発生した。豪雨時の道路の冠水、特にアンダーパスの危険性についてはかねてより指摘されており、国土交通省は冠水した道路を走行する場合に発生する不具合に関する情報を発信している²⁾。総務省中部管区行政評価局では 2018 年にアンダーパスを中心とした道路冠水想定箇所における事故防止対策の実施状況について調査しており³⁾、京都市下京区役所が作成した水災害対応マニュアルには区内 5 カ所のアンダーパスを記載した

地図を掲載している⁴⁾。

このように災害時の自動車での避難には危険性が伴い、水没時には自動車自体に不具合が発生することに加えて、水圧がドアに作用することによりドアを開けることが困難になる。自動車の水没時にドアに作用する水圧およびドアからの避難が困難になる点については、上述の資料などにも記載されており、実物大の自動車模型を使った模型実験も実施されている⁵⁾。

ここでは、自動車が水没した状況を想定した避難体験実験について、過去の模型実験結果の他に、小学生を対象として行われた実験結果を加えて実験結果の整理を行った。また、実験結果を回帰分析することにより、水深条件と避難成功率の関係を示し、年代間での結果の比較も行った。

2. 避難体験実験の概要

ここで用いる実験結果は、自動車からの避難行動を想定した模型実験の結果であり、実験には実物大の自動車

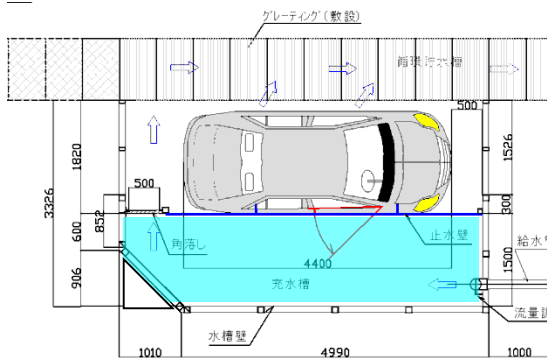


図-1 実物大自動車模型

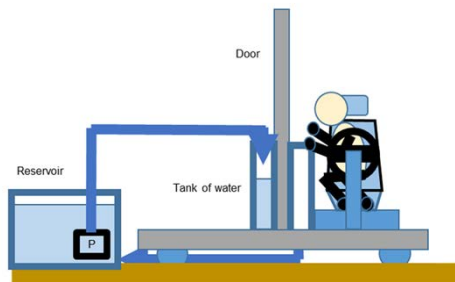


図-2 可搬式ドア模型（座席を取り付けた状態）

模型の前部ドア、および自動車の前部ドアに見立てた可搬式のドア模による避難体験実験の結果を使用した。

実物大の自動車模型（図-1）は、セダントタイプの自動車と浸水状況を再現するための水槽および給排水設備から構成されている。設置された自動車は4ドアの普通乗用車（長さ 4.4m、幅 1.6m）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位置しており、水深は床面から最大 1m までの間で水槽流出部での角落しにより設定できる。実物大の自動車模型は車内への浸水は考慮されておらず、次に示す可搬式ドア模型と同様に浸水深に対応する水圧がドアを開ける行動を妨げる形で作用する状況を再現する。

可搬式ドア模型（図-2）は、水圧が作用するドアからの避難体験実験用に製作されたものであるが、写真のように可搬式ドア模型に専用の椅子部分を取り付け、その椅子に座って腰を浮かさないようにしてドアを開ける実験を行うことで、自動車の前部ドアからの避難体験実験に相当する実験を可能としている。なお、以下に示す実験結果における水深はドア下端からの水深である（水面がドア下端の時、水深はゼロとする）。

ここで取り扱う実験結果は以下の4件である。

- ・実験結果1：成人男性（20代前半），32名
- ・実験結果2：小学3年生（男子），232名
- ・実験結果3：小学4年生（男子），216名
- ・実験結果4：小学4年生（男子），44名

実験結果1は2008年に行われた実物大の自動車模型を用いた実験の結果である。実験結果は表-1に示すように全6段階の水深条件において、被験者32名（全員大学生）が体験実験を行い、ドアを押し開けて車外に脱出できた人数を成功数として、成功数と被験者数の割合から成功率を算出している。

実験結果2～4は、いずれも関西大学環境都市工学部石垣研究室により可搬式ドア模型を用いて行われた実験結果である。実験結果2と3は複数年にわたりいくつかの小学校において実施された実験結果をまとめたものであり、被験者数も多い。残念ながら、実験結果2、3については被検者数と成功者数（ドアが開いた被検者数）の詳細は確認できなかったが、実験時の水深条件と成功率は表-2、表-3に示す通りである。実験結果4は、2019年に小学4年生を対象に行われた実験の結果である。対象となる小学4年の男子児童は全44名であるが、被検者数は水深条件によって異なっている。ここでの成功率は各水深条件における被検者数に対する成功者数の割合である（表-4）。

表から、小学生による実験では、水深条件が0.3mを超えると成功率が下がり、水深が0.5mに達すると成功率はゼロとなっている。一方、成人男性（大学生）の場合には、成功率が下がるのは水深条件が0.4mを超えてか

表-1 実験結果, 成人男性 (20代前半, 32名)

水深条件(m)	0.175	0.255	0.365	0.455	0.505	0.56
被験者数 (人)	32	32	32	32	32	32
成功数 (人)	32	32	31	24	14	9
成功率(%)	100.0	100.0	96.9	75.0	43.8	28.1

表-2 実験結果, 小学3年生, 男性 (2018年以前, 232名)

水深条件(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
被験者数 (人)						
成功数 (人)						
成功率(%)	100.0	99.1	81.5	56.9	0.0	0.0

表-3 実験結果, 小学4年生, 男性 (2018年以前, 216名)

水深条件(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
被験者数 (人)						
成功数 (人)						
成功率(%)	100.0	97.7	74.1	51.4	0.0	0.0

表-4 実験結果, 小学4年生, 男性 (2019年, 44名)

水深条件(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
被験者数 (人)	1	8	44	18	4	1
成功数 (人)	1	8	29	3	0	0
成功率(%)	100.0	100.0	65.9	16.7	0.0	0.0

らであり、水深条件が 0.5m を超えても成功率はゼロにはならない。ただし、水深条件が 0.5m を超えると成功率は 50%を下回り、さらに水深が 0.56m に上ると成功率は急激に下がり 30%を下回る。

このようにある程度水深を境として、成功率が大きく下がる結果は、成人男性の実験結果に基づいて考察された既発表の論文でも指摘されており、その傾向は小学生においても同様であることがわかる。ただし、実物大の自動車模型の場合には路面からドア下端までの高さが 0.32m であるので、実験の水深条件が 0.3m の際には車外の浸水深は 0.6m を越えることになる。車外に出た後の避難行動のためには、車外の浸水深についても留意する必要がある。

次の章では、各実験結果を回帰分析し、その回帰分析結果に基づいて年代間の比較などを行う。

3. 回帰分析結果

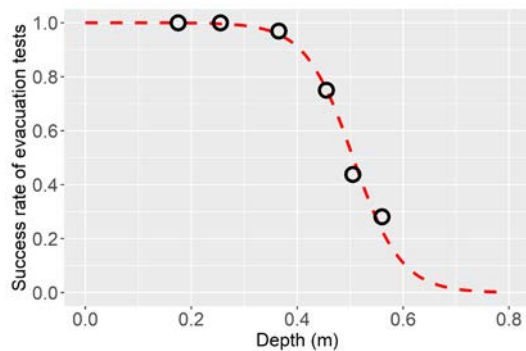
前章で示された避難体験実験では、ある水深条件に対して「ドアを開けることができた」、「ドアを開けることができなかった」という 2つの結果を得る。このように目的変数が 2つ (2値) となる場合の回帰分析には、

ロジスティック回帰分析が使用される。

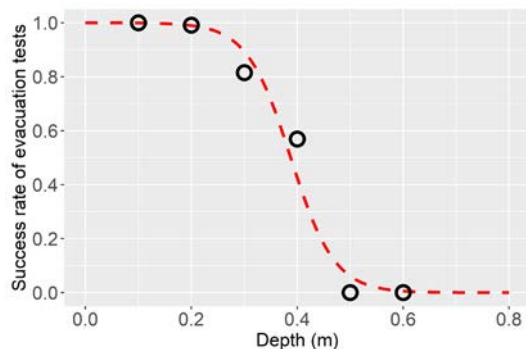
ロジスティック回帰分析のモデル式は式 1 に示す通りで、式 1 は説明変数が 1つ (ここでは水深条件) の場合である。実験結果は 2値 (ドアが開いたか開かなかったか) で得られるが、式 1 から得られる予測値はゼロから 1 の値をとる。この値は確率を示しており、ここで使用する実験結果の場合ではある水深条件に対してドアが開く確率を示す。前章の各実験結果に対するロジスティック回帰分析結果を図-3 に示す。図中、丸印は表-1~4 に示された各実験における成功率であり、赤破線がロジスティック回帰分析結果である。

$$y = \frac{1}{1 + \exp[-(b_0 + b_1x)]} \quad (1)$$

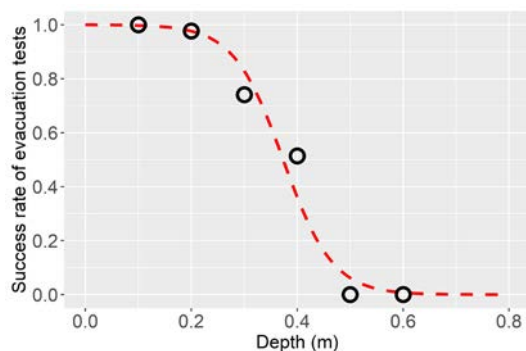
いずれの図においても、回帰分析結果は実験結果の分布を良好に表現することができている。ただ、小学生の実験結果では、水深条件が 0.5m に達するといずれの実験においても成功率がゼロになっているが、回帰分析結果では S 字曲線がゼロに漸近する形であるため、水深 0.5m 付近で実験結果と回帰分析結果に差が見られる。一方、成人男性の実験結果には成功率がゼロとなる結果は含まれていない。回帰分析結果から、成人男性 (20代前半) の場合でも水深が 0.6m に達すると成功率がほぼゼロになることが推測される。



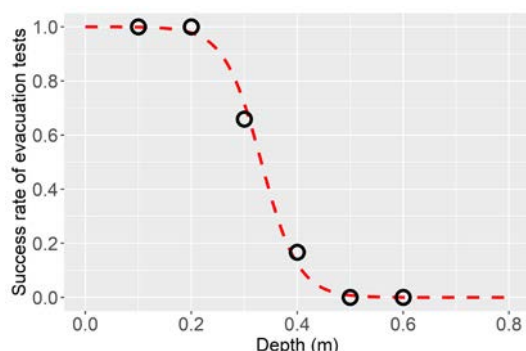
(a) 成人男性 (20代前半, 32名)



(b) 小学3年生, 男性 (2018年以前, 232名)



(c) 小学4年生, 男性 (2018年以前, 216名)



(d) 小学4年生, 男性 (2019年, 44名)

図-3 実験結果および回帰分析結果

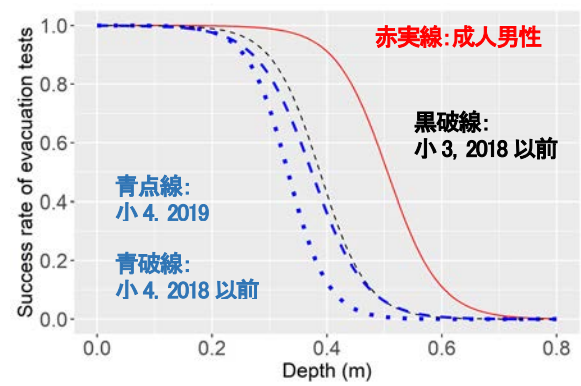


図-4 回帰分析結果の比較

(1) 実験結果の年代間の比較

図-4 は上記 4 つの実験結果から得られた回帰分析結果を一つにまとめたものである。小学生の実験結果は、実施時期や被験者数によりばらつきが見られるものの、おおむね同じような傾向を示している。成功率が 50% となる水深条件は成人男性 (20 代前半) で 0.5m 程度、小学 3 年生、4 年生で 0.4m を下回る程度である。ロジスティック回帰曲線の傾きが最も大きくなるのも成功率 50% 付近であり、自動車のドアを通じた避難がしづらくなる危険な条件であると考えられる。

ロジスティック回帰曲線の変化率が大きくなる (成功率の低下率が大きくなる) のは、成人男性で 0.44m 付近であり、水深が 0.4m を超えると変化率が急激に増加 (成功率が低下) する。小学生の場合は、水深 0.3m 前後でロジスティック回帰曲線の変化率が急激に増加 (成功率が低下) する。

安全な避難のためには、ロジスティック回帰曲線の急激な変化、すなわち避難成功率の急激な低下が起こる上記の水深となるまでに避難することが重要であることがわかる。ただし、どの年代でも避難成功率が高い条件 (例えば水深 0.2m) でも、路面からドア下端までの高さ (実物大の自動車模型の場合、0.32m) を加えた水深 0.5m 程度の浸水が発生しているため、避難後の移動を考えるとより早い段階での避難行動が重要である。

(2) 立位の実験結果との比較

水圧が作用するドアからの避難体験実験は、被験者が立位で行う実験も行われており、比較的被験者数も多いことから年代別に避難が困難となる水深条件についても推定されている⁹⁾。

図-5 は実物大のドア模型を用いた立位の実験結果と、実験結果を体力テストの結果を用いて重回帰分析した結果を示したものである⁹⁾。立位の実験結果では、ドアを開けるのが困難となる水深条件の最大値は 0.4m を少し

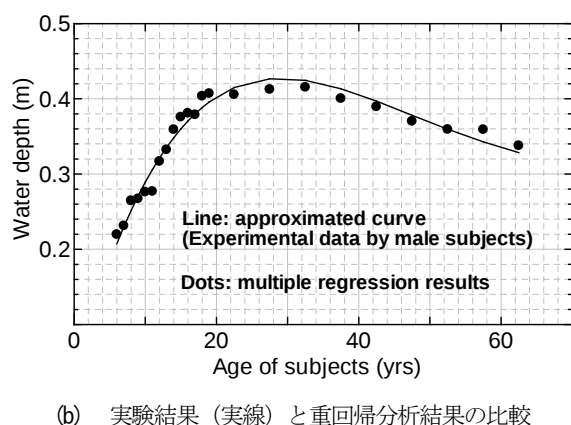
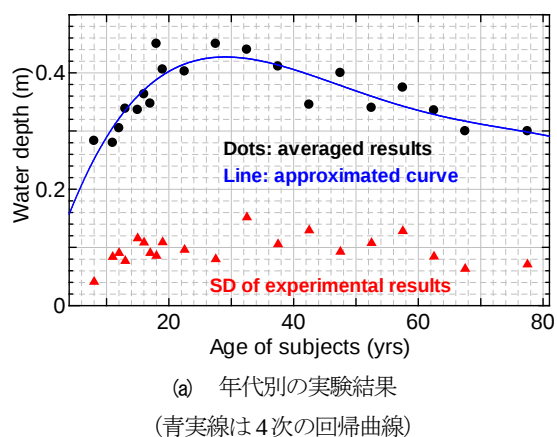


図-5 実物大ドア模型を用いた立位の実験結果⁹⁾
(男性被験者 397 名)

上回る程度で、20～30代でピークとなる。10代以下の世代では年齢とともに伴いドアを開けるのが困難となる水深条件が増加する。また20代前半の成人男性と小学3年生、4年生（9、10歳）の間で水深条件比較すると、10数cm程度の差があることがわかる。

図-4から、小学生の座位での実験結果には、時期や被検者数の違いにより結果に多少のばらつきがあるものの、成人男性との水深条件との差は、立位の実験と座位の実験でほぼ同程度の値であることが確認できる。仮に、立位の実験と座位の実験において、年代間の実験結果の傾向が変わらなと仮定すると、ここで示した成人男性（20代前半）の実験結果が全世代を通じて避難が困難となる条件の上限値に近いとすることができ、立位の実験と同様に避難が困難となる水深条件は20～30代で最も大きく、年齢を重ねると次第に低下すること、10代以下の世代では年齢とともに水深条件が大きくなることが予想される。

4. おわりに

ここでは、自動車が水没した状況を想定した避難体験実験について、過去の模型実験結果の他に、小学生を対象として行われた実験結果を加えて実験結果の整理を行った。対象とした4つの実験結果は、時期も実験に参加した被検者数にも大きな違いはあるものの、実験結果は目的変数が2値の場合に適用されるロジスティック回帰分析を用いて良好に再現された。回帰曲線の比較から、避難成功率の変化や変化率が大きくなる水深条件や、成人男性の実験結果では明確になっていなかった避難成功率がゼロになると想定される水深条件が明らかとなった。

また、別途実施されていた立位での避難体験実験結果との比較から、ここで示された座位の避難体験実験の結果も、立位の場合と同じような年代間の差を持つ可能性があることが示された。ただし、避難成功率が高いとされる水深条件でも、路面からドア下端までの深さを加えるとかなりの浸水が発生していることになるので、浸水深が大きくなる前の早期に避難することが重要である。

謝辞：本論文において使用した避難体験実験にご参加いただいた皆さま、ならびにデータ計測にご協力いただいた皆さまに記して謝意を表します。本研究の一部は科学研究費補助金（19K04966）の補助を受けました。

参考文献

- 1) 牛山素行：2019 台風 19 号等による人的被害についての調査, https://janet-dr.com/050_saigaiji/2019/191224/191224_04_04_ushiyama.pdf, 参照 2020-09-22.
- 2) 国土交通省：水深が床面を超えたら、もう危険！—自動車が冠水した道路を走行する場合に発生する不具合について—, https://www.mlit.go.jp/report/press/ji-dosha08_hh_003565.html, 参照 2020-09-22.
- 3) 総務省中部管区行政評価局：道路冠水時における事故の防止対策に関する調査, https://www.soumu.go.jp/main_content/000541040.pdf, 参照 2020-09-22.
- 4) 京都市下京区役所：下京区民 水災害対応マニュアル, p.10, 2020.
- 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, pp.853-858, 2009.
- 6) Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI, Keiichi TODA: Experimental Studies on Safety Evacuation from Underground Spaces under Inundated Situations, *Journal of JSCE*, Vol. 5, No. 1 pp.269-278, 2017.

(Received ????, 2020?)
(Accepted ????, 2020?)

EXPERIMENTS ON EVACUATION BEHAVIOIR FROM A SEATED POSITION THROUGH A VEHICLE DOOR

Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI and Keiichi TODA

This paper shows some experimental results of evacuation tests from a submerged vehicle. In the evacuation tests, two types of real-scale models are used, one uses a secondhand car and the other uses a real-scale door model with car seat as an alternative to the car model.

Four subject groups of different ages had real-scale model tests to open a vehicle door under 6-level water depth conditions. It is found from the experimental results that the evacuation rate of adult males suddenly decreases if water depth above the door bottom exceeds 0.4–0.45m deep (around 0.7–0.8m deep above the floor) and that the critical water depth condition for children is about 0.1m lower than the one for adult males.

The variations of evacuation rate to water depth are approximated by using logistic regression analyses. Based on the regression results, it is also found the comprehensive relationship between evacuation rate and water depth condition in different ages, and water depth condition to decrease rapidly evacuation rate.