

水没した自動車からの避難の難しさ

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

集中豪雨によって、都市域では短時間で溢水氾濫や内水氾濫が引き起こされるケースが頻発している。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、車内から人が脱出できない事態が発生する。本報は、水没した車からの脱出避難がどれほど厳しいかを明らかにするために、実物大の車模型を用いた体験実験を実施し、成人の避難限界を求めたものである。セダンタイプの小型自動車の場合、車内に水が浸入しないと条件の下で、地上水深70~80cmが運転席からの成人の脱出限界であることがわかった。またドアの面積の違いから、後部ドアの方が前部ドアよりも脱出しやすいという知見も得られた。クルマ社会の中、水害時のドライバーの自助意識の向上が重要である。

キーワード: 都市水害, 水没車, 避難実験, 実物大模型

1. はじめに

都市部を中心に局地的に時間雨量50mmを超えるような非常に激しい雨が頻発している。ゲリラ豪雨とも呼ばれるこのような集中豪雨により、中小河川や都市河川の流域では短時間のうちに溢水氾濫や内水氾濫が発生することがある。ひとたび氾濫が発生すると、地上での氾濫被害に加えて地下空間にも氾濫水が浸入して、甚大な被害をもたらすことがある。地下空間で浸水が発生した場合、人命に関わる危機的な状況の発生が予想され、迅速な避難行動が重要となる。そのため、体験実験による地下浸水時の避難に関する研究成果が示されてきている(武富ら, 2001; 石垣ら, 2006; 大西ら, 2007; 大西ら, 2008)。

氾濫には至らなくとも、河川内や下水道内での流量の急増のために、思わぬ事故がもたらされる危険性もある。記憶に新しいところでは、2008年7月の神戸の都賀川や同年8月に発生した東京都の下水道での痛ましい水難事故が挙げられる。また、相対的に低い場所に位置する地下駐車場や、道路・鉄道の高架下のアンダーパスの浸水による被害も報告されている。2008年の7月、8月には京都、栃木でアンダーパスの冠水による自動車浸水被害が発生した。7月の京都での浸水被害は、京都府向日市のJR東海道線下のアンダーパスで発生した。浸水深は深いとこ

ろで1.5mに達し、幼稚園の送迎バスと乗用車が被災した。幸い、乗用車の運転手は自力で脱出しており、送迎バスは車高が高いことが幸いして、幼稚園児は座席に立った状態で救助を待つことができた。一方、8月に栃木県鹿沼市の東北自動車道下のアンダーパスで発生した浸水事故では、水深が最大約2mにも達し、不幸にも軽自動車内の1名が水死する結果となった。同じ場所では、上記の事故の30分ほど前にも浸水事故が発生しており、その際は何とか自力で脱出して、最悪の事態は免れている。これらの事故は、自動車が水没することにより生じる危険性を如実に示している。

上に述べた水難事故以外にも、洪水氾濫時には過去にも自動車の水没による被害が多数発生している。古くは1982年7月の長崎豪雨水害時に、長崎市内で、水没した自動車により多くの人が犠牲となっている(高橋・高橋, 1987)。

本研究は以上のような背景を踏まえて、自動車水没時の危険性、避難困難度について、実物大の自動車(セダンタイプ)を使用した体験実験により検討したものである。本実験は、アンダーパスのように相対的に低い場所が冠水して自動車が水没した状況を想定しており、水の流れがない状態で車外の水深を変化させた条件での避難実験および押し開け力の計測を行った。

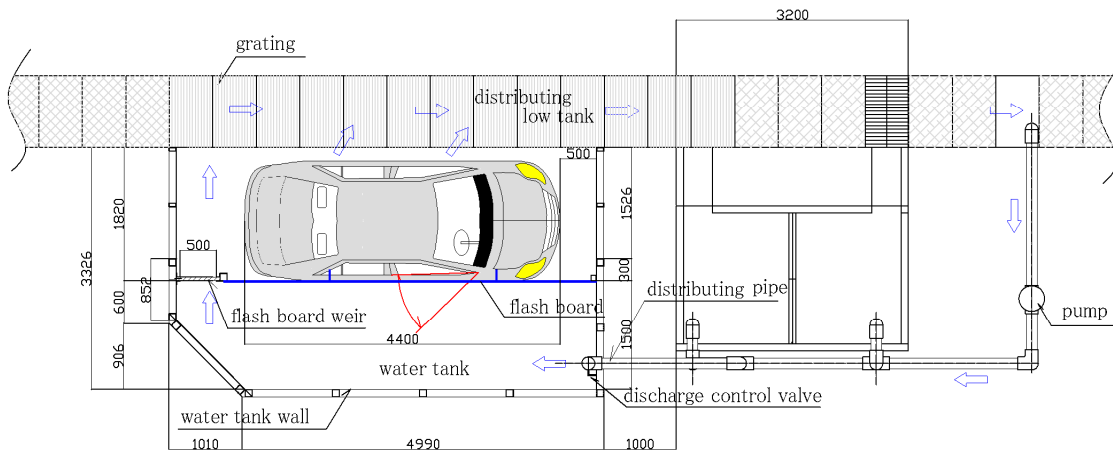


Fig. 1 Experimental set-up



Photo 1 Real sized car model



Photo 2 Measurement of force to open the door

過去の被災例や実験等では、水没初期に自動車は浮く状況や水没の進行に伴い車内への浸水が生じることが報告されている。実験方法の制約などもあり、本実験では、これらの条件までは考慮せずに、車外に一定以上の水深があり、なおかつ車内への浸水が進行していない状況（水没の比較的初期段階）での実験的検討を実施した。

2. 実験装置および力の計測

2.1 実験装置の概要

実験に用いた装置の概要をFig. 1に示す。また装置の全景写真をPhoto 1に示す。装置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、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。

設置された自動車模型は4ドアの小型自動車（長さ4.4m、幅1.6m）であり、床面に固定されている。自動車のエンジン部等、本実験に不要な部分は、あらかじめ取り外されている。乗車スペース内には水抜き穴が用意され、車内に浸水した水が速やかに排水

されるようになっている。また、前部・後部のシートは防水加工が施されており、浸水実験の繰り返しによる内装の劣化をできるだけ少なくするようにしている。

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までの間で設定できる。自動車と水槽の間には止水壁があり、水槽への湛水時にタイヤ部分等からの水漏れが起こらないような処置が施されている。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により調節が可能であり、角落としから越流した水は低水槽に戻り、ポンプにより再び水槽に循環される。水を循環した状態で実験を行うことにより、ドア開閉時の水深の変動を最小限に抑えて、可能な範囲で一定に近い条件下で実験を実施できるようにしている。

2.2 ドアの押し開け時に要する力の計測

まず、水没した自動車のドアを押し開ける際に必要となる力を、前部および後部のドアそれぞれについて計測した。実験ではPhoto 2に示すように、ドア

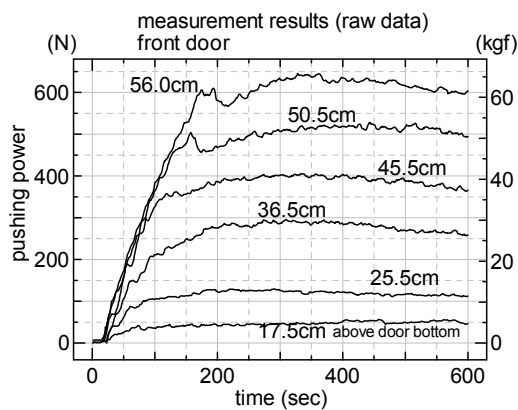


Fig. 2 Force measurement results (front door)

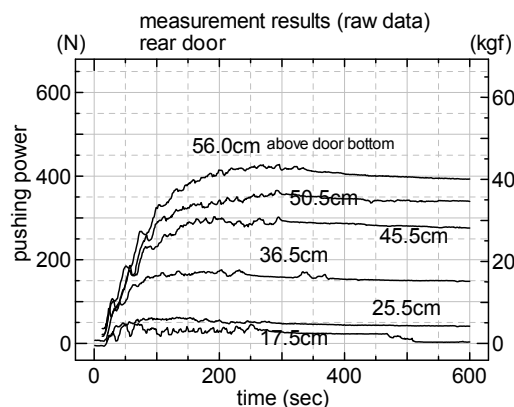


Fig. 3 Force measurement results (rear door)

の押し開けに必要な力の計測にロードセル(写真中、白い四角状の装置)を用い、ジャッキにて機械的にドアを押し開ける場合の力を計測した。ロードセルからの出力電圧は10Hzで計測され、事前に検定された出力電圧と力との関係により変換される。また、実験中はビデオ撮影も行い、ドアが開いた時点の判定に用いた。Fig. 2, Fig. 3は、前部および後部ドアの押し開け時の計測結果であり、各2回ずつ実施された計測の平均値を示している。図に示す水深はドア下端からの値で、32cmを加えると床面からの水深となる。力の計測と並行して撮影されたビデオ画像より、ドアが開き始めるのは、押し開け力が最初のピークに達するタイミングであることを確認している。押し開けに必要な力の計測結果より、浸水深が大きくなるに従って、押し開けに必要な力が大きくなること、ドアを開けた後も水圧に応じた力が継続的に作用することがわかる。

Fig. 4はドアが開いた時点に計測された力を、ドア下端からの水深で整理したもので、ここに示された力は計測結果のほぼ最大値に相当している。図中の点線は、水深の二乗に比例する近似曲線である。ジ

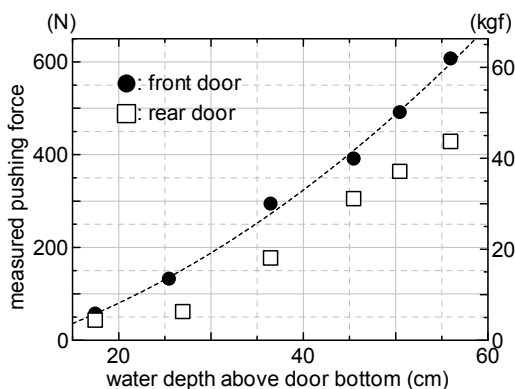


Fig. 4 Force required to open the front and rear doors

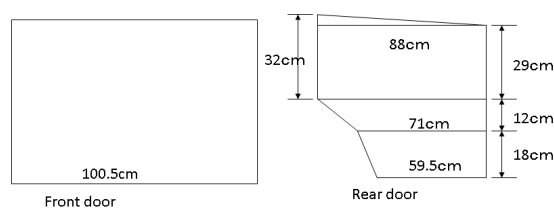


Fig. 5 Door area (front door and rear door)

ャッキを用いた機械的な計測結果から、自動車ドアの押し開けに必要な力となる力は、水深の二乗に比例する形で急激に増大することがわかる。これは、ドアに作用する水圧が水深の二乗に比例して増加する状況に対応するものであり、浸水深の増加に従って安全に避難できる状況が急激に変化することを示している。

また、前部ドアと後部ドアの押し開けに必要な力の計測値を比較すると、後部ドアの押し開けに必要な力となる力は、前部ドアの6~7割程度となる結果が得られた。この結果は、実験に使用した自動車の前部ドアと後部ドアの形状(面積)の違いによりドアに作用する水圧が異なるためであり、前部ドアからの避難が困難な場合でも、後部ドアからの避難には可能性が残されていることを示すものである。参考までに、車模型の前部・後部のドア面積の概略寸法図をFig. 5に示す。

3. 水没時の自動車からの避難実験

3.1 脱出避難限界

ここでは、自動車の浸水状況を変化させた条件下での避難実験の結果について示す。避難実験の様子を Photo 3, Photo 4 に示す。ある程度まとまった人数の被験者を集めた避難実験を、これまでに2回実施しており、その概要は以下のとおりである。



Photo 3 Evacuation experiment (front door)



Photo 4 Evacuation experiment (rear door)

●避難実験その1（以下、実験1）

被験者数：14名（全員男性）

年齢構成：20歳代×5名，40歳代×4名，50歳代×3名，60歳代×2名

●避難実験その2（以下、実験2）

被験者数：35名（男性33名，女性2名）

年齢構成：20歳代×35名

計測項目はいずれの実験とも同じで、被験者がドアを開けて自動車から脱出避難できるかどうかの判定と避難に要した時間の計測の二つである。ここで“避難に要した時間”はドアを押し始めてから体が完全に車外に出た瞬間までの時間であり、車外に出た時点の判断を同一とするため、計測は同一人物により行われている。

最初の避難実験（実験1）は、被験者数が少ないものの、幅広い年齢構成の基に実験が行われている。この実験結果は、2回目の実験（実験2）結果と合わせて示すのでここで詳細には触れないが、浸水深の増加とともに、避難に要する時間が増大し、合わせてドアを開けて避難できる人数が減少する結果となった。

実験2は、全被験者が20歳代という条件下ではあるが、30名以上の被験者（女性2名を含む）を得て実施

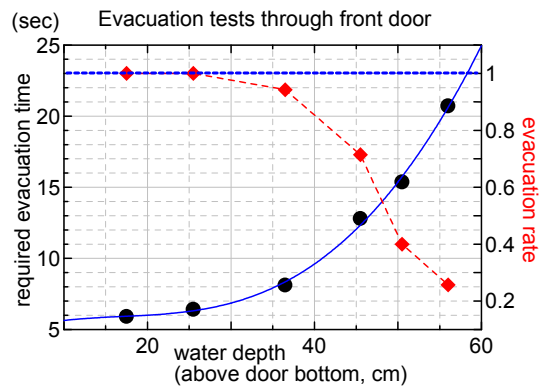


Fig. 6 Evacuation time and evacuation rate through the front door (Experiment 2)

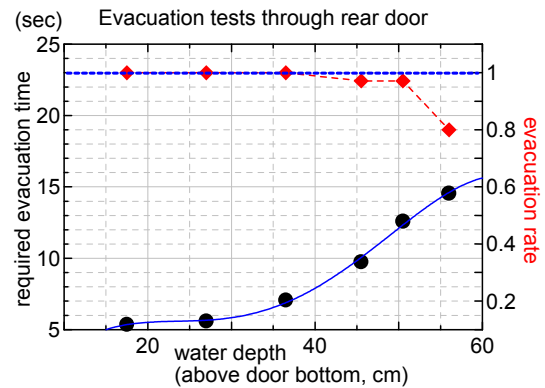


Fig. 7 Evacuation time and evacuation rate through the rear door (Experiment 2)

されている。被験者は設定された浸水深の条件下で、前部および後部ドアからの避難実験を行い、避難の可、不可ならびに避難の際の所要時間が計測されている。

実験2における、前部ドア下端からの浸水深と、避難に要した時間および避難成功率の関係を示したものがFig. 6である。避難成功率は、総被験者数のうち、脱出避難ができた人数の割合である。また、避難の所要時間は、実験で設定した各浸水深において、避難に成功した被験者の所要時間の平均値である。

図に示すように、浸水深の増加に伴い、避難に要する時間が急速に増大している様子が認められる。避難の所要時間は、最終的にドアを押し開けて避難ができた被験者の結果であり、ある程度の浸水状況でも避難の可能性はあるものの、避難に要する時間は浸水深の小さい状況に比べてはるかに長い時間となることに留意する必要がある。図中赤色で示した避難の成功率に着目すると、浸水深の小さい条件から大きい条件に変化するに従って、成功率が急激に減少する様子が確認できる。すなわち、自動車の浸水状況が進行するに従って、避難の可能性が著しく狭まるとともに、仮に避難ができたとしても所要時

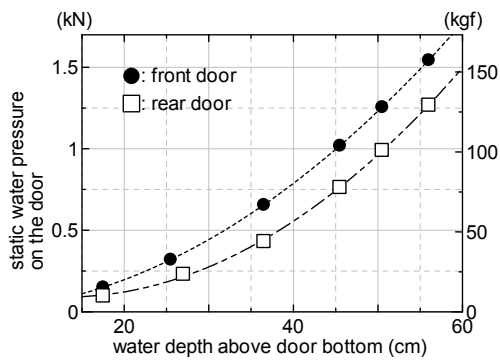


Fig. 8 Hydrostatic pressure acting on the front door and rear doors

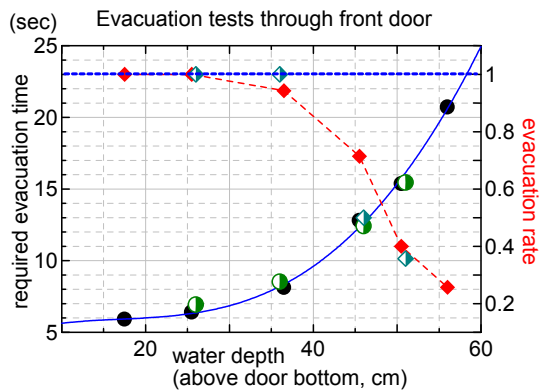


Fig. 9 Evacuation time and evacuation rate through the front door (Experiment 1 and Experiment 2)

間が増えることを考え合わせると、浸水条件下でのドアからの避難は、浸水状況の進行に伴って容易ではなくなることがわかる。

Fig. 7に、後部ドアからの避難に要した時間と避難成功率を合わせて示す。前出の前部ドアの結果と同じく、浸水深の増加に応じて、避難に要する時間が増加している様子が確認できる。ただ、所要時間の増加の割合は前部ドアの場合に比べて相対的に少なく、ドアからの避難成功率も実験条件の大半ではほぼ被験者の全員が避難できる結果となった。

これは、今回の実験に使用した車種では、後部ドアが前部ドアに比して面積が小さく、同じ浸水状況での浸水面積が小さいために、ドアの押し開けに要する力が少なくて済んだためと考えられ、Fig. 4の結果と対応している。

Fig. 8に、計測されたドアの寸法と水深から求めたドアに作用する静水圧と水深の関係を示す。図中の点線、二点鎖線はいずれも2次の近似曲線であり、ドアに作用する水圧が水深の二乗に比例して増加する様子が認められる。後部ドアに作用する水圧は前部ドアにかかる水圧よりも小さく、浸水深の小さい場合（図中の20～40cm付近）において、両者の増加傾

向にやや違いが見られる。本実験で使用した乗用車の後部ドアは、後輪に近い位置にあり、そのため低い位置でのドア幅が前部ドアよりもかなり小さい形状となっている。そのために、浸水深の小さい条件で作用する水圧が前部ドアに比べて小さくなる結果となっている。ただし、前部ドアと後部ドアに作用する水圧の差異は、車種、ドアのタイプ・形状等によって異なる特性を示すものと思われる。

前部ドアからの避難実験について、実験1と実験2の実験結果を合わせて示したのが、Fig. 9である。実験1（総勢14名、年齢構成20～60歳代）の避難に要する時間の平均値（図中緑丸）は、実験2の実験結果と極めてよく一致している。本実験での被験者総数は約50名程度にとどまっているが、ここで示した2回の実験が、異なる時期に、異なる対象者により実施されていることを考慮すると、本実験から得られた結果は、ドアからの避難に要する時間と浸水深の一般的な関係に近いものを表していると考えられる。

一方、避難成功率については、実験1の結果（図中緑菱）は実験2の結果と同様の傾向を示すものの、実験1の方が実験2よりも急に減少する傾向を示している（図中、45cm付近）。これは、実験1では比較的高齢の被験者を含むことが影響していると考えられる。実験1では約1/3が50歳以上の被験者であるのに対し、実験2では女性を2名含むものの全員が20歳前半の被験者である。

避難成功率に両者の差が確認できるドア下端からの水深45cm付近は、前部ドアからの避難成功率の変化率が最も大きく、急激に低下する状況であることが実験結果（Fig. 9）からわかる。すなわち、本実験における“ドア下端からの水深45cm付近”という実験条件は、前部ドアからの避難限界の範囲内と考えられ、そのような厳しい条件下の実験において年齢による体力差が避難成功率の差として如実に現れたものと考えられる。被験者の年齢、性別に起因する個人差が避難実験の結果に影響することはある程度予想されることであり、本避難実験の被験者の年齢層、性別を幅広く設定するに従って、避難の所要時間、避難成功率がある程度の幅をもって分布することは止むを得ないと思われる。

実験1と実験2を合わせた結果から、浸水状況がある程度大きくなると、ドアを押し開けての避難行動が急激に困難になる状況が明確に認められる。水没した自動車からの一般的な避難限界に当たる数値を示すことは難しいところであるが、本実験の結果では地表面からの浸水深が70～80cm程度になると、ドアからの避難行動が難しくなる状況がわかる。

高橋・高橋（1987）は、1982年の長崎豪雨水害後、自動車修理工場でのヒアリングや氾濫に遭遇したド

ライバーへのアンケート調査結果をまとめており、そのなかで、「水位がドアの半分で、ドアが水流と水圧のために開けにくい」と記している。ドアの半分の水位は地上水深60cm程度と推察される。

また、クレーンで吊り下げたミニバンを水槽に降ろしていく方法を用いた避難実験によると、水深90cmで運転席も後席スライドドアもびくともせず、開けることができなかったことが報告されている（JAFユーザーテスト、2010）。

これらの参考事例を踏まえれば、地上面からの浸水深70～80cm程度が避難限界という今回の実験結果は概ね妥当ではないかと考えられる。

3.2 被験者の体験アンケート

この実験に参加した被験者を対象にアンケートを実施し、実験体験後の水没事故に対するイメージなどについて調査した。ここでは以下の3項目の質問についての調査結果を示す。

（質問）

1. 実験に参加する前と、した後では自動車の水没事故に関してどのようにイメージが変化しましたか？

2. 実際にあなたが水没した車両の中にいる場合を想定したとき、あなたは冷静に判断して行動できると思いますか？

3. その他、実験に参加して感じたこと、考えたことがありましたら自由にお書きください。

まず、実験後の水没事故に対するイメージの変化であるが、実験前と後では、後のほうがより事故への恐怖心が高くなっており、危険を感じている者が多数いることがわかった。また、ドアを開くための力が想像以上に必要であったという回答も多くみられた。実験を行う前では、水没時にドアを開くことの困難さはあまり認識されていない、もしくはその想像は難しいということがいえるであろう。

続いて、実際に水没した際に冷静に判断できるかどうかを調査したところ、やはり多数の回答者が「冷静には判断できない」と答えた。体験により、ある程度は冷静に行動できるであろうと答えた者もいたが、車ごと水の中へ突入してしまった場合などはその限りではない等、状況によってはパニックに陥る可能性が高いことを示唆した意見も多かった。

その他、実験を通しての感想や意見を尋ねたところ、スライドタイプのドアでの実験の必要性や電気系統が正常に作動する限界の指標などについての意見があった。全体的には、水没した自動車からの避難に対する危険度の認知が一番重要であろうという意見が多かった。豪雨により浸水したアンダーパス

に誤って車が進入するのを防ぐような様々な対策も必要であるが、水に対する車の脆弱性、危険性をドライバーが認識し、注意深い行動をとることが重要である。

4. おわりに

本研究は、自動車水没時の避難について実験的に検討したものである。実験では一般的なセダントタイプの自動車を使用し、約50名の成人の被験者による避難実験を行った。本実験の結果から得られた主要な結論は以下のとおりである。

1. 浸水深の増加に伴って避難に要する時間が急激に増大する。

2. 地上面からの浸水深が70～80cm程度になると、被験者の避難成功率が急激に低下する。この浸水深の範囲が成人の避難限界と考えられる。

3. ドアの形状の違いにより作用する水圧の大きさが変化するため、同じ浸水状況では前部ドアに比べて後部ドアが避難に有利となる。

ただし、ドアを通じての脱出避難状況は車種、ドアのタイプによって異なることが予想され、避難行動に際しての被験者間の個人差も考慮に含める必要がある。避難限界などの指標がある程度の幅を持つことに留意する必要がある。子供や高齢者では避難限界の浸水深が下がるのは明らかである。

今後、本装置を活用して追加で行う実験としては、スライドタイプのドアでの実験と、車に接続する水槽内で流れを与えての実験が挙げられる。

自動車水没時の避難行動について示した資料（例えば、相川、2009）には、ドアからの避難、窓ガラスを割っての避難、さらには車内に水が入った際に車内の水深がある程度まで上昇するのを待って、ドアを押し開けて避難する方法が示されている。本実験の結果からも明らかのように、ある程度の浸水深に達するとドアからの避難が困難になることが予想される。その次の避難方法として考えられるのが窓ガラスを割っての避難であるが、自動車の窓ガラスは一定以上の強度を有するために、割るのは容易ではない。避難用に窓を割るためのハンマーや類似の先端の固いもので、窓ガラスの端部を叩くと割ることができるので、水難事故対策の一つになり得ると思われる。

自動車内への浸水が始まった場合、車内側の水深がある程度まで上昇するのを待つと、車内、車外の水深差が小さくなり、ドアに作用する水圧差がある程度軽減した状態になると予想される。そのような状態での避難も考えられなくはないが、パニック状態に陥るような状況の下、大変な危険を伴うのは言

うまでもない。

また、浸水時には、車のパワーウインドーなども正常に機能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）。自動車水没時の避難は予想以上に厳しいものであることを，車を利用する誰もが正しく理解しておくことが大切である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（B）No.20310096）の補助を受けて実施した。協力いただいた青柳政樹君（当時関西大学学生），大渡慎也君（当時京都大学学生）に感謝の意を表します。また実験に被験者として参加いただいた方々，ならびに関係者の皆様にも謝意を表します。

参考文献

相川潔（2009）：自然現象・災害による緊急事態に遭遇したときの対処法（特集 クルマにおける危

機管理・対処法），自動車工業（JAMAGAZINE），43（508），pp.2-8.

石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川 一（2006）：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集，第50巻，pp.583-588.

大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一（2007）：地下空間利用者の避難困難度と利用者の水防意識について，水工学論文集，第51巻，pp.559-564.

大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一（2008）：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用，水工学論文集，第52巻，pp.841-846.

高橋和雄・高橋裕（1987）：クルマ社会と水害—長崎豪雨は訴える—，九州大学出版会，182 pp.

武富一秀・館健一郎・水草浩一・吉谷純一（2001）：地下空間へ流入する氾濫水が階段上歩行者に与える危険性に関する実験，土木学会第56回全国大会講演概要集，II-122.

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

Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI* and Keiichi TODA

* Faculty of Environmental 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. Underground inundation inflicts severe damage when urban flood occurs. In a similar way, low-lying areas like bowl-shaped depression and underpasses under highway and railroad bridges are also 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 show some experimental results of evacuation tests from a submerged vehicle and discuss the limit for safe evacuation through the doors of vehicle. From the results, it is found that a required time for evacuation and risk to safe evacuation increase rapidly as a water depth rises. The water depth of 70-80cm from the ground surface is the safe evacuation limit.

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