

水没した自動車からの避難に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON EVACUATION FROM A SUBMERGED VEHICLE BY USING REAL SIZE MODEL

馬場康之¹・石垣泰輔²・戸田圭一³・中川 一¹

Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI, Keiichi TODA and Hajime NAKAGAWA

¹正会員 京都大学防災研究所 流域災害研究センター (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

²正会員 関西大学 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-35)

³正会員 京都大学防災研究所 流域災害研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Many urbanized cities in Japan are located in alluvial plains, and the vulnerability of urbanized areas to flood disaster is highlighted by flood attacks due to heavy rain fall or typhoons. Underground spaces located in the urbanized area are flood-prone areas, and they inflicted severe damages on urban functions and infrastructures 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.

This paper shows some experimental results of evacuation tests from a submerged vehicle and discuss the limit for safety evacuation though the doors of the vehicle. From the results, it is found that required time for evacuation and the risk to safety evacuation increase rapidly as water depth rises.

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

1. はじめに

近年、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降る事例が散見される。雨量の観測結果にも、同様の傾向が表れており、このような激しい集中豪雨により、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の被害が発生することがある。一たび氾濫が発生すると、地上での氾濫被害に加えて相対的に低い場所に位置する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。地下空間で浸水被害が発生した場合、空間規模の大小を問わず危機的な状況が予想され、素早い避難行動が重要となるため、地下浸水時の危険度評価に関する研究成果が示されつつある^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}。

氾濫被害には至らなくとも、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年の7月の神戸の都賀川や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室、地下駐車場といった地下空間や、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。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、不幸にも乗用車の1名が水死する結果となった。この同じ場所では、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る危険性を如実に示している。過去にも自動車の水没による被害が発生していることを鑑みて、浸水被害発生時の危険性の把握は、被害軽減の観点から非常に重要であると考えられる。

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

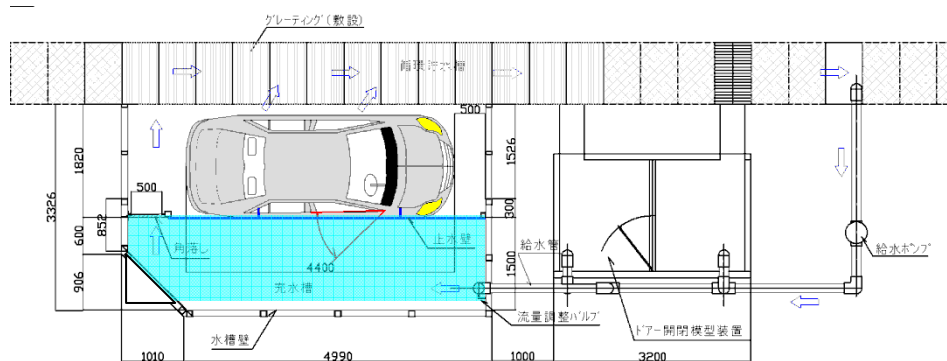


図-1 実験装置の概要



写真-1 自動車模型



写真-2 ドアの押し開け力の計測状況

（運転席側より撮影、ロードセルは写真白枠の位置）
（助手席外側から鉄パイプを介してドアを押し開けている）

ンタイプ）を使用して実験的に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た場合に自動車が水没した状況を想定しており、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。

過去の被災例や実験等では、水没初期に自動車が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。本実験では、これらの条件は考慮されていないが、早期避難が重要であることを考え、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. 実験装置および方法

実験に用いた装置の概要を図-1に示す。装置はセダンタイプの自動車と浸水状況を再現するための水槽（図中水色）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。自動車のエンジン等の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、角落しとしかから越流した水は低水槽に戻り、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、ドア開閉時の水深条件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の実験を行うように留意している。

（1）ドアの押し開け時に要する力の計測

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。実験では写真-2に示すように、ドア押し開けに必要な力

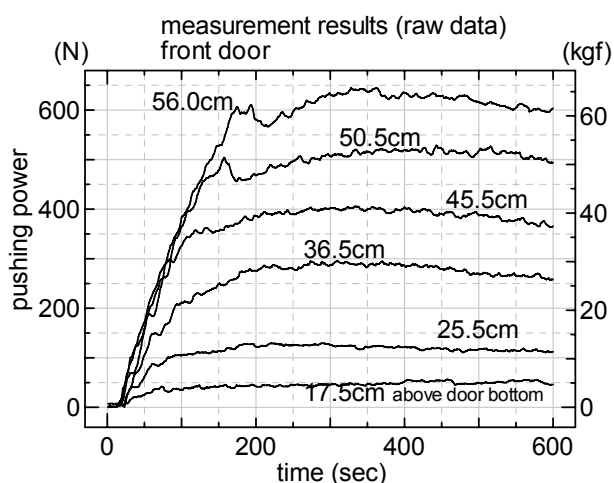


図-2 ドア押し開け力の計測結果（前部ドア）

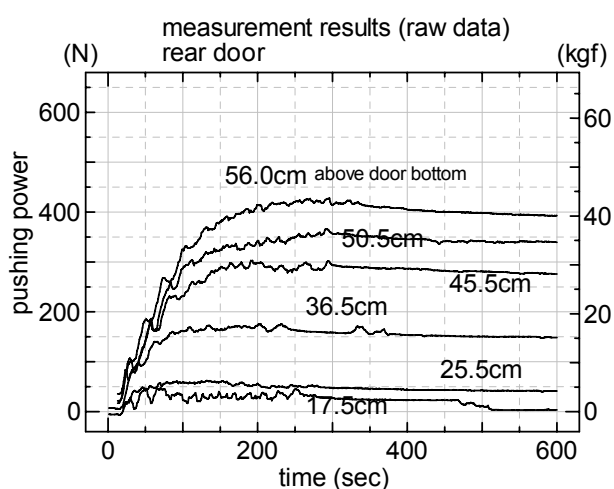


図-3 ドア押し開け力の計測結果（後部ドア）

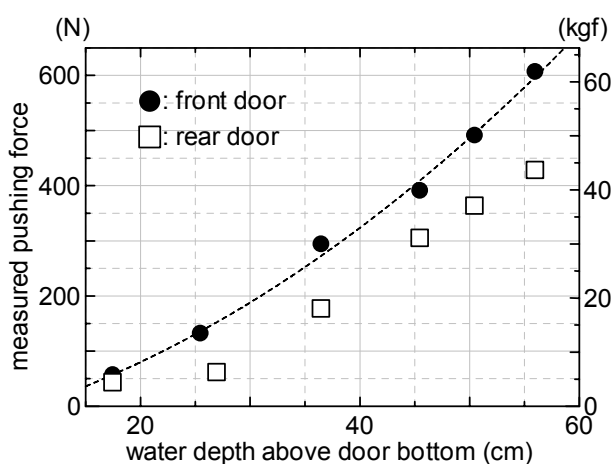


図-4 ドア押し開けに必要な力

の計測にロードセル（写真中、白い四角状）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の関係により変換される。また、実験中はビデオでの撮影も行い、ドアが開いた時



写真-3 避難実験の様子（前部ドア）



写真-4 避難実験の様子（後部ドア）

点の判定に用いた。図-2、図-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が確認されている。押し開けに必要なとなる力の計測結果より、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。

図-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水圧が一気に増大、すなわち安全に避難できる状況が急速に縮小する状況を示している。

また、前部ドアと後部ドアの押し開けに必要なとなる力の計測値を比較すると、後部ドアの押し開けに必要なとなる力は、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

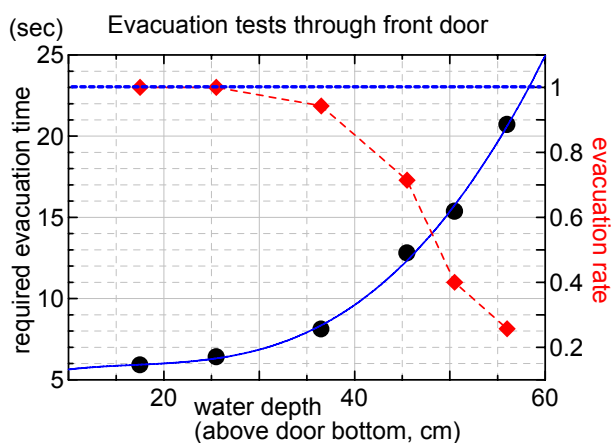


図-5 避難実験結果（前部ドア）

黒丸：所要時間，赤菱：脱出成功率（青点線・成功率100%）

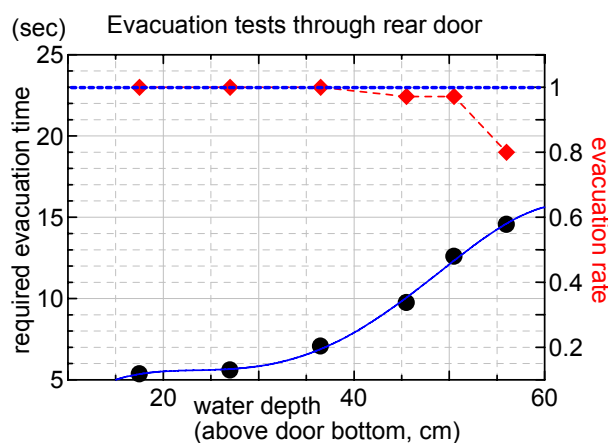


図-6 避難実験結果（後部ドア）

黒丸：所要時間，赤菱：脱出成功率（青点線・成功率100%）

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。ただし、後部ドアの押し開けに必要な力も、水深の増大に対応して急速に増大しており、いち早い避難行動が重要であることは言うを待たない。

3. 水没時の自動車からの避難実験

ここでは、自動車の浸水状況をいくつかに変化させた条件下での避難実験の結果について示す。ある程度まとまった人数の被験者を集めた避難実験はこれまでに2回実施されており（写真-3、写真-4），その概要は以下の通りである。

●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避難できるかどうか、および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”は押し始め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図-5である。ここに示した避難の所要時間は、当該実験条件（浸水深）でドアからの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。

図-6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

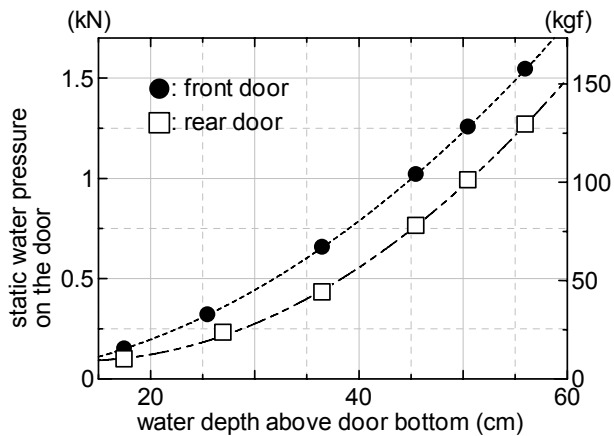


図-7 ドアに作用する静水圧

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済んだためと考えられる。図-7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、図-8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思われる。

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よりも急に小さくなる傾向を示している（図中、45cm付近）。つまり同じ浸水深でも、避難の困難度が増える結果となっている。この結果については、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

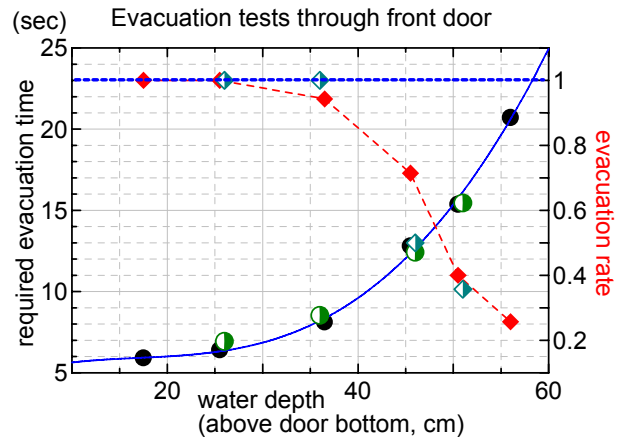


図-8 避難実験結果（前部ドア）

黒色、赤色、青点線：前出 図-5
緑色の結果：実験1の結果

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（図-5）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に近い条件であると考えられ、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ことと思われる。

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。本実験の結果が、限られた被験者数ならびにセダントタイプの普通乗用車を使用していることを考慮すると、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。

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乗用車を使用し、約50名の被験者による避難実験を行った。本実験の結果から、浸水深の増加に伴って避難に要する時間が急速に増大すること、地表面からの浸水深が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とが確認された。また、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状況が確認された。

ただし、ドアを通じての避難状況は車種、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。自動車のドアからの避難に関する危険度評価においては、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。

自動車水没時の避難行動について示した資料⁷⁾などには、ドアからの避難、窓ガラスを割っての避難、さらには車内側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なように、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ようであるので、浸水被害対策の一つになり得ると思われる。

また、本実験では自動車内への浸水は考慮していない。上述の資料等にあるように、車内側の水深がある程度まで上昇するのを待って、車内、車外の水深差を少なくすることで、ドアに作用する水圧をある程度にまで軽減されると予想される。過去に実施された水没した自動車からの脱出実験⁸⁾では、水が車内に入ることによってドアを開けるのが容易になったとの記述がある。ただし、パニックの危険性も予想されるなど、水没が進行する中でドアを開けて避難するという行動はその詳細が不明であり、加えてどのような危険性が生じるのかも明らかではないため、まずは早期の避難による安全の確保、さらには水没という状況を発生させないための対策が重要であると考えられる。

謝辞：本実験装置（自動車模型）の設置には、国土交通省の建設技術研究開発助成を受けた。本研究の避難実験データの整理には、関西大学工学部4回生の青柳政樹氏の協力を得た。また、本実験に参加していただいた方々および関係者の皆様に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 武富一秀・館健一郎・水草浩一・吉谷純一：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-122，2001.
- 2) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一・吉田義則・多河英雄：実物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験，京大防災年報第48号B，pp.639-646，2005.
- 3) 戸田圭一・岩村真理・間嶋真嗣・石垣泰輔：都市水害時の地下浸水の危険性について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第11巻，pp.163-170，2006.1.
- 4) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：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.583-588，2006.3.
- 5) 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一，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.559-564，2007.3.
- 6) 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：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.841-846，2008.3.
- 7) 例えば，社団法人 日本自動車工業会：水中に転落したクルマからの脱出法，日本自動車工業会 Web ページ，http://www.jama.or.jp/user/pr/pr_2d.html.
- 8) 井出よしひろの県政情報：ひたちなか西警察署が水没車からの脱出実験，http://www.jsdi.or.jp/~y_ide/970608suibotu.htm.

(2008. 9. 30受付)