

# 可搬式ドア模型による浸水時避難体験実験と 参加者の水防意識について

## EVACUATION TEST USING MOVABLE DOOR MODEL AND EXAMINEE'S OPINIONS ON URBAN FLOOD

中畑佳城<sup>1</sup>・石垣泰輔<sup>2</sup>・島田広昭<sup>2</sup>・戸田圭一<sup>3</sup>  
Yoshiki NAKAHATA, Taisuke ISHIGAKI, Hiroaki SHIMADA, Keiichi TODA

<sup>1</sup>学生会員 関西大学大学院 工学研究科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

<sup>2</sup>正会員 工博 関西大学 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)

<sup>3</sup>正会員 Ph. D. 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Recently, the urbanization such as the expansions of an underground space is advanced. On the other hand, urban flood menaces the spaces. In the last decade, urban floods attacked Tokyo, Nagoya and Fukuoka. It is necessary to consider the disaster prevention and reduction of damages in underground space vulnerable to flood. In this paper, The results of evacuation test by using movable door model were shown, and the safety of evacuation from a virtual underground space was examined. And, opinions of examinees on underground flood are reported here, and education effect on the disaster prevention by this device are also investigated on the basis of the questionnaire results.

**Key Words :** *urban flood, evacuation test, movable door mode ,underground flood, questionnaire research*

### 1. はじめに

近年, 地球規模での気候変動による集中豪雨が増加している. 時間雨量50mmを超える降雨も少なくなく, 時間雨量100mmを超えるような降雨も観測されている. 時間雨量50mmを超えるような降雨は, 治水整備による下水道施設の雨水処理能力を超える降雨であり水害が発生する可能性が大きい.

一方で, わが国は1960年代以降の経済発展に伴い, 都市域に人口・資産・産業が集中するようになった. 都市域への一極集中により都市化の進展が行われたが, 土地に限りがあるため, 建築構造物の高層化や地下空間開発に焦点が当てられるようになった. 都市化の進展は地表面をコンクリートやアスファルト等で被覆し, 都市部の保水・遊水機能を低下させた. 現在, 地下空間は商業施設の立ち並んだ便利な空間, 車両の往来がない安全な空間などといった観点からも注目されており, 多くの人に利用されている. 他にも, ライフラインのほとんどが地下空間に整備されており, 地下空間は様々な面で都市を支える上で非常に重要な空間となっている. その一方で,

地下空間は構造上, 排水が困難であり, 水害に対して脆弱な空間にもなっている. 近年, 「都市型水害」と呼ばれる水害が発生し, 地下空間への浸水による被害が増えている. 1999年6月に福岡県福岡市と同年7月に東京都新宿区で発生した都市型水害では, 地下空間への浸水により地下室からの避難が遅れ, 地下室に取り残され人命が失われた. このような事例は, 地下空間における浸水の危険性や水害に対する脆弱性を露呈させることとなった.

著者らは, 地下空間浸水時の避難体験実験を通して避難について検討し, 安全避難指標を提示してきた<sup>1)2)3)4)5)</sup>. また, これら一連の実験を通じ, 地下空間浸水時の危険性を周知するには, 多くの人々に浸水時の避難を体験してもらうことが必要であるとわかった. そのため, より簡便に避難体験してもらうことを目的に可搬式ドア模型を作製して体験実験を実施してきた. 本論文では, 581名に及ぶ体験者による実験結果に基づく仮想地下空間からの避難の安全性の検討を行うとともに, アンケート結果から地下浸水に対する意識と体験結果の差異, および本装置による防災教育効果について検討した結果を報告する.



写真-1 可搬式ドア模型

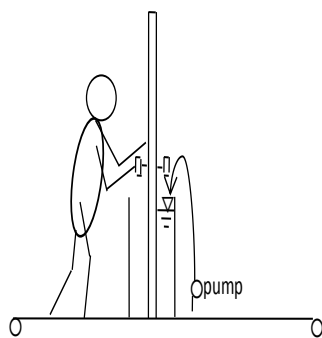


図-1可搬式ドア模型

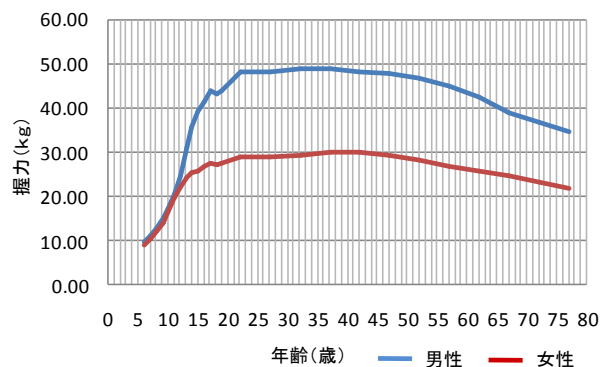


図-2 全国体力測定結果(握力)

表-1 被験者数

単位: (名)

| 年齢 | ～10歳 | 11～15歳 | 16～20歳 | 21～35歳 | 36～50歳 | 51～65歳 | 66歳～ | 計   |
|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-----|
| 男性 | 8    | 130    | 112    | 83     | 18     | 19     | 2    | 372 |
| 女性 | 2    | 101    | 66     | 33     | 6      | 1      | 0    | 209 |

## 2. 可搬式ドア模型による浸水時避難体験実験

### (1) 実験概要

使用した可搬式ドア模型を図1及び写真1に示す。模型の構造は、2つの水槽とその間に設置された高さ1.8m、幅0.83mの鋼製のドアから成り立っており、他に用意した水槽からポンプを用いて水を汲み上げ、ドア前面の水深を0.1m～0.5mまで設定できる。なお、この模型は四隅に取り付けられたローラーを使用することによって任意の場所への移動が可能である。

実験では予め被験者に開けることができると思う最大の水深を0.1m～0.5mの範囲で予想してもらい、その水深に対して被験者が避難可能かどうか調べた。なお、実験は初の体験という点を重視して各人1回とし、実験後にアンケート調査を行った。また、実験ではドアを開け終えるまで（水槽奥行き0.15mまで）に要した時間の計測も行っている。所要時間の計測に際しては、被験者がドアノブに手をかけた瞬間から、開け終えるまでとした。

本研究は、より多くの人に体験してもらうことを目的のひとつとしているため、学園祭や都道府県が主催する防災イベント、さらに近隣の中高生の授業の一環として実験を実施して、浸水時の避難を体験してもらうことにした。

### (2) 体験実験結果

実験結果については、被験者の体力差から男女別・年齢別にまとめた。ドアを押し開ける力に関しては個人個人によって様々であるが、年齢別に分類するには何らかの基準を設けることが必要であった。そこで、本報では「押し開ける力」の基礎指標として握力に着目し、全国体力測定値の握力測定結果<sup>9)</sup>を参考にして、年齢別の分類を行った。図-2に示した握力測定結果から、20歳までの間に急激に上昇すること、また、それ以降は緩やかに変化することを考慮して、11～20歳までは5歳間隔、21歳～65歳は15歳間隔で分けた。なお、それ以外は10歳以

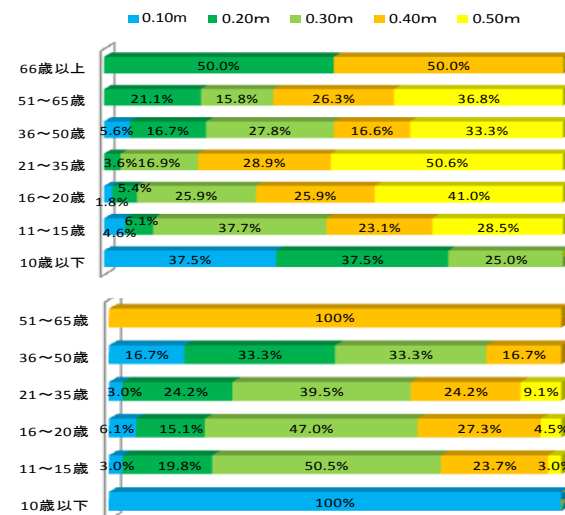


図-3 予想水深(男女・年齢別)  
上段:男性, 下段:女性

下、66歳以上とし、年齢別の被験者数を表-1に示す。

被験者の開けられると予想したドア前水深を男女別・年齢別にした分布を図-3に示す。男女とも0.3m以上を多くの人が開けられると予測していることがわかる。最も体力があるとされる21～35歳では、男性で95%以上の人が0.3m以上を予想するという結果になった。しかしながら、既往の論文<sup>2)</sup>では、ドア前水深が男性で0.35m、女性で0.3mを超えると自力避難ができなくなる危険性があることが明らかになっている。このことから、多くの人がドア前水深による水圧を軽視していると言える。

図-4は男女別・水深別にドアを開けることができた割合を示している。ここで、図-4における総被験者数は、各水深を指定した被験者の合計人数である。図-4によると、ドア前水深0.1mでは100%開けることができるが、

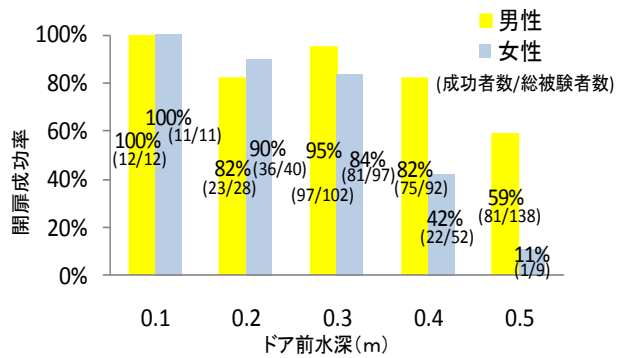
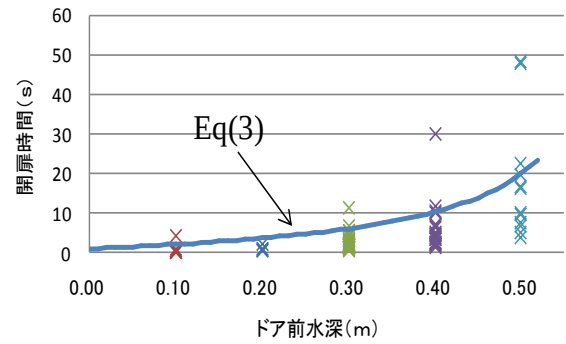
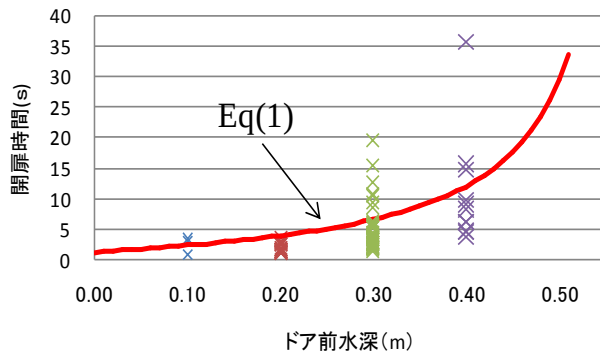


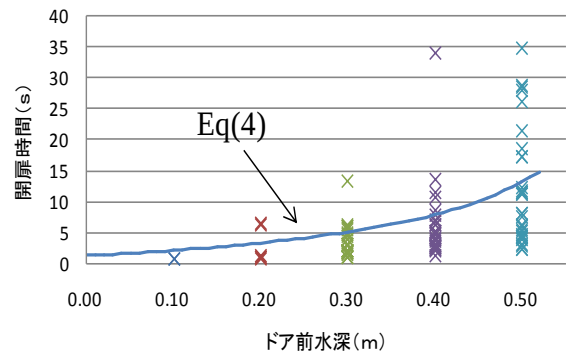
図-4 男女別-水深別開扉成功率



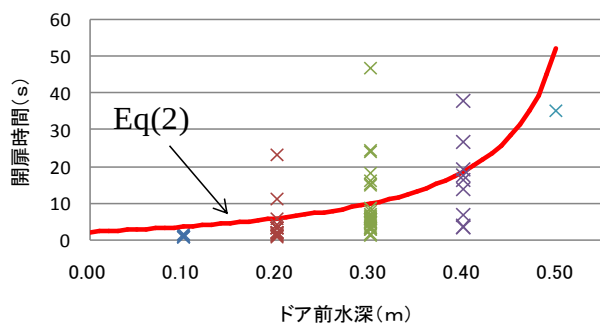
(c) 11～15歳 (男性)



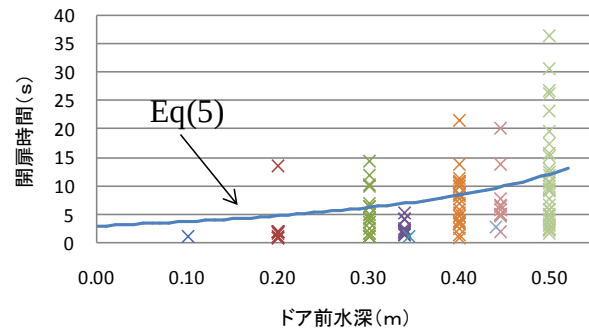
(a) 11～15歳 (女性)



(d) 16～21歳 (男性)



(b) 16～65歳 (女性)



(e) 21～65歳 (男性)

図-5 ドア開扉時間

0.2m以上になると諦める人も出てくる。ドア前水深0.5mになると男性では約6割が開けることができるが、女性では約9割の人が諦めるという結果になった。また、0.4mを超えると成功率が低くなってきており、既往の研究結果と一致している。ここで、男性のドア前水深0.2mにおいて0.3mの時よりも成功率が低くなっているが、これは10歳未満の男性が多く指定し、失敗したためである。このことから、10歳未満の子供は特に危険であると言える。

次に水深ごとにドア開扉時間をプロットした結果を図-5に示す。女性の11～15歳に対して16～20歳と21～65歳の被験者が少なかったため、16～65歳をひとつの区分としている。なお、21～65歳のグラフに関しては指定水深

が異なるものの、条件はほぼ変わらないため既往の研究<sup>1)</sup>から得られているドア開扉時間も加えている。図中の曲線は開扉時間結果の各母集団に対する95%の信頼区間値に基づいたものであり、近似式ではなく試行錯誤して求めた式である。これによると、ドア開扉時間は、成人男性が緩やかな曲線になっているのに対して、比較的体力がないとされる11～15歳の男性や、女性では急激に上昇していることがわかる。この曲線をドア開扉時間 (T: 単位sec) とし、以下の計算式を得た。

$$\text{女性 } 11\sim15\text{歳 } T = \frac{3}{0.59 - h} - 3.8 \quad (1)$$

$$16\sim65\text{歳} \quad T = \frac{4}{0.57 - h} - 4.9 \quad (2)$$

$$\text{男性} \quad 11\sim15\text{歳} \quad T = \frac{4}{0.66 - h} - 5.0 \quad (3)$$

$$16\sim20\text{歳} \quad T = \frac{4}{0.73 - h} - 4.2 \quad (4)$$

$$21\sim65\text{歳} \quad T = \frac{4}{0.78 - h} - 2.2 \quad (5)$$

ここに、 $h$ はドア前水深(m)である。なお、この曲線は統計的に求めた多くの人が避難可能であるという目安であり、100%避難可能というものではないが、ここでは避難指標として用いた。

図-5から男性は年齢が上がるにつれて、曲線が緩やかになり、図-2に示した各年齢層における握力に沿った結果となった。しかし、図-5において11～15歳の女性が、16～65歳に比べて速く開けることができるという結果が得られた。これは、18歳以上の多くの女性がハイヒールのような足もとが安定していない履物を身につけていたためと考えられる。

### 3. 小規模地下空間における避難に関する検討

#### (1) モデル概要および条件

本研究では、既往の研究<sup>3,4)</sup>では考慮されていないドアを考慮することで、より実際の小規模地下空間からの避難に近いシミュレーションの構築を目指した。なお、ドアの考慮においては、実験より得られた上記の式(1)～式(5)を適用することで、性別・年齢別の考慮も可能である。このシミュレーションを行うことにより、今まで提示されていない安全避難に必要な避難開始の目安を提示することが可能である。

本研究で用いた検討手法は、構造格子モデルを用いた氾濫計算と、避難経路の避難困難度に関する計算を組み合わせることで構築されている。構造格子モデルは対象領域を正方格子に区切り解析を進める手法であり、本研究では格子分割に当たり、一辺1mの正方格子を用いた。本報では、図-6に示した3層構造の仮想地下空間を対象とし、地下空間浸水時に浸水に気付かず、地下室に取り残された状況を想定した。また、避難者は予め設定した水深になると避難を開始するものとし、避難開始後は、扉は締まり、部屋内部に浸水はしないものとする。なお、図-6において避難者は丸で示し、避難ルートを線で示している。

避難経路に関する計算は、予め設定した経路上の格子内を人が移動するという想定で行っている。避難経路は

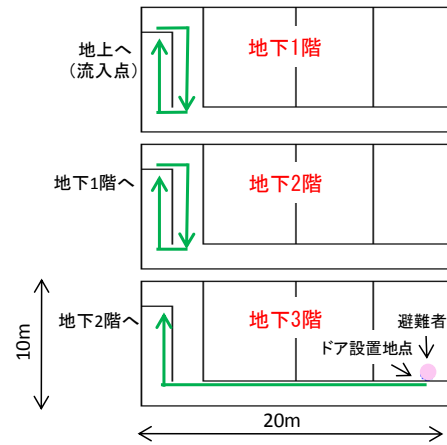


図-6 仮想地下空間図

隣接する（斜め方向も含む）格子と避難者の位置する格子の図心を結ぶ線上に設定される。地下への氾濫水の流入は、近年都市部で被害が増加している内水氾濫によるものとする。内水氾濫時の地上での水深上昇速度は0.02m/分とし、地上につながっている階段から流入させた。

#### (2) 避難に関する指標について

避難困難度を評価する指標として、単位幅比力が提唱されている<sup>3)</sup>。単位幅比力： $u^2h/g+h/2$ は単位体積重量当たりの運動量と水圧の和である。ここに、 $u$ は流速 (m/s)、 $h$ は水深 (m)、 $g$ は重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ である。既往の研究<sup>4)</sup>から、成人および高齢者が安全な避難の限界となる「安全避難」指標と避難行動が完全に不可能となる「避難困難」指標が得られているため、ここでも単位幅比力を用いた指標で評価を行う。既往の研究<sup>3,4)</sup>では成人男性が避難困難となる単位幅比力は $0.125\text{m}^2$ 、成人女性が避難困難となる単位幅比力は $0.100\text{m}^2$ となっている。また、子供に関する避難困難度指標が得られていないため、本報では、「高齢者」と同程度であると考え、11～15歳は「高齢者」の指標を適用している。既往の研究<sup>4)</sup>では、高齢男性の避難困難となる単位幅比力は $0.100\text{m}^2$ 、高齢女性の避難困難となる単位幅比力は $0.080\text{m}^2$ である。また、16～20歳に関しては、「成人」ではないが体験実験の結果や体力試験の結果から21～65歳と同程度であると言えるため、「成人」の指標を適用している。

#### (3) 実験結果の適用

計算にあたって、避難者の前にドアが存在しており、避難者は体験実験で得られたドア開扉時間の式にしたがって、ドアを開けるように設定している。また、ドアを開けてから通路を移動する際の歩行速度の低減については既往の研究<sup>3)</sup>で得られた式を用いた。なお、歩行速度の低減についても避難に関する指標と同様に11～15歳は「高齢者」の低減式、16～65歳は「成人」の低減式を適用している。

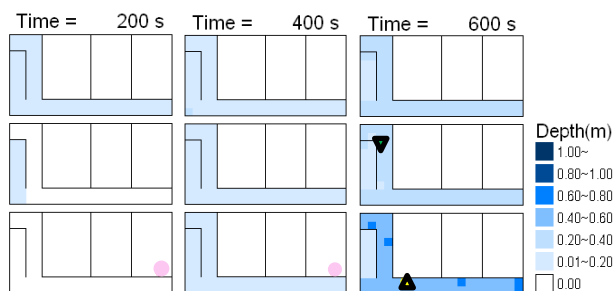


図-7 避難行動計算結果の可視化  
(避難開始水深0.4m時)

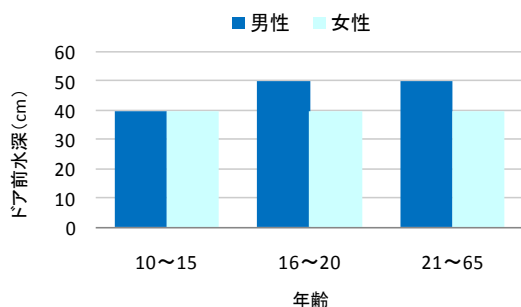


図-8 避難の可能水深

#### (4) 計算結果

図-7はドア前水深0.4mに達した時から避難を開始した場合の流入開始から200,400,600秒後の避難行動計算結果を図示したものである。避難開始前の避難者は○で描画しており、避難開始地点には「成人」の男性と女性が存在し、同時に避難開始するものとする。また、避難開始後の男性避難者は▼、女性避難者は▲で描画している。流入が開始されて400秒後には地下3階部にまで浸水が広がり、600秒後には避難開始していることがわかる。なお、このとき地下3階では、既往の研究<sup>3)</sup>で成人女性の安全避難が困難になるとされる単位幅比力が0.100m<sup>2</sup>を超えているため、女性は安全避難不可となっている。600秒経過した図からわかるように、同じ時間から避難を開始し始めても、性別によって避難時間に大きな影響を及ぼすことがわかる。図-7と同様の計算を、避難開始水深を変えて性別・年齢別に計算を行った結果から避難可能な水深を図-8に示す。この結果における避難の安全性は、単位幅比力による成人および高齢者が安全な避難の限界となる「安全避難」指標を用いている。また、ここで示した水深は0.1m刻みであるが、これはドア模型実験の水深の変化幅が0.1m刻みであったためである。男性は16歳以上が0.5m未満で避難が可能であるのに対して、発育途中である11~15歳でドア前水深が0.4m未満のとき避難が可能であることがわかった。女性は、11~15歳と16~65歳が共に0.4m未満で避難が可能という結果が得られた。

また、この結果はドアを開けることができた場合であり、個人の体力によってはドアを開けることができず、避難できない可能性もある。よって、この図に示された

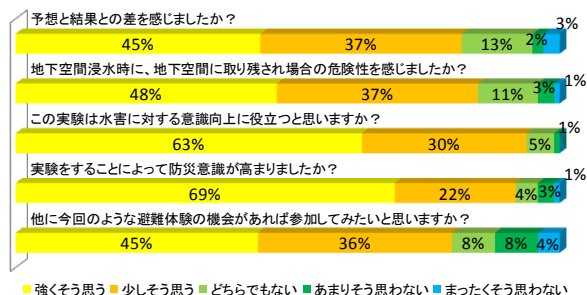


図-9 危機意識に関するアンケート結果

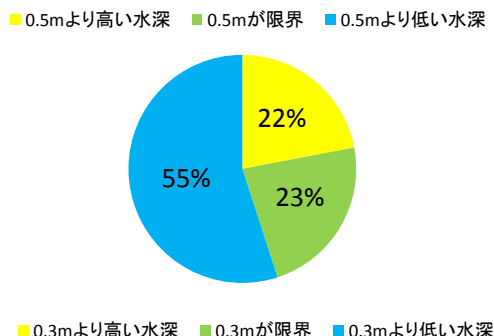


図-10 体験後の開けられると思う予想水深  
上段: 男性、下段: 女性

水深は目安になるが、個人の体力にあった早急な避難開始が必要であると考えられる。図-4に示したように、ドア前水深が0.2mになると避難ができない人がある。したがって、ここで示した結果は、あくまでドア開扉が可能な避難者を想定したものであり、安全な避難を行うには、全員が開扉可能なドア前水深0.1mに達する前に避難することが必要であることは言うまでもない。

## 4. 水害意識調査と防災教育に関する検討

### (1) 調査概要

本調査は、一般の参加者が地下浸水に関してどのような意識を有しているのか明らかにするため、実験後にアンケートによる調査を行った。アンケートは、体験後に被験者(581名)を対象に行った。内容は、ドア模型実験を体験した感想や「地下空間に残された場合の危



険性を感じたか」などの地下空間浸水時の危険性に関する意識、そして「防災意識が高まったか」などの防災教育効果について調べている。

## (2) 調査結果

### a) 地下浸水の危険性に対する意識

危機意識に関するアンケート結果を図-9に示す。8割以上の人が予想と結果との差を感じたと答えている。これは、図-3からいえることであり、水害に対して認識が甘いことがわかる。

次に、体験前に男性が最も多く開けられると予想した水深0.5mと女性が最も多く開けられると予想した水深0.3mにおける体験後に再度開けられると思う水深を予想してもらった結果を図-10に示す。男性では、22%の人が0.5mより高い水深でも開けられると回答している。女性においては67%と多くの人が0.3mより高い水深でも開けられると回答している。この項目においては自由記述式で回答してもらったが、体験前の予想以下の水深から最大で1.0mという回答があるなど、その意識には人によって大きな相違が見られる。

以上のことから、地下空間浸水時の危険性についての周知をより一層深めることが重要であると考えられる。

### b) 防災教育効果

図-9から8割以上の人が地下空間浸水時に地下空間に取り残された場合の危険性を感じていることがわかる。さらに、9割以上の人が意識向上に役立つと答えたことから、この実験は防災教育の面からも効果的であると考えられる。また、8割以上の人がまた機会があれば参加したいと答えていることから、本実験以外にも体験型の実験などを用いて防災教育を行うことは有効であるといえる。

## 5. おわりに

本研究では、可搬式ドア模型を用いて老若男女を対象とした実験及びアンケート調査を行った。また、今回行った実験と既往研究の結果を用いて、仮想地下空間においてドアも考慮に入れた避難困難度指標の避難行動計算への適用を試みた。本研究で得られた成果を以下に簡潔に示す。

- 1) ドア前水深0.1mでは100%開けることができるが、0.2m以上になると諦める人も出てくる。ドア前水深0.5mになると男性では約6割が開けることができるが、女性では約9割の人が諦めるという結果となった。
- 2) 体験実験により得られた開扉時間を数値計算へ適用することにより、ドアの開扉も考慮されたシミュレーションが可能である。これにより、都市水害が起こった場合、過去の事故でも死傷者を多く発生させ、浸水

被害が多い小規模地下空間の避難についても検討することが可能である。

- 3) 被験者の8割以上の人が体験前の予想と体験後の結果に差を感じたことから、水害に対しての認識が甘いことがわかった。また、8割以上の人が地下浸水時の避難に危険性を感じ、9割以上の人が防災意識向上に役立つと答えた。よって、この実験は防災教育の面からも効果的であると考えられ、今後も防災教育の一環として体験型実験を実施していくことは有益であるといえる。

本研究では実験結果から、性別・年齢によるドア開扉時間の指標を提案することができた。また実験結果と避難行動計算とを組み合わせることでドアの開扉を考慮した避難の安全性を検討することができた。その一方で、水害に対する意識は人によって大きな相違が見られ、認識の甘さも明らかになった。近年増加している都市型水害によって、氾濫水が地下空間に流入した場合、人命に関わる被害に繋がるであろうことも容易に予想することができる。このような被害を抑制・軽減するためには止水板の設置などのハード面も重要であるが、避難体制の強化などのソフト面の対策も重要となってくる。よって、今後も地下空間浸水時の危険性についての周知をより多くの人に深めていくことが重要であると考えられる。

**謝辞：**本研究を遂行するに際し、体験実験・意識調査にご協力頂いた方々およびデータの計測・集計にご協力頂いた方々に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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。
- 2) 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と水防意識について，水工学論文集，第51巻，pp.559-564，2007。
- 3) 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。
- 4) 浅井良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討，水工学論文集，第53巻，pp.859-864，2008。
- 5) 中畑佳城・中西健太・石垣泰輔・島田広昭：可搬式ドア模型を用いた地下空間浸水時の安全避難に関する実験的検討，第64回年次学術講演会，pp.379-380，2008。
- 6) 文部科学省 平成15年度体力・運動能力調査。

(2009. 9. 30 受付)