

防災小委員会（17年度重点研究課題）

地下空間浸水時の避難・救助システム に関する研究

重 点 研 究 課 題 報 告 書

2006年 3月 31日

土木学会地下空間研究委員会防災小委員会

防災小委員会（17年度重点研究課題）
地下空間浸水時の避難・救助システムに関する研究
報告書〔要旨〕

1. 研究の目的

地下空間の水害に対する危険性の予測やその対策についてはこれまでほとんど取り扱われてこなかった。地下空間は市街地の最深部に位置し、氾濫水が最終的に集中することから、外力や地理的条件によっては巨大災害に結びつく危険が極めて高く、その防御システムの整備は「安全で安心な街づくり」の最重要課題のひとつである。

本研究は、地下空間の実態調査や実規模スケールの大型水理模型実験により、都市水害時の地下浸水の危険性を明らかにするとともに、ソフト的対策として重要な避難誘導システムならびに救助・救援システムの望ましいあり方を提示しようとしたものである。

2. 主な研究成果

(1) 地下空間の実態調査

全国主要都市の地下街の実態調査を実施し、地下空間の構造的特徴や地形的特徴を把握し、地下空間の災害環境特性を明らかにした。

(2) 避難誘導システムの検討

京都大学防災研究所の水理施設（実物大の階段・ドア模型）を活用して、浸水体験実験を実施し、地下浸水時の避難限界を明らかにするとともに、安全な避難のあり方を考察した。その結果、地上水深が30cm相当の流入流量で成人が階段を上れる限界状況となり、押し開きのドア前面の水深が40cmを超えると、成人男性でもドアを開けることが困難になることが明らかとなった。安全な避難のためには、止水板や段差などにより地下空間に水を入れない、あるいは流入を遅らせることが大切であるが、地下への迅速な情報伝達も重要となる。

(3) 救助・救援システムの検討

実物大の階段模型を用いた消防関係者の訓練を参考に、地下浸水時の救助・救援システムについて検討した。その結果、1)服装の違いにより階段移動時の抵抗が大きく変わり、防火服などの服装では救助活動に支障をきたす、2)浸水時は階段を昇るよりも降りの方がはるかに困難を伴う、3)被災者が歩行困難な場合、担いでの救出は難しく、担架のような器具の準備も必要となる、という知見が得られた。

キーワード：水害、地下空間、避難、救援

委員：代表研究者名：戸田 圭一

石村勝伸、井田隆久、大友譲、栗岡均、畔柳剛、後藤恵之輔、小林誠、酒井喜市郎、坂井哲郎、澤田基弘、鈴木祥三、清木隆文、多田彰秀、永田尚人、中山学、西淳二、西田幸夫、日比野敏、堀内浩三郎、前田穰、松永浩、水口雅晴、吉松康公、下河内隆文、馬場康之

< 目次 >

第Ⅰ章 はじめに（戸田圭一委員長担当）	
1. 研究目的	1-1
2. 研究内容	1-1
第Ⅱ章 わが国の地下空間の実態調査（西 淳二委員担当）	
1. 北欧との地下利用比較並びに地下街の発展	2-1
2. 名古屋の地下街	2-2
3. 札幌地下街の発達と駅前通地下歩行者通路建設	2-7
4. 地下歩行空間整備計画の経緯	2-11
資料：数値解析による地下環境予測	2-14
第Ⅲ章 地下空間浸水時の避難に関する体験実験（馬場康之委員担当）	
1. はじめに	3-1
2. 実規模階段模型を用いた地下空間からの避難に関する体験実験	3-1
3. 実規模ドア模型を用いた地下室からの避難に関する体験実験	3-3
4. まとめ	3-6
資料 避難体験実験参加者の感想	
第Ⅳ章 地下空間の浸水時の避難解析（戸田圭一委員長担当）	
1. はじめに	4-1
2. 解析モデル	4-1
3. 解析結果と各対策の効果	4-5
4. まとめ	4-10
第Ⅴ章 地下空間浸水時の救助	
1. 地下浸水時を想定した救助訓練（馬場康之委員担当）	5-1
2. 東京消防庁における地下浸水時の救助活動(中澤氏の講演)（西田幸夫委員担当）	5-12
第Ⅵ章 おわりに（馬場康之委員担当）	
1. 地下空間の実態調査	6-1
2. 浸水時の避難誘導システムの検討	6-1
3. 浸水時の救助・救援システムの検討	6-2

第 I 章 はじめに

1. 研究目的

地下空間の防災に関しては、これまで火災を中心に研究が行われていたが、水害に対する危険性の予測やその対策についてはほとんど取り扱われてこなかった。地下空間は市街地の最深部に位置し、氾濫水が最終的に集中することから、外力や地理的条件によっては巨大災害に結びつく危険が極めて高く、その防御システムの整備は「安全で安心な街づくり」の最重要課題のひとつである。

近年、京都大学等の研究機関において、地下空間を対象に、大規模な水理模型実験と数値シミュレーション解析による地上・地下の浸水状況の把握、実規模スケールの施設を用いた浸水体験実験による浸水状況に対する危険回避行動（避難行動・救助活動）の困難さや限界に関する科学的な分析が実施されている。

本研究は、これらの知見を基に、重要な都市施設の水害脆弱性改善策の確立、都市型水害発生時の最適な避難誘導システムならびに救助・救援システムの確立を目指すものである。

2. 研究内容

京都大学等の研究機関による大型水理模型実験ならびに都市型水害シミュレーションで得られた洪水氾濫流況、実体験型の避難・救助行動実験と避難・救助行動シミュレーションで得られた洪水氾濫時の人間の行動解析結果を基に、以下の調査、検討を進める。

（1）地下空間の実態調査

全国主要都市の地下街の実態調査を実施し、地下空間の構造的特徴および地形的特徴を把握する。これらの調査活動を通じて、地下空間の災害環境特性を明らかにする。

（2）避難誘導システム検討

実物大の階段模型、ドア模型を活用して浸水体験実験を実施し、地下浸水時の避難限界を明らかにする。さらに、地下空間の浸水時の避難に関しては、浸水状況下での最適な避難経路の選択問題とリンクして捉えた避難行動解析を基に、安全な避難のあり方を考察する。あわせて、地下浸水防止の止水板やステップなどを設置した条件での検討を行い、それらのハード対策の有効性も確認する。

（3）救助・救援システム検討

止水板やステップなどの設置、浸水に対応した非常口や避難経路の設置、緩勾配階段の導入といったハード的な対応策に加え、実物大の階段模型を用いた消防関係者の訓練を参考に、地下浸水時の階段からの救助・救援のあり方について検討を加える。

第Ⅱ章 わが国の地下空間の実態調査

1. 北欧との地下利用比較並びに地下街の発展

北欧と日本との地下利用の差異を考えるにあたって、そのキーワードは何であるのか。やはり、気候・風土という側面が大きな要素をしめるのではないであろうか。「岩・石」の北欧と「土・木」の日本という土台をなす基礎地盤と家を建てる時の伝統的材料から始まっていると考えてよいのではないか。北欧の建造物の耐用年数の長さ、そしてそれ故 100 年後、200 年後の利用をも考えての発想が基盤にあるといえよう。

さらに、都市交通の歴史的経緯を考えると、馬車の時代を十分長く経験した欧州と、かなり急激に、ほんの短時間に馬車という時代を経ずに市街電車、そして車社会に突入したためもあって、人と車との分離という思想がつい最近まで定着してこなかった日本という図式をあげることができる。

建造物の耐用年数に加えて、キリスト教という宗教的背景とその歴史的建造物であり、その都市のシンボルともなっている教会建築を中心とした都心部の歴史的環境（景観も含めて）を、ごく自然に保全していこう、ということは議論の手前にあるというか、議論にもならない、という歴史重視という思想があたりまえのように発達しているようにも感じられる。

加えて、生き残り、サバイバルというキーワードからの、核シェルター（特にスウェーデンにおいて顕著であるが）を地下鉄駅や地下スポーツ施設に併設するというところは、いさぎよく腹を切って死を選ぶという戦国時代から江戸時代、明治までの日本人の考え方とはおおいに差異があるといえよう。

結論的には、コスト重視の貧しい日本（日本のインフラ整備の費用は昭和 40 年代以降に本格的に使われるようになった）と都市の歴史的たたずまいについてコストをかけても守ろう（守ることが当たり前）としてきた欧州といった図式であろう（西淳二：欧米の地下空間活用の思想と背景、土木学会誌、1996.5 月号、表一「地下空間利用と日欧比較」参照）。

そもそも、日本の地下街のはしりは、地下鉄銀座線の収益向上に少しでも寄与できるように、駅構内に売店を造ったことであつた。デパートと直結する形の地下鉄駅の整備（三越前駅とか）などもあつたが、日本の地下街整備が格段に発達した原因は、昭和 30 年代の後半に、駅周辺の駐車場整備需要を民間資金により行おうとした、民活型の「地下街と一体的に整備した地下駐車場」である。当時、駅周辺の駐車場を整備するほどの公的資金は不足していた背景のなか、道路管理者としては必ずしも歓迎しない地下街（道路下）について、駐車場を併設する形式での占用許可を許すというものであつた（八重洲地下街、名古屋ユニモールなど多数）。

乗降客の多いターミナル駅周辺に立地する地下街は、その後歩行者通路のネットワーク整備にも寄与する形態のものが出現した。川崎アゼリア、大阪ダイヤモンド地下街などがその代表である。この面では、モントリオール、トロント、ニューヨーク・ロックフェラーセンターなどに広がる地下歩行者ネットワークと相通ずる面が多いというべきか、カナダの事例に学んだというべきかもしれない。

地下街の商業的側面はサイズというか商業床の狭さ（道路下という制約から売り場面積が狭小にならざるを得ないという側面）から、だんだんとその経営にかげりがみえはじめてきているここ 10 年という問題をかかえるなか、上記の歩行者ネットワーク機能を重視した計画が実現してきた。東京の汐留や札幌駅前通地下歩行者通路（工事中）である。歩行者というか人間を「地下」に置くとはけしからん、という意見はもっともではあるが、現実問題として、すでに地上には車（車道）

が出来上がってしまっているという時点での歩行者と自動車との分離、あるいはバリアフリーの実現、あるいは積雪寒冷都市における冬季における歩行者への快適空間の提供（札幌など）を目的としたものである。

名古屋駅前周辺に広がる地下街連合体（整備年代も経営母体も違っているが結果として地下街と周辺ビルとを有機的に連絡する複合的地下都市的なものを形成している）は、計画的、思想的にそのことを意図したものではなかったが、出来上がって、そして近年の駅前の豊田毎日ビル再開発事業、名古屋駅ビル再開発事業とも相まって一段とその地下階のネットワーク機能を更に発揮する状況が生まれつつあるといえよう。

以下に、防災小委員会で実施した名古屋地下街の状況並びに札幌駅前通地下歩行者通路の計画について記述する。

2. 名古屋の地下街

名古屋市においては、JR 名古屋駅や名鉄、近鉄、地下鉄等交通施設の集中する名駅地区や商業業務施設が集中する栄地区を中心に地下利用が進んできた。

地下利用の第一歩は 1957 年 11 月に開通した地下鉄東山線（名古屋駅～栄間）であり、それとほぼ同時期にその起終点に名古屋地下街、（地下鉄）名古屋駅地下街、（地下鉄）栄地下街が開業している。その後、昭和 30 年代は名駅地区で次々と地下街が整備されてきた。

1960 年代後半に入ると、地下駐車場の整備が始まり、1965 年 10 月に栄公園駐車場が完成したのを皮切りに栄・名駅の両地区でその整備が進められた。また、地下街も駐車場の整備と相まって整備され、1960 年代で両地区の地下街の建設がほぼ完了している。

1970 年代後半には、いくつかの地下街や地下駐車場の整備されたが、1980 年の静岡駅前ゴールデン街ガス爆発事故以降は地下街の新設は沈静化し、1989 年ユニモール地下街の延伸、2000 年に新設された栄公園地区に完成した地下広場公園（一部バスターミナル併設）の一角には飲食、物販の地下商店が併設されている。

1999 年 10 月 11 日午前、栄地下街で起きた火災は、煙が排気口を通じて地上にまで噴出し、地下街を一時パニックに陥れた（1999.8.11 中日新聞夕刊）。これより先、1983 年地下鉄栄駅構内の変電所から出火した事故では、3 時間にわたって煙が充満し、消防士 2 人が煙に巻かれて死亡した事例がある。

以下に、地下鉄栄森の地下街、ユニモール、セントラルパークにおけるヒアリングを整理した。

（1）名古屋セントラルパーク

調査日：2005. 2. 2（水）13:30～14:30

ヒアリング先：（株）セントラルパーク取締役総務部長兼管理部長 野村治氏

調査者：西 淳二（NPO ジオテクチャーフォーラム）

施設管理者 名称：セントラルパーク

構築：昭和 53 年 11 月

改築：平成 9 年 9 月、平成 14 年 10 月栄公園オアシス 2 1 と接続

根拠法：都市計画駐車場、地下歩道は市道

施設の形態：①地下通路：公共、②地下街：大規模、③地下鉄駅：複数、

地下街面積 29,779m²、駐車場面積 25,059m²、延べ面積 54,838m²



図-2.2.1 名古屋セントラルパーク地下街

設置場所：道路下（通称久屋公園の地下部分）、公共用地下

障害者用トイレ：男女共用 1基

施設の利用可能日・時間 施設全体：休日なし（商店街は年間3日間休み）

利用可能時間：am7:00—pm22:00 地下鉄駅、名鉄駅周辺の一部は終電まで開場

エスカレータ：0 エレベータ：2 一般用トイレ：7 障害者用トイレ：1

設備 非常口20箇所 案内施設 案内板10、触地図0 場内放送あり、

携帯電話：利用可能、

情報収集と伝達方法 情報収集：防災センター、 処理：上層部への連絡

連絡方法・媒体：内線電話、携帯電話（他の地下街とはホットライン）

公衆電話：19箇所、

誘導ブロック：なし（オアシス 21 接続部から地下鉄東山線への連絡部分にのみ交通局の要望で設置）

世界 ITS 会議のうちにテスト的に点字ブロックを設置しようという話があったが進んでいない。既往の床面にそのまま貼り付けると、段差ができてしまうので、難しい。

体制：総務部、営業部、販売促進部、施設部、管理部（資本金 10 億円、従業員 32 名）

関連会社：(株) セントラルパークアネックス（資本金 4 億円）

防災訓練：連携組織あり、訓練・頻度：年 1～2 回、指導・対象：出店舗従業員とセントラル社員、

方法：防災訓練、消火訓練、屋内消火栓の扱い訓練、

防災会議：年 4 回開催

過去の火災、浸水、震災などはゼロ

課題：全体として問題点は少ない：

平常営業時における身障者対応は飲食店もふくめて店独自で対応しているが盲導犬の入店も可としている。身障者用トイレは普段は施錠してある。地下街全体に車イスの方の来場は多い。併設管理の B1 階のもちの木広場は東海地震時の避難広場にも指定されている。

（2）名古屋ユニモール

調査日：2005. 2. 2（水）16：00～17：00

ヒアリング先：(株) ユニモール代表取締役社長 今枝哲夫氏

参与施設部長 石黒克久氏

調査者：西 淳二（NPO ジオテクチャーフォーラム） 同行者：若杉和秋氏（名古屋市）

施設管理者 名称：(株) ユニモール

構築：昭和 45 年 11 月

改築：平成 7 年 1 月、延伸、改装工事完了

現在、新トヨタビルからの地域冷暖房を受け入れる工事にかかるところ

根拠法：名古屋都市計画の公共駐車場および地下街の建設にかかる道路占用許可

施設の形態：①地下通路：公共、②地下街：中規模、③地下鉄駅：複数、

公共通路等 8,384m²、店舗面積 6,163m²、駐車場等面積 8,719m²、

機械室その他 4,098m²、延べ面積 27,363m²

設置場所：道路下（通称桜通の地下部分）、公共用地下

障害者用トイレ：0 基

施設の利用可能日・時間 施設全体：休日なし

利用可能時間：通路 am7:00—pm22:30, 商店 am10:00～21:00

横断通路の一部は pm23:00 まで

エスカレータ：0 エレベータ：（地下 2 階の駐車場との荷捌き用に）2 基、

一般用トイレ：婦人用 4、紳士用 3（いずれも階段の途中にある） 障害者用トイレ：0

設備 非常口 15 箇所 案内施設 案内板 5、触地図 0 場内放送 あり、

携帯電話：利用可能、

情報収集と伝達方法 情報収集：防災センター、 処理：上層部への連絡
連絡方法・媒体：内線電話、携帯電話（他の地下街とはホットライン）
消防署とも連絡用電話あり。

公衆電話：7箇所（延べ12台）

誘導ブロック：なし

体制：受電は、中部電力からスポットネットワーク方式により停電の少ない方法で受電をし、非常時に地下街および駐車場の安全を推移するために発電機を設置している。中央監視室では、24時間の体制でコンピュータ内蔵の監視盤により地下街と駐車場の電気・空調・衛生設備及び消防用設備等を管理している。

防災訓練：連携組織あり、訓練・頻度：年1回（毎年3月15日）、指導・対象：出店舗従業員とユニモール社員（消防署からのOBも4名雇用）、方法：防災訓練、消火訓練、屋内消火栓の扱い訓練、
店舗内から横断通路までは、従業員が客を誘導することとし、その先地上までは客がみずから地上へ避難する、という誘導方法を指導している。
東海地震の避難訓練は別途行っていて、今回は避難場所ののりたけの森まで、全員で歩くなどの訓練を実施した。

過去の被災：東海豪雨時に、街路に滞留した雨水が、大型車の走行に伴う波の発生により、止水板を乗り越えての浸水があったが、商品、その他への具体的被害は無かった。

課題：問題点は大小4つある。

1つは、エレベータによる地上との連絡を確保する必要があるが、地上の街路上にはエレベータを設置する場所がないので、1～2年後に予定しているユニモール桜ビルの改築立替にあわせて、地下街と接続し、ビル側のエレベータを利用して地上との連絡をしたいと考えている。ただ、用地が1,000m²とやや狭小であるので、従来の協議会での吹きぬけまでは確保できるか、今後詳細に検討をしていきたい。それまでのつなぎとしては、地下2階の駐車場との連絡エレベータをもう少し改善改良して使うことも考えている。また、地下鉄東山線方向にある広い階段の一部を使って、スロープもしくは簡易エレベータを設置することも可能と考える。（現在は国際センター駅を経由するか、大名古屋ビルを経由するという迂回コースをとることで、かろうじて地上との接続が可能である）。

2つ目は、点字ブロックの問題。以前にハイヒールの女性が、すべってころび訴訟ざたにまでなったことがある。ユニモールは、商品構成をOLの通勤客に照準をあわせている店が主力であるので、テナントの意向としては、ハイヒールなどが引っかかりやすい点字ブロックの設置に難点をしめしている。

3つ目は、身障者用トイレであるが、現在は出入り口階段の途中の位置にすべて設置されている。これを地下街レベルとどう連絡するのかは、相当工夫が必要かとおもわれる。

4つ目は、駐車場にまだ身障者専用スペースがないことである。現在の荷捌き用の大型エレベータ2基を身障者用に改良して、B1階までは連絡できる。この先地上へは上記、ユニモール桜ビルを介してという形をなんとか実現したい（現在は国際センター駅、もしくは大名古屋ビル経由となることは前述したとおりである）。



図-2.2.2 名古屋ユニモール地下街

(3) 名古屋地下鉄栄森の地下街

調査日：2005. 2. 2 (水) 14:40~15:30

ヒアリング先：名古屋地下鉄振興(株) 施設部次長 三浦 仁氏

調査者：西 淳二 (NPO ジオテクチャーフォーラム) 同行者：若杉 和秋氏 (名古屋市)

施設管理者 名称：名古屋地下鉄振興(株)

構築：昭和32年

改築：昭和40年9月、昭和44年9月、昭和53年11月

根拠法：地下鉄コンコース上に商店街(地下街として旧建設省への報告あり)

施設の形態：①地下通路：地下鉄コンコース、②地下街：小規模、③地下鉄駅：複数、

地下街面積 延べ面積

利用者数：断面により異なるが 10,000～20,000 人/日

設置場所：道路下（通称久屋公園の地下部分）、公共用地下

障害者用トイレ：男女共用 1 基

施設の利用可能日・時間 施設全体：休日なし

利用可能時間：am7:00—pm22:00 地下鉄駅、名鉄駅周辺の一部は終電まで開場

エスカレータ：0 エレベータ：3 一般用トイレ：4 障害者用トイレ：1

設備 非常口 16 箇所 案内施設 案内板 12、触地図 0 場内放送 あり、

携帯電話：利用可能（B1 階のみ、地下鉄駅構内は利用不可）、

北 1 番街、北 2 番街との接続に車イス用スロープあり。

情報収集と伝達方法 情報収集：防災管理室（交通局）、 処理：上層部への連絡

連絡方法・媒体：電話、放送

公衆電話：2 箇所、

誘導ブロック：あり（交通局コンコース）

体制：

防災訓練：連携組織あり、訓練・頻度：年 2 回、指導・対象：テナント従業員

方法：防災訓練、消火訓練、屋内消火栓の扱い訓練、

過去の災害：平成 11 年 8 月飲食店の排煙ダクト内のチリが燃焼して煙が地下街にも充満して約 100 名の客が避難するという小火災があった。人的被害は無かった。

課題：視覚障害者をふくむバリアフリーへの対応が大切なことであることはよく理解しているが、なにせ小さな地下街会社であるから、なかなかそのための設備投資をする余裕がないのも事実である。名古屋市が進めるということであれば、何らかのタイアップをしなければならぬのも事実であるが、できれば、公的な支援などがあればやりやすい。

3. 札幌地下街の発達と駅前通地下歩行者通路建設

札幌地下街建設の推移は、昭和 46 年 11 月 16 日オーロラタウン、ポールタウン地下街の一斉オープンに始る。これは、札幌冬季オリンピック開催に合わせての、昭和 47 年 1 月の地下鉄南北線（北 24 条駅～真駒内駅間）の開通に始るものである。その後、南北線延伸、昭和 51 年 6 月の地下鉄東西線開通、昭和 63 年地下鉄東豊線開通を経て、現在平成 18 年 札幌駅前通地下歩行者通路建設詳細設計中、平成 19 年から工事着工という予定である。

地下街に関する法令との関係では、昭和 49 年 の通達「地下街の基本方針について」が、規制緩和で廃止とはいえ、それが地下連絡協議会の骨子となっており、結局生きている。それまでは建築基準法および消防法準拠によっている。通達は法律とは異なり、守らなければならないものではないが、事実上守らないわけにはいかない。たとえば、地下街の面積規定について、地下空間の広さは通達により 200m²以下となっているが、紀伊国屋(本屋)などが抵触。実情が合わないとの申請の結果、同通達廃止により、建築基準法の 500m² が生きてくる。また既存地下街において、一定間隔毎に設けなければならない広場などを今から建設することは不可能ということも事実である。

水害対策の水害発生基準は、降雨量 50mm/hr を基準値としている。例え札幌は降水量が小さい

とは言えそもそも現状に合致していない。豊平川はかつて1回氾濫(堤防決壊)したことがある。流入防止のため、通常は水の流入防止のため入口に段差を設けるが、バリアフリーの考え方と合わないため、札幌地下道では仕切板式を採用している。しかし駐車場はスロープのため、一気に水が流入する。現在詳細設計中の新地下通路は札幌駅側に向かって5/1000~7/1000傾斜している。このため流入水は駅側に一気に流れていく。排水対策として、ポールタウンは0.5m³/minのポンプを12台設置している。

既存地下街については、地下鉄との同時運用開始後35年近く経ち、その後に整備された地下に関する法令を十分満足する防災システムが整っているかは疑問(現在の法令準拠のための改造点や課題について、さらに調査を行いたいところ)。見た目では歩行スペースは余裕があり、狭い感じはしない。また照明も明るい感じ。地表へのアクセスも頻繁で、安心感はある。雪寒地域の地下街の特徴である地表アクセスの扉は二重で、夏季はしばしば開放されているが冬季は閉鎖されており、地下街内部の密閉性は比較的高い(実際にはJRや地下鉄、各ビル地下との接続箇所の密閉性も確認する必要がある)。地下街レベルから地下鉄レベルへの連絡路は少ない(駅部分のみ)。地表とのアクセスが多いため、水害時は流入水が多く、地下鉄レベルの水没の前に地下街レベルが水没すると思われる。ポールタウンの排水能力0.5m³/minで対応できるかなども危惧されるところである。

地下歩行空間については(平成17年12月25日の防災フォーラムでの講演内容も踏まえて)、観光客や出張者など内地の人の足は札幌駅を出発点とし、大通方面へ向かうことが多い(視察者の経験からの推測)。冬季に札幌駅地下鉄コンコースから地表への階段を上り、雨の中や雪の中を荷物を持って歩くのは難儀。地表商店街への影響が予測されたにせよ、大通一すすきの地下街との利便性、快適性の差は著しい。

歩行空間のコンセプトを「憩いの空間」という通常の歩行交通に供されない空間を設けたことが、今回のこの空間設計の目玉である。はたして片側わずか4mの幅員で十分であるか否かは疑問ではあるが、市役所の説明では、国からの補助を受けるときの国との協議の中でこの数値が採択された、とのことであった。安全性、とりわけ火災時の排煙については中央分離帯位置に設けられる明かり取り兼用の天窗(スルーホール)を利用する計画である。

本歩行空間貫通により、札幌の地下は広範囲に互い連続的な広がりを持つことになる。このことは、空気、火災ガス・煙の流動が広域化し、リスクが拡散することを意味する。また歩行空間中央に設けられたスルーホールは強制排気方式でないために、排煙効果がどの程度あるものか。今後、火源を想定した広域的な火災時解析*等により、被害拡大予測と対策の効果検証等を行ってはどうか。

* 鉱山、特に我が国の炭鉱で開発された通気網解析の一種で、圧力の変化による火災ガス(煙)と空気の流動を予測する解析手法。通気(換気)的なネットワ

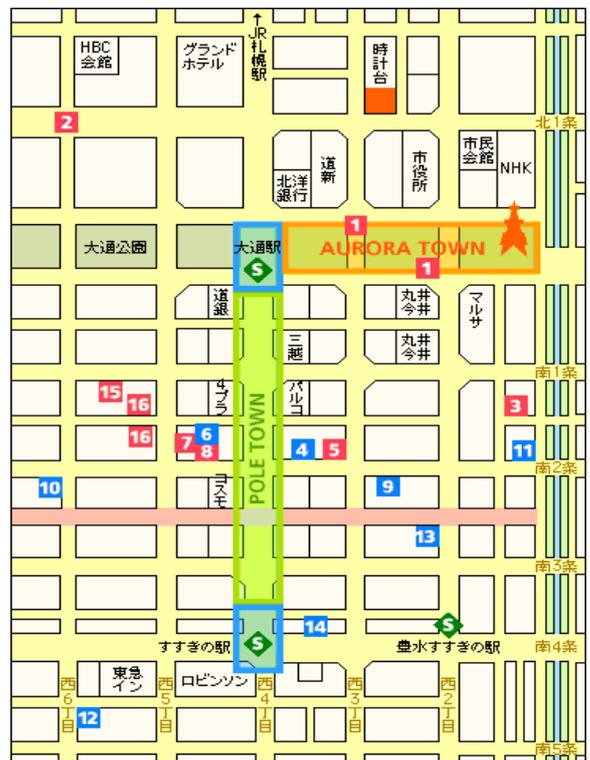


図-2.3.1 札幌地下街

ーク上において、火源と火源温度を設定することで、火災による浮力や摩擦力の増加を考慮しつつ、時間経過毎の火災ガスの位置、温度、ガス濃度等が求まる。



写真-2.3.1 防火シャッター
火災報知器
消火器



写真-2.3.2 閉店後の店舗
店用シャッター



写真-2.3.3 オーロラタウン
地下通路(暗い)



写真-2.3.4 地下空間(広場)



写真-2.3.5 透明除煙板
(区画化)



写真-2.3.6 天井給気口

4. 地下歩行空間整備計画の経緯

(1) 概要

札幌市では、これまで積雪寒冷地札幌における四季を通じて安全で快適な歩行空間として、地下歩行空間の形成を推進してきた。平成15年春、札幌駅南口において、札幌駅南口総合開発（デパート等商業施設、ホテル、オフィスなど京都駅、名古屋駅につづく駅直結空間の大規模開発）が一部オープンしたことにより、札幌駅周辺と大通駅周辺地区の商業機能の二極化が進むことが想定されている。札幌駅前通りは、札幌の目抜き通りにふさわしいにぎわい、多様性、美しさを創出することなどを目標としている。札幌駅前通り沿道には、昭和30年代、40年代に建設され、築30年以上を経過し、具体的な再開発構想があるビルなど今後建替え時期を迎えるビルが数多い状況にあり、地下歩行空間との接続が期待される。

(2) 事業の経緯

昭和47年の地下鉄南北線建設にあわせて、地下街・地下通路を整備しようという話は、当時沿道地上商店街の理解が得られず実現できなかった。その後、地下街併設型はやめて、地下通路のみの整備という計画が、札幌市役所企画調整局が中心となって進められてきたが、平成9年の市議会代表質問で、自民党の鈴木健雄氏が、同党のこれまでの地下通路推進方針を転換し、「先送りすべし」と表明、他の会派も、民主、共産が「先送り」、市民ネットが「計画撤回」を主張ということで、市議会の多数派が先送りとなった（北海タイムス、1997.6.10付け）。これを受けて、札幌市役所は平成9年度内を目指していた地下通路整備計画の都市計画決定を断念した（北海道新聞、1997.7.12付け朝刊）。平成15年春の札幌市長選挙は、25%条項に基づき再選挙（2003.6.8）となったが、この選挙においても大きな争点となった（北海道新聞2003.6.5付け、札幌圏版朝刊）。新市長に当選した上田文雄氏は、この記事のなかで「地下通路自体は否定しないが、市民の意見を聞きながら何が最善なのか慎重に判断し進める」と答えている。ちなみに、北海道新聞世論調査では、建設推進派が31%、慎重派は55%と世論が割れた状況である。NPO法人による地下空間利用者札幌会議という勉強会「市民の声を生かした地下通路とは」も2002年9月から活動しはじめている（同上新聞記事および北海道建設新聞2003.5.29付け）ことから、今後は市民・納税者の意見と市民・利用者のニーズを反映させた利用活用のためのプランづくりが望まれている。

(3) 官民協力について

平成12年度の市民アンケート調査、平成13年度の公募市民50名によるワークショップなどを通じて把握された意見をもとに、施設づくりの基本的方向性は以下のとおりである。

- ①札幌駅～大通駅間の歩行機能に加え、空間の広がりや地上との一体性の創出、ビル低層階への楽しさを支える機能の導入および民間都市再開発の誘発など、官民一体となって「にぎわいの軸」形成を先導するため、沿道ビルと連携した空間を創る。
- ②そのため、沿道ビルとの一体的接続を進めるとともに、歩行部分以外の空間（たまりの空間、交差点広場）の活用を図る。とくに、ビルと接続している部分は沿道ビルと一体性のある活用を図る。
- ③また、道路内での空間活用にはさまざまな制約があるため、道路法に基づく兼用工作物協定の活用（活用を図る部分を条例で広場として位置づけ、協定により広場管理者が管理するなど）、あるいは空間活用を行う新しい仕組みづくりなど検討を行う。

官民パートナーシップにより、20m の地下通路部分は国の補助金も入れて公共で造るが、接続部分の約 8m 部分は接続を希望する民間ビル側の負担で造ることになる。また、憩いの空間の活用あるいは沿道ビル側の広場的空間と一体となった部分の活用、空間の維持管理運営においては、「官民一体型の協議会もしくはNPO」によるなどの方策も考えていかなければならない。

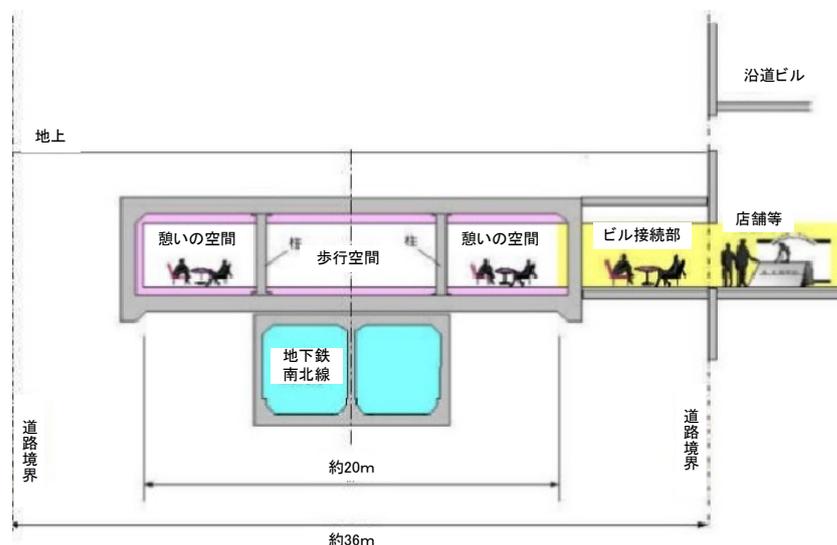


図-2.4.1 札幌地区地下歩行空間計画断面図

参考文献

- 1) 地下空間利用研究グループ：地下都市—ジオフロントへの挑戦、清文社、1989
- 2) 土木学会：地下空間と人間①②③④（④地下空間のデザイン）、丸善、1995
- 3) 平成16年度大深度地下におけるバリアフリー化の推進・アメニティの向上に関する検討調査報告書（案）、平成17年3月、（委員長：西淳二、副委員長：神作博、委員：西田幸夫ほか）
- 4) 建設省における大深度地下利用に関する調査報告書、平成12年3月、建設省大臣官房技術調査室
- 5) 地下における空間有効活用方策に関する調査検討委託報告書、平成16年3月、（社）日本トンネル技術協会
- 6) 地下・空間利用1985、国土政策機構、1985. 12
- 7) 月刊建設オピニオン、2000. 7月号、特集：新たなフロンティア大深度地下への挑戦
- 8) （財）地下鉄互助会平成13年度公益基金交付金、地下鉄駅空間における人間避難行動研究成果報告書、2002年3月
- 9) 名古屋駅地区地下空間サインシステム計画、名古屋市、平成17年10月（名古屋市地下空間サイン検討委員会、座長：西淳二、委員：神作博、三浦仁ほか）
- 10) 名古屋の地下空間—名古屋の地下空間の過去、現在、未来がわかる—、名古屋市、平成18年3月（パンフレット）
- 11) 西淳二：地下空間のデザイン、都市地下空間活用研究、No.20,pp33~45,1993、
- 12) 都市地下活用研究会1989.7：ヨーロッパ都市地下空間活用事例及び法制度調査団調査報告書（1989.3.27~4.8）
- 13) 都市地下空間活用研究会編：地下都市をデザインする、1991

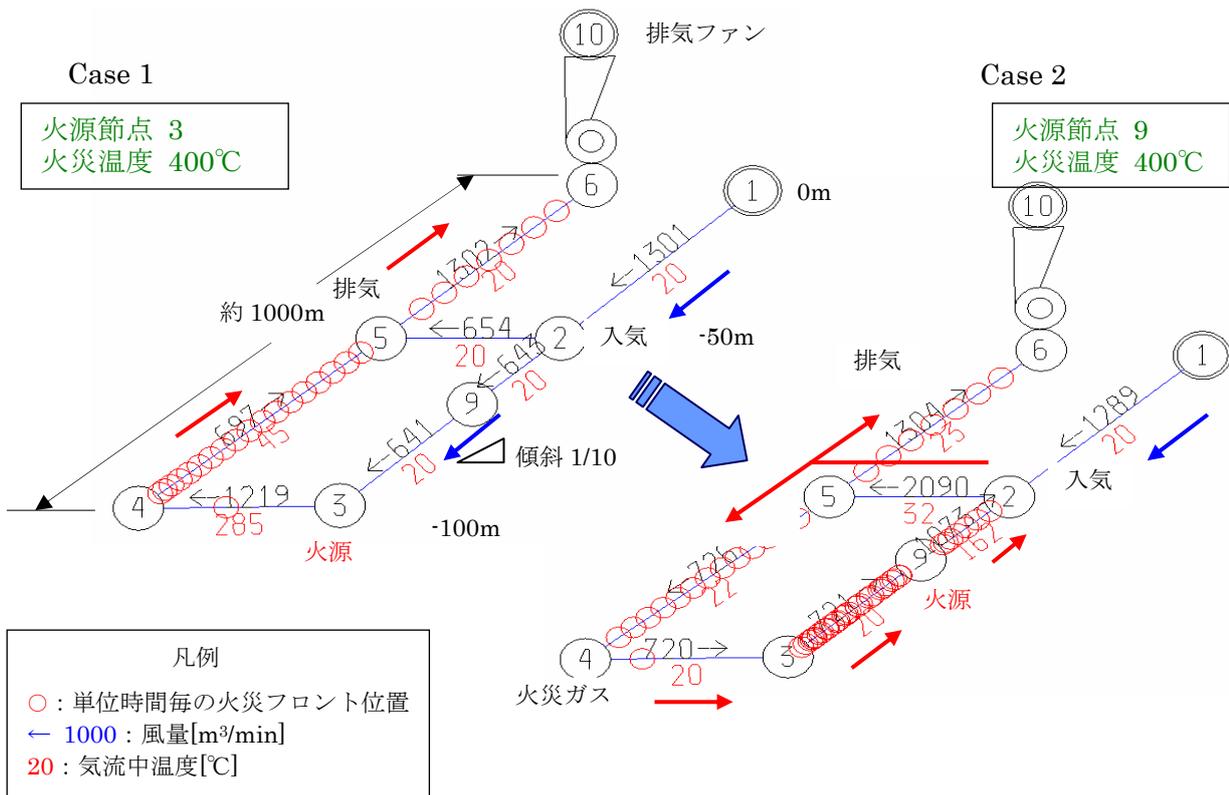
- 1 4) SD 別冊 3 2 号、スポーツのための空間、資料提供・執筆協力:西淳二 p64~67,
- 1 5) ディテール 9 5 (1998.1) ,特集:地下空間のディテール、
- 1 6) UBD 研究会訳:地下建築物のデザイン手法、丸善、1 9 8 7
- 1 7) 名古屋都市センター:アーバン・アドバンス、No.11,1998.9、特集:都市と地下利用、
- 1 8) 羽根義、小林浩訳:地下空間のデザイン、1995,山海堂、
- 1 9) 世界の地下鉄—1 1 5 都市の最新情報—、日本地下鉄協会、2000
- 2 0) 地下都市計画研究会編著:地下空間の計画と整備、大成出版社、1994、
- 2 1) 建設コンサルタンツ協会:明日への JCCA,Vol.187,特集:地下利用—都市インフラの新たなフロンティア、1995.4
- 2 2) 月刊建設オピニオン、2000.5 月号、「地下空間活用の現状と可能性」、
- 2 3) 大深度地下利用に関する技術開発ビジョン技術開発テーマ報告会、平成 1 4 年 5 月 3 0 日、四谷区民ホール(学、協会、組合共催)資料

数値解析による地下環境予測

- 通気網解析
 - 風量解析／熱環境解析
 - 通気ネットワークの風量、温度、湿度等の解析
 - 火災時解析・退避解析
 - 通気ネットワーク上の火災の影響予測と避難路の解析
- 数値流体力学解析—Computational Fluid Dynamics
 - 粉じん挙動解析・温度分布解析

【地下施設の火災ガス挙動の数値解析例】

火災時のガスや煙の挙動は予測しがたく、特に落差と温度差が有る複雑な地下施設においては、数値解析による通気挙動予測と、それに基づいた通気制御計画の立案が必要である。下記に火災ガス挙動の例を簡易モデルで示す。まず、傾斜 1/10、落差 100m の 2 本の斜坑と連絡坑道からなる地下施設モデルを想定し、異なった火源で火災を発生させて火災ガスの挙動を見る。

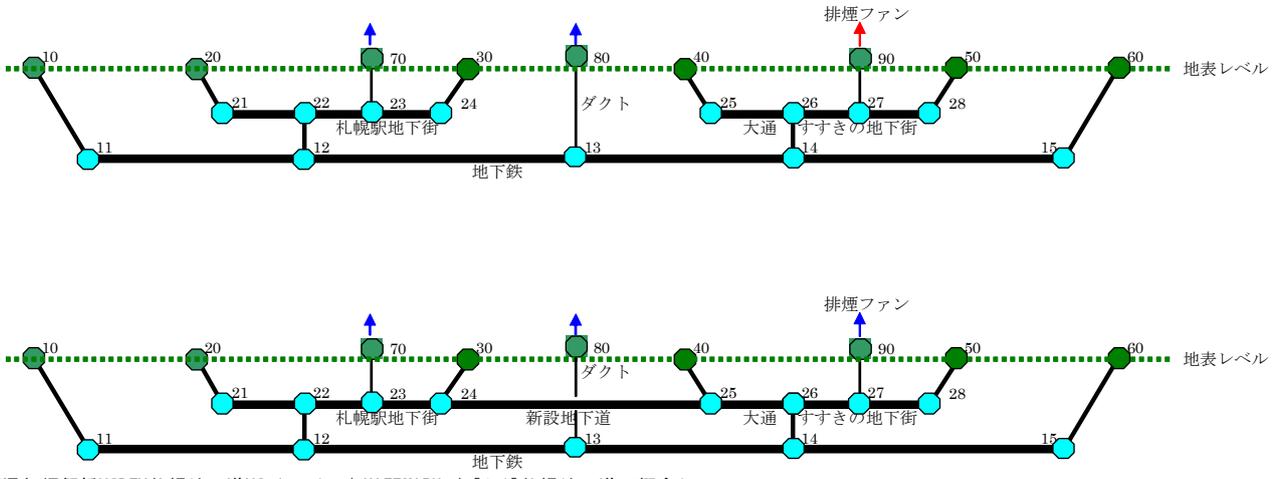


参考図 1 火源の位置による火災ガス挙動の変化例

Case1 ではもとの風の流れてに沿って火災ガスが流れるが、Case2 のように火源の位置が入気坑口側にずれると火災ガスが浮力により逆流（上昇）し施設深部で対流する。この結果、地下は殆ど火災ガスに汚染される。

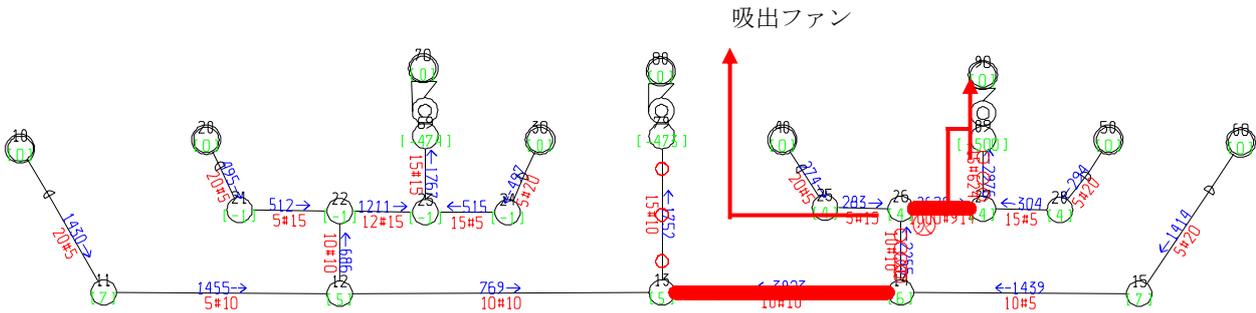
【札幌地下道開通による火災ガス挙動】

通気回路が変更された場合、条件によっては火災による被害が拡大する。例えば札幌駅地下街と大通一すすきの地下街、および地下鉄南北線からなる極く簡単な地下構造モデルを想定し、地下道が開通する前と開通後における火災ガスの挙動を簡易解析してみる。図 2 に開通前と後の地下構造のモデル概念を示す。地表との連絡路や地下街と地下鉄の連絡路、ダクト等の通気回路を最小限の回路で構成。



参考図 2 地下道と地下鉄からなる地下構造のモデル概念

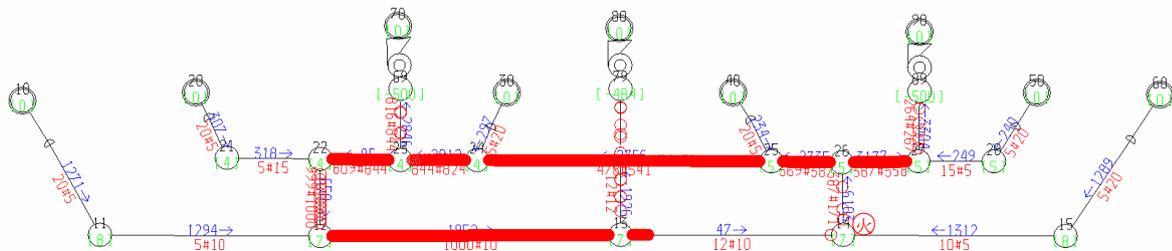
上段：現状、下段：地下道開通後 ●：地表節点 ●：地下節点 ⊕：ファン



参考図 3 現状の地下構造モデル概念の火災時解析結果

地下鉄(節点 14)で 1,000℃の火災発生、地下街と地下鉄 2 箇所の排煙ファンで排煙

上段：風量(m³/min)、下段：温度(℃)、節点下段：圧力(mmAq)



参考図 4 地下道開通後の地下構造モデル概念の火災時解析結果

地下鉄(節点 14)で 1,000℃の火災発生、地下鉄と地下街を広く汚染、3 箇所の排煙ファンで排煙

上段：風量(m³/min)、下段：温度(℃)、節点下段：圧力(mmAq)

第三章 地下空間浸水時の避難に関する体験実験

1. はじめに

1999年および2003年に福岡、2000年に名古屋で発生した水害は、複雑かつ多層な都市空間において洪水氾濫による地下空間の危険性を顕在化させた。被害軽減対策の一つとして、地下空間からの避難が重要であることは言うまでも無いが、浸水発生時の避難困難度に関する定量的な評価はあまりなされていなかった。本章では、実物大の階段模型（実際に地下街や地下鉄駅に連絡する階段とほぼ同じ仕様）を用いた地下空間浸水時における階段からの避難を想定した実験、および実物大ドア模型を用いてドア前面が浸水した状態で避難する場合を想定した実験の結果を報告する。即ち、実規模階段模型による避難体験実験の結果と検討結果、および地下室からの避難を想定した実規模のドア模型による避難体験実験の結果と検討結果をまとめ、地下空間浸水時の避難困難度について検討を行った。

2. 実規模階段模型を用いた地下空間からの避難に関する体験実験

本節では、浸水発生時の避難路となる階段において、流水状態での避難困難度を実規模の階段模型を用いた避難体験実験結果に基づいて検討する。

(1) 実規模階段模型を用いた実験

実験に用いた装置の概要および実験の様子をまとめて図-3.2.1に示す。装置は、高水槽とそれに続く地上を想定した平坦部、高低差3m、全20段からなる階段部（踏み板長さ0.3m、蹴上げ高さ0.15m）、および踊り場と水路部から構成されている。階段部、踊り場、水路部の幅は1mである。高水槽から平坦部を通り階段を流下した水は、踊り場および水路部にある4箇所の排水口より低水槽に戻り、4台のポンプで高水槽に循環される（最大 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ ）。以下の実験では、高水槽に続く平坦部での水深を地上水深として結果の整理を行っている。

体験実験の参加者は表-3.2.1の通りで、男性75名、女性30名、合計105名に協力いただいた。本研究では、大きく分けて2つ実験を行っている。一つは、年齢、性別による違いを検討することを目的とした基本条件下での実験、次に実際の浸水時避難を想定した条件を付加した場合の実験である。ここで、基本条件とは、あらかじめ準備された運動靴（以下ではスニーカーと呼ぶ）あるいは底面の状態が同様の個人の運動靴を履いた状態を意味し、得られたデータを本実験の基準としている。また、実際に想定した条件とは、詳細は後述するが、革靴にズボンといった実際の地下空間利用者の服装を想定した条件を考慮した実験ケースを意味し、より現実に近い条件下でのデータを収集することを目的としている。

いずれの実験でも、図-3.2.1に示した階段上端にある平坦部を地上と想定し、平坦部の水深 H を地上水深として浸水のない状態（ $H=0\text{cm}$ ）から、10cm、20cm、30cm、40cmと段階的に変化させ、各水深条件の下で、階段下の長さ5mの踊り場（以下では直線部と呼ぶ）と20段の階段（移動距離=6.71m、以下では階段部と呼ぶ）を移動するための所要時間を計測した。なお、小学生、中学生、女性では地上水深20cm以上、男性では30cm以上の条件では、安全を確保するためヘルメットおよび命綱を着用した。また、すべての体験時には、ビデオによるモニタリングを行い、実験時の安全確認を徹底した。

以下における避難困難度に関する検討結果を理解する上で階段上を流れる流水の基本的な特性の把握が重要である。従来の研究結果¹⁾に基づき、階段部での流動特性の概要を以下に述べる。

階段上を流れる水の量（流量）は、地上水深の増加に伴って増え、H=10cm で約 0.05m³/s、20cm で約 0.15m³/s、30cm で約 0.3m³/s、40cm で約 0.45m³/s となる。また、階段上での流速は、階段を下るにつれて加速するため、階段下部での流速は、H=10cm で約 2m/s、20cm で約 3m/s、30cm で約 4.5m/s、40cm で約 5.5m/s という非常に大きな流速に達する。

（２）基本条件（スニーカー着用時）での避難体験実験結果

図-3.2.2 は、基本条件下における全体（直線部+階段部）、階段部、直線部における避難時間の測定結果である。男性の平均年齢は 31 歳、女性は 34 歳、中学生は 12 歳、小学生は 8 歳である。いずれの図においても、男性、女性とも地上水深が大きくなるにつれて避難時間が長くなっており、流入流量を規定する地上水深が避難困難度に関係していることがわかる。男性の避難時間を基準にとると、女性は男性の約 1.5 倍、小学生・中学生では約 1.7~1.8 倍となっている。男性と女性の避難時間の比率は階段部および直線部に分けた場合でも同程度であるが、中学生の場合異なる結果となっている。これは、中学生の被験者数が 3 名と少ないことが一因と考えられる。計測された避難時間から避難速度を計算すると図-3.2.3 のようになる。結果から、地上水深が増加するにしたがって避難速度が低下し、地上水深が 40cm になると、浸水のない状態の避難速度に対し、60%~40% 程度にまで低下することがわかる。階段部と直線部を比較すると、直線部の速度に比べて階段部の速度は遅く、地上水深が増加するにつれて、階段部の避難速度はさらに低下している。このことは、地上からの深い場所に位置する場合、階段を通じて流入する流れの影響を受けて避難に要する時間が長くなることを意味している。したがって、避難計画を策定する際には、最も不利な条件となる地上水深での浸水時に対応する避難速度を基準とすることが必要となる。

（３）階段を通じた安全な避難のための限界地上水深

前節(2)で示した結果より、避難困難度は地上水深の増加とともに増大する傾向を持つことが確認されたが、安全避難のための限界となる地上水深を示す明確な根拠を見出すことはできなかった。実験では、地上水深が増えるにつれて流速が大きくなるとともに、直線部および階段部が気泡の混入の影響もあって見えにくく、階段上は水が高速で流れ落ちるスロープとしか認識できない状況となっていた。このような大きな流速に起因すると思われる恐怖感および階段位置を認識できないことによる不安感のためか、地上水深が大きい場合には体験者が躊躇する場面も見られた。つまり、避難が安全に行えるかどうかは、避難者の意識にも大きく影響されると予想される。ここでは、体験者に対して実施したアンケート結果に基づき、安全避難の限界となる地上水深について検討する。

アンケートは、階段模型での体験実験後の男性 48 名、女性 20 名、合計 68 名にお願いした。アンケート内容は、各地上水深での避難困難度の 5 段階評価（体験前と体験後）、停電・手荷物などの条件が付加された場合の避難限界水深、地下浸水に対するイメージ、実験の改善点の 4 項目である。以下では、地上水深に対する避難困難度の 5 段階評価および予想避難限界水深の結果を示す。表-3.2.2 および表-3.2.3 は、各地上水深に対する避難困難度に関する回答を、それぞれ回答数および割合で示したものである。この結果から体験前と体験後の平均評点を求め、グラフにしたものが図-3.2.4 である。表の下部に示したように、評点が 3 より低い場合は安全避難が可能、3 より高い場合は困難であると感じるとした。この基準に従って図-3.2.4 の結果を見ると、体験の有無あるいは性別にかかわらず、評点 3 となるのは地上水深が 30cm であり、この水深が安全な避難のための限界水深を設定する一つの目安となり得ることがわかる。また、予想避難限界水深に関する回答

を、5cm 毎の頻度で示した結果が図-3.2.5 である。この結果からも、男女ともに 25～30cm 程度を避難限界水深と回答する人が多く、図-3.2.4 の結果と同程度の水深が安全な避難の限界水深として妥当な数値であることを示している。以上、実規模階段模型を用いた実験の結果から、階段を通じた安全な避難が可能となる地上水深の限界値は 30cm と判断される。

(4) 付加的条件下での避難体験実験結果

従来の研究から、片足に作用する流体力が、素足、素足にスニーカー、長靴、スニーカーに長ズボンという順に大きくなるという結果¹⁾ が得られている。これらの結果を考慮し、表-3.2.1 に示した 4 つの条件 (胴長の着用、停電時を想定して照明を落とす、片手に荷物を持つ、ハイヒール (5cm 程度) の着用) の下での実験を行った。胴長の着用は、靴と長ズボンという一般的な条件を想定したものである。また、停電時の条件では、安全性を考慮して全くの暗闇とすることは避け、薄明かりの状態としたため、後に示すように基本条件の結果との差は明確にはならなかった。

図-3.2.6 は、上記 4 条件を付加した場合の避難時間 (男性) を基本条件の結果と比較し、全体 (直線部+階段部)、階段部、直線部に分けて示したものである。結果から、停電時、片手荷物の結果は基本条件 (スニーカー) の結果と差がなく、むしろ避難時間は短くなる傾向がみられる。一般的に、別条件が追加された場合には避難時間も長くなると考えられるが、ここでは逆転する結果となった。この理由として、種々の実験を同日で行ったために、体験者が流水中の階段を上る実験に慣れてしまったことが一因として挙げられる。図-3.2.7 は、避難時間 TH を浸水なしの条件下での避難時間 T0 で無次元化した時間を示している。この図から、停電時および片手荷物の結果は基本条件のスニーカーとほぼ同様であり、男性の避難に対しては大きく影響しないと言える。一方、地上水深が大きくなるにつれて胴長着用時の結果は基本条件 (スニーカー) の結果を大きく上回るようになり、地上水深が 40cm の場合には基本条件の避難時間よりも 3 割ほど大きくなる。この結果は、階段部での結果でより顕著であり、胴長という抵抗の大きな服装の影響は階段を上る際に大きくなるのが分かる。同様に女性の結果を整理したものが図-3.2.8 (避難時間)、図-3.2.9 (無次元化時間) となる。女性の場合にも、階段部、直線部を合わせた避難時間に関する結果より、基本条件 (スニーカー)、停電時、片手荷物、ハイヒール、胴長の順に避難時間を要することが分かり、一般的に想定される結果と一致する。また、女性も男性と同様に、胴長着用時の結果が他の結果を大きく上回り、その差は、男性の場合よりもかなり大きくなっている。以上の結果より、履物と服装 (下半身) が避難困難度に大きく影響することが分かった。特に、流水中での抵抗が増えるような着衣 (例えば、靴と長ズボンの着用) の場合には、避難困難度が基本条件に比べて高くなる傾向があることも明らかとなった。

3. 実規模ドア模型を用いた地下室からの避難に関する体験実験

都市における比較的規模の大きなショッピングモール、またビルおよび住居の地下室などは、水害時の浸水、避難困難な状況の発生が危惧され、その危険性が指摘されつつある。ここでは、これらの小規模な地下空間から、地下室のドアを開けて避難する場合を想定した体験実験に基づき、避難困難度に関する検討結果を示す。

(1) 実規模ドア模型を用いた実験

図-3.3.1 および写真-3.3.1、写真-3.3.2 に、実験に用いた実物ドア模型の概要を示す。これは、

二つの水槽の間に実物の鋼製ドアを設置し、低水槽からポンプを用いて水をくみ上げ、いずれか一方の水槽に水を溜めることにより浸水時の状況を再現する実験装置である。ドアは市販されているもので、幅 82cm、高さ 2.0m の鋼鉄製である。そのドア前面水深は、写真-3.3.2 に示すように水槽の排水口に設置した角落しの高さを変えることにより調節が可能である。なお、角落しを越流した水は低水槽に戻るようになっている。

この装置を用いて次に示す 2 種の実験を行った。一つは、ドアを押し開けるために必要な力および発揮できる力の計測である。もう一つの実験は、設定されたドア前面の水深の下でドアを押し開けることができるかどうか、さらには開けたドアを抜け出までの所要時間を計測する実験である。体験者は、成人男性 47 名（力測定実験：45 名、避難体験実験：41 名）、成人女性 12 名（全員 2 種の実験に参加）の合計 59 名である。なお、計測および実験の詳細は、結果とあわせて示す。

（2）体重とドア押し開け力との関係

地下室のドアは、火災時の避難方向を考慮して押し開けドアが多く、地下室からはドアを押し開けて避難することになる。その場合、ドア前面（室外）が浸水した際には、ドアに水圧が作用する結果として普段以上の力で押し開ける必要がある。このような状況を想定し、写真-3.3.3 に示すように、立った姿勢（立位）でドアを押し開けた際に発揮できる力を計測した。写真で体験者が押しているのが“ロードセル”と呼ばれる力を測るための装置であり、原理としては体重計と同様である。この装置を用いて力を測定すると、図-3.3.2 のような結果が得られる。ここでのデータは 0.1 秒毎に計測されているが、図に示すように大きく変動しているのがわかる。予備実験および体験実験の結果より、瞬間的な大きな力ではドアを開けることはできず、ある程度継続できる力でドアを押し開ける必要がある。その結果をふまえて、ここでは図に示すように 1.0 秒間の移動平均値をドアの押し開けを評価する力と仮定し、以後の検討に用いた。

図-3.3.3 および図-3.3.4 は、ドア押し開け時に発揮された力と体重との関係を男性と女性に分けてまとめた結果である。図から、体重と押し開け力との相関は高く、データはある特定の範囲内に分布していることが分かる。図にデータの上限と下限を示す直線（体重に対する一定の割合を表す直線）を併示した。本実験の結果では、男性では体重の 45%～80%程度、女性では 40%～70%程度の押し開け力を発揮できることがわかる。

（3）ドア押し開け避難が困難となるドア前面の水深

前節の測定結果より、押し開け時に発揮し得る力の範囲が把握できたので、ドアを押し開けるのに必要な力とドア前面の水深の関係が分かれば、押し開け可能な水深の上限、すなわち、避難限界水深を推定することが可能になる。

そこで、ドアを押し開けるのに必要な力とドア前面の水深との関係を明らかにすることを目的として、写真-3.3.4 に示す測定装置を設置し、種々のドア前面水深に対し、ドアを押し開けるために必要な力の計測を行った。実験では写真に示すように、ドア押し開けに必要な力の計測にロードセルを用い、ドアを押し開けるにはジャッキを使用した。また、ドアの変位およびドア前面水深の測定には超音波変位計を使用した。図-3.3.5 は、ドア前面の初期水深（ドアが開く前）が 46.1cm のケースにおけるドアに作用する全水圧、ドアの変位および力の時間変化を示したものである。なお、計測では、ジャッキを用いてほぼ一定の速度でドアを開け、ロードセルにより計測された力のピーク値（図中赤線のピーク値）を、ドア押し開けに必要な力とした。

以上の方法で得られたドア押し開けに必要な力とドア前面水深との関係を示したものが図-3.3.6、図-3.3.7である。両図中の曲線が、ドア前面水深と押し開けに必要な力との関係を示している。これに押し開け時に発揮できる力の計測結果から、押し開けが可能なドア前面水深の上限、すなわち、避難限界水深を推定することができる。この方法で、男性および女性の避難限界水深を求めると、図に示すように、男性（体重 65kg）で 35cm～47cm、女性（体重 50kg）で 29cm～38cm となる。このように避難限界水深の範囲が推定されるが、実際の避難行動時には、全員が避難することが大前提であり、その点を考慮すると、成人男性では 35cm 程度、成人女性では 30cm 程度が避難の限界になると想定される。また、本研究での体験者は成人の健常者であり、災害弱者となる老人・若年者などの避難を考慮すると、避難限界水深をさらに低い水深に設定する必要があるのは言うまでも無い。本実験では、体験者の安全性確保を第一としているので、老人や若年者による体験実験は実施していないが、今後何らかの方法で検討すべき課題であると考えている。

（４）体験実験結果および検討

前節までは、押し開け力の測定結果から避難限界水深について検討した。ここでは、避難体験実験結果から限界水深について検討し、両者の結果の比較検討を行う。表-3.3.1 よび表-3.3.2 は、男性 41 名および女性 12 名の体験者について、設定したドア前面水深での避難に成功したかどうかについて結果をまとめたものである。避難に成功するというのは、体験者がドアを押し開けて外側（水が溜まっている側）に体全体がでることと定義し、その成功者の割合を成功率としている。つまり、成功率とは、実際の避難では地下室から脱出し、廊下と階段を通過して地上への避難が可能な状態に達する割合のことである。これらの結果を横軸にドア前面水深をとって整理すると図-3.3.8 のような結果となる。図より、男性、女性ともある水深を境に成功率が急激に減少しており、成功率の急変部が避難限界水深に相当すると仮定すると、限界水深は男性では約 50cm、女性では約 40cm という値が得られる。また、実験では、避難に至るまでの所要時間および避難をあきらめる時間の測定を行っている。避難に成功した場合の所要時間は、男性、女性を問わず 10 秒以内であった。一方、避難をあきらめる時間は、図-3.3.9 に示すように、数秒～1 分程度まで個人差が見られる。速い人は、成功した場合の時間（10 秒程度）を超えるとあきらめ、頑張る人でも 1 分を超えると放棄してしまうという結果になった。本実験より、30 秒を超えると 83% 以上の人が避難をあきらめてしまうという結果となった。本実験では、水深を一定に保った条件で行っているが、実際の浸水時には時間とともに急激に水深が増加するため、さらに短時間内に、避難できない（避難をあきらめる）という状況の発生が予想される。

前節で示した押し開け力とドア前面水深の関係を示すグラフに、体験者個々が押し開け時に発揮した力と避難の成功（○）・不成功（×）を示したものが図-3.3.10 である。なお、図中の、上側の曲線は、図-3.3.6 および図-3.3.7 で示したドア押し開けに必要な力と前面水深との関係を示しており、下側の曲線（太線）は、40%に低減させた曲線である。図より、成功を表す○印は 2 本の曲線の間分布しており、これは機械的に計測された押し開けに必要な力よりも小さな力で、ドアを押し開けることが可能であることを意味している。この結果は、前項で示した避難限界水深が、図-3.3.8 の避難成功率から推定される限界水深より小さいことに対応している。図-3.3.11 は、40kgf の押し開け力を出せる人の避難限界水深を求めた結果である。図より、40kgf でドアを押し開けることができる人の避難限界水深は 41cm～64cm 程度と推定できる。しかしながら、最大値の 64cm という水深は、本実験では誰一人として避難に成功していない条件である。また、最小値の 40cm と

いう水深は、避難成功率から推定される女性の避難限界値である。この結果を考慮すると、避難成功率から推定した限界水深は危険側の値と認識せざるを得ず、ここでは前項で示した水深を、成人の男性および女性が安全に避難できる限界水深の指標とする。

4. まとめ

浸水時の地下空間からの避難は、ビルなどの小規模地下空間からの避難の場合は、地下室ドアから通路・階段・地上という経路、地下街や地下鉄などの大規模地下空間からの避難の場合は通路から階段・地上という経路で行われる。従来の研究¹⁾では、実規模のドア模型および階段模型を用いて避難に関する実験を行い、ドア実験では前面水深が40cm、階段実験では地上水深が30cmという避難限界を示している。ここでは、より実際に近い状況を考慮し、ドア実験では、ドアを開けるために必要な力と体重の関係、避難するための所要時間の計測を行うとともに、階段実験では、年齢、性別、服装（履物）、荷物、照明などの避難の困難度にかかわる条件を負荷条件として設定した実験、および検討を行った。

実規模階段実験では、成人男性66名、女性25名および小学生11名、中学生3名を加えた合計105名の体験実験のデータを用いた検討を行い、次のような結果を得た。

- 1) 小学生・中学生は成人男性に比べて避難するのに1.5～1.9倍の時間が必要である
- 2) 荷物や照明条件が避難時間に与える影響は本実験では顕著ではないが、服装（足元まわり）による影響は大きく表れた

また、被験者へのアンケートの結果、地上水深30cm程度を階段での避難限界と考える人が多いことが確認された。

実規模ドア実験では、成人男性47名、女性12名の合計59名の体験実験に基づく検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) ドアを押し開ける際に、成人男性では体重の45～80%程度、女性では40～70%程度の力を発揮できる
- 2) 本体験実験を通して、ドア前の避難限界水深としては男性では35～47cm程度、女性では29～38cm程度が妥当な値であることが推定された。

また、本実験の体験者に対するアンケート結果より、階段およびドア実験を体験した人は地下浸水の危険性をより一層強く認識することが確認された。

【資料】避難体験実験参加者の感想

(a) 50代、男性

- ・ 階段で流水によりステップが見えないこと、流水のため大きく進行が妨げられることなど、日常では経験できないことである。今回は水のみであるが、水と物が一緒に流下した場合には、非常な脅威であると感じました。
- ・ 健常者でこのような状況ですから歩行障害者の場合には、この何倍の脅威となることと思いました。
- ・ また、流下する水勢を減少させるような対策は非常に難しいとの印象でした。このため、地上への出入り口の高さにはそれぞれ計画的に高低差を設けて、浸水順序をコントロールするなど

の配慮ができないのだろうかと思いました。

(b) 30代、男性

<地下室ドアからの避難実験について>

- ・ 地下室の扉には、自動車のブレーキアシストや電動アシスト自転車のように、機械的・電氣的に開閉をサポートするシステムが有効かも知れない。この場合、停電時の電源確保や設備の耐水性向上が必要。
- ・ 引き戸式を基本とすることで解決できるか？バリアフリーの点からも引き戸式が有利か。
- ・ 一方で、重い扉を開けて逃げ出すより、止水性能を向上し、地下室をシェルター化してあえて内部に籠ることも一案では。

<実物大階段模型による避難実験について>

- ・ 避難経路として、階段部の移動を容易にするため、浸水時の水の誘導を行えるような工夫、例えば仕切り板や導水路の設置などを考慮していかななくてはならないと感じた。
- ・ 水の音、流れにより生じる風、水しぶきなどで、実験であっても災害の恐ろしさを垣間見た気がする。

(c) 50代、男性

①地下浸水時の避難実験 階段模型での歩行について

- ・ 30cm、40cm の2つを体験したが、自分の感覚では歩行時間に大きな違いがあるとは、感じなかった。
- ・ 事前にレクチャーを受けているので安心感がある。30cm を経験して 40cm なので対応がしやすくなった。被験者には、直前まで階段の状況や深さなど知らせずに不安感など心理量を加えてみると、浅い深さでも歩くことが難しくなると考える。

氾濫水深 30cm の場合

- ・ 階段部のはじまりの前の場所で、水流が最も強く感じられた。
- ・ 階段全体が泡状になるためステップがわかりづらく、特に1段目がわからないのが不安で、1段目の場所付近では 30cm 以下でも歩行速度が落ちるのではないか。
- ・ 上部の泡がないところでは、なれるせいもあるが歩きやすい。
- ・ ステップに足を下ろす時に水に流される感じがする。
- ・ ステップの滑り止めがあるので引っかけりがしっかりとしていた。踏み面もモルタルではなく P タイルなど滑りやすい素材ではフラットな面でも歩きづらい。

氾濫水深 40cm の場合

- ・ 手すりがあるので安心感がある。最上部の水面がさらに広いと恐怖感が増す。
- ・ 手すりなどのガイド（利用するだけでなく方向として）がないとまっすぐ歩くことが難しい。
- ・ 胴長をはいていても 40cm では、上半身に水しぶきがかかる量が増え、不安定さが増すような感じがする。複数の人がいると相互に影響を及ぼし歩きづらいこともあるのではないか。
- ・ ステップに足を下ろす時に水に流される感じは強くなり足元をみる割合は多くなる気がする。

②浸水体験実験 ドア模型での実験について

浸水時のドアの開閉について、40cm でやっと開くことがわかった。ドアノブの回転方向など形状や、外部の状況（浸水している）がわからないと、開ける努力をあきらめてしまうかもしれない。建物の非常扉の下部にあける消防ホースなどのような開口部を外部の圧力差で開く仕組みがあると、閉じこめられないのではと考える。

参考文献

- 1) 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.

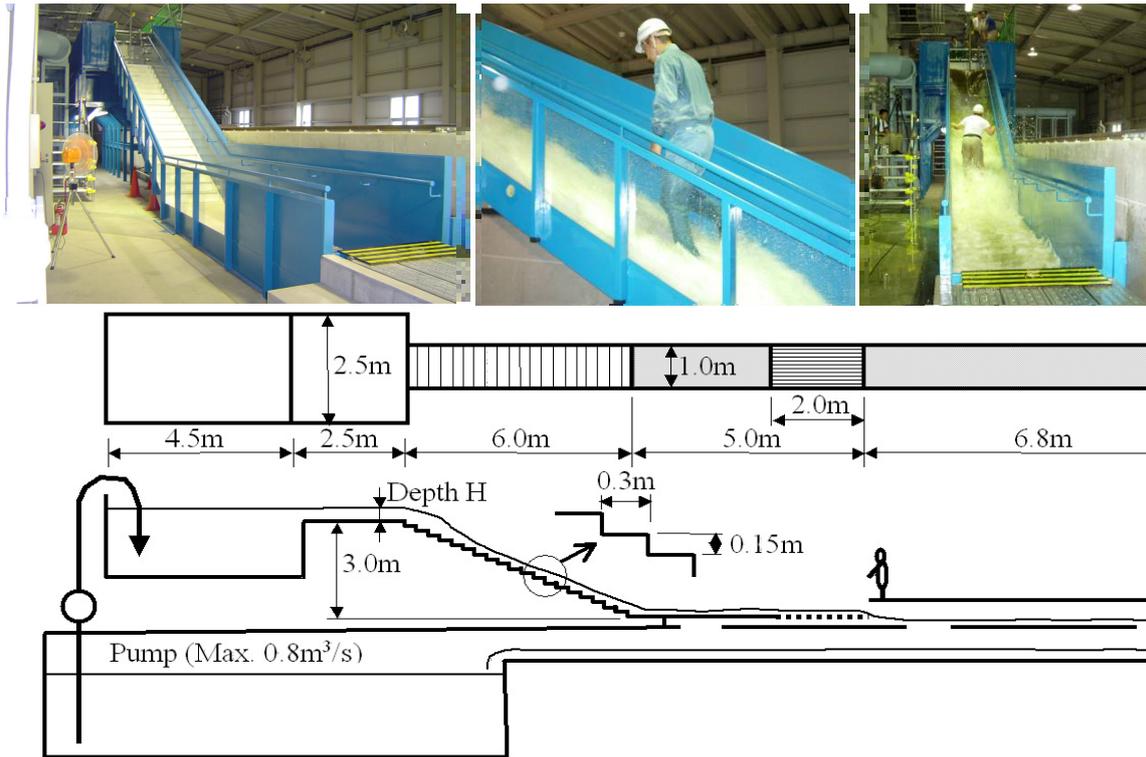


図-3.2.1 実規模階段模型と体験実験の様子

表-3.2.1 実物大階段模型実験の被験者数の内訳

条件	基本条件(スニーカー)			付加的条件			
	成人	小学生	中学生	胴長	停電時	片手荷物	ハイヒール
男性 75名	48名	7名	2名	35名	21名	21名	-
女性 30名	19名	4名	1名	9名	3名	3名	3名
計 105名	67名	11名	3名	44名	24名	24名	3名

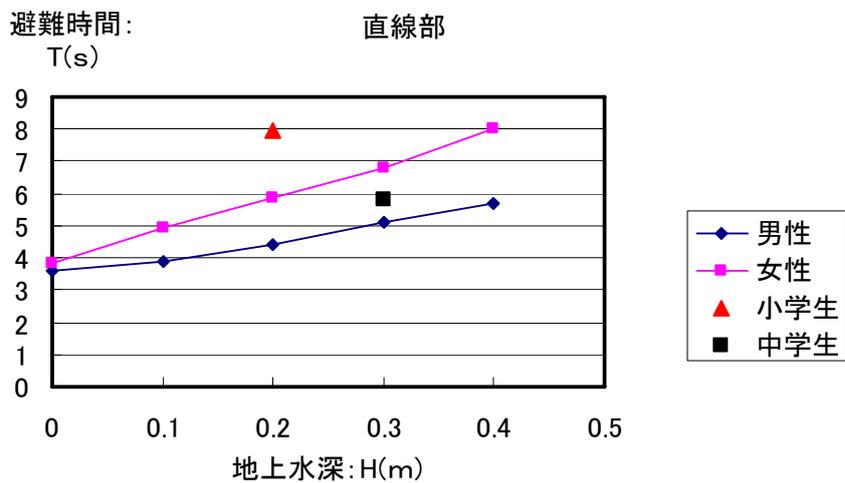
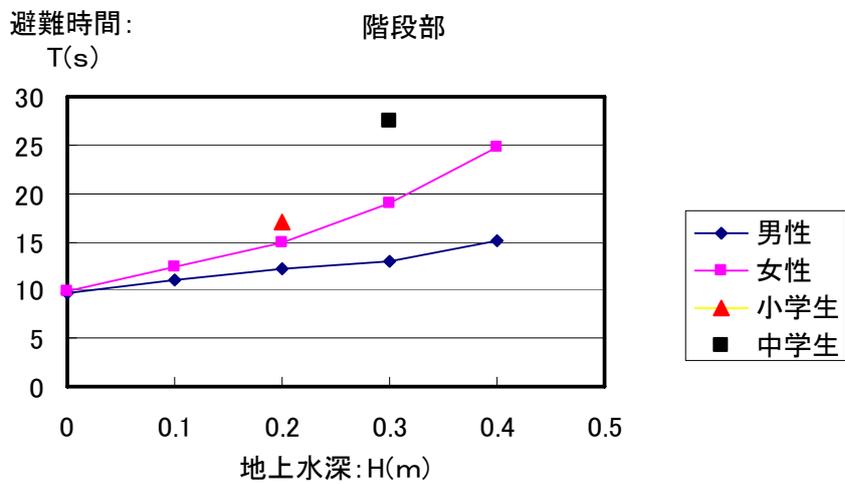
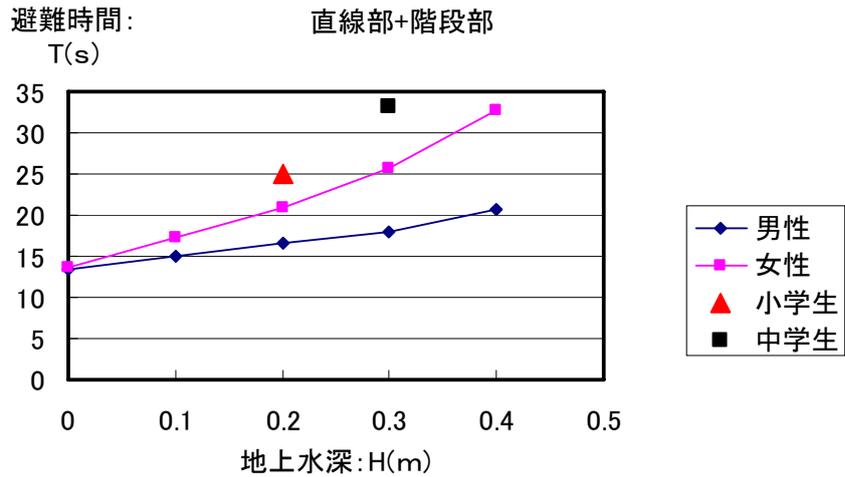


図-3.2.2 避難時間の測定結果 (スニーカー)

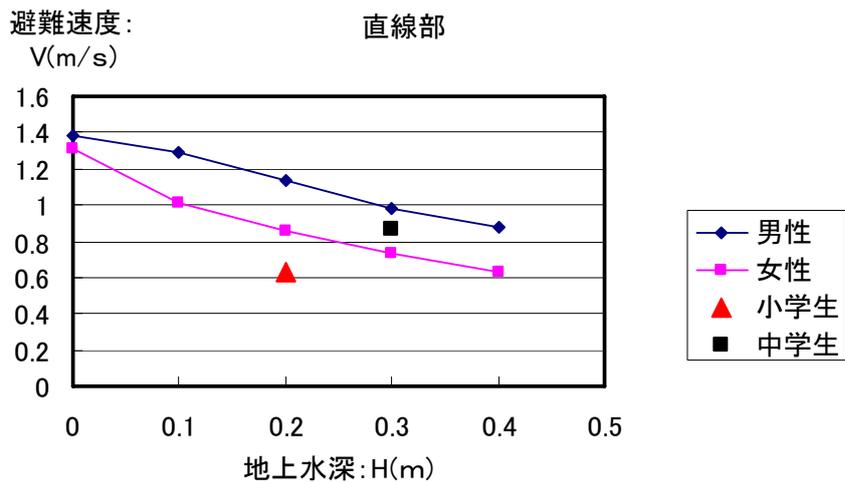
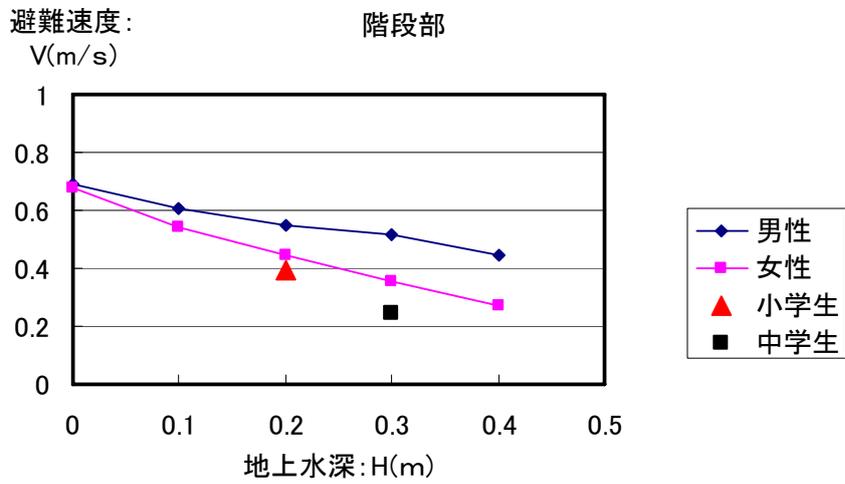
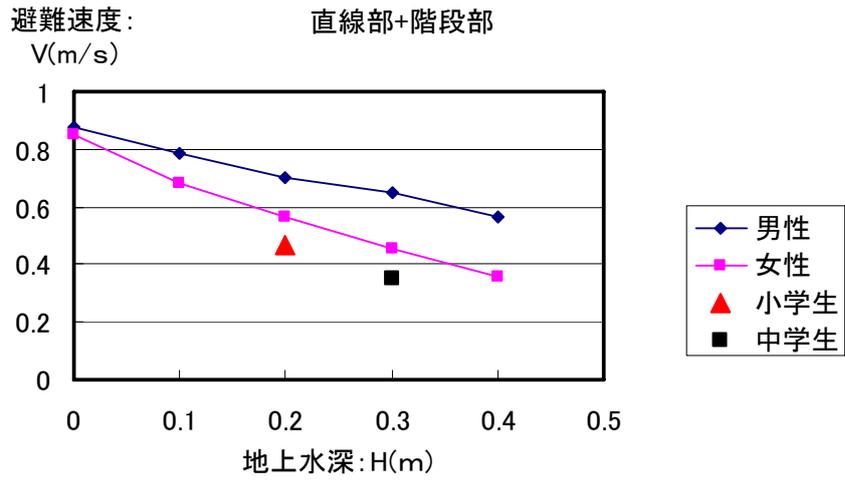


図-3.2.3 避難速度の計算結果 (スニーカー)

表-3.2.2 実験の体験前と体験後の感じ方

全体(68名)		①	②	③	④	⑤
10cm	体験前	48	13	7	0	0
	体験後	50	17	1	0	0
20cm	体験前	20	26	22	0	0
	体験後	23	32	13	0	0
30cm	体験前	4	12	36	15	1
	体験後	3	15	40	10	0
40cm	体験前	1	5	20	25	17
	体験後	0	5	27	33	3

男性(48名)		①	②	③	④	⑤
10cm	体験前	35	10	3	0	0
	体験後	39	9	0	0	0
20cm	体験前	14	18	16	0	0
	体験後	17	25	6	0	0
30cm	体験前	3	7	27	11	0
	体験後	3	9	30	6	0
40cm	体験前	1	3	12	19	13
	体験後	0	5	18	25	0

女性(20名)		①	②	③	④	⑤
10cm	体験前	13	3	4	0	0
	体験後	11	8	1	0	0
20cm	体験前	6	8	6	0	0
	体験後	6	7	7	0	0
30cm	体験前	1	5	9	4	1
	体験後	0	6	10	4	0
40cm	体験前	0	2	8	6	4
	体験後	0	0	9	8	3

体験前	体験後
難なく上れそう	① 難なく上れた
普通に上れそう	② 普通に上れた
上りにくそう	③ 上りにくかった
かろうじて上れそう	④ かろうじて上れた
上れなさそう	⑤ 上れなかった

表-3.2.3 実験の体験前と体験後の感じ方の割合 (単位は%)

全体(68名)		①	②	③	④	⑤
10cm	体験前	71	19	10	0	0
	体験後	74	25	1	0	0
20cm	体験前	29	38	32	0	0
	体験後	34	47	19	0	0
30cm	体験前	6	18	53	22	0
	体験後	4	22	59	15	0
40cm	体験前	1	7	29	37	25
	体験後	0	7	40	49	4

男性(48名)		①	②	③	④	⑤
10cm	体験前	73	21	6	0	0
	体験後	81	19	0	0	0
20cm	体験前	29	38	33	0	0
	体験後	35	52	13	0	0
30cm	体験前	6	15	56	23	0
	体験後	6	19	63	13	0
40cm	体験前	2	6	25	40	27
	体験後	0	10	38	52	0

女性(20名)		①	②	③	④	⑤
10cm	体験前	65	15	20	0	0
	体験後	55	40	5	0	0
20cm	体験前	30	40	30	0	0
	体験後	30	35	35	0	0
30cm	体験前	5	25	45	20	0
	体験後	0	30	50	20	0
40cm	体験前	0	10	40	30	20
	体験後	0	0	45	40	15

体験前	体験後
難なく上れそう	① 難なく上れた
普通に上れそう	② 普通に上れた
上りにくそう	③ 上りにくかった
かろうじて上れそう	④ かろうじて上れた
上れなさそう	⑤ 上れなかった

体験前、後の感じ方

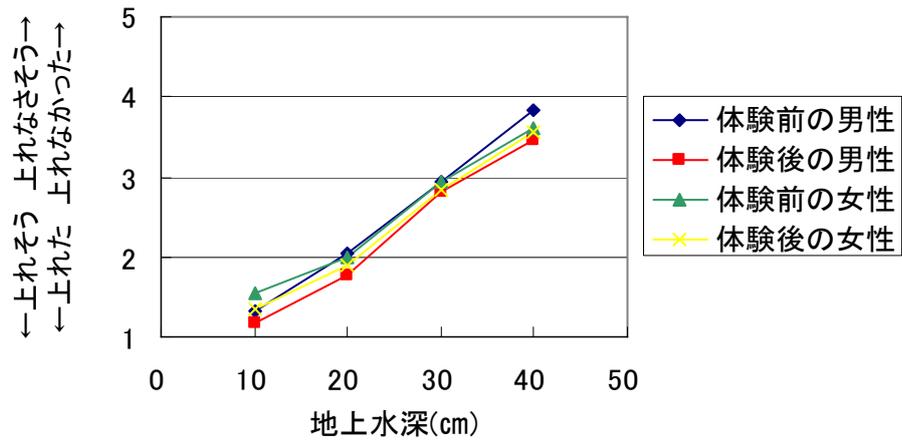


図-3.2.4 男女別の実験の体験前と体験後の感じ方の変化

予想避難限界水深

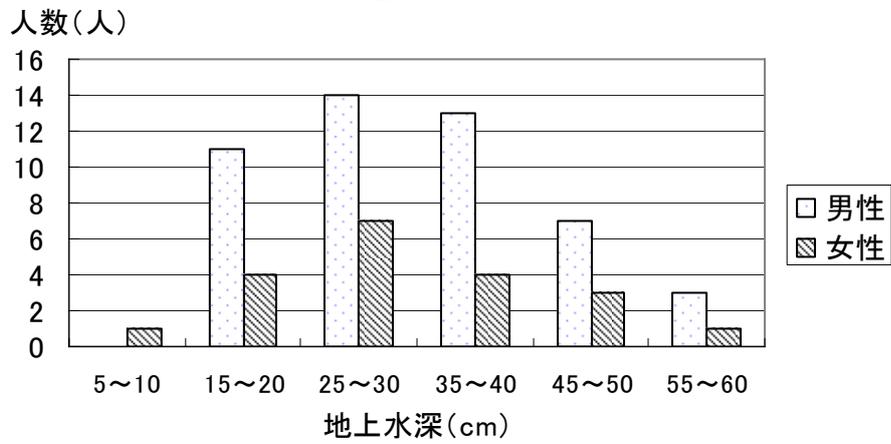


図-3.2.5 予想避難限界水深

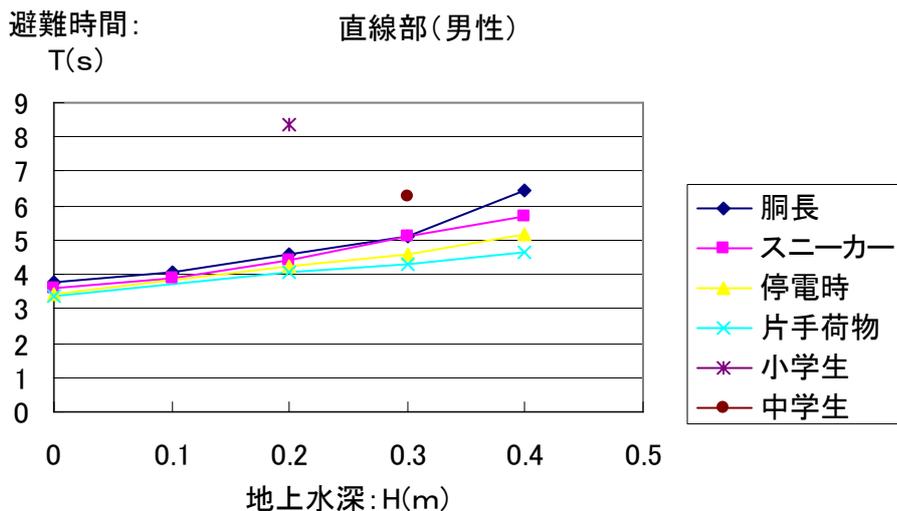
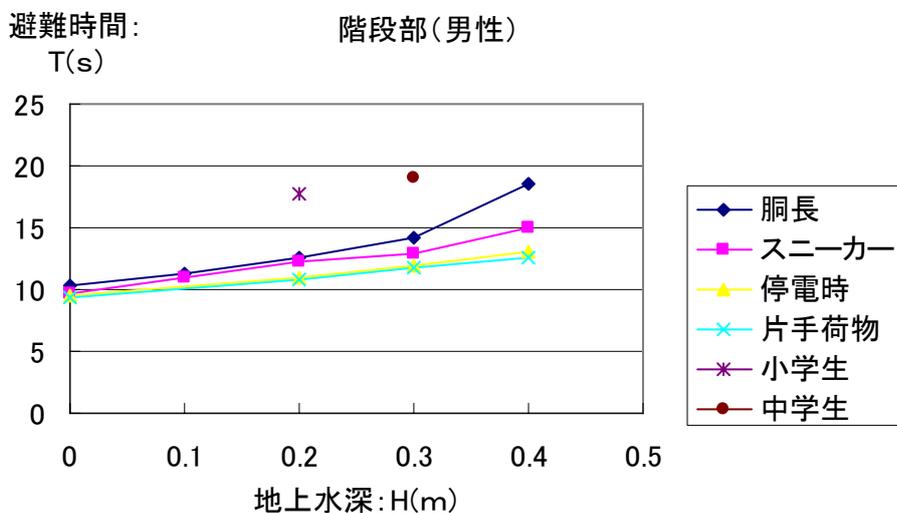
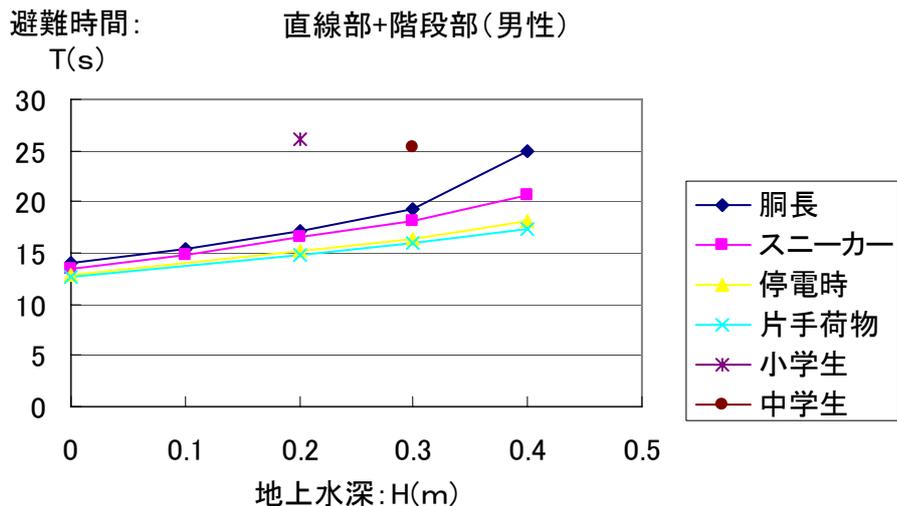


図-3.2.6 付加的条件下での男性の避難時間の測定結果

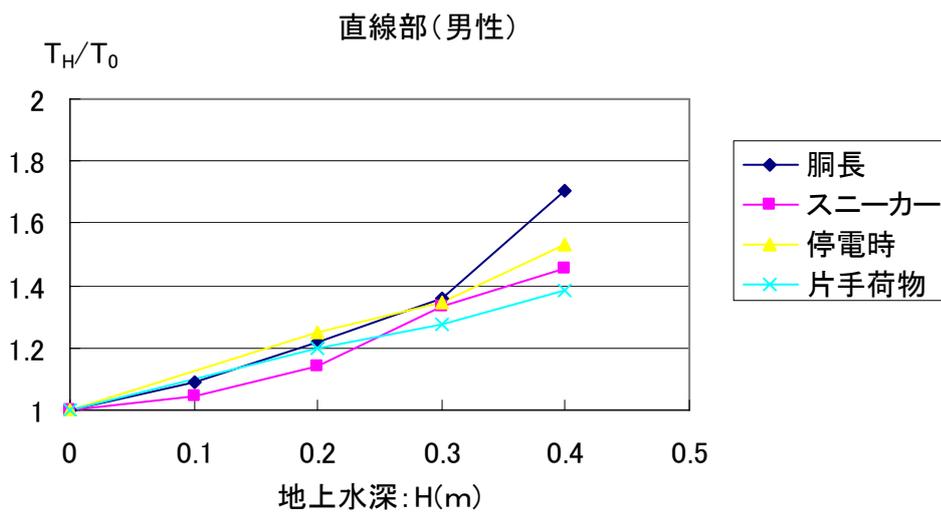
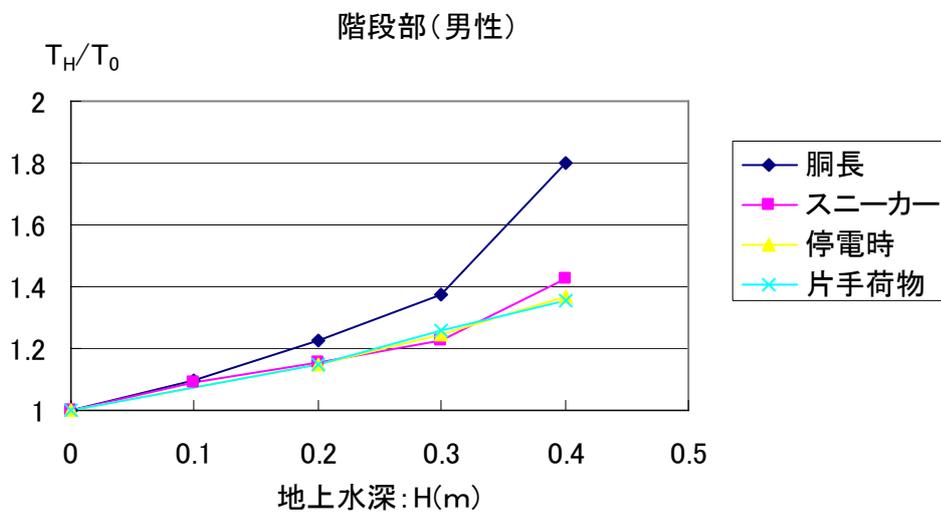
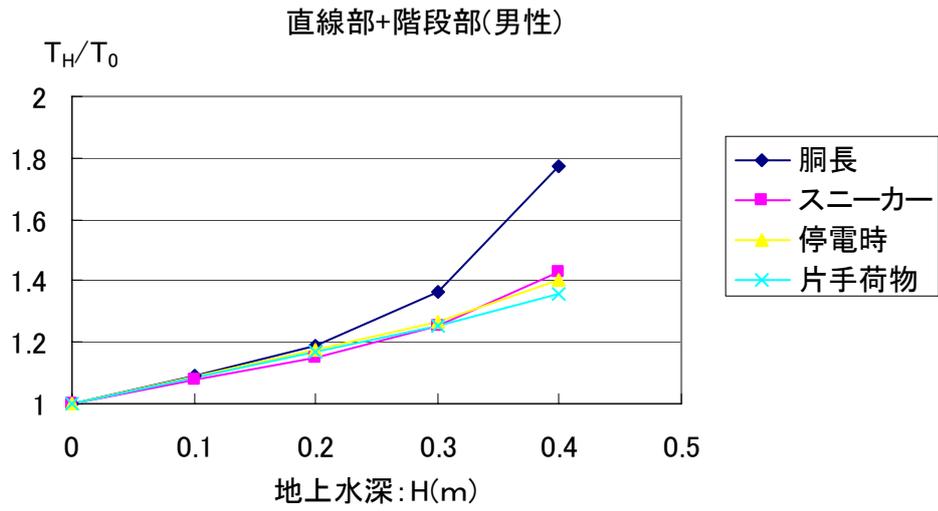


図-3.2.7 付加的条件下での男性の避難困難度

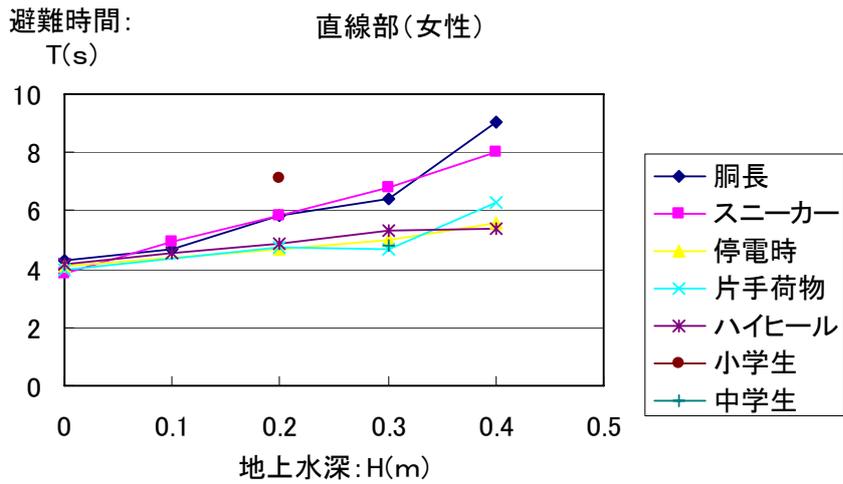
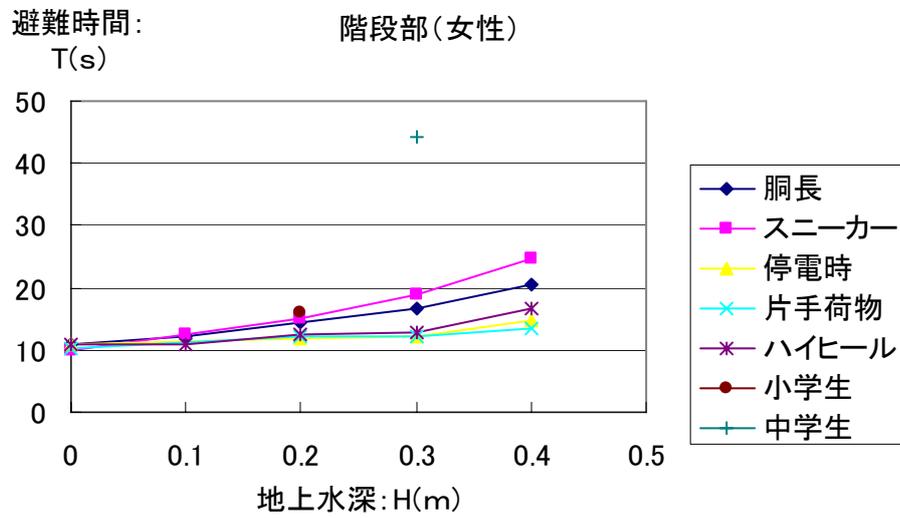
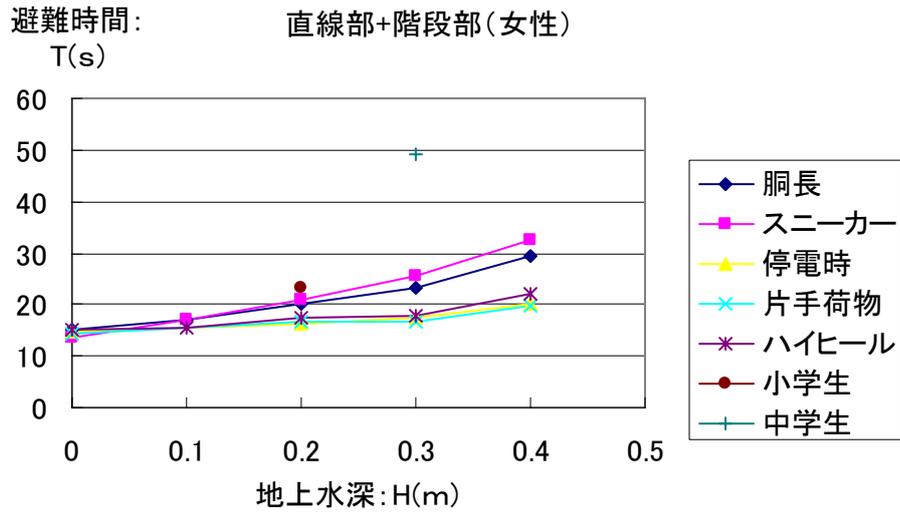


図-3.2.8 付加的条件下での女性の避難時間の測定結果

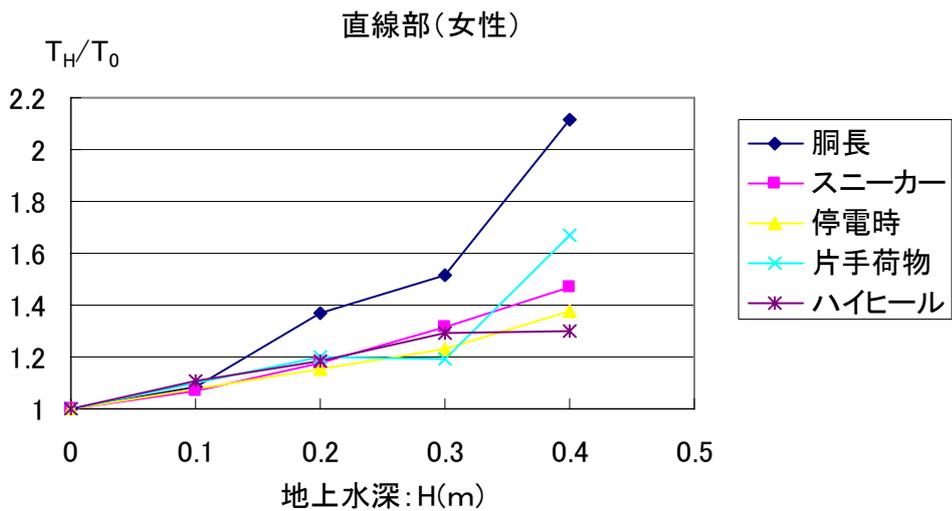
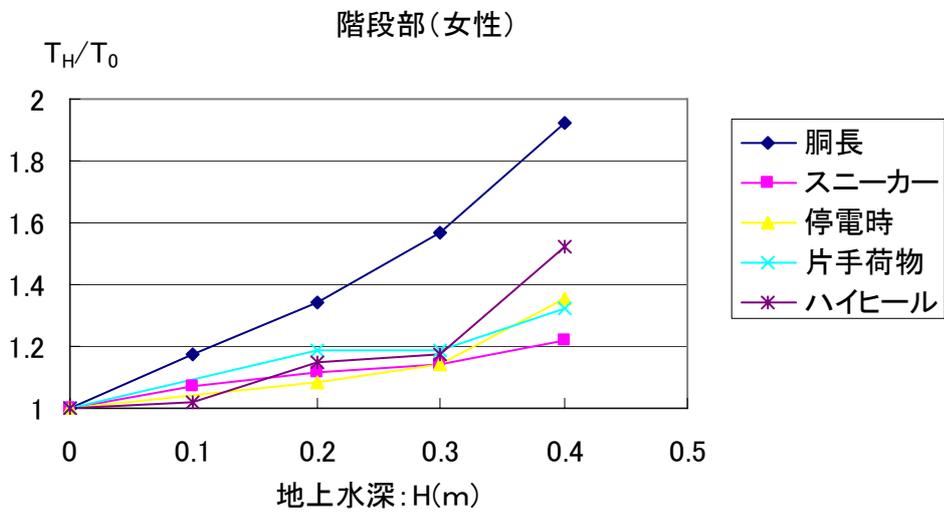
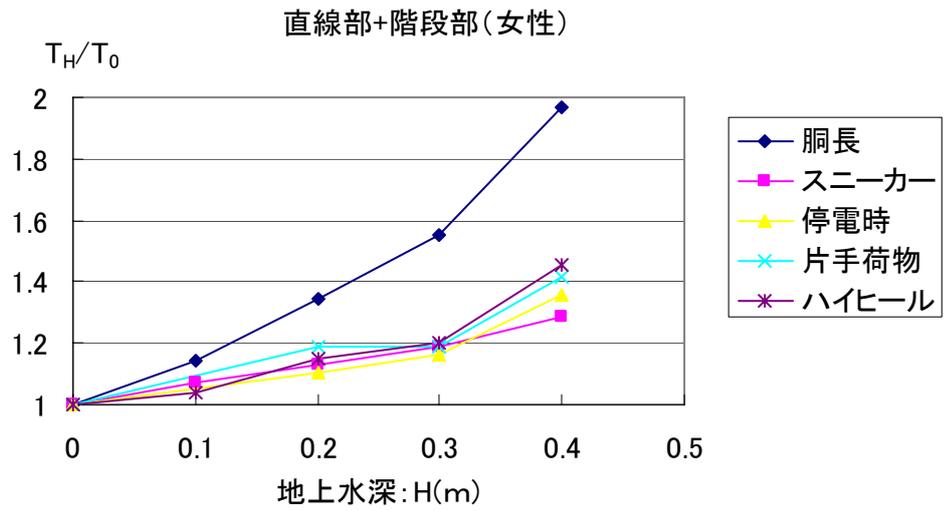


図-3.2.9 付加的条件下での女性の避難困難度

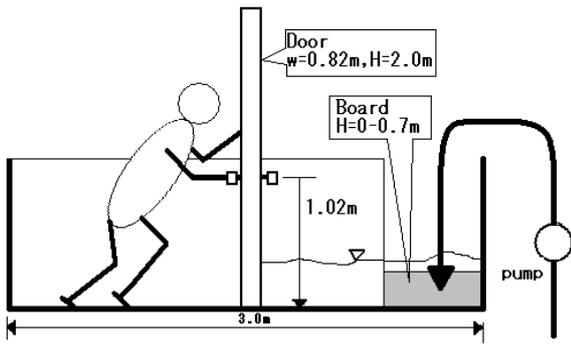


図-3.3.1 ドア模型の概要図

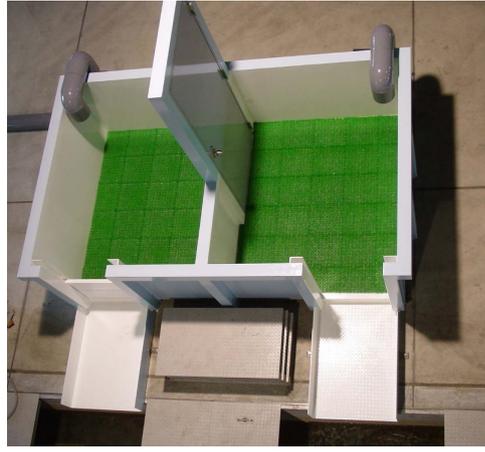


写真-3.3.1 実物大ドア模型（上方からの撮影）



写真-3.3.2 実物大ドア模型実験
（側面からの撮影）



写真 - 3.3.3 ロードセルを用いた押し開け力測定

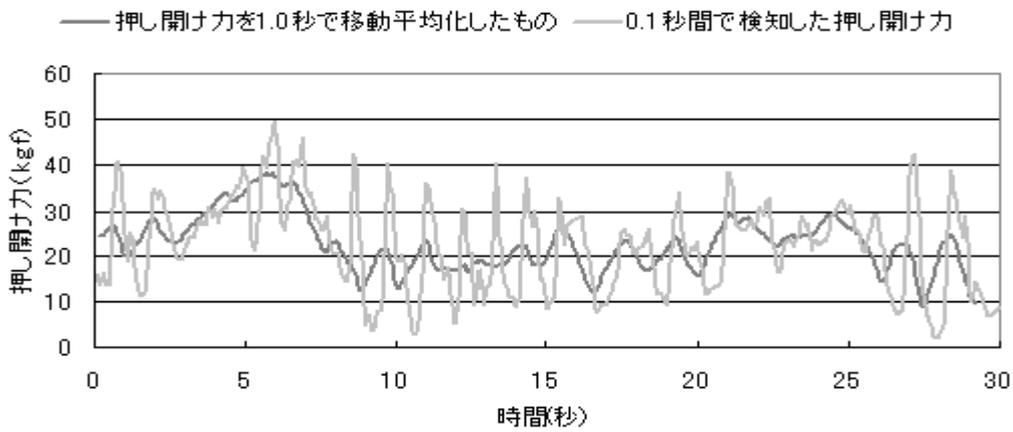


図-3.3.2 押し開け力計測結果と移動平均値

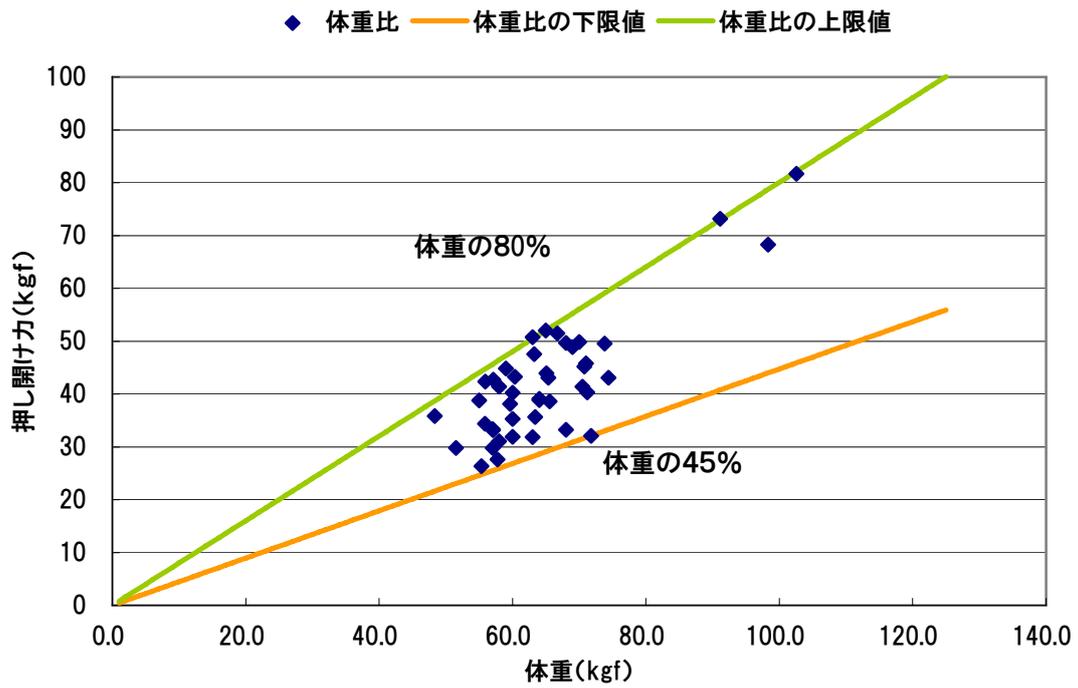


図-3.3.3 体重と押し開け力の関係（男性）

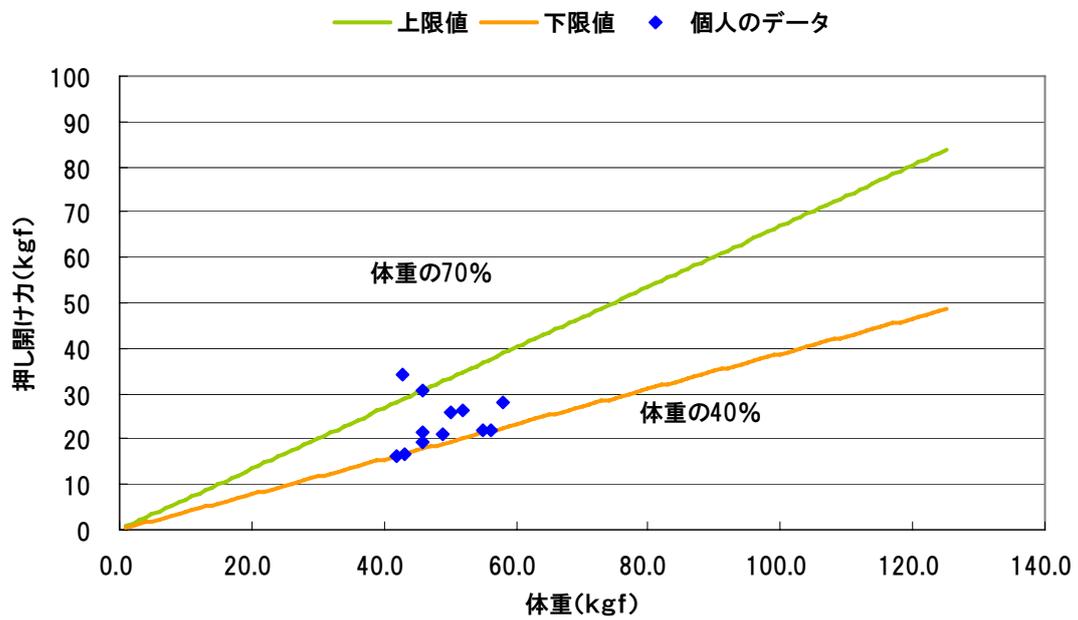


図-3.3.4 体重と押し開け力の関係（女性）



写真-3.3.4 ジャッキを用いたドアを開けるために必要な力の測定

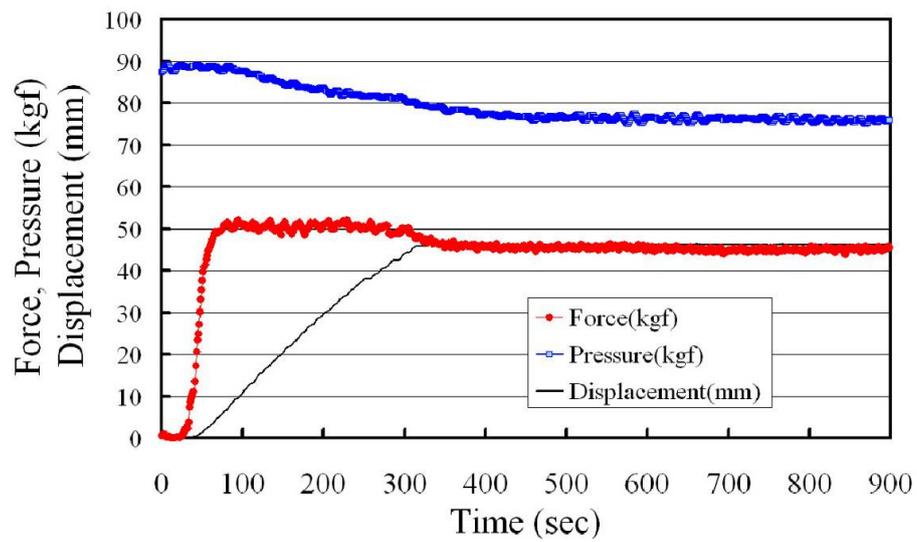


図-3.3.5 ドアの押し開け力（赤線），全水圧（青線），
ドアの変位（開度：黒線）の計測例

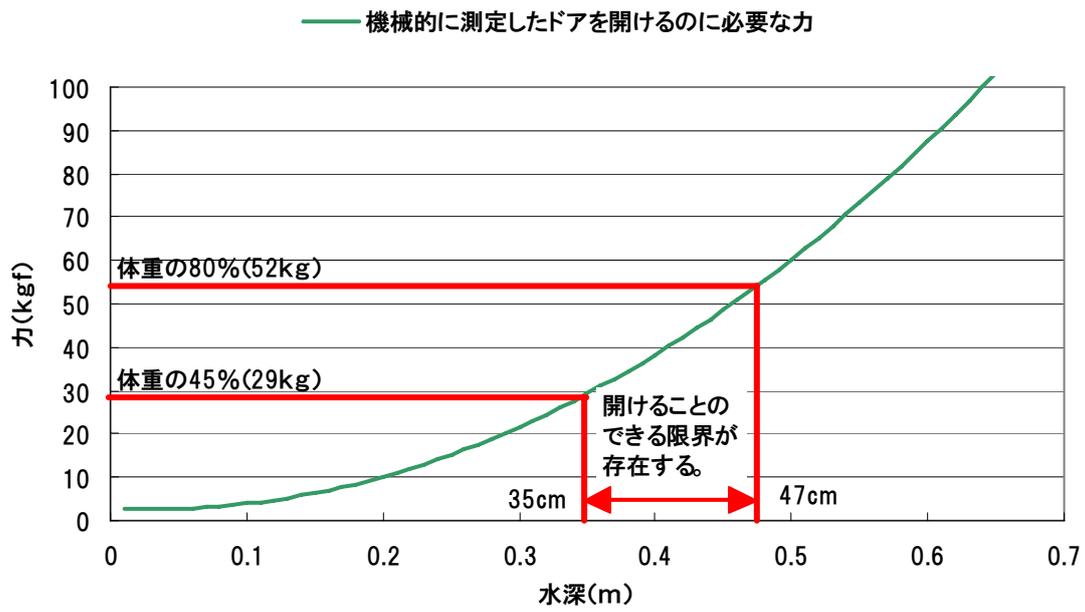


図-3.3.6 限界水深の計算（男性）

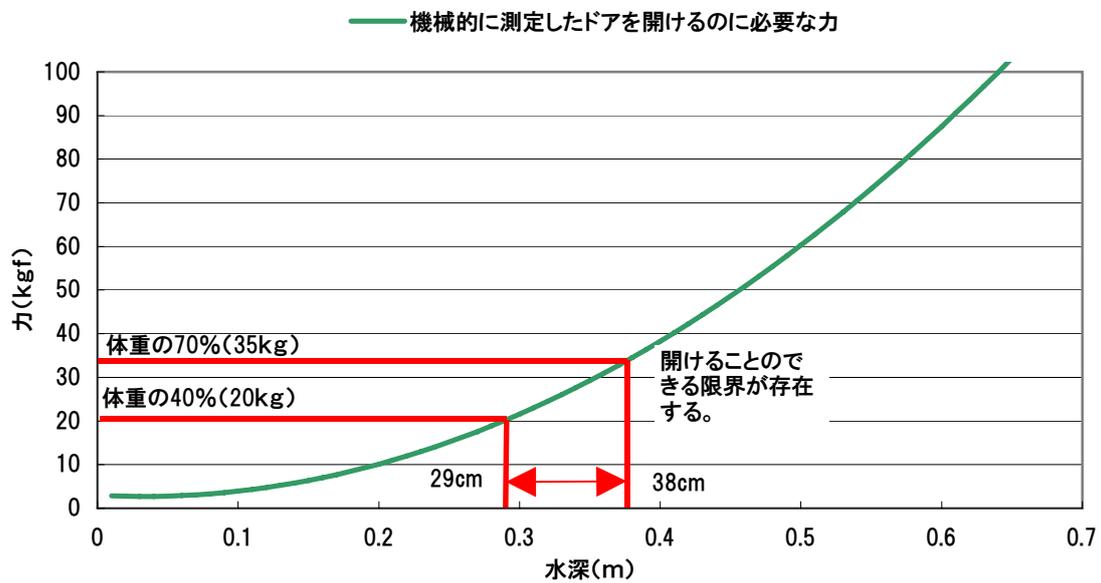


図-3.3.7 限界水深の計算（女性）

表-3.3.1 避難成功率（男性）

被験者：41名

	35cm	45cm	54cm	56.5cm	61cm
成功者数(人)	41	40	4	2	0
成功率(%)	100	98	10	5	0

表-3.3.2 避難成功率（女性）

被験者：12名

	26cm	35cm	45cm	54cm
成功者数(人)	12	12	1	0
成功率(%)	100	100	8	0

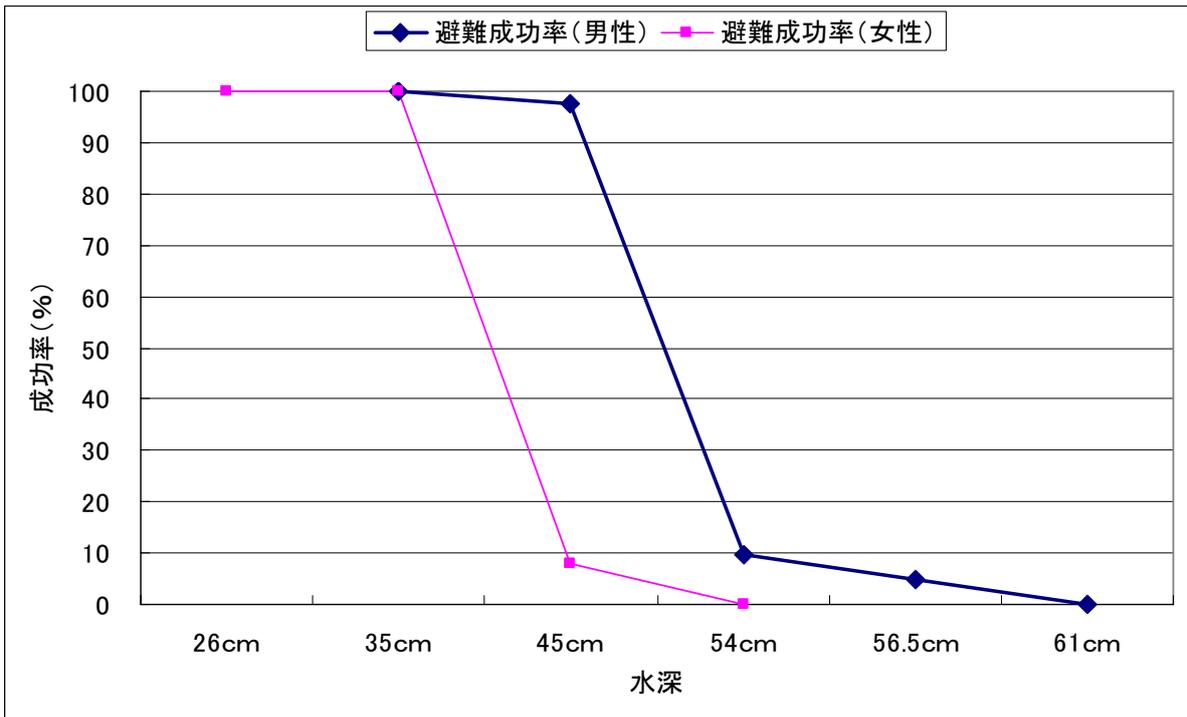


図-3.3.8 避難成功率と水深の関係

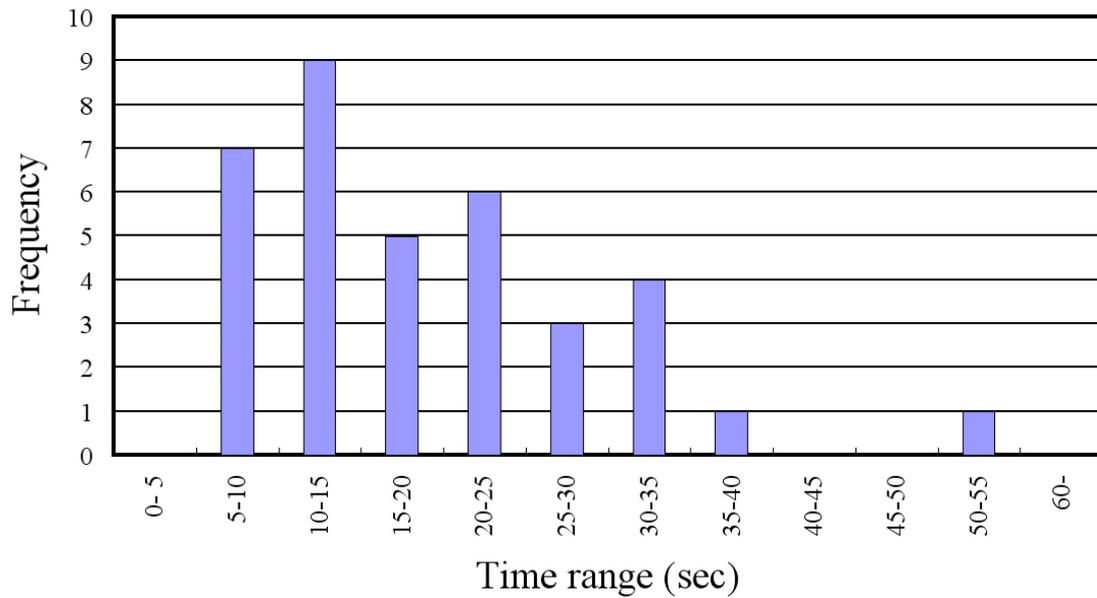


図-3.3.9 ドア押し開け実験をあきらめるまでに時間

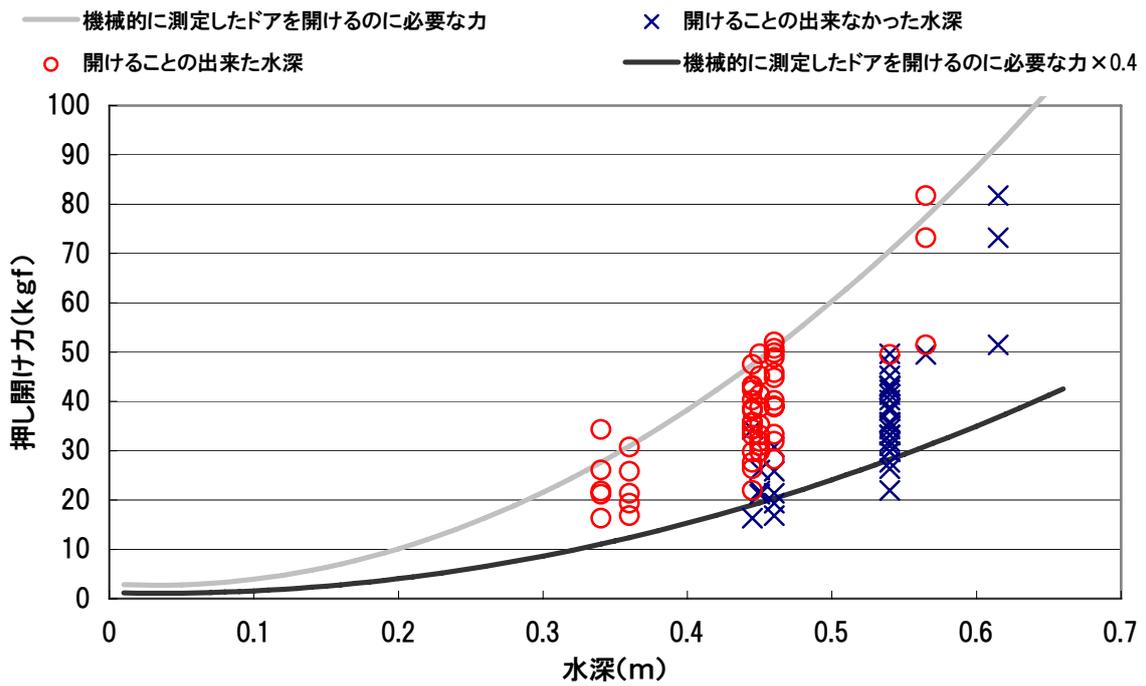


図-3.3.10 体験実験結果（押し開け可○，不可×）一覽

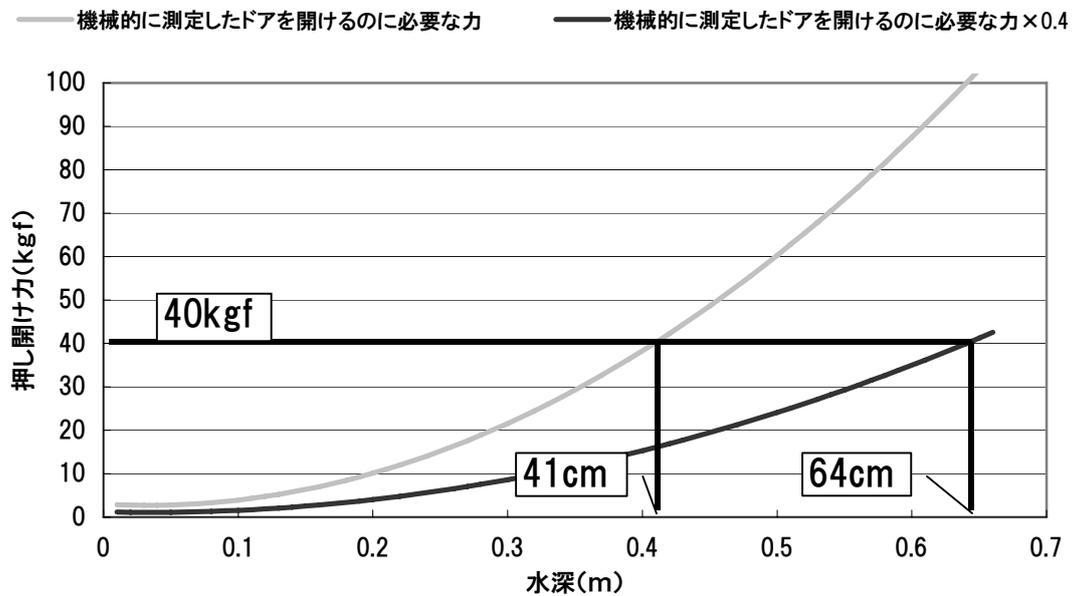


図-3.3.11 避難限界水深の分布範囲（推定値）の一例
（40kgf の押し開け力を発揮した場合）

第IV章 地下空間の浸水時の避難解析

1. はじめに

都市水害の発生時には、地下空間も浸水する可能性があり、場合によっては人命に関わることもある。このような中で、浸水時の地下空間における避難体制の強化は、実際に水害が起きた場合に、特に人的被害を防ぐという観点から非常に有効と考えられるが、災害時の避難行動を実験的手法で解析するには、さまざまな制約のために困難が伴う。そこで、災害時の避難行動解析には、計算機によるシミュレーションが大きな意味を持つことになる。

避難に関する研究は、分野を問わず、さまざまな角度から行われている。例えば、建築や土木の分野では、清野ら¹⁾は、従来、地盤解析や構造解析などの分野で用いられてきた個別要素法を、地下街を対象とした被災時の人間行動に応用した。横山ら²⁾は、各避難者の性格や知識など、個人特性の影響を取り入れた大規模空間の避難行動シミュレーションを行う手法を提案している。この手法では、対象とする空間を、避難に関する各要因の影響を表すポテンシャルの時間・空間分布として各避難者ごとにモデル化し、得られたポテンシャル場から進行方向を決定している。これらのモデルは、主に地震や火災を想定して、その際の避難について検討している。

浸水時の避難に関する研究では、西原³⁾は、二次元非定常流としての氾濫解析モデルと避難解析モデルとを結合し、同時に解析するモデルを確立している。対象とする領域の避難経路はネットワークで表し、実際の避難解析に際しては、浸水深による避難経路長の補正、住民の疲労と群集密度による歩行速度の低下を考慮している。高橋ら⁴⁾は、西原³⁾のモデルを応用した形の避難解析モデルを開発している。避難経路の設定にはWarshall-Floyd法を用いて避難所までの最短経路を算出しているが、氾濫範囲などを考慮する付加条件を与えることで避難先、避難経路の変更をモデル化しており、より実際に近いモデルの構築が可能であるとしている。これらのモデルは浸水を想定しているものの、対象としているのは地上部であり、多層化した地下空間における浸水時の避難に関する研究は、ほとんど行われていない。

本章では、多層化した地下空間における浸水時の避難がどの程度危険であるのかを評価するために、従来の避難行動解析モデル³⁾⁴⁾を地下空間の場に適用できるものに拡張した。そして、京都御池地下街を対象に地上と地下空間とを統合した氾濫解析結果を基に避難行動解析を実施した。さらに、避難行動解析を通して、ソフト、ハード両面によるさまざまな対策の効果についてもあわせて検討を加えている。

2. 解析モデル

(1) 対象領域

多層化した地下空間の浸水時の避難解析を行うことを目的としているため、対象とする地下空間を選ぶ上での前提条件としては、浸水する可能性のある地下空間であることが挙げられる。また、扱うデータ量についても勘案すると、多層化していながらもさほど複雑でないことが望ましい。そのような観点から、対象空間を京都御池地下街とする。

図-4.2.1に示すように、京都御池地下街は、京都市中心部を東西に走る御池通の地下、約650mにわたって位置しており、東端付近を鴨川が流れている。地下街は図-4.2.2に示すように3層構造であり、地下1階は、東側がゼスト御池（ショッピングモール）と地下鉄コンコース、西側が駐車場、地下2階は全面駐車場、地下3階は地下鉄東西線・京都市役所前駅ホームで構成されている。地盤高は東側の方が1.5m低く、また、地下3階の地下鉄ホームは地下1階とだけ接続している。

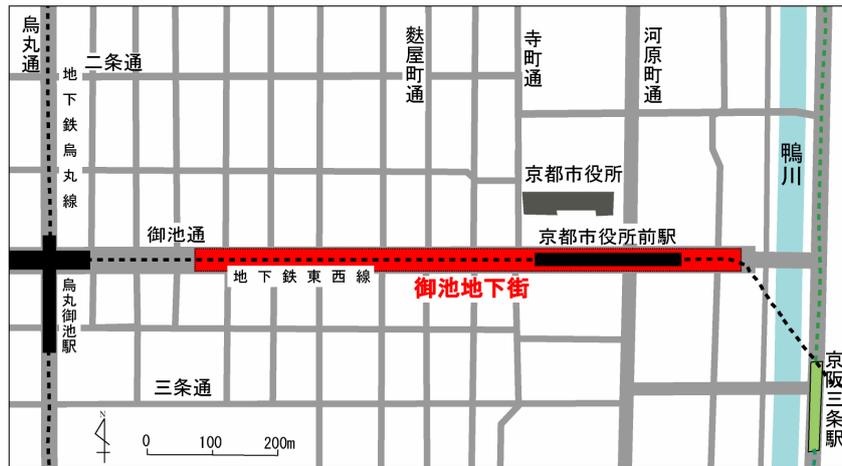


図-4.2.1 対象領域図

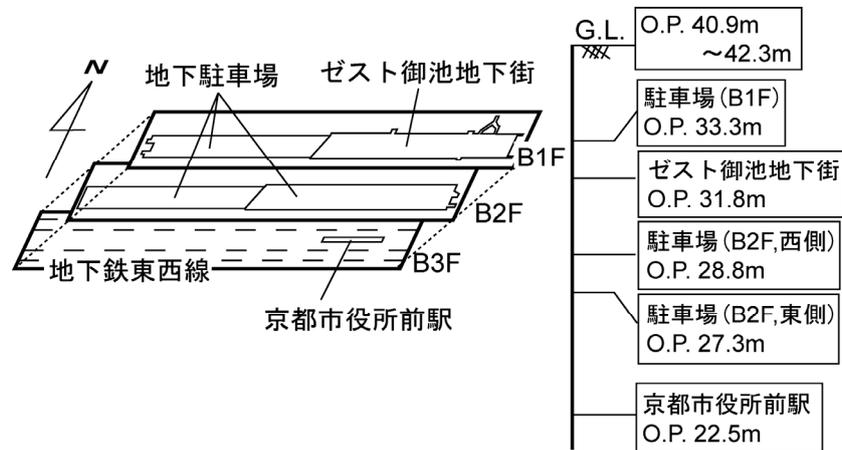


図-4.2.2 京都御池地下街の概要

(2) 浸水解析モデル

解析モデルを構築するにあたり、図-4.2.3 に示すように浸水解析と避難解析とを分離して考えることとする。浸水解析は間島ら⁵⁾の手法を参考に地上と地下空間とを統合して、ポンドモデルを用いて解析する。ポンドモデルは、地下街を貯留槽(ポンド)が3次元的に連結した空間として捉え、解析する手法である。なお、地上についても同様の手法を適用する。

この解析手法を用いて、京都御池地下街および京都市地上部を対象に浸水解析を行った。解析条件として鴨川からの溢水を想定し、流入流量は $100(\text{m}^3/\text{s})$ を計算開始と同時に御池大橋北側右岸側の格子に流入させた。計算時間は60分、計算時間ステップは $\Delta t = 0.05(\text{s})$ である。なお、地上部から地下空間への流入口には一律に10cmの段差があるものとした。

図-4.2.4は、計算開始15分後の地上部の解析結果である。これより御池地下街が浸水域に存在することがわかる。

(3) 避難解析モデル

ここでは、対象とする地下空間が多層化しており、一定の幅を有する通路から構成されていると

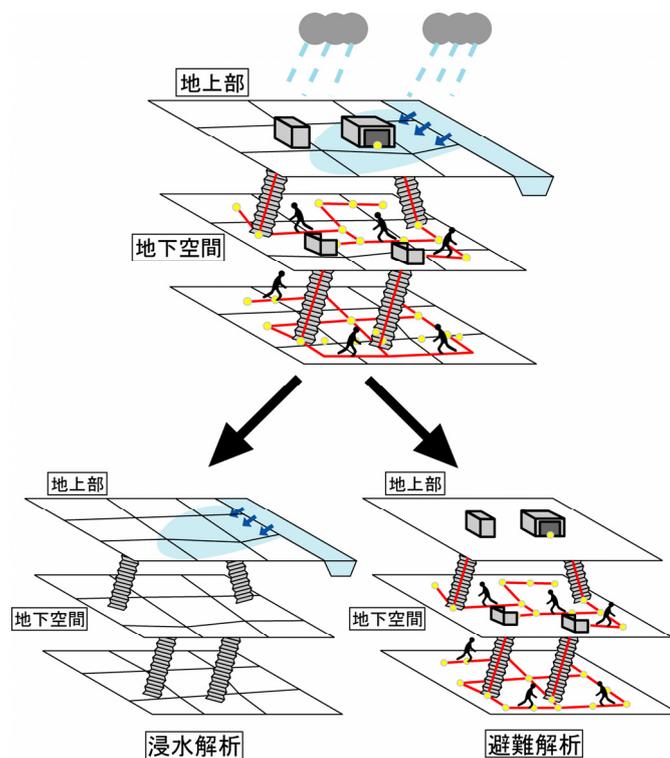


図-4.2.3 モデル概念図

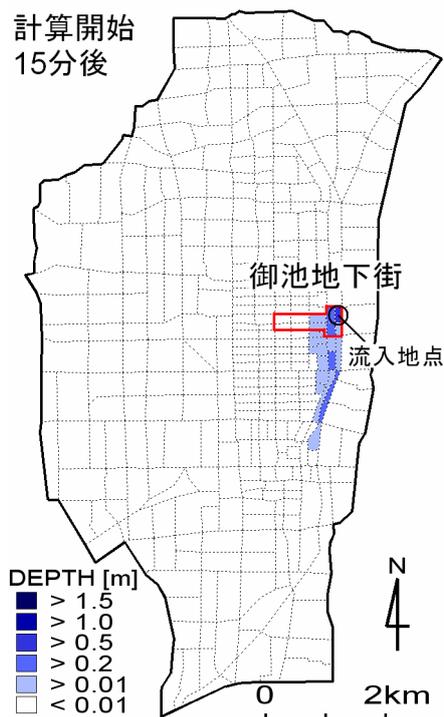


図-4.2.4 地上の浸水深図

みなせることから、対象とする地下空間にネットワークを張りめぐらせ、人はそのネットワーク上を動く点として扱うことで避難行動をモデル化している。まず、図-4.2.5は京都御池地下街に張りめぐらせた避難ネットワークを示す。避難ネットワークはノードとリンクからなり、リンクの両端には必ずノードが存在する。リンクは、地下空間内の通路および階段を表している。ノードは、通路の交差点、避難解析の際の人の初期位置、また避難方向の決定地点としての役割を持っている。

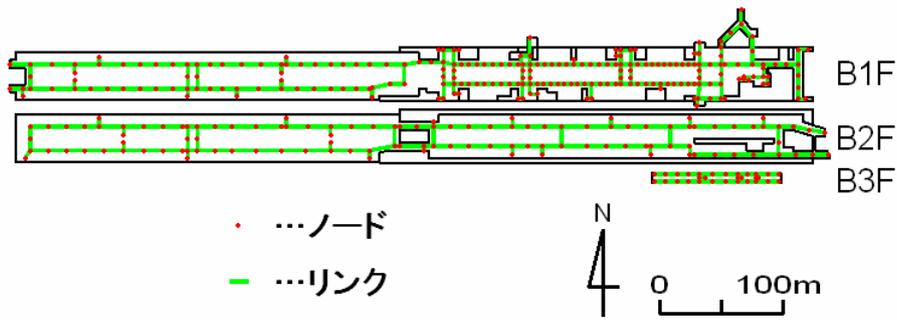


図-4.2.5 避難ネットワーク図

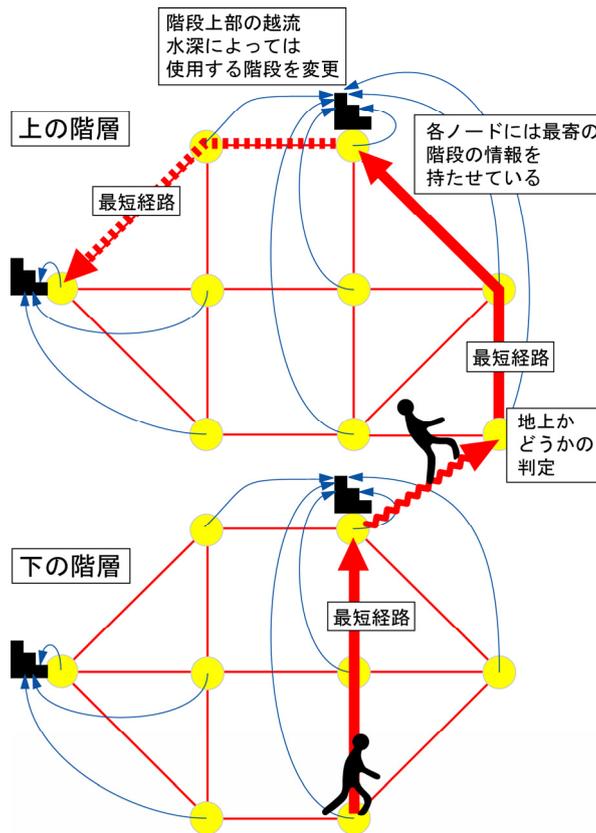


図-4.2.6 避難経路設定の概念図

リンクは439本（うち階段51本）、ノードは399個（うち地下部367個）である。

次に、具体的な避難経路の設定について説明する。まず、避難経路設定の概念図を図-4.2.6に示す。各避難者はそれぞれノードに初期配置されるが、配置されたノードから最寄りの階段を用いて上の階層に行くものとする。このとき、地下にあるノードにはそれぞれ最寄りの階段の情報が与えられているため、各避難者は、初期配置されたノードによって必然的に使用する階段が決まる。

次に、その階段までは、初期位置を始点、使用する階段の下側ノードを終点とする最短経路を用いて避難するものとする。この最短経路を求めるのには、高橋ら⁴⁾と同様に、最短経路選択問題の解法として最も簡便であり、またよく用いられているWarshall-Floyd法を適用している。

避難開始は、各人の足もとに5cm以上の浸水が認められれば、その時点で自主的に避難を開始するとしている。このときの歩行速度は1.00(m/sec)とし、西原³⁾にならって、換算距離の方法によ

り浸水による移動能力の低下を考慮している。

しかし、必ずしも初めに決めた階段を使用して地上に行くとは限らない。階段の下まで来てから、その階段から水が入ってきているために自発的に避け、別の階段を使用して地上に行くことが考えられる。そこで、本モデルでは、階段の下側ノードに達すると、そこでその階段を実際に使用するかどうか選択できるようにしている。具体的には、階段上部の越流水深が 10cm を超えるとその階段を使用しないものとし、別の階段を選択する。この際、次に選ぶ階段の選択肢としてはいくつもあるが、以下の二つの理由から、今いる地点よりも西側でなるべく近い階段を選ぶものとしている。一つには、浸水解析の結果から、この地下空間では東側から浸水が進むと考えられるためであり、もう一つには、いち早く地下空間から脱出したいという意識を考慮してのことである。ここで、階段を変更した際にも、次に選択した階段の下側ノードまでの最短経路を Warshall-Floyd 法を用いて求め、それにより移動するものとしている。最終的には、この動作を繰り返し、階段の下側ノードに到達した際の階段上部の越流水深が 10cm 未満である階段を用いて地上に向かう。

本研究では、多層化した地下空間を対象としているため、階段を上っても地上とは限らない。そこで、使用した階段の上側ノードに達すると地上かどうかの判定を行っている。そして、その階段の上側ノードがまだ地下にあると判定されれば、そのノードを新たな初期位置として、一連の計算を行い、上の階層に到達した際に地上であると判定されるまで繰り返すことになる。

最後に、自力で避難できるかどうかの判定基準について説明する。水平部では、避難の途中でその地点の水深が 1m になれば自力での避難が「不可能」とし、計算を終了している。また、避難の途中でその地点の水深が 50cm になれば自力での避難が「困難」としている。ただし、自力での避難が困難と判定されても計算は継続している。同様に、階段部においては、階段上部の越流水深が 30cm になれば自力での避難が「不可能」とし⁶⁾、計算を終了している。また、階段上部の越流水深が 20cm になれば自力での避難が「困難」としている。ただし、水平部の場合と同様、自力での避難が困難と判定されても計算は継続している。

3. 解析結果と各対策の効果

(1) 避難解析結果

まず、地下にある 367 個のノードに 1 人ずつ配置し、避難解析を行う。避難解析の計算時間ステップは $\Delta t = 1.0$ (s)、計算時間は 3600 秒である。計算の基準時刻は浸水解析を始めた時刻、すなわち鴨川からの溢水が始まった時刻としている。このときの浸水深の時間変化と避難状況を図-4.3.1 に示す。図中の「完了者数」は地上に到達した合計人数を示し、「困難者数」は自力での避難が困難と判定された人数、「不可能者数」は自力での避難が不可能と判定された人数を示す。

浸水解析の結果をみると、計算開始 240 秒後にすでに地下街での浸水が始まり、一部では 20cm 以上の浸水が認められる。したがって、この京都御池地下街は鴨川からの溢水が起きた場合に、浸水し始めるまでの時間がきわめて短く、危険性が高いことがあらためて確認される。また、地下 3 階地下鉄ホームにおける浸水深の上昇度が非常に大きく、一瞬の判断によって生死が分かれる可能性がある。

足下の水深が 5cm を超えて自主避難する場合の避難解析の結果については、自力での避難が「不可能」と判定されている人はいないが、「困難」と判定されている人が 6 人現れている。したがって、この地下空間における浸水時の危険性は高いと考えられる。

このケースは各避難者が階段を選択しながら避難しているが、これは周囲の状況を把握し、冷静

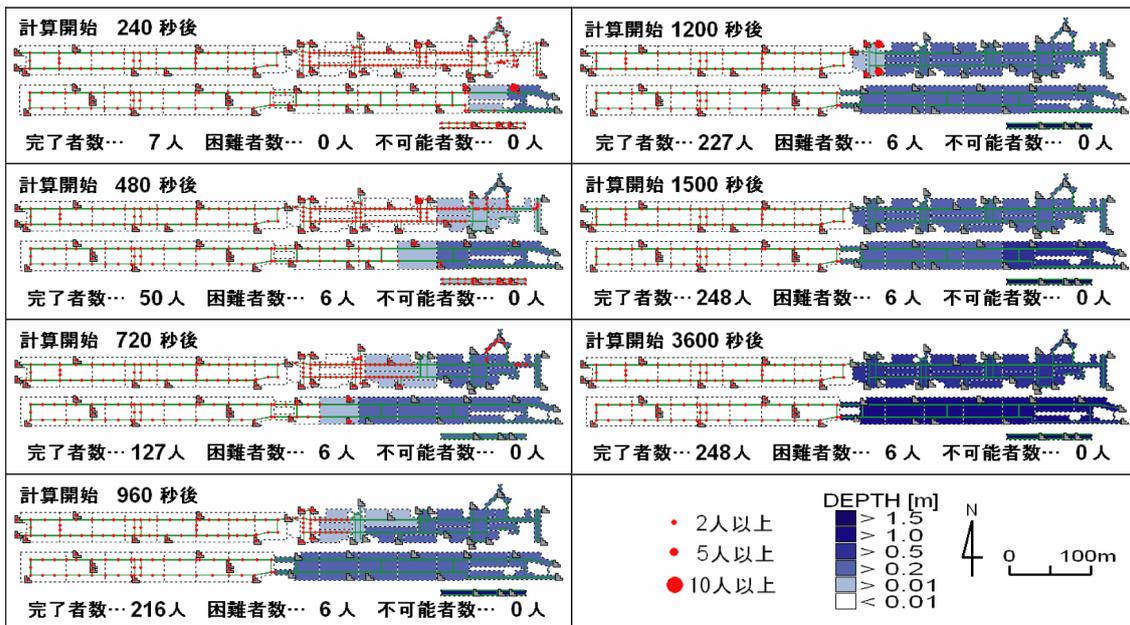


図-4.3.1 浸水深の時間変化と避難状況図（自主避難）

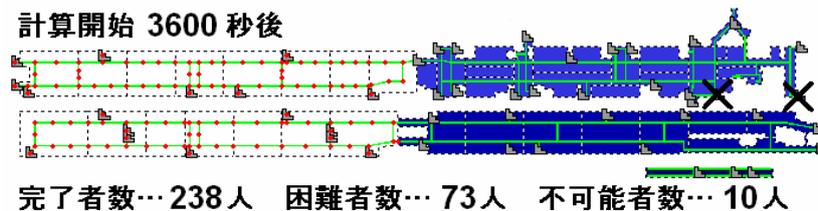


図-4.3.2 解析結果（階段選択なし）（自主避難）

に避難している状況と考えられる。そこで、周囲の状況がわからない、あるいは冷静さを失った場合を想定し、階段選択を行わず、必ず最寄りの階段を用いて避難するケースについて解析を行う。このときの解析人数も地下にある367個のノードに1人ずつ、計367人で行っている。図-4.3.2にこのケースの最終的な結果を示す。図中の×印は自力避難不可能と判定された人がどこでどのように判定されたのかを示す。

このケースでは、自力での避難が不可能と判定された人が10人現れ、また、自力での避難が困難と判定された人数が最終的に73人と、避難完了者のおよそ1/3を占めていることから、自力で地上まで避難できた人の中にも、かろうじて逃げられた人が数多くいたということになる。したがって、このような状況になったときの危険性は大変高いものと予想される。また、自力での避難が不可能と判定された人は全て階段部において判定されている。したがって、地下空間からの避難においては階段部分がネックになると考えられる。

(2) 各対策の効果

前節では、地下浸水時の避難状況について示した。ここでは、さまざまな対策の持つ効果を避難行動解析を通して定量的に評価する。そこで、最悪の状況を緩和するという視点から、前節における「階段選択なし」のケースを「標準ケース」として、これを対象に解析を行う。

まず、ソフト面による対策として、自主避難の前でも強制的に人を移動させる指示避難と、その指示発令時刻が避難行動に及ぼす影響について検討する。初期配置は前節と同様として解析を行う。図-4.3.3は、避難指示発令時刻が、鴨川溢水時を基準として30秒ずつ遅れたときの平均避難時間

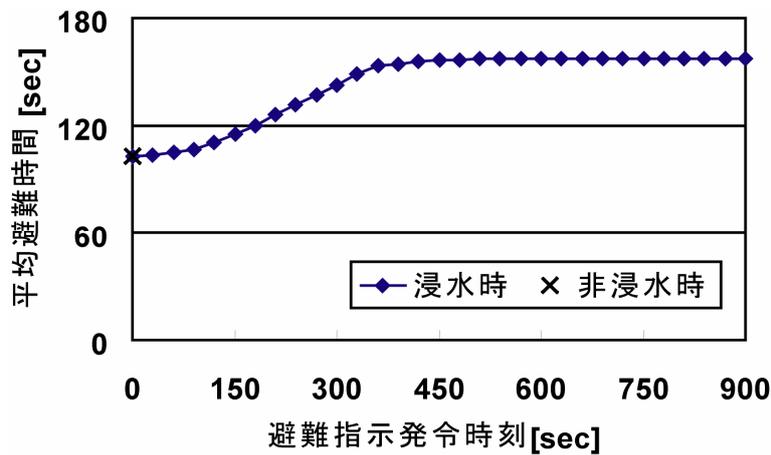


図-4. 3. 3 避難指示発令時刻と平均避難時間との関係

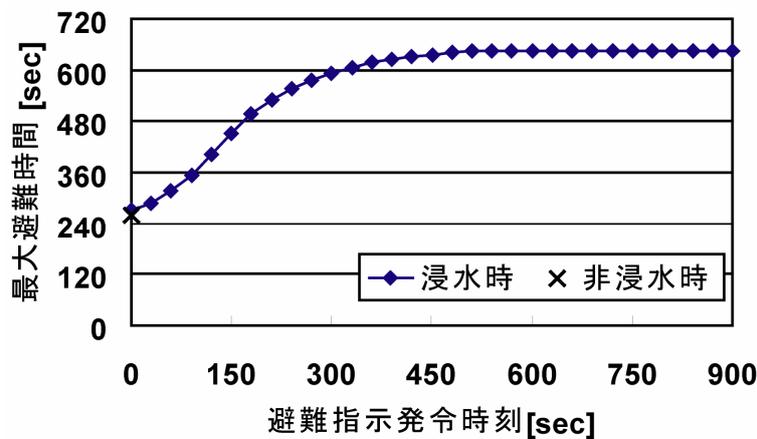


図-4. 3. 4 避難指示発令時刻と最大避難時間との関係

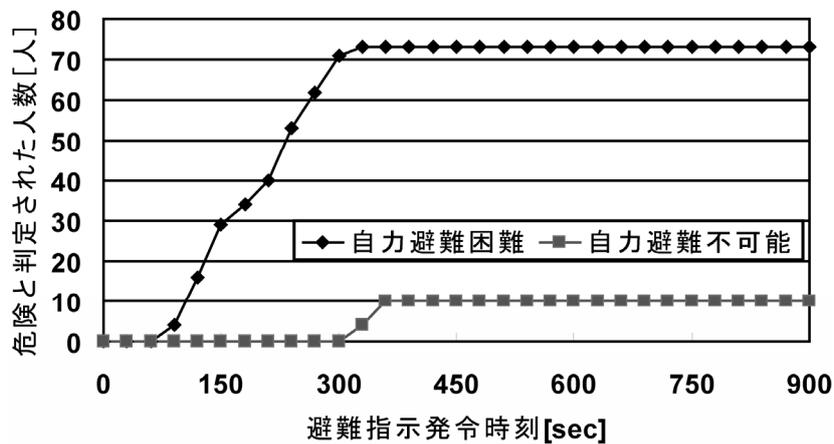


図-4. 3. 5 避難指示発令時刻と自力避難不可能者数、困難者数との関係

との関係を示し、図-4. 3. 4 は、最大避難時間との関係を示している。ここで、「平均避難時間」とは、避難を開始した人の平均避難時間であり、「最大避難時間」とは、避難を開始した人の中で地上に到達するまでに最も時間を要した人の避難時間である。図中の非浸水時とは、浸水解析を行わず、計算開始とともに強制的に移動を開始させた場合の平均避難時間、最大避難時間である。また、図-4. 3. 5 は、浸水時に、避難指示発令時刻が 30 秒ずつ遅れたときの避難が不可能あるいは困難と判定された人数の変化の様子を示している。

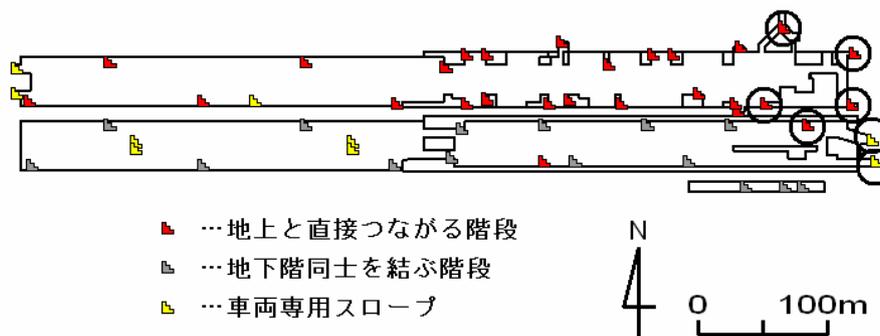


図-4.3.6 対策を施す入口

これらの図より知られる最も重要なことは、避難解析の結果が避難指示発令時刻に強く影響されているということである。そこで、これらの図についてももう少し詳細に検討する。

まず、避難指示があり、またその発令時刻が鴨川からの溢水が始まった時刻と同じであれば、平均避難時間、最大避難時間とも非浸水時の場合とほぼ同じであるため、安全に避難できると言える。これはまた、鴨川からの溢水が始まる前までに避難指示を発令し、全員が速やかに避難を開始することができれば、地下街にいる人は全員安全に避難を完了することができると考えられる。しかし、避難指示発令時刻が遅くなるにつれ、平均避難時間、最大避難時間とも増加し、地下街の危険性が非常に速く増加する。

これらのことは、避難指示発令時刻と自力避難不可能者数、困難者数との関係からもわかる。避難指示発令時刻が鴨川からの溢水が始まった時刻とほぼ同じであれば、自力での避難が不可能、あるいは困難と判定される人がいないため、安全に避難できている。

しかし、このようなソフト面による対策は不確実性が高い。そこで、より確実性の高いハード面による対策について、ここでは、高さ 50cm の止水板と高さ 15cm の常設の段差について検討する。なお、この段差は、浸水解析の際に導入した車道と歩道との段差とは異なり、地下街への入口に設けられた段差を表している。今後は浸水解析の際の段差と区別するために、この入口に設けられた段差を「ステップ」と呼ぶ。これらの設備を設置する入口は、図-4.3.6 に示す鴨川に近い東側の 7 カ所であり、浸水解析の結果から氾濫水の流入が予想される入口である。

図-4.3.5 より、避難指示発令時刻が鴨川溢水後 330 秒以上遅れると自力での避難が不可能と判定される人が現れる。そこで、地下にある 367 箇所のノードに 1 人ずつ配置し、計算開始 360 秒後に避難指示が発令されるものとして、現状と止水板を設置したケース、ステップを設置したケースとを比較する。図-4.3.7、図-4.3.8、図-4.3.9 は、それぞれ、現状、止水板を設置したケース、ステップを設置したケースの最終的な解析結果を示している。

まず、止水板を設置すると、氾濫水の流入自体をかなり防いでいることがわかる。その結果、特に危険になることもなく、速やかに避難を完了している。一方、ステップを設置した場合は、高さが低くなっている分、止水板を設置したときほどは氾濫水の流入自体を防ぐことはできていないが、特に自力での避難が不可能や困難と判定される人もなく、安全に避難できているものと考えられる。

次に、これらのハード面による対策が持つ時間的な効果について説明する。先ず、対策を施すことでどの程度浸水が遅れるのかを検討する。そこで、地下にあるノードのうち、現状の場合に浸水が認められた 248 カ所のノードについて、現状の場合の浸水開始時刻と対策後の浸水開始時刻との差を考える。その結果を図-4.3.10 に示す。なお計算開始 3600 秒後（60 分後）においても浸水し

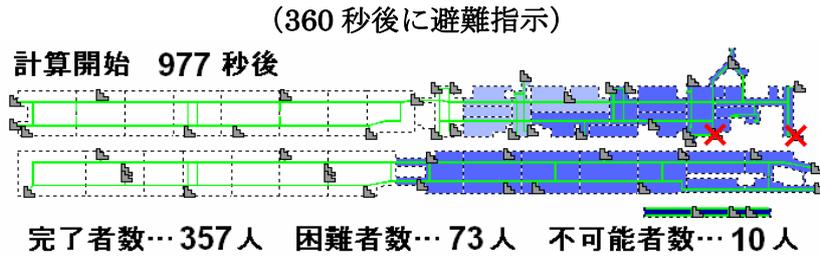


図-4.3.7 解析結果 (現状)

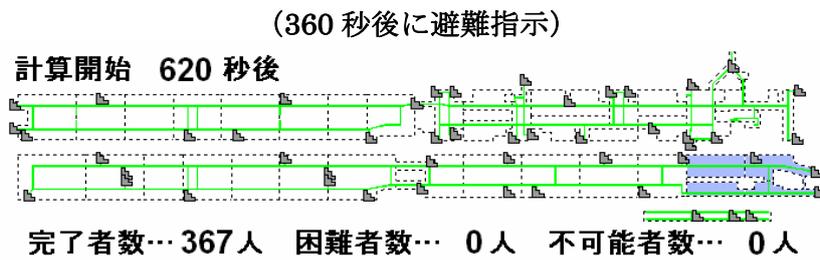


図-4.3.8 解析結果 (高さ 50cm の止水板を設置した場合)

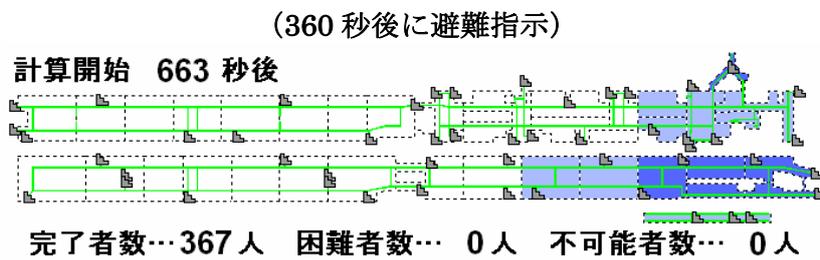


図-4.3.9 解析結果 (高さ 15cm のステップを設置した場合)

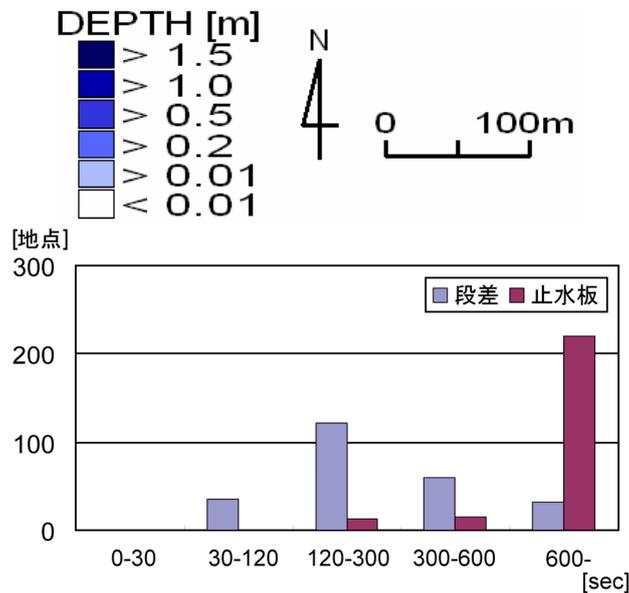


図-4.3.10 ハード対策による遅延時間

なかった場合は、600 秒以上遅れるグループに含めている。

この図より、止水板を設置するとほとんどの場所において 600 秒（10 分）以上浸水開始が遅れており、その効果の大きさが確認される。ステップを設置した場合、止水板ほどの効果は見られないが、平均的には 120 秒から 300 秒遅れており、この地下空間の大きさを考えれば、かなりの時間的余裕を生み出していると考えられる。

4. まとめ

本章では、多層化した地下空間における浸水時の避難がどの程度危険であるのかを評価するために、従来の避難行動解析モデルを地下空間の場に適用できるものに拡張した。そして、地上と地下空間を統合した浸水解析結果を基に避難行動解析を実施した。また、京都御池地下街を対象に解析することで、さまざまな対策による効果について考察を行った。ここで得られた結果を以下にまとめる。

- a. 避難行動シミュレーションのモデル化にあたって、従来の避難行動解析モデルを、多層化した地下空間の場に適用できるものに拡張した。浸水時の避難行動を考えて、階段を選択しながら上の階層に行く状況も表現できるようにした。
- b. 地下浸水時の避難では、特に階段部がネックになることがわかった。
- c. 地下浸水対策について、ソフト面による対策としては、避難指示が重要であることが確認された。ハード面による対策としては、止水板による対策で十分と言えるが、避難という点では、高さ 15cm のステップを設置するだけでもかなりの効果があることがわかった。

参考文献

- 1) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について、土木学会論文集 No. 537/ I -35、pp. 233-244、1996.
- 2) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用、土木学会論文集 No. 513/ I -31、pp. 225-232、1995.
- 3) 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究、京都大学学位論文、1983.
- 4) 高橋保・中川一・東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究、京都大学防災研究所年報、第 32 号 B-2、pp. 757-780、1989.
- 5) 間島真嗣・戸田圭一・大八木亮・井上和也：都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析、水工学論文集 第 49 巻、pp. 601-606、2005.
- 6) 岩村真理・戸田圭一・間島真嗣：地下浸水時の危険性についての一考察、平成 17 年度関西支部年次学術講演概要、2005. (CD-ROM)

第V章 地下空間浸水時の救助

1. 地下浸水時を想定した救助訓練

(1) はじめに

都市域における地下空間は、限られた地域の中に人口や資産が高度に集積した都市において重要な空間であり、その有効利用は今後さらに進展するものと考えられる。利活用の進む地下空間は、その一方で水害時の危険性が指摘されており、過去にも人的被害が発生するなどの事態が生じている。従って、地下浸水発生時には、地下空間内において被災者の発生ならびに救助・救援活動が必要となる状況が十分予想される。

地下空間内での救助・救援活動を行うにあたっては、まず地下街、地下構造物内の利用者の分布図、さらには地下空間のハザードマップの事前準備が重要であると考えられる。これらの分布図、ハザードマップは、不足しがちな地下空間内の空間情報を与えるとともに、地下浸水発生時の状況予測、地下浸水発生時の認識および対応の想定を事前に行うためにも重要であると考えられる。

実際の避難、救助活動を想定すると、階段は地下空間からの避難路でもあり、救助活動の起点ともなるため、極めて重要な位置を占めることになる。その階段を通じての避難、救助では、階段部分の形状の把握、分類も事前準備の一つとして肝要になると考えられる。理由として、これまでに行われている階段を通じての避難行動に関する実験結果によると、氾濫水の流入により階段部で生じる流動の状況が避難行動に大きく影響を及ぼすことが指摘されており、階段部での流動状況が、救助方法の適用性にも大きく関係することが同時に予想されるためである¹⁾。

水防法の改正(平成17年)では、地下空間の浸水時における避難確保計画の作成が定められた²⁾。これは、地下空間では、浸水深の上昇が速いなど地上とは異なる想定外の状況が発生することや、地上の状況が把握しにくいこと、さらには通路が複雑に入り組んでいるために避難行動が容易でない状況に対策を講じることを目的としている。今後、進められる防災体制の強化においては、被災者の発生に対応した救助・救援活動についても上述の避難確保計画と連携する形で具体的方策が整備されることがより望ましいと思われる。

本章では、地下空間からの救助活動を念頭に、実物大の階段模型を用いて行われた救助訓練の概要について述べるとともに、訓練時および訓練後のヒアリングなどを通じて浮き彫りとなった点などについて考察を行う。

(2) 救助訓練の概要

実物大階段模型(京都大学防災研究所・宇治川オープンラボラトリー内)を用いた、京都市消防局による救助活動に関する訓練は2回実施された。2回の訓練の概要を示すと以下のようなものである。

救助訓練1 (レスキュー隊員を含む総勢20名程度が参加)

- レスキュー隊員による、浸水時の階段における移動、および被災者救助の訓練
 - ・流水中の階段を通じての被災現場への移動(安全性の確認)
 - ・被災者(人間型の人形)の救助方法
 - 被災現場での被災者の確保
 - 安全な方法での救出(担架状の器具による被災者の救出)
 - ・服装(特に足元周り)の違いによる、移動しやすさの確認
 - 通常の制服、防火服、素足、ウェットスーツ&ブーツ、沢登り用ブーツ等

救助訓練 2（レスキュー隊員を含む総勢 20 名程度が参加）

●未体験の隊員による階段昇降の体験

●階段の移動方法に関する訓練

複数（5 名程度）が前後に並んだ状態で移動（昇降）

安全帯を装着しての移動訓練（昇降）

●被災者の救助方法に関する訓練

1 名の隊員が、1 名の被災者を背負って移動（救助法 I）

2 名一組、左右から被災者を抱えて移動（救助法 II）

4 名一組、被災者を前後 2 名ずつで守る形で、一列で移動（救助法 III）

4 名一組、前 2 名が流勢を弱め、後 2 名が被災者を抱えて移動（救助法 IV）

自立できない被災者を、担架状の器具に乗せて引き上げ（救助法 V）

1 回目の訓練（救助訓練 1）は、実物大階段模型での流水中の階段昇降が初めてであったこともあり、基本的に流水時の階段昇降動作の確認や、服装による階段昇降動作への影響の確認が主となった。2 回目の訓練時（救助訓練 2）には、実際の救助活動を想定して、安全な階段昇降および被災者の救出方法を、階段模型上で実際に試すこととなった。

ここで行われた訓練は、階段昇降時にロープで隊員の安全を確保するなど、訓練時の安全には十分に配慮された中で実施された。

(a) 流水中の階段の昇降

写真-5.1.1 は、流水中の階段を昇降する様子であり、階段模型の未体験者に対する最初の体験時のものである。実験条件は地上での氾濫水深が 30cm 程度で、この条件では階段の下端では流速が約 4m/s に達する。この状況はこれまでの体験実験の結果¹⁾から、一般人の階段を通じての避難が困難になる水深である。訓練に参加した隊員は、全員昇降が可能であったが、写真にあるように下る際に手すりを使用する場合も見られた。

写真-5.1.2 は、階段下端部でロープにより姿勢を確保する様子である。上述のように、地上の氾濫水深が 30cm 程度の場合、階段の下端での流速が 4m/s となり、氾濫水深が 40cm になると流速は 5m/s を超える。このように流速が非常に大きくなる状況下での救助活動時には、隊員の姿勢の確保は欠かせず、状況に応じた形での方策が必要となる。ただし、地上からの氾濫水が流れ込む階段では、水以外の漂流物も合わせて流れ込むため、姿勢を確保しつつもある程度の回避行動は取れるようにした方がよいと思われる。

(b) 階段移動時の服装について

これまでに実施された避難に関する体験実験においても、服装の条件、特に足元周りの条件の違いにより、足元に作用する流体力ならびに階段上での移動のしやすさに違いのあることが確認されている¹⁾。今回の訓練においては通常の制服に加えて、写真-5.1.3 に示す 4 種の服装（防火服、素足、ウェットスーツ&ブーツ、沢登り用ブーツ）による移動のしやすさの確認が行われた。

素足は足元に加わる流体力が最も小さくなる状態であり、訓練時にも確認されている。しかしながら、現場を想定した場合、足元を負傷する可能性が大きいいため、安全性の面から適用は難しいと

思われる。

防火服は、ここで試された4種の中で最も移動が困難であることが確認された。火災に対しては有効である防火服も、流水中では流水に対する投影面積が大きくなるために過大な流体力が足元に作用する結果となり、他の服装に比べて移動が難しい状況となった。

流水中の階段を移動する服装としては、今回の訓練ではウェットスーツが最も適したものであり、さらには沢登り用ブーツが足元の安定により有効性のあることが確認された。このように救助活動時の服装が、階段での移動に大きく影響することから、発災時の状況をよく把握して服装を選択すること、および、より適切な服装の準備が重要である。

(c) 階段の移動方法に関する訓練

本節では、前節までとは異なり、複数人数での移動に関する訓練の状況について示す。まず、5人1組で階段を昇降する様子が写真-5.1.4である。ここでは、5人ができるだけ固まった状態で移動することで、移動時の安全性を確保しようと試みている。今回の訓練時には、足の運びを全員で合わせていたために、昇降速度が大きくできなかった。この移動方法では、最も上段に位置する隊員が流水の矢面に立ち、他の隊員に作用する流勢を弱める利点を有するが、最上段の隊員への負担が大きくなる点、またスリップ、転倒時には他隊員にも影響する点などに注意が必要である。

写真-5.1.5は、2名の隊員が1本のロープを介して、それぞれが階段を昇降する様子を示している。この方法は救助隊員の移動だけではなく、被災者の救助時にも利用できる可能性がある。ただし、この方法の適用には階段形状が関係する(今回のような直線階段には適用しやすい)ほかに、流水中のロープ操作等への問題点も残されている。

(d) 被災者の救助方法に関する訓練

今回の訓練では、被災者の救出方法について、隊員の人数、被災者の歩行の可、不可に応じた全5種類の救出方法の訓練を行った(上述訓練概要参照)。

最初に、1名の隊員が1名の被災者(歩行不可)を背負って移動する状況(救助法I)を写真-5.1.6に示す。この方法は、器具を使わない救助方法(救助法I~IV)の中で、最も移動速度が速い結果となった。これは、複数の隊員による救助方法の場合、隊員同士が相互に確認を取りつつ固まって移動する形となり、結果的に集団としての移動速度が遅くなったためである。ただし、1名の隊員による救助が速やかに行われるのは、被災者を背負った状態の救助隊員に十分な余裕があり、なおかつ地上の氾濫水深が大きくなりなく階段上の流水による昇降への影響が少ない状況においてである。また、不慮の事態の状況下で、対応が取りにくいのも本救助法の難点の一つである。

写真-5.1.7は、2名の隊員による被災者1名(歩行不可)の救助の様子(救助法II)である。先にも述べたように、この方法は隊員1名による救助よりも移動速度は遅い結果となったが、各隊員への負担は少ない。また、不慮の事態への対応も可能である利点がある一方で、現場での階段移動時には片方の隊員のみ手すりが見える状況になることが予想される(実際の階段幅は今回の階段模型よりも大きい場合が多い)ので、隊員間でのアンバランスには注意を要する。

写真-5.1.8には、4名の隊員による被災者1名(歩行可、不可)の救助の様子(救助法III、救助法IV)を示す。写真-5.1.8(a)は被災者が歩行可能の場合であり、先導する隊員の後を付いて移動する形で、隊員が被災者を前後から囲むようにしている。被災者が歩行不可能の場合(写真-5.1.8(b))には、2名の隊員が被災者を抱え、残り2名の隊員が先導する形で移動している。いず

れの場合も、集団としての移動速度が遅くなりがち（特に被災者も歩行する場合）であるのが難点であるが、両方法とも先導する隊員が存在し、被災者への流勢をある程度緩和できるほか、漂流物の流入などの事態にも対応が可能である。ただし、その場合先導役の隊員の安全確保の手段が必要である。

次に、歩行不可能な被災者を、器具を使って救助する方法(救助法V)について示す(写真-5.1.9)。今回使用されたのは、担架に浮体を取り付けた簡易な器具ではあるが、被災者を載せた状態で救助隊員の支持が無くても安定な状態を保てることが確認された。実際の救助活動時には、隊員もしくはロープ等による支持が必要であり、また階段形状が直線でない場合には、引き上げロープの操作、器具の安全な移動のための隊員の配置が必要となる。

最後に、歩行可能な被災者に対する別の救助方法を写真-5.1.10に示す。この方法は被災者がある程度自力で避難可能であることを前提に、複数の隊員が隊列を組み、流勢を弱めた部分すなわち避難路を作り出そうとするものである。訓練時の状況では、十分な避難路（写真中、階段右側）を作り出すに至ってはいないが、流水中の階段に避難の難しくない領域を確保するという考え方は、階段を通じた避難、救助活動を行う上で有効性の高いものと考えられる。

（3）訓練を通じての考察

今回実施された訓練は、地下空間への浸水を想定した救助方法に関する数少ない訓練の一つである。上に示した訓練の内容から、次のような考慮すべき項目が挙げられる。

●救助隊員の服装

服装の違いにより、階段を移動中に受ける抵抗が大きくなり、移動に要する時間に影響がでるため、浸水被害発生時を想定した服装が必要である。特に防火服のような服装では、流水中で受ける抵抗が大きくなり、救助・救援活動に支障がでることが予想される。

●階段等の経路を通じての現場への移動

救助・救援活動の場合、地下へ流入する氾濫水と同じ方向（上から下）に地下空間へ向かうことになる。今回の訓練を通じて、階段を降りる動作が上る動作よりも危険性を感じることを確認され、安全な移動方法の確立が求められる。

また、訓練時に実物大階段模型で使用できた“手すり”は、現場では実質上片側のみしか利用できないと想定されるので、実際の救助・救援活動は今回の訓練よりも一層困難な状況に直面することが予想される。そのため、被災現場へ移動する過程での階段部および流水速度の大きな場所（例えば、階段下の踊り場等）での救助隊員および被災者の移動については、十分に安全に配慮する必要がある。

●被災者の救助方法について

被災者の状態により、適用できる救助方法が異なるため、それぞれの状況の応じた適切な方法を採用することが大切である。今回の訓練においても、いくつかの救助方法が試されたが、実際の階段部分は幅が広く、全体の形状、手すりの有無など実情を十分に勘案した救助方法を確立する必要がある。

なお、現場への移動、救助活動中を通じて、救助隊員自身の安全性の確保は十分に勘案すべきで

ある。

また、地下の深い位置での救助活動においては、潜水作業を伴う可能性がある。この場合には、潜水機材の準備、搬送を効率よく行うとともに、潜水作業者に対する位置情報の提供ならびに通信手段の確保、被災者の救助方法などを構築する必要がある。

(4) まとめ

本章では、2回実施された地下浸水発生時の救助訓練の概要について、訓練の内容と訓練から浮き彫りとなった点について示した。

前述のように、地下空間への浸水時の救助活動を想定した場合、救助活動時の隊員の服装、流水中の階段での移動方法ならびに被災者の安全な救出方法について、それぞれ適切な方法に関する検討の必要性が確認された。また地下浸水時には、時々刻々と変化する地下での浸水状況への対応が要求されるほか、場所により流速、水深等の異なる流水中での救助活動であること、不慮の事態の発生などにより、想定された救助活動に対する不確定性が生じる可能性がある。地下浸水時を念頭においた救助活動方針の策定においては、これらの諸問題を勘案しながら安全性の高い方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 水防法研究会 編：逐条解説 水防法, ぎょうせい, 2005.



写真- 5. 1. 1 流水中の階段昇降



写真- 5. 1. 2 隊員の姿勢確保の様子



写真- 5. 1. 3 足元周りの服装の違い
(左上：防火服、右上：沢登り用ブーツ、左下：ウェットスーツ、右下：素足)



写真-5.1.4 階段の移動方法（5人1組）



写真-5.1.5 階段の移動方法（ロープ使用）



写真- 5. 1. 6 被災者の救助方法（隊員 1 名、被災者 1 名）



写真- 5. 1. 7 被災者の救助方法（隊員 2 名、被災者 1 名）



(a)



(b)

写真- 5.1.8 被災者の救助方法（隊員 4 名、被災者 1 名）



写真- 5. 1. 9 被災者の救助方法（器具使用）



写真- 5. 1. 10 被災者の救助方法（避難路）

2. 東京消防庁における地下浸水時の救助活動(中澤氏の講演)

東京は江戸以来、低湿地の埋め立て等により市街地を築いてきた。そのため、戦後はいくつもの台風に襲われ、そのたびに浸水していたが、河川改修等によって被害が減少してきた。また、都市化の進展により一時に大量の雨水が河川に流れ込むようになり、処理能力を越え山の手地域でも浸水被害が発生している。これに対して環七地下河川や遊水池の設置などによって改善が図られている。

しかし、平成 11 年に新宿区において自宅地下室への浸水をエレベータで見に行った男性が死亡した。平成 17 年には集中豪雨によって杉並区ではマンションの 1 階部分が浸水するという被害も発生している。

そこで東京消防庁における地下浸水時の救助について、平成 18 年 2 月 23 日、東京消防庁中澤氏より東京消防庁の地下浸水時の救助についての講演をいただき、地下鉄、地下街等での水防活動についての概要および意見交換について以下にまとめた。(写真提供：東京消防庁)

(1) 地下鉄、地下街等での水防活動

(a) 活動方針

東京消防庁の水防活動については、「新消防戦術／東京消防庁監修」に沿って行っており、その活動方針では、人命救助が第一であり、そのために必要な情報を入手するため地下鉄、地下街等の責任者および関係機関との連絡を密にし、二次災害を阻止するための浸水防止と排水の作業を実施することとしている。

(b) 地下鉄、地下街等での水防施設

地下鉄、地下街における水防施設としては以下のようなものがある。

・地下鉄

通風口：地上との通風口では、路面に設置されている場合は周辺地盤より高い位置に設置する。

浸水防止機：通風口を閉鎖する機能を持ち、手動と降水計と連動したものや最寄り駅から遠隔操作が行えるものがある。

防水板：アルミパネルなどで地上部出入口に設置するもの。

防水扉：出入口、通路部や軌道敷設部に設置されている。軌道敷設部分のものは、トンネル全体を閉鎖するもので上下 2 段となっている。

排水設備：駅舎および駅間に排水ポンプ室があり 1.0m³/秒以上の能力を有する排水ポンプが 2 台以上設置されている。

・地下街

地上部出入口については、地下鉄と同様の施設を有している。また、排水ポンプは汚水・排水と兼用が多い。

(c) 活動要領

消防隊が救助活動を行うための活動要領として重要なことは、水害は時間とともに水位が上昇するため、人命救助、避難誘導を最優先とする。また、地下空間では、停電による視界の制約等が想定されるため活動部隊の安全管理を徹底することである。以下要領に沿って主な活動を示す。

- ① 施設にある排水ポンプや防水扉等の設備の操作を行わせるとともに、消防ポンプ車等を活用して排水を行う。
- ② 図面により被害状況、活動動線等を確認し、小隊ごとの活動を原則に、救命胴衣、救命浮輪、水深

測定棒、命綱および照明器具等を装備する。また、潜水時間の管理を徹底する。

- ③ 地下への進入隊と指揮本部との通信は、消防法にある無線通信補助設備の活用を図る。状況により無線中継地点を設定する。
- ④ 施設関係者および防災関係機関と連絡調整を密に行い、任務分担を明確にした上で活動に移行する。
- ⑤ 多数の浮遊物、濁水による視界不良や活動動線上の扉の開放と固定、漏電を防ぐため電気の完全遮断等の安全管理を行い二次災害の発生防止につとめる

(2) 活動事例

活動のケースとして3事例（事例1,2 東京都、事例3 福岡市）があり、以下の地下浸水に対する避難や救助への課題が示された。

- ・ 水圧により外開きドアが開かなかった。
- ・ 水中のためシャッターの切断ができなかった。
- ・ 多数の浮遊物によって救助を妨げられた。
- ・ 通報時に地下浸水であることが不明であったため装備の用意ができなかった。

(a) 事例1（狭い地下空間、出入口1ヶ所）

平成11年7月21日(覚知16時15分)都内の耐火造長屋共同住宅の地下1階36㎡(倉庫ほか)へ屋外階段から雨水が浸入し地階が水深1.9m(天井高2.5m)まで水没し、地階にいた1名(男性65才)が死亡した。当日の雨量は15時から16時30分までに128mmであり、消防隊到着時の道路冠水は約60cmであった。同建物付近の地形は北・南・東方向へ緩く上っている。

地階から地上へはEVと屋外階段(1ヶ所)であるが、屋外階段が浸水経路であったことからドア(外開き)が開放できなかったものと思われる。

救護活動は、ポンプ隊等の排水活動と並行して、救助隊員が1階と地階の途中で止まっていたEVの天井を破壊(通報が「EV内閉じ込め」)し進入するとともに、屋外階段のドア(天窓を破壊し進入し開放)から進入して、室内を検索したところ浮遊した家具の下で要救助者を発見した。(覚知から救出までの所要時間は1時間20分)

(b) 事例2(大変長い地下空間、出入口1ヶ所)

平成16年10月9日(覚知18時31分)都内の全路線泥水式シールド工事現場(立坑42m、横坑732m、径2.7m)において、作業終了後、突然排水バキュームが停止したため、作業員3名のうち1名が横坑に確認に行ったところ、大量の出水により流され行方不明となった。2名は地上へ自力避難したが、1名(男性32才)が死亡した。

救助活動は、救助隊が立坑から進入し目視で検索したが、立坑水深約20m、横坑が完全に水没しており、泥水で視界が全く不良であり、また多数の浮遊物があったことから、救助活動不能と判断し救助は行われなかった。その後、都下水道局による排水作業が実施された。

(c) 事例3（大規模地下空間、出入口3ヶ所）

平成11年6月29日(覚知11時16分)福岡市の複合用途建物地下1階700㎡(飲食店2、駐車場)へ2つの屋内外階段、車両出入口、駐車場換気用ガラリから雨水が侵入し、完全に水没し、飲食店舗にいた3名の従業員のうち2名は自力避難し、1名(女性52才)が死亡した。消防隊到着時、道路冠水は約50cmであった。

救助活動は、屋外階段から進入したがシャッターにより進入不能であったため、潜水隊員3名が1階屋内階段から進入し、飲食店前の通路で要救助者を発見した。

(3) 今後の課題

地下空間における浸水時の救助について以下のような項目が必要と考えられることが示された。

① 避難計画の根拠と避難訓練の定期的実施

ア 消防計画に浸水時の避難計画を明記する。

消防法施行規則第 3 条 1 項リ(消防計画)「火災、地震その他の災害が発生した場合における消火活動、通報連絡及び避難誘導に関すること」

イ 避難訓練の定期的な実施

② 安全階の確保と活動拠点

想定される浸水水位が高い地域においては、地上への避難は必ずしも安全とはいえないことから、地下空間に直結あるいは隣接する地上建物・構造物がある場合には、その地上階等を越える階等に一時避難場所を指定しそこに直結する階段の確保が必要である。

また、このような安全階（避難空間）は消防活動の拠点としても活用できる。

③ 救助資器材の配備強化

水上バイク、大型排水ポンプ、水中救助資器材の配備、水中で使用可能な破壊器具等の配備

④ その他

ア 浸水遅延対策と早期通報

救助活動の開始時における被害の状況により、救助効率(生存率)が大きく異なるものと考えられる。そのためは、施設への浸水遅延対策と 119 番への早期通報の 2 要素が重要となる。

早期通報は判断基準が事前に定められていること、また特に人員の少ない地下鉄駅舎等では、通報が一般に遅れることが予想されることから、関係者からの通報と自動的な通報を組合わせた「有人直接通報」が有効と考えられる。

(4) 意見交換

講演の後、以下のような意見交換が行われた。

- ・災害時には判断する情報が現場責任者まで届きづらい。
- ・災害等の時には、防火管理者から施設の図面を出してもらい活動を行う。
- ・電気系統は、火災を対象としているのでダウンする可能性がある。
- ・無線は、地下施設に設置されている設備を利用するが、その高さは床から 1 m 程度のところにあるので水没すると利用できないかもしれない。
- ・大量の黒煙により視界が効かないなかでの活動は、非常に困難である。水害でも同様に暗い場合や浮遊物が多いなど救助活動に支障をきたす。
- ・住民にハザードマップのようなものも含めて事前に周知する必要がある。
- ・最近完成した地下鉄道駅で警報が鳴っているのに乗客が、改札内へ入っていく事例を見たが、誤報などもあるが危険な場所からの避難については、事業者は当然であるが利用者も考える必要がある。



写真-5.2.1 東京消防庁と消防団の活動
(杉並区 2005年9月5日)
写真提供：東京消防庁

第Ⅵ章 おわりに

本研究は、重要な都市施設の水害脆弱性改善策の確立、都市型水害発生時の最適な避難誘導システムならびに救助・救援システムの確立を目的として、地下空間の実態調査の実施、避難誘導システムの検討、ならびに救助・救援システムに関する検討を行ったものである。以下に、主な検討結果を示す。

1. 地下空間の実態調査

名古屋地下街の現状調査では、名古屋セントラルパーク、名古屋ユニモール、および名古屋地下鉄栄森の地下街の3箇所での調査を実施した。調査では、地下街発展の経緯、過去の被災事例などを踏まえ、施設の形態ならびに設備等に関する調査を行い、次の問題点を指摘している。

- 1) エレベータによる地上との連絡の確保
- 2) 点字ブロックの設置が通行者の歩行に及ぼす影響
- 3) 身障者用トイレおよび駐車スペース設置
- 4) バリアフリーを含めた設備整備に要する財源

札幌駅前通地下歩行者通路建設は、昭和46年に始まった札幌地下街建設の一環で、平成19年からの工事着工を目指して準備が進められている。調査結果より、駅前通地下歩行者通路により札幌地下街が広範囲に連続的なつながりを持つことにより、対策が不適切な場合、火災時の流動が広域化し発生するガスや煙が拡散する可能性があることが指摘されている。また、地下浸水については、寒冷地域の地下街の特徴である地表アクセスの階段室の二重扉が浸水被害を拡大させる恐れがあることも指摘している。

2. 浸水時の避難誘導システムの検討

地下室からの避難を想定した実物大のドア模型による避難体験実験（成人男性47名、成人女性12名）、および大規模地下空間から地上への避難を想定した実物大階段模型による避難体験実験（成人男性66名、成人女性25名および小学生11名、中学生3名）の結果、次の結果が得られた。

実物大階段での実験結果

- 1) 小学生・中学生は成人男性に比べて避難するのに1.5～1.9倍の時間が必要である。
- 2) 荷物や照明が避難時間に与える影響は顕著ではないものの、服装による影響は大きい。
- 3) 被験者へのアンケートの結果、地上水深30cm程度が避難限界と考える人が多い。

実物大ドア模型での実験結果

- 1) ドアを押し開ける際に、成人男性では体重の45～80%、女性では40～70%程度の力を発揮できる。
- 2) ドア前の水深で、男性で35～47cm、女性で29～38cmが避難限界として妥当な値であることが本実験結果より推測される。

また、従来の避難行動解析モデルを地下空間の場に拡張し、地上と地下空間を統合した浸水解析結果を基に避難行動解析を実施した。さらに、京都御池地下街を対象に解析することで、さまざまな対策による効果について考察を行い、次の成果が得られた。

- 1) 避難行動シミュレーションのモデル化にあたって、従来の避難行動解析モデルを多層化した

地下空間の場に適用できるものに拡張した。この中で、浸水時の避難行動を考えて、階段を選択しながら上の階層に行く状況も表現できるようにした。

- 2) 地下浸水時の避難では、特に階段部がネックになることがわかった。
- 3) 地下浸水対策について、ソフト面の対策としては、避難指示が重要である。ハード面の対策としては、止水板の設置が求められるが、避難の観点から見ると、高さ 15cm のステップを設置するだけでも相当な効果があることがわかった。

3. 浸水時の救助・救援システムの検討

浸水時の地下空間からの救助活動を念頭に、実物大の階段模型を用いて行われた救助訓練の概要について述べるとともに、訓練時および訓練後のヒアリングなどを通じて次項目が明らかとなった。

- 1) 服装の違いにより、階段を移動中に受ける抵抗が大きくなり、移動に要する時間に影響がでるため、救助・救援活動の際には浸水被害発生時を想定した服装が必要である。特に防火服のような服装では、流水中で受ける抵抗が大きくなり、救助・救援活動に支障がでることが予想される。
- 2) 救助・救援活動の場合、地下へ流入する氾濫水と同じ方向（上から下）に、隊員は地下空間へ向かうことになる。今回の訓練を通じて、階段を降りる動作が上る動作よりも危険性を感じることが確認され、安全な移動方法の確立が求められる。
- 3) 浸水時に歩行可能か否かなど、被災者の状態により適用できる救助方法が異なるため、それぞれの状況に応じた適切な方法を採用することが大切である。

また、実際の地下鉄、地下街等での水防活動を通じた考察からは、「消防計画に浸水時の避難計画を明記する」ことを始めとする避難計画の策定、避難訓練の定期的な実施が必要であること、救助・救援活動の拠点や避難場所となる安全階の確保が重要視される。加えて、浸水遅延対策と早期通報の重要性も指摘されており、早期通報には判断基準の設定、および有人直接通報の有効性が示されている。

地下空間は地震および火災に対する防災設備に関しては十分ではないにしろ配慮され整備されつつある。一方、浸水に対する対策は必ずしも十分ではなく、しかも火災などの対策と相反する可能性も指摘されている。今後、これらの防災設備における各災害に対する安全性の整合の検討が残されている。