

大規模地下街での短時間集中豪雨を想定した 浸水時における安全避難に関する検討

中阪 友太郎¹・石垣 泰輔²

¹ 学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail: k192114@kansai-u.ac.jp

² 正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

近年, 気候変動の影響により局所的かつ短時間の集中豪雨の発生回数が増加している。都市部で集中豪雨が発生した場合, 地上だけでなく地下街等の地下空間への浸水の危険性が考えられる。よって, 浸水時を想定した地下空間における安全避難を計画することが防災上の重要な課題といえる。本研究では, 都市部の密集市街地に存在する大規模地下街を対象とし, 短時間集中豪雨に伴う地上の氾濫解析・地下の浸水解析を行うことで, 地下街の浸水リスクについて検討を行った。また, 地下街における浸水時の避難行動シミュレーションを行うことにより, 避難成功率の向上について検討を行った。解析結果として, 降雨量の増加により地下街の浸水リスクが高まり, 避難の早期開始や地下街と接続しているビルへの避難等により, 避難成功率が向上することが示された。

Key Words: underground mall, pluvial flood, inundation, evacuation, multi-agent simulation

1. はじめに

近年, 都市化の進展や気候変動の影響等により, 集中豪雨の発生回数や降雨量の増加が確認されている。昨今の集中豪雨の特徴として, 10~20分間といった短時間かつ局地的に発生することが挙げられる。そのため, 発生の予測と対策が困難であり, 深刻な被害を与える可能性がある。都市部では, 一般的に時間雨量 40~50mm 程度の雨水が排水できるように設計されているが, 短時間に下水道の処理能力を超える豪雨が発生した場合には, 内水氾濫が生じるリスクがある。例えば, 2013 年 8 月に大阪で発生した集中豪雨では, 大阪の梅田地区で内水氾濫が発生し, 駅や商店が浸水の被害を受けた。これは, 10 分間雨量で約 23.5mm の降雨が観測され, 約 20 分間で計画降雨量を上回る規模の猛烈な豪雨であった。

東京, 大阪, 名古屋等の都市域では, 地下鉄や地下街等の地下空間の高度利用が発達しているが, 海拔 0m 地帯が広がっている。よって, 水害が発生した場合は, 地上の浸水のみでなく, 地下空間への浸水が危惧されている。そのため, 大規模な集中豪雨に伴う地下浸水を想定し, 地下空間における安全かつ迅速な避難計画を作成することが防災上の重要な課題といえる。

都市部の内水氾濫に伴う地下空間の浸水や地下空間からの避難に関する研究は, これまでに多数なされている。例えば, 森兼ら¹⁾, 尾崎ら²⁾は, 内水氾濫では総降雨量よりも降雨強度が地下街の流入に影響を与えることを示している。関根ら^{3,4)}は, 地下街浸水時には避難誘導により効率的に避難が可能であることを示している。川中ら⁵⁾は, 地下街利用者の密集度の増加によって, 避難成功率が低下することを示している。瀧澤ら⁶⁾は, 地下街の接続ビルへの垂直避難や避難場所の容量を考慮した研究を行っている。このように, 地下空間の浸水や避難に関する研究が行われている一方で, 将来的な降雨量の増加を含めて検討している研究はあまり見られない。

本研究では, 都市部の密集市街地に存在する大規模地下街を対象とし, 短時間集中豪雨による内水氾濫の発生に伴う地下街の浸水解析により, 地下街の浸水状況の把握と浸水危険度の評価を行った。このとき, 下水道の計画降雨を基準とし, 降雨量の増加が地下街浸水に与える影響について検討した。また, 地下街浸水時の避難行動シミュレーションを行い, 降雨量の増加, 排水ポンプの有無, 避難経路の変更, 避難開始のタイミングといった様々な条件を考慮することにより, 避難成功率の向上に関する検討も行った。

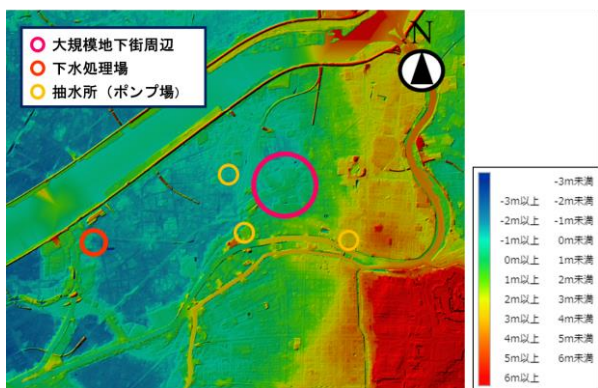


図-1 海老江処理区内の位置関係（国土地理院に加筆）

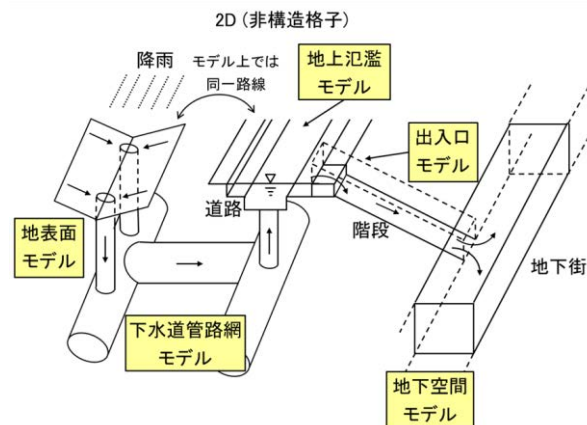


図-3 地上・地下統合氾濫解析モデル

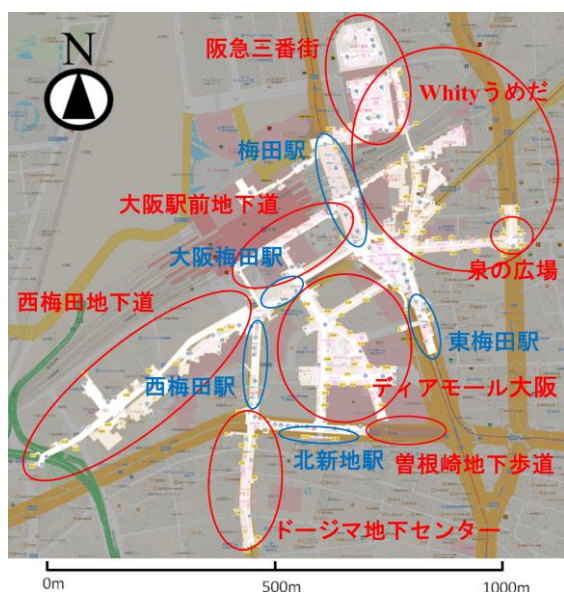


図-2 大規模地下街内の位置関係（Yahoo!地図に加筆）

2. 対象地域の概要

対象地域は、大阪市にある下水道処理区の1つである海老江処理区である（図-1）。この処理区内は、東の地盤高は比較的高く、西に向かって地盤高が低くなっている。特に中央部に位置する梅田は周辺部に比べて1～2mほど低くなっている。よって、地上で氾濫が発生した場合、地盤高の高い場所から低い場所に向かって氾濫水が流れるため、梅田は非常に危険な場所であるといえる。

また、対象地域には排水ポンプ場が存在するが、処理能力を上回る規模の豪雨が短時間に集中すると、ポンプが機能を停止する可能性がある。そこで、ポンプ稼働時とポンプ停止時の両方で検討を行った。なお、ポンプは解析の間は継続的に稼働または停止すると設定した。

海老江処理区に存在する大規模地下空間は、約1km四方に広がる日本有数の地下街である（図-2）。公共の出入口（接続ビルからの出入口除く）は約140ヶ所存在し、多数のビルや5つの地下駅が接続し、管理者の異なる複数の地下空間で形成されている。

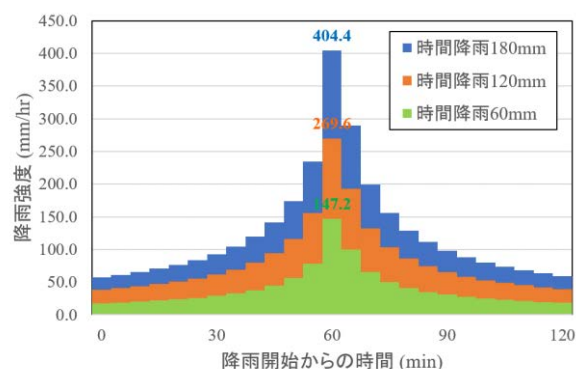


図-4 モデル降雨のハイトグラフ

3. 大規模地下街を含む地上部の氾濫解析

(1) 氾濫解析モデルの概要

地上部の内水氾濫解析を行い、地下街への氾濫水の流入量を計算するために、地表面と下水道管路網の統合解析が可能な InfoWorks CS（現：ICM）を用いた。本モデルは、地表面モデルと下水道管路網モデルから構成されている（図-3）。地表面モデルは、降雨を入力データとし、降雨損失考慮後の有効降雨が単一貯留池モデルによって地表面を流れ、マンホールへの流入量を算定するモデルである。下水道管路網モデルは、算出された各マンホールでのハイドログラフを用いて Saint Venant 方程式を適用して管内の水の流れを解析するモデルである。

また、地下街のモデル化の際には、地下街を巨大な管渠とし、出入口をマンホールで再現し、地表面と階段部の境界に仮想の堰を設けることで、地表面における浸水深が堰高を越えると地下街に水が流入するように設定している。出入口のモデル化には、現地調査の結果より得られた各出入口の幅とマウンドアップ高を適用した。

なお、本モデルは、2011年8月末の豪雨（時間雨量77.5mm）を用いて内水氾濫の再現性の検証及びキャリブレーションが行われたものを用いている⁷⁾。

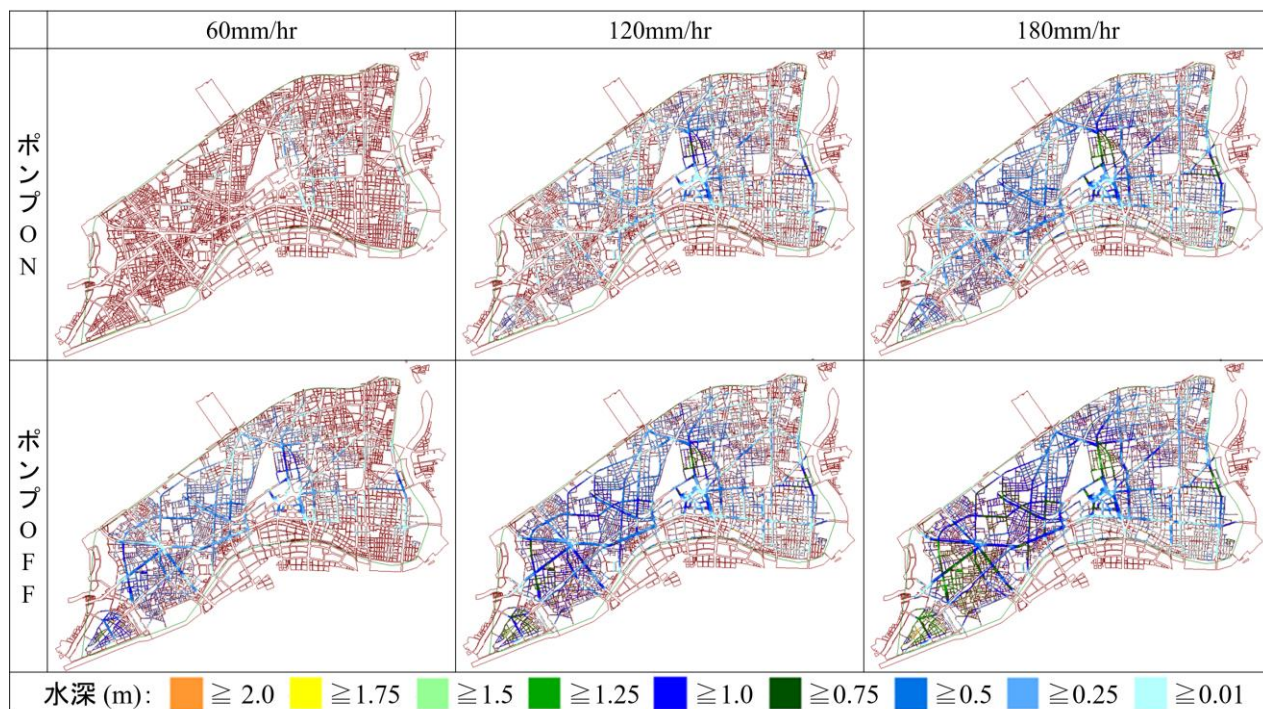


図-5 各降雨条件における地上部の最大浸水深（浸水深の高さで色分け）

(2) 氾濫解析条件

海老江処理区では、既に森兼ら¹⁾の研究をベースとし、尾崎ら²⁾、黄ら⁸⁾によって、様々な外力条件による内水氾濫解析が検討されている。ここでは、短時間の降雨強度が大きな降雨に伴う内水氾濫時の地下街への流入及び浸水特性を明らかにするため、黄らが作成した計画降雨を考慮したモデル降雨を用いる。対象地域の雨水排水能力は、1時間降雨 60mm（20年確率降雨に相当）で計画されている。よって、時間降雨 60mm を基準とし、その2倍、3倍の規模に相当する時間降雨 120mm、180mm のモデル降雨を作成した。図-4に示すように、モデル降雨はそれぞれ時間間隔 5 分、降雨継続時間 2 時間の中央集中型のハイトグラフである。なお、モデル降雨は対象地域（集水区）に一律に発生させるものとし、面的な分布の偏りなどは考慮しないものとする。また、氾濫解析に関する主なモデルパラメータとして、流出モデル（固定係数法）の流出係数を 0.85（中心市街地）と 0.65（周辺住宅地）とし、初期損失係数を 0.28mm とし、氾濫解析の粗度係数を 0.043 とした。

(3) 氾濫解析結果・分析

決定した解析条件をもとにして、対象地域での内水氾濫解析を行った。図-5に、各降雨条件における地上部の道路面の最大浸水深の結果を示す。なお、浸水深の凡例は、各地点における浸水深を 0.01m から 2m 以上で示し、2m までは 0.25m ずつの色分けを行っている。また、図-6に、氾濫解析結果から得られた各モデル降雨における地下街への氾濫水の流入量を示す。

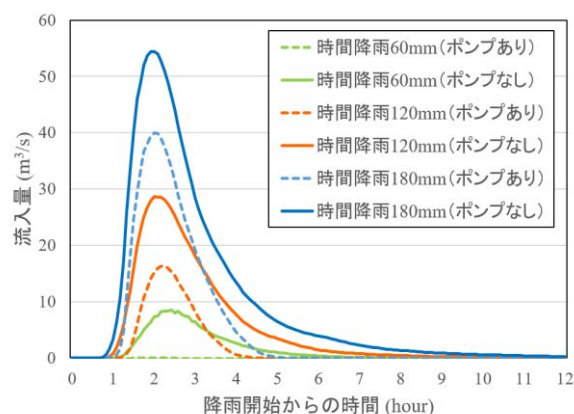


図-6 各降雨条件における地下街への流入量

図-5より、降雨量が増加するにつれて、地上部における浸水域が広がっている。ポンプ停止時は、主に対象地域の西側と地下街周辺で浸水が発生し、降雨量が増加するにつれて、全体に浸水が広がっている。これは図-1の通り、周辺よりも地盤高が低いためである。ポンプ稼働時は、停止時よりも内水氾濫の規模が小さくなり、西側の浸水深は抑制されているものの、地下街周辺を中心に浸水が発生していることがわかる。

図-6より、降雨量が大きくなるにつれて、地下街への流入量が増加していることがわかる。排水ポンプの稼働により、流入量が抑制され、特に下水道の設定基準である 60mm/hr ではほぼゼロに抑えられている。また、いずれの場合も地下街では約 2 時間後に流入がピークを迎えることから、流入のピークが到達するまでの時間に大きな差はないことが示された。

4. 大規模地下街における浸水解析

(1) 浸水解析モデルの概要

地上部の氾濫解析結果より得られた地下街の各出入口の流入量を外力とし、地下街における浸水解析を行った。解析モデルは、森兼ら⁹⁾の構造格子モデル（図-7）を用いた。メッシュのサイズは、解析範囲、通路幅、店舗の大きさ等を考慮し 2m の正方格子とする。また、フロアレベルの高低差は現地実測によるもので、地下駅が存在する場所のメッシュは地盤高を低く設定し、氾濫水が地下駅のメッシュに溜まるような設定を行った。浸水計算は、以下の 2 次元浅水方程式（運動方程式と連続式）を基礎式としている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここで、 h ：水深 (m)、 t ：時間 (s)、 u ： x 方向の流速 (m/s)、 v ： y 方向の流速 (m/s)、 M ： x 方向の流量フラックス ($M = uh$)、 N ： y 方向の流量フラックス ($N = vh$)、 H ($H = h + z$ 、 z は地盤高)：水位 (m)、 τ_{bx} ：水底面での x 方向のせん断応力成分 (kg/m^2)、 τ_{by} ： y 方向のせん断応力成分 (kg/m^2)、 ρ_w ：水の密度 (g/cm^3)、 g ：重力加速度 (m/s^2) である。

また、底面のせん断応力は、マニングの粗度係数 n を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

また、地下街の浸水解析に関するパラメータとして、粗度係数は 0.020（粗いコンクリート程度）と設定した。

浸水解析の方法について説明する。まず、計算の最初のステップとして、初期条件から運動量方程式を計算する。次に、流入出による境界条件を計算し、格子間を移動する流量フラックスを求める。その後、タイムステップ Δt を 1 つ進める。次に、移動した流量フラックスにより格子内に入り出した水の量を計算し、格子内の水深を計算する。その水深の値から、境界上の流量フラックスより流速を求める。その後、時間ステップ Δt を 1 つ進め、計算終了時間まで同様のことを繰り返す。

なお、これらの基礎式の差分化については、時間項には前進差分、移流項には Doner Cell スキーム、底面摩擦項には中央差分、それ以外の項には中央差分をそれぞれ適用した。また、未知量 (h , M , N) については千鳥格子状に配置し (staggered grid)、運動量方程式と連続式を交互に計算する Leap-Frog 法を用いて時間ステップを

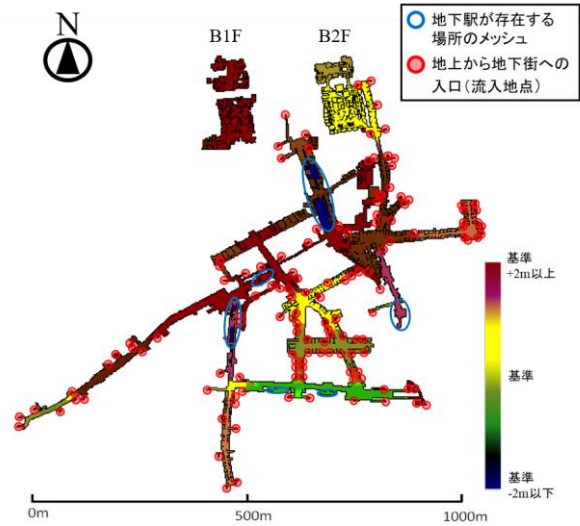


図-7 梅田地下街モデル・フロアマップ

表-1 歩行速度・避難困難度指標（単位幅比力）

	非浸水深時の歩行速度 (m/s)	避難困難指標 (単位幅比力)	
		安全避難 限界 (m^3/m)	自力避難 困難 (m^3/m)
成人男性	1.40	0.125	0.250
成人女性	1.10	0.100	0.200
高齢男性	1.10	0.100	0.200
高齢女性	0.80	0.080	0.160

進めることで、計算終了時間まで解析を行った。なお、計算差分時間は、0.005 秒と設定した

(2) 単位幅比力を用いた浸水時の避難困難度指標

地下空間は階段部分では流速が速く、通路部分では水深が高くなることから、流速と水深を同時に評価できる指標が必要である。そこで、大西ら¹⁰⁾や浅井ら¹²⁾の実験結果より、運動量だけでなく水圧も考慮できる単位幅比力が検討され、地下空間で安全に避難できるかどうかの判断に用いるための指標として示されている。以下に、単位幅比力の算定式を示す。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (6)$$

なお、 M_0 ：単位幅比力 (m^3/m)、 u ：流速 (m/s)、 h ：水深 (m)、 g ：重力加速度 (m/s^2) である。また、浅井ら¹²⁾の実験結果から得られた、単位幅比力に基づく避難困難度指標をまとめたものを表-1 に示す。

地下街の浸水解析により、各格子のメッシュにおける時間ごとの流速と水深を求めることで、単位幅比力を算出した。本研究では、最も早期に避難が困難となる高齢女性を対象とし、安全に避難できる限界である単位幅比力 0.08 (m^3/m) を用いて評価を行った。

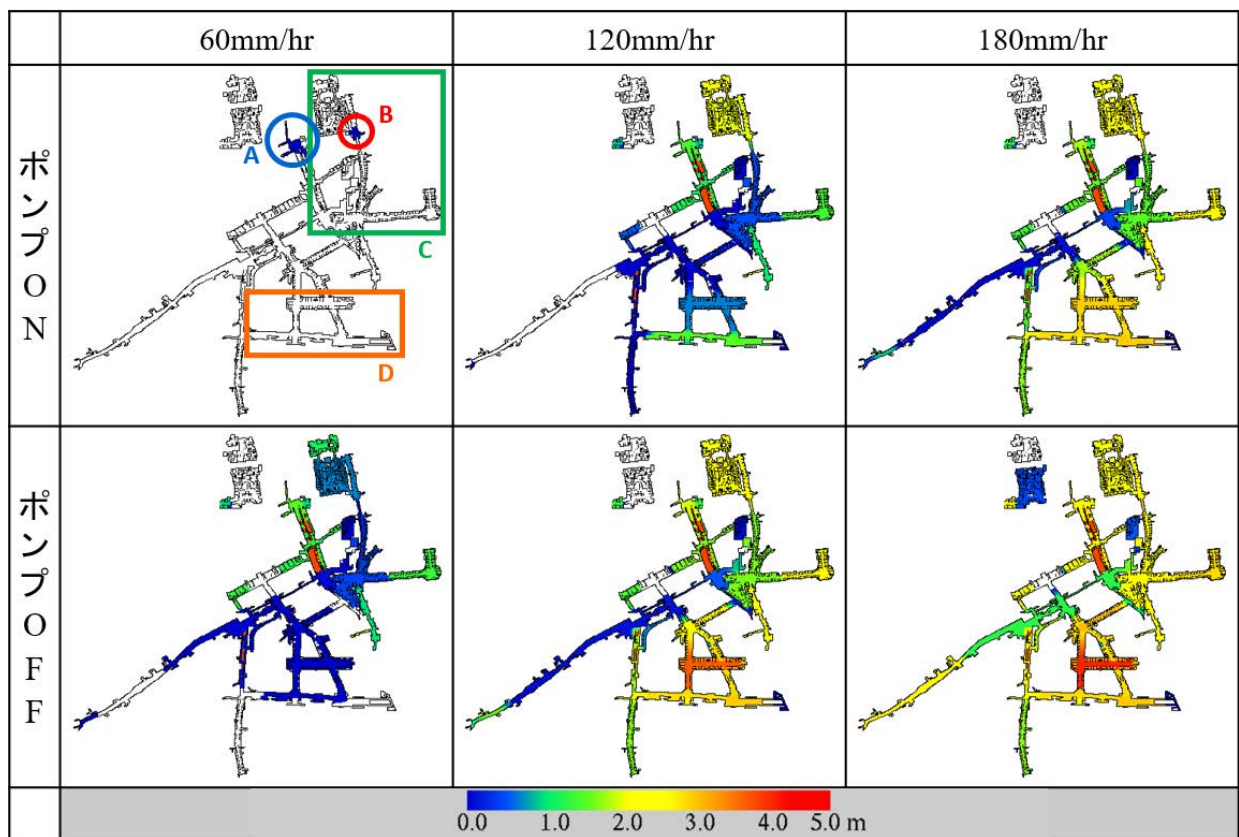


図-8 降雨条件別の地下街における最大浸水範囲・最大浸水深（浸水深の高さで色分け）

(3) 浸水解析結果・分析

地下街内部の浸水解析は、降雨開始時を解析開始のタイミングとし、6時間経過するまで解析を行った。図-8に、地下街の最大浸水深（ほぼ定常状態となる降雨開始6時間後の様子）を示す。ここでは、浸水深が0mを上回る格子を浸水箇所と判定し、浸水深の高さで色分けを行っている。また、図-9に、各降雨条件での地下街全体における浸水面積の割合の時間変化を示す。

地下街の浸水状況は、図-2で示した地下街の位置関係と、図-8で示したエリアA～Dを用いて説明する。まず、地下街への流入は、エリアA（梅田駅北側周辺）とエリアB（Whity うめだ）の出入口が最も早く開始する。エリアAは、地下駅と接続しているため、流入した水が滞留することなく、地下駅構内へ流れる。エリアBとCは、図-7より地盤高が低いため、流入した水が溜まりやすく、浸水深が増加しやすい場所である。また、降雨量が増加した場合（120mm/hr、180mm/hr）では、エリアD（北新地駅周辺・ディアモール）の浸水深が高くなる。これは、降雨量の増加により、地上部の内水氾濫が広範囲において発生し、地下街南部からも水が流入するためである。

流入開始1時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hrでは浸水面積は2.2%、120mm/hrでは60.2%、180mm/hrでは70.5%となった。また、ポンプ停止時には、60mm/hrでは31.2%であり、120mm/hrでは64.0%、180mm/hrでは57.1%となった。

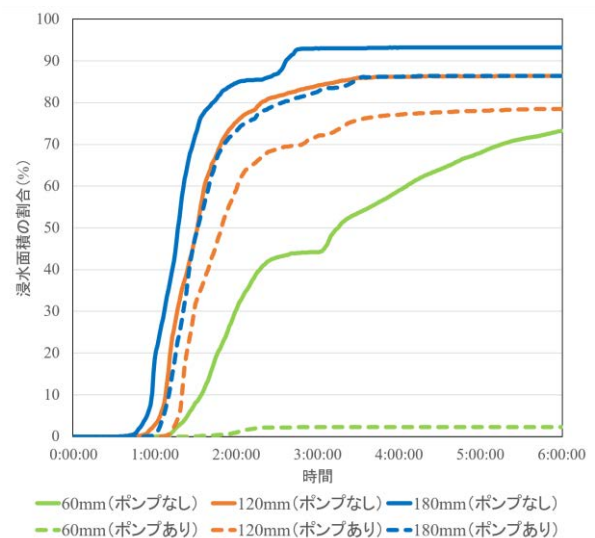


図-9 浸水面積の割合の時間変化

また、降雨開始から6時間後（定常状態）では、ポンプ稼働時には、60mm/hrでは浸水面積は2.2%、120mm/hrでは78.5%、180mm/hrでは86.4%となった。また、ポンプ停止時には、60mm/hrでは73.3%であり、120mm/hrでは86.4%、180mm/hrでは93.2%となった。

以上より、降雨量の増加により、地下街の浸水範囲が広がり、浸水深が増加することが示された。また、排水ポンプの稼働により、浸水範囲が抑制され、地下駅を除く全域で浸水深が減少することが示された。

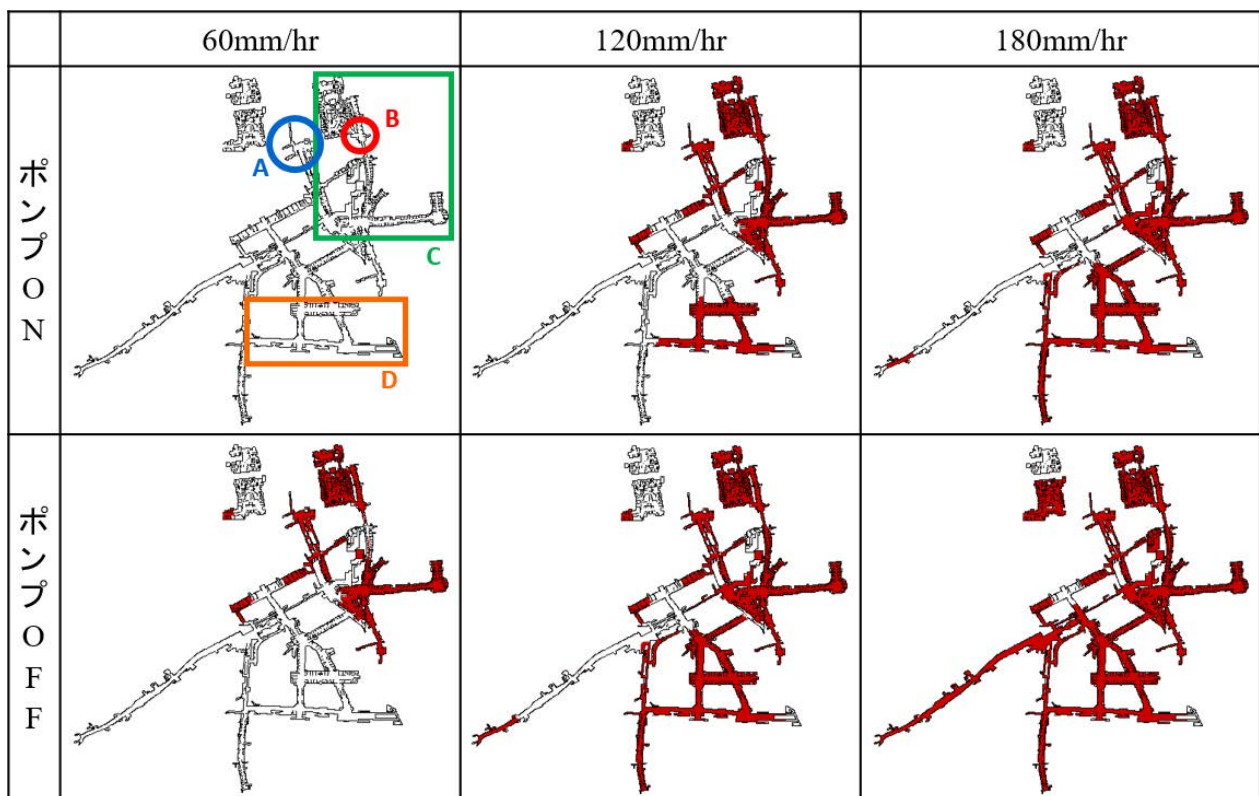


図-10 降雨条件別の地下街における避難困難の状況（降雨開始6時間後）

(4) 浸水時の避難困難度評価

地下街浸水時の避難困難度評価は、浸水解析と同様に降雨開始時を解析開始のタイミングとし、6 時間経過するまで解析を行った。前述の通り、高齢女性の安全避難限界である $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を基準とし、それを上回る格子を危険、下回る格子を安全として評価を行った。ここで、安全避難可能面積を白色、安全避難困難面積が赤色となるように設定した。降雨開始6時間後の地下街における避難困難の状況を、図-10 に示す。また、地下街全体に対する安全避難可能面積割合の時間変化を、図-11 に示す。

浸水状況と同様に、図-2 の位置関係と、図-10 のエリア A～D を用いて説明する。まず、60mm/hr（ポンプ稼働時）を除くすべての条件で、エリア A（梅田駅北側周辺）とエリア B（Whity うめだの一部）は、流入が早いいため、早期に避難が困難となる。エリア C（Whity うめだ）も、エリア B から水が流入するため、避難困難箇所が徐々に増加する。降雨量が増加した場合（120mm/hr、180mm/hr）では、地上部の内水氾濫結果より、地下街の南側周辺からも水が流入するため、エリア D（北新地駅周辺・ディアモール）でも避難困難箇所が増加している。

図-11 より、流入開始1時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hr では安全避難可能面積は100%（地下街全域）であるが、120mm/hr では78.5%、180mm/hr では64.4%となり、降雨量の増加に伴い減少した。また、ポンプ停止時には、60mm/hr では97.3%であり、120mm/hr では76.2%、180mm/hr では57.1%となった。

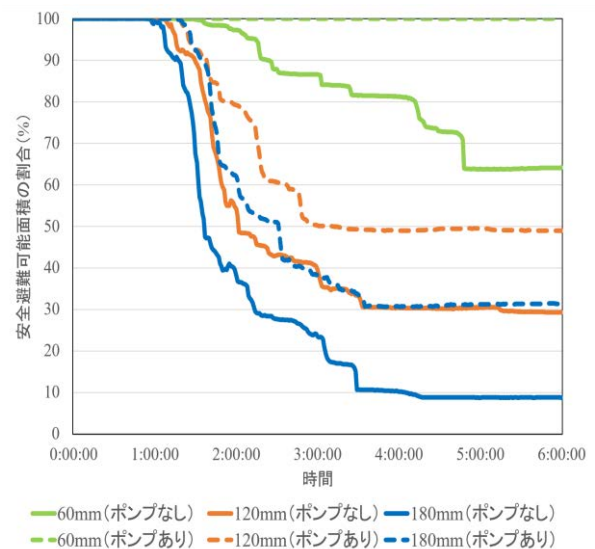


図-11 安全避難可能面積の割合の時間変化

また、降雨開始から6時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hr では安全避難可能面積は100%で、120mm/hr では49.0%、180mm/hr では30.6%となった。また、ポンプ停止時には、60mm/hr では64.2%であり、120mm/hr では29.3%、180mm/hr では8.8%となった。

以上より、降雨量の増加により、地下街の安全避難可能面積が減少し、ポンプの稼働により、面積の減少が抑制されることが示された。また、60mm/hr（ポンプ稼働時）を除くすべての条件で、主に北東部（Whity うめだ）のほぼ全域で避難が困難になることが示された。

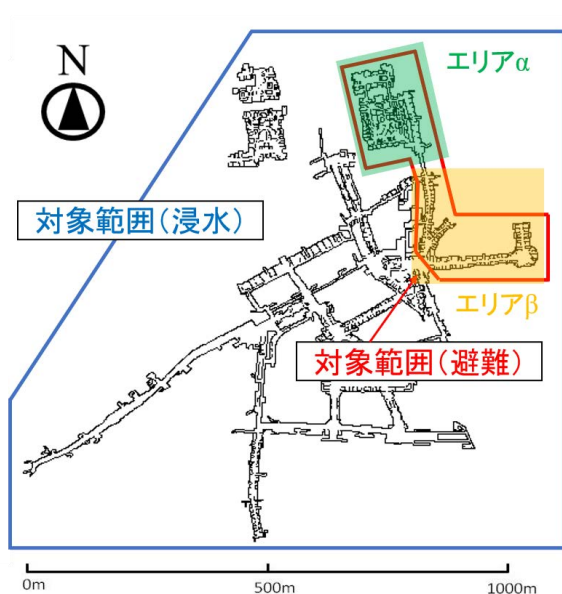


図-12 浸水・避難解析の対象領域

5. 大規模地下街における浸水・避難統合解析

(1) マルチエージェントモデルの概要

マルチエージェントモデルとは、仮想空間に複数（マルチ）の人間や生物（エージェント）を配置し、各々に独自のルールを持たせ、それらの干渉（相互作用）を考慮しつつ、人間の自律的な意思決定をモデル化することができるというものである。地下空間浸水時の避難行動は、戸田ら¹³⁾や石垣ら¹⁴⁾の研究より、それぞれの利用者の性別、年齢、歩行密集度などが大きく関係することが指摘されている。そこで、避難行動者を個々に取り扱うことが可能なマルチエージェントモデルを地下街モデルに組み込みことで、浸水・避難の統合解析を行った。

(2) 対象地域・避難経路の設定

地下街の浸水状況から、いずれの降雨条件でも、主に北東部（Whity うめだ・阪急三番街 B2）で避難が困難になることが示された。そこで、このエリアを避難解析の対象領域とし、重点的に検討を行った。浸水及び避難の解析対象領域について、図-12 に示す。また、避難場所の設定のため、対象領域を2つのエリアに分割した。エリアαは、商業ビルの内部（阪急三番街 B2）も考慮するため、地上への出口と商業ビルの上の階の2種類を避難場所と設定した。エリアβは、図-13 のように地階で隣接するビルが多数存在するため、地上への出口と接続ビル入口の2種類を避難場所と設定した。現地調査で確認した接続ビルの例を、図-14 に示す。なお、接続ビルの防水対策は万全であるものとし、ビル内は浸水しない広い空間であると仮定した。よって、解析に反映させるのは入口部までとし、エージェントは接続ビルの入口部を通過し、接続ビル内に入った瞬間に避難完了とした。

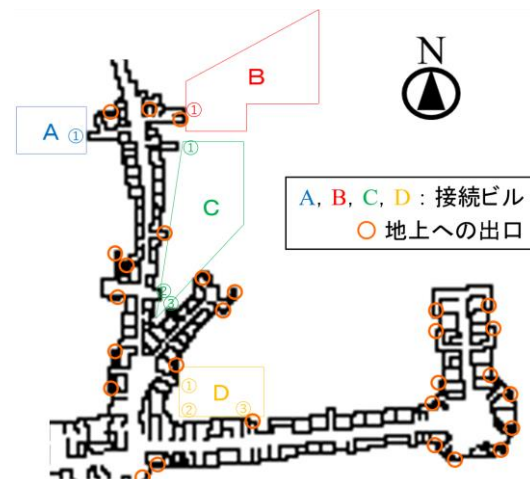


図-13 エリアβにおける地上への出口・接続ビル入口

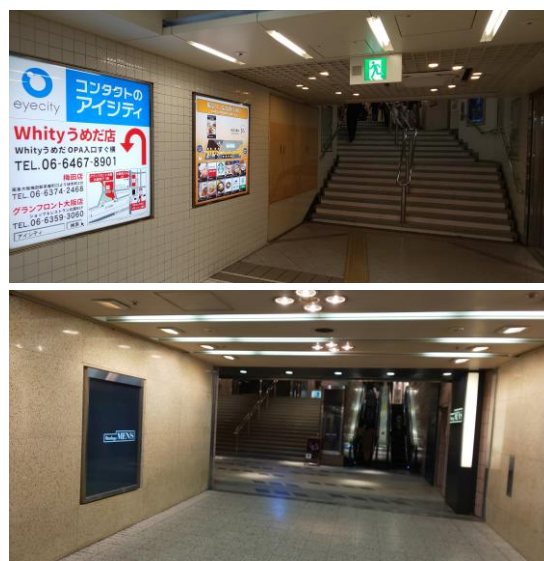


図-14 接続ビル入口の例（上：ビルA，下：ビルC）

(3) エージェントのモデル化

本研究では、エージェントの体型や視野について全員を同じ条件としてモデル化を行った。

a) 人体のモデル化・初期条件の設定

実際の人の形状は、上方から見ると前後に短く左右に長い楕円形をしている。本研究では、図-15 に示すように長径が 0.5m、短径が 0.3m の楕円とした。また、それぞれのエージェントには、性別、年齢層、非浸水時の歩行速度、視野距離、避難開始条件（時間と水深）を設定することで、個別の属性を与えられるようにした。

b) 可視範囲の決定

人間の視野範囲は、歩行時において左右に 60° 程度で、標識等の認識距離は 40m としたため、図-15 に示すような視野範囲を設定した。正面を基準に 1° ごとに視野線を伸ばし、それぞれの視野線と最も近い壁や障害物との交点までを可視距離とする。この距離を、人がそのまま移動した場合の移動予測範囲と仮定して、その範囲内で次の移動目標の決定を行うこととする。

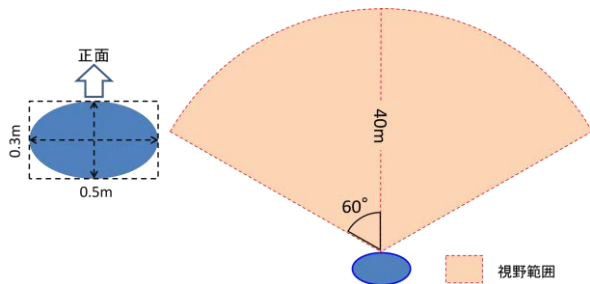


図-15 人体のモデル・初期の視野範囲

(4) 避難行動のモデル化

基本的な考え方は、関根らの研究^{3)・4)}を参考にし、川中らの研究⁵⁾をベースとして用いた。図-16に、避難行動シミュレーションの手順を示す。

a) 避難行動開始の意思決定

避難行動を開始する意思決定の基準として、浸水等の周囲の状況変化による自主的な判断（個別避難）と管理者からの避難アナウンスのような他者からの指示による判断（一斉避難）の2種類が考えられる。自主的な避難開始条件は、大西ら¹⁰⁾の調査結果（図-17）より、自身が存在する格子の水深が2cm以上、10cm以上、20cm以上と場合分けして「避難開始水深」とした。また、避難アナウンスによる避難開始条件は、地下街のどこかで浸水が開始した直後に利用者に情報を与えて避難開始を促すと仮定し、浸水開始時間を「避難開始時間」とした。

b) 移動目標の決定

避難を行う際には、何らかの目標に向かって移動するため、計算格子を階段、通路、店舗、交差点のような属性を持った幾つかの領域に分割し、人はその領域と領域の境界を目指すようにした。また、境界に様々な選択の条件を設けることで細かな移動先の選択が行えるようにした。まず、領域の属性ごとに優先度を設け、優先度の高い領域と接続する境界を移動目標とした。地上への出口に向かう場合は、出口が最も優先度が高く、上に向かう階段、通路、店舗の順となる。同じ優先度の境界が複数存在する場合は、最も近い境界を移動目標と設定した。なお、実物大の階段実験の際に実施したアンケート調査結果¹⁰⁾により、階段の上部の水深が0.1m～0.2m程度で恐怖を感じる事が示されたため、階段の上部の水深が0.1m以上の場合にはその階段を選択しないようにした。

c) 状況変化に基づく歩行速度の決定

避難行動時の歩行速度の変化は、表-1に示した非浸水時の歩行速度に、流速や水深による影響と歩行者の密集度による影響を乗じることで求められる¹⁵⁾。

$$v = S_p \cdot D_e \cdot v_{normal} \quad (7)$$

ここで、 v は歩行速度(m/s)、 S_p は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 D_e は歩行密集度による歩行速度の減少率、 v_{normal} は非浸水時の歩行速度(m/s)である。

水流の影響による減少率は、避難者の存在する計算格

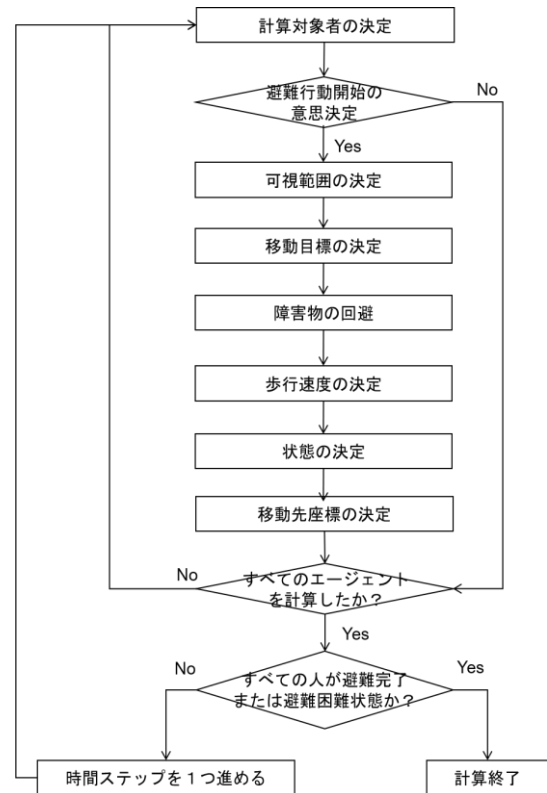


図-16 避難行動シミュレーションの計算フロー



図-17 避難開始水深に関する調査結果（大西ら¹⁰⁾より）

子における流速と水深を基に、次式を用いて評価した。

$$S_p = 0.22 \cdot \exp(-125.3 \cdot M_0) - 0.71 \cdot M_0 + 0.78 \quad (8)$$

ここで、 M_0 は単位幅比力であり、運動量と水圧を同時に考慮して歩行速度を変化させることができる。

歩行密集度の影響による減少率は、川中ら¹⁵⁾により最も近い人の影響を大きく受けることが考えられることから、次式を用いて評価した。

$$D_e = \exp(L^{4.37}/2.55) - 0.48 \quad (9)$$

ここで、 L は避難者の進行方向にいる最も近い他者との距離(m)である。

階段部における歩行速度は、石垣ら¹⁴⁾により通路部の約半分となるため、浸水の影響や避難時の密集度による変化の後に、1/2を乗じた歩行速度とした。

d) 避難困難度指標に基づく状態の決定

避難者は、表-1における安全避難状態、安全避難困難状態、自力避難困難状態のいずれかの状態となり、自身が存在する浸水解析の格子内の単位幅比力によって決定されるとした¹⁵⁾。なお、自力避難困難状態では手すりや他人の補助がないと歩行できない状態であるため、歩行速度を $v=0.0\text{m/s}$ としてその場に滞留するようにした。

表-2 浸水・避難統合シミュレーション条件 (全48 ケース)

Case	時間降雨 (mm/hr)	排水 ポンプ	避難経路(目的地の設定)	避難開始 時間(分)	避難開始 水深(m)	Case	時間降雨 (mm/hr)	排水 ポンプ	避難経路(目的地の設定)	避難開始 時間(分)	避難開始 水深(m)
A-1	60	ON	地上への出口	86	—	D-1	120	OFF	地上への出口	41	—
A-2	60	ON	地上への出口	—	0.02	D-2	120	OFF	地上への出口	—	0.02
A-3	60	ON	地上への出口	—	0.1	D-3	120	OFF	地上への出口	—	0.1
A-4	60	ON	地上への出口	—	0.2	D-4	120	OFF	地上への出口	—	0.2
A-5	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	86	—	D-5	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	41	—
A-6	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	D-6	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
A-7	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	D-7	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
A-8	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	D-8	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2
B-1	60	OFF	地上への出口	61	—	E-1	180	ON	地上への出口	52	—
B-2	60	OFF	地上への出口	—	0.02	E-2	180	ON	地上への出口	—	0.02
B-3	60	OFF	地上への出口	—	0.1	E-3	180	ON	地上への出口	—	0.1
B-4	60	OFF	地上への出口	—	0.2	E-4	180	ON	地上への出口	—	0.2
B-5	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	61	—	E-5	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	52	—
B-6	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	E-6	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
B-7	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	E-7	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
B-8	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	E-8	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2
C-1	120	ON	地上への出口	64	—	F-1	180	OFF	地上への出口	33	—
C-2	120	ON	地上への出口	—	0.02	F-2	180	OFF	地上への出口	—	0.02
C-3	120	ON	地上への出口	—	0.1	F-3	180	OFF	地上への出口	—	0.1
C-4	120	ON	地上への出口	—	0.2	F-4	180	OFF	地上への出口	—	0.2
C-5	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	64	—	F-5	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	33	—
C-6	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	F-6	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
C-7	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	F-7	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
C-8	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	F-8	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2

(5) 浸水・避難統合解析条件

表-2のように、降雨量、排水ポンプ、避難場所、避難開始のタイミングといった条件の変更により、解析のケース分けを行った。

a) エージェントの人数・配置

本研究では、エージェントはすべて最も早く自力での避難が困難になる高齢女性とした。対象領域に配置するエージェントの人数を求めるため、現地調査から実際の混雑率（密度）を計算した。図-18に、現地調査で撮影した平日の混雑時の様子を示す。橙色で囲んだ箇所の面積は約 320m²であり、その中にいる人数が 105 人であることから、混雑率は約 0.33 人/m²と算定できる。対象領域にこの混雑率を適用するため、本解析ではエージェントの配置人数を 4450 人と設定した。初期の配置条件については、乱数を用いることで、X 座標、Y 座標、向きを与え、各々が接触しないように密集度を考慮して偏りが出ないように一様にエージェントを配置した。

b) 降雨・ポンプの条件

降雨量の違いが避難成功率に与える影響について検討するため、地上部の氾濫解析で用いた 3 種類のモデル降雨（60mm/hr, 120mm/hr, 180mm/hr）でケース分けを行った。また、排水ポンプについては、稼働時と停止時という 2 通りの条件でケース分けを行った。

c) 避難経路（目的地）の条件

本研究では、地上への出口と接続ビル入口の 2 種類を避難の目的地とし、地上への出口のみへ避難する場合と地上への出口と接続ビル入口を併用する場合という 2 通りの条件でケース分けを行った。ただし、接続ビル入口



図-18 現地調査で撮影した平日の混雑時の様子
(橙色で囲んだ箇所に 105 人、混雑率 0.33 人/m²)

はエリアβのみに設定し、エリアαは商業ビル内（阪急三番街 B2）の上の階も地上への出口と同様に避難場所として設定した。

d) 避難開始のタイミング

避難行動を開始する意思検定の基準として、エージェント自身の格子水深が上昇することによって自主的に避難を開始する場合と、管理者からの避難アナウンスを想定して、地下街のどこかが浸水した直後に一斉に避難を開始する場合の 2 通りでケース分けを行った。自主的な避難については、図-17 で示した調査結果に基づき、自身の格子水深が 0.02m, 0.1m, 0.2m の 3 種類でケース分けを行った。避難アナウンスを想定した一斉避難の場合は、降雨開始時間を 0 分とし、地下街の浸水開始時間を避難開始時間として設定した。

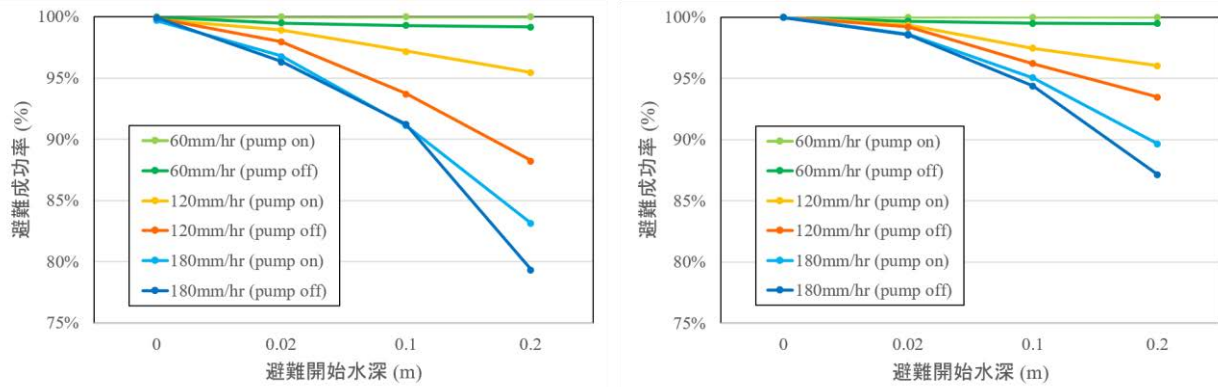


図-19 避難成功率のまとめ（左：地上への出口のみの場合、右：地上への出口と接続ビル入口を併用する場合）

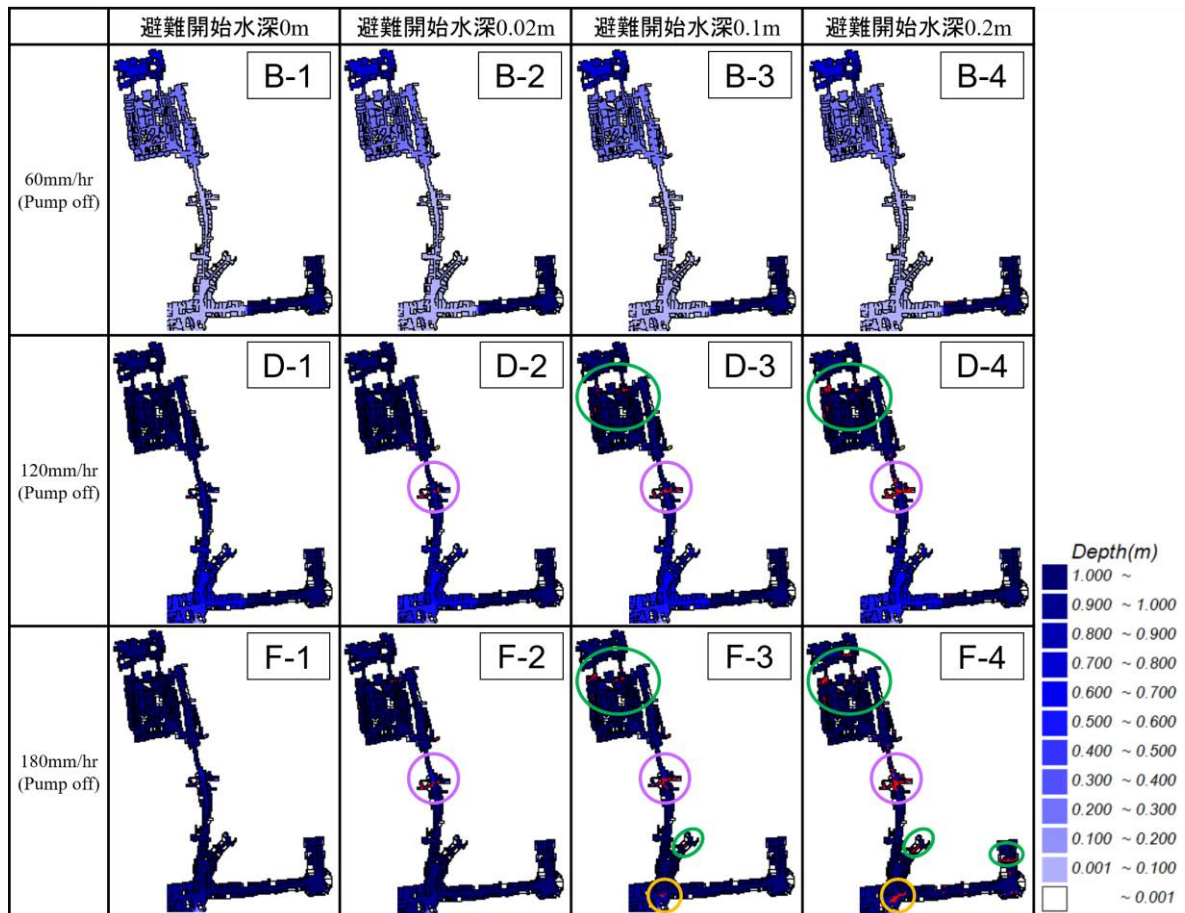


図-20 避難開始水深に着目した避難経路の安全性評価（自力避難困難状態のエージェントを赤で示し、密集箇所を丸で囲む）

(6) 解析結果・分析

解析結果（避難成功率）を、図-19 に示す。ここでの避難開始水深 0m は、避難アナウンスで地下街の浸水開始時間に一齐に避難を開始した場合である。また、避難者エージェント全員が避難完了状態または自力避難困難状態となった時点での状況を、図-20 及び図-21 に示す。これらの図では、浸水深を青色で示し、グラデーションで深さを表現している。ただし、時間降雨 60mm（ポンプ稼働時）では、図-8 より格子水深が 0.02m 以上となる箇所が少なく、図-10 より避難困難状態になる箇所が発生しないことが示されている。よって、A シリーズ（A-

1～A-8）では、避難を開始しないエージェントが多数存在し、かつ対象領域全体が安全な状態のままであるため、解析を行わずに避難成功率をすべて 100%と仮定し、他の B～F ケースの結果との比較に用いることとした。

a) 避難開始の遅れが避難成功率に与える影響

図-19 より、避難開始水深が同じ場合、降雨量の増加により、避難成功率は低下している。また、降雨量が同じ場合、避難開始水深の増加により、避難成功率は低下している。また、図-20 より、B、D、F シリーズの結果で比較を行ったところ、丸で囲まれた箇所避難できないエージェントが滞留している。これらの箇所は、出口

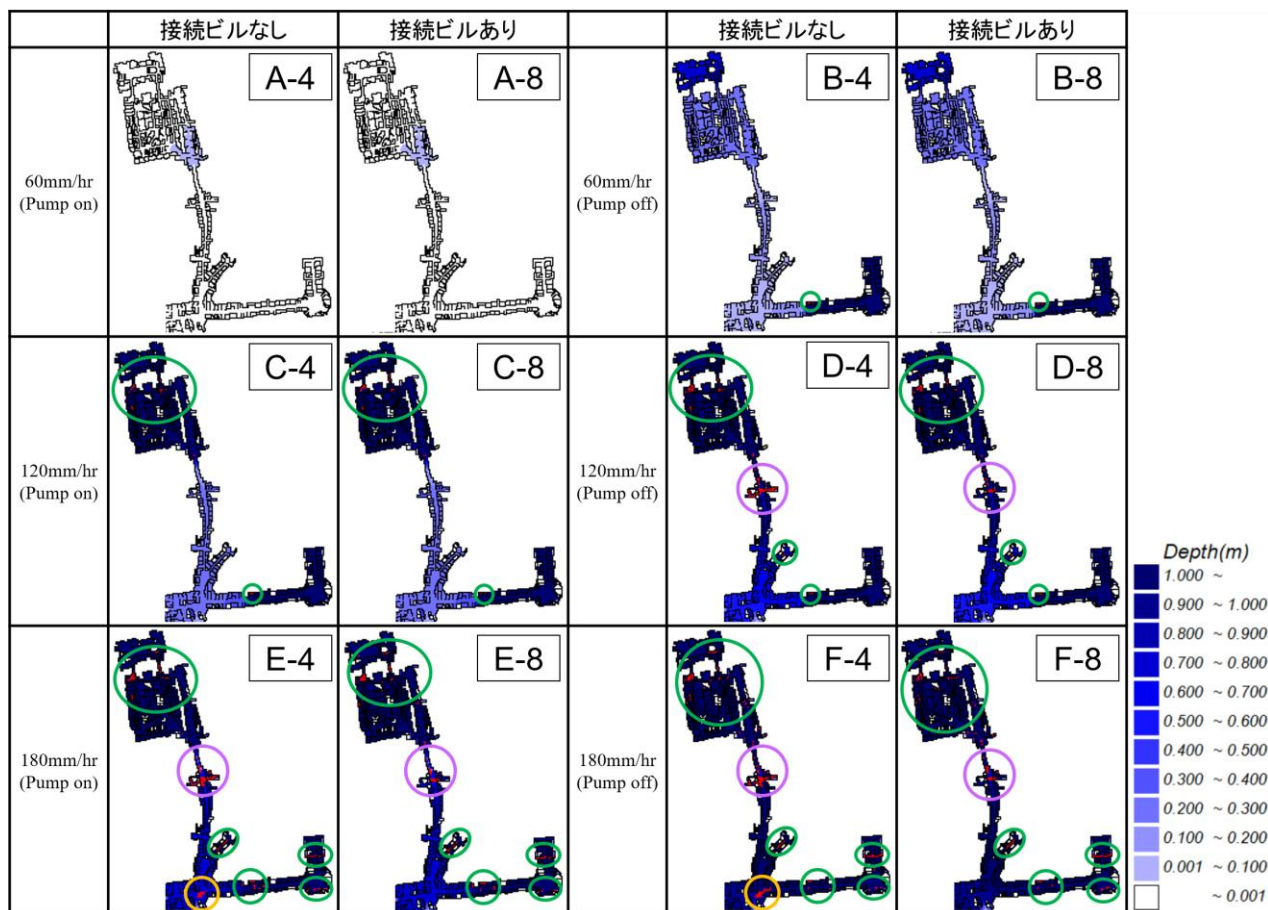


図-21 接続ビルの有無による避難経路の安全性評価（自力避難困難状態のエージェントを赤で示し、密集箇所を丸で囲む）

付近であり、多くのエージェントが密集していることが避難成功率を低下させていると考えられる。また、地下街への氾濫水の流入が一定量を超えた場合、浸水を発見した時にはすでに大量の水が広範囲に流れ込んでいるため、避難を開始しても間に合わないということが考えられる。以上のことから、避難の早期開始が避難成功率を向上させる要因であると考えられる。

b) 接続ビルとの併用が避難成功率に与える影響

図-19 より、接続ビル入口を避難経路として併用することにより、地上への出口のみへ避難する場合と比較して、いずれの解析ケースでも避難成功率は向上することが示された。このことから、水が流入する地上への出口だけでなく、接続しているビルの内部から上の階を目指すような避難も行うことで、より安全な避難が可能と考えられる。また、図-21 より、D～Fシリーズの接続ビルなしの場合では、紫色と黄色の丸で囲んだ箇所エージェントが滞留していて、近くの出口から水が流入しているため、避難が一層困難となっている。一方で、接続ビル入口との併用により、これらの箇所にいる赤色エージェントの数が減少していることから、出口に増加による滞留の解消によって避難成功率が向上していると考えられる。以上のことから、複数の避難経路の確保が避難成功率を向上させる要因であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、大阪市の海老江処理区内にある大規模地下街を対象地域として、短時間集中豪雨に伴う地上部の内水氾濫解析を行い、地下街への流入量をもとに地下街内部の浸水解析及び避難解析を行った。

地上部の氾濫解析結果より、降雨量の増加により、浸水面積・浸水深は増加した。また、排水ポンプの停止により、地下街の浸水リスクが高まることが示された。

地下街の浸水解析結果より、降雨量の増加により、地下街の浸水面積は大きく、浸水深も高くなった。単位幅比力を用いた地下街の避難困難度評価結果より、降雨量の増加により、避難可能面積の減少が著しく、早期に避難を行う必要があることがわかった。排水ポンプが停止した場合には、地下街への流入量が増加するため、安全に避難できる時間がさらに短くなることが示された。

地下街の避難解析結果より、降雨量や避難開始水深の増加に従い、避難成功率は減少することが示された。とりわけ、避難開始水深が 0.2m を超えると、避難成功率は急激に減少した。また、接続ビルを避難場所として考慮することで、地上への出口のみを避難場所とした場合と比較して、避難者をより多くの避難先に分散させることができるため、避難成功率が向上すると考えられる。

なお、本研究では、地下街の出入口に浸水対策を行わない場合での検討を行った。しかし、実際には地下街やビルの管理者による止水板の設置等の対策が考えられる。今後は、降雨条件に応じた最適な止水板の設置箇所や順番を考慮した検討を行う予定である。また、降雨量が増加した場合の地下街の浸水リスクが示されたが、それらの氾濫水は地下駅へと流れていくため、地下駅のホーム等から避難する場合の検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 森兼政行, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策, 水工学論文集, 第 55 巻, I_967-I_972, 2011.
- 2) 尾崎平, 浅野統弘, 石垣泰輔, 戸田圭一: 短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1417-I_1422, 2014.
- 3) 関根正人: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp907-912, 2010.
- 4) 関根正人, 大野龍馬: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.961-966, 2011.
- 5) 川中龍児, 吉川雅志, 石垣泰輔: 大規模地下空間における浸水時の避難成功率に関する検討, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.70, No.1, I_13-I_19, 2014.
- 6) 瀧澤重志, 高木尚哉, 谷口与史也: 浸水被害を想定した梅田地下街の垂直避難シミュレーション, 大阪市立大学都市防災研究プロジェクト, 都市防災研究論文集, 第 2 巻, pp.35-38, 2015.
- 7) 浅野統弘, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 密集市街地における内水氾濫時の歩行避難および車両移動の危険度評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, I_1561-I_1566, 2013.
- 8) 黄碧蕊, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 極端気象下での地下街浸水時の安全避難について, 地下空間シンポジウム, 第 23 巻, pp.103-108, 2017.
- 9) 森兼政行, 井上知美, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 地下駅を考慮した大規模地下空間での浸水特性と浸水対応策の効果に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, I_1003-I_1008, 2012.
- 10) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時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.
- 11) 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.
- 12) 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, 2009.
- 13) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 中井勉, 竹村典久: 複雑な地下空間の浸水実験, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.583-588, 2004.
- 14) 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.
- 15) 川中龍児, 石垣泰輔: 地下空間浸水時のアナウンスが安全避難成功率に及ぼす影響について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.163-168, 2012.

STUDY ON SAFE EVACUATION IN FLOODED LARGE UNDERGROUND MALL CONSIDERING SHORT-TIME TORRENTIAL RAIN

Yutaro NAKASAKA and Taisuke ISHIGAKI

In recent years, the frequency of localized and short-time heavy rainfall has increased because of climate change. In urban areas, underground spaces such as underground shopping malls have been used. For this reason, when pluvial flood occurs in urban areas with underground space, there is an inundation risk not only above the ground but also underground. In this study, pluvial flood analysis was performed by using the short-term torrential rainfall data, and the inundation risk of an underground mall was evaluated. In addition, the improvement of the evacuation success rate was examined by simulating the evacuation behavior when underground inundation occurred. The results of these analyses have shown that the inflow of flood water to underground increases with rainfall increasing and that the safe evacuation rate depends on the timing of evacuation, and evacuation into a connecting building is very important to improve the rate of safe evacuation.