

地下空間スケールに着目した地下浸水の 危険性について RISK ANALYSIS OF UNDERGROUND INUNDATION FROM UNDERGROUND SCALE ASPECT

戸田圭一¹・山本大介²・米山望³・大塚健太⁴
Keiichi TODA・Daisuke YAMAMOTO・Nozomu YONEYAMA・Kenta OOTSUKA

We study the risk of underground inundation in urban flooding from the underground scale aspect. The studied area is Kobe City with Sannomiya underground mall. The difficulty of evacuation in underground inundation by heavy rainfall for a short time is compared among the underground mall, multistory underground spaces of office buildings and small basement. The rainfall condition that was observed in Tokyo in September 2005 is imposed. As a result, the small basement becomes dangerous immediately after underground inundation starts. In the underground of office buildings, evacuation activity from the lower floor becomes difficult. Especially, the underground space with parking lot is much dangerous. Meanwhile, in the underground shopping mall, the dangerous place is very limited.

Key Words: underground scale, underground inundation, inundation analysis, evacuation

1. はじめに

ゲリラ豪雨とよばれるような集中豪雨により，都市水害が頻発している．都市水害の中でとくにやっかいな事象は氾濫水が地下空間に流入する地下浸水である．地下空間は都市の最深部に位置し，地上の氾濫水が集中してくる場所であり，また地上に比べてその面積が小さいため，平面部では浸水深が急激に増大するとともに，避難経路の階段から水が流入し，地下からの避難は大変厳しいものとなる¹⁾．また地下室などではドアを押し開けて逃げることも想定されるが，ドア前面が浸水したときは，水圧も避難の妨げとなる¹⁾．よって地下浸水では人命が失われる可能性があり，その予測と対策は大変重要である．

地下空間の浸水予測にあたっては，著者らのグループにより，降雨から，都市域の地上での氾濫，さらには地下空間での浸水の拡がりに至る一連の過程を解析できる統合型モデルが構築されており，外水氾濫および内水氾濫時の地下街の浸水予測が行われている²⁾．また地下室のような小規模地下空間の浸水時の危険度を検討した解析事例もある³⁾．一方で，都市に多く存在する中規模地下空間（小・中規模オフィスビルの地下階）の浸水時の危険性に関してはほとんど検討されていない．さらに空間スケールが地下浸水時の危険性にどの程度影響を及ぼすかといった検討も，著者らが知る限り系統的には行われていない．

本研究では，まず，神戸市内の三宮地下街を含む都市流域に統合型モデルを適用し，降雨から地上の氾濫，地下の浸水までの状況を解析する．そして，解析をとおして，地上の流入口から地下街へ流入する氾濫水の単位幅流量のなかで最も多いものを見出す．次にその流入条件を適用し，地下室，小・中規模オフィスビルでの浸水解析を行い，空間スケールの違いによる浸水時の危険度の比較検討を実施する．

キーワード：地下空間スケール，地下浸水，氾濫解析，避難

1 正会員 京都大学防災研究所 教授

2 正会員 西日本高速道路（株）技師

3 正会員 京都大学防災研究所 准教授

4 学生員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻

2. 解析モデル

(1) 統合型モデル

地下街浸水解析においては、平面二次元モデルを基にした、非構造格子を用いた地上での氾濫モデルおよびポンドモデルを用いた地下空間の氾濫モデルを統合したモデルを用いている。地上の氾濫水の地下空間への流入については、地下の入口部で段落ち流れが生じることを仮定する。モデルの概念図を図-1に示す。格子に降る雨は、連続式の中で横流入として取り扱う。また、地上の氾濫水の下水による排除効果は、ここでは簡単に氾濫水(雨水)の横流出として取り扱う。

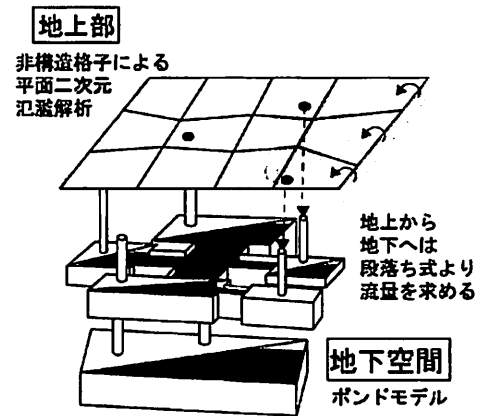


図-1 統合型モデル概念図

(地上の氾濫解析モデルの基礎式)

<連続式>

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

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここに、 x, y : 座標、 t : 時間、 M, N : x, y 方向の流量フラックス、 r : 有効降雨、 r_d : 下水による雨水処理量、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数、 u, v : x, y 方向の流速である。

一方、地下空間は、いくつかのポンド(貯留槽)が3次元的に連結している場ととらえ、それらポンド間の水のやりとりを考える。

(地下空間浸水モデルの基礎式)

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_m \quad (4)$$

ここに、 A : ポンドの有効底面積、 h : 水深、 t : 時間、 Q_i : 貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量、 m : 流量の出入りが行われる接面数、 Q_m : 地上など外部からの流入流量である。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (5)$$

ここに、 ΔH : 水位差、 Q : ポンド間の流量、 L : 隣接する貯留槽の図心間の距離、 A_b : ポンド間の接面の断面積、 α : マニングの粗度係数に関連する損失係数である。

地上部から地下空間への接続箇所では、地下空間への流入流量を以下の段落ち式で求める。

$$Q = B_e \mu h \sqrt{gh} \quad (6)$$

ただし、 B_e : 地下流入口の幅、 h : 流入地点での有効水深、 μ : 段落ち流れの流量係数(=0.544)である。

(2) 神戸三宮地区への適用

上記のモデルを、神戸市の中心市街地の三宮地区および三宮地下街に適用する。図-2 に三宮地下街が存

在する三宮地区の位置を示す。三宮地区は神戸市の中心地であり、JR 線をはじめとして私鉄、地下鉄の各線の駅が集中しており、これらを結ぶようにして三宮地下街が発達している。図-3 に三宮地下街を浸水解析するのに用いたポンドとその標高を示す。地下街の面積は約 0.22km² である。神戸市は地形上、南北の勾配が大きい、三宮地下街も地上の地形の影響を受けて大きな勾配を有しており、また地下鉄ホームへの入口も地下街の勾配の影響が及ぶところに位置している。

外力として 2005 年（平成 17 年）に東京都神田川流域での洪水氾濫をもたらした短時間降雨（図-4）を用いる。この降雨を対象領域に一律に与えるとともに、下水道による雨水処理量は、簡単に、神戸市の計画処理量 49.1mm/hr（10 年確率）の 70%に相当する量を仮定する。

三宮地下街には地下へ通じる階段が 36 箇所あり、これらが地上から地下街への氾濫水の流入口となる。なお今回は、各地下街の入口は、周囲の地盤高よりも 15cm 高いと仮定している。また、短時間豪雨のため止水板を設置する時間的余裕がないとしている。地下街に流入した水は、4 箇所の地下鉄ホームへの入口を通して最終的に地下鉄軌道上に排出される。排出量は(6)式で得られる。

降雨開始（計算開始）から 3 時間後の地上の浸水状況を図-5 に、地下街の氾濫状況を図-6 に示す。地下街では浸水域が拡がり、北端の通路では水深が 20cm を超えている。

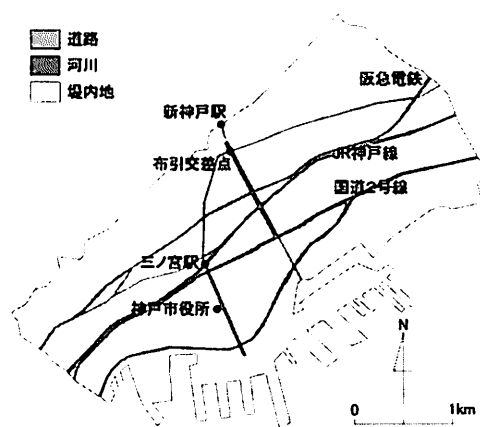


図-2 三宮地区周辺図

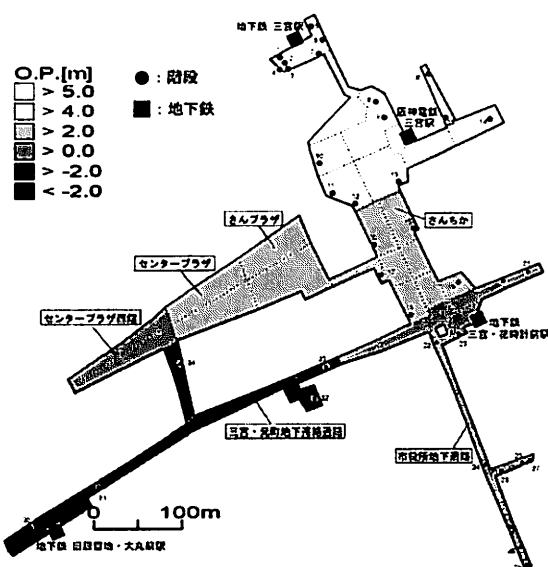


図-3 三宮地下街のポンド分割と標高

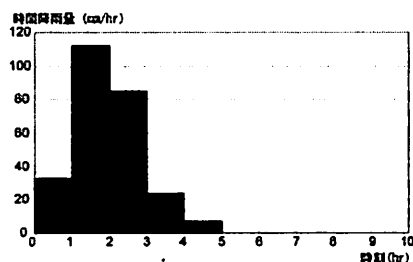


図-4 対象とした降雨

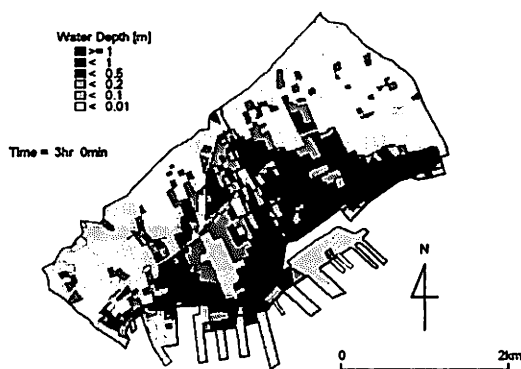


図-5 地上の氾濫状況

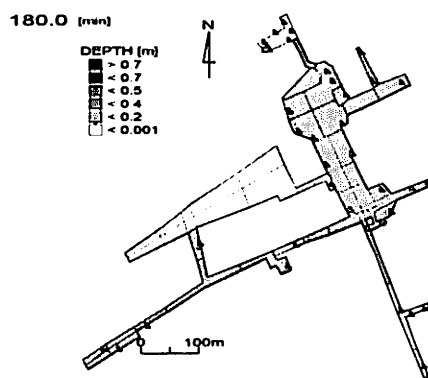


図-6 地下街の浸水状況

3. 空間スケールの違いによる地下空間の浸水時の危険度比較

(1) 地下室とオフィスビルの地下空間

地下室と2種類のオフィスビル（Sビル、Nビル）を対象とする。地下室は一辺が 15m 四方の大きさの、

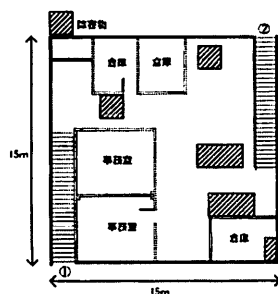


図-7 地下室

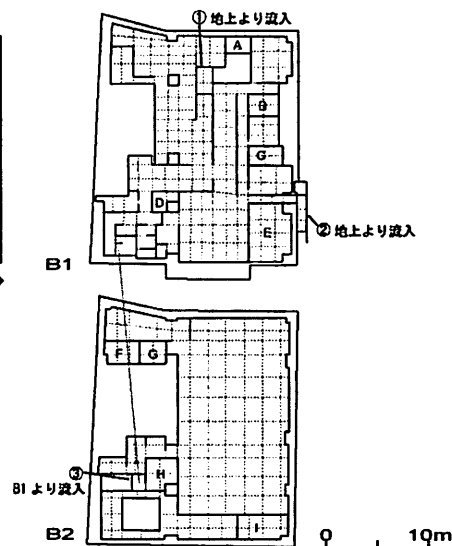


図-8 小規模オフィスビル (Sビル)

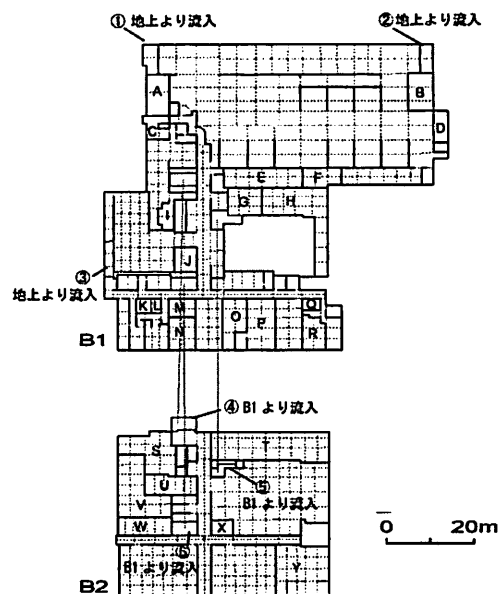


図-9 中規模オフィスビル (Nビル)

都市域で見られる標準的な小規模ビルの地下室を想定している。床面積は 225m^2 である。図-7 に平面図を示す。通路、倉庫、事務室があり、通路には障害物（ロッカーや柱を想定）が存在している。地上から地下室に通じる階段が2箇所（合計幅3m）あり、これらが氾濫水の流入口となる。Sビル⁴⁾ は小規模オフィスビルで、地下2階建、延床面積 941m^2 である。図-8 に平面図を示す。地下1階は中央部が通路となっており、その両側に飲食店が並んでいる。地下2階は駐車場、ポンプ室、機械室などで構成されている。駐車場へ車はリフトで移動し、水の流入は考えない。地上から地下1階へ通じる階段は①②の2箇所（合計幅2.48m）あり、これらが地上から地下1階への氾濫水の流入口となる。地下1階から地下2階へ通じる階段は③の1箇所である。Nビル⁵⁾ は中規模オフィスビルで、地下2階建、延床面積 5840m^2 である。図-9 に平面図を示す。地下1階の上側半分の領域は駐車場である。下側半分の領域は食堂、会議室、休養室、印刷室、機械室、倉庫など様々な用途に利用されている。地下2階は書庫、電気室、機械室などで構成されている。地上から地下1階への接続箇所は、地下駐車場への車の出入口であるスロープが①②の2箇所（合計幅9.72m）、階段が③の1箇所（幅0.96m）である。地下1階から地下2階へ通じる階段は④⑤⑥の3箇所である。

(2) 計算条件

前章で示した三宮の地下浸水解析で、地下街への流入流量が最も多かったのは地下街南西端の格子に位置する入口であった。このときの単位幅あたりの流入流量を境界条件として用いる。すなわち、地下街南西端を含む地上格子内に、ここで扱う地下室やオフィスビルが位置していると仮定する。流入流量のハイドログラフを図-10 に示す。浸水解析はポンドモデルを用いて行い、降雨開始時刻を計算開始時刻とする。

(3) 浸水時の地下空間からの避難限界指標

浸水時の避難の困難さをもとに、短時間豪雨による、地下室、小・中規模オフィスビル、地下街の浸水発生時の危険度を比較する。

浸水時には地下空間内で水深が上昇し、平面部では歩行が困難になる。またドアを閉じた部屋にいと、ドア前面の水圧によって閉じ込められてしまう。また避難経路である階段からは氾濫水が流下してくるため、階段からの避難は困難を強いられる。本研究ではこれまでの研究成果^{1), 6)} をもとに、平面部、ドア部、階段部で以下のような避難限界指標を設定している。

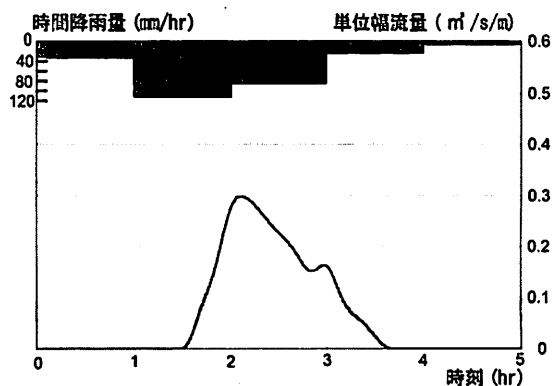


図-10 単位幅流入流量ハイドログラフ

<平面部の歩行による避難限界>

- ・水深 0.20m 以上で子供・高齢者が歩行不可能
- ・水深 0.50m 以上で成人女性が歩行不可能
- ・水深 0.70m 以上で成人男性が歩行不可能

<部屋からドアを開けての避難限界>

- ・水深 0.30m 以上で子供・高齢者が避難不可能
- ・水深 0.35m 以上で成人女性が避難不可能
- ・水深 0.40m 以上で成人男性が避難不可能

<階段部の歩行による避難限界>

- ・地上水深 0.20m 以上で子供・高齢者が歩行不可能
- ・地上水深 0.25m 以上で成人女性が歩行不可能
- ・地上水深 0.30m 以上で成人男性が歩行不可能

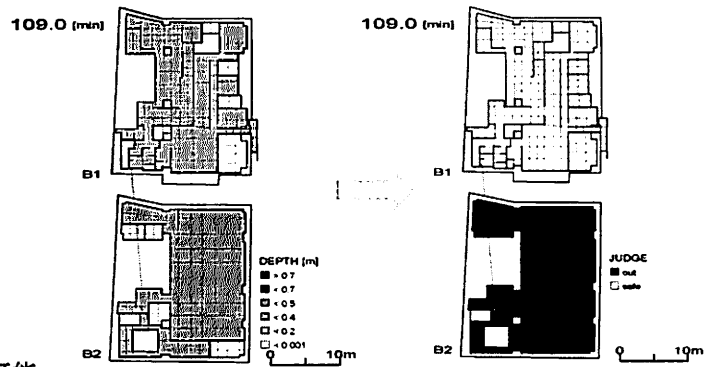


図-11 浸水時の危険度の表現法

(4) 浸水時の危険度の比較

浸水解析結果、避難限界指標をもとに、ある時刻において、地下空間の、ある地点（初期位置）から地上（避難の最終目的地）までの経路を考え、経路の途中に避難不可能な箇所が存在する場合、その初期位置を黒く表示する。図-11 は、S ビルでの成人女性の浸水時における危険度評価の例である。左の図が浸水深の分布図である。この状況では成人女性の場合、地下 1 階、2 階平面部では水深が 0.5m 以下でそれぞれ歩行が可能であるが、地下 2 階から地下 1 階への階段の越流水深が 0.25m を越えているため、この階段を通過できない。よって地下 2 階から地上への避難は不可能であり、地下 2 階全域が黒く表示されている。

図-12、図-13、図-14 は、子供・高齢者、成人女性、成人男性それぞれについて、浸水時に地下空間のどの場所から危険になっていくかを、地下室、オフィスビル、三宮地下街とを比較しながら示したものである。なお時刻の後の括弧内は地下への流入開始後の時間である。全体をとおして、成人に比べて、子供・高齢者の危険度が高いことがわかる。とくに平面部の歩行避難の限界となる水深が小さいために、地下室やオフィスの地下 1 階での危険度が高い。

地下空間スケールで比較すると、地下室は面積が小さいことが支配的となり、水深が急激に上昇するため、非常に短時間で、ドアが押し開けられない、または通路を歩けない状況となる。オフィスビルも短時間で危険となるが、とくに階段部での避難限界の影響で地下 2 階の危険度が高い。N ビルの床面積は S ビルの約 6 倍であるが、地下駐車場スロープからの流入量が多いため、危険度は同程度となっている。一方、三宮地下街は空間スケールが大きいため、氾濫水が流入しても、すぐに人が身の危険を感じるまでには至らない。

4. おわりに

神戸市の三宮地下街を含む都市域を対象とし、2005 年に東京都神田川流域に降った短時間豪雨を与えて、様々な地下空間の浸水時の危険度評価を行った。要点を以下に示す。

(1) 地下室においては、浸水が始まってから急激に水深が上昇し、非常に短い時間で避難が困難となる。(2) 多層の小・中規模オフィスの地下空間では、地下 2 階からの避難が不可能となり、その中でも地下駐車場を有する地下空間の危険度が高い。(3) 地下街では、それよりスケールの小さい地下空間に比べれば、流入直後の危険性はごく限定的である。

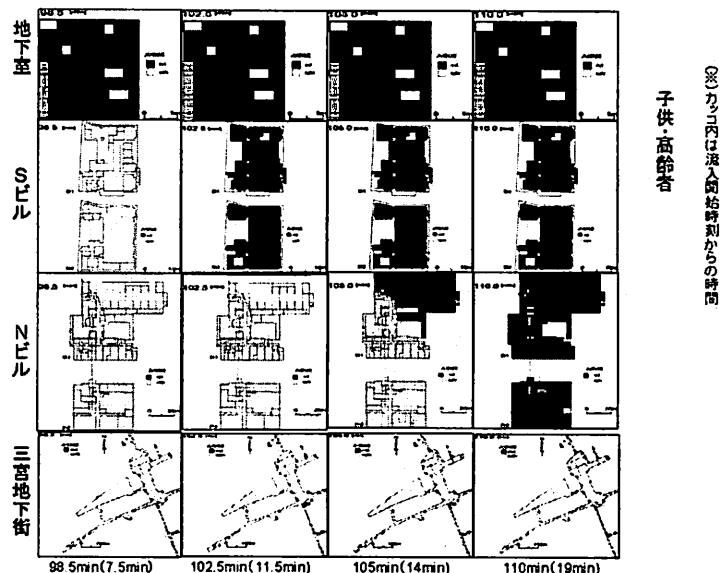


図-12 浸水時の危険度比較（子供・高齢者）

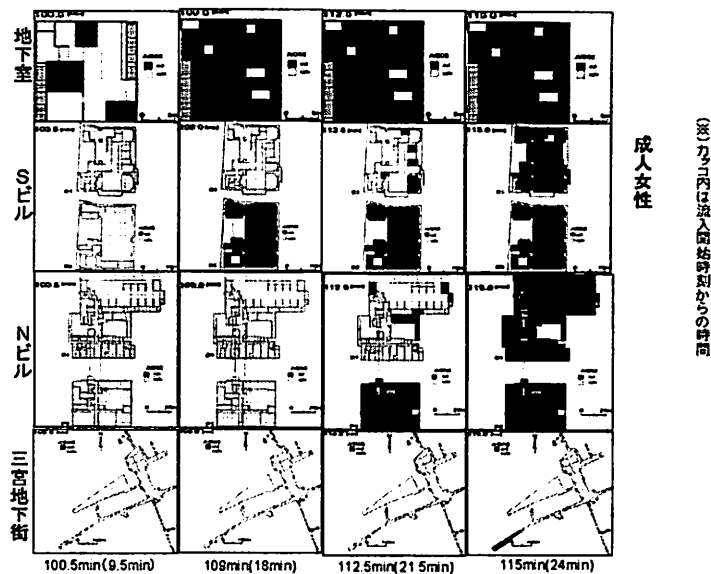


図-13 浸水時の危険度比較（成人女性）

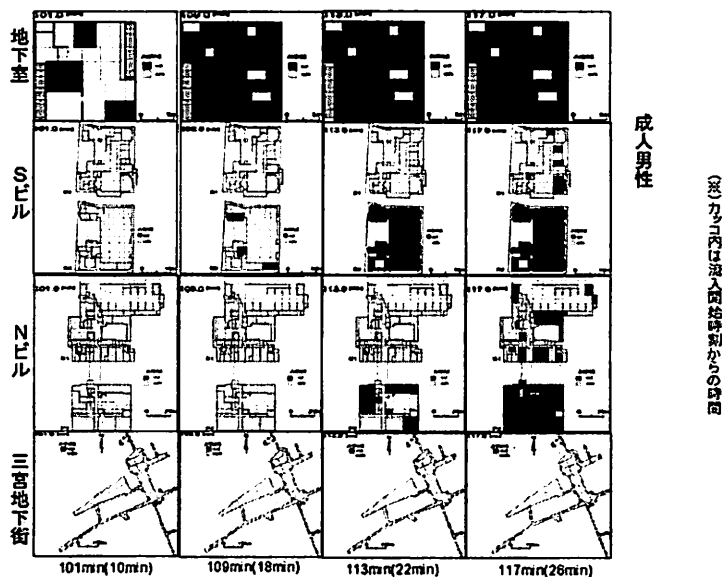


図-14 浸水時の危険度比較（成人男性）

謝辞：本研究を進めるにあたり，協力いただいた京都大学大学院生の桑野靖子氏に謝意を表する．なお本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究（B）20310096代表戸田圭一）を受けて実施したものである．

参考文献

- 1) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：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) 戸田圭一・川池健司・深草新・山本大介：地上・地下を統合した都市水害モデルによる神戸市の地下街浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第13巻，pp.225-230, 2008.
- 3) 戸田圭一・山本大介・米山望・間島真嗣：小規模地下空間の浸水時の危険性について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第12巻，pp.139-146, 2007.
- 4) 建築思潮研究所編：建築設計資料21 新しいオフィスビル，建築資料研究社，2000.
- 5) 建築思潮研究所編：建築設計資料35 庁舎，建築資料研究社，1992.
- 6) 亀井勇：台風に対して，天災人災住まいの文化誌，ミサワホーム総合研究所，1984.