

都市水害時における小規模地下空間の浸水過程 に関する数値解析的検討

NUMERICAL STUDY ON INUNDATION PROCESS OF SMALL UNDERGROUND SPACE IN URBAN FLOOD

米山 望¹・間島真嗣²・戸田圭一³・山本大介⁴

Nozomu YONEYAMA, Shinji AIHATA, Keiichi TODA and Daisuke YAMAMOTO

¹正会員 博 (工) 京都大学助教授 防災研究所 (611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²工修 国土交通省 北陸地方整備局 (951-8153 新潟市文京町 14-13)

³正会員 Ph.D 京都大学教授 防災研究所 (611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A 3-D numerical simulation model is developed for inundation analysis in a small underground space. The incompressible fluid analysis method and VOF method are used in the model.

The model is verified through comparing some computation results with the experimental data of a full-scale stairs model and of a 1/15-scale basement model of a standard small-scale building comprising two stairs, hallway and five rooms. It is found that the model can well simulate the inundation flow at the bottom of stairs and the inundation process in the basement. It is therefore concluded that the model is applicable to the evacuation analysis in a small underground space.

Key Words : *Underground space, flood inundation, urban flood, numerical analysis, VOF, evacuation*

1. はじめに

我が国では、都市が発展するにつれて地下空間がますます利用される傾向にある。地下空間は土地の高度利用に役立つ一方で、水害発生時には地上の氾濫水が流入し水没するおそれがある危険な空間である。地下空間の水害に関して、地下街や地下鉄といった大規模な地下空間の浸水過程については研究が進められてきている^{1),2)}。しかし、小規模地下空間の浸水過程はこれまで十分検討されているとは言い難い。小規模地下空間は大規模な地下空間と比較して床面積や容積が小さく、浸水深の急激な増加が予想されるため、人命を失うような状況が発生する可能性が高い。実際、1999 年の福岡水害では小規模地下空間において水死事故が発生している。このため、小規模地下空間における浸水時の氾濫水挙動をあらかじめ予測しておくことは防災上重要である。

山本ら³⁾は小規模地下空間を対象とした浸水実験を行い、浸水時には水深の急上昇により短時間で避難困難になることを示した。また、氾濫解析や浸水解析で一般に用いられる貯留槽 (ポンド) モデルによる浸水過程の予測解析を行い、同モデルにより水深の時間変化を概ね再現できるものの、浸水の初期過程を正しく表現できない

ことを明らかにした。このことから、小規模地下空間では浸水開始からの短い時間に避難する必要がある、確実な避難のためには浸水時の初期過程をできるだけ精度良く予測しておくことが重要であること、浸水初期の挙動を把握するためには、貯留槽 (ポンド) モデルより高度な手法も併せて用いる必要があることがわかる。

一方、地下空間からの避難の指標として、平面部の避難限界⁴⁾や階段、ドアからの避難限界⁵⁾などが提案されている。これらの指標は水深をパラメータとして整理されている。これらを用いて地下からの避難可能性を詳細に検討するためには、地下空間内の水深変化をできるだけ精度良く予測することが望ましい。特に、高度に利用された地下空間では、吹き抜けなどを伴った複雑な形状の階段や地下空間内の様々な起伏があるため、空間内の三次元形状をできるだけ反映できる手法を用いて水深変化を予測することが重要と考えられる。

そこで、本研究では、浸水挙動を高精度に予測するため、VOF 法⁶⁾を用いた三次元数値解析手法を階段部を含めた小規模地下空間に適用してその妥当性を検証する。

以下では、本研究で用いる数値解析手法の概要を説明したのち、実物大階段模型に解析手法を適用してその妥当性を検証する。つぎに階段部を含めた小規模地下空間

を対象とした解析を行い、実験結果と比較して精度を検証する。さらに、対象とした地下空間からの避難の可能性に関する検討を試みる。

2. 数値解析手法の概要

本研究では、水面を有する三次元流動現象を精度良く再現するため、水面挙動の予測にVOF法を用いた三次元非圧縮流体解析手法を用いた。本解析法で用いる基礎方程式は、以下のようなものである。

・連続方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式 (Reynolds 方程式) ($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

ここで、 u_i ：流速の各方向成分、 G_i ：単位体積あたりの外力、 p ：圧力、 ρ ：流体密度、 ν ：動粘性係数、 $\bar{\cdot}$ ：レイノルズ平均量、 $\overline{u'_i u'_j}$ ：レイノルズ平均量からの変動量であり、式 (2) 中のレイノルズ応力 $-\overline{u'_i u'_j}$ を求めるため、以下の乱流評価式を用いる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{i,j} \quad (6)$$

ここで、 $k(\equiv \overline{u'_i u'_i}/2)$ ：乱流エネルギー、 $\varepsilon(\equiv \overline{\nu u'_{i,j} u'_{i,j}})$ ：乱流エネルギー散逸率、 ν_t ：渦動粘性係数であり、式 (3)～式 (4) 中の定数は $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.45$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ とした。

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化してSIMPLE法⁷⁾に基づいて解析する。各物理量の定義点は、流速のみを計算セルの境界面中央、その他の物理量を計算セルの中央で定義するスタッガード配置とし、離散化は時間について前進差分、移流項は三次精度風上差分、その他は中央差分とした。底面や側面境界条件は流速、乱流量ともフリースリップとした。

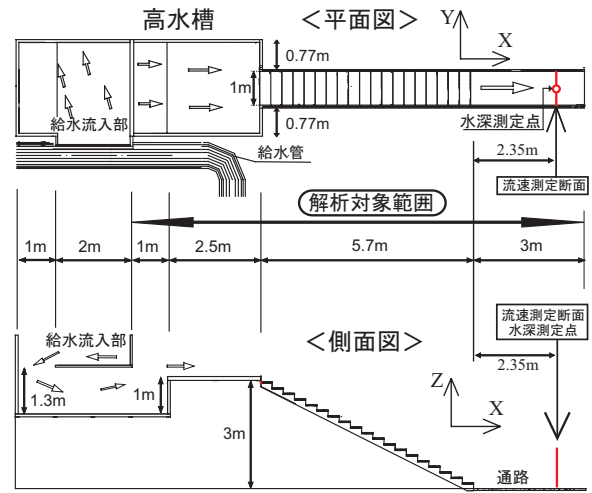


図-1 実物大階段模型

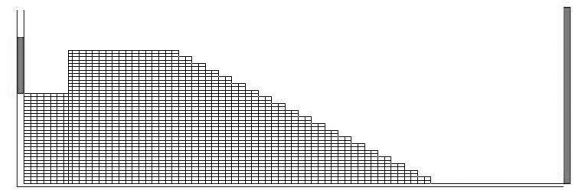


図-2 階段解析用メッシュ (鉛直断面)

水面の移動はVOF法に基づき次式を用いて計算する。(流体体積の移流方程式)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

ここで、 F は各計算セルの流体存在割合である。この F 値に応じて、計算セルを流体セル、水面セル、空セルに分類し、水面を移動させる。本研究では、水の体積を精度良く保存するためのいくつかの工夫を行っている^{8),9)}。なお、氾濫水がドライな床を広がる際に、水深が1mmに達するまではさらに隣接するドライなセルへの進行を制限するため、底面に接し水深1mm以下のセルは F 値が0より大きくても空セルとして扱った。

3. 解析手法の適用と検証

(1) 階段下の流況比較

a) 実物大階段模型の概要

図-1に対象とした実物大階段模型の概要を示す。同図には流速測定断面、水深測定点および解析対象範囲も表示している。実験は階段上部の水深を一定として行い、その水深を10cm、20cm、30cm、40cm、50cmと変化させた。流速は測定断面内の9点をピトー管を用いて計測した。水深は、図-1に示すように流速測定断面の中央で計測した。

b) 解析結果と実験結果の比較

本研究のVOF法を用いた三次元解析モデル（以下、VOFモデル）により実験模型を忠実に再現した三次元解析を行った。解析メッシュの総数は110,864となった。

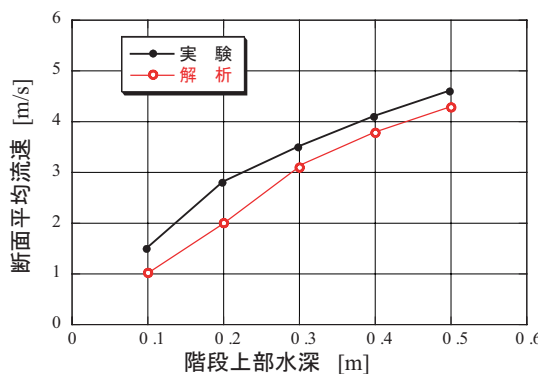


図-3 階段下の断面流速比較

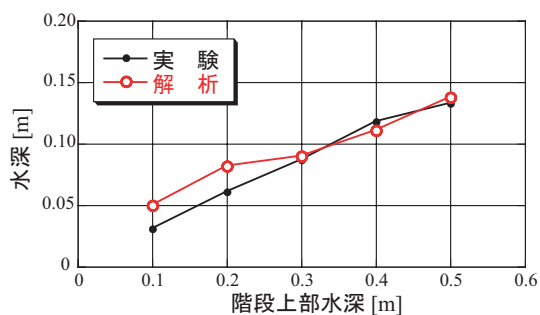


図-4 階段下の水深比較

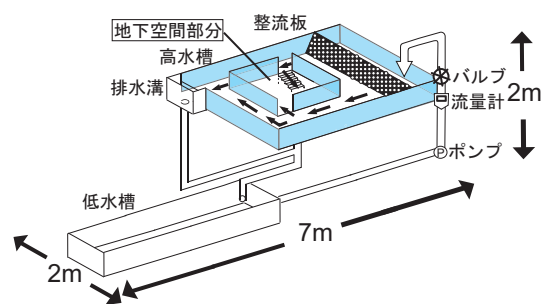


図-5 小規模地下空間模型の外観

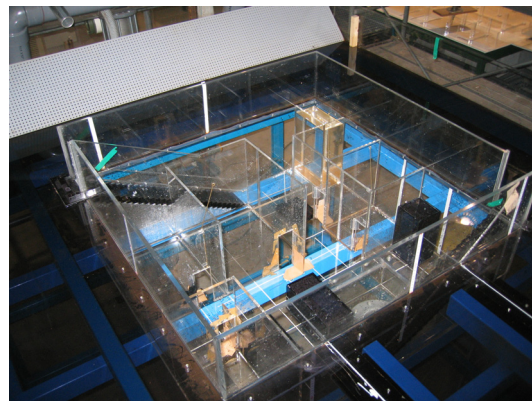


写真-1 小規模地下空間模型の地下部分

作成した解析用メッシュの鉛直断面図を図-2に示す。計算メッシュ分割は、鉛直方向に階段1段の蹴上の二等分(0.075m)、X方向は、階段1ステップの踏面の二等分(0.1m)、Y方向には階段を10分割(0.1m)とした。図-3に階段下における断面平均流速を、図-4に階段下の水深を実験値と解析値ともに示す。流速の解析結果は実験結果に比べて小さな値を示している。階段下の水深は階段1段の高さ(0.15m)より低いため鉛直には解析メッシュが二つしか確保できていない。このためメッシュ刻みが現象に対して大きいと考えられ、また階段下の水深の解析結果が実験とおおむね一致していることを考え合わせると、流速値の実験との差異は許容範囲内であり、階段下の流動を再現できていると判断した。

(2) 階段部を含めた小規模地下空間の浸水挙動比較

a) 小規模地下空間模型の概要

VOFモデルを用いて、山本らが実験を行った小規模地下空間模型³⁾を忠実に再現した三次元解析を実施した。この小規模地下空間模型は1辺が15m程度のビル地下階を想定したものである。対象地下室には5部屋と通路、ホールがあり、進入路としてA階段とB階段がある。このうちB階段は側方が手すりのみで氾濫水が側方から流出可能であり、B階段の裏側は空洞となっている。また、通路に仕切り壁が設置可能であり、仕切り壁設置による避難時間の確保の可能性などが検討できる。実験はフルード相似則を用いて行い縮尺は1/15とした。

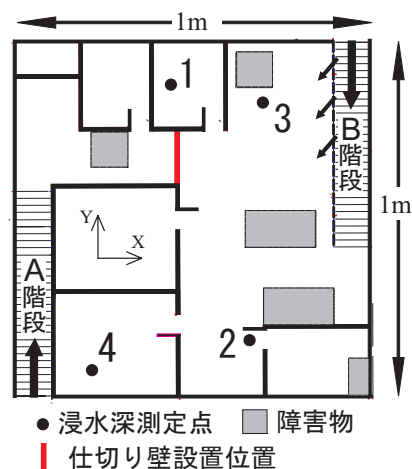


図-6 模型地下部分の平面図

実験模型の外観を図-5に、実験模型のうちの地下部分を写真-1に示す。また、図-6に地下部分の平面図とともに、仕切り壁設置位置、浸水深測定点等を表示した。

b) 実験方法及び解析条件

実験は、地下室への流入口を閉じた状態で所定の水深になるまで高水槽に水を貯留し、実験ケースに応じて地下室への流入口を開放して水を流入させた。流入開始とともに図-6に示す合計4点で水深の測定を開始した。各測定点の水深は、超音波式変位センサにより1秒おきに計測し、データ収集システムを通してパソコンに取り込

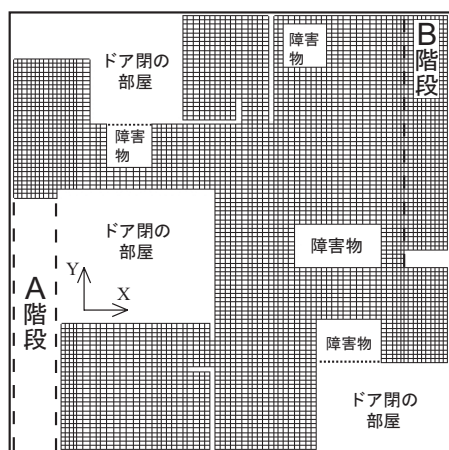


図-7 本解析のメッシュ分割例



図-8 ポンド分割とポンド番号

表-1 実験ケース

	流入口	地上水深	ドア状態	仕切り壁
ケース1	Aのみ	0.033m	全開放	なし
ケース2	同上	0.033m	同上	あり

んだ。さらに模型上方にビデオカメラを設置し、浸水の先端の広がりも撮影した。

解析範囲は階段部を含む地下部分とした。解析メッシュ分割を図-7に示す。同図では地下空間の底面に接する解析メッシュ分割を例示している。階段部の階段1ステップの踏面(2cm)を2等分(Y軸方向)、蹴上(1cm)を2等分(Z軸方向)して作成した。また、X軸方向は階段幅(10cm)を10等分した。階段部以外のメッシュ分割は、地下空間模型の部屋を仕切る壁や障害物をメッシュと一致させるため、メッシュ刻み幅を変化させている。メッシュ数は、616,896メッシュ(X方向84×Y方向68×Z方向108)となった。なお、氾濫水はA階段の上端から一定流量0.91ℓ/sで流入させた。この流量は山本らの実験³⁾により求められた地上水深が0.033m(実物換算50cm)のときの流入流量である。解析時間刻みは0.001sとした。実験ケースを表-1に示す。なお、ケース2では高さ0.1mの仕切り壁を用いた。

また、山本らの貯留槽モデル(以下、ポンドモデル)

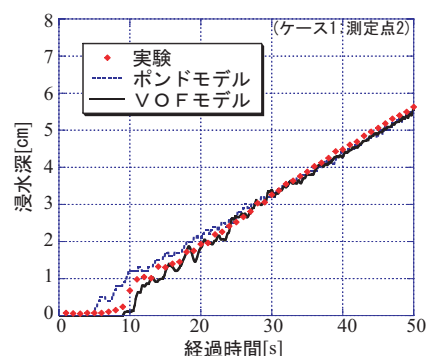


図-9 浸水深時間変化の比較(ケース1;測定点2)

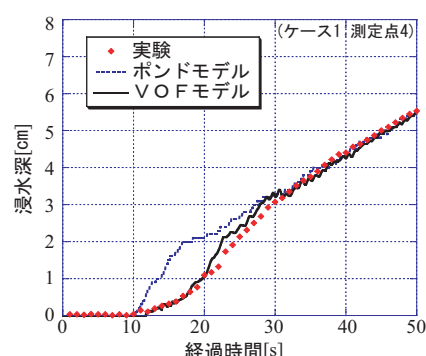


図-10 浸水深時間変化の比較(ケース1;測定点4)

の解析³⁾とも比較した。山本らは図-8のように地下空間を30のポンドに分割した。また、ポンドモデルでは階段を表現できないため、階段直下のポンド(A階段の場合30番のポンド)に一定流量を与えて解析している。

c) 実験結果と解析結果の比較

ケース1, 2について浸水深測定点2, 4の浸水深の時間変化を実験, VOFモデルおよびポンドモデルと比較した結果を図-9～図-12に示す。さらに、図-13にケース1における地下空間全体の浸水深および浸水域の時間変化をVOFモデルとポンドモデルで比較した結果を実験で得られた浸水の先端とともに示す。浸水の先端は実験時に模型上部からビデオ撮影し画像解析した。

図-9～図-12からわかるように、ケース1, 2とも測定点2の水深上昇はVOFモデル、ポンドモデルとも実験結果と概ね一致している。また、測定点4について浸水の到達時間は、両モデルとも実験結果と一致しているが、その後の上昇はポンドモデルのみ早くなっている。この原因を考えるため、図-13を用いて水深変化を比較する。階段直下の水深(ポンド番号では30)を比較するとVOFモデルでは14秒時点で5cm以上となっているが、ポンドモデルは2～3cmに留まっている。ポンドモデルでは水深差が主な駆動力のため、水深が上昇する方向には流れにくい。そのため、浸水深の広がりがある程度表現できても、部分的に水面が盛り上がる滞留を継続的には表現できない。その結果、滞留しない氾濫水が早めに広がり、測定点4の水深上昇速度を早めていると

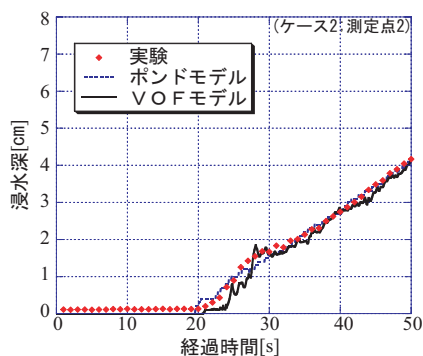


図-11 浸水深時間変化の比較（ケース 2；測定点 2）

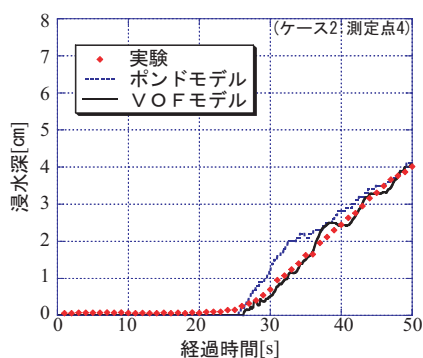


図-12 浸水深時間変化の比較（ケース 2；測定点 4）

考えられる。一方、ケース 2 測定点 4 において、ポンドモデルの水深上昇の実験結果等との乖離がケース 1 に比べて小さいのは、ケース 2 で設置している仕切り壁が A 階段下の滞留の代わりをしていることによると考えられる。

図-13 から VOF モデルは実験の浸水域の広がり精度良く再現できていることがわかる。一方、ポンドモデルはその概略を概ね再現するが、3 秒、4 秒時点において、氾濫水が直進し B 階段の裏側の領域に広がる実験の様子は、移流の影響が大きいと考えられるため、ポンドモデルでは再現できないことがわかる。

以上から、VOF モデルは小規模地下空間での浸水挙動を適切に再現できること、ポンドモデルは浸水の広がり概略を再現できるが詳細な水深変化については十分再現できない場合があることがわかった。

(3) 避難可能性の検討例

本研究の VOF モデルを用いて浸水時の避難可能性の検討を試みる。図-14 に示す地下空間内の 4 領域の平均水深の上昇をそれぞれ調べた。なお、本節では実物換算表示を用いるが、解析は模型実験スケールで行っている。

検討に用いる浸水条件は、A 階段、B 階段の両方から流入し、地上の水深を 0 から 25cm まで 43 秒かけて増加するとした。地下空間のドアのうち、ドア A、ドア C およびドア E は閉じた状態、他のドアは開放状態とした。77.5 秒時点の水面形状を図-15 に示す。

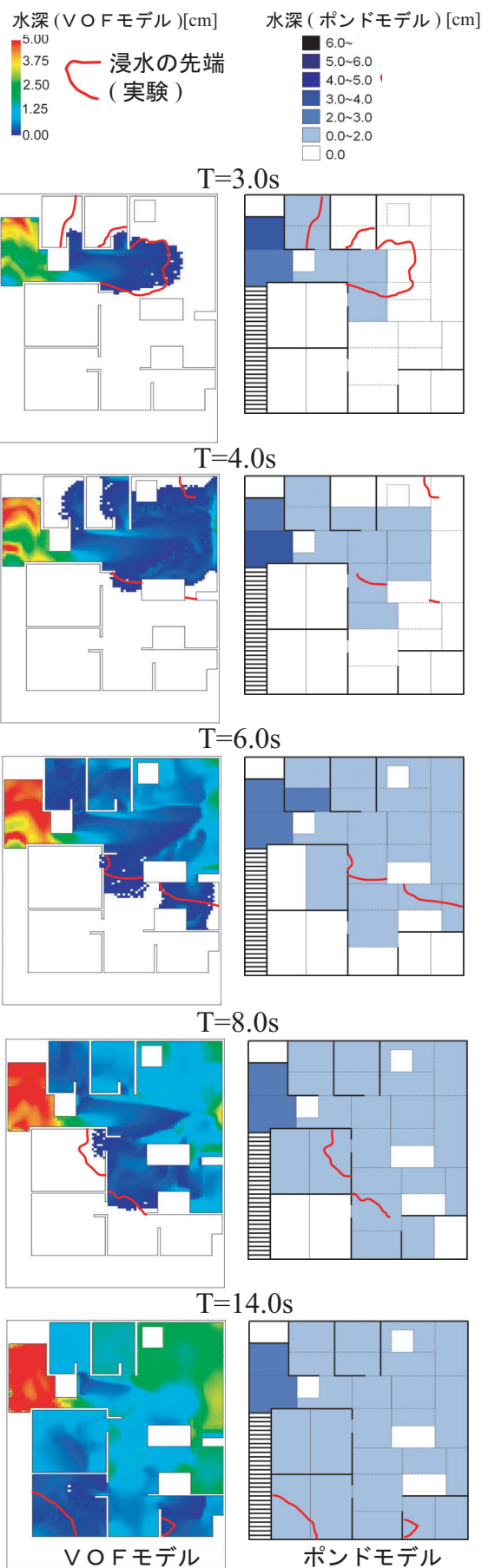


図-13 浸水深および浸水域時間変化の比較

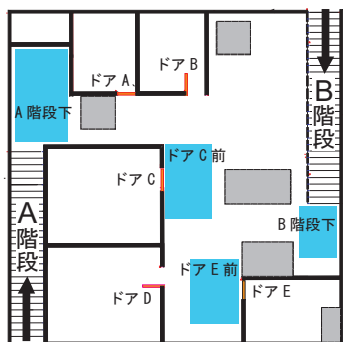


図-14 避難検討領域（水色）とドア状態

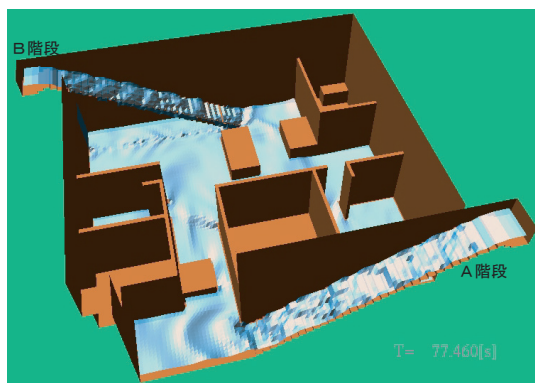


図-15 避難検討解析時の水面形状（77.5 秒時点）

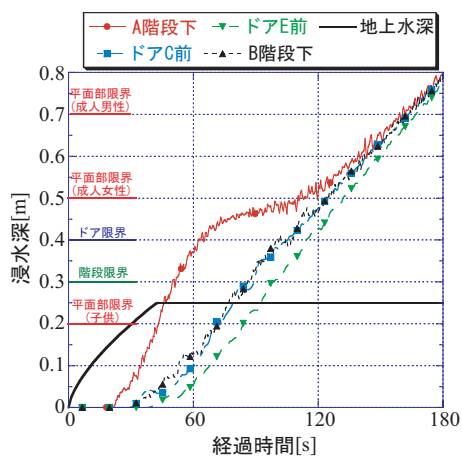


図-16 各領域の水深変化と避難限界指標

図-16 に各領域の浸水深時間変化を示す。同図には、平面部、階段部、ドア部からの避難限界を表示した。平面部の避難限界は、亀井⁴⁾が提案している、①子供が水深 0.20m 以上で、②成人女性が 0.50m 以上で、③成人男性が 0.70m 以上とする指標を、また階段部、ドア部の避難限界は石垣ら⁵⁾が提案している流入口の地上水深が 0.30m、部屋の中からドアを開けることのできる限界のドア前面水深が 0.40m とする指標を用いた。これらの指標と各領域の浸水深時間変化を比較することで避難可能時間を容易に調べることができる。

図-16 から、対象とした浸水条件では、子供は 43 秒で A 階段下の平面部を通じた避難が困難になること。107

秒でドア C から、116 秒でドア E からの避難が困難になること。また、160 秒前後で成人男性もすべての検討領域で平面部を通じた避難が困難になることなどが読み取れる。

4. おわりに

小規模地下空間の浸水挙動に VOF 法を用いた三次元解析モデルを適用した結果以下のことがわかった。

- VOF 法を用いた三次元解析モデル（VOF モデル）は、浸水深の上昇や浸水域の広がりなどの浸水過程を精度良く再現できることがわかった。
- また、ポンドモデルの解析結果と比較した結果、階段下の浸水深の上昇や浸水域が広がる方向など、局所的な挙動について本研究の VOF 解析モデルが優位であることがわかった。
- 本研究で対象とした比較的単純な小規模地下空間でも浸水挙動は単純ではなく、水位差を主な駆動力とするポンドモデルでは再現できない場合もあることがわかった。
- 浸水深をパラメータとして提案されている避難限界と VOF モデルで予測する浸水深の時間変化を用いることにより、精度の高い避難可能性検討を実施可能であることを示した。

本研究では解析手法の検証として、比較的単純な場での検討となったが、今後はより複雑な階段形状、階層構造を持つ場に適用して、そこからの避難限界を検討していく。

参考文献

- 1) 戸田圭一・栗山健作・大八木亮・井上和也：複雑な地下空間における浸水解析，水工学論文集第 47 巻，pp.877-882,2003.
- 2) 関根正人・河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集 No.789/-71,pp.47-58,2005.
- 3) 山本大介・戸田圭一・米山 望・間島真嗣：小規模地下空間の浸水実験，河川技術論文集，第 12 巻，115-120，2006.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 7) Patankar, S.V. and Spalding, D.B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, *Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.15, pp.1787,1972.
- 8) 米山望，守屋祥一：VOF 法を用いた自由液面の数値解析手法，水工学論文集，第 39 巻，pp.373-378，1995.
- 9) 米山望：自由液面解析コード (FRESH) の開発，日本流体力学会誌「ながれ」第 17 巻 第 3 号,1998.

(2006.9.30 受付)