

# 地下空間浸水時の避難誘導に関する数値解析

## NUMERICAL SIMULATION OF EVACUATION FROM AN INUNDATED UNDERGROUND SPACE

関根正人<sup>1</sup>・本山量啓<sup>2</sup>

Masato SEKINE<sup>1</sup> and Kazuhiro MOTOYAMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>2</sup> 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

Evacuation process from an inundated underground space to a ground level was investigated in this study. Numerical model which was proposed in our previous paper was applied here to simulate the evacuation behavior of people from the actual underground space in Shibuya as well as the inundation itself. Several series of computation were made, and a possible evacuation route was found for crowd of people there to go out of this space safely and efficiently without walking in the coming water. This kind of computation must be needed before we make a plan of evacuation route from such an inundated underground space in order to make a human damage be minimized.

**Key words:** *evacuation, underground space, inundation, numerical simulation.*

### 1. 序論

近年, 地球規模での異常気象が頻繁に話題に上るようになった。都市では, これに加えてヒートアイランド現象という特有の現象の影響も顕著に受けるため, 想定規模を超える豪雨に見舞われることが少なくない。こうした豪雨の影響を最も強く受けるのはそもそも標高の低い窪地上の区域であり, もしこの区域の地表下に地下空間があるならば, そこそが最大の弱点箇所となることは言うまでもない。もし浸水に関する十分な認識がないままに地下空間に居あわせて氾濫水に遭ったとすると, 利用者はどのような行動をとるであろうか。果たして冷静に自主避難することが可能であろうか。この問いに簡単に答えることはできないが, どの程度の利用者がその地下空間の構造に習熟しているか, 実際にどの程度の混雑度であるか, などによって結果は異なるであろう。そして, もし混雑している時間帯に予期せぬ浸水に混乱を来しパニックになる利用者が出てくるとするならば, 浸水による直接的な被害がない場合であったとしても二次的な被害が生じる可能性は否定できない。こうした事態を招かないためには, 事態によっては浸水の可能性があることを周知し, その認識の度合いを高めておくことに加えて, 地下空

間の管理者が有効な避難誘導を行えるように準備を整えておくことが必要となる。具体的には, 本論文で説明するような避難シミュレーションを行い, その地下空間特有の浸水拡大過程を理解した上で, 地上へとつながるどの連絡階段を通じていかに効率よく利用者を避難させるかといった戦略を練っておくことが望ましい。避難シミュレーションとは本来このような目的で行われるべきであり, さらに深刻な事態, すなわち人と人との接触してけが人が出るほどの状態までを想定することは本来の意味からして二の次であると考ええる。

地下空間からの避難に関わる数値シミュレーションについては, これまでにいくつかの手法が提案され, 実際の解析も進められてきている。これに関しては, 土木学会地下空間研究委員会防災小委員会(代表研究者: 京都大学戸田圭一教授)により最近とりまとめられた「地下空間浸水時の避難・救助システムに関する研究」と題する報告書<sup>1)</sup>に詳しく述べられている。たとえば, 戸田らは京都市内の御池地下街を対象とした避難シミュレーションを行っており, 興味深い知見を報告している。彼らの研究も手法こそ異なるものの, 本研究と同様の趣旨で行われたものである。本研究では, 前報<sup>2)</sup>においてその内水氾濫過程についての考察を加えた東京渋谷駅周

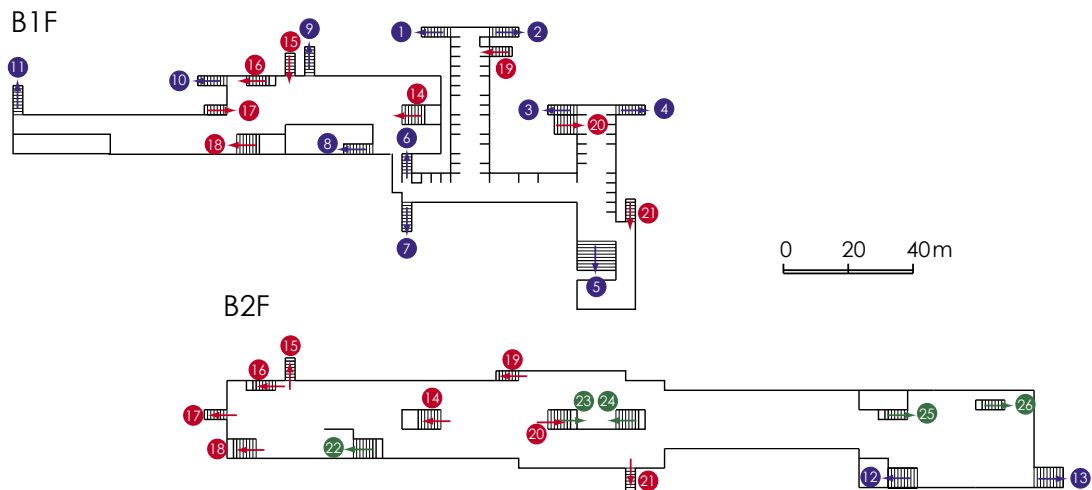


図-1 解析対象地下空間の概要：

図中の青の矢印は地下1階（No. 12ならびに13のみ地下2階）から地上へつながる連絡階段、赤の矢印は地下2階から地下1階への連絡階段、緑の矢印は地下3階から地下2階への連絡階段をそれぞれ表す。地下3階は地下鉄駅ホームにあたるが、本解析ではここへの水の流入を考慮するものの、地下3階からの人の避難については想定外とする。No. 20と23は上下の関係で立体的に並んでいる。

辺の地下空間を検討の対象として、その浸水拡大過程を明らかにするとともに、利用者をこの空間から安全かつ効率的に避難させる方法を探ることを目的として、数値シミュレーションを行った。

## 2. 解析概要

### (1) 浸水解析

本研究で対象とする地下空間の構造図を図-1に示す。この地下空間は地下1階から地下3階までの3層構造になっており、各階を結ぶ連絡階段は図-1に示すとおり合計26ヵ所存在する。この空間が存在する渋谷駅周辺地域を対象に行った内水氾濫解析によれば、地上の氾濫水が流入する可能性のある連絡階段は図-1中のNo.6とNo.7に限定される<sup>2)</sup>。本研究では、実績降雨に対して行った再現計算<sup>2)</sup>の結果に基づき、この二つの連絡階段の上端に当たる地点の浸水深の時系列データを境界条件として与えることにした。図-2がその結果を図示したものであり、標高が等しく近接していることから、二つの連絡階段とも同一の値をとるものとした。

地下空間の浸水解析については次のように行った。まず、フロー上の流れに関しては、空間を1m四方のメッシュに分割し、その各々をコントロール・ボリュームとして運動方程式ならびに連続式を解くことで流速の二成分と水深とを求めている。ここでは、運動方程式として、これまでの研究に倣い移流項のみ省略した二次元浅水方程式を適用した。この際必要となるManningの粗度係数 $n$ に関しては、これまで通り0.02とした。また、連続式の解法に当たり、注目するコントロール・ボリューム

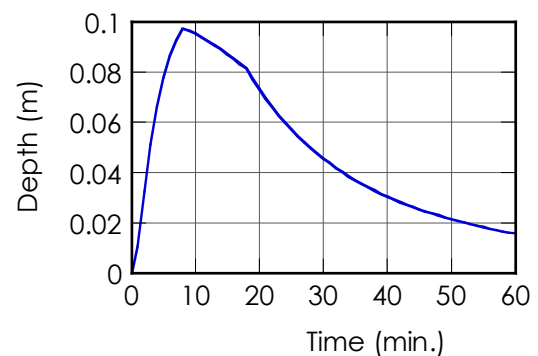


図-2 地下空間への連絡階段No.6および7の上端における浸水深の時間変化（境界条件）

が上階あるいは下階へとつながる連絡階段に接している、しかもこれらの階段を通じて水の流入あるいは流出が生じる場合には、これらの流量を求め、これらを加味することで水深を求めている。次に、連絡階段上の流れに関しては、次のように計算を行った。まず、階段（段差15cm、奥行き30cm）の各段の中央に水深計算点を、端部に流速の計算点をそれぞれ配置したスタaggered計算格子を設定した。流速の計算には、階段上の水深が段差より小さい場合には、端部において限界水深をとるものとしていわゆる段落ちの考え方を適用する。また、それ以外の場合にはいわゆる一次元不定流解析を行うことにした。その際、抵抗の評価の際にManningの粗度係数 $n$ が必要となるが、これについては戸田らの実験<sup>1)</sup>の結果などを参考に0.2と仮定することにした。なお、連絡階段の上端からの流入流量に関しても、上記の流速の計算法を適用して求めている。また、水深に関しては、これらの流速に見合った水の流出入を考慮に入れ連続式から求めることにした。

## (2) 避難行動解析

人の避難行動に関する数値解析モデルについては、関根・本山<sup>3)</sup>により既に公表済みのものと基本的に同一のものであり、この一部に修正を加えて適用することにした。このモデルの特徴は以下の通りである。

1) 避難者の歩行速度は、その人が位置する計算メッシュ内の群衆密度に応じて変化させるものとし、避難者の面前に位置する計算メッシュ群の中から群衆密度の低い方向に向けてその移動方向を修正することとする。歩行速度自体は、前論文<sup>3)</sup>と同様に平坦な床ならびに階段に分けてそれぞれ値を与える。

2) 水中を歩行する場合には、浸水深  $h$  に応じてその歩行速度が低下する<sup>4)</sup>ことが知られており、須賀ら<sup>4)</sup>の水中歩行実験の結果を参考に、以下のような近似式によって速度の補正を行うことにした。

$$v = v_0 (1 - h / h_e) \quad (1)$$

ここに、 $v$  は歩行速度、 $v_0$  は浸水深 0 の場合の歩行速度を表し、 $h_e$  を 1 m とする。

3) 避難者が移動する方向に関しては、それぞれが位置する計算メッシュ毎に定められた避難目標点を目指すものとする。なお、この避難目標点は、原則としてそれぞれの位置から最短距離で到達できる上向きの連絡階段の下端の点とした。

4) 任意の時刻の避難者の位置は、それより  $\Delta t$  時間だけ前の時間の座標に移動速度ベクトルに  $\Delta t$  を乗じた距離だけ変位する。

本研究では、基本的には避難を呼びかけるアナウンスを流すことなく、地下空間に居合わせた利用者が「自主避難」することを前提とする。この場合の避難開始については、次のように考えることにした。利用者は、自らの視界の範囲内に水が接近してきたことを確認した時点で避難行動を開始するものとしたが、これに加えて、自分を追い抜いて避難行動を継続していく他者を認識したときにも自らの判断で避難を開始するものとした。ここでは、眼科医学的な観点から人が水ならびに他者を認識できる距離（いわゆる「視認距離」）を 5 m とする。また、他者との関係で避難を開始する場合に関しては次のように推察される。もし、利用者がこの地下空間において浸水の危険があることを十分に認識し、いざという時には直ちに避難しなければならないと考えているならば、自らの横を避難する他者を認めれば直ちに避難を開始するであろう。ただし、これはかなり理想的な行動であり、実際には認識の程度に応じて、同様の行動を起こす他者を立て続けに見るうちに身の危険を感じて避難を起こすことになるのではないか。こうした推論に基づき、本研究ではこの

表 -1 Case 毎の解析条件

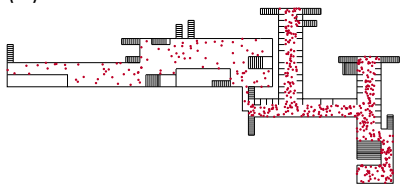
| Case       | 1   | 2   | 3 | 4 |
|------------|-----|-----|---|---|
| $\alpha_e$ | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 |
| 避難誘導       | 無   | 有   | 無 | 無 |
| 避難開始アナウンス  | 無   | 無   | 無 | 有 |

認識の程度を表すパラメータを  $\alpha_e$  ( $0 \leq \alpha_e \leq 1$ ) とし、上記の「自らを追い越して避難する他者の行動」を視認する毎に 0 ～ 1 の間の一様乱数を発生し、この値が  $\alpha_e$  以下であれば避難を開始するものとした。たとえば、 $\alpha_e = 1$  が前述の理想的な行動を表すことになる。本研究では、このような解析に加えて、参考として、地下 1 階のフロアに水が到達した瞬間にアナウンスを流して「避難指示」を与えた場合の解析も行っている。

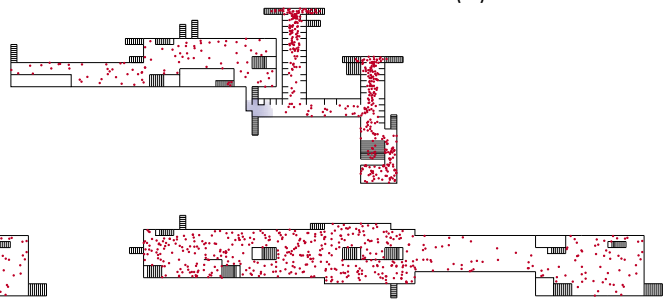
本解析では、地下 1 階ならびに地下 2 階にそれぞれ 500 人ずつ、合計 1000 人の避難者がこの地下空間に留まっている状態を初期状態とする。避難者の初期配置に関しては、それぞれのフロア毎に利用者数に空間的な偏りがある実態を踏まえて、空間内に一様ではなく重み付け配置を行うものとし、乱数を利用して避難者個々の初期位置を決定した。具体的に設定された個々の避難者の初期位置については、後掲の図 -3(a) 中に赤色の点で示されている。また、計算時間刻み  $\Delta t$  は、汎濫流の計算では 0.01 秒、避難者の移動の計算では 1.0 秒とした。

本研究では、表 -1 に示すような 4 ケースの解析を行った。Case 1 は、 $\alpha_e = 0.1$  とした上で、避難者が最寄りの階段を目指すとした解析を表す。Case 2 は  $\alpha_e = 0.1$  とする点は変わらないものの、避難に用いる階段を選別し、水に遭遇することなく最も効率よく避難できるルートを通っての避難行動をシミュレートした一例である。一方、Case 3 と Case 4 は、 $\alpha_e = 1$  とした解析であり、避難者が浸水に対してかなり高い認識を持ち、人の動きを見て素早く自らも行動を起こすと言う前提に立ったシミュレーションになっている。Case 3 はこの点を除けば Case 1 と同一の解析である。最後に、Case 4 は、あくまでも参考のために行った解析であり、地上から浸入した水が地下 1 階のフロアに到達した時刻に避難指示のアナウンスを流し、これを契機に避難が始まるとしたシミュレーションに相当する。なお、 $\alpha_e = 0.1$  とは、実際の人の動きに近い行動を再現することを目指して試行錯誤の末に定めた値であり、現時点ではひとつの目安に過ぎない。この変数の意味については今後検討の余地が残されている。

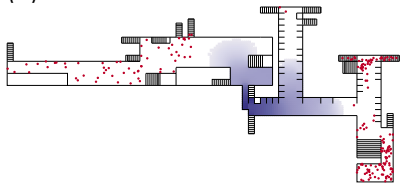
(a) 0 s : Case 1



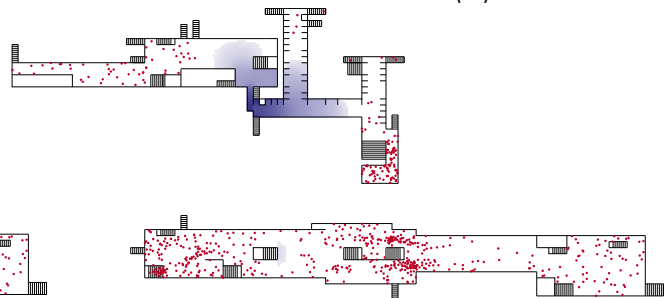
(b) 120 s : Case 1



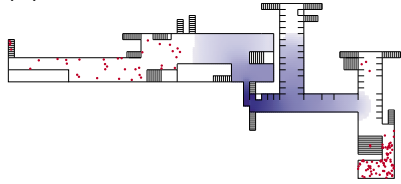
(c) 360 s : Case 1



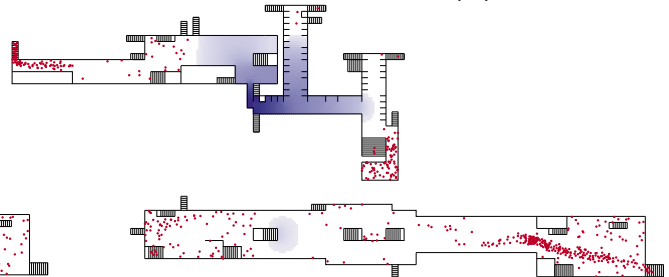
(c') 360 s : Case 2



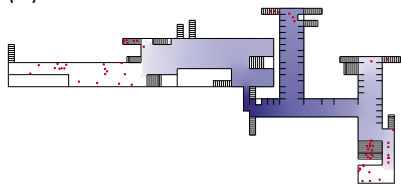
(d) 450 s : Case 1



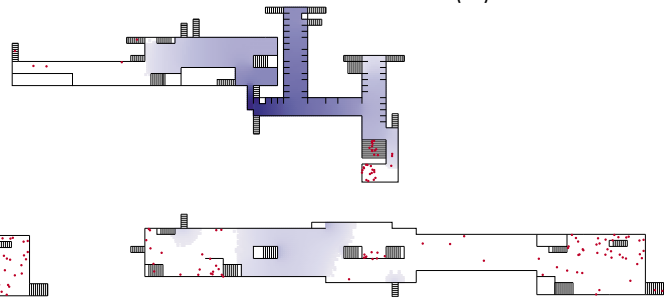
(d') 450 s : Case 2



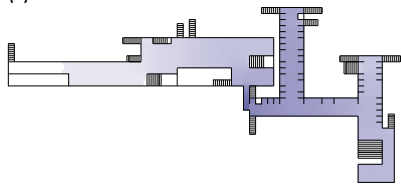
(e) 720 s : Case 1



(e') 720 s : Case 2



(f) 1800 s : Case 1



(g) 2400 s : Case 1

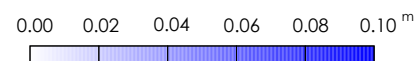
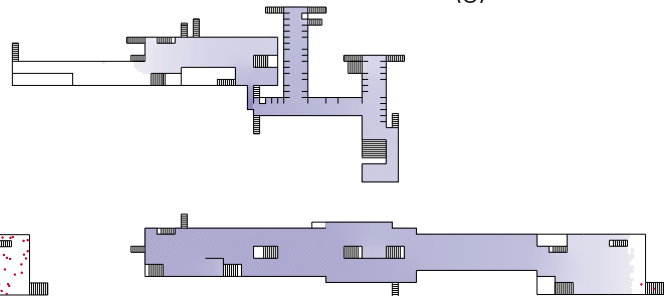


図-3 地下空間の浸水深コンター図と利用者の避難状況：図中の青色の濃淡が各階の浸水深を表し、図中の赤色の点が避者個々の位置を表す。(c')～(e')には同時刻のCase 2の結果を比較のため併記した。地上からの水の流入が開始した時刻を時間の原点にとっており、図-2の原点と一致する。

### 3. 結果と考察

まず最初に、Case 1 と Case 2 の結果について考察を加える。ここで、Case 1 は各階ともに最寄りの階段を目指して自主避難し、地上へと到るとした解析である。ただし、主たる水の通り道となる地下 1 階の No.6, 7 の階段、ならびに地下 2 階の No.14 の階段は、避難経路から除外している。一方、Case 2 は、一連の避難シミュレーションの結果から試行錯誤の末に見出された避難経路を通っての避難を表す。この場合には、上記の 3 つの階段を除外することに加えて、地下 2 階では、必ずしも最寄りの階段を使わず、No.19, 20, 21, 12 の階段の代わりに No. 13 の階段を、また、No.15, 16, 17 の階段の代わりに No.18 の階段を使って、避難者をそれぞれ直接地上あるいは地下 1 階へ誘導している。

図-3 には、この 2 つの Case の解析結果を示した。図中には、各時刻における浸水深のコンター図を青色の濃淡で示されているほか、避難者の位置が赤の点の集合として表示されている。このうち、図-3(a) 中の赤の点が避難者の初期位置を表しており、これはここで行った解析のすべての Case を通じて共通である。ここでの浸水の特徴づける時刻として、地上から No.6 と No.7 の階段を通じて流入した水が地下 1 階のフロアーにまで到達するのが計算開始後 55 秒、地下 1 階を経てはじめて地下 2 階に水が到達するのが 302 秒後であった。以上を踏まえて、以下、図-3 を見ていくことにしよう。

まず、図-3(b) には 120 秒後の Case 1 の結果を示したが、同時刻の Case 2 の結果はこれとほぼ等しい。次に、360 秒後の Case 1 の結果である図-3(c) を見ると、地下 2 階にいて No.14 の階段から流れ落ちてきた水に気づいた避難者が、No.20 の階段を上って地下 1 階に到り、その後 No.3, 4 の階段を通して地上へと向かうような人の流れを作っていることがわかる。これに対して、同じ時刻の Case 2 の結果である図-3(c') を見ると、Case 1 であれば No.14 より右側に位置する階段を目指していた避難者が、すべて No.13 の階段へと誘導されるために、No.24 の階段の両側（図上ではその上下）に位置する通路を通して右方向へ移動する組織的な人の流れが形成されていることがわかる。これは、最初一方向を目指す数人程度の流れであったものが、その後、連鎖反応的に大きな流れへと発展したものであり、壁際付近の取り残されがちな位置にいる人にまで避難を喚起することができ、結果的に効率のよい避難となったと考えられる。ただし、群衆を一方向に向かって移動させることから、階段などで群集密度が高くな

ることが懸念される。さらに、450 秒後を経て 720 秒後になると、地下 1 階における浸水範囲が拡大し、No.15, 19, 20, 21 の階段からも地下 1 階の水が地下 2 階へ流出するようになる。図-3(e) の Case 1 の場合には最寄りの階段を選んで避難することになっているため、これらの階段も避難経路となる。これらの階段上の水深は 5 cm 以下であり、避難できない階段ではないが、安全に避難を完了するためにはこのような階段は避けるべきであろう。Case 2 の避難誘導はこうした点を考慮したものであり、図-3(e') のように浸水した階段を利用した避難は回避している。

この地下空間の場合、地下 1 階の No.5 の階段の右横ならびにその下の閉ざされた区域と、地下 2 階の No.22 と No.18 に左右を挟まれた帯状の区域では、後述する Case 4 のようにアナウンスによる避難指示を行わない限り、最終的に水に取り囲まれるまで避難を開始することなくその場に残される傾向がある。実際には、このあたりに人を引き止めるようなものはなく、そもそもこのあたりに人が留まっていることはないと考えられる。また、上記の区域は地下空間内で最後に水が到達する区域であり、浸水深もあまり大きくはならない。本解析の場合には数 cm 未満であったため、浸水した床の上を移動し避難を完了するのに大きな障害はないものとも考えている。しかし、万一を考えてより短い時間で安全に避難を完了させるためには、地下空間の管理者がこの辺りに注意を払い、速やかに避難を促すことが望ましい。なお、後掲の図-4 を見ると、Case 1 ～ 3 のいずれの場合にも地下 2 階にいる 10 % 程度の人の避難が遅れることが見て取れるが、これは上記のような理由による。そこで、Case 1 ～ 3 の避難の状況について論じる際には、避難完了率 90 % 程度までの過程に注目してを比較する方が望ましい。ここに、避難完了率とは、初期に各階に配置された避難者数 500 人のうち地上への避難が完了した人数の累積値の占める割合を表しており、計算開始時に 0、全員が避難を完了した時点で 100 となる。以上のことから、図-2 のような複数の連絡階段が複雑に入り組んだ地下空間の場合には、浸水時に避難に利用する階段とそうでないものを選別することが望ましく、これにより安全でしかも効率のよい避難誘導が可能になる。ただし、避難経路上の特定の地点で人の過度な集中を招かないようにする必要がある。

最後に、他の条件下で行った解析の結果について見ておく。図-4 には Case 毎の避難完了率の時間変化を示した。この図-4 より次のことが理解される。(1) 浸水ならびに避難に対する認識の程度を表すパラメータ  $\alpha_e$  を 1 とし、自主避難に任せた Case 3 の

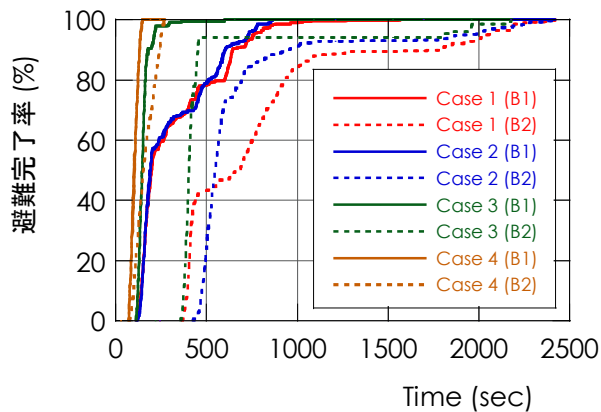


図-4 Case 毎の避難完了率の時間変化：初期状態として地下1階にいた人の避難完了率の値を実線で、地下2階にいた人の値を破線でそれぞれ示している。

場合には、図中の緑色の線に現れているように極めて整然と速やかに避難が完了する結果となった。地下2階において避難完了時間が遅れるのは、前述した区域に最後まで取り残された人の避難が遅れたためである。ただし、 $\alpha_e = 1$  という条件は極めて理想的な行動を意味するため、このような避難は実際には生じ得ないと考えられる。

(2) Case 4 は、 $\alpha_e = 1$  とした上で、地下1階のフロアに水が到達した直後に避難指示のアナウンスを流しているため、Case 1～4の中で最も速やかに避難が完了する条件である。この場合には、一部区域に人が取り残されることもなく、予想通りの結果となった。ただし、避難者がアナウンスとともに一斉に移動を開始し、あまりに早く最寄りの階段に殺到するために、地下1階から移動してきた人が地下2階からの人に追いつかれるなど、多くの階段において過度の混雑が発生することがわかった。階段における混雑を緩和するためには、階段付近に管理者を配して適切に指示を与えることが望ましい。この点に関して、Case 2 の場合には混雑の度合いが比較的高くなる可能性のある階段は No.11, 13 の2つに限られるため、安全に避難を誘導することが可能であるが、Case 4 の場合には、アナウンスによって比較的速やかにしかも多くの階段に群衆が殺到するため、これらすべての階段付近に管理者を待機させて適切な誘導を行うことはかなり不可能に近いと言わざるを得ない。また、二次的な被害を招く可能性もある。避難指示のアナウンスを行う場合には、その適切なタイミングを見出す必要があり、今後更なる検討が必要である。

(3) Case 1 および Case 2 に関しては、前述したような理由で避難が遅れる区域があるために、避難完了に要する時間に大きな差は見られないものの、避難誘導を行った Case 2 の方が速やかに避難が行われ

ていることがわかる。

#### 4. 結論

本研究では、浸水時の地下空間からの避難行動シミュレーション・モデルを作成し、一連の数値解析を行った。浸水解析の結果から、対象とする地下空間において想定される氾濫水の移動経路が明らかになった。この情報を基に、この地下空間からの避難を安全かつ効率よく行うための誘導経路に関する検討を行ったところ、Case 2 のような誘導が望ましいとの結論を得た。本解析で用いた避難行動モデルにおいては、地下空間における浸水ならびに避難に対する認識の程度を表すパラメータ  $\alpha_e$  というものを導入し、試行錯誤の上で 0.1 という値を用いることにした。しかし、この点についての検討が明らかに不足しており、今後の課題と言わざるを得ない。また、ここでは、1999 年の実績降雨に対する再現計算から得られた量の水が地下空間内に流入するものとしたが、将来、これを超える量の水が流入する可能性も否定できない。この地下空間からの避難誘導プランを立てるためには、さらに異なる流量下での同様の検討が必要であろう。また、ここでは特定の地下空間を対象とした解析を試みたが、他の地下空間でも同様の検討を行うことで適切な避難誘導ができるように準備しておくことが望ましい。本研究の成果が、こうした検討を進めていく上での第一歩となれば幸いである。

**謝辞：**本研究の遂行に当たり、日本学術振興会科学研究費基盤研究 C (研究代表者：関根正人，課題番号：19560517) を受けました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会地下空間研究委員会防災小委員会：平成 17 年度重点研究課題報告書「地下空間浸水時の避難・救助システムに関する研究」，4-1 - 4-10，2006 年 3 月。
- 2) 関根正人，河上展久：都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する地下空間の浸水に関する数値解析，水工学論文集，第 49 巻，595-600，2005。
- 3) 関根正人，本山量啓，中村 淳：浸水時の地下空間からの避難行動に関する数値シミュレーション，水工学論文集，第 51 巻，547-552，2007。
- 4) 須賀堯三，上阪恒雄，白井勝二，高木茂知，浜口憲一郎，陳 志軒：避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第 38 巻，829-832，1994。

(2007. 9. 30 受付)