

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

NUMERICAL SIMULATION OF INUNDATION AND EVACUATION IN COMPOUND UNDERGROUND STATION

関根正人¹

Masato SEKINE¹

¹ 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)

Evacuation process from an inundated underground space to a ground level was investigated in this study. Numerical model proposed by the author was modified in this study in order to simulate the movement of persons in actual subway station. Several series of computation were made, and a possible evacuation route was found for crowd of people there to go out of this underground 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

東京などの大都市では、地下鉄・地下街をはじめとした大規模な地下空間が開発されており、地上が内水氾濫に見舞われるなどして地下浸水が生じると、その深刻な被害はとなる可能性がある。ここでの被害とは、施設の継続的な使用に支障を来すという類のハードウェア上のものと、利用者個々の生命に関わる人的なものに分けられる。浸水を防ぐための対策として、土嚢や止水版を準備し、いざというときにこれを設置するなど、地下空間管理者による手だては講じられつつある。しかし、実際に豪雨となったときにこれらを適切なタイミングで設置できるか否かは、当事者の判断によるところも大きく、万全といえるハードウェア対策を期待することは難しい。そこで、これとあわせて、万一浸水が生じた場合であっても人命を損なうことのないようなソフトウェア上の対策を練っておくべきである。具体的には、浸水時に利用者を安全かつ効率よく地上に移動させるための避難誘導が挙げられる。本研究では、東京都内の地下鉄駅を中心とした地下空間を対象として、この空間における浸水危険性を調べた上で、どのような避難誘導が望ましいかを数値解析を通じて明らかにすることを目指す。

地下空間における浸水過程に関する研究は、たと

えば戸田・井上ら¹⁾ならびに著者ら²⁾によって進められてきた。これに対して、浸水時の地下空間からの避難についてはいくつかの基礎的な研究がなされてきたが、前述の目的に適う研究は少なく、著者の知る限り最近の戸田ら³⁾のものと著者ら⁴⁾によるものに限られる。浸水解析ならびに避難行動解析を行う上での最大の課題は、検証に耐えうるデータならびに情報が不足していることにある。これに加えて、避難行動解析の場合には、人が人として行動する際に現れる諸特性に不明な点が多いこともまた問題である。こうした事態を鑑みてか、近年、石垣・戸田ら^{3), 5)}により「実物大の階段模型実験」などが行われ、今後の解析の基礎となる有益な情報がもたらされてきた。たとえば、浸水時の人の歩行速度が、水深、流速ならびに人の年齢層・性別によってどの程度変化するか、といった点に関する実物大実験が行われ、これらが定量的に明らかにされた³⁾。本研究ではこの成果を活用して避難行動解析を行った。

著者による避難行動解析の基本的な考え方は、以下の通りである。地下空間浸水時に氾濫水がどのような経路をたどって広がり、その結果、浸水域がどのように拡大するかを数値解析を通じて明らかにし、どの区域に危険が潜んでいるかを把握する。次に、この結果を踏まえて、この空間の利用者を、できるだけ安全にかつ速やかに地上へと避難させるに

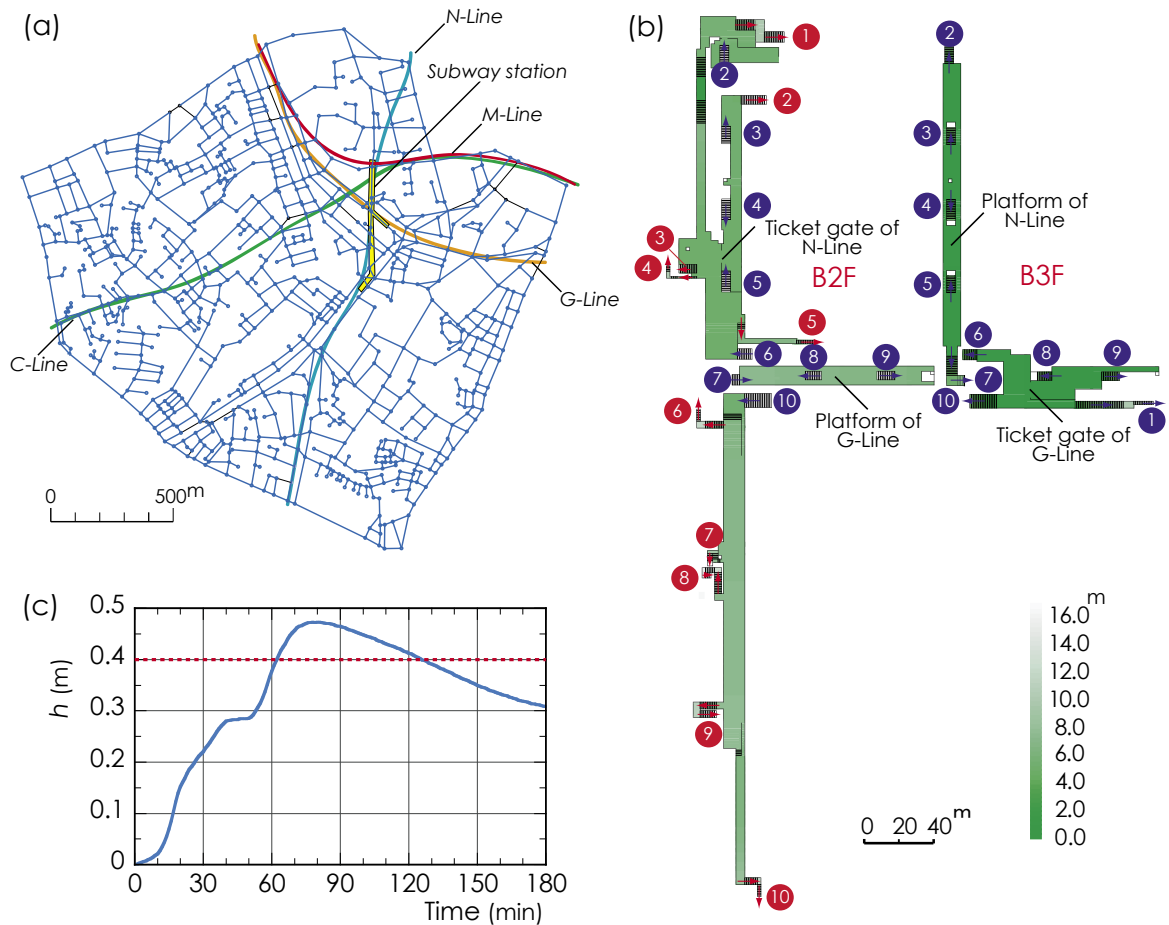


図-1 対象とする地下空間の概要： (a) 内水氾濫解析の対象区域と道路ネットワーク，(b) 地下空間の構造（緑色の濃淡はフロアーならびに階段の各地点の標高を表す．赤の矢印は地下2階から地上への連絡階段，緑の矢印は地下3階から地下2階への連絡階段をそれぞれ表す．地下3階が地下鉄駅ホームに相当する），(c) 連絡階段（赤丸 No.5 ならびに青丸 No.1）上部に位置する道路上の浸水深の時間変化（水深 h が図中の赤の点線で表した 0.4 m を超えると地下空間への進水が生じる．）

は、どのような経路を使って誘導するのが望ましいかを検討する。地下鉄駅で最も深刻な事態が予想されるのは、通勤時間帯のような混雑時に予期せぬ浸水に遭遇した場合である。このような場合に避けなければならないのは利用者がパニックを起こすことであり、浸水だけでは被害が生じないにもかかわらず、将棋倒しなどの二次的な被害が引き起こされる可能性もある。管理者は、それを避けるために、利用者が走ることなく避難できる最適ルートを予め探っておき、利用者が本能に任せて避難行動をとることのないように適切に誘導することが望ましい。

2. 解析概要

(1) 浸水解析

本研究では、東京都心部にある地下鉄溜池山王駅を中心とした地下空間を解析の対象とする。ただし、この地下空間における浸水は、地上の内水氾濫の結果として生じることから、この解析とあわせて地上における解析も同時に行うことになる。解析対象区

域の概要を図-1にまとめて示す。この空間は谷のような地形の凹部の真下に位置し、谷に沿って幹線道路が延びているため、その凹部において内水氾濫の被害が生じる危険性が高い。この駅には4つの地下鉄路線が立体交差しており、通勤時間帯には1時間に数千人の利用者が乗り降りするといわれている。また、地下2階から地下5階（地下1階は通路）までの複数のフロアーが、相互に複雑に連結されているため、乗り換えには混乱を来すことすらある。図-1(b)には、構造図とあわせて、地下空間内の各地点の標高を緑色の濃淡で表現したコンター図を示した。図からの判読は容易ではないが、同じフロアーであっても微妙な高低差があり、これが後述するように浸水域の拡大に影響を与えることになる。

この地域を対象とした内水氾濫過程については、これまでに検討を進めてきており、その成果は別論文^{たえぼ2)}にまとめて報告してきている。そこで、内水氾濫解析については必要最低限の記述に止める。なお、本研究を含む一連の解析では、この地下空間が実際に浸水被害に見舞われた1999年8月

の豪雨時の現象を念頭においており、可能な限りそのときの状況を再現するように努めた。ただし、そのときの降雨データとして信頼性の高いものが残されていないため、この地域に近い東京渋谷で観測された降雨データを参考にしてこれを与えることにした。具体的には、渋谷で観測されたデータをそのまま用いた解析に加えて、このデータを一律に 125% ならびに 150% に引き伸ばしたものを入力値とした解析を行った。その結果、125% ならびに 150% に引き伸ばした降雨データに対して地下空間で浸水が生じることが確認されたほか、地下空間へ水が進入する可能性のある「道路歩道からの連絡階段」はわずか 2 つに限られ、図 -1(b) 中の赤丸 No.5 と青丸 No.1 だけであることがわかった。こうしたことを踏まえて、本論文では 150% に引き伸ばされた降雨に対する解析結果を例として示し、これについて論じていく。図 -1(c) は、上記二つの連絡階段の入口における道路上の浸水深の時間変化を表している。水深 h が図中の赤の点線に相当する 0.4 m より大きくなる時間帯において地下空間への水の進入が生じる。なお、道路から連絡階段への流入流量は、この水深を基にして段落ちの考え方にに基づき評価した。

次に、地下空間の浸水解析について説明する。まず、フロア上の流れに関しては、空間を 1 m 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により流速の二成分と水深とを求める。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、これらのコントロール・ボリュームのうち、上階あるいは下階へとつながる連絡階段に接していて、しかもこれらの階段から水が流入あるいは流出するものに関しては、これらの流入流出量を考慮しつつ体積保存の関係から水深を求める。次に、連絡階段上の流れに関しては、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ッガード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の結果などを参考に 0.2 と仮定することにした。

(2) 避難行動解析

人の避難行動に関する数値解析モデルとしては、

関根・本山⁴⁾のモデルを基本とし、これをさらに現実に近づけるために修正を加えたものを適用した。関根・本山のモデル⁴⁾では、空間内にいるすべての利用者が止まっている状態を初期状態とし、避難してくる他者の動きを認知するか、氾濫水が近づいてくるのを検知した時点で避難を開始させるものとした。ショッピングモールのような地下街の場合には、このようにある程度の時間にわたって人が立ち止まっていることはありえる。しかし、本研究で対象とするような地下鉄駅を含む地下空間の場合には、乗り換えのための移動を中心として利用者が動き回っているのが自然であり、列車待ちの場合を除いて立ち止まっていることはほとんどない。そこで、本研究では、通常時の地下空間内の人の流れを調べ上げ、これを忠実に再現する行動モデルを作ることとした。そして、ひとたび避難を開始すべきと判断した時点で、移動目標地点を変え、スムーズに避難行動に移行できるようにした。豪雨により浸水が生じるとすれば、その人的被害が最も大きくなるのは「夕方の通勤時間帯」であると判断される。そこで、この時間帯に駅構内で目視による調査を行ったほか、東京メトロにより行われた乗降者数の調査結果を参考にして、この時間帯におけるこの地下空間内の人の流れを把握するよう努めた。浸水解析によれば、浸水の可能性がある区域はこの空間内の一部に限られ、図 -1(b) に示された地下 2 階 (B2F) ならびに地下 3 階 (B3F) 以外に水が到達することはないことがわかっている。この範囲内にあるのは地下鉄 G 線と N 線のホームならびにここに至る改札口などの関連区域である。そこで、この範囲に限定して説明すると、主要な人の流れは、(a) 上記二つのプラットフォーム間の乗り換えに伴う移動と、(b) 地上から地下空間に入り、改札口を経てプラットフォームに向かう、またはこの逆の移動、であることがわかり、これ以外には (c) N 線の北に位置する C 線ホームとの間の乗り換え移動があるにすぎないと判断される。そこで、それぞれの経路毎の移動人数についてのデータに基づき試行錯誤を繰り返すことで、後述するようなエリア分けならびに移動目標の設定を行った。ここでは、群集としての平均的な移動パターンが定量的に実際の人の流れに近いものとなるように努めた。

避難行動モデルの概要は以下の通りである。

1) 空間を階段とフロアとに分け、フロアに関してはその構造的な特徴に基づいて、複数のエリア (B2F では 69, B3F では 26 のエリア) に分割した。エリアの境界は、主として階段の上下端や隔壁などであるが、平面形状や移動経路などを考慮して新た

に境界を挿入し、連続したスペースをさらに細かく分割した。また、G線ならびにN線のプラットホームの端には、境界を設けて人が線路上に転落することのないようにしたほか、列車への乗降口を模したエリアをそれぞれ4箇所設定した。

2) 移動パターンとしては、「地上から各プラットホーム」、「各プラットホームから地上」、「G線プラットホームからN線プラットホーム」、「N線プラットホームからG線プラットホーム」の4つとし、これに浸水時の「避難誘導」パターンを加えた5つを考える。なお、N線からC線へ、あるいはC線からN線への移動に関しては、「プラットホームから地上」あるいは「地上からプラットホーム」への移動の一つとして取り扱った。

3) 各エリアに対して上記のパターン毎の移動（避難）目標点を設定する。ここではそれぞれ複数の選択肢を用意し、乱数によりそのいずれかを選ばせることにした。ここでの取り扱いは、「〇〇の方向に移動したい人はこちらの方向を目指せばよい」という指針を示していることに相当する。

4) 各プラットホームを目指して移動する人は、最終的には列車の乗降口のひとつに到着することで一連の移動を終え、その後の移動を選択する。具体的には、(a) そのままもう一方のプラットホームを目指して移動する、(b) 地上を目指して移動する、あるいは、(c) 列車に乗り込んでこの空間から姿を消すものとする。ただし、(c) の場合には、地上からの連絡階段のひとつを選択し、その入り口から新たな利用者がプラットホームを目指して移動を開始するものとして取り扱う。また、「プラットホームから地上」を目指して移動してきた人が、その目標とする地点に到達したときにも、同様の取り扱いを行う。これは、避難行動として移動してきた人が地上に到達した場合を除いて、空間内に存在する利用者の総数を一定に保って計算を続けるためである。

5) 避難目標の設定に当たっては、浸水域が拡大していく区域を避け、できるだけ水に触れることなく、しかも過度の密集を避けて地上へと到達できるように留意した。この経路設定こそが本研究の目的のひとつということもできる。なお、ここでは地上に直接出る代わりに、一部の人をあえてC線のプラットホームへと導くようにすべきとの結論に到った。

6) 利用者の歩行速度については、浸水深・流速（あるいは比力）に加えて性別・年齢層により値が異なることが実験的に明らかにされている。本解析では、この浅井・石垣・馬場・戸田らの研究成果³⁾を適用する。ただし、提案された評価式により与えられる速度は人の単独歩行時のものであり、群集密度（床

1m² 当りに存在する人の数）が高くなるほど歩行速度は低下することがわかっている⁶⁾。そこで、ある計算格子における水深ならびに流速に応じて定まる歩行速度を v_0 としたとき、これに群集密度の関数として与えられる歩行速度の低減率 r_p を乗じた値がここに位置する人の歩行速度となる。この取り扱いに関しては、著者らのこれまでの研究におけるものと同一であり、詳しくは文献⁶⁾を参照されたい。

7) 平時に移動していた利用者が避難行動へと移行する判断については、次のように考える。避難すべきとの判断は、(a) 視野の範囲内に水があることを認識した場合と、(b) 既に避難を開始した他者の動きに不安を抱き、やがて危険を察知した場合のいずれかのタイミングでなされ则认为。眼科医学的知見によれば、視認距離は5 mとされることから、この距離の範囲内に水があると認識した場合には、避難を開始するものとした。一方、他者の移動に関しては様々な取り扱いが考えられるが、数値解析上は次のような基準で判断を下すことにした。すなわち、避難行動をとっている他者とすれ違った回数がN回となった時点で避難を開始するものとした。ここでは、他者を認識する範囲を半径1m以内とし、Nを100とした。この数値は試行錯誤の末に定めたものであるが、今後検証に耐えうる情報が得られた時点で再度見直す必要があると考える。従って、定性的には有益な知見が得られると期待される一方で、避難完了時間などはひとつの目安に過ぎない。これに関しては実際の人の行動に関する検討とあわせて今後の課題とする。

3. 結果と考察

図-2は、浸水解析ならびに避難行動解析の結果の一例をまとめたものである。地下空間の構造上の理由から、図-1(b)に描かれているB2Fの南側通路部分が浸水することはない。そこで、ここに到る図中の青丸No.10の階段を上り切ることができれば十分に安全な場所に到達したことになる。図-2においてこの部分の結果が示されていないのは、このためである。ただし、本避難解析においてはこの南側通路部分における人の移動についても計算を行っている。空間利用者の総数は、前述の調査結果を踏まえて1000人とし、歩行速度を評価する上で必要となる年齢層については仮に成人を90%、高齢者を10%とした。ここでは、簡単のため、いずれも男性であるとした。この図には色分けして浸水深のコンター図が示されているほか、各利用者の位置を点（成人を青点、高齢者を赤点）で示してある。この

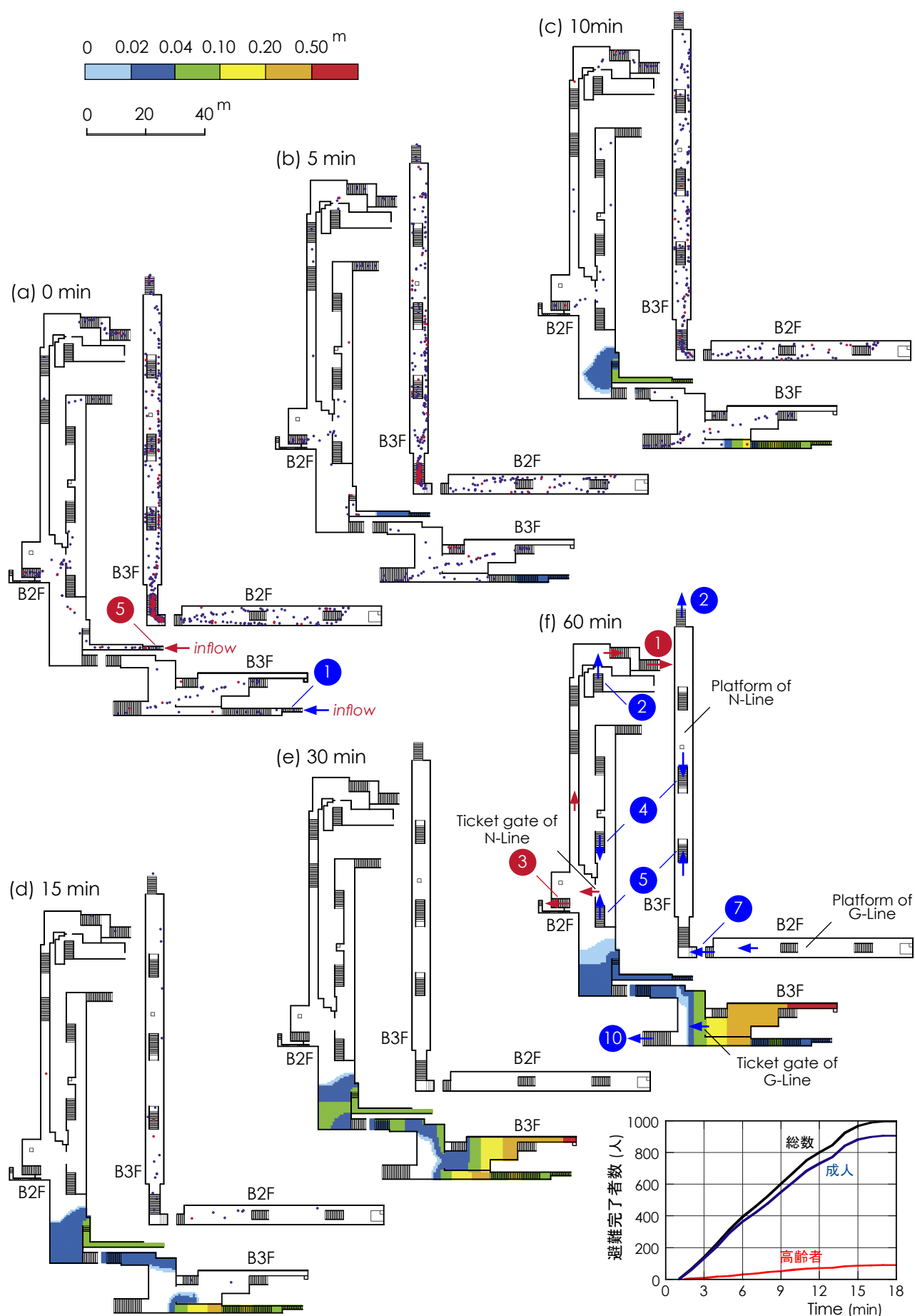


図-2 地下空間の浸水深コンター図と利用者の避難状況：図中の青色の点が成人，赤色の点が高齢者の位置を表す。また，右下の図は，避難完了者数の時間変化を表しており，総数に加えて，参考までに，成人と高齢者の内訳も示してある。

図について簡単に説明を加える。本解析では、利用者の初期位置を乱数を用いて設定し、初速度ゼロの条件下で15分間にわたって助走計算を行った後に、本計算に移行するものとした。この助走計算で再現される移動こそが浸水のない平常時における利用者の移動ということになる。そこで、この移動パターンが可能な限り実状に近いものとなるように試行錯誤を繰り返した上で、エリアの分割ならびにそれぞれの移動目標を確定した。そして、図-1中に示された $t=0$ が助走計算終了時刻を表し、その1分後に浸水が始まるとした。なお、利用者1000人の避難が完了したのは浸水開始から約17分後であった。利用者の初期位置を変えて行った一連の数値解析の結果から、次のような知見が得られた。

(1) 浸水過程に関しては、時間の経過とともに浸水域が拡大することになるが、地下3階(B3F)にある地下鉄G線の改札付近の標高の特に低い区域に向かって水が集められるように流れ下る。ここで対象とした降雨の条件下では、浸水開始から60分程度で平衡状態に近づき、その浸水深は上記の改札付近で0.3m(一部区域で最大で0.7m)程度となるとの結果が得られた。なお、浸水は63分間にわたり継続した。

(2) 地下2階(B2F)の浸水域が限られており、さらに北側にまで及ばないのは、この付近の床が北に向かって緩やかな登り勾配をもつためである。もし仮にこの部分が水平であったとすると、浸水域はさらに北に及び、やがては地下鉄N線の改札口を経てプラットホームにまで及ぶ可能性がある。

(3) 浸水時の避難経路としては、図-2(f)に矢印で示した方向をたどるルートが望ましいとの結論に到った。すなわち、地下鉄G線のプラットホームにいる人は、青丸No.7の階段を下ってN線のプラットホームへ、N線のプラットホームにいる人については、その一部を北に誘導することにして青丸No.2、赤丸No.1の階段を経由してC線のプラットホームへと向かわせる。ただし、この一部は青丸No.4または5の階段を経てB2Fに移動させる。このB2Fにいる人は赤丸No.3を経て地上へと誘導するか、赤丸No.1の階段を経てC線方面へと向かわせる。一方、G線の改札口があるB3Fにいる人は青色のNo.10の階段へと誘導する。

(4) 避難を呼びかけるアナウンスを流した場合を想定した解析によれば、青丸No.7ならびに赤丸No.1ならびにNo.3の階段に人が殺到し、極めて高い群集密度となることが理解された。これはほとんど歩くことのできない混雑状態であり、将棋倒しなどの二次的な被害が生じる危険性が高い。避難を呼びかけるアナウンスについては慎重に行うべきである⁴⁾。

なお、図-2を見てもわかるように、青丸No.7の階段は群集密度が高くなる隘路ということができ、避難誘導に当たっては十分な注意が必要である。

4. 結論

本研究では、地下鉄駅を含む複雑な構造を有する地下空間を対象として、浸水ならびに避難行動解析モデルを考案し、数値解析を行った。その結果として、この地下空間の場合には浸水が一部区域に限られることなどその拡大過程が明らかになった。また、多くの計算を繰り返した結果、この浸水時にはどのような経路を選択して避難誘導を行うべきかの案を提示することができた。モデルには避難行動開始条件をはじめとしてさらに検討すべき点が残されている。モデルの妥当性を検証するための情報を得ることとあわせて、今後の課題としたい。

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)を受けるとともに、東京地下鉄(株)からは様々な情報の提供を受けました。ここに記して謝意を表します。また、本解析を行うに当たり石垣朝子君、寺西美里君(当時、早稲田大学学生)の協力を、本論文のとりまとめに当たり風間大彰君(早稲田大学大学院学生)ならびに大野龍馬君(早稲田大学学生)の協力を得ました。

参考文献

- 1) 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, 601-606, 2005.
- 2) Sekine, M. and Nakamura, J.: Numerical simulation of inundation in underground space in highly urbanized area in Tokyo, Proc. of the 8th International Conference on Urban Drainage Modelling, 2-C1, 2009.
- 3) 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, 859-864, 2009.
- 4) 関根正人, 本山量啓: 地下空間浸水時の避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第52巻, 847-852, 2008.
- 5) 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, 583-588, 2006.
- 6) 岡田光正, 吉川勝行, 柏原士郎, 辻 正矩: 建築と都市の人間工学, 鹿島出版会, 1977.

(2009. 9. 30 受付)