

地下空間浸水時の避難行動解析と その実空間への適用

NUMERICAL SIMULATION OF EVACUATION MOVEMENT AND ITS APPLICATION TO AN ACTUAL UNDERGROUND SPACE

関根正人^{1*}・大野龍馬²

Evacuation movement of persons from an inundated underground space was investigated in this study. Numerical simulation model was developed to investigate such movement. In this simulation, the persons were guided to evacuate along a recommended route which enables them to evacuate on foot without walking in coming water. As the result of this study, it was confirmed that the guide was effective to make an orderly and safe evacuation from the space. This kind of simulation must be effective before we make a plan or find a route of evacuation in order to make a human damage minimum.

Key words: , *underground inundation, evacuation, urban inundation, numerical simulation*

1. 序論

地球規模の気候の変調に伴い，わが国でもこれまで以上に規模の大きな豪雨に見舞われるようになった．東京でも内水氾濫が頻発する傾向にあり，2011 年も 8 月 26 日午後には局地的集中豪雨が発生し，羽田をはじめ都内各地で被害が出ている．豪雨が都市を襲った場合に，最も深刻な被害となるのは地下空間であるといえよう．この点は広く認識されるようになり，その被害を軽減するための対策が検討されつつある．東京などの大都市に開発されている大規模地下空間の中には複雑な構造を持つものが少なくない．この被害を軽減するため，下水道ネットワーク上に貯留能力を有する管を増設する対策がなされているほか，土嚢や止水板が用意されるなど，可能な限りのハードウェア上の対策が進められている．しかし，近年の自然の猛威を目の当たりにすると，これらの対策だけで完全に被害を食い止められるとは言えない．このため，大規模地下空間の場合には，どの階段を通じて水が侵入し，浸水範囲が拡大していく可能性があるのかを予め知り，浸水時にはどのようなルートをたどって利用者を避難誘導すればよいのかという情報をもっておくことが望ましい．

このために有用と言えるのが「浸水ならびに避難

行動に関する数値シミュレーション技術」である．著者らは，これまでに東京都心部の大規模地下空間を対象に，浸水解析^{1), 2), 3)}を行ってきた．また，浸水時の利用者の避難誘導に関わる数値シミュレーション手法に関する検討も進めてきた^{4), 5)}．本論文では，これまでの避難行動シミュレーション手法を見直し再構築するとともに，これを都心部に位置する地下鉄駅に適用した場合の解析結果について説明する．この手法の妥当性の検証には，平常時の夕方を対象として管理者により行われたパーソントリップ調査の結果を用いた．

本研究と関連する既往の研究については，引用文献にあげたようなもの^{5), 6), 7)}がある．浸水時の歩行行動については，実物大模型を用いた歩行実験^{6), 7)}が行われ，今後の研究の基礎となる有益な知見が得られている．本研究では，この成果を踏まえて利用者の行動解析モデルを構築した．

2. 解析の概要

(1) 浸水解析

本研究で対象とする地下空間は，主として地下鉄のプラットフォームや改札口などの駅施設と，そこに向かう経路としての連絡通路・階段から構成される．

キーワード：地下浸水，避難，内水氾濫，数値シミュレーション

¹ 正会員 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），E-mail: sekine@waseda.jp

² 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科（同上）

図-1にこの地下空間の概略図を示した。図よりわかるように複層の構造になっているほか、通路が複雑に延びている。また、同じフロアであっても微妙な高低差があり、実際にはかなり複雑な構造となっている。本研究では、この空間の管理者から提供された情報に基づき、これらを忠実に再現した浸水解析を行った。なお、この解析は、地上の内水氾濫解析、すなわち道路上ならびに下水道内の雨水の流れの解析とともに行われた。なお、ここでは実際に浸水被害のあった1999年の豪雨を対象降雨とした。

解析の詳細は、別論文³⁾にて既に公表済みであるため、ここでは簡潔に要点のみ記す。ポイントとなるのは、結果として地上から水が侵入する可能性があるとしてされたのは、この図の青丸のNo.1と赤丸No.5の二つの連絡階段のみであるということである。ここで対象とした雨よりも遙かに強い雨にならない限り、この点は変わらないものと判断している。この空間内で当時どのように浸水域が広がっていったのかを、浸水深のコンター図の時間変化として示したのが図-2である。ここには、浸水開始後5分～60分の各時刻での状況が示されている。なお、この図-2ならびに後掲の図-4において、地下2階(B2F)の南側通路部分が描かれていないのは、この部分が浸水する危険する可能性は極めて低く、避難の際にはこの部分にまで到達すれば十分に安全と判断されるためである。ただし、この部分の解析も他の部分と同様に行われていることを付記する。

(2) 地下空間内における利用者の行動解析

地下空間には一般に複雑な構造を持つものが少なくなく、防火用の隔壁が随所に設けられていたり、フロアの中央に階段や柱があることも稀ではない。このため、一般に見通しはよいとは言えず、ここでの移動は障害物を避けながらのものとなる。本研究では、このような利用者の移動を次のような行動として捉える^{4),5)}。

- (a) 図-1に示された地下空間を複数(B2Fでは70, B3Fでは26)の「エリア」に分割する。各エリアには、移動目標となる座標が線分(「移動目標ライン」)として定められており、この線分上の任意の点を目指して最短距離の移動となるように行動するものとする。この移動目標ラインは、(b)で説明する行動パターン毎に設定される。なお、エリアによっては同じパターンであっても、複数の方向への移動経路の中から、利用者がいずれかを選択している場合がある。このように判断されるエリアでは、移動目標となる線分を複数与えることにする。そして、こうし

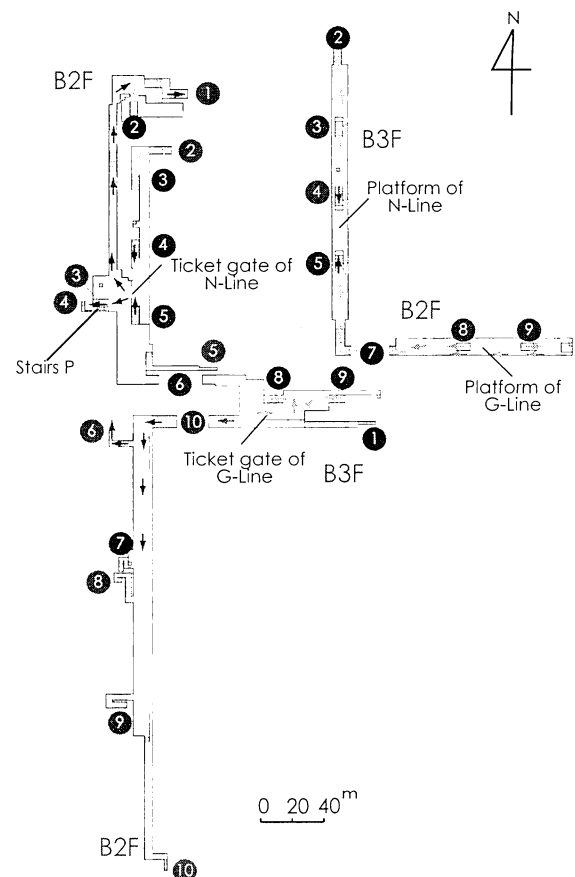


図-1 対象とする地下空間の概要³⁾：赤丸は地下2階から地上への連絡階段、青丸は地下3階から地下2階への連絡階段をそれぞれ表す。赤丸No.5ならびに青丸No.1(これは地下3階と地上とを直接結んでいる)の連絡階段が地上の氾濫水が入り込む経路となる。矢印は著者らの解析によって得られた望ましい避難誘導経路を示す。

た線分上のどの点を目指して移動するかは一樣乱数を用いて決定する。

- (b) この地下空間内の場合、N線、G線ならびにC線という3つの地下鉄路線へ乗り降りするための行動がほとんどである。具体的には、(1)地上から各路線のプラットフォームの乗車行動、(2)各プラットフォームから地上へ到る降車行動、(3)G線とN線の間(図-1中青丸のNo.7階段経由)ならびにN線とC線間の乗り換え行動の三つが考えられる。平常時は以上の通りであるが、浸水時にはこれに避難行動のパターンが加わることになる。避難行動を開始する条件については後述するが、これが満足された瞬間に、そのエリア毎に指示されている方向へ向かって避難行動をとるパターンを「誘導避難」と呼ぶ。
- (c) 浸水時の利用者の行動を解析するには、浸水開始時点での利用者の総数や、その個々の位置ならびに移動速度を定める必要がある。これらの値は、本来、平常時の行動の結果として決まってくるものである。そこで、本研究では、まず

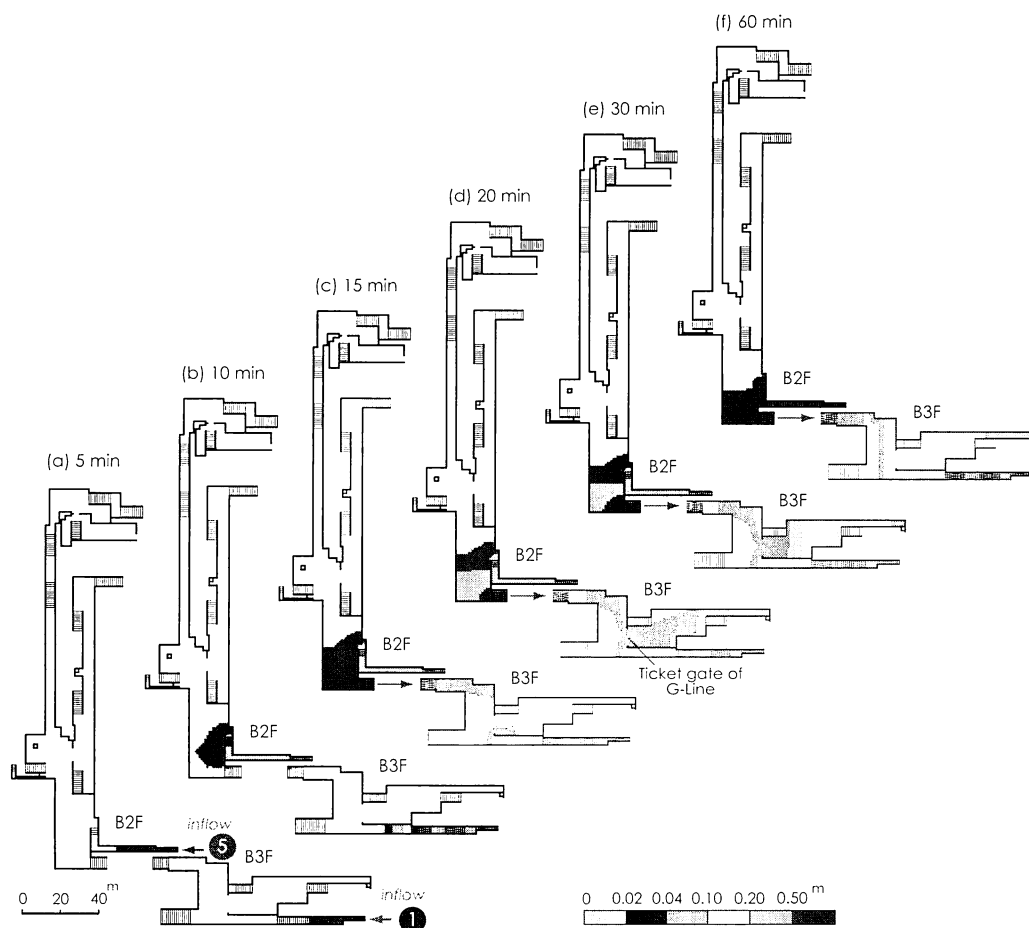


図-2 浸水深コンター図の時間変化：(a) から (f) は各時刻における浸水深を色分けしてコンター図の形で表示したものである。図中に青丸の No.1 および赤丸の No.5 として示された二つの連絡階段から浸水が始まることがわかっている。

第一に利用者の平常時の行動を数値模擬できるようにした。その上で、本解析では、このような計算（助走計算）を1時間にわたって行うことにし、その後に浸水が発生するように取り扱うことにした。

- (d) 本研究では、夕方の帰宅ラッシュ時を想定して解析を行う。この時間帯の平常時の利用者の行動については、地下空間管理者によって行われたパーソントリップ調査の結果がある。そこで、この情報に基づき、解析結果が可能な限りこの調査結果に一致するようにモデルの詳細を定めていくことにした。この結果については、後掲の表-1を参照しながら次章で説明することになる。利用者総数については、試行錯誤を繰り返した結果、これを400人程度とするのが最適であることがわかっている。そこで、上記の助走計算を経て、避難完了者が現れるまでは、空間内にはこの人数の利用者が居続けるものとして取り扱った。
- (e) この空間内の移動は、走ることなく歩いて行われる。人間科学あるいは人間工学の分野研究によれば、 1m^2 を単位としてとられたコントロー

ル・ボリューム内に存在する利用者の人数を「群集密度」と定義すると、歩行速度はこの群集密度に応じて大きく変化するとされる⁷⁾。群集密度が1以下の場合には「自由歩行」と呼ばれ、他者の影響を受けることなく、 1.3 m/s 程度の速度で移動することができる。しかし、群集密度が1を超えると「群集歩行」の状態となり、その値が増加するにつれて歩行速度の値は低減する。本研究では、利用者400人の行動解析の結果から、各コントロール・ボリュームにおける群集密度を求め、上記の関係⁹⁾を適用して、個々の利用者の歩行速度を定めることにした。ただし、浸水時には、この速度で歩行することはできない。これに関しては、浅井・石垣・馬場・戸田⁸⁾により研究が行われており、ここではこの成果に基づき歩行速度を修正する。

(3) 避難行動開始の条件とその後の経路選択

地下浸水時の避難行動を考えると、どのタイミングで避難行動を開始するのか、その後どのような経路をとって避難を完了させるのか、という二つの要因が重要となる。

平常時の行動をしていた利用者が避難行動へと移るのは、次のいずれかが満足された場合であると考えられる。すなわち、(a)利用者がこの空間内に進入した水を目撃し、それと認識した場合と、(b)避難する他者の動きを見て不安を感じて避難を開始する場合である。前者については、眼科医学的知見に基づき、侵入した水が各利用者の半径 5m 以内の範囲に及んだ場合に避難を開始するとした。一方、後者に関しては、各利用者から半径 1m の範囲内を避難する他者をある人数以上目撃した場合に避難を開始するとした。この半径 1m という距離は、混雑時であっても避難者の表情を認識できる範囲という意味で設定されたものである。また、この人数は、浸水に対する利用者の認識の度合によって変化するパラメータと考えてよい。他者の動きを見て避難するという行動は、災害心理学の専門家によっても指摘されており、このような避難行動シミュレーションを行う上で重要である。本論文では、この数値を変えた数多くの数値解析を基に、この人数を 10 人とした場合の結果を示す。

避難誘導を考える上で重要となるのは、各エリアにおける移動目標をどのように設定し、全体として望ましい避難経路をいかに見いだすことができるかということである。その際、(a)可能な限り浸水する可能性のある区域を避けること、(b)しかも過度に混雑する地点を経由しないこと、(c)走ることなく歩いて避難を完了できること、などに留意することが望ましい。本研究では、前述の地下空間において浸水が生じた場合を検討の対象とし、避難目標を変化させた一連の数値シミュレーションを通じて、試行錯誤の末に最も望ましい避難経路を見いだすことを目指した。

このような地下空間について考えたとき、浸水に伴う被害が最も大きくなると予想される時間帯は、夏の夕方への帰宅ラッシュ時である。この時間帯における地下空間の利用者は、その大半が周辺にある官庁や商業用のビルからの通勤客や日常的にこの駅で乗り換え行動をしている人であり、観光客などの不慣れた利用者はほとんどいないと判断される。ここでは、この点を踏まえて解析を行った。

3. 結果と考察

(1) 利用者の平常時行動を対象とした検証計算

この地下空間では、平常時の 17:00 ～ 18:00 を対象とした「利用者の行動調査（いわゆるパーソントリップ調査）」が管理者により行われている。本研究では、まず最初にこの平常時の移動行動を対

表 -1 平常時行動解析の検証結果

注目断面における移動方向	通過人数 (person/h.)	
	調査結果	解析結果
N 線改札口から出	806	1,283
N 線改札口から入	2,672	2,404
G 線改札口から出	1,559	980
G 線改札口から入	4,083	4,531
N 線から G 線へ乗換	2,401	2,547
G 線から N 線へ乗換	2,674	3,155
N 線から C 線へ乗換	659	586
C 線から N 線へ乗換	403	707

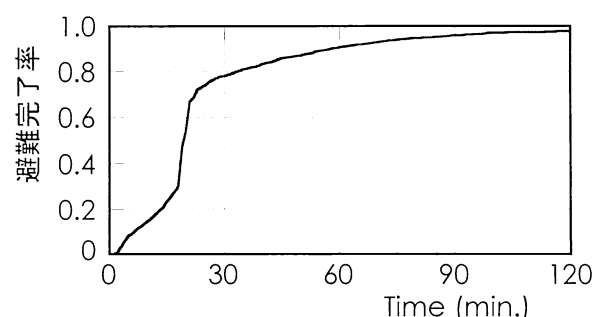


図 -3 避難完了率の時間変化

象とした数値解析を行った。そして、その結果と調査結果とを比較することにより、ここでの解析手法によって群集として利用者の平常時行動がどの程度まで再現可能かについて検証した。本解析は、助走計算開始時の個々の利用者の座標を定める際に乱数を用いているほか、利用者がそれぞれのエリア内に進入した直後に避難目標点を決定する際にも乱数を用いている。このことは、解析を行うたびに得られる結果が微妙に異なることを意味する。そこで、本解析では合計 10 回のシミュレーションを行い、その結果を平均化するなどして、平均的な移動行動パターンをつかむことにした。

表 -1 には、図 -1 に記された地下空間内の特定の断面を対象として、そこを 1 時間あたりに通過した利用者の人数がまとめられている。解析結果として示したのは、群集としての行動が定常状態に達したと判断される時間帯におけるものである。この表には、N 線と G 線の改札口をそれぞれ出入りした人数、G 線と N 線を結ぶ階段（図 -1 に青丸 No.7 として示されたもの）を通じて乗り換えた人数、青丸 No.2 ならびに赤丸 No.2 の階段を通じて N 線と C 線の間で乗り換えた人数、がまとめられている。調査結果と解析結果を比較すると、N 線と C 線との間の乗り換え人数にのみ差が認められるものの、これを除けば両者は概ね一致する結果といえる。

なお、浸水時の避難行動に関しては、これを検証するデータが得られていないため、現時点ではこれ以上の検証をするのは難しいと判断している。

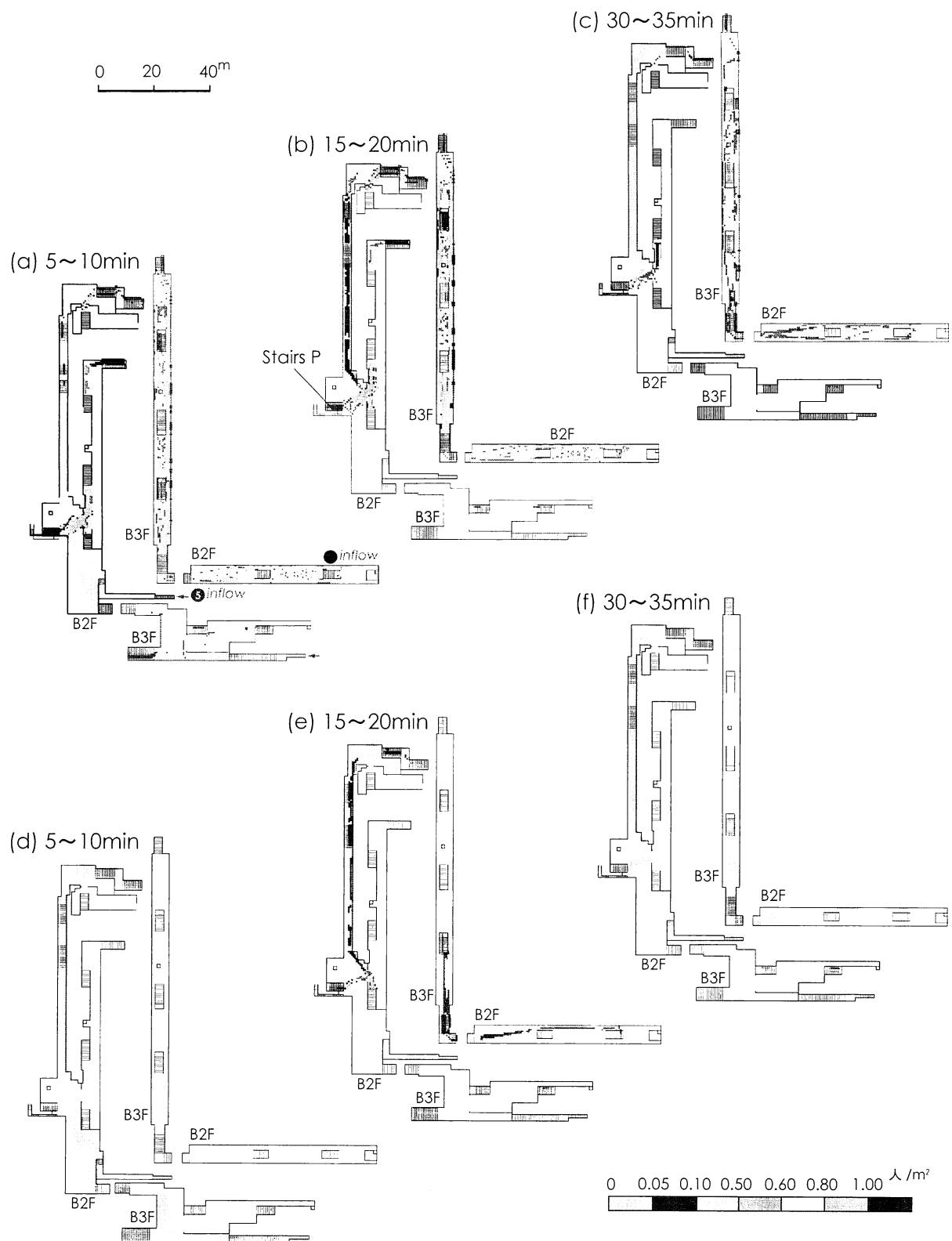


図-4 利用者の群集密度コンター図の時間変化：それぞれ対応する5分間にわたって平均化された群集密度を表し、その大小によって色分けして図化されている。上段の(a)～(c)は地下空間内にいるすべての利用者を対象とした群集密度を、下段の(d)～(f)は避難行動をしている利用者のみを対象として算定された群集密度を、それぞれ表している。

(2) 避難誘導経路の選択と誘導戦略

本研究では、避難誘導経路を見いだす上での方針を以下のように考えた。すなわち、(a) 今後予想される強い雨に対しても浸水が及ぶことがないと判断さ

れたC線のプラットフォーム(図-1の右上方に位置し、赤色のNo.1またはNo.2の階段を経てそこに到達することができる)に向かって一部の利用者を誘導し、そこから地上へゆっくりと避難させる。(b)

地下2階の南側部分は同じく浸水の危険のない通路であるため、地下3階にあるG線改札口付近にいる利用者の一部は、この通路へと誘導する。(c)この地下空間の場合には、図-1中にStair Pと記した赤丸No.3の階段を通じて、多くの利用者が出入りしている。浸水時にもこの階段において過度の混雑が発生する可能性が高く、二次災害が懸念される。上記の(a)と(b)の誘導は、浸水区域に近寄ることなく、しかも主要な避難経路となるこの階段の混雑をすこしでも緩和することをねらったものである。

以上のことを考慮し、試行錯誤を繰り返した上で選定された避難誘導経路を図-1中に併記した。図中の矢印がこの空間内の推奨される経路であり、細かな移動の方向がわかるように色を変えて示した。

(3) 誘導を受けた利用者群集の避難行動

図-3および図-4は数値解析により得られた利用者の避難行動をまとめて図示した結果である。図-3は利用者の避難完了率の時間変化を表している。ここに避難完了率とは、その時刻までに避難を完了した利用者総数の初期人数(=400人)に対する比を表している。図-4は各地点における避難者の群集密度をコンター図の形にまとめたものであり、たとえば(b)は、この空間内の混雑の度合いがピークとなる浸水開始20分後から25分後までの5分間の群集密度の平均値が示されている。また、この図の上段には、各時間帯においてこの空間に止まっている全利用者を対象に算定された群集密度が示されているのに対して、下段には避難行動をしている利用者だけに限って求めた群集密度に関する図が示されている。詳細な検討の結果として、図-1に示した避難経路に沿って誘導を行うことにより、大きな混雑を起こすことなく、順調に避難が進むことが確認され、その様子は図-4からも見てとることができる。なお、別途行っている単純避難の場合には、たとえば前述のStair Pにおいて遙かに大きな混雑が生じるという結果を得ており、上記の判断はこれとの比較においてなされたものである。

なお、ここでは特に考慮していないが、この地下空間の場合には地下2階(B2F)に位置するG線のプラットフォームが浸水する可能性はない。そこで、このプラットフォーム上に止まって動かないという難の逃れ方もあり得る。このような誘導も選択肢のひとつとなると考える。

4. 結論

本研究では、地下鉄駅を含む複雑な構造を有する

地下空間を対象に、浸水が拡大していくプロセスを明らかにするための数値解析と、浸水時の避難誘導に関わる数値解析とを行った。ここでは、平常時に行われた空間内の移動行動調査の結果を用いて解析モデルの妥当性を検証した。また、「避難する他者の動きを見て自らも避難を開始する」という行動に注目して、避難開始条件についての検討を行った。次に、浸水時の避難誘導経路に関する検討を行い、経路選定に当たっての考え方を示すとともに、数値解析を通じた試行錯誤を通じて望ましい経路を見いだした。その避難誘導の効果の一端は数値解析の結果から見てとることができる。また、このような「誘導避難」を行うことにより、二次災害が懸念される連絡階段への利用者の集中が回避され、走ることなく効率よく避難誘導できることを示した。今後はさらなるモデルの検証とともに、多くの地下空間にこれを適用して実用に供していく予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり東京地下鉄株式会社より情報の提供を含めた協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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 / II-71, 47-58, 2005.
- 2) 関根正人, 河上展久: 都市域における内水氾濫と地下鉄駅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29巻, 595-600, 2005.
- 3) 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.
- 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) 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56巻, 961-966, 2011.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 岡田光正: 群集安全工学, 鹿島出版会, 2011.