

2. 本検討の目的, 位置づけ

本検討では、これまで国内外の津波避難検証で活用されている広域群集シミュレーション手法を用いて、避難誘導情報がない無制御状態と周辺エリアの関係機関が連携して誘導制御ができた状態を比較して、その改善効果とそれを実現する情報施策の方向性や課題について検証を行う。

人が多く集まり、災害時に群集避難が発生する可能性のある施設の一つとして、大規模ターミナル駅が上げられる。表-1は国内の駅について、1日あたりの平均乗降者数が多い上位10駅を示したものである。また、混雑時の駅の様子を写真-1に示す。最も乗降者数が多い新宿駅では、1日あたり360万人以上の利用者がいる。上位には東京都内の駅のほか、大阪駅・梅田駅、横浜駅、名古屋駅といった駅でも100万人以上が利用している。本検証対象は、大規模ターミナル駅周辺の各施設から一時避難場所と広域避難場所、それらを繋ぐ歩道等をネットワーク空間として、群集（エージェント）を整然と誘導制御する情報発信のあり方を避難想定シナリオとして設定し、群集シミュレーション手法（以下、マルチエージェントモデルと記す）を活用して検証を行った。

表-1 駅別1日あたりの平均乗降者数（2008年）⁸⁾

順位	駅名	1日平均乗降者数(人)	順位	駅名	1日平均乗降者数(人)
1	新宿駅 (西部新宿線を含む)	3,607,498	6	名古屋駅	1,147,237
2	池袋駅	2,711,067	7	東京駅	1,133,169
3	大阪駅・梅田駅 (北新地駅を含む)	2,411,717	8	品川駅	913,182
4	渋谷駅	2,150,361	9	高田馬場駅	906,124
5	横浜駅	2,105,964	10	難波駅 (大阪難波駅、JR難波駅を含む)	867,923



写真-1 混雑時のターミナル駅の様子

ここでは、避難は歩行者のみを対象として車による避難や火災発生等による影響は考慮しないこととする。

対象とする施設は、在来線、私鉄、地下鉄等の駅構内といくつかの街区に分割した大規模オフィス、行政庁舎、商業施設を設定した。大規模施設では、施設内避難階段からの避難者を公開空地やロビーなどに一時的に滞留させる退避空地／一時避難場所を設けた。また、発災直前

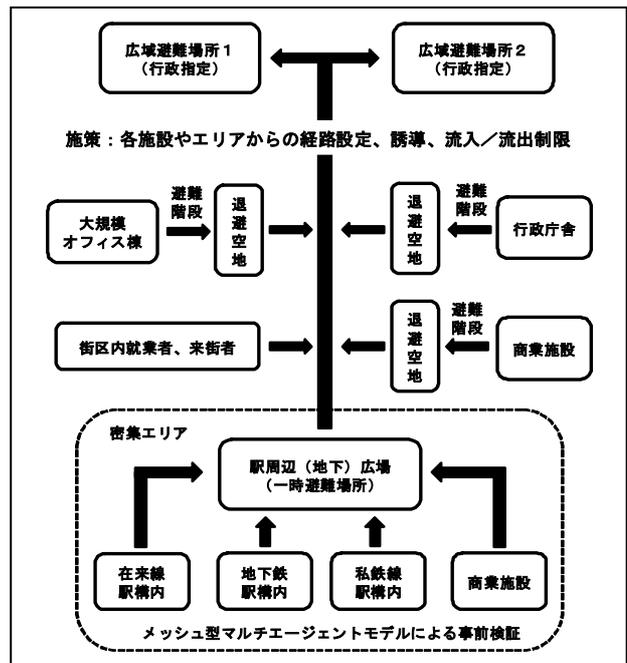


図-2 本検討の誘導制御, 避難行動

の歩道上の歩行者や一時避難場所と各施設からの避難者が、行政が対象エリアで指定している広域避難場所を最終目的地として設定した。

想定避難シナリオとして、誘導の有無で2ケース、誘導する場合、最短経路で誘導する場合と、特定の経路の混雑を回避するため、経路を分散して誘導する場合、合わせて3ケースのシナリオを想定し、その改善効果と現実的にそれを実現する情報施策の方向性と課題について検証を行った。想定した3つのシナリオについての説明を以下に示す。

① シナリオ1：避難情報無策のケース

どこに避難するかは各避難者が判断すると想定する。避難地点が明らかに近い場合は最寄りの広域避難地点に向かって避難行動を行うが、2つの避難地点が近傍にあり、距離が同程度の場合、1/2の確率でどちらかの避難地点を選択し避難を行う設定とした。

② シナリオ2：最寄りの広域避難場所へ誘導

鉄道事業者や周辺施設関係者等が避難開始地点から最寄りの避難地点へ向かうように誘導を行う。全ての避難者が最寄りの避難地点へ向かうため、対向流が現れず円滑に避難が行われると考えられる。

③ シナリオ3：特定の広域避難場所への集中を抑制

全ての避難者が最寄りの避難地点に向かうと、特定の避難完了地点に避難者が集中することが予想される。そこで、シナリオ2の結果を踏まえ、1つの避難経路に集中することを抑制するため、避難者の誘導を行う。

なお、対象エリア内で最も避難群集の混雑が高いと予想される駅周辺広場（密集エリア）の状況は、予めメッシュ型マルチエージェントモデル(図-3)により検討を行

い、その結果をネットワーク型マルチエージェントモデルの入力データとして適用した。ここで採用したメッシュ型モデルは、これまで商業施設、イベント会場、駅ビル⁸⁾などの旅客流動シミュレーション検証で使用しているモデルを使用した。(図-4)

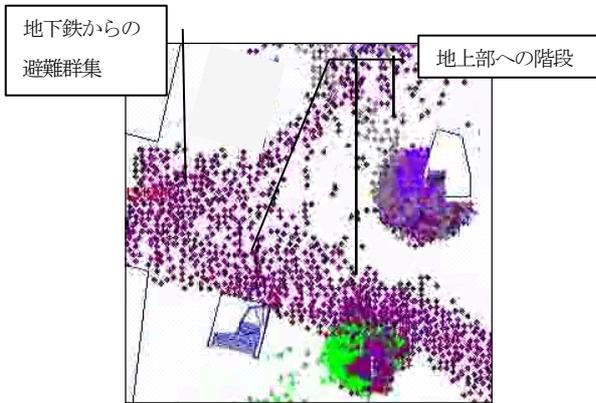


図-3 メッシュ型マルチエージェントモデル検証図



図-4 メッシュ型モデルによる駅ビル火災避難検証例

3. シミュレーション設定

(1) ネットワークシミュレーション概要

本検討では、大規模ターミナル駅とその周辺施設からの避難行動について検討するため、比較的広い範囲のシミュレーションを行う必要がある。そこで、多人数、広範囲の対象をシミュレーション可能なネットワーク歩行型のマルチエージェントモデルを活用した。

ネットワーク歩行型のマルチエージェントモデルは、対象空間の道路形状を点(ノード)と線(リンク)で表現した道路ネットワークをシミュレーション空間モデルとする(図-5)。また、目的地に該当するノードをゴール地点ノードとする。

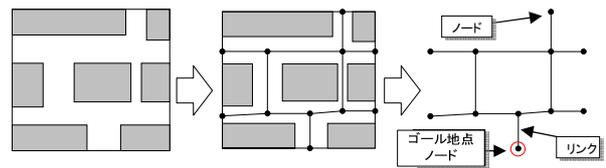


図-5 実空間からのネットワーク空間抽出

この道路ネットワークのノード上を避難者がゴール地点ノードに向かって移動する。道路形状をネットワーク空間として簡略化して表現しているため、比較的広い範囲を対象としてシミュレーションすることが可能であり、また、避難者はノード上を1次元的に移動するため計算コストが低く、数万人単位のシミュレーションが可能である。図-1に示した津波対策の広域避難シミュレーション例は、上記のネットワークシミュレーションで行われており、対象範囲は6km×4km、10万人の避難行動のシミュレーションを行った実績がある。

(2) 対象空間

シミュレーション対象領域は、大規模ターミナル駅周辺を想定した約850m×800mとした(図-6)。地震発生後、この範囲内のビルや駅に存在する人々が広域避難場所として指定されている西側避難地点(図-6左側)と東側避難地点(図-6右側)へ避難する状況のシミュレーションを行う。

今回使用したネットワーク空間のリンクを青線、ノードを赤点で示した。地震発生後も道路に多くの車両が存在すると想定されることや緊急車両用に道路を確保する必要があるため、避難者が通行可能な道路は歩道のみを設定した。

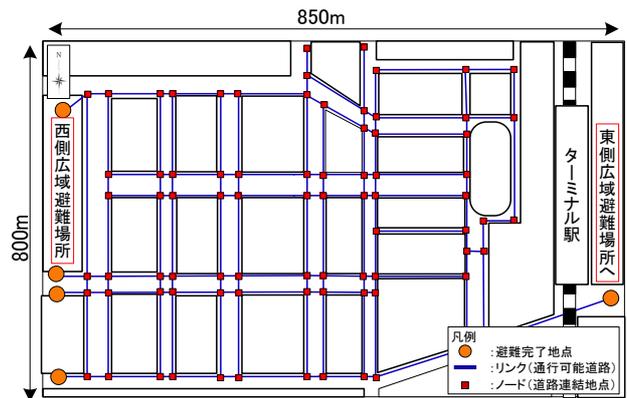


図-6 シミュレーション対象空間と歩行可能な道路ネットワーク

(3) 避難行動設定

- ・徒歩での避難行動のみを対象とし、車や自転車といった交通手段は考慮しない
- ・非常時を想定しているため、信号による歩行者の制御は行わない。
- ・移動速度について、

歩行速度を決定する式と速度前方密度の関係を以下に示す。歩行速度は、自由歩行速度を上限とし、歩行者前方の密度に応じて速度を動的に低減させることとした⁵⁾。ある避難者 i の速度 v_i の式と、速度と前方密度の関係のグラフを図-7に示す。

$$v_i = \begin{cases} V_i & (0 \leq \rho < \rho_i) \\ 1.8\rho^{-1} - 0.3 & (\rho_i \leq \rho < 6.0) \\ 0 & (\rho \geq 6.0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで v_i は避難者 i の自由歩行速度を表す。自由歩行速度は、避難者ごとに平均 1.2m/s、標準偏差 0.2 に従う正規分布で与えた⁸⁾。 ρ は歩行者前方の密度 (人/m²) を表す。 ρ_i は $V_i = 1.8\rho_i^{-1} - 0.3$ を満たす密度である。密度 $\rho_i < \rho < 6.0$ の範囲の速度低減を表す式は、密度 6.0 人/m² で速度が 0m/s となる関数を設定した。

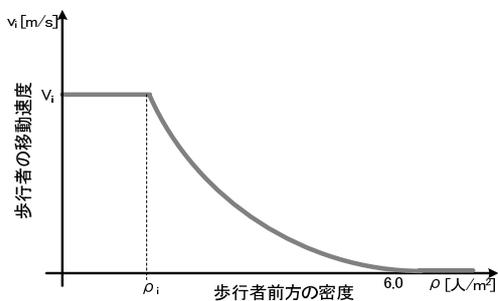


図-7 速度決定関数グラフ

ここで前方密度 ρ とは、対象となる避難者の前方距離 L m × 道路幅員 W m の範囲の密度を表す。避難者の前方 L m 以内の範囲にいる歩行者の数を数え、前方の対象領域の面積で割ることで求める。

すなわち、前方対象領域に n 人の歩行者がいた場合、前方密度は、 $\rho = n/LW$ で表される。本シミュレーションでは歩行者の前方距離 L を 6.0m に設定した。

(4) 避難人数設定

避難人数は対象範囲を 20 街区に分割し (図-8 赤枠)、その街区に建物の床面積を設定し、その床面積から在館者数を推計して設定した。また、街区内に避難可能な空

地がある場合、その街区の避難者はまず街区内地に避難し、空地に避難しきれない避難者が、東西の広域避難場所に向かって避難することとした。千代田区では空地内に避難可能な密度を 1.3 人/m² あたり 2 人を想定していることを参考とし、本シミュレーションでは退避空地に避難可能な密度の上限を簡略化して 2.0 人/m² と設定した。この上限値を超えると街区内から歩道へ避難者が流出することとした。

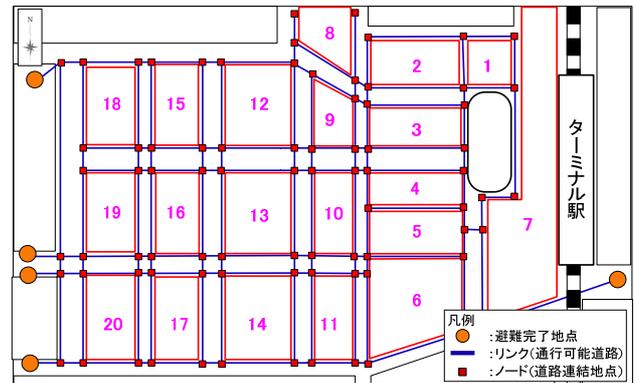


図-8 街区の設定

(5) 避難開始時間

地震は対象地区の人口ピーク時間である 14 時に発生したとする。街区内に退避空地がある街区については、退避空地が満員になったら広域避難場所への避難を開始することとした。街区内に退避空地がない街区については、地震発生から 20 分後¹⁰⁾ (時刻 14 時 20 分) に避難を開始することとした。

(6) 評価項目

シミュレーションを行い、その避難状況の動画を作成した。シミュレーション動画では、避難者の前方密度が高いときは赤、低いときは青といったように、密度の高低に応じて避難者の色を変更して表現した。また、街区に付属する退避空地についても、密度の高低によって退避空地の色を変化させた。これにより、退避空地の密度が徐々に増加する様子を表現した。以下では、避難者、退避空地の色と密度の設定について述べる。

a) 避難者の前方密度表現

群集流動において、密度が 4 人/m² 以上になると群集は低速あるいは停止するといった滞留状態になるといわれる¹¹⁾¹²⁾。そこで、前方密度が 0 人/m² のときは青色、4 人/m² 以上では赤色とし、その間の密度では、青色から赤色へと連続的に繋がる色で、避難者の色を表現した。

図-9 は避難者の前方密度を上記の設定で色分けして

表現したものであり、図中紫の矢印は避難方向を表す。避難者が3方向から合流する地点では、密度が高くなるため赤色で表現される。列の先頭にいる避難者の前方密度は0人/m²となるため青色、その近くの避難者の前方密度も比較的lowく、青～緑色で表現されている。

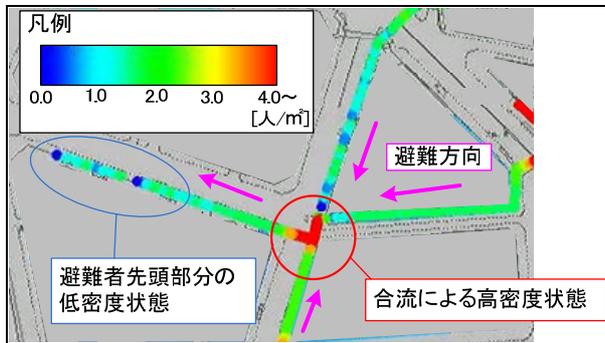


図-9 避難者の密度表現凡例



写真-2 歩道に溢れる人々 (2011. 3. 11 渋谷)

b) 退避空地の密度表現

前述のように、本シミュレーションでは退避空地に避難可能な人数の上限を1 m²あたり2人と設定した。そこで、退避空地の密度表現は、密度0人/m²のときを青色、避難可能な密度の上限値2.0人/m²を赤色と設定し、その間の密度では、青色から赤色へと連続的に繋がる色で退避空地密度を表現した (図-10)。

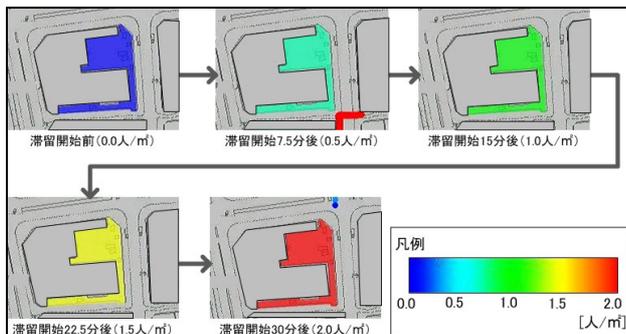


図-10 退避空地の密度表現

4. 結果

(1) シナリオ1：避難情報無策ケース

シナリオ1で高密度状態が継続した地点を図-11に示す。次ではそれぞれの地点の滞留の様子について述べる。

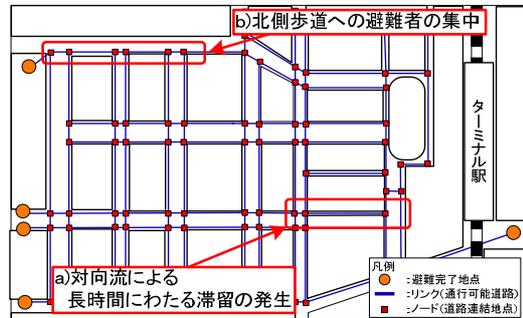


図-11 シナリオ1における問題地点

a) 対向流による長時間にわたる滞留の発生

誘導を行わないケース(シナリオ1)では、東側へ避難する避難者と西側へ避難する避難者とで対向流が発生する(図-12 左)。そのため、下図の丸の部分で渋滞が発生する(時系列変化の様子は表-2 シナリオ1を参照)。この影響により、対向流による渋滞が発生した歩道を通り西側へ向かう経路は、約40分間(地震発生より60分後まで)滞留が続く。

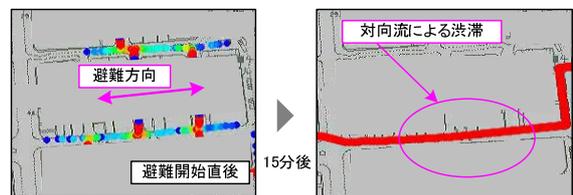


図-12 対向流による渋滞

b) 北側歩道への避難者の集中

最も避難が完了するのに時間がかかる経路は、北側の歩道を通り西側広域避難場所へ避難する経路である。ここでは、多くの街区の避難者が北側の歩道を通り西側広域避難場所の入り口に向かうことにより、長い滞留が形成される (図-13 紫丸)



図-13 北側の歩道での滞留

(2) シナリオ2：最寄りの広域避難場所へ誘導

誘導を行わないケース（シナリオ1）では、避難者が赤枠内で東側に避難する避難者と西側へ避難する避難者との2方向へ避難する様子が見られる。シナリオ2では、全ての避難者が最寄りの避難地点へ向かうため、同じ方向へ避難することとなる。

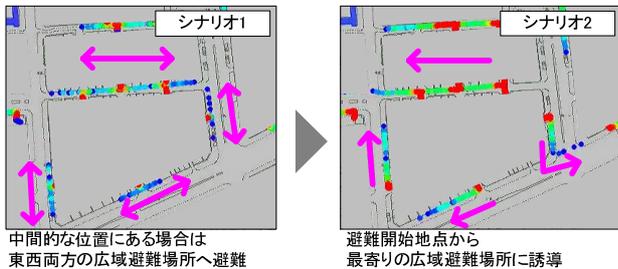


図-14 避難地点の誘導

シナリオ1とシナリオ2の避難状況の様子を比較した図を表-2に示す。避難開始直後の地震発生20分後の様子を比較すると、シナリオ1では避難開始地点から左右両方に避難する様子が見られる。

一方、シナリオ2では最寄りの避難地点への誘導を行うため、同じ避難開始地点から発生する避難者は同方向に避難を開始する。地震発生35分後の様子を比較するとシナリオ1では図中央部分の滞留が解消されずに残っているが、シナリオ2では解消している。これはシナリオ2では対向流が起こらないため、円滑に避難が行われたためであると考えられる。

表-2 シナリオ1と2の避難状況の比較

	シナリオ1	シナリオ2
地震発生二十分後		
地震発生三十五分後		
地震発生四十五分後		

(3) シナリオ3：特定の広域避難場所への集中を抑制

誘導を行わないケース（シナリオ1）に対して、対向流が発生しないよう最寄りの避難地点へ避難するように誘導する（シナリオ2）と、対向流が発生する地点の滞留が緩和された。しかしながら、シナリオ2では、最も長い滞留が発生する北側の歩道を通過して西側地点へ避難する避難者の抑制には繋がらなかった。

そこで、シナリオ3では、北側から避難する避難者を西側広域避難場所の別の入り口、または東側広域避難場所に誘導する設定をし、シミュレーションを行った。

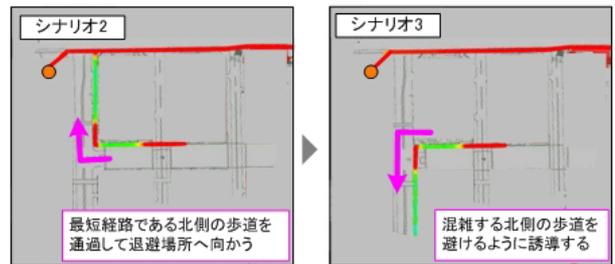
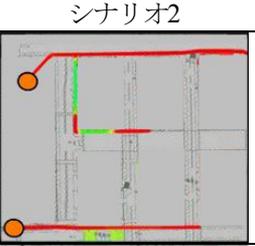
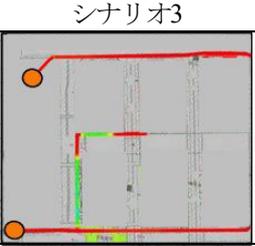
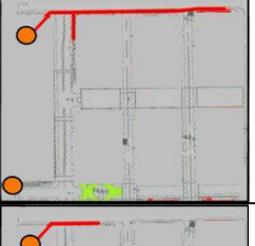
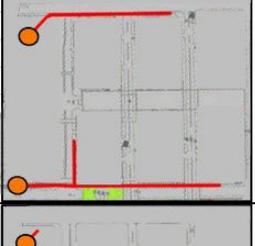


図-15 シナリオ3の変更点

シナリオ2とシナリオ3の避難状況の様子を比較した図を表-3に示す。図中のオレンジ色の丸は避難完了地点を表す。地震発生70分後のスナップショットを比較すると、シナリオ3では、北側の歩道の混雑を避けるように誘導され、南側に移動する様子が見られる。誘導された避難者は、西側中央の避難地点に向かうため、中央部分の滞留が長くなっている。

地震発生100分後を比較すると、シナリオ2では中央部分の滞留は解消されているが、北側の滞留が長く、この滞留が解消されるまで約25分かかる。シナリオ3では、中央部分と北側との両方の滞留が残っており、これらの滞留は約20分後に解消される。シナリオ3では、他の2つのシナリオと比べ、約5分避難完了時間が短縮された。また、シナリオ3では、北側の歩道と中央の歩道の滞留解消時間がほぼ同時であることから、両歩道に適切に避難者を配分されたと考えられる。

表-3 シナリオ2と3の避難状況の比較

	シナリオ2	シナリオ3
地震発生七十分後		
地震発生八十五分後		
地震発生一〇〇分後		

- ・対象エリアの駅乗降客、就業者、就学者、来街者の人数、行動パターンの収集方法
- ・建物倒壊、歩道や道路の遮断、火災等の危険度発生の検討
- ・関連行政機関との情報連携の確認、見直し
- ・待機、避難、制止、経路等の群集制御手段の検討
- ・発災後のリアルタイム状況の把握、指示判断方法
- ・情報発信方法としてのデバイス、コンテンツ
- ・全国大規模ターミナル駅周辺での検討を効率化、促進するためのシミュレーションツールの簡易化等の仕組み構築

また今回は、大規模ターミナル駅を中心とした道路や広場をモデルに検討をおこなったが、このような大規模ターミナル駅には地下鉄や民間ビルが接続され、多くの人が利用している地下空間が存在している。これらの地下空間について、梶や塚越らは地下空間が抱える危険性を4つの側面で整理している。¹³⁾

- ① 物理的な有効避難口の少なさ
- ② 火災発生時の火炎・煙などによる避難路確保の困難さ
- ③ 平常時の人口密集度の高さ
- ④ 方向覚知困難および精神的圧迫感による避難行動の緊迫化

地下空間は閉鎖された空間であり、身近な避難口として機能を果たす出入口も避難時には多くの人が殺到してパニックになる可能性はあるものとして考えておく必要がある。

このような地下空間特有の防災に関して、安全・安心の内容を高めていくためには、避難行動や設備対応等のシミュレーションに基づいた安全性の判断と地下空間内での効果的な避難誘導手法の検討が必要である。今後は、広域的な避難シミュレーションと合わせて、検討内容をいかに地下空間において実際に適用していくか、適用した場合の課題に対処していくか、がますます重要となってくる。いま多くの人が所有している携帯電話等に緊急地震速報が流れる状況と同じように、これからは1人1人の安否情報が容易に確認でき、屋内において正確な位置情報が取れるような災害に対応した環境が、屋内・屋外で整備され、それらの技術検証を行うための役立つシミュレーションを実施していくことが必要であると考えられる。

更に、日本の防災技術は、海外でも強力な「売り物」になるという考えで防災インフラ技術の海外展開が、今後、ますます増えてくる。その一環として、この5月1日に日米がGPSを共同開発し、その利用のひとつに防災をテーマに挙げたことは非常に意味あることと考える。特に最近のアジア諸国で自然災害が多く発生しており、

5. 本検討の成果と課題、今後の展望

本検証では、ターミナル駅周辺をネットワーク空間としてモデル化し、地震発生後の避難行動を群集シミュレーション手法を活用して誘導制御のあり方について検証を行った。これによって以下の知見が得られた。

- ・退避空地に一時的に避難するように誘導することで、歩道に出てくる避難者に時間差が現れ、歩道への避難者の集中を抑制することができる。
- ・特に道路幅員が狭い地点で対向流が発生すると、滞留解消までに多くの時間が必要となるため、対向流が発生しないよう誘導する対策をとる必要がある。
- ・避難誘導計画を想定する際に、群集シミュレーション手法を活用することが有効であることが示唆された。

この検証結果をベースとして、従来の広域防災で指摘されている事項も含め¹³⁾、現実的な情報管理の仕組みを構築していく必要がある。そのため、今後は以下に例記する課題や開発について自治体担当部署や鉄道事業者等との連携を図りながら各関係機関が汎用的、効率的、迅速に状況や判断を共有化できる情報管理モデルの開発を進めていく必要があると考え、以下にその内容を列記する。

- ・関係機関の現行防災マニュアル、防災教育のレビュー
- ・施設、道路、駅、一時/広域避難場所等の図面、収容人数、役割、実施内容の確認

それらを事前に察知することや災害時の避難誘導を GPS で行うことなど、多くの利用が防災の観点で発揮されることを期待する。今回の事例においても海外での検証実績を踏まえたモデルを適用したことは意義があるものと考ええる。

今回は国内の大規模ターミナル駅での避難誘導情報の施策展開案を群集シミュレーションを適用して明らかにした。非常に多くの人々が利用している駅自体の利用方法も変わってきており、駅自体が商業施設となり、都心部の核として多くの人を引き付ける場所となっている。このような状況を踏まえながら、大規模ターミナル駅を中心とした防災に着目し、安全・安心な都市施設となるように計画・設計等を進めていくことが、都市としての安全性を高めるものと考ええる。

参考文献, 研究報告書等

- 1) 「大丸有地区の防災に関する取り組み」 大手町・丸の内・有楽町地区再開発計画推進協議会
<http://www.toshisaisei.go.jp/yuushikisya/231107/2.pdf#search='大丸有 防災'>
- 2) 木下 芳郎, 島村 誠, 三須 弥生, 山田 武志: 上りエスカレーターでの渋滞現象のモデル化とシミュレーションによる再現, 日本建築学会学術講演梗概集. E-1, p.585-586, 2008
- 3) 末松孝司, 木下芳郎, 山田武志: 「大都市大震災軽減化特別プロジェクト (文部科学省)」, 2002 年 4 月~2006 年 3 月, (株) ベクトル総研
- 4) 目黒公郎, 藤田卓: ポテンシャルと VR を組み合わせた新しい避難シミュレーションの開発, 東京大学生産研究所, pp.43-46, 『生産研究』 Vol.54, No.6, A, 2002
- 5) 佐竹健治, 後藤洋三, 山田武志, 印南潤二: JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (インドネシアにおける地震火山の総合防災策), 2009 年-2011 年, 東京大学地震研究所.
- 6) 末松孝司, 山田武志: 「地域減災情報共有プラットフォームシステム開発 (文部科学省)」, 2004 年 4 月~2006 年 3 月, (株) ベクトル総研.
- 7) 木下芳郎, 山田武志, 印南潤二: 「平成 23 年度鐘ヶ淵地区まちづくりにおける効果検証委託」, 東京都都市整備局, 2012 年 2 月, (株) ベクトル総研.
- 8) 駅別乗降者数ランキング,
<http://d.hatena.ne.jp/keyword/%B1%D8%CA%CC%BE%E8%B9%DF%B5%D2%BF%F4%A5%E9%A5%F3%A5%AD%A5%F3%A5%B0#keywordbody>
- 9) 末松孝司, 木下芳郎, 山田武志, 印南潤二: 「駅ナカ商業施設における避難シミュレーション開発 (東京消防庁)」, 2010 年 8 月, (株) ベクトル総研.
- 10) 株式会社サーベリサーチセンター, 宮城県沿岸部における被災地アンケート調査報告書, 2011
- 11) 日本建築学会=編: 建築設計資料集成 [人間], 丸善, 2003.
- 12) ジョン・J. フルーイン, 長島正充訳: 歩行者の空間: 論理とデザイン, 鹿島出版会, 1974
- 13) 梶秀樹, 塚越功編著: 改訂版 都市防災学 地震対策の論理と実践, 学芸出版社, 2012

PEDESTRIAN SIMULATION STUDY TO EVALUATE THE EFFECT OF EVACUATION GUIDANCE AROUND THE LARGE-SCALE TERMINAL STATION

Junji IN-NAMI, Takayoshi SHOGAKI, Fumihiko KAKEHI, Kiyoshi FUKUI
and Takeshi YAMADA

In case the great earthquake hits the urban area in the near future, it is expected tens of thousands of people flow into the large-scale terminal stations and cause chaos for many hours due to the damage of railways and buildings. In this study, we conduct the pedestrian simulation assuming that the walkways connecting the station facilities and emergency shelters will be used as the evacuation route, to evaluate the measures of evacuation control. Specifically, we compare the two cases: uncontrolled chaos with no guidance and controlled evacuees guided by the information provided through the cooperation among the railway company, surrounding facilities and municipal authorities.