

Ⅲ.2 大都市特性を反映する先端的な災害シミュレーションの技術の開発

研究代表者 後藤 洋三 (防災科学技術研究所)

1. 研究の目的

首都直下地震が発生すると死者は1万人を超え、全壊焼失家屋は85万棟に達し、650万人が帰宅困難者となり、112兆円の経済被害が発生すると想定されています(H17年内閣府被害想定、M7.3震源東京湾北部、風速15m)。そこで、この研究は、大都市に特有な高層ビル、地下街、ターミナルにおける地震災害と、帰宅困難者、ならびに同時多発火災の問題を取り上げ、先端的な災害シミュレーション技術を開発・適用して、どのような災害が起こりどのような対処が効果的かを予測し、被害低減の施策を提案していくことを目的としています。

2. 主要な成果

(1) 高層ビル内の地震時安全性とその評価システム

1) 大地震が発生すると、建物が倒壊・大破する被害だけでなく、高層建物内部の天井・壁・扉などの非構造部材や設備機器などが損壊・落下・移動・転倒し、中にいる人が負傷する可能性が大きくなります。また、避難通路を断たれるといったことも起こります。

このような被害は、構造的被害が発生する震度より震度階級で1程度低い震度5弱程度の揺れでも発生する可能性があります。ビルの管理者や住民はこのような被害を事前に予測し対策を講じておくことが非常に重要です。

2) 数値解析によるパラメータスタディーと実物の実験、ならびに地震被害の実態調査を行って、高層建物の簡易応答評価手法、家具の転倒・移動危険性評価手法、非構造部材の損傷評価手法、負傷危険性の評価手法、避難支障度の評価手法を開発しました。

3) 5~50階建ての中高層建物を対象として、地震時の室内安全性を簡便に評価するプログラムを作成しました。このプログラムはExcelシートで構成されており、詳細版プログラムと簡易版プログラムの2種類があります。簡易版は、建築の知識や家具・非構造部材の詳しい情報が無い場合でも簡便に安全性評価できるプログラムです。

(2) 大規模地下空間の被害・避難シミュレーション

1) 地下鉄の駅や地下街などの大規模地下空間の周辺地盤に作用する断層変位、その影響により地下構造物に発生する被害、地下空間内の群集の避難行動、を推定する一連のシミュレーション技術を開発しました。

2) 非線形スペクトル確率有限要素法を用い、基盤に発生した断層変位が表層の未固結層を破壊しながら地表へ伝搬していく過程をシミュレーションするプログラムを開発しました。兵庫県南部地震の野島断層で観察された右横ずれ断層に

特有の左雁行配列(地表に現れる地割れのパターン)した地表地震断層をシミュレーションし、検証しています。

3) 群集をマルチエージェントでモデル化し、地下街や地下駅から避難する様子をシミュレーションするシステムを開発しました。エージェント(人のモデル)は実際の地下空間の数値モデルの中を動きます。その数値空間モデルの作成を容易にするため、実際の設計図面(CADデータ等)から避難経路のモデルを自動作成するプログラムを開発しました。

4) 実務使用を考慮して、この避難行動予測シミュレーションのための入出力データを簡便化しています。入力データはコードのオブジェクト化の徹底によって簡便化しました。避難過程の出力については、ファイルフォーマットの工夫により、市販の汎用描画ソフトウェアであるTecPlotで、2次元ないし3次元の動画を作成できるようになっています。

5) 地下鉄事業者に対し、避難誘導計画の検証や改善策の検討に活用するよう働きかけています。

(3) 密集空間における総合避難誘導シミュレーション

1) 密集空間としてイベント会場、高層ビル、地下街(地下駅も含む)、医療機関、学校等を取り上げ、各施設の現時点での避難誘導體制の課題を調査・分析し、考えられる改善策の効果を群集シミュレーションを適用して定量的に解析し確認していきました。

2) 群集シミュレーションはマルチエージェントモデルによりしました。歩行速度制御、相互間隔制御、周辺認識制御、行動目的制御を取り入れています。一方、密集状況観測システムとして既設の監視カメラの画像データを活用する自動人数計測システムを開発しました。

3) 群集シミュレーション等で明らかになる最適な避難方法、誘導方法を広く施設関係者に認知、習得、活用してもらうために、高層ビル管理者向けの防災eラーニングシステムを構築し、実証実験を行ってその活用効果を確認しました。

4) この研究成果の活用を促進するためには、防災以外の目的でもシステムや装置を活用できる施策が必要で、人流把握技術を人流の効率化等によるCO₂削減や資源の有効活用、コスト削減にも適用していくよう働きかけています。

(4) 帰宅困難者シミュレーション

1) 首都直下地震では膨大な数の帰宅困難者が発生すると予測されています。そのため、帰宅困難者のシミュレーションシステムを開発し、外出者が一斉に帰宅しようとした場合の道路の混雑状況や徒歩帰宅者の所要時間を試算できるようにしました。

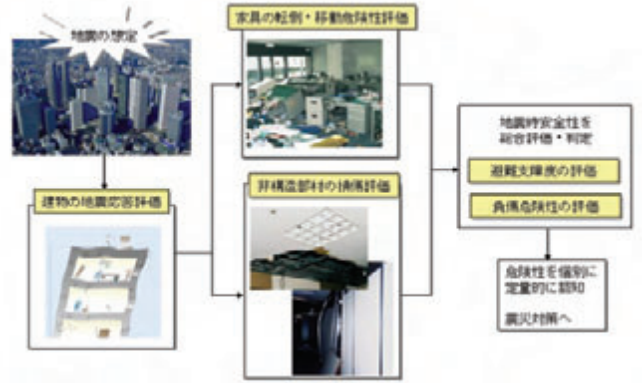
- 2) 約1kmメッシュで首都圏をモデル化し、各メッシュ内の帰宅目的地別の人口が主要道路の歩道相当幅を使って目的地へ移動するものとしました。混雑すると歩行速度が低下するモデルを採用しています。
- 3) 平日正午に帰宅困難者が一斉に徒歩帰宅を始めた場合、都心部では10時間後くらいまで混雑度合いの高い状態が続くことが明らかになりました。
- 4) 特に都心部に近い青梅街道、甲州街道・環状七号線、第一・二京浜道路、蔵前橋通では長期間混雑が続くと予想されます。

(5) 大震災時の消防力最適運用シミュレーション

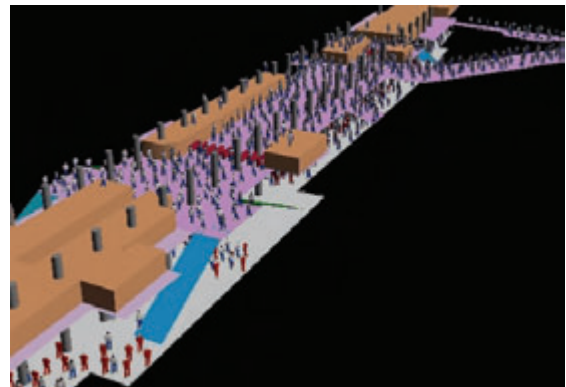
- 1) 大規模地震により同時多発火災が発生した場合は、限られた消防力を戦略的・効果的に運用することが必要となります。本研究では、消火活動優先と救出活動優先の方針選択に注目し、シミュレーションによって選択の結果を比較できる「消火・救出活動支援演算装置」を開発しました。
- 2) 開発した装置は、入力で選択された消防力の運用方針に従って、建物1棟ごとの分解能で延焼拡大、消火、救助救命の進行をシミュレーションし、一定時間後の消火件数・救助者数と焼損面積、死者数等を出力します。
- 3) 東京23区内の平均的な消防署を対象にケーススタディを行った結果、地震により発生した被害が甚大なケースでは人命救助より消火活動を優先した方が焼失面積を極小化できて焼死者が少なくなり、結果として死者数も少なくできる事が明らかになりました。

3. 今後の課題

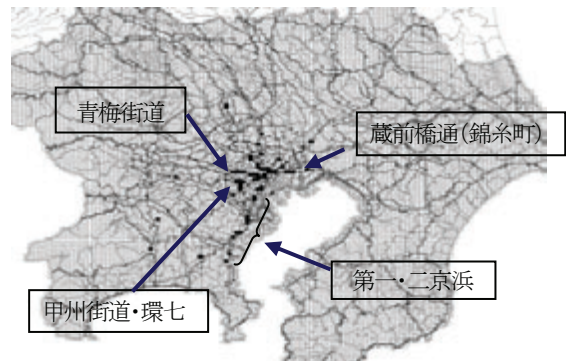
- 1) 高層ビル内で発生する家具の転倒や非構造部材の破損による被害は比較的小さな震度でも発生するため、首都直下地震でも被害は広域に及び、量的には膨大な被害となる恐れがあります。避難所の容量や企業の事業継続にもかかわる問題であり、自治体、企業、一般市民が危険性を認識して対策を進める必要があります。
- 2) 大規模地下空間や高層ビル、病院、学校などの密集空間から、混乱なく効果的に群集を避難させる管理システムや訓練システムを普及、定着させていくためには、これらのシステムが日常的な密集状況の管理や群衆の誘導、人流の効率化による省エネなどにも有効活用できるよう、付加価値を高めて行く必要があります。
- 3) 一斉帰宅行動を避けるなどの帰宅困難者対策を行うと帰宅所要時間を短縮できることが明らかになりました。シミュレーションの精度とリアリティを上げて、現実性のある対策を検討出来るようにしていく必要があります。
- 4) 首都直下地震では、一つの消防署の消防力の最適運用に留まらず、多くの消防署の広域連携に基づく最適運用も大きな課題です。システムの高速度と広域連携に向けた高度化が望まれます。



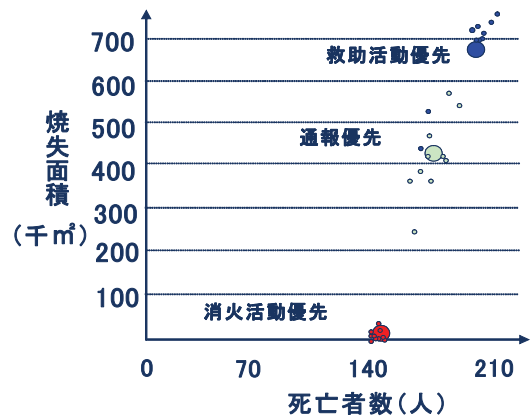
高層ビル内の地震時安全性の評価フロー



地下駅からの避難のシミュレーション



初期状態の滞留者数以上の徒歩帰宅者数が6時間以上継続するメッシュ



焼失面積と死亡者数の関係

1. 高層ビル内の地震時安全性とその評価システム

大都市圏で大きな地震が発生すると、建物が倒壊・大破するような被害だけでなく、建物内部の天井・壁・扉などの非構造部材や家具や設備機器などの損壊・落下・移動・転倒などにより人が負傷する可能性が大きくなります。また、エレベータが停止した中で、階段の損傷や非構造部材の散乱により避難通路を断たれるといったことも起こり得ます。さらに、スプリンクラーのような防災設備の損傷により二次災害の発生を防ぐことができなくなることも考えられます。

このような被害は、通常、構造的被害が発生する震度より震度階で1程度低い震度5弱程度の揺れ発生する可能性があります。首都直下地震では震度5弱以上の地域は広範囲に広がりますので、膨大な被害が発生する恐れがあります。

1.1 評価手法の構築

(1) 評価フロー

この研究では、図1のフロー図中に示す項目について簡易に評価できる手法を構築しました。

(2) 高層建物の簡易応答評価手法

地表の最大加速度、最大加速度と最大速度の比、建物の階数と構造種別の情報のみから、各階の最大加速度、最大速度、層間変位を簡易に計算できる評価式を構築しました。評価式では最上階、中間階、最下階の応答が算定でき、各階の応答はこれらの値を直線補間して算定することとしています。

(3) 家具の転倒・移動危険性評価手法

以下の条件を用いて、家具の転倒・移動危険性を評価する手法を構築しました。

- ・家具の寸法（高さ・奥行）
- ・床材（床の滑りやすさ）
- ・脚周りの状況（キャスターの有無）
- ・設置位置（壁際または部屋中央）
- ・固定状況（固定家具の割合・固定方法）
- ・各階の最大加速度と最大速度

評価式では、まず、各家具が固定されていないものとして転倒確率と移動期待値を算定し、次に、その値を固定家具の割合と固定方法に応じて減ずることとしました。そして、これらの転倒確率と移動期待値を基に、転倒・移動の危険性を評価します。評価フローを図2に示します。危険性評価は4段階評価としました。

(4) 非構造部材の損傷評価手法

非構造部材の損傷評価では、外装と内装とガラスサッシと鋼製扉は層間変形角で、天井は応答震度で、エレベータは地表震度で判定することとし、4段階評価としました。

(5) 負傷危険性の評価手法

図3に示す要領で地震時の室内閉塞率から負傷率を算定し、負傷率に応じて負傷危険度を4段階で評価しました。

(6) 避難支障度の評価手法

建物外への避難の支障度には、エレベータ使用の可否、対象階の階数、家具等の散乱状況が大きく影響すると考えられます。また、住宅の場合には、住戸外へ出る扉が一箇所であることが多く、扉の開閉の可否が避難に大きな影響を及ぼすと考えられます。そこで、 j 階から建物外への避難の支障度 $\bar{D}_{ev,j}$ を下式で判定することとしました。

$$\text{住宅の場合} \quad \bar{D}_{ev,j} = \max(\bar{D}_{fu,j}, \bar{D}_{fu,j-1}, \dots, \bar{D}_{fu,1}, D_{dr,j}, \bar{D}_{el})$$

$$\text{事務所の場合} \quad \bar{D}_{ev,j} = \max(\bar{D}_{fu,j}, \bar{D}_{fu,j-1}, \dots, \bar{D}_{fu,1}, \bar{D}_{el})$$

ここで、 $\bar{D}_{fu,j}$ は j 階の家具の被害度、 $D_{dr,j}$ は j 階の扉の損傷度、 \bar{D}_{el} はエレベータの損傷度と対象階の階数の関係から設定される支障度です。 \bar{D}_{el} は表1によって設定しました。

1.2 評価プログラムの開発

(1) 評価プログラムの概要

5～50階建ての中高層建物を対象として、地震時の室内安全性を簡易に評価するプログラムを作成しました。本プログラムはExcelシートで作成されており、詳細版プログラムと簡易版プログラムの2種類があります。詳細版は、地震の設定、家具や非構造部材の仕様を詳細に与えることができるプログラムであり、専門的なビル管理者や自治体・企業の施設・防災担当者などを対象にしています。簡易版は、建築の知識や家具・非構造部材の情報が十分に無い場合でも簡易に評価できるプログラムです。図4に入力画面の一例を示します。

1.3 評価プログラムの活用法

(1) 自治体における考え方

非構造部材などの被害は人の死傷につながる可能性があるだけでなく、建物機能が保持できなくなり、地震後の避難者数に大きな影響を与える可能性があります。また、避難所には機能が保持される建物を選定することが必要で、開発した室内安全性評価プログラムはこのような検討に活用できます。

(2) 企業における考え方

企業においては、まず、事務所や工場などの事業所施設における従業員・顧客の安全を確保しなければなりません。構造体の損傷の有無だけでなく、この評価プログラムを用いて、非構造部材・家具・設備機器類の挙動も考慮した総合的な安全性を定量的に評価しておくことが有効です。また、企業の事業継続計画を検討する上で、非構造部材の被害の影響も考慮する必要性が有ることは言うまでもありません。

(3) 一般市民における考え方

一般市民にとっても地震発生時に自分たちの住宅の家具や扉やエレベータがどのような被害を受けるか、このような評価プログラムを使って予測し、家具固定や避難経路の確保などの対策をとっておくことが大変重要です。

III.2 大都市特性を反映する先進的シミュレーションの技術の開発

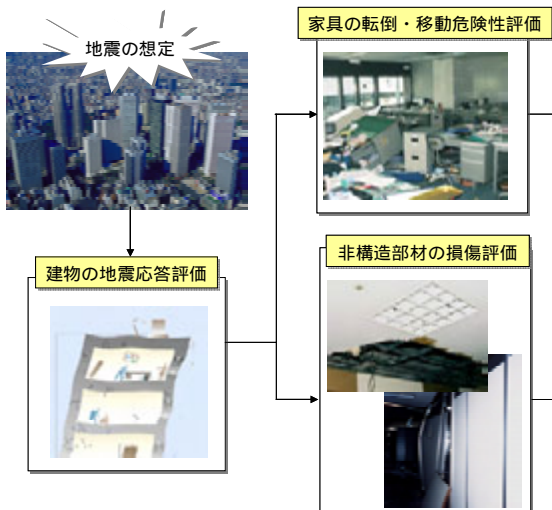


図1 高層ビル内の地震時安全性の評価フロー

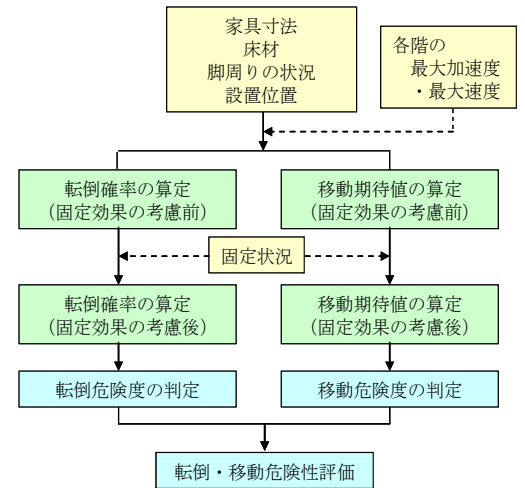


図2 転倒・移動危険性評価フロー

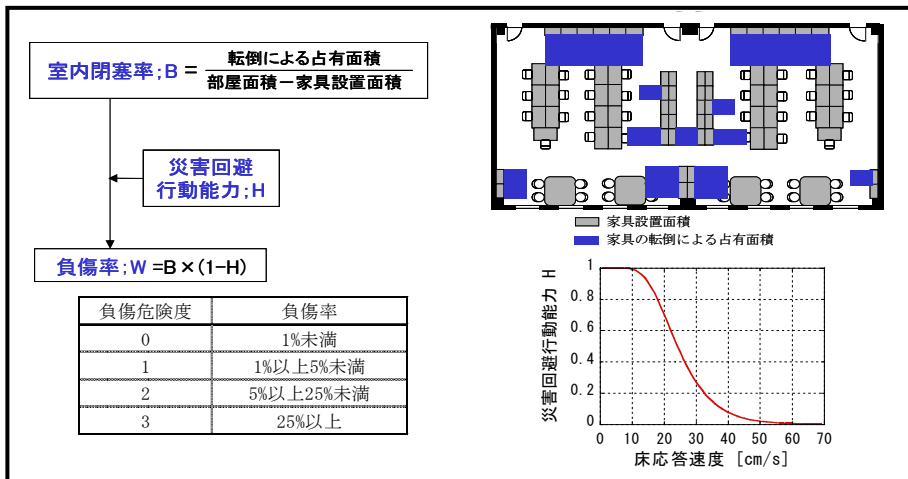


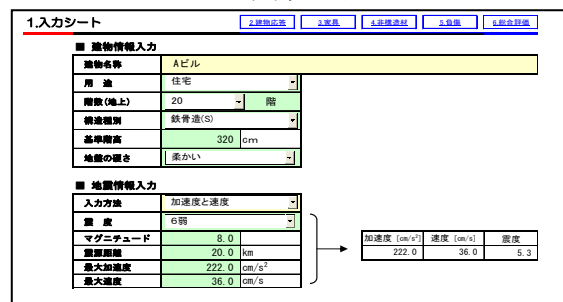
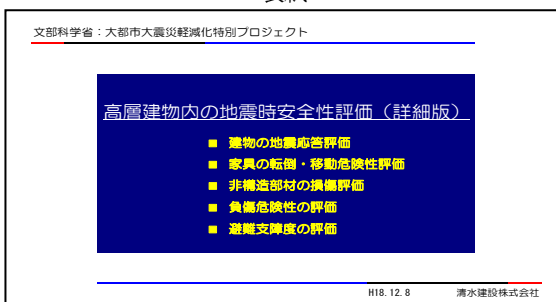
図3 負傷危険性の評価手法

表1 エレベータの損傷度と階数の関係から設定される支障度

		エレベータの損傷度			
		0	1	2	3
階	21階以上	0	1	2	3
	11~20階	0	1	1	2
	10階以下	0	0	0	1

表紙

1. 入力シート



2. 建物応答の推定シート

3. 家具の転倒移動危険性評価シート

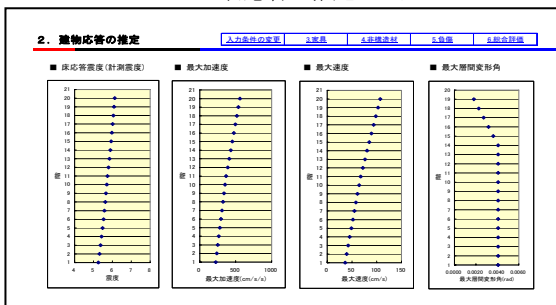


図4 入力画面の一例

2. 大規模地下空間の被害・避難シミュレーション

大都市に特徴的な施設の一つが地下鉄のターミナルや地下街のような大規模地下空間です。大都市のこのような地下空間が断層変位の影響を直接受けた例はこれまでありませんが、直撃を受けると大きな災害となる可能性があります。また、ひとたび危急の事態が発生した際に、空間内の群衆を安全に避難させることが重要な課題です。このような未経験で大規模な実験が不可能な事態への対応策を検討していくためには数値シミュレーション技術の適用が有効です。

この研究では、大規模地下空間に対する断層変位の影響と地下空間内の群衆の避難行動を推定する一連のシミュレーション技術を開発しました(図1)。

2.1 地下空間に影響する断層挙動の推定

(1) 断層挙動予測シミュレーションの位置づけ

図2にシミュレーション全体のフローチャートを示します。当該地域で判明されている活断層の有無をチェックし、さらに、見過ごされている可能性のある伏在断層の脅威をチェックします。その上で、チェックされた断層が活動した場合の大規模地下空間に対する脅威を断層挙動予測、構造物被害推定、対応行動のシミュレーションにより検討するものです。

(2) 断層挙動予測シミュレーションの概要と野島断層の解析例

断層挙動予測シミュレーションは次の特徴を持っています。

- ・シミュレーションの対象は未固結層の破壊過程とする。
- ・未固結層には不確かさに応じた確率モデルを構築する。
- ・入力となる基盤(固結層)の断層変位は安全側に設定する。
- ・未固結層の破壊過程の分岐をシミュレートする。

この数値シミュレーションでは未固結層の層厚や材料特性、そして基盤断層変位の向きや量が入力です。数値解析手法は非線形スペクトル確率有限要素法を用いました。確率モデルによるため、変位・ひずみ・応力といった応答を確率的に評価できます。また、応答の平均・分散は勿論、確率密度関数や結合確率密度関数の計算も可能です。

1995年の兵庫県南部地震では、右横ずれ断層に特有の左雁行配列(左奥・右手前の断絶した地割れ群)した地表地震断層が野島断層沿いに観察されています。図3に野島断層を模擬した数値シミュレーションの結果を示しました。基盤変位の増加につれ、地表面に左雁行配列した断層が現れています。

2.2 地下構造物の被害推定

(1) 地下構造物被害予測シミュレーションの位置づけ

ここでは、2.1の断層挙動予測シミュレーションが応答として計算する表層変位を地盤-構造物モデルに入力し、その変位によって引き起こされる地下構造物の被害を出力します。

この表層変位は、変位境界条件として地盤-構造物モデルの周囲の境界に加えます。変位の値として確率密度関数が最

大となる変位(最も発生しやすい変位)を取ると、構造物の被害は2.1で入力した基盤断層変位に対する平均的な被害となります。

(2) 地下構造物被害予測シミュレーションの例

地中構造物横断方向の地盤-構造物モデルを図4に示します。

2.3 地下空間内の群衆の避難行動推定

(1) 避難行動予測シミュレーションの概要

避難行動予測シミュレーションは、人の基本特性を持つエージェントを使ったマルチエージェントシミュレーションです。エージェントは、固有の歩行速度や方向決定の特性を持ち、周囲の環境を見て、自律的に仮想空間内を歩行します。

同一の大規模地下空間に同一の人々が居合わせた場合でも、人々の配置や特性によって避難行動の様子が異なります。この点を考慮して、避難行動予測では、エージェントの初期配置と各エージェントの歩行速度や方向決定の特性をランダムに変えたモンテカルロ法によるシミュレーションを行います。このシミュレーションの基本データとなるエージェントの数や避難経路のモデルは入力データとして設定する必要がありますが、エージェントの配置や特性は自動的に決定されます。

(2) 避難行動予測シミュレーションの解析事例

1) 避難経路モデルの自動構築と入出力の簡便化

エージェントが動く仮想空間は実際の大規模地下空間を模擬するものです。その設定を容易にするため実際の設計図面(CADデータ等)から避難経路モデルを自動構築するモジュールを開発しました。地下鉄駅等の構造物では設計図としてCADが標準的に使われていますが、CADデータは、原則として、梁・柱や壁のような構造部材と階段の段や仕切り壁等の非構造部材の情報を含むものの、人が通る経路の情報は含んでいません。自動構築モジュールは、最初にCADデータを分析してこのような構造部材・非構造部材で囲まれる経路を抽出し、出口まで連結する経路のネットワークとして避難経路モデルを構築します。大型の地下鉄駅のCADデータから避難経路モデルが自動構築される過程の一例を図5に示します。

さらに、実務使用を考慮して、データの入出力を簡便化しました。入力データはコードのオブジェクト化の徹底によって簡易化されています。また、避難過程の出力はファイルフォーマットの工夫により、市販の汎用描画ソフトウェアであるTecPlotを使って、簡単に2次元ないし3次元の動画にできます。

2) 避難行動シミュレーションの例

解析例として、1000人のエージェントが地下街を避難する動画のスナップショットを図6に示しました。このようなシミュレーションをモンテカルロ法により初期条件を様々に設定して繰り返し、避難完了時間などを統計的に推測することができます。

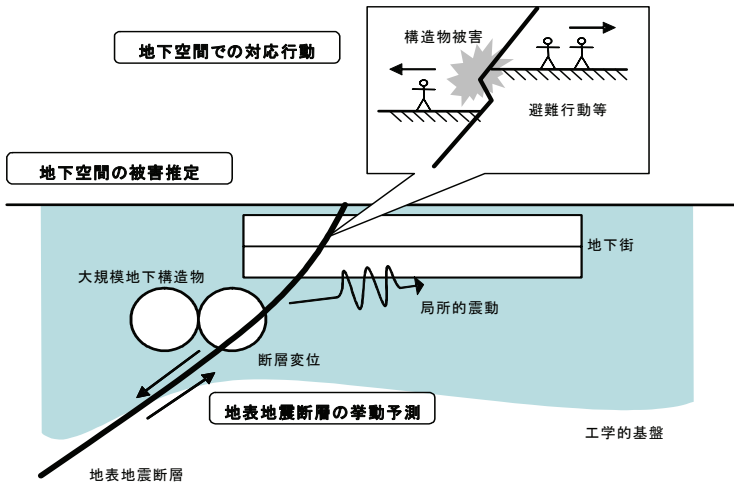


図1 地下空間からの総合避難シミュレーションの概念

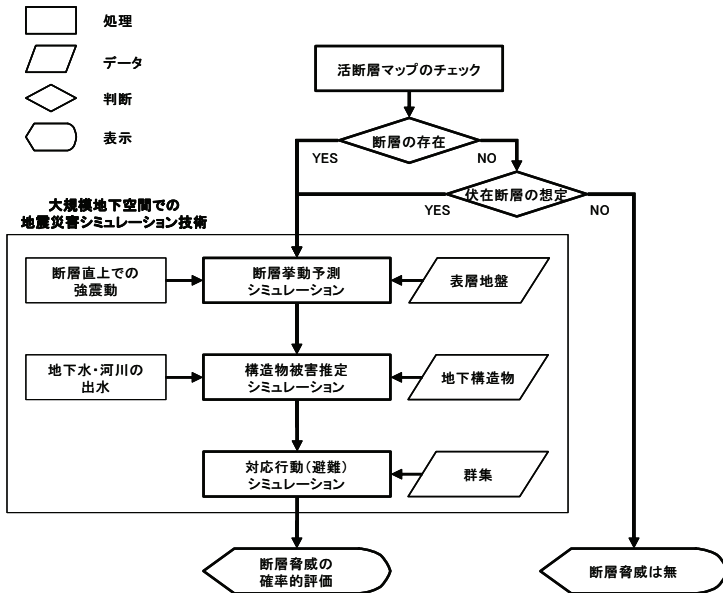


図2 シミュレーション全体のフローチャート

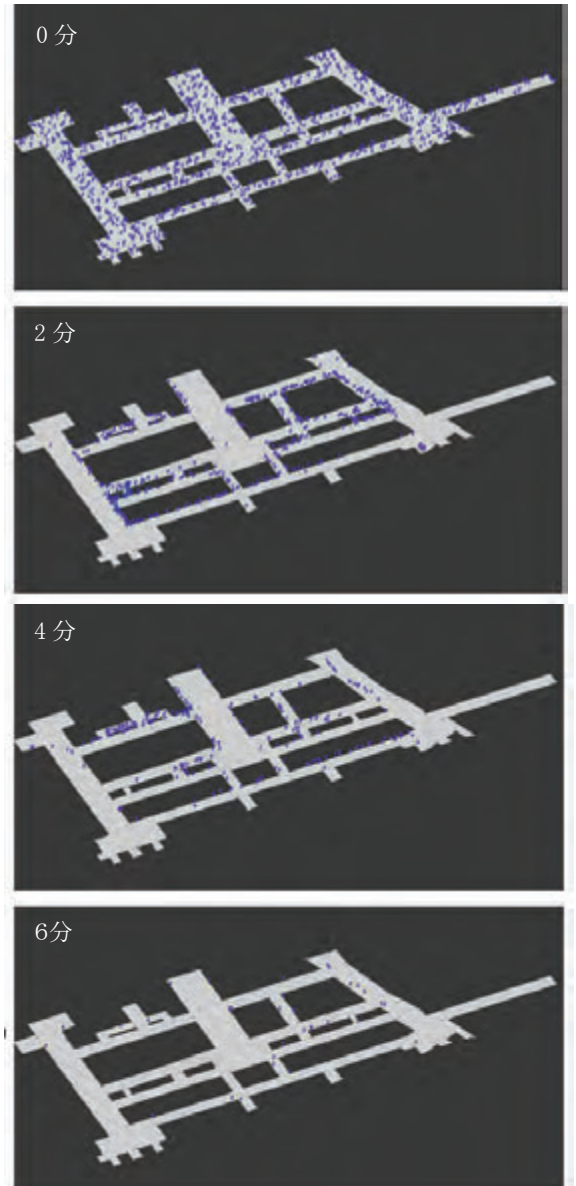


図6 1000人が地下街を避難する動画のスナップショット

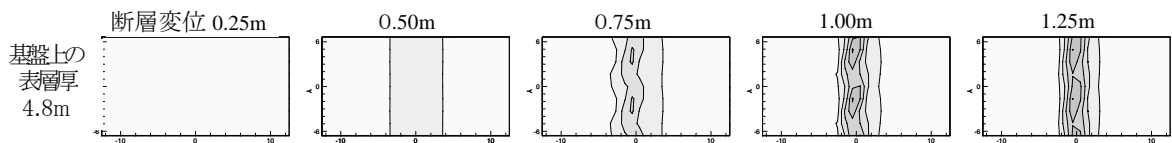


図3 野島断層を模擬した数値シミュレーション地表面図: 基盤変位の増加につれ、左雁行配列した断層が見れる

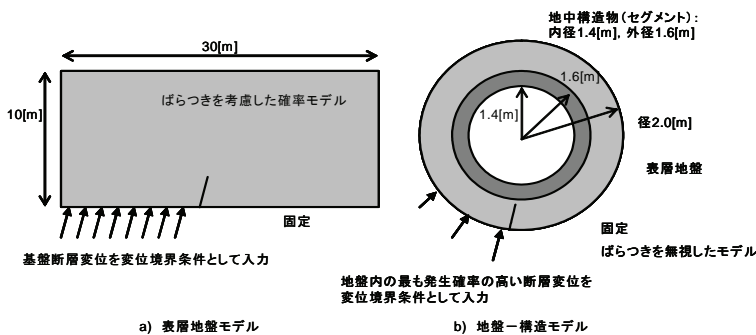


図4 地中構造物横断方向の地盤-構造モデル

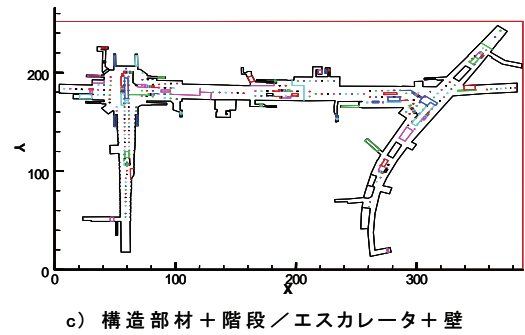


図5 避難経路モデル自動構築過程の一例

3. 密集空間における総合避難誘導シミュレーション

本研究は、密集空間という特定の屋内環境における地震時の被害、特に人命に係る被害の軽減化を図る技術の開発を目的としています。具体的な施設として駅(地下駅も含む)、イベント会場、高層ビル、医療機関、学校等を取り上げ、これらの空間における群集の効率的な避難誘導を支援する要素技術(群集シミュレーションシステム、現況観測システム、避難体験バーチャルシステム、誘導表示システム等)を開発して総合的な避難誘導シミュレーションシステム(図1)に構成しました。

3.1 総合避難誘導シミュレーション研究の成果概要

平成14年度からの5年間で各施設毎に実施した研究開発の成果を業務項目別に表1にまとめました。最初に、各施設の現時点での避難誘導体制の不備等の課題を明らかにし、次に群集シミュレーションモデルを構築してその課題に対する改善策、例えば段階的避難や複数経路への配分を定量的に解析し、その改善効果を確認していきました。

3.2 本研究で開発した要素技術

(1) 群集シミュレーションシステム

各避難者を粒子で表現し、粒子が以下の制御のもとで自律行動するエージェントモデルシミュレーションを開発しました。

- ・避難者属性別の歩行速度制御: 健常者 = 1.2m/秒、高齢者 = 0.7m/秒、身障者 = 0.4m/秒としました。
- ・避難者間の相互間隔制御: 接近すると速度を落とします。
- ・周辺認識制御: 避難者寸法 = 直径 0.45m、知覚領域 = 直径 0.54m、視野角度 = 進行方向 110° としました。
- ・行動目的の制御: 発生地から目的地まで最短経路を避難し、他者や混雑状況により動線を修正します。

(2) 現況観測システム

既設の監視カメラの画像データを活用した自動人数計測システムです。通路等における方向別断面交通量(人/秒)、対象空間における滞留人数、滞留人数で見たサービスレベル(人/m²)、極度の混雑度警報のアラーム等が出力されます。

3.3 対象施設別の研究成果

(1) 駅(建築基準法の適用外)、地下空間への適用、活用方法

鉄道事業者の協力を得て①地下から地上へ避難者が殺到する階段や改札での混雑状況の定性的、定量的把握、②避難情報の発信内容やタイミングによる被害軽減効果(逃げ遅れ者数)の比較、③誘導員の適正配置や避難者属性(高齢者等)別の避難経路の計画策定支援などを実施しました。

(2) 高層ビルへの適用、活用方法

高層ビルオーナーの協力を得て①各階から避難者が殺到する避難階段での混雑状況の把握、②避難情報の各階別の発信内容やタイミングによる被害軽減施策の効果、③避難者

属性(怪我人、高齢者等)別の避難経路計画の策定支援、④自衛消防隊やテナント従業員向けの防災教育eラーニングシステムの開発と効果の検証、を実施しました。

(3) イベント会場への適用、活用方法

会場に不慣れな避難者が殺到するボトルネック箇所のシミュレーションによる予測、誘導員の適正配置計画、雑踏警備関係者の事前の状況確認と現況観測システムによるリアルタイムの状況共通認識への適用を可能にしました。

(4) 医療機関への適用、活用方法

災害直後に被災者が殺到すると予想される医療機関と連携し、シミュレーションによるトリアージ(症状重度別の優先治療)や火災避難に関する震災対応計画作成の支援、多忙な医療スタッフに対する効率的(反復、更新)な災害対応訓練支援システムの提供を可能としました。

(5) 学校への適用、活用方法

最も減災に関する学習効果が高いと思われる小学校を対象にして、避難誘導シミュレーションの安全教育への適用を図りました。導入効果として、①実映像とシミュレーションによる災害時イメージ向上、②災害時の行動判断を向上させる有効な学習内容(注意力と考察力)、③グループ学習(コミュニケーションと思いやり)が可能なプログラム構成、④教材のパッケージ化による教師の負担軽減化、を検証しました。

3.4 実用化の施策

(1) 実用化普及ツールの構築: 防災eラーニングシステム

本研究のシミュレーションで明らかになった最適な避難誘導方法を広く施設関係者に認知、習得してもらう目的で防災eラーニングシステムの構築(現時点では高層ビル編)と実証実験を行い、その活用効果を確認しました。

(2) 実用化シナリオの提言

この研究の成果が強制的力を持った法的規制・基準に反映される状況には有りません。そこで、本システムの導入を促進するためには防災以外の目的でも活用できる施策が必要です。本研究の基本である施設内の人流把握技術を、人流の効率的制御によるCO₂削減や資源の有効活用、コスト削減にも適用できる総合的な施設管理プランを提案し、働きかけています。

3.5 今後の課題

緊急地震速報、現状管理(人流把握)、施設被害推定、施策選択、情報伝達とそれらを一元管理するプラットフォームの構築を行い、リアルタイムに即応できる仕組みを作る必要があります。特に、緊急地震速報の実用化を迎え、速報伝達による群集挙動の予測とその対応策について、これまで開発してきたシミュレーションやバーチャルリアリティ技術を活用して群集挙動データの収集、分析を行っていく必要があります。

表1 平成14年度から各施設毎に実施してきた研究開発

対象施設	実施事項	本研究の対象範囲				今後の展開	
		管理体制 法規制調査	現在の人流動 実態調査	シミュレーション モデル構築	避難誘導施策 効果検証	管理用ツール 開発	実用化 提案活動
駅	東急電鉄	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	活動実施中	活動実施中
地下空間	横浜高速鉄道	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	19年度以降	19年度以降
高層ビル	新宿パークタワー	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	活動実施中
イベント会場	横浜アリーナ	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	活動実施中	19年度以降
医療機関	災害医療センター	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	19年度以降	19年度以降
学校	都内区立小学校	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	19年度以降	19年度以降

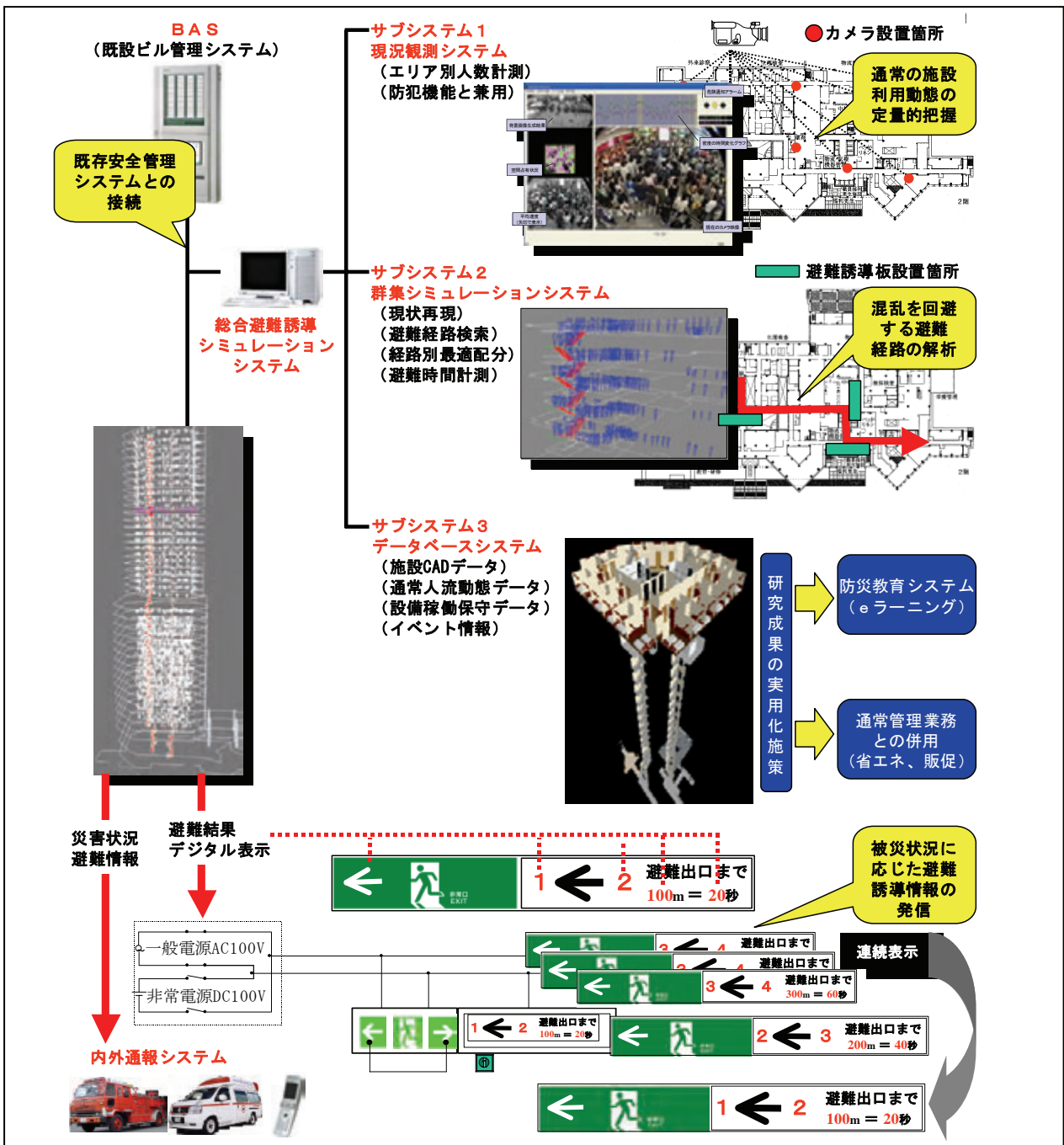


図1 総合避難誘導シミュレーションシステム

4. 帰宅困難者シミュレーション

首都圏に大きな地震が発生し交通機関が停止した場合、東京都が行った試算では約 392 万人の帰宅困難者が発生します。この膨大な数の帰宅困難者によって、その滞留場所や徒歩帰宅経路が混乱し救援物資や施設が不足すると懸念されています。しかし、これまで経験されていない問題であり具体的な状況予測も行われていないため、十分な対策がとられているとはいえません。

この研究開発では、帰宅困難者のシミュレーションシステムを開発し、外出者が一斉に帰宅しようとした場合の道路の混雑状況や徒歩帰宅による所要時間等を試算し、問題を検討する具体的な資料を提供することを目的としました。

4.1 帰宅困難者に関するシミュレーションの概要

(1) 前提

平日正午に、外出中の人が一斉に徒歩帰宅しようとする想定します(外出先と自宅との直線距離は最大 50km としました)。ただし、実際に帰宅行動を取る人の割合は外出先と自宅との距離に応じ、表 1 のような比率を設定しました。

(2) 条件等

1) 対象範囲: 東京都市圏パーソントリップ調査(以下、パーソントリップ調査という)の範囲としました。この範囲は、東京を中心とする半径約 80km 圏域で、東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県、茨城県(南部)を含みます。

2) 地域区分単位: 上記対象範囲を標準地域 3 次メッシュで区分した、おおむね 1km メッシュをシミュレーションの最小地域区分とします。徒歩帰宅者の混雑度や歩行速度等はこのメッシュ単位で評価します。

3) 外出者人口分布: 東京都内はパーソントリップ調査のゾーン単位、都外は1つの区市町村を1つのゾーンとし、ゾーン単位での発地(O)、着地(D)の組み合わせについて、各 O-D の人数をメッシュに配分しました。

徒歩行動は、各メッシュに存在する O-D が同じ人達がひとつの集団となって、時間刻み(5分)ごとに進んでいきます。

4) 道路メッシュネットワーク: 徒歩帰宅に使用する道路は、国道および帰宅支援道路(都内のみ)としました。これらの道路ネットワークをメッシュで表現しました。

5) メッシュ内道路面積: まず、細密数値情報(10m メッシュ土地利用)を基に、各メッシュの道路面積を求めました。つぎに、都内交通センサスを基に、国道面積に対する歩道面積の比率の平均を求め、これをメッシュ内道路面積に乗ずることで徒歩帰宅に用いる道路面積としました。

6) 帰宅経路: 徒歩帰宅に使用する経路は、道路メッシュネットワーク上で最短距離となる経路を通過するものとしました。混雑により歩行速度が低減しても、経路の迂回はいしません。

7) 歩行速度の評価: メッシュ内の徒歩帰宅者の群集密度

(人数/道路面積)と速度の関係から、各時間における歩行速度を求めました。基準となる速度は 4km/時とし、混雑度合いが増すにつれ、速度が低減するようにしています(表 2)。

4.2 シミュレーション結果

(1) 混雑状況

平日正午に一斉に徒歩帰宅をした場合の混雑状況の推移を図示したのが図 1 です。帰宅開始後 10 時間くらいまで都心部では混雑度合いの高い状態が続きます。

(2) 区市町を通過する徒歩帰宅者数

区市町に含まれるメッシュ内の徒歩帰宅者数を集計し時間推移を示したものが図 2 です。都心中心部、特に世田谷区、文京区では、徒歩帰宅者の通過地区となるため混雑が長期継続し、滞留者数の低減ペースが遅いことや、混雑が継続する路線を抱える隅田区や江東区でも、滞留者数の低減ペースが遅いことが読み取れます。

(3) 混雑が継続する箇所

混雑が長時間継続するメッシュについて見たのが、図 3 です。この図では、初期状態の滞留者数以上の徒歩帰宅者数が 6 時間以上継続するメッシュに着目して色を塗っています。都心中心部の青梅街道、甲州街道・環状七号線、第一・二京浜道路、蔵前橋通では長期間混雑が続いています。

(4) 着地別発地からの帰宅所要時間

着地ごとに帰宅を開始する地区からの所要時間を集計しました。紙面の制約で省略しますが、都心部からの帰宅や都心部を経由する帰宅に時間を要する結果となっています。

4.3 今後の課題

今回のシミュレーションでは、帰宅行動による混雑、徒歩帰宅の所要時間に関するマクロな把握に主眼を置いたため、算定には大きな仮定を設けています。今後は以下の点などを考慮して精度とリアリティを改善する必要があると考えています。

(1) モデルについて

- 1km メッシュ単位からより小さい単位での評価、あるいはメッシュではなく道路ネットワークを用いた評価
- 現実に近いデータに基づく道路面積の反映
- 混雑状況により経路を変更するなどより現実的な行動の反映
- 帰宅者の多様な属性(年齢、疲労、情報の有無等)による行動の違いの反映、等。

(2) 被災シナリオについて

- 外出者の一斉帰宅だけでなく、状況に応じて変化する帰宅者の多様な行動の評価
- 地震動による道路被害や橋梁の損傷、建物倒壊、落下物、延焼等による道路遮蔽の影響の考慮
- 帰宅開始時間の調整などの施策導入の効果の評価、等。

表 1 徒歩帰宅者数の設定

自宅との距離	徒歩帰宅者の比率
0~25km	100% (全員徒歩により帰宅)
25~50km	100%から0%まで、直線的に減少
50km~	0% (全員徒歩帰宅しない)

表 2 群集密度と歩行速度

群集密度(人/m ²)	~1.5	1.5~6	6以上
速度(km/時間)	4	直線的に減少	0.4

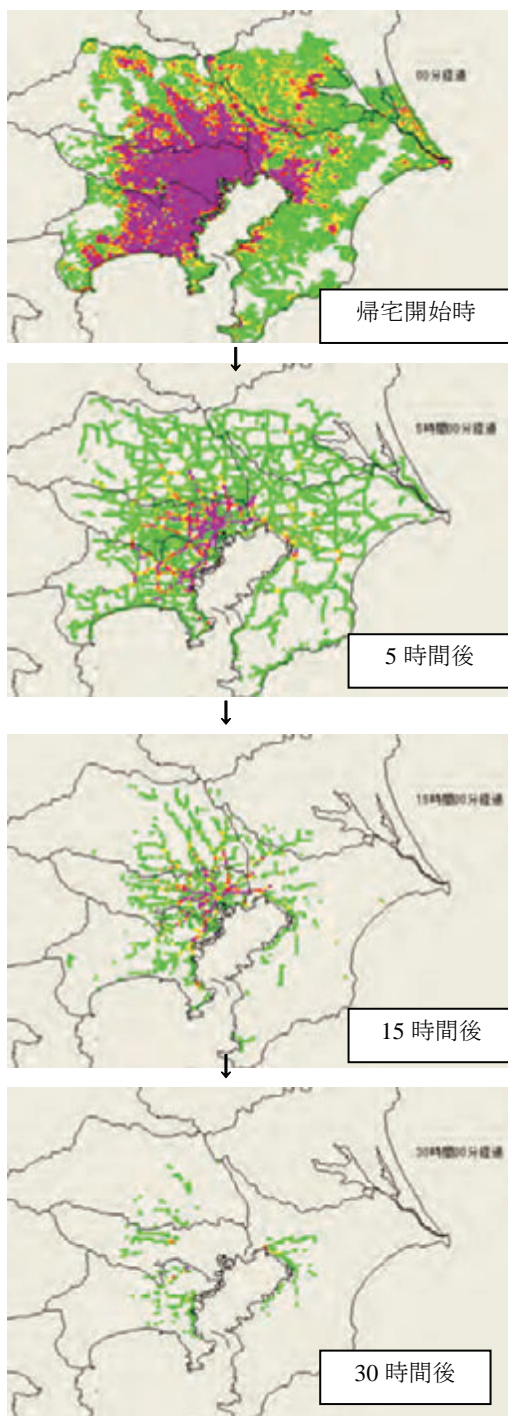


図 1 一斉帰宅の場合の混雑状況の推移

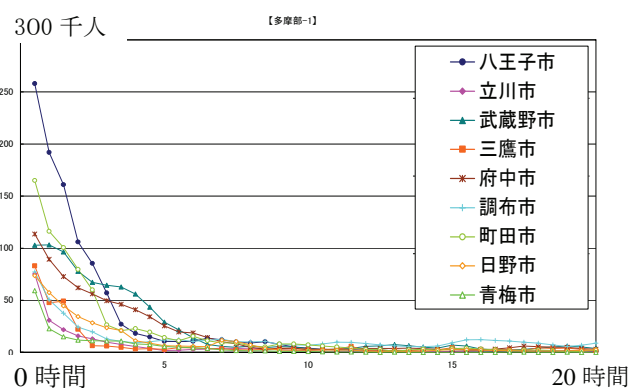
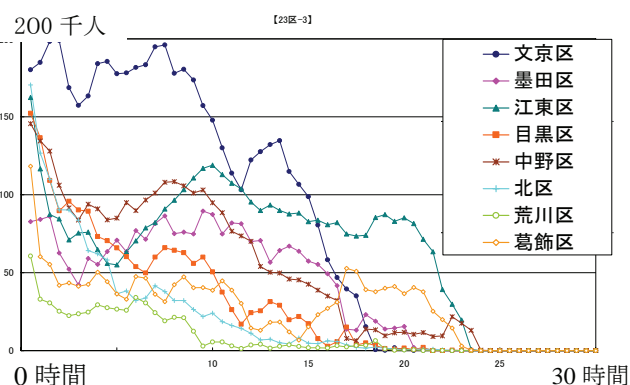
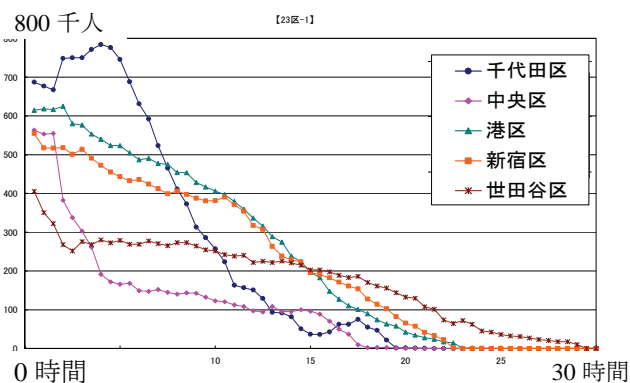


図 2 主な区市町を通過する帰宅者数

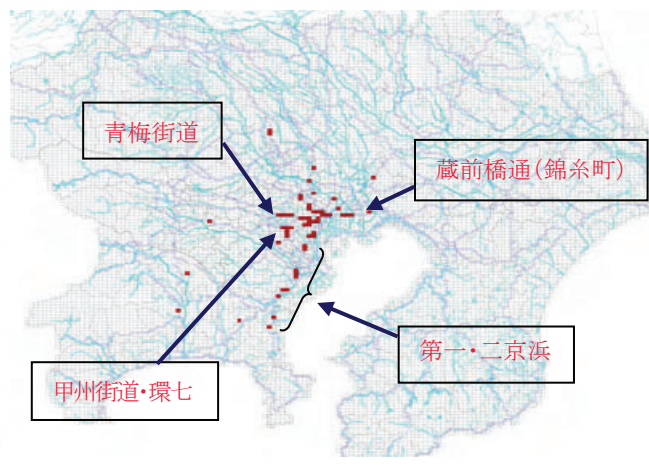


図 3 初期状態の滞留者数以上の徒歩帰宅者数が6時間以上継続するメッシュ

5. 大震災時の消防力最適運用シミュレーション

大規模地震で同時多発火災が発生した場合には、限られた消防力を戦略的・効果的に運用することが必要不可欠となります。本研究では、震災時に必要な消防活動のうち消火活動と救出活動に注目し、シミュレーションにより活動の効果を評価する「消火・救出活動支援演算装置」を開発しました。

5.1 消火・救出活動支援演算装置

(1) 装置の概要

開発した装置は、消防力の一定の運用方針(消火活動優先、救助活動優先、通報覚知順など)に基づいて、建物1棟ごとの延焼拡大、消火、救助活動を同時に計算し、一定時間後の消火件数・救助者数など焼損面積、死者数などを出力します。

図1は震災時における消防活動の構造を示したものです。地震によって建物に構造的被害が発生し、倒壊建物の内部にいた人の一部が生き埋め状態になります。また、相当数の出火が見込まれ、住民によって消火できなかった火災は一棟火災を経て市街地火災となります。一方で、建物被害は市街地内の道路を閉塞させ、消防活動の支障となります。このような状況下で、生き埋め者救出や消火の要請が多数通報覚知されます。その中からどの現場を優先して消防活動を展開するのが望ましいのか、方向性を示すことが求められています。

(2) 支援演算装置に組み込んだ火災拡大・消火活動モデル

1) 出火点の位置設定と延焼拡大モデル

指定する出火数にしたがって、対象市街地内にランダムに出火点を設定します。地震後の出火時間は阪神・淡路大震災時の分析事例に基づいて乱数で定めます。建物から建物へ延焼拡大する速度は東消式2001マイクロ式で与えます。

2) 消防における覚知および覚知時間

消防による火災の覚知手段として①住民通報、②消防機関による情報収集活動の2つを想定しました。

3) 消火活動およびその効果の概要

現実の消火活動は火災建物群を囲む凸包領域を各筒先が受け持つ担当火面長で包囲していくものです。筒先1口あたりの有効範囲は平成7～14年の東京消防庁管内で発生した建物火災のデータから導出した次式で計算しました。

$$y = 0.336x_1 + 0.019x_2 + 0.073x_3 + 0.098x_4 + 0.429$$

ただし、 y :放水口数

x_1 :延焼建物棟数[-] x_2 :延焼床面積[m²](≥ 20 m²)

x_3 :木造系建ぺい率[%] x_4 :非木造系建ぺい率[%]

個々の火災の完全鎮火までの焼損面積あたり放水量は、耐火建物1棟火災で0.3m³/m²、木造・防火造の1棟火災で0.5m³/m²、準耐火造建物で0.4m³/m²としました。

(3) 救助活動に関するモデル

1) 生き埋め者の位置設定

与条件として指定する生き埋め者数にしたがって、対象市

街地内にランダムに設定します。

2) 生き埋め者の生存時間

図2に示す太田ほかの「余命と特性関数」を適用します。

3) 生き埋め者の救出要請の通報覚知時間

消防機関が生き埋め者の発生を覚知するまでの時間は、「付近住民が生き埋め者を発見するまでの時間」と「生き埋め者情報を通報するまでに要する時間」の和とします。

4) 生き埋め者を救出するために要する時間

阪神・淡路大震災の事例分析から設定しました。

5) 生き埋め者の救助判定

「生き埋め者を覚知するまでの時間」と「生き埋め者を救助するのに要する時間」に消防隊・団の移動時間を加えて「地震発生から生き埋め者が救助されるまでの総時間」とし、「余命と特性関数」に当てはめて救助の成否を判定します。救助前に生き埋め地点の建物が火災となった場合は死亡と判断します。

(4) 消防隊等が出場可能となるまでの時間

消防隊は0分、消防団15分としました。消防隊の予備車隊は参集職員により編成される隊であるため30分としました。

(5) 消防隊・団の現場への走行、放水と救助活動

以下の手順を踏むものとします。

①出火点直近の消防水利まで消防車両が最短走行

②部署(割り当てられた)した消防水利から出火地点まで消防隊員等によってホースを延長

③火災に対する放水を開始

救助活動を開始するまでの手順も①～③を準用します。なお、①の段階で閉塞道路に遭遇した場合には、その閉塞道路を除外した道路ネットワークで再度経路選択を行います。走行速度、移動速度は、消防隊10km/h、消防団9km/h、②については7km/hとしました。

5.2 ケーススタディ

(1) 対象消防署の概要

東京23区内の平均的な消防署を対象としました。管内の面積は約13.9km²、人口は212,483人、世帯数は102,665世帯です。木造及び防火造の建築物が約70%を占め、耐火造建築物は約30%となっています。また、震災時には機能しない可能性のある消火栓を除いた消防水利の数は536基(箇所)です。シミュレーション実験では、現有消防力のポンプ隊8隊(うち予備車2隊)、特別救助隊1隊、消防団18隊の合計27隊が活動を実施するものとしました。

(2) 被害発生パターンの設定

出火件数3、6、12件、生き埋め者数10、100、1000人を組み合わせた6種類の「被害発生パターン」を設定しました。

(3) 消防機関の消防力運用方針の設定

震災時において、消防機関が実施することが可能な基本的

な運用方針を「消火活動優先」、「通報優先」、「救助活動優先」の3つに設定し、シミュレーションを実施しました。

(4) ケーススタディ結果

1) 発生被害が甚大なケース

図3、4は、出火件数12、生き埋め者数1000の最も被害の大きなパターンについて、出火点と生き埋め者位置を変えた10回のシミュレーションを行い、地震発生後6時間後の被害等を算定、指標の各値と平均値を併せて示したものです。

図3をみると、消火件数は、当然のことながら「消火活動優先」>「通報優先」>「救助活動優先」の順に多くなっており、一方で、生存救助者数は「救助活動優先」>「消火活動優先」>「通報優先」の順です。しかし、図4を見ると、「死亡者数」は「救助活動優先」>「通報優先」>「消火活動優先」となっています。「救助活動優先」の場合は生存救助者が多いことは当然ですが、その一方で火災が事実上の放任火災となり、その中に生き埋め者が存在するため、火災によって死亡する件数が思いのほか大きな数字となっています。それに対し「消火活動優先」の場合は、12件全ての火災の消火に成功し、焼失面積が非常に小さく、死亡者数も最も低い値になっています。

2) 様々な被害パターンと運用方針の関係

(2)で述べた6つの被害パターンについて、シミュレーション10回の平均値を算出しました。出火と生き埋め者の被害がともに小さい場合は、運用方針の違いにかかわらず同じ結果となりました。これは、消防力にとって対応が十分可能な余裕のある被害であったため、運用方針が異なっても、実際の消防力適用状況は大きく変わらなかったためと考えられます。

5.3 消防力の効果的な運用についての結論

現実の地震直後に出火件数と生き埋め者数の全容を把握することは不可能ですから、消防機関は常に最悪の事態を想定しながら活動する必要があります。一方、本稿で示したシミュレーション実験では、被害が甚大な場合は「消火活動優先」が最も望ましい運用方針であり、被害が少ない場合は、運用方針が違っていても看過できないほどの被害差が生じませんでした。これらの結果を考慮すると、消防機関が取るべき対応方法は、「火災の消火を優先した活動」を前提とすることが「大きな間違いのない消防運用方針」である、ということが出来ます。

本稿では紙面の制約上で示すことができませんが、被害が甚大な災害シナリオの場合には、一定時間待機して状況を把握してから戦略的に消防力を運用した方が、より大きな効果が得られることを示唆する結果も得ています。

5.4 今後の課題

改善点としては、演算速度の向上をはかり、多数の災害シナリオ・ケースについてシミュレーション計算を実施すること、操作インターフェースの実用性を高めること、が挙げられます。

システム開発・拡張の課題としては、首都直下地震を想定した広域連携を前提に、消防署の管轄区域を越えた広域運用時の方針を検討出来るようにしていくことが挙げられます。

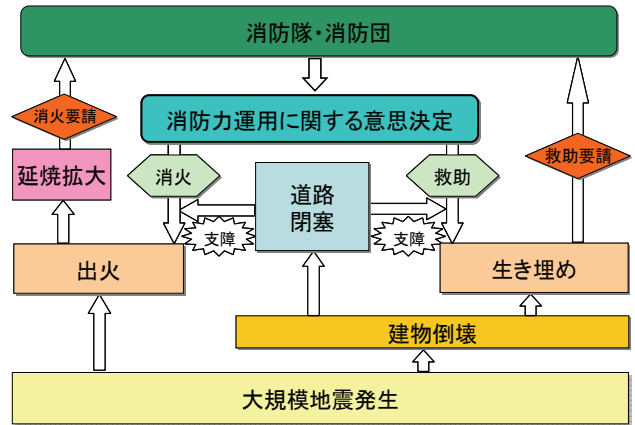


図1 震災時消防活動の構造

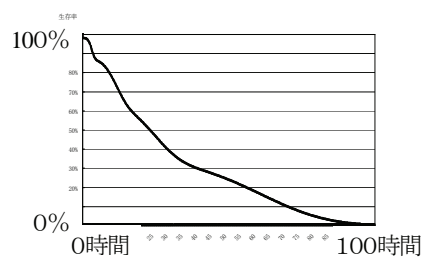


図2 生き埋め者の余命と特性関数

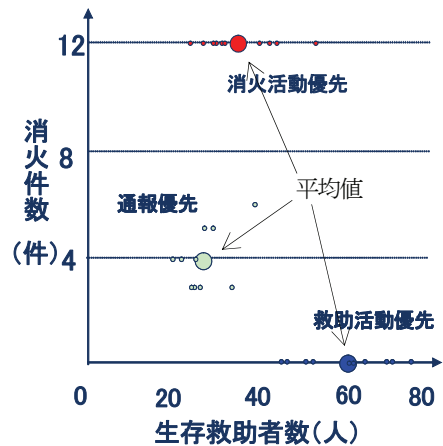


図3 消火件数と生存救助者数の関係

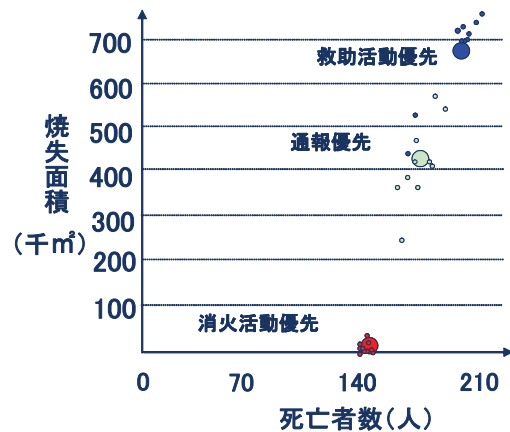


図4 焼失面積と死亡者数の関係

研究実施体制

研究代表者

後藤 洋三 (防災科学技術研究所)

1. 高層ビル内の地震時安全性とその評価システム

田村 和夫 (清水建設)

中村 豊 (清水建設)

金子 美香 (清水建設)

神原 浩 (清水建設)

2. 大規模地下空間の被害・避難シミュレーション

堀 宗朗 (東京大学)

小国 健二 (東京大学)

3. 密集空間における総合避難誘導シミュレーション

後藤 洋三 (防災科学技術研究所)

末松 孝司 (安全安心マイプラン)

木下 芳郎 (安全安心マイプラン)

山田 武志 (安全安心マイプラン)

元結 正次郎 (東京工業大学)

外井 哲志 (九州大学)

浅利 眞 (クライシスイテリジェンス)

4. 帰宅困難者シミュレーション

佐野 昌利 (三菱総合研究所)

田野中 新 (三菱総合研究所)

田山 裕信 (三菱総合研究所)

5. 大震災時の消防力最適運用シミュレーション

糸井川 栄一 (筑波大学)

鈴木 勉 (筑波大学)

村尾 修 (筑波大学)

阿部 英樹 (筑波大学)

