

震災時における負傷者搬送を考慮した高層建築物の避難方法に関する研究

東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター 伊藤 博紀

東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター 柴山 明寛

東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター 大野 晋

1. はじめに

近年の超高層建築物に代表される多層建築物においては、利用者が迅速にかつ安全に避難できる避難計画を整備することが必要不可欠である。特に大規模地震災害時には、高層建物内で負傷者の発生が懸念されるため、それを考慮した避難計画が必要となる。これまで、高層建築物における避難については、避難シミュレーション^{例えば 1)}や震災時火災を考慮した研究^{例えば 2)、3)}、震災時の室内被害を考慮した避難シミュレーション⁴⁾、避難者用車椅子の実証実験や避難シミュレーション^{例えば 5)、6)}などの研究が行われている。

ただしこれらの研究は、室内被害予測、負傷者発生予測、負傷者の避難方法などに対する個別の評価法の提案を主な目的としており、高層建築物各階の床応答レベルから室内被害を算定し、それに基づく負傷者を予測して、室内散乱及び通路閉塞を考慮しながら負傷者を含む在館者の全館避難方法について検討すると言ったトータルでの安全な避難方法に関する検討はまだ十分に行われていない。このような検討により、負傷者を伴う全館避難において影響が大きい因子を抽出することで、安全な避難方法を検討できるものと思われる。

そこで本研究では、高層建築物において実際に観測した強震記録⁷⁾をもとに床応答レベルから室内被害及び負傷者数を算定し、マルチエージェントシステムを用いて負傷者を考慮した全館避難シミュレーションを実施した。

2. 避難シミュレーションのためのモデルの構築

①高層建築物のモデル化について

本研究で対象とする建物は、1974年に竣工した仙台市に実存する地上18階、地下2階のオフィスビルである。対象建物では、1978年宮城県沖地震を経験し、地下2階、9階、18階の3地点で強震記録が観測されている。この建物を対象とした理由は、今後の宮城県沖地震を想定し、実際の建物応答記録に基づく避難シミュレーションを行うためである。今回、避難シミュレーションを行うにあたり、地下階の避難者の影響は少ないと考え、地上階のみでシミュレーションを行った。

対象建物の平面形状及びオフィスレイアウトを図1に示す。対象建物の平面形状は、32.4m×32.6mのほぼ正方形の明快な平面形であり、避難階段は2カ所、避難階段室の面積は11.52m²、階段幅は1.2mである。建物高さは66.0m、階高に関しては、1階は4.02m、2階から15階は3.45m、16階は3.65m、17階は4.05m、18階は5.65mである。オフィスレイアウトは、文献調査^{8)、9)}を参考に執務空間内占有比率を基に什器類を設置した。オフィスレイアウトは各階で同一とした。これは、対象建物がテナントビルであり、随時企業の入れ替わりがあるため、標準的なオフィスレイアウトを採用したためである。

設置する什器の種類に関しては、負傷者数の算定のために表1に示す「転倒しにくいもの(Type A)」と「転倒しやすいもの(Type B)」の2つに分類した¹⁰⁾。ここで示している「転倒しにくいもの(Type A)」は、奥行き:45cm、幅:80cm、高さ:120cm、「転倒しやすいもの(Type B)」は、奥行き:45cm、幅:80cm、高さ:180cmの2種類に分

*Study on human evacuation considering an injured person in a high-rise building for earthquake disaster by Hiroki Ito

類した。Type A と Type B の違いは、什器の高さの違いのみである。

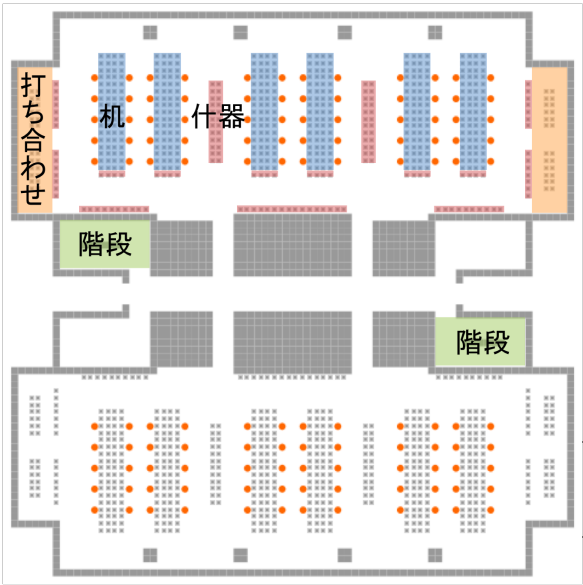


図1 オフィスレイアウト

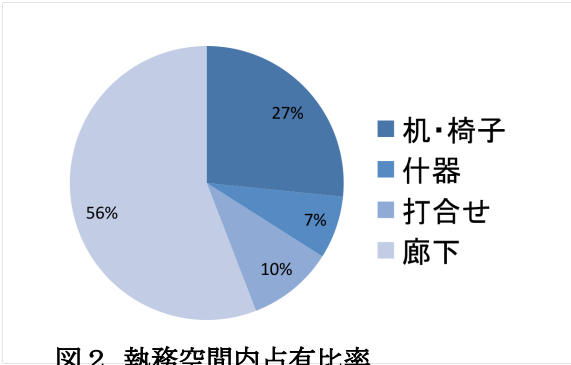


図2 執務空間内占有比率

表1 什器の分類¹⁰⁾

転倒しにくいもの (Type A)	・単体家具 (壁、独立、高さ150cm未満の背中合わせ) ・多段積み家具の最下段
転倒しやすいもの (Type B)	・高さ150cm以上の背中合わせ ・多段積み家具の最下段以外

②在館者と負傷者のモデル化について

在館者数は、図1で示したオフィスレイアウトから執務スペースにおける1人当たりの占有面積を約5 m²として、各階を120人、全体の在館者数を2,160人と設定した。これは、日本での執務スペースにおける1人当たりの占有面積の平均5～8m²に相当するものである。

設定した在館者数を基に各階の負傷者数の算定を行う。1978年宮城県沖地震の際に対象建物の地下2階、9階、18階の3地点において観測された水平最大速度⁷⁾を線形補間して各階の床応答速度を算出し、翠川・佐伯のフロー¹⁰⁾に従って什器類の転倒防止対策が施されていない状況の負傷者数の算定を行った。また、重傷率は負傷率の1割であると仮定して重傷者数を算定した¹¹⁾。表2に各階の床応答速度と負傷者数を示す。

表2 各階の床応答速度と負傷者数

階数	応答速度 (m/s)	負傷者数 (重傷者数)
18	92	22(3)
17	88	21(3)
16	83	20(3)
15	79	20(3)
14	75	19(3)
13	70	18(3)
12	66	17(3)
11	62	16(3)
10	58	15(2)

階数	応答速度 (m/s)	負傷者数 (重傷者数)
9	53	14(2)
8	51	14(2)
7	49	13(2)
6	47	12(2)
5	45	11(2)
4	42	10(2)
3	40	10(2)
2	38	9(1)
1	36	7(1)

下層階から上層階になるにつれて負傷者数が増大し、最上階18階で22人、最下階1階でも7人の負傷者が発生する結果となった。

③避難者エージェントの行動規範及び移動能力

避難シミュレーションを行うにあたり、本研究では、個々の人間をシミュレートするマルチエージェントシステム(artisoc¹²⁾)を用いて行った。

避難者エージェントの行動フローを図3に示す。避難者エージェントは、現在の位置、最終的な避難口の位置、避難口までの経路地点の位置、周辺の人や壁等の障害物の位置を情報として持っており、これらの情報を基に障害物との衝突を回避しながら最終的な避難口を目指すようにした。シミュレーションにおける避難者エージェントの種類は、以下の3種類である。

- ①自立歩行可能な避難者
- ②自立歩行可能な負傷者
- ③自立歩行が困難である重傷者

③の自立歩行が困難である重傷者の搬送に関しては、①の歩行可能な避難者2名が重傷者を腕組みによる介助運搬するものとした。①、②の自立歩行可能な避難者が階段室を降下する際には、③自立歩行が困難である重傷者の追い越しができないものとした。

3種類の避難者エージェントの移動速度を表3に示す。①自立歩行可能な避難者¹³⁾、②自立歩行可能な負傷者¹⁴⁾の水平移動速度は、平均値及び標準偏差の正規分布に従って与えられ、それぞれの階段降下速度は60%減少するものとした。③の自立歩行が困難である重傷者に関しては、搬送する際の水平移動速度を0.5m/s、階段降下速度を0.3m/sとなるように設定した¹⁵⁾。

避難者エージェントの初期位置と執務空間内の移動に関して述べる。まず、避難開始前の避難者エージェントの初期配置は、机周辺に設定し、自立歩行が困難な重傷者に関しては什器周辺にランダムに発生させた。次に、執務空間内の移動に関しては、①、②の自立歩行可能な避難者は、避難開始と同時に一斉に最も近い出口に向かい階段室へと移動する。③の重傷者に関しては、転倒した什器類からの救出及び搬送形態への移し替えに要する時間⁸⁾を考慮して避難行動を開始するものとした。

この際の執務空間内の避難行動に関して、①、②の自立歩行可能な避難者は、転倒した什器類を乗り越えて避難するものとする。現状では転倒した什器類を乗り越える速度及び転倒した什器類からの救出に要する時間の関係を示したデータがないので、実証実験を行いこれらの値を取得した。実験の結果、転倒した什器を乗り越える際の移動速度は64%減少し、救出に要する時間は平均で14.8秒であった。③の重傷者は実験より得られた値及び搬送形態への移し替えに要する時間¹⁶⁾に基づき、約23秒遅れて避難を開始することとした。

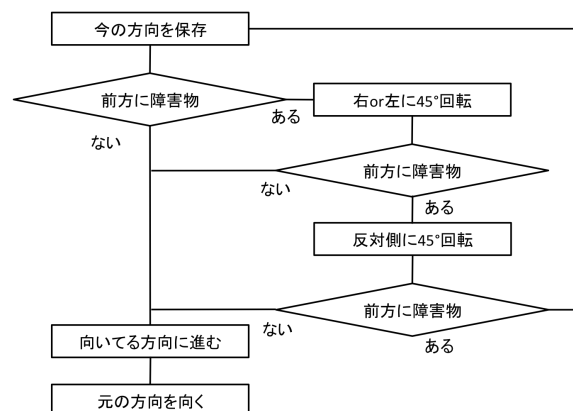


表3 避難者エージェントの種類と移動能力

エージェントの種類	水平移動(m/s)		階段降下(m/s)
	平均	標準偏差	
①自立歩行可能	1.47	0.246	60%減少
②負傷者(自立歩行可能)	0.95	0.32	60%減少
③重傷者(2名で腕組み)	0.5		0.3

図3 エージェントの行動フロー

3. シミュレーション結果

①負傷者の発生の有無による比較

負傷者の発生がない場合と負傷者の発生がある場合との避難率と避難完了時刻(在館者が全員1階から屋外に出た時刻)を図4に示す。避難率をみると、負傷者の発生がある場合では介助歩行される重傷者の影響で避難効率の低下がみられ、最終的な避難完了時刻は、負傷者の発生がない場合と負傷者の発生がある場合とで400秒ほどの差が出る結果となっている。この差の主な要因は、重傷者が介助歩行で降りる際に、その後ろにいる自立歩行が可能な避難者が介助歩行者を追い越すことができないために生じた遅れだと思われる。そこで、各階の在館者毎の避難完了時刻を図5に示す。散布図は、ポイント一つ一つが1人の避難者の避難完了時刻を表しており、青色が自立歩行可能な避難者、赤色が自立歩行の困難な重傷者である。避難完了時刻は、上階ほどその階より下で発生した重傷者の影響により遅れが生じており、途中で途切れる形となっている。これらのことから、自立歩行が困難な重傷者を伴って在館者が一斉に避難を開始した際、重傷者の階段での移動がボトルネックとなり、避難に遅れが生じる可能性が大きいと言える。

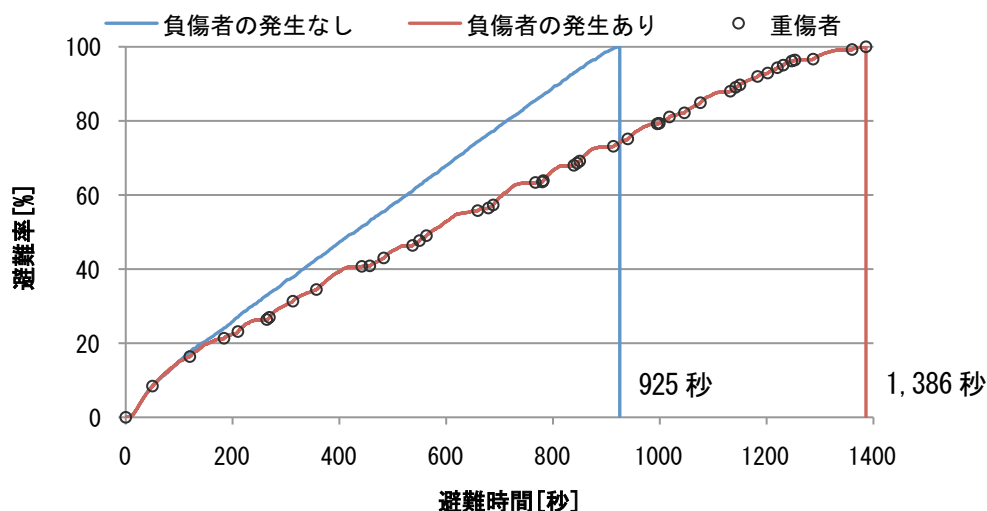
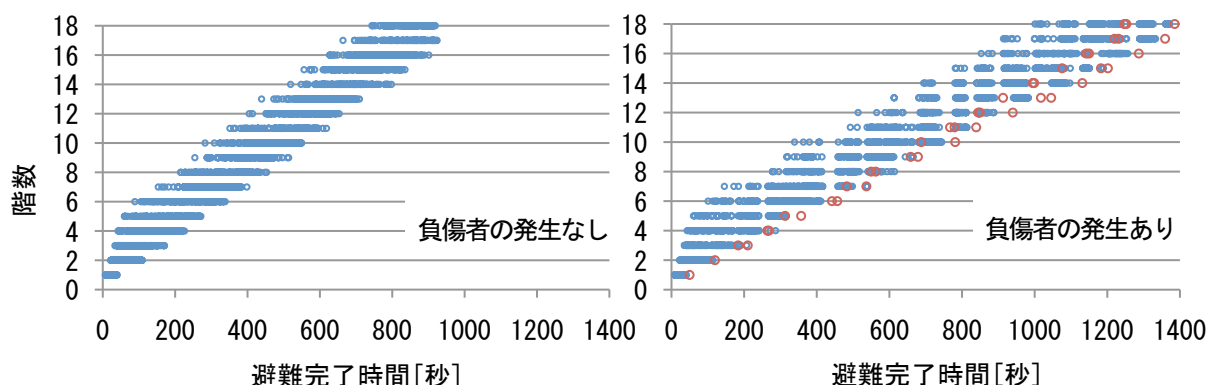


図4 避難率と避難完了時刻



○：自立歩行可能な避難者、○：自立歩行が困難な重傷者

図5 自立歩行可能な避難者が介助歩行者を追い越すことができない様子

②時間変化ごとの各階在館者数

ここでは重傷者の発生が、在館者全員の避難完了時刻のみならず、各階の避難経過に与える影響について検討を行う。経過時間(480 秒後、720 秒後)ごとの各階の在館者数を棒グラフで表したものを図 6 に示す。図 6 より、負傷者の発生がない場合は避難時間の経過とともに避難が順調に進行していく様子がみてとれるが、一方の介助歩行される重傷者を伴う避難では、避難開始から 480 秒経過しても各階、特に上層階の在館者数には大きな変化はみられない。さらに避難時間が経過すると、負傷者の発生がない場合は、上層階にいた在館者が中層階及び低層階に移動しているのに対して、重傷者を伴う避難の場合では、避難開始から 720 秒経過してもなお、最上階である 18 階に在館者が留まっている結果となった。このような非常時に長時間にわたり同じ場所に留まることは、避難者に心理的な不安を生じさせる可能性があると言える。

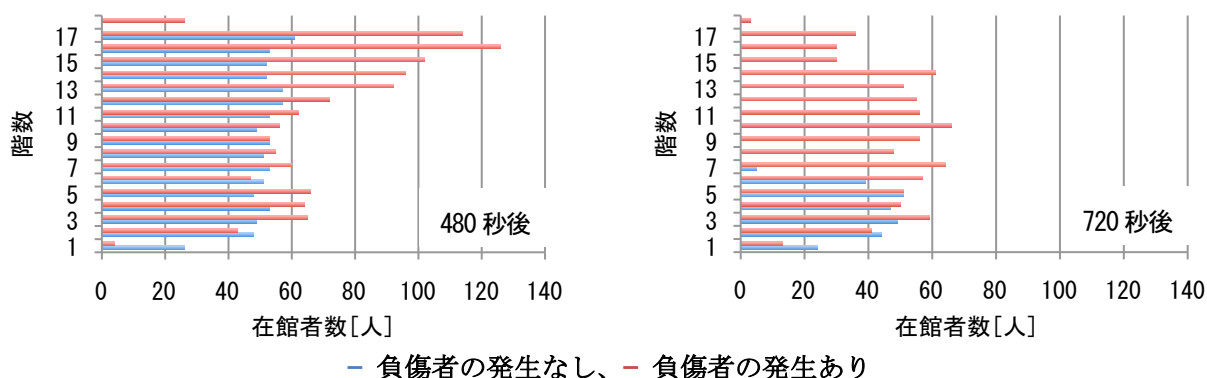


図 6 什器類の転倒防止対策率の違いによる各階在館者数の時間変化

③負傷者の搬送形態による比較

上記の通り 2 名腕組みによる重傷者の搬送形態では、自立歩行可能な避難者が介助歩行者を追い越してできない状況がボトルネックとなり避難時間に遅れが生じている。そこでこのボトルネックを軽減できる搬送形態として自立歩行可能な避難者が介助歩行者を階段室において局部的な追い越しが可能となる避難者用車椅子がある。それぞれの避難者エージェントの移動速度を表 4 に示す。また避難率及び避難完了時刻を図 7 に示す。

図 7 の避難率をみると、避難者用車椅子の搬送形態では 2 名腕組みの搬送形態でみられた重傷者の影響による避難効率の低下が軽減されていることがわかる。このことにより、最終的な避難完了時刻も 2 名腕組みの搬送形態と比較すると 200 秒ほど短縮される結果となった。

4. まとめ

本研究では、高層建築物において実際に観測した強震記録をもとに床応答レベルから室内被害及び負傷者数を算定し、マルチエージェントシステムを用いて負傷者を考慮した全館避難シミュレーションを実施した。その際、什器類の転倒防止対策率の違いを考慮して室内被害を算定した。シミュレーションの結果、什器類の転倒防止対策を進めると重傷者の発生が抑えられ、避難時の階段室でのボトルネックが少なくなるために、順調な避難が可能となる。したがって、避難計画上也什器類の転倒防止対策の重要性が再確認された。

一方、重傷者を伴う避難の場合、階段室において介助歩行される重傷者の追い越しができない状況がボトルネックとなることから、階段室においての局部的な追い越しが可能となる搬送形態を採用することが重要であることがわかった。

表 4 避難者エージェントの種類と移動能力

エージェントの種類	水平移動速度(m/s)		階段降下 (m/s)
	平均	標準偏差	
①自立歩行可能	1.47	0.246	60%減少
②負傷者(自立歩行可能)	0.95	0.32	60%減少
③重傷者(2名で腕組み)	0.5		0.3
③重傷者(避難者用車椅子)	1.6		0.31

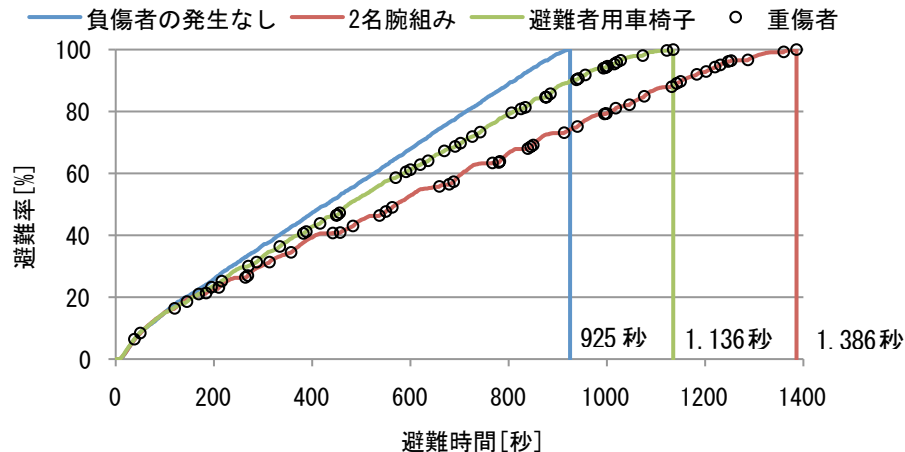


図 7 避難率と避難完了時刻

参考文献

- 1) 鴨井悠太、翠川三郎:簡易なシミュレーションに基づく高層建築物における地震時避難状況の把握に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、pp. 643-644、2005
- 2) 峰岸良和、吉田克之、竹市尚広:高層建築物における中間避難階を利用した全館避難時の群集流動の制御、日本建築学会大会学術講演集梗概集、A2、pp. 31-32、2009
- 3) 矢代嘉郎、海老原学、掛川秀史:避難シミュレーションに基づく大規模建築物の全館避難の課題大規模建築物の避難安全性に関する研究(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、A2、pp. 221-222、1995
- 4) 北後明彦、原田曜輔、関沢愛、掛川秀史:商業施設における地震時の避難シミュレーションに関する研究、神戸大学都市安全研究センター、研究報告、第13号、pp. 43-48、2009
- 5) 中野陽介、佐野友紀、阿部修太郎、大宮喜文、石突光隆、荻原一郎:高層建築物における在館者の避難行動特性(その4):避難者用車いすの訓練とアンケート調査を踏まえた利用可能性、日本建築学会 関東支部研究報告集 I、pp. 327-330、2004
- 6) 荻原一郎、佐野友紀:防災計画における避難者用車いすの利用に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演集、A2、pp. 113-114、2003
- 7) 宮城県:’78 宮城県沖地震災害の教訓、今野平版印刷株式会社、昭和59年3月
- 8) 日本建築学会編:第2版コンパクト建築設計資料集成、丸善、1994年
- 9) 片方善治 監修:オフィス環境プランニング総覧、フジ・テクノシステム、1994年
- 10) 翠川三郎、佐伯琢磨:オフィスビル群における地震時の室内負傷者発生予測、日本建築学会構造系論文集、第476号、pp. 49-56、1995
- 11) 大都市大震災軽減化特別プロジェクト平成18年度成果報告書:
<http://www.kedm.bosai.go.jp/japanese/seikahoukoku/h18/2-3.1.pdf> (参照 2010/09/01)
- 12) 構造計画研究所:artisoc、<http://mas.kke.co.jp/>(参照 2010/09/01)
- 13) Wills et al : "Human movement behavior in urban spaces", Environment and Planning B : Planning and Design 31, pp. 805-828、2004.
- 14) K.E. Boyce、et al : Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering ; Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and an Incline、Fire Technology、1994.
- 15) 兼田敏之 編集代表:artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション、株式会社構造計画研究所、2010年
- 16) 大西一嘉、室崎益輝:病院の避難計画に関する研究(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、E、pp. 289-290、1986