

木造密集地域における地震時の広域火災に対する避難計画に関する研究

AN EVACUATION SIMULATION FROM SPREADING FIRE AFTER AN EARTHQUAKE
IN THE AREA DENSELY CROWDED WITH WOODEN HOUSES

馬淵ゆみ¹, 瀬尾和大², 元木健太郎³, 上田 遼⁴

Yumi MABUCHI, Kazuoh SEO, Kentaro MOTOKI, and Ryo UEDA,

¹元東京工業大学 大学院総合理工学研究科 現Accenture株式会社

Master Student, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

²東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻 教授

Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

³東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻 助教

Assistant Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

⁴元東京工業大学 大学院総合理工学研究科 現鹿島建設株式会社

Division of Architectural Design and Engineering, Kajima Corp

This study aims to propose an effective evacuation method against spreading fire after an earthquake in an area densely crowded with wooden houses. Firstly, detailed fire risk of the research area is shown using Monte Carlo method. Secondly, multi-agent model is applied for the simulation of evacuation from the fire spreading. And then a case study comparing two evacuation routes is carried out. The case study showed that the evacuation on the eastern route, which is avoiding high-fire risk area, is better than the western route, which is recommended as a main route by the local government, although it includes high-fire risk area. It is concluded that the evacuation planning using practical simulation like this study looks very important and effective.

Key Words: 2-Step Evacuation, Risk of Spreading Fire After Earthquake, Area Densely Crowded with Wooden Houses, Multi-Agent-Model

1. はじめに

東京都は 1923 年関東大震災の広域火災で当時の東京市の半分以上を焼失し多くの犠牲者が生じたことを教訓とし、現在では被災地から一時集合所を経て広域避難場所への 2 段階避難を定めている。しかし避難活動の詳細については検討されていないため、避難中に火災にさらされることや住民が一斉に同じ経路を利用した場合、道路混雑を引き起こすことが予想される。このような観点から、2 段階避難を忠実にモデル化し研究を行った例はほとんど見当たらない。また、既往の 500m メッシュごとの火災延焼危険度評価¹⁾では、避難途中経路上の火災による危険性までを把握することはできない。青木ほか²⁾は地震火災時の情報伝達に着目し避難誘導方法を考察しているが、そのモデルでは 1 段階の避難しか検討されておらず、火災危険度を考慮した効果的な避難計画の提案は行われていない。そこで、本研究では世田谷区の木造密集市街地を例として、建物の火災延焼の危険度を確率論的手法によって評価し、それを考慮した 2 段階避難のモデルを構築し避難シミュレーションを行うことで、震災時の効果的な避難方法の提案を行うことを目的としている。

2. 対象地域と想定地震

対象地域は東京都世田谷区太子堂の木造密集市街地と

し図 1 の破線枠内に示す。東京都¹⁾および内閣府³⁾の想定によれば、対象地域は都内で最も地震火災リスクが高い地域の一つとされており、この地域に、地震火災にとって最悪の条件として冬の夕刻 18:00・風速 15m/s 強風時という条件で東京都や内閣府と同様の首都圏直下地震(東京湾北部 M7.3)が発生したと想定する。地域の一部は明治 14 年頃に存在した水田の跡地(今後旧水田地域と称する)を造成したため地盤が悪いと予想される。そこで旧水田地域の表層地盤を谷底低地、その他の地域を台地と分類し、内閣府の地震被害想定支援マニュアル⁴⁾を参照し、図 1 のごとく旧水田地域内外で異なる地震動強さを設定した。

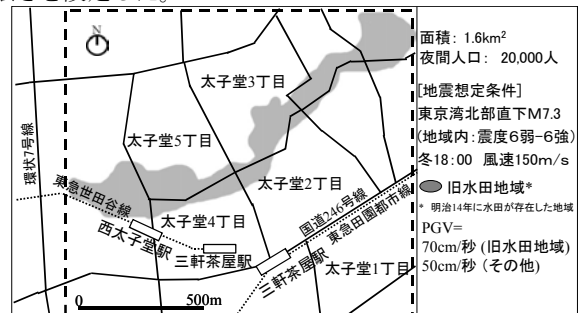


図 1 対象地域と想定地震

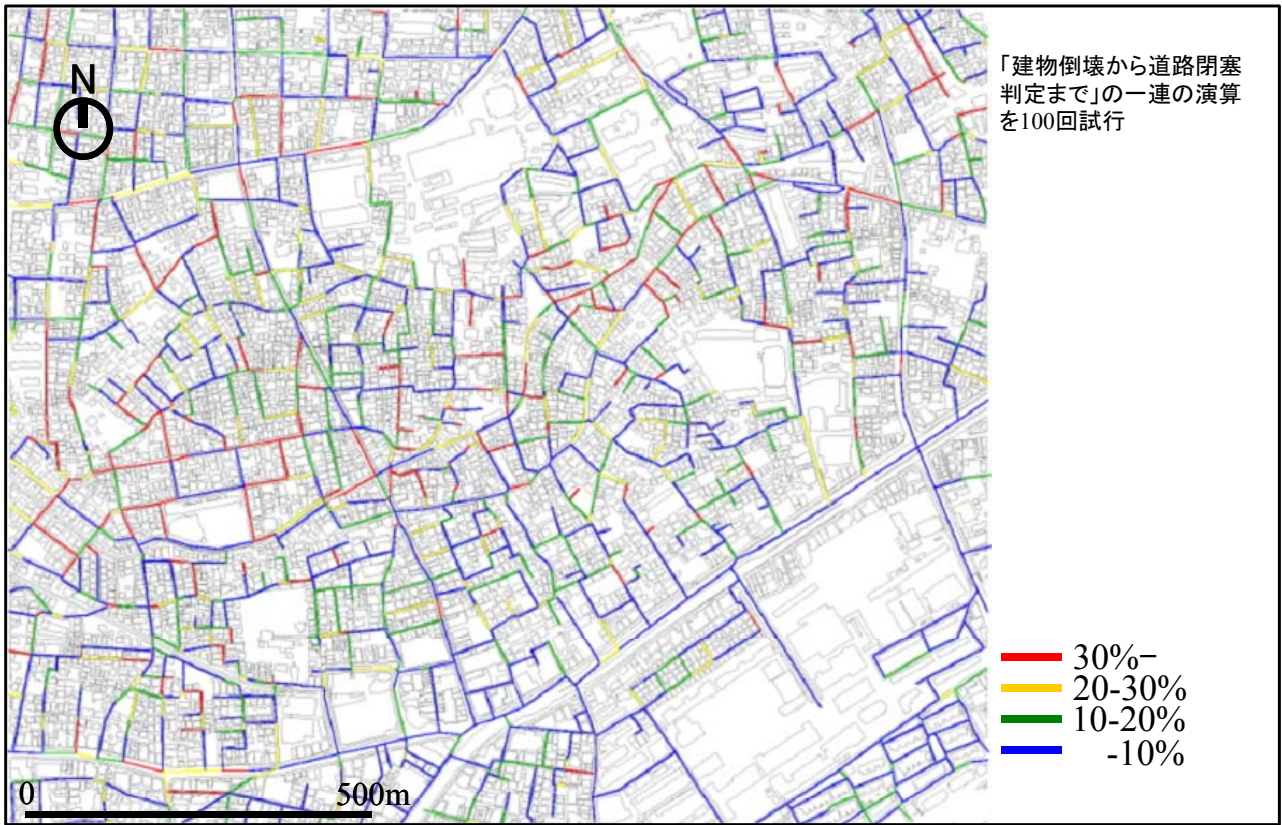


図2 道路閉塞確率

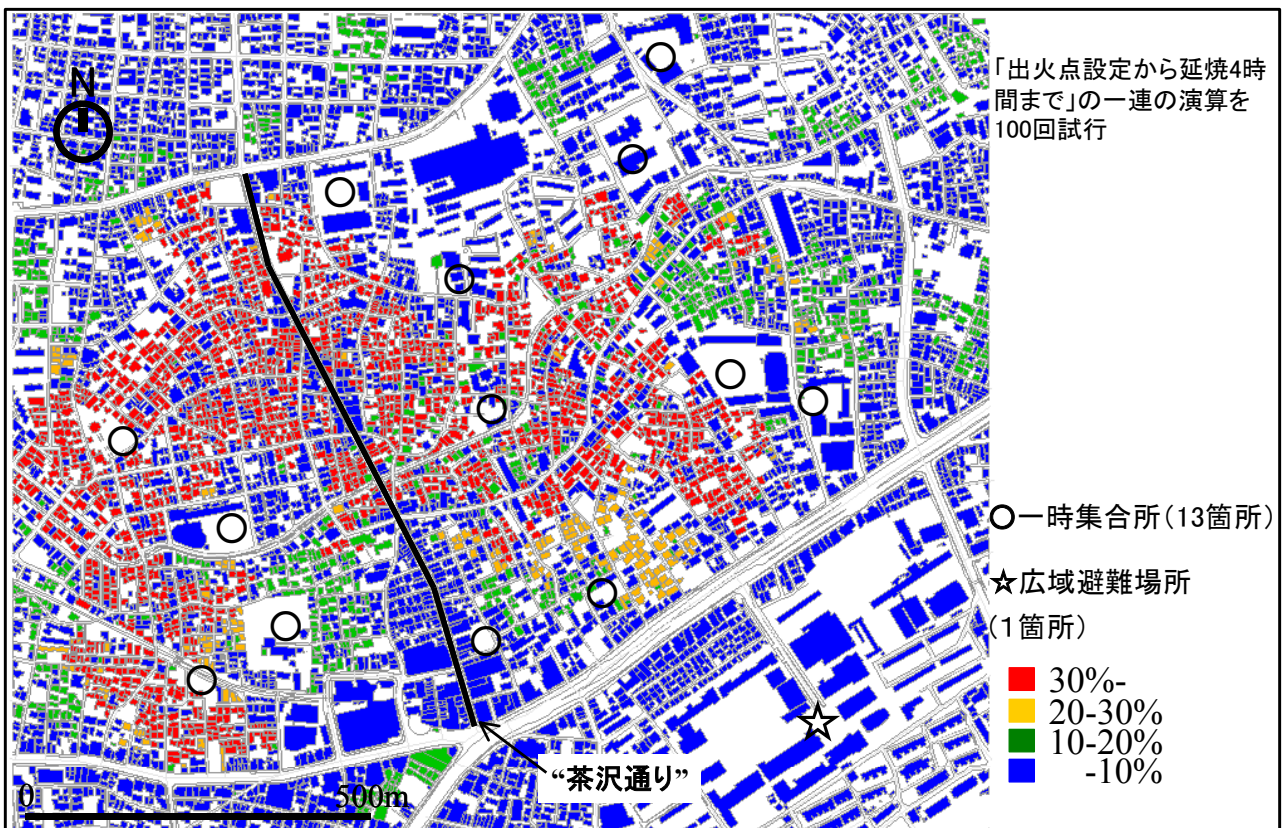


図3 延焼焼失確率

3. 道路閉塞確率及び火災焼失確率の決定

震災時の避難において障害となるのは、道路閉塞と建物火災の2つが考えられる。建物倒壊に起因する道路閉塞確率及び火災焼失確率を決定するためには、双方に共通して建物の全壊率を設定する必要がある。まず世田谷区土地利用現況図に基づき建物構造、築年数を設定する。ただし築年数は個別に特定できないため暫定的に年代3区分（1971以前、1972-1981、1982年以降）の割合に合うように比例配分した。つぎに内閣府の地震被害想定支援マニュアル⁴⁾を参照し、全壊率と築年数の関係式を基にして全壊率を設定する。道路閉塞は、市川ほかのモデル⁵⁾と同様に、全壊建物の周りに建物の高さと同じ幅の瓦礫が広がるものとし、瓦礫が道路幅員を完全に覆った場合にその道路を閉塞状態と判定する。建物の出火延焼は、まず神奈川県防災会議による出火率のモデル⁶⁾に基づき出火率を設定し、乱数を発生させ出火点の数や場所を決定する。火災延焼計算は浜田⁷⁾堀内⁸⁾ほかのモデル同様、着火側の建物防災性能ごとに隣棟への延焼時間を求め、逐次計算によって延焼拡大を追跡する。最悪状況を想定しているここでは消防力の寄与は考慮していない。「建物倒壊から道路閉塞判定まで」の一連の演算および「出火点設定から延焼4時間まで」の一連の演算をモンテカルロ法を用い、それぞれ100回試行した。道路閉塞確率(閉塞回数/試行回数)を図2に、火災焼失確率(焼失回数/試行回数)を図3に示す。図2図3ともに旧水田地域における道路閉塞確率および焼失確率が比較的高くなることは、地盤特性が全壊率、また全壊率が出火率に影響することから容易に予想できる。また図3から“茶沢通り”特にその北半分は、火災に対する危険度がきわめて高い地域であることが確認できる。

4. 防災区民組織へのアンケート調査

世田谷区では、震災時に防災区民組織の協力を得て災害対策活動を行う。そこで避難モデル構築の基礎資料を得るために、対象地域の防災区民組織役員にアンケート調査を行った(表1)。

回答者が良いと考える、自宅から一時集合所へ避難(今後“1次避難”と呼ぶ)のタイミングは、「避難勧告(指示)が出たら」が54%、次いで「自宅建物の被害に気付いたら」が28%であった(図4)。また1次避難を指示してくれるであろう人では、回答者の60%前後が「近所の人」「自治会」「自主防災組織」を選んだ(図5)。また回答者が良いと考える、一時集合所から広域避難場所へ避難(今後“2次避難”と呼ぶ)のタイミングは、「一時集合所に火災が接近したら」「避難勧告(指示)が出たら」という回答に大きく二つに分かれた(図6)。また2次避難を指示してくれるであろう人では、回答者の80%弱が「自治会」「自主防災組織」という住民の代表を選んだ(図7)。震災直後行政から避難勧告が出るということは想像し難いため、実際には行政に変わって住民の代表が火災接近などの指標をもとに避難指示を行う必要がある。

これらの結果を参考に今回のシミュレーションでは、1次避難2次避難ともに自主防災組織が火災接近を目標で確認したのち、避難指示を出す設定とする。またこの他の設問では、組織の構造や設置している班の種類など基礎情報を把握した。

表1 アンケート概要

配布期間	2007/9/1～/9/31
対象者	防災区民組織80名
アンケート内容概要	・属性や組織構造など基礎的情報 ・地震後の避難方法
配布方法/収集方法	各役員へ直接手渡し/郵送
回収率	69%(55/80)

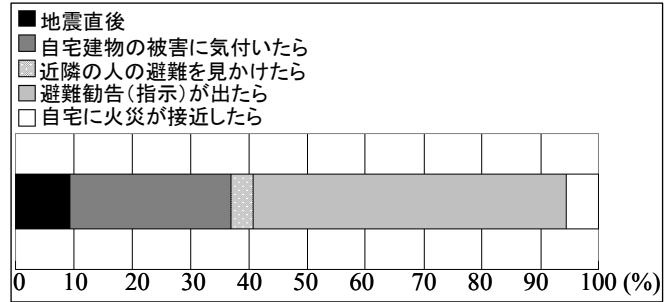


図4 1次避難タイミング

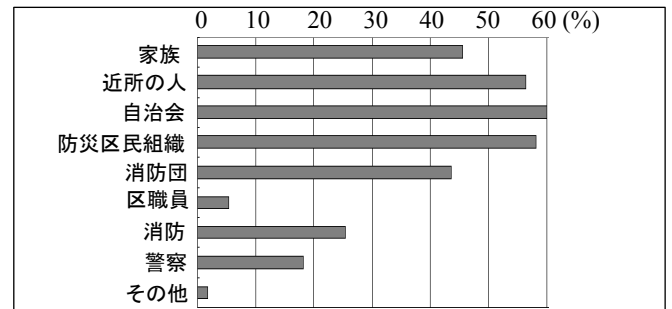


図5 1次避難を指示する人

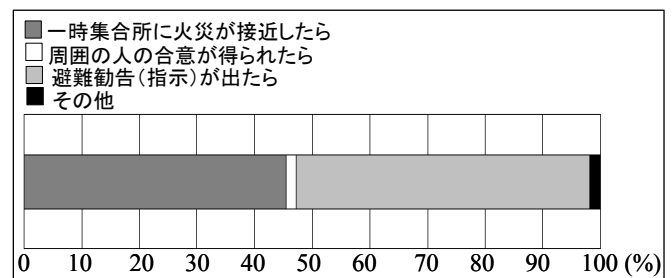


図6 2次避難タイミング

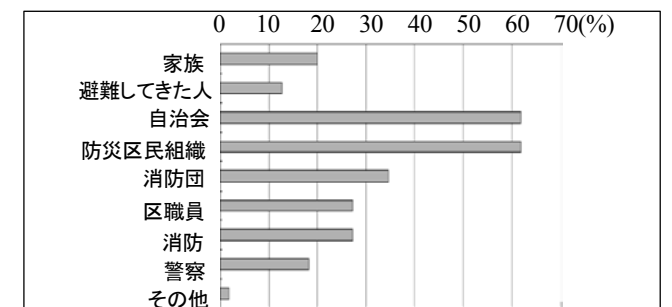


図7 2次避難を指示する人

5. 避難行動シミュレーションのためのマルチエージェントモデルの構築

マルチエージェントモデルとは相互作用しあう多数のエージェント（自律的に思考・行動・状態変化する人間等のモデル）から構成されるモデルであり、複雑な人間行動の研究などに有用である。本研究では、火災回避行動や群集密度に応じた歩行速度の決定など、避難者個別の行動を模擬する必要があるため、このマルチエージェントモデルを利用する。避難モデル構築に際しては防災区民組織へのアンケート調査を行い、現状の避難活動を本モデルに取込もうと考えたが、地域独自の避難計画は特段準備されていないことを前章にて確認した上で、本研究独自の方法で火災の接近を回避した震災後の避難行動モデルを構築する。そして既往の地震被害モデル（道路閉塞・火災延焼）と連動させる（図 8）。避難者エージェント（以下「エージェント」）は対象地域内の夜間人口を基とした 20,000 人を想定する。なお今回は計算負荷を下げため、40 人を 1 グループとして、500 組のエージェントを形成するが、この設定が結果に影響しないことを別途確認している^{注 1)}。避難の開始条件については、延焼火災のフロントから 200m⁹⁾ 以内の区域のエージェントは順次最寄りの一時集合所への一次避難を始めることとし、二次避難についても、同様に火災が一時集合所の 200 m⁹⁾ 以内に近づいた場合に避難を始めることとする。また、一時集合所までは最短経路で移動し、移動途中に火災が 50m⁹⁾ 以内に迫ると火災と別方向かつそこから目的地までの最短経路を選択し回避行動を行う。また Fruin¹⁰⁾ 式により経路の群集密度に応じて歩行速度を定める。また閉塞道路においては、瓦礫を乗り越えて歩くことができる¹¹⁾ ことを想定し、その際の歩行速度を通常の 0.7 倍と設定する。シミュレーション時間は発災から 4 時間後までを対象としているが、その妥当性については後程論じられる。

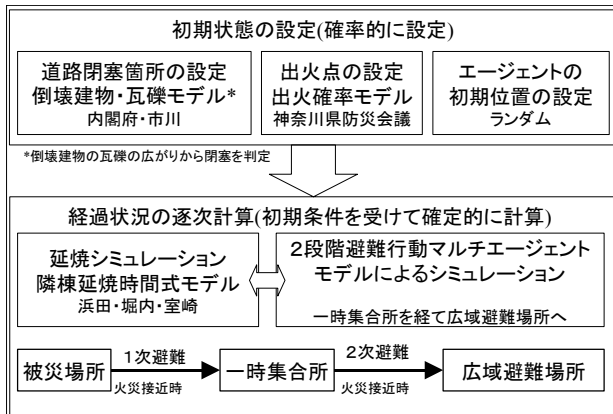


図 8 火災および道路閉塞を考慮した二段階避難シミュレーションの概要

6. 避難行動のケーススタディ

“茶沢通り”は対象地域の主要避難経路として世田谷区や防災区民組織によって推奨されており、震災時多くの住民が利用することが予想されている。ここでは、“茶沢通り（以下では西経路と称する）”と、“火災危険地域を避けた避難経路（以下では東経路と称する）”を用いた 2 通りのケーススタディを行い、広域避難完了者率（広域避難完了エージェント組数/500）および広域避難

途中者率（広域避難途中エージェント組数/500）の比較を行う。2 次避難時、各一時集合所から広域避難場所へ向う際の経路は図 9 の概念図に示されている。図 9 では、避難所別に西経路と東経路で使用する道のりを矢印で示している。矢印に道路番号が示されている場合、指定された道路を使用し、指定道路までは最短経路で移動する。「直接」と示されている場合は、指定道路①～④を経由せずに広域避難場所へ最短経路で向かう。

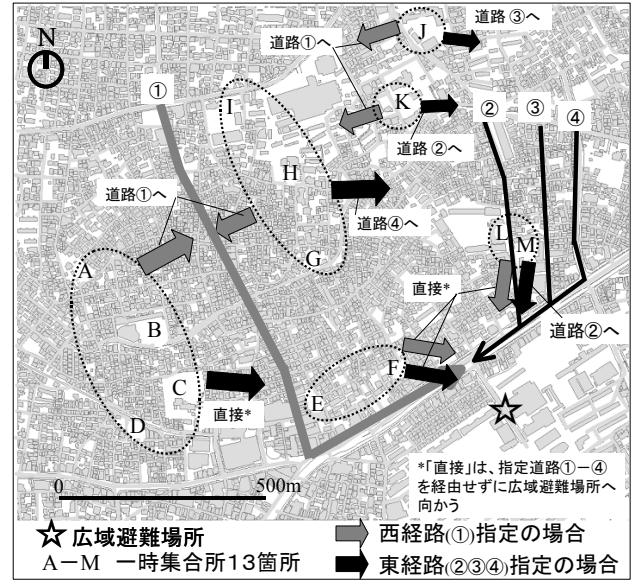


図 9 2 次避難経路

火災の接近が避難開始のタイミングとなるため、出火点の位置およびそこから火災延焼の様子によって避難者数は異なるので、異なる火災パターン 10 ケース^{注 2)}について西経路と東経路のそれぞれについての避難シミュレーションを行い、それらの平均値としての広域避難完了者率と広域避難途中者率を図 10 に示す。

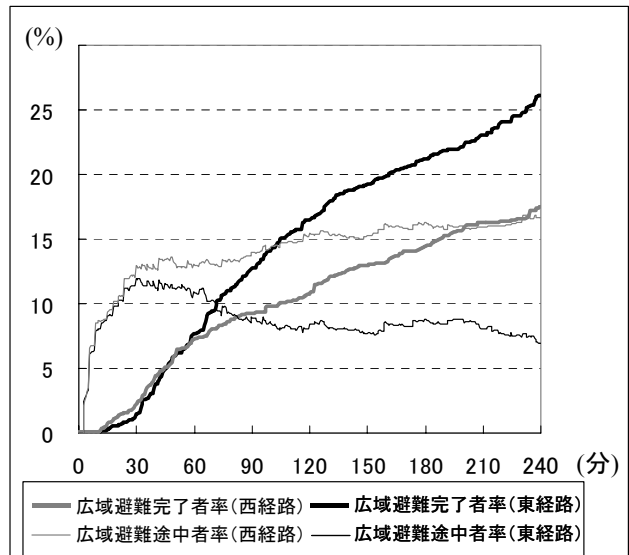


図 10 広域避難完了者率および広域避難途中者率

まず広域避難完了者率を見ると、東経路は西経路に比べて避難完了スピードが速いことが確認できる。西地域の一時集合所 G, H, I から広域避難場所までの避難距離は

東経路より西経路の方が短いため、西経路の方が有利であるが、シミュレーション結果では東経路の方を有利と判定している。この理由として西経路は、火災リスクが高いため避難者が大量に発生するうえ、主要避難経路が茶沢通りに限られているため、そこに混雑が起りやすいこと、また火災に遭遇する確率が高いため、火災に避難を阻害される確率が高いことなどが考えられる。

一方東経路の場合には、火災リスクが低く経路も分散しているため、円滑な避難が可能であると推察される。これは、対象地域の火災による危険度を詳細に評価し、それを考慮した適切な避難方法を提案するという本研究の手法の有用性を示唆しているものと考えられる。次に広域避難途中者率をみると、西経路については、およそ60分以降から徐々に増加しており、おおむねこの時間帯から道路混雑が深刻化していると考えられる。実際に図11の120分後のシミュレーション画面を見ても混雑状態が確認できている。また混雑具合を表す群集密度を同一条件で別途再計算し、図12図13に示す。ここでは群集密度が4人/m²以上を道路混雑と称することとする。群集密度が0人/m²で歩行の妨げがない場合は歩行速度は約80m/分であるが、道路混雑箇所では歩行速度が6m/分(下限値)となり、群集がほとんど進めない状態である。図12より、西経路の場合2時間後には茶沢通り南半分においておよそ100mにわたり道路混雑が発生していることが確認できる。また4時間後も状態がほぼ変わらないことを別途確認した。また道路混雑に巻き込まれた場合のエージェントの歩行速度は、約6m/分となり、

最も歩行速度が速い^{注3)} エージェントの約1/10以下まで低下することが確認できた。これらの結果は先述の西経路の避難阻害要因について考察した内容の裏付けとなる。とともに、このような混雑時間帯を発見することで、通行整理を重点化するなどの対策が取りやすくなると考える。

一方東経路について広域避難途中者率をみると、30分後のピーク値約12%から時間経過とともに減少しており、240分後には約7%にまで値が減少した。また図13より1時間後の東経路の群集密度は0.5人/m²以下であり、エージェントの歩行速度が70m/分前後になることから、スムーズに避難行動が行えていることが分かる。また4時間後も状態はほぼ変わらないことを別途確認している。これらの結果から、東経路を利用するとおよそ4時間以内に広域避難を完了することができたと考える。ただし240分後に存在する7%の広域避難途中者の大半は、すでに火災の危険度が低い地域に移動していることを別途シミュレーション画面にて確認している。

なお図3から、発災から4時間が経過すると広域避難場所周辺に火災が接近する危険が高まり、その場合には避難者が2次避難できない状況になることが予想される。そのためこの地域は事前対策を行うことが必要である。行政の対策としては、建物の耐火性能の強化や道幅の拡張など、ハード面での事前対策が考えられる。また地震時広域火災が発生した場合の事後対策としては延焼予防措置として、まずこの地域の消火・防火活動を優先的に行うことが有効であると考えられる。

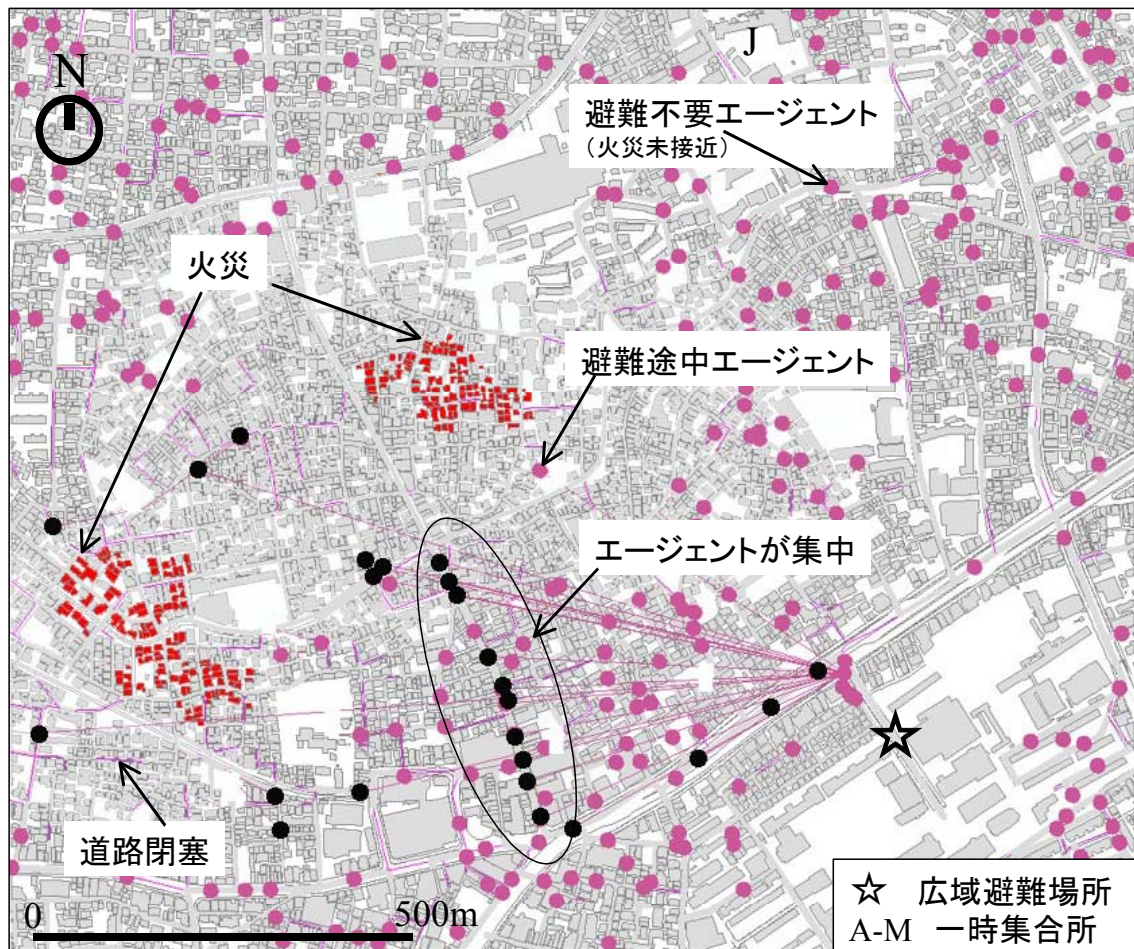


図11 120分後のシミュレーション画面(西経路)

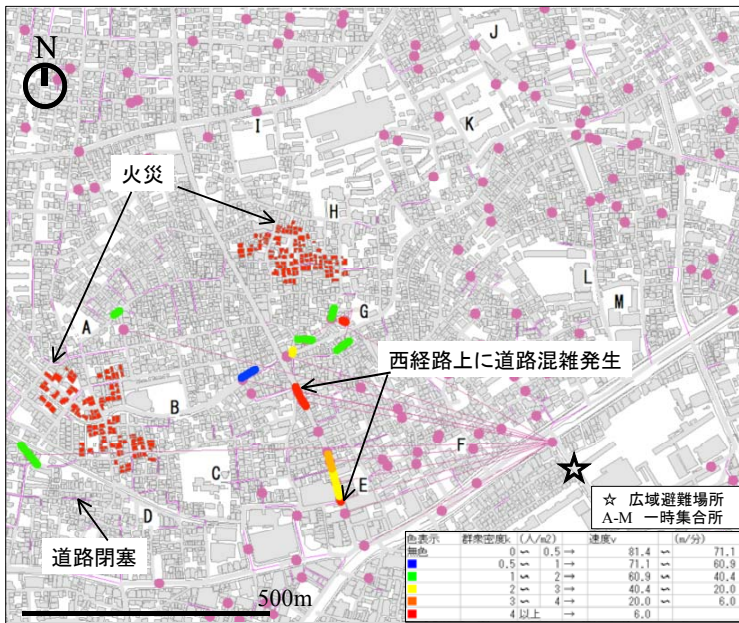


図12 120分後の群集密度(西経路)

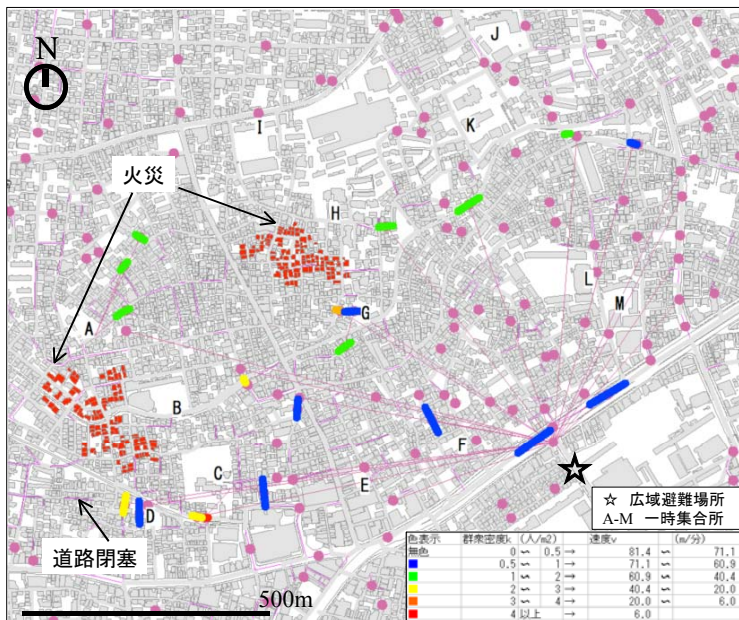


図13 120分後の群集密度(東経路)

7. 広域避難場所の再配置について

大多数の住民は広域避難途中に国道246号線を横断する必要があるが、国道246号線は発災4時間後以降、都心からの帰宅滞留者の影響^{注4)}を受ける恐れがあり、横断が困難となる可能性がある。最悪の状況として横断が不可能な場合も想定され、できれば広域避難場所の配置計画を再考するなどの行政の対策が必要である。しかし前章から、東経路を使用することによって4時間以内に広域避難をおおむね完了できたことから、地域住民が中心となり4時間以内の避難および消火活動を効果的に行い、4時間以降の避難者数を出来る限り小さく抑えるように努めることを優先して行っていくべきであると考えられる。そのためには、火災危険度マップを地域住民に配布し、それを参考にしながら普段から火災による危険地域および東経路の有効性を認識しておくことが必要である。

また防災区民組織は震災時、住民のリーダーとして避難および消火活動の指揮を取れるように、だれがどのような状況で住民を導いていくのかという各自の担当内容を明らかにしておくことも大切である。そして実際に自治会や行政が協力して、火災リスクマップを利用した避難訓練や消火訓練を行うことで、震災時に住民間や住民と行政の間で連携のとれた避難行動や消火活動を行うことが可能になると考える。

8. まとめ

世田谷区太子堂の木造密集市街地を対象として、地震時の火災リスクを考慮した避難シミュレーションを実施し、避難計画の提案を行った。対象地域では火災が地域西側に発生する可能性が高いため、東経路を避難経路として利用することが有効であることが確認できた。

謝辞

世田谷区役所太子堂出張所、災害対策課、まちづくり課、都市整備部都市計画課、および太子堂地域防災区民組織役員の皆様に取材と資料提供のご協力をいただいた。記して感謝の意を表す。

注

- 注1) グループ化を行うことにより群衆密度は不連続な値をとることになるが、1組およそ60人未満のグループ化を行っても結果は変わらないことをスタディにより確認している。
- 注2) 火災パターン10ケースは、火災焼失確率の割合に合わせて選定している。つまり、10ケース中対象地域中央および西側に延焼する火災パターンを7ケース、それ以外の地域に広がるパターンを3ケース使用する。
- 注3) エージェントの歩行速度が最も速い場合は群集密度が0に近い場合であり、Fruinの式に従いおよそ分速80m/分である。また本シミュレーションでは本シミュレーションでは1m²あたり4人以上のエージェントが存在する場合、歩行速度の低限值として6m/分と定める。
- 注4) 他地域からの主な流入者として渋谷等都心部の滞留者の帰宅者が想定されるが、高浜ら¹²⁾によるとM7レベルの地震時には、交通機関の安全確認には2~4時間を要する。交通での帰宅を諦め徒歩により移動を開始する都心部滞留者の影響を対象地域が受けるのは最低でも地震発生4時間後と考えられる。

参考文献

- 1) 東京都: 首都直下地震による東京の被害想定報告書, 2006
- 2) 青木義次, 他: 情報伝達と地理イメージ変形を考慮した地震時避難行動シミュレーションモデル, 日本建築学会計画系論文報告集, 第440号 PP.111-118, 1992
- 3) 内閣府: 首都直下地震対策専門調査会報告書, 2005
- 4) 内閣府: 地震被害想定支援マニュアル 閣府防災情報 HP 2001 <http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>
- 5) 市川総子, 他: 道路閉塞による避難経路の危険性を考慮した避難地の危険性を考慮した避難地の配置に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 F-1, PP.489-490, 2001
- 6) 神奈川県防災会議: 神奈川県地震被害想定報告書, 1986
- 7) 浜田稔, 火災の研究 I, PP.183-188, 1951
- 8) 堀内三郎, 新版建築防火, PP.183-188, 1994
- 9) 1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書 (社) 日本火災学会, 1996.11
- 10) J. Fruin: 歩行者の空間, 鹿島出版会, 1974
- 11) 川上光彦, 都市計画 PP. 88-89, 2008
- 12) 高浜, 他, 地域安全学会論文集 No.8, 2006.1
- 13) 上田達, 他, 東京都杉並区の木造密集市街地における地震時の道路閉塞および火災危険度評価, 地震工学シンポジウム論文集, PP.1374-1377, 2006
- 14) 上田達, 他, 地域防災力に着目した地震火災時の災害時要援護者救助シミュレーション-東京都杉並区阿佐ヶ谷高円寺の木造密集市街地を例として- 日本建築学会計画系論文集 No.622, PP.137-144, 2007.12
- 15) 梶秀樹, 他, 都市防災学, 学芸出版社 2007

