

観光地における地震火災からの 避難に関する基礎的検討

伊津野 和行¹・小林 祐一郎²・近藤 智³・久能木 慎治⁴・崔 青林⁵

¹立命館大学 理工学部都市システム工学科 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: izuno@se.ritsumei.ac.jp

²立命館大学大学院 理工学研究科 前期課程院生 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: rd003076@ed.ritsumei.ac.jp

³立命館大学大学院 理工学研究科 前期課程院生 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: ri004072@ed.ritsumei.ac.jp

⁴立命館大学大学院 理工学研究科 前期課程院生 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: rd003072@ed.ritsumei.ac.jp

⁵立命館大学 歴史都市防災研究センター 研究員 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

E-mail: qinglin@fc.ritsumei.ac.jp

地震火災による被害を少なくするためには、ハード面の対策、ソフト面での対策の両者が重要である。しかし観光地においては、景観を守るためにハード面の対策が難しい場合があり、ソフト面の対策がより重要となる。また、災害弱者とも位置づけられる観光客は、避難経路や避難場所を知らない場合がほとんどであり、避難する際に混乱が生じる可能性がある。本研究は京都市の清水寺周辺地域を対象として、地震火災発生時の避難行動を数値シミュレーションによって再現し、その結果をもとに観光客に対する適切な避難誘導方法の検討を行なったものである。適切な避難誘導により、避難完了時間をどの程度短縮することができるかを示した。

Key Words : *vulnerable people, evacuation activity, sightseeing area, post-earthquake fire, multi-agent simulation*

1. はじめに

大規模な地震時には、地震火災などの二次災害も脅威である。地震後に各所で火災が発生したり、建物が倒れたりした場合、観光客は観光を中止し、家もしくは宿泊先に戻ることが予想される。避難者の安全を確保し、少しでも被害を少なくするためには、建築物の耐火性能を強くし消火設備を充実させるなどハード面の対策と、避難計画や防災マップの作成などソフト面での対策の両者が重要である。しかし観光地においては、景観を守るためにハード面の対策が難しい場合があり、ソフト面の対策がより重要となる。また、土地勘が無く、避難場所や避難経路がわからない観光客が多数存在するため、混乱が生じる可能性がある。よって、災害弱者とも位置づけられる観光客が、災害時に迅速かつ安全な避難ができるような避難計画を作成することが重要である。

コンピュータを用いた避難シミュレーションは1970年代から行われてきた。近年では、津波からの

避難に関するマルチエージェントシステムを用いたシミュレーションがさかんに行われている^{例え1)-3)}。

また、災害弱者の避難に関しては、高齢者や車椅子利用者を考慮した研究^{4), 5)}が行われており、結果を建築物の設計に活かそうという試みがなされている。災害弱者として観光客の避難問題を取り扱った研究に関しては、仲谷らの研究⁶⁾が挙げられる。情報工学分野における研究で、土地不案内者を安全に広域避難場所まで誘導するための仕組みとして、マルチエージェントを用いた観光地避難支援システムの提案がなされている。それに対して本研究では、広域避難場所だけではなく、一時避難場所として観光地内の大型駐車場や広幅員の道路も考え、よりよい避難行動の検討を行ったものである。これは、前述のとおり、観光客が必ずしも広域避難場所へ避難するとは考えられないためである。

本研究の目的は、地震火災が発生した際の観光客の避難行動を数値シミュレーションによって再現し、その結果から観光客に対する適切な避難誘導方法や

対策を検討することである。

2. 対象地域の状況

本研究では、歴史的観光地域であるためハード面での対策が難しいと考えられる地域の一例として、京都市の清水寺周辺地域を対象とした。京都市が2003年に発表した第3次地震被害想定⁷⁾では、花折断層で地震が発生すると、中心市街地のほとんどが震度6弱以上となり、清水寺がある東山区の一部に震度7の地域が出現するとされている。

清水寺は年間400万人もの参拝客が訪れる観光名所であり、外国からの観光客や高齢者も多く訪れる。山麓にあるため、境内には多くの階段がある。さらに周辺地域は細い通路も多く、しかも坂道となっている。災害弱者にとって、避難しにくい場所だと考えられる。一番近い広域避難場所である円山公園までは1.5kmあり、道幅の狭い通路を通ることになる。このような条件の下、災害発生時には、数千人の観光客が一斉に避難を開始すると考えられる。

3. 解析手法と避難場所の設定

(1) 解析に用いたソフトウェア

本研究の避難シミュレーションには、出口ら⁸⁾による社会シミュレーションモデル構築用言語SOARS (Spot Oriented Agent Role Simulator) を使用した。SOARSは、エージェント、スポット、ロール (役割) の3つの要素を用いてモデルを構築していく。エージェントとは意思決定主体を、スポットはエージェントの存在できる空間を表しており、ロールはエージェントとスポットに対するルールを定義するものとして用いる。エージェントはスポット間を移動することができ、エージェントもスポットもロールによって定義されたルールに従う。

SOARSで避難シミュレーションモデルを構築する場合、図-1のようにエージェントは避難者を、スポットは避難者の滞在できる施設や移動できる通路などを表し、ロールでは避難者の挙動や施設・通路の状態 (混雑しているか、通行可能か等) を定義する。避難場所となるスポットを決め、避難者となるエージェントがそのスポットに向かって移動するように設定し、そのスポットにエージェントが辿り着いた時点で避難者の避難が完了する。避難者全員が避難完了した時点でシミュレーション終了とする。

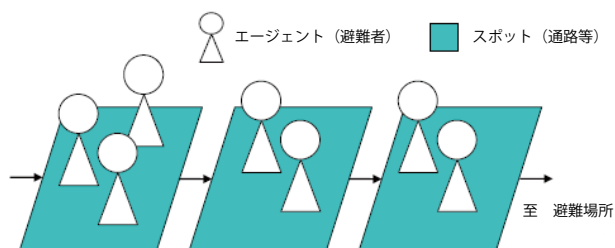


図-1 スポットとエージェント

通路の幅や面積などから、それぞれに対応するスポットにおいて、一度に流入可能な人数や許容人数を設定した。移動時間に関しては、時間変数を用いて、そのスポットにその時間だけ滞在するという形で表現した。例えば、移動に10分かかる通路を表現する場合、対応するスポットに10分間エージェントが滞在し、10分経過したら次のスポットに移動するという形で表現した。また、避難者の経路選択については、経路の分岐点で確率を設定して各エージェントを分岐させた。

(2) 解析パラメータの設定

対象地域は図-2に示す清水寺周辺地域とし、施設および通路をスポットで表現し、避難者（観光客）となるエージェントを配置した。地震火災の発生などでまわりの状況を観光客が危険だと認識し、全員が避難を始めることを想定する。エージェントはシミュレーション開始と同時に、設定した避難場所に向かって避難を始める。途中の経路で通行止が発生した場合には、通行止が発生したと想定した場所に対応するスポットを通行不可能とし、エージェントがそのスポットに移動できないようにした。スポットは、図-2に示した名称の各所、そしてそれぞれのスポットを結ぶ通路及び階段とした。

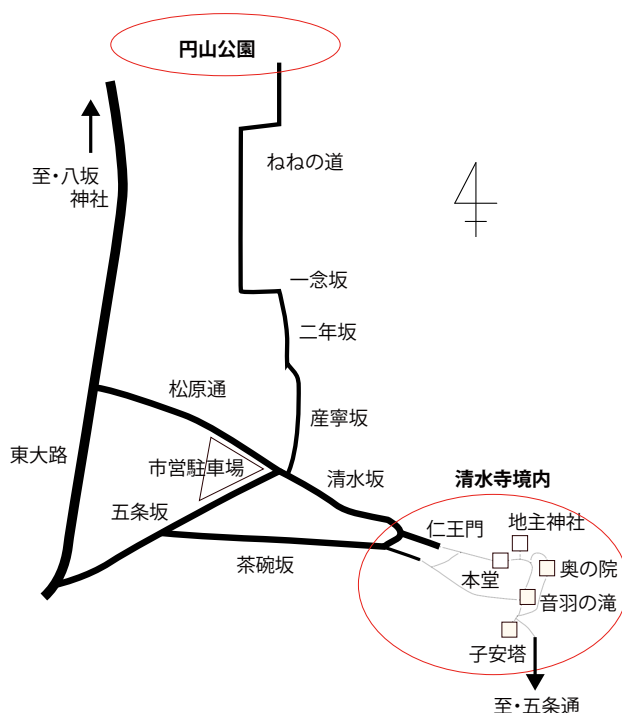


図-2 対象地域

避難者の初期配置に関しては、現地調査で人数を数えた結果から、各スポットにおける観光客の分布状況を求め配置した。観光客が多い2010年11月の休日の正午過ぎに、複数人で同時に10分間計測した。場所によって2~5回計測した平均人数を表-1に示す。避難者の人数については、表-1の調査結果が3,000人弱であったため、それより多めの3,500人を想定

した。経路選択に関しては、図-3の青と緑の矢印で示した6ヶ所で考慮した。経路選択確率はGPSロガーを用いて集めたデータを参考にして決定した。清水寺に行ったことがない学生15人に、GPSロガーを持って実際に清水寺へ観光に行ってもらった。彼らの移動した経路のログを参考に、経路選択確率を決定した。

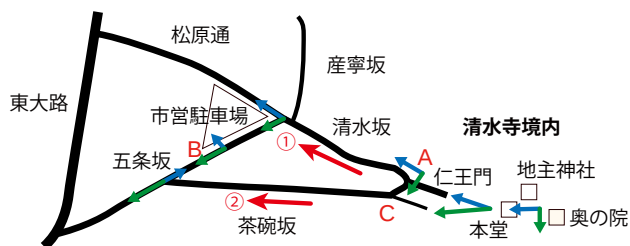


図-3 避難経路

表-1 人数の調査結果

場所	人数（人）
奥の院	155
清水寺本堂	366
地主神社	58
音羽の滝	381
子安の塔	11
仁王門	168
清水坂	1,163
茶碗坂	292
五条坂	237
駐車場入り口（東大路側）	69
駐車場入り口（清水坂側）	29
合計	2,927

(3) 避難場所の設定

清水寺及び周辺地域の広域避難場所は、図-2上部に示した円山公園である。しかし、円山公園まで徒歩20分はかかり、なじみがない観光客も多いため、観光客が必ずしも広域避難場所へ避難するとは考えられない。清水寺までどのようにして来たかを考えると、観光バスで来た観光客はバスが停まっている市営駐車場、公共交通機関で来た観光客はバス停等のある東大路を、まず目指すことが考えられる。

そこで本研究では、市営駐車場と東大路へ向かう一時避難のケースと、広域避難場所へ向かうケースの2通りを考えることとした。

まず一時避難に関しては、避難場所として設定した市営駐車場や東大路にたどり着くまでに、清水坂と茶碗坂のどちらかを通る必要がある。そのため、どちらか片方が火災や建物の倒壊によって通行不可能となった場合、観光客の避難にかなりの遅れが生じるものと考えられる。そこで、清水坂で通行止が発生した場合の影響についても検討した。清水坂は清水寺周辺地域ではもっとも人通りが多い場所であり、避難の際にも多くの避難者が避難経路として用いることが予想される。通行止発生箇所として清水坂の東側（清水寺側）・中央・西側（駐車場側）の

3パターンを想定してシミュレーションを行なった。通行止が発生しない場合に利用される主な避難経路は図-3に示した①の清水坂に、清水坂で通行止が発生した場合の主な避難経路は図-3の②に示した茶碗坂になる。

図-2に示したように、広域避難場所に向かうケースでは産寧坂を通ることになり、途中で急な坂や細い道があるため、図-3の左に示した広い東大路へ迂回させるケースについても検討した。

4. 一時避難に関する検討

(1) シミュレーション結果の概要

通行止がない場合と、清水坂の東側・中央・西側でそれぞれ火災発生等で通行止となる計4パターンで、避難者を3,500人としてシミュレーションを行った。なお、本研究では火災の延焼に関しては考慮していない。井元らの研究⁹⁾で、時間経過にともなう清水寺周辺地域の延焼状況が計算されており、火災発生後1時間ほどでは延焼があまり広がらないことが示されている。本研究における避難シミュレーションの結果から考えると、火災が発生しても延焼が本格的に広まる前に、避難者の避難は完了することが予測されたからである。

各スポットに設定したパラメータを表-2に示す。避難者の移動速度は、建設省告示¹⁰⁾の階避難安全検証法における避難計算で用いられる値を参考に、下りの坂道や階段で 0.78m/s 、その他で 1.3m/s を用いた。各スポットの幅員は、地図で判読できない箇所を前述の現地調査の際に計測した。距離は地図情報から読み取った。幅員と距離から面積を算出し、群衆事故が発生する可能性のある群衆密度 $3\text{人}/\text{m}^2$ を安全限界、それ以上の $4\text{人}/\text{m}^2$ を許容限界と仮定して限界人数を設定した。1秒間に流入可能な人数は、幅員（m）×移動速度（ 1.3m/s もしくは 0.78m/s ）×許容限界人数（ $4\text{人}/\text{m}^2$ ）として設定した。

表-2 各スポットに設定したパラメータ

スポット	幅 (m)	距離 (m)	許容限 界人数 (人)	流入可 能人数 (人)	通過 時間 (s)
奥の院	2	44	435	5	34
子安塔	2	36	332	5	46
地主神社	2	43	385	4	33
本堂	3	94	1,062	6	73
仁王門	4	62	1,067	9	80
音羽の滝	3	32	430	7	25
茶碗坂	6	414	10,274	12	318
清水坂	5	216	4,707	11	166
五条坂	8	454	14,909	16	349
奥の院-本堂	2	38	370	5	29
奥の院-子安塔	3	161	1,721	5	124
子安塔-音羽の滝	3	113	1,459	6	87
本堂-仁王門	4	69	1,148	8	152
音羽の滝-仁王門	4	198	3,299	8	152
本堂横階段	3	40	550	7	51
仁王門前階段	2	32	305	5	41
茶碗坂東端階段	5	34	621	9	44

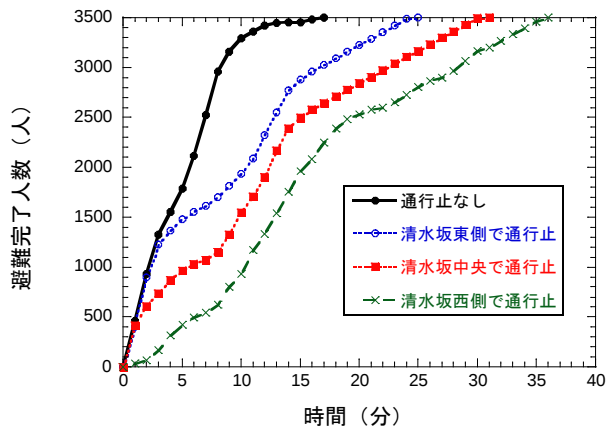


図-4 避難完了人数の比較

シミュレーション結果を図-4に示す。通行止がない場合と比べると、清水坂東側の通行止で7分、清水坂中央の通行止で13分、清水坂西側の通行止で19分避難が遅れることがわかった。

また、通行止がない場合、ほとんど混雑は発生しなかった。一方、通行止が発生した場合、3パターンとも仁王門付近から茶碗坂手前の階段までの地点（図-3のA地点）で約900人の混雑が生じていた。また、五条坂沿いにある駐車場の入口付近（図-3のB地点）においても400人程度の混雑が生じていた。仁王門前広場と市営駐車場入り口に注意を要するという結果である。

(2) 混雑の原因に関する考察

この避難シミュレーションモデルでは、清水坂で通行止が発生した場合、境内にいる観光客は清水坂にたどり着いた時点で通行不可能と知り、それから図-3②の茶碗坂に向かう。清水坂の入り口に行くまでは、通行止発生なしの場合と同じように行動する。

清水坂には日中かなりの観光客が滞在しており、本モデルにおいても初期配置の時点で1,000人以上が滞在している。清水坂の西側および中央で通行止が発生した場合、かなりの人数がまず清水寺方面に向かって移動し、仁王門前（図-3のA地点）を通過して茶碗坂へ向かい、茶碗坂を利用して避難することになる。そして、境内にいる観光客も最初は清水坂に向かって避難し、仁王門前から茶碗坂へ向かう。つまり、境内にいる避難者のほぼ全員と最初清水坂にいた避難者が、図-3A地点を避難経路として利用することになる。その結果、A地点でかなりの混雑が生じたと考えられる。

図-3B地点の混雑に関しては、清水坂で通行止が発生した場合、茶碗坂を通過して避難した避難者の半数以上が、入り口の狭いB地点の駐車場入口に向かうためであると考えられる。避難者ほぼ全員がA地点を通過するのに対し、3～4割の避難者は東大路へ向かうためにB地点を通過しないので、結果としてA地点よりも混雑しなかった。しかし、B地点の混雑は、市営駐車場から車が脱出する妨げとなるため、対策が必要となる。

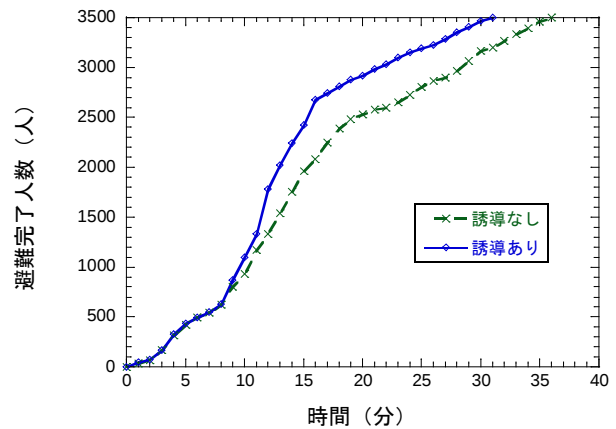


図-5 避難誘導の有無

表-3 広域シミュレーションのパラメータ

スポット	幅 (m)	距離 (m)	許容限 界人数 (人)	流入可 能人数 (人)	通過 時間 (s)
清水坂	5	250	5,000	26	192
産寧坂	3	200	2,400	15	154
二年坂	4	150	2,400	20	115
一念坂	4	100	1,600	20	77
ねねの道/南	4	300	4,800	20	231
ねねの道/北	4	150	2,400	20	115

(3) 混雑緩和策の検討

混雑を緩和するには、仁王門前広場を迂回して、本堂から直接茶碗坂へ降りる道（図-3のC地点）へ誘導する方法が考えられる。そこでC地点の経路選択率を変えたシミュレーションを行ったが、図-5のように避難完了時間は3～5分の短縮にとどまった。

図-5は、清水寺西側で通行止が発生する場合のグラフである。劇的に状況を改善するまでには至らないが、通行止を早めに知らせてC地点経由に誘導することは、観光客の安全を確保する上で重要である。清水寺には、門前町の商店主らを中心として清水寺自警団が組織されている。地元をよく知る人たちの協力により、避難はより安全なものとなるであろう。

本章で一時避難場所として設定した場所は、清水坂が通れなくなると、避難時間を大きく改善することが難しい。図-2の下部にある五条通りへの道は、通常観光客が利用しない道であるが、救急車など緊急車両の通行には利用されている。災害時には、必要に応じてこちらへ誘導することが重要になる。

5. 広域避難場所への避難

(1) 解析パラメータの設定

本章のモデルでは、清水寺、清水坂、産寧坂、二年坂、一念坂、ねねの道（ねねの道は経路長が長いので南北2つに分割）に避難者を配置し、広域避難場所である円山公園までの避難をモデル化した。

各スポットに関するパラメータを表-3に示す。前章の表-2の条件と違い、清水寺境内の細かい設定は

行っておらず、階段や通路も含めたモデルとなっているため、清水坂のパラメータが表-2とは異なる。本章の広域シミュレーションモデルの対象範囲は清水寺以外も含まれ、住民も考慮する必要があるため、20,000人まで避難者エージェントを増やした場合を考えた。1,000～20,000人まで千人ずつ避難者数を増加させ、シミュレーションを実施した。各スポットに配置する避難者の割合については、前述した現地調査結果と仲谷ら⁶⁾の研究を基に設定した。

(2) 広域シミュレーション結果

図-6に、避難者総数に対する避難完了時間を示す。避難者数が増加するにつれ、避難完了時間がほぼ線形的に増えることがわかる。

大半のスポットでは許容限界人数に達しておらず、ある程度円滑に避難することができていた。しかし、避難者総数が5,000人を超えると、産寧坂で許容限界人数に達して、待ち行列が発生した。図-7に産寧坂と清水坂における人数の時間経過を示す。

図-7(a)の産寧坂においては、5,000人を超えると避難開始から十数分経過後に許容限界人数に達し、避難者数が15,000人になると、開始直後と十数分後の2回限界人数に達する。避難者数が10,000人になると、図-7(b)の清水坂も許容限界人数に達する避難者が押し寄せた。

以上、本シミュレーションにおいては、避難者数5,000人で、産寧坂が許容限界人数に達した。狭い階段もある産寧坂(写真-1)の人数を緩和することが、全体として安全な避難につながる。よって、図-2の左側の東大路を迂回路として指示することが有効だと考えられる。東大路は道幅も広く、急な階段等もない。産寧坂の入り口で人の流れを制御すればよいので、比較的容易に実施できるものと考えられる。シミュレーションの結果、避難完了時間は約5分の短縮にとどまったが、産寧坂が混雑する時間は改善することができ、安全性は向上した。

6. おわりに

本研究では、観光地における地震火災からの避難についてシミュレーションを行った。京都市の清水寺を対象地域とし、観光バスが多数集まっている市営駐車場と、公共交通機関で来た場合に経由する広い道である東大路とをを目指す一時避難と、当該地域で設定されている広域避難場所である円山公園を目指す避難とを考えた。

一時避難の場合、途中の経路で通行止が発生した場合には、避難誘導を行っても3～5分の時間短縮にとどまり、他方面への避難を考慮すべきだという結論が得られた。広域避難場所を目指す場合には、狭い産寧坂がボトルネックとなり、広い東大路への避難誘導が必要になった。

今後はさらに、災害弱者の特性を考慮した検討を行っていく必要がある。清水寺境内には多くの段差

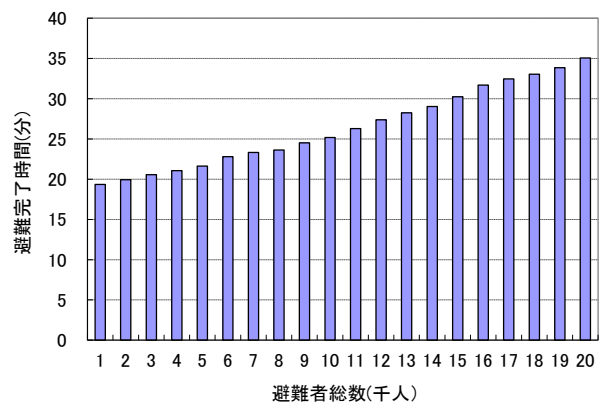
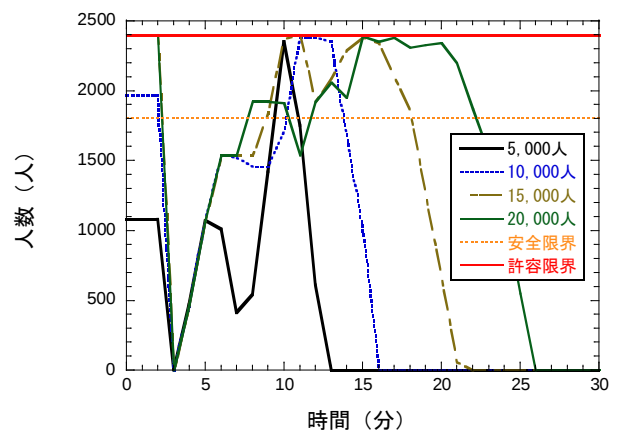
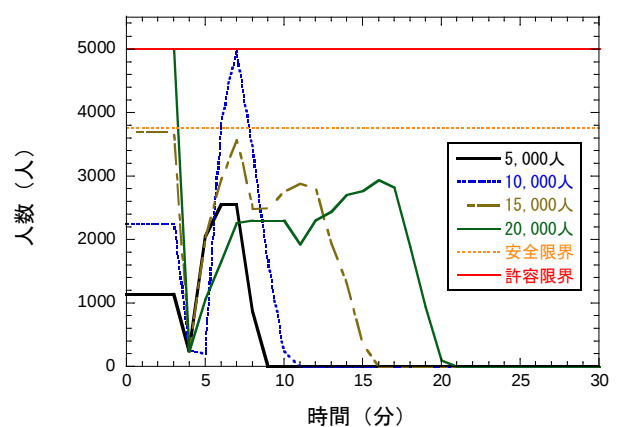


図-6 避難者数と避難完了時間の関係



(a) 産寧坂を通過する人数



(b) 清水坂を通過する人数

図-7 避難者数の時間変化



写真-1 産寧坂の状況

や階段があり、この段差によって障がい者や足腰の不自由な高齢者等は移動範囲が限られてくる。

特に車椅子参拝者は通行可能経路が決まっており、専用の出入り口がある。しかし、その経路は清水寺の境内からの避難となった際は、一般客の避難できる経路とは違い、遠回りしなくてはならない。車椅子の参拝客の通行可能経路を図-8に示す。奥の院や本堂周辺にいた場合は、境内の中心部を大きく迂回して、来た道を戻らなくてはならない。

また、境内周辺は細い通路や急な坂道が多いうえに、清水坂では土産物店が軒を連ねており、祝日や観光シーズンには大混雑していて、平常時にも車椅子は通りにくい。高齢者や子供連れも避難速度が遅く、災害が起こった際に走って避難できないこともある。災害弱者を優先した安全な経路を考えて、誘導するなどの対策が重要になってくる。

さらに、外国人や遠方から訪れた観光客などに向けた避難経路図などの掲示を、すべての人達に分かりやすい図等で行うことも有効であろう。境内には各建造物の名称が示された地図しか案内図がない。防災ユニバーサルデザインについて研究し、効果的な減災につなげていくことが必要である。



図-8 車椅子通行可能経路 (Google Mapに加筆)

謝辞：本研究の実施にあたっては、財団法人鹿島学術振興財団研究助成金の補助を得た。また、研究当時立命館大学大学院生だった早川真農氏に、現地調査等で協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤岡正樹, 石橋健一, 梶秀樹, 塚越功: 津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価, 日本建築学会計画系論文集, 第562号, pp. 231-236, 2002.
- 2) 齋藤崇, 鏡味洋史: マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーションー奥尻島青苗地区を例としてー, 日本建築学会計画系論文集, 第597号, pp. 229-234, 2005.
- 3) 渡辺公次郎, 近藤光男: 津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発, 日本建築学会計画系論文集, 第74巻, 第637号, pp. 627-634, 2009.
- 4) 海老原学, 掛川秀史: 避難シミュレーションに基づく高齢者施設の避難安全性の確保に関する考察, 日本建築学会計画系論文集, 第521号, pp. 1-8, 1999.
- 5) 瀧本浩一: 個別要素法を用いたシミュレーションによる避難時の車椅子使用者と他の避難者との影響に関する一考察, 日本建築学会環境系論文集, 第566号, pp. 9-15, 2003.
- 6) 仲谷善雄, 渡辺大輔: マルチエージェントを用いた観光地避難支援システム, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 10, No. 5, pp. 21-26, 2008.
- 7) 京都市消防局: 京都市第3次地震被害想定, 2003.
- 8) 田沼英樹, 出口弘: エージェントベース社会シミュレーション言語SOARSの開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-D, No. 9, pp. 2415-2422, 2007.
- 9) 井元駿介, 大窪健之, 樋本圭佑, 田中孝義: 木造文化都市を守る「延焼抑止防水システム (WSS)」の配置計画に関する研究ー京都市清水周辺地域での延焼シミュレーションによる評価を通してー, 歴史都市防災論文集, Vol. 4, pp. 21-28, 2010.
- 10) 建設省: 階避難安全検証法に関する算出方法等を定める件, 建設省告示第1441号, 第2 (歩行速度), 2000.

EVACUATION SIMULATION AT SIGHT-SEEING AREA FROM POST-EARTHQUAKE FIRES

Kazuyuki IZUNO, Yuichiro KOBAYASHI, Satoshi KONDO,
Shinji KUNOGI and Qing-Lin CUI

Software countermeasures are especially important for mitigation of disaster due to post-earthquake fires at sight-seeing area, because hardware countermeasures are sometimes difficult to conduct at the beautiful location. Further, sight-seeing people are vulnerable during natural disasters, as they are not familiar with the location and don't know where to evacuate. This paper conducted numerical simulation on the evacuation activities of sight-seeing people from post-earthquake fires at Kiyomizu temple in Kyoto: the famous sight-seeing place. The vulnerable locations and countermeasures to reduce evacuation time are discussed.