

歴史都市における行動分析に基づいた広域避難場所への地震時避難経路に関する研究

Study of Evacuation Routes to Refuge Places in a Historical City
based on Analysis of Refuge Behavior

塚口博司¹・松田有史²・安隆浩³・小川圭一⁴

Hiroshi Tsukaguchi, Yuji Matsuda, Yoongho Ahn and Keiichi Ogawa

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

²(株)奥村組 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

³立命館大学助手 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

⁴立命館大学准教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Since most Japanese cities are disaster prone urban areas, they have developed evacuation plans and designated refuge places in order to provide against large disasters including earthquakes. However, evacuation routes to the refuge places are not discussed sufficiently, though guidance systems to get to the refuge places are very important. This study proposes a method to find suitable evacuation routes to refuge places which are likely to be used by citizens, considering characteristics of pedestrian route choice behavior and high possibility to reach the places.

Keywords : Evacuation planning, Evacuation route, Route choice behavior, Disaster mitigation

1. はじめに

自然災害に脆弱である日本の多くの都市においては、災害時に不可欠な広域避難場所が設定されている。これらの避難場所を緊急時に効果的に機能させるためには、平常時から実効性ある避難誘導計画を立案し、適切な避難経路等の検討を十分に行っておくことが必要であるが、広域避難場所に向かうための経路に関しては、十分な誘導方法が検討されているとは言えない。

一般に、市民を避難場所に誘導する場合の考え方として、何らかの規範に基づいて推奨経路を求める方法と、市民の行動特性の分析結果に基づいて推奨経路を求める方法がある。避難場所への誘導に関する既往研究の多くは、前者の方法を採用し、例えば最短経路を案内することが多い。もっとも、緊急時に要避難者に対してどのような経路を案内することが妥当であるかは慎重に検討すべき事項である。本研究は、行動特性から見て市民に通行されやすいと思われる経路に誘導することを基本姿勢としている。

図1に本研究の考え方を示す。まず、緊急時を想定したアンケート調査結果に基づいて緊急時に出現する可能性の高い行動特性を明らかにし、これと平常時に条件を変えて実施した歩行実験の結果を比較する。その結果、緊急時の行動特性と類似した平常時の行動を見出すことを通して、避難経路の代替案を複数選択する。次に、これらの代替案(代替経路)について、通行可能性を推定し、最も確実に目的地に到達できる経路を推奨経路とする。なお、筆者らは先に図1に示すプロセスに従って、(E)の段階まで概略的な研究を進めた¹⁾。しかしながら、先の研究では、(B)における実験が1地区でしか実施されておらず不十分であり、その結果、(E)のモデル化も十分ではなかった。そこで、本研究では、これらを充実させるとともに、(F)

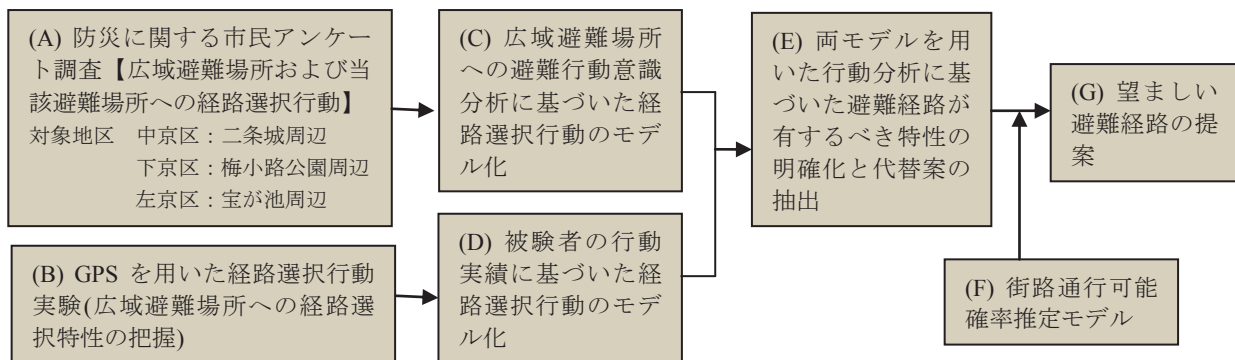


図1 研究の進め方

の過程を追加し、要避難者に利用されやすく、かつ到達可能性の高い経路を推奨経路として提案することを目的とする。本研究では、緊急時を想定した行動特性と平常時の行動特性を比較して、緊急時に要避難者をサポートする誘導方法を見出そうとしている。緊急時における行動と平常時の行動は同一ではないであろうが、平常時に全く見られない行動が緊急時に突然現れ、これがスムーズに行われるとも考えにくい。そこで、本研究は、避難経路として望ましい経路の設定に当たっては、平常時の経路選択行動を反映させることが妥当であると考えられる。

なお、本研究では、市民が自宅周辺から広域避難場所へ避難する行動を対象としているが、発災直後にすべての市民が広域避難場所に移動するわけではない。避難が必要となったとしても、一旦、一時避難場所に避難し、その後に広域避難場所に移動する場合も少なくない。しかし、一時避難場所は市民の自宅近傍に存在するから、上記のことが広域避難場所への誘導について検討することの必要性を低めるものではない。

本研究で対象とする京都市では、68ヶ所の広域避難場所が設定されている。本研究では、これらの広域避難場所から、次章に示す都心部に位置する2ヶ所と郊外の1ヶ所を選んだ。

2. 行動分析のためのデータ整備

(1)京都市民の避難行動調査²⁾

本研究で使用する京都市民の避難行動データは、2004年に市民1万人に対して実施した「大規模地震災害への対応と地震発生時における行動に関する市民の意識調査」によるものである。この調査では全区を対象としているが、本研究では、二条城周辺地区（上京区・中京区）、梅小路公園周辺地区（下京区）、宝が池公園周辺地区（左京区）を取り上げた。二条城周辺地区および梅小路公園周辺地区は概ね格子状街路網、宝が池公園周辺地区は不整形街路網を有している。これらの地区においては、二条城等が広域避難場所と指定されており、図2は緊急時に市民がこれらの施設へ至る経路が記載されている。なお、各広域避難場所が担当するおおよその範囲を示すために、ボロノイ分割を用いて境界を示してある。

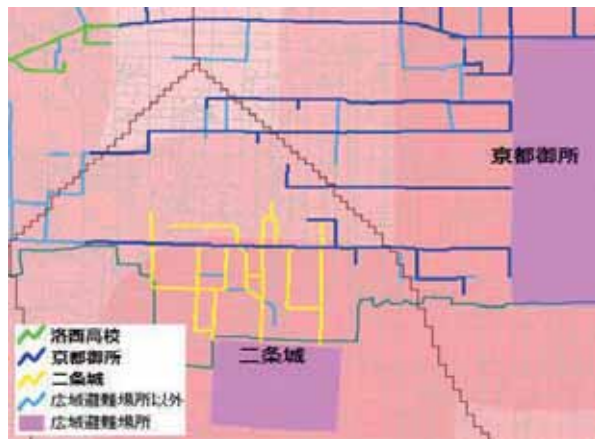
(2)広域避難場所までの避難行動実験

a)実験の目的

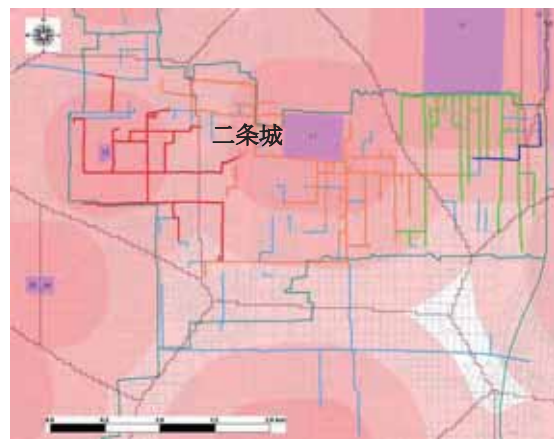
上記のアンケート調査で得られた行動特性と比較検討し、避難者の経路選択特性を把握するため、GPSを用いて広域避難場所までの経路を把握する実験を行った。本実験は、二条城周辺地区では2009年12月および2010年11月に行っており、被験者数は各年とも16名ずつ、合計32名である。梅小路公園周辺地区および宝が池公園周辺地区においては2011年11月に実施し、被験者数はそれぞれ18名である。

b)実験方法

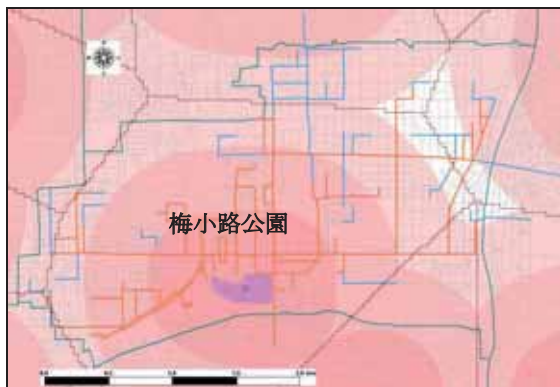
各広域避難場所へ向かう被験者の行動を把握するために、図3に示すように、出発地点を設定した。二条城周辺では8か所、梅小路公園周辺および宝が池周辺周辺では3ヶ所である。被験者には立命館大学の学生を採用したが、現地の地理を熟知した学生でないことを確認した上で被験者とした。実験に当たっては、被



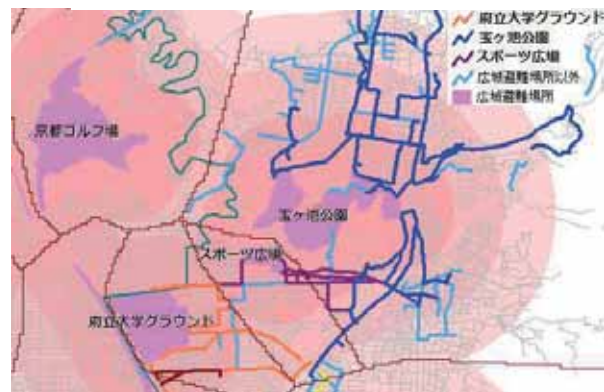
二条城周辺地区（上京区）
（二条城への経路は黄色で示す）



二条城周辺地区（中京区）
（二条城への経路はオレンジ色で示す）



梅小路周辺地区（下京区）
（梅小路公園への経路はオレンジ色で示す）



宝が池公園周辺地区（左京区）
（宝が池公園への経路は青色で示す）

図 2 対象地区における避難場所・経路の選択状況(アンケート調査)



図 3 GPS 実験における対象範囲と出発地点

験者に出発地点がわからないようにするために、タクシーで出発地点まで移動し、その間はアイマスクを着用するなど、できるだけ外部が見えないように工夫した。

実験開始時には、目的地とする広域避難場所と当該地のおおよその方向を伝えた。昼間と夜間の行動の差異を調べるために、同一被験者に対して昼間と夜間の 2 回実験を実施した。なお、1 回目は地図無しで、2 回目は地図を持った状態で実施した。

表 1 には実験条件が歩行時間等に与える影響を示している。昼間実施と夜間実施は、平均歩行時間および平均歩行距離には影響を与えていないが、迷った割合は夜間の方が高くなっている。また、地図有り と 地図無しにはかなり差が認められる。

表 1 実験条件による差異

	平均歩行時間	平均歩行距離	迷った割合
全データ	20 分 38 秒	1.6 km	15.4 %
昼間	20 29	1.6	13.3
夜間	20 48	1.6	17.6
地図有り	18 38	1.4	5.9
地図無し	22 52	1.7	25.0

3. 経路選択行動分析

(1)分析手法³⁾

歩行者の経路選択行動特性は、筆者らが提案している目的地方向角度と進入方法角度の関係に基づいて分析する方法を用いた。目的地方向角度とは、目的地指向性すなわち「歩行者は目的地の方向の経路へ進む」という特性を表す指標であり、進入方向角度とは、方向保持性すなわち「歩行者は現在進行している状態を維持する」という特性を表わす指標である。図 4 の S 点は歩行者が経路選択を行う点を表しており、目的地方向角度は挟角 α 、 β 、進入方向角度は挟角 γ 、 δ で表わされる。なお、歩行者が通過した経路選択機会のある全ノードのうち、最短経路に対する迂回経路の目的地までの迂回率が、0.2 以下のノードのみを分析対象ノードとした。

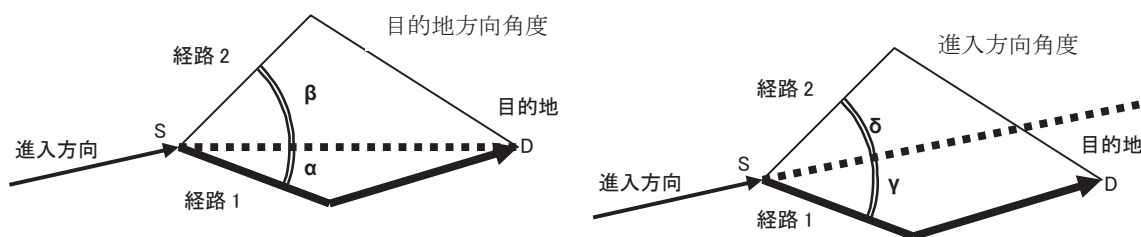


図 4 目的地方向角度および進入方向角度

(2)目的地指向性と方向保持性の影響

アンケート調査および GPS を用いた行動実験の結果を用いて、各分岐ノードにおける目的地方向角度および進入方向角度を測定した。ここでは、まず両角度の大小の組合せによって、各ノードにおける選択行動を以下の 2 タイプに区分した。

タイプ A：一方の経路の進入方向角度と目的地方向角度がともに小さい(大きい)場合

タイプ B：進入方向角度と目的地方向角度の大小が異なる場合

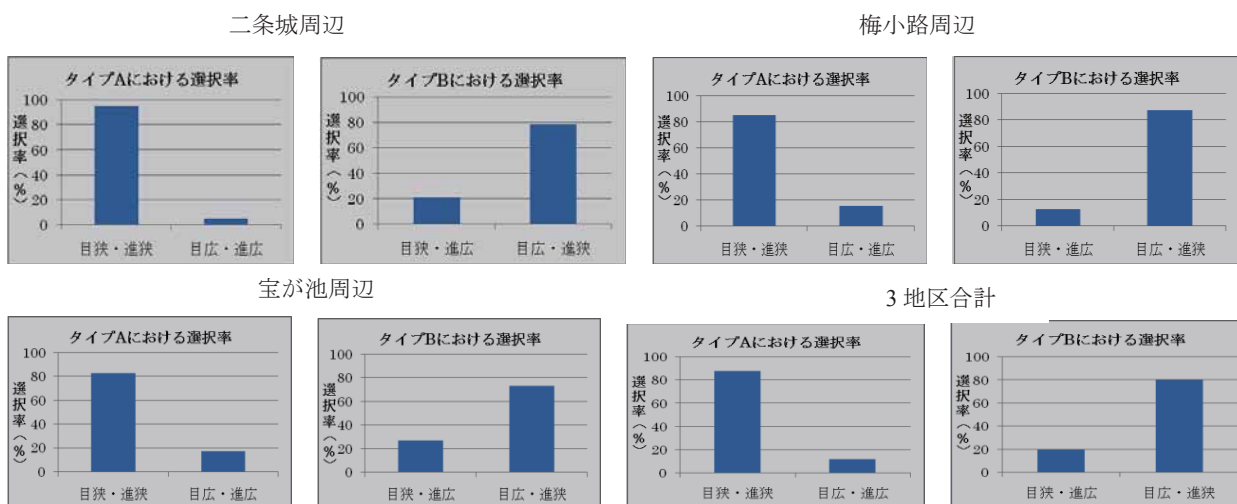
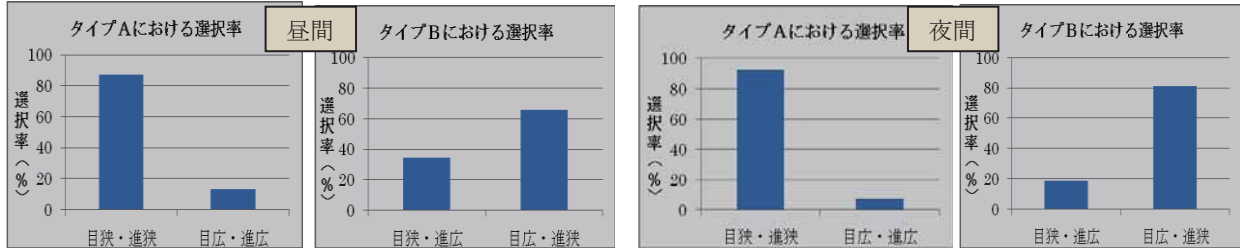
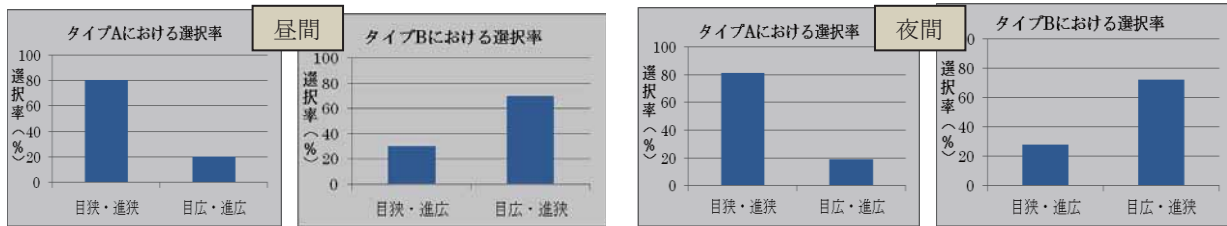


図 5 緊急時の想定経路選択行動における経路選択率 (市民アンケート調査結果)

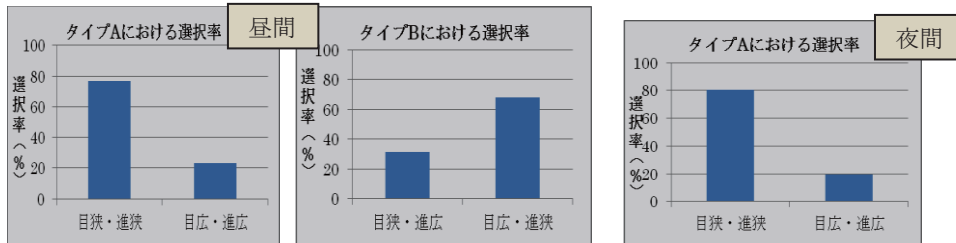
二条城周辺



梅小路周辺



宝が池周辺



注) 「目」は目的地方向角度、「進」は進入方向角度を示し、「広」および「狭」はそれぞれの角度の大小を示す。

図6 GPS実験における経路選択率

両タイプにおける経路選択率をアンケート調査結果に対しては図5に示し、GPS実験に対しては図6に示す。緊急時を想定した市民アンケート調査結果ならびにGPS実験のいずれにおいても、全地区において、目的地方向角度と進入方向角度の双方が小さい経路が選択される確率が高いことがわかる(タイプA)。また、タイプBの場合には、全体としては方向保持性の影響が大きいことがわかる。これらをまとめると表2のように整理できる。もっとも、タイプBについて昼間と夜間を詳細に比較すると、目的地方向角度が大、進入方向角度が小である経路の選択率が、昼間時には65.6~69.9%であるのに対して、夜間は72.2~81.2%となっており、夜間の方が相対的に方向保持性の影響が大きいことが窺える。一方、緊急時を想定したアンケート調査結果では、この割合が73.2~87.4%となっており、夜間の行動に近いように思われる。

表2 GPS実験における経路選択率

	緊急時を想定した市民の避難行動意識調査結果	GPSを用いた実験(平常時)	
		昼間	夜間
方向保持性	大	大	大
目的地指向性	小	小	小

(3) 経路選択モデルの構築

前項で述べたように、目的地方向角度と進入方向角度の両方が小さい経路が選択され、両者の大小が異なる場合には、進入方向角度が小さい方が選択される傾向が3地区で共通しているから、目的地指向性および方向保持性が経路選択行動に与える影響は、地区によって大きくは異なるように思われる。そこで、本研究では3地区の全データを用いて選択モデルを構築することにした。表3および表4には、アンケート調査とGPS実験について、それぞれの3地区合計データを用いた場合、GPS実験に関しては、昼間および夜間データを用いた場合、地図の携帯有無別の場合のモデルを示す。なお、表3および表4に示すパラメータ比とは目的地方向角度のパラメータ値を進入方向角度のパラメータ値で除した値であり、この値が大きいほ

表3 パラメータ推定結果（市民アンケート）

3地区合計	パラメータ	t検定値	パラメータ比
目的地方向角度(°)	-1.17E-02	-3.602	5.83E-01
進入方向角度(°)	-2.01E-02	-12.554	
尤度比	0.3707		
的中率(%)	83.19		
データ数	795		

表4 パラメータ推定結果（GPS実験）（その1）

全体	パラメータ	t検定値	パラメータ比
目的地方向角度(°)	-1.19E-02	-6.295	6.67E-01
進入方向角度(°)	-1.79E-02	-17.338	
尤度比	0.3359		
的中率(%)	80.53		
データ数	1017		

表4 パラメータ推定結果（GPS実験）（その2）

昼	パラメータ	t検定値	パラメータ比
目的地方向角度(°)	-1.31E-02	-5.009	8.36E-01
進入方向角度(°)	-1.56E-02	-11.462	
尤度比	0.2881		
的中率(%)	77.32		
データ数	507		

夜	パラメータ	t検定値	パラメータ比
目的地方向角度(°)	-1.11E-02	-3.853	5.46E-01
進入方向角度(°)	-2.03E-02	-13.055	
尤度比	0.3928		
的中率(%)	83.57		
データ数	510		

地図あり	パラメータ	t検定値	パラメータ比
目的地方向角度(°)	-1.19E-02	-4.373	6.77E-01
進入方向角度(°)	-1.76E-02	-11.833	
尤度比	0.3292		
的中率(%)	80.63		
データ数	480		

地図なし	パラメータ	t検定値	パラメータ比
目的地方向角度(°)	-1.10E-02	-4.209	6.38E-01
進入方向角度(°)	-1.72E-02	-12.465	
尤度比	0.3164		
的中率(%)	79.11		
データ数	537		

ど目的地指向性が強く、小さいほど方向保持性が強くなることを表している

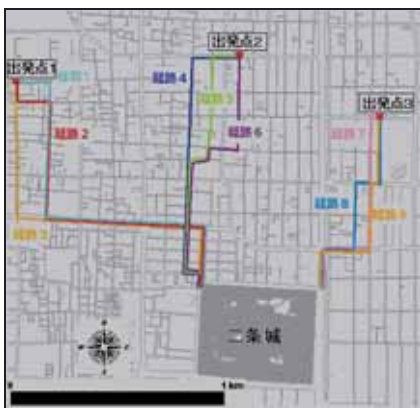
パラメータ比でみると、全体としては方向保持性が優位であるが、昼間と夜間を比較すると、相対的に昼間は目的地指向性、夜間は方向保持性が優位であることがわかる。表3に示す市民アンケート調査結果と比較すると、方向保持性が優位であるという点で、避難時の市民の行動は夜間の実験結果に近いのではないかと推察される。

4. 推奨避難経路の提案

(1) 推奨避難経路代替案の作成

表4に示すモデルを用いて、昼間と夜間における避難流動図を作成すると、昼間時には右左折を含んだ多様な経路が使用されているが、夜間には右左折回数が少なくなるような経路選択が行われていることがわかる。これらの基礎図は紙面の関係で省略せざるを得ないが、ここでは、この流動基礎図に基づいて昼間および夜間における主要な経路を抽出し、これを図7に示すように推奨経路代替案とすることにした。

二条城周辺(昼間)



梅小路周辺(昼間)



宝が池周辺(昼間)



図7 推奨経路代替案（その1）

二条城周辺(夜間)



梅小路周辺(夜間)



宝が池周辺(夜間)



図7 推奨経路代替案 (その2)

(2) 通行可能性からみた最適経路の抽出

前節で作成した代替案に対して、目的地である広域避難場所に到達できる確率を求め、適切な経路を抽出する。筆者らは先に、道路幅員と沿道建物の状況を考慮して、道路区間ごとの通行可能性を評価するモデルを構築している⁴⁾。道路幅員のみを説明変数とするモデルは簡便ではあるが、本研究のように細街路までを対象とする場合には危険側の結果となる。このため、本研究では道路幅員と沿道建物状況の双方を説明変数とするモデルを用いて、各代替案の到達確率を推定し表5に示す。

表5 各経路の到達可能性の検討

二条城周辺地区(昼間)

出発点No.	経路No.	到達可能率(%)
1	1	3.7
	2	2.8
	3	72.3
2	4	0.3
	5	0.4
	6	0.1
3	7	30.3
	8	22.9
	9	61
計		21.5

梅小路公園周辺地区(昼間)

出発点	経路No.	到達可能率
1	1	65.5
	2	87.8
	3	87.7
2	4	52.6
	5	23.6
	6	30.4
3	7	78.5
	8	59.5
	9	37.1
計		58.1

宝が池公園周辺地区(昼間)

出発点No.	経路No.	到達可能率(%)
1	1	11.5
	2	11.5
	3	97.2
2	4	6.7
	5	93.4
	6	93.1
3	7	25.4
	8	53.7
	9	12.7
計		45.0

二条城周辺地区(夜間)

出発点No.	経路No.	到達可能率(%)
1	3	72.3
	10	71.8
	15	0
2	4	0.3
	11	0.1
	12	99.7
3	9	61
	13	99.7
	14	99.5
計		56.0

梅小路公園周辺地区(夜間)

出発点	経路No.	到達可能率
1	10	87.6
	11	65.5
	12	65.5
2	4	52.6
	5	23.6
	13	67.8
3	7	78.5
	9	37.1
	14	61.8
計		60.0

宝が池公園周辺地区(夜間)

出発点No.	経路No.	到達可能率(%)
1	2	11.5
	3	97.2
	10	97.2
2	5	93.4
	6	93.1
	11	87.9
3	8	53.7
	9	12.7
	12	62.7
計		67.7

昼間と夜間の避難経路代替案を比較すると、夜間の経路の方が目的地への到達確率が高いことがわかる。夜間には方向保持性が一層優先し右左折回数を少なくしており、結果として幹線性の高い道路が選択されているからであろうと考えられる。表5には各地区の出発地点ごとに最も到達確率が高い経路を赤枠で囲んで示し、これらの経路を図8に図示した。

前節で述べたように、緊急時に要避難者が選択すると予想される経路は、平常時の夜間における経路選行情動に近いものであり、夜間の経路の方が確実に目的地である広域避難場所に到達できると考えられる。これらを考慮して、本研究では図8に示す経路を緊急時に推奨すべき避難経路として提案する。

二条城周辺



梅小路周辺



宝が池周辺



図8 推奨経路

5. まとめ

本研究は、広域避難場所への避難経路の設定が十分に検討されていないことに注目し、市民アンケート調査ならびに経路選択実験に基づいて、推奨すべき経路代替案を歩行者の選択特性を反映させて抽出するとともに、これらの経路の通行可能性を別途評価することによって、推奨経路として選定する方法を提案した。

平常時における経路選択特性として、昼間、夜間ともに方向保持性の影響が強いが、夜間には昼間と比べて方向保持性が更に強くなる傾向があることを把握した。結果として、昼間には右左折が多く含まれ細街路に分散した動線が表れることとなり、夜間には右左折が少なく広幅員道路を中心とした動線が顕著である傾向となる。緊急時を想定したアンケート調査結果と比較すると、緊急時における市民の経路選択行動は、平常時の夜の経路選択行動に類似していることが明らかとなった。

昼間の主要経路と夜間の主要経路を目的地への到達確率から評価すると、夜間の経路の方が到達率が高く、夜間に選択される経路の方が確実な経路であると考えられる。

このような特性を考慮し、本研究では、歩行者が平常時の夜間に行う経路選択特性に基づいて、避難行動時に誘導すべき経路を設定することが妥当であるとの結論に至った。

なお、GPS実験においては、広域避難場所へ地図無しで向かう場合、途中で道に迷う被験者が少なくなかった。「迷い行動」は常に生じる恐れのあるものであるから、このような状況を改善するためには何らかの誘導システムが必要である。本研究では、推奨経路に誘導する方法については論じていないが、少なくとも経路が右左折する地点等の「迷い行動」が発生しやすい場所では避難場所の方向を示すサインが必要であろう。また、本研究では最終的には取り上げなかったが、昼間の主要経路も使用されやすい経路ではあるから、両者の分岐点もこのようなサインの設置場所候補として挙げられると考えられる。

参考文献

- 1) 塚口博司・松田有史・小川圭一・安隆浩：行動分析に基づいた地震災害時の避難計画に関する一考察，歴史都市防災論文集 Vol. 5, 2011.
- 2) 八木昭憲・塚口博司・小川圭一：大規模地震災害後における交通行動—京都市におけるアンケート調査より—，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, IV-193, 2006.
- 3) 竹上直也・塚口博司：空間的定位置に基づいた歩行者の経路選択行動モデルの構築，土木学会論文集，No.807, 77-86, 2006.
- 4) 塚口博司・小川圭一・田中耕太・本郷伸和：歴史都市における道路機能障害の推定歴史都市防災論文集，Vol. 3, 2009.
- 5) 松田有史・塚口博司・小川圭一：歴史都市における徒歩による避難行動分析と避難計画に関する研究，土木学会第 67 回年次学術講演会講演集, 2011.