

大規模交通ターミナル地区における歩行者の3次元経路選択行動分析*

Three dimensional pedestrian route choice behavior in a large transportation*

柴田裕基**・塚口博司***・平田秀樹****

By Hiroki SHIBATA**・Hiroshi TSUKAGUCHI***・Hideki HIRATA****

1. はじめに

わが国が未曾有の高齢社会に向かっている今日、交通バリアフリー法、ハートビル法を踏まえた、バリアフリー新法など、歩行者空間の充実を目指した施策が打ち出されている。このことを鑑みるに、今後、安全で快適な歩行者空間の整備、運用に対する関心は一層高まってくると考えられる。このような状況の下で、歩行者の経路選択行動に関する傾向や法則性を把握し、歩行者行動特性を踏まえた質の高い歩行者空間を整備していくための方法論の確立が重要な課題となっている。特に、どのような工夫をすれば歩行者を円滑に誘導できるか、あるいは、賑わいのある街づくりを行うにあたり街路整備をどのように行っていくかなどについては、歩行者の経路選択行動特性の把握が必要不可欠であると言えよう。

とりわけ、多種多様の来訪者が混在し、地上と地下にそれぞれ起終点となりうる鉄道駅、公共施設、大規模商業施設等が存在する交通ターミナルでは、歩行者行動特性が考慮された空間の整備、運用方法を検討する必要がある。本研究では、交通ターミナル地区において多数発生する上下移動を伴う歩行者の経路選択行動に注目した。このような地区において歩行者空間整備や運用方法の検討を行うためには、地上空間における経路選択行動、あるいは地下空間における経路選択行動だけではなく、上下移動を含む一連の経路選択行動を把握することが不可欠である。上下移動を含む歩行者の経路選択行動に関しては、紙野・舟橋¹⁾の先駆的研究があるが、これは地下鉄駅の改札口とプラットフォーム間の移動に関するものであり、線的な移動を扱ったものである。大規模交通ターミナル地区における歩行者の行動を把握するためには、面的に広がった空間における分析が必要である。

そこで本研究では、歩行者の上下移動を伴った3次元空間における面的な経路選択行動特性を把握することを目的とする。特に「地上→地下(下り行動)」と「地下→地上(上り行動)」の行動に焦点を当てて分析する。

*キーワード：歩行者、経路選択行動、3次元空間での移動

** 正会員、修士(工学) 国土交通省

*** フェロー会員、工博、立命館大学理工学部 都市システム工学科

(滋賀県草津野路東 1-1-1、TEL：077-561-2735、E-mail：tsukaguc@se.ritsumeai.ac.jp)

**** 学生員、立命館大学大学院 理工学研究科

筆者ら²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は、すでに平面(地上空間と地下空間)において空間定位に基づいた経路選択行動分析に基づいて経路選択行動モデル構築をしている。これらのモデル

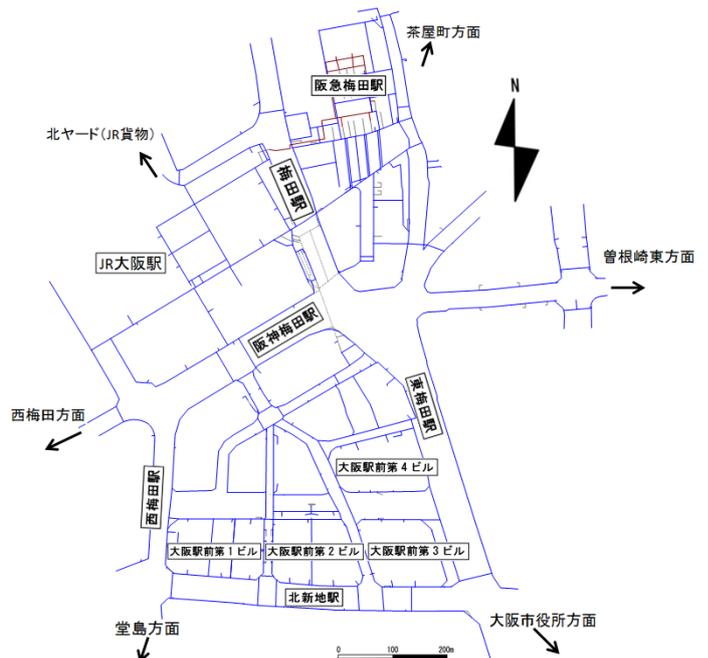


図1 JR大阪駅周辺地上街路図

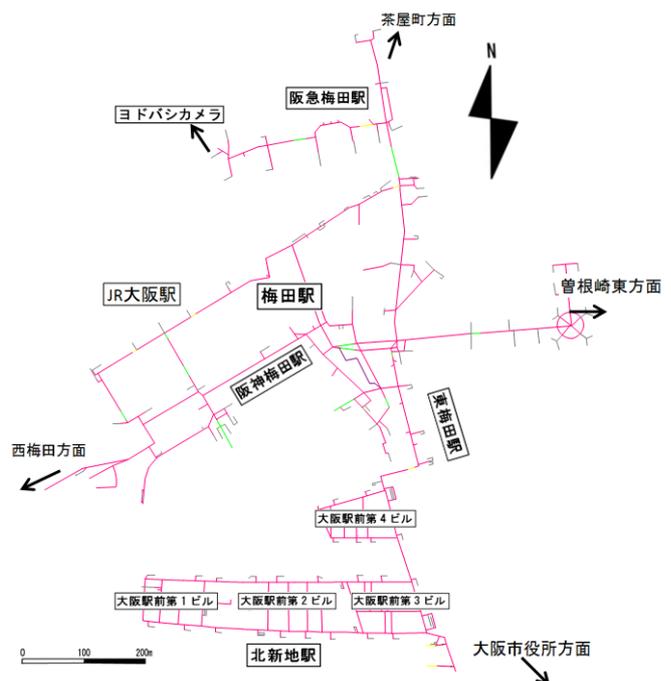


図2 JR大阪駅周辺B1街路図

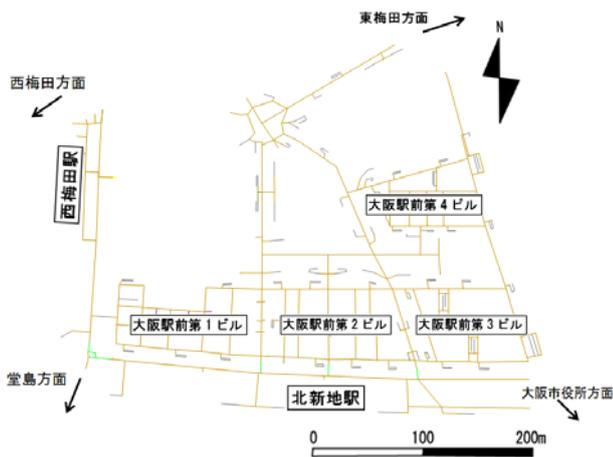
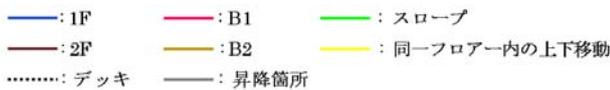


図3 JR大阪駅周辺B2街路図



と新たに構築する3次元経路選択行動モデルを組み合わせることによって、上下移動を伴う一連の歩行者の経路選択行動の推定方法を提案する。

2. 調査対象地域及び調査概要

調査対象地区は図1～3に示す通りである。図1はJR大阪駅周辺の地上街路網図であり、図2および図3はその地下部分B1、B2を示している。当地区では、7つの鉄道駅（地上駅2駅、地下駅5駅）、大規模な商業施設、商業ビルなどが立地しているため、歩行行動の起終点となる施設が多い。このため人通りも多く、様々な属性の歩行者の行動データを取得できる。また、街路網構造が多層的であり、交通ターミナル地区の特徴である、上下移動を伴う経路選択行動が発生しやすいことも挙げられる。さらに、当該地区は地下空間が大規模であることから、トリップ長が長い歩行者行動の把握も比較的容易である。このように、当該地区は3次元空間における多様な歩行者経路選択行動に関する分析に適している。

次に調査の概要について述べる。調査員が鉄道の駅改札口等において歩行者を無作為に選び目的地まで追跡することにより当該歩行者の歩行経路を把握する方法を採用した。目的地に到着するまでに調査範囲外に出た場合は当該地点を目的地とした。前述の通り、筆者ら²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は既に地上空間ならびに地下空間において歩行者追跡調査を実施しているが、上下移動を伴う行動は対象としていなかった。本調査は、地上⇄地下空間間の一連の行動を追跡し、上下移動を含んだ3次元経路選択行動を把握する点に特徴がある。調査は2009年8月17日（月）～20日（木）の10時～17時に実施した。追跡対象とした歩行者は271サンプルで

あった。ODに関しては、交通施設間は142サンプル、交通施設⇄非交通施設は127サンプル、その他は2サンプルであった。ここで、1サンプルには単独歩行者だけでなく、複数名のグループ歩行も含まれている場合がある。なお、追跡調査において捉えた上下移動を伴う経路選択行動の主要ODは、「JR大阪駅、阪急梅田駅」⇄「地下鉄谷町線東梅田駅」であった。

3. 上下移動を伴う経路選択行動の分析

本研究では、歩行者経路選択行動と、「総歩行距離」「地上距離」「横断歩道横断回数、横断歩道距離」および「昇降施設種類」との関係进行分析した。

分析対象となる行動は、271サンプルの中で、被験者が実際に選択した上下移動箇所以外に上下移動箇所候補が1経路以上存在するものとした。その際、選択、非選択経路の迂回率（「実歩行距離／最短歩行距離」－1.0）が0.4以内となるものを対象としている。その理由としては、実際の追跡調査結果より地上→地下では、97%、地下→地上では、97%の歩行者組数が迂回率0.4以下であったためである。また、上下移動伴う経路選択行動はその選択経路が上下移動施設の場所に大きく依存することから、既往の研究⁴⁾⁵⁾における分析対象（地上空間では迂回率0.2以内、地下空間では迂回率0.3以内行動を分析対象）より高い迂回率を設定することが妥当と考えたためである。地上⇄地下行動に関するサンプル数は、地上→地下では75、地下→地上では61である。

図4より、地上→地下の行動では、 α （地上距離／全行程距離）が小さい地点において下り行動を行う傾向が強く、地下→地上行動も α が小さい地点にて上り行動が見受けられた。このことから、地上⇄地下行動ともに地下距離が長い経路が選択されやすいと言える。

地下距離が長く地上距離が短くなれば、歩行者が自動車と交錯する機会が減少する。当該地区の街路には歩道が整備されているが、地上街路を通行すれば横断歩道を通行することが必要となる。表1および表2からわかるように、多くの歩行者の横断歩道横断回数が0回となり、横断歩道距離も0m～10mに該当する歩行者が多い（表3、4）。地上距離を長くすると、横断歩道における自動車との交錯や信号待ち等によって円滑な歩行が妨げられる恐れが大きくなるから、歩行者は地下を優先して歩行しているのではないかと考えられる。

また、当該地区の構造上、交通施設を始点とした場合、地下距離を長くする経路を優先する方が結果として最短距離で目的地に到達できることが多いことも一因ではないかと思われる。

次に、上下移動時に選択された施設は表5および6のようである。当該地区に存在する上下移動施設の多くが

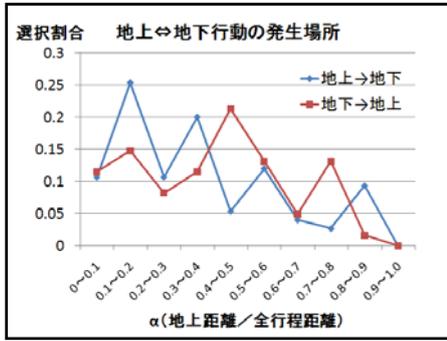


図4 上下移動箇所の結果

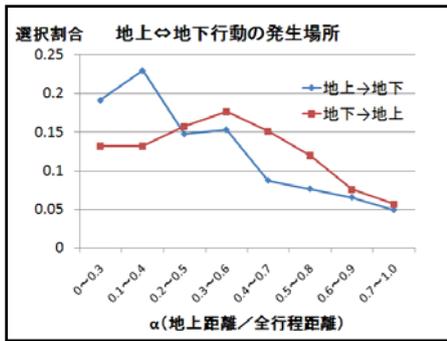


図5 上下移動箇所の結果 (3項移動平均)

階段であることを考えると、ESC の選択割合は相対的に高いと思われる。地上→地下、地下→地上行動の違いにより、ESC あるいは階段のいずれかが選択されやすいという傾向は見られなかった。

4. 3次元経路選択行動モデル

経路選択行動の分析結果より、上下移動を伴う歩行者の経路選択には、「総歩行距離(m)」、「地上および地下区間距離(m)」、「昇降施設種類」などが影響すると考えられる。これを踏まえ、上下移動箇所に着目した3次元経路選択モデルを地上→地下行動、地下→地上行動についてそれぞれ構築した。本モデルは、3経路の選択モデルとした。このため、以下の3つの上下移動選択が存在する経路データを用いた。すなわち、 $0.00 \leq \alpha < 0.33$ の場合を経路1、 $0.33 \leq \alpha < 0.66$ の場合を経路2、 $0.66 \leq \alpha \leq 1.00$ を経路3とした。なお、該当する経路が複数存在する場合は、各ランクの α の中央値に近い経路を代表経路として抽出した。また、昇降施設については、階段=0、EV・ESC=1と表わした。地上→地下、地下→地上行動のイメージは図6および7に示す通りである。

モデル式は、3肢選択ロジットモデルであり、選択肢は経路1と経路2、経路3である。3肢以上の選択も生じるODも存在するがそれに関しては、上述通り、代表する経路を抽出することで対応した。各経路の効用を V_1 、 V_2 、 V_3 とした場合、経路選択確率は以下の式で求められる。

$$\text{経路1 選択確率} = \frac{\exp(V_1)}{\exp(V_1) + \exp(V_2) + \exp(V_3)} \quad (1)$$

$$\text{経路2 選択確率} = \frac{\exp(V_2)}{\exp(V_1) + \exp(V_2) + \exp(V_3)} \quad (2)$$

$$\text{経路3 選択確率} = \frac{\exp(V_3)}{\exp(V_1) + \exp(V_2) + \exp(V_3)} \quad (3)$$

パラメータ推定結果を表5および6に示す。パラメータの符号、尤度比、およびt検定値より、良好なモデル

表1 横断歩道横断回数 (地上→地下)

横断回数	サンプル数	構成比
0	59	0.787
1	15	0.200
2	1	0.013
3	0	0.000
合計	75	1.000

表3 横断歩道横断距離 (地上→地下)

距離(m)	サンプル数	構成比
0~10	59	0.787
10~20	12	0.160
20~30	0	0.000
30~40	3	0.040
40~50	1	0.013
合計	75	1.000

表5 選択昇降施設 (地上→地下)

昇降施設種類	サンプル数	選択割合
ESC	24	0.320
階段	50	0.667
EV	1	0.013
合計	75	1.000

表2 横断歩道横断回数 (地下→地上)

横断回数	サンプル数	構成比
0	34	0.557
1	20	0.328
2	7	0.115
3	0	0.000
合計	61	1.000

表4 横断歩道横断距離 (地下→地上)

距離(m)	サンプル数	構成比
0~10	35	0.574
10~20	15	0.246
20~30	7	0.115
30~40	3	0.049
40~50	0	0.000
50~	1	0.016
合計	61	1.000

表6 選択昇降施設 (地下→地上)

昇降施設種類	サンプル数	選択割合
ESC	19	0.311
階段	42	0.689
EV	0	0.000
合計	61	1.000

を作成することができたと言えよう。

本モデルを用いて、全経路の総歩行距離が同一、全昇降施設が階段の条件で、 α が0.2(経路1)0.5(経路2)、0.9(経路3)となる各経路の選択確率を図8および9に示す。次に、他の条件は同一で経路1の経路の昇降施設がESCになった場合を図10、11に示す。さらに、経路3の昇降施設がESCになった場合を図12、13に示す。

まず、全昇降施設が階段の場合、総歩行距離が長くなるに伴い3経路の選択確率の差異が拡大する。これは、地上距離は総歩行距離に比例しており、地上距離が長くなると、歩行者が信号待ち等によって歩行を妨げられる可能性が高く、それを回避する経路選択をしているためであろう。一方、総歩行距離が短い場合には、3経路の経路選択確率の差が小さくなる。これは、総歩行距離が短いと地上距離も短くなるため、上記の抵抗を受ける可能性が3経路とも小さくなり、いずれの経路を選択しても歩行者に与える影響が大きくは変わらないことに起因していると思われる。

次に、経路1の昇降施設がESCである場合には、多くの歩行者が経路1に集中する。総歩行距離が長くなるに伴いその集中度も増加する。歩行者流を集中させるときには有効な手段であると思われる。

逆に、経路3の昇降施設がESCであった場合は地上→地下行動、地下→地上行動ともおよそODの総歩行距離が350mくらいまでは、地上距離が長い経路3の選択確率が最も高くなっている。つまり、経路3は図8、9に示すように、本来各経路の昇降施設条件が同一の場合最も選択されにくい経路であるが、昇降施設を変更することで歩行者動線を分散させることが可能になると考えられる。今回の追跡調査で主要ODとなった「JR大阪

駅、阪急梅田駅⇄東梅田駅」はおおよそ 300m 前後である。また、他の地上駅⇄地下駅間の距離は 300~400m であることから、実際のターミナル地区における歩行者動線計画の際などにおいて、一つの知見として活用する

ことができるのではないかとと思われる。このように、実際の上下移動を伴う経路選択行動の改善施策に活用できるモデルが構築できたと考える。

経路1: $0.00 \leq \alpha < 0.33$ 経路2: $0.33 \leq \alpha < 0.66$ 経路3: $0.66 \leq \alpha \leq 1.00$
 $\alpha = \text{「地上距離(m) / 全行程距離(m)」}$

地上空間; — 地下空間; — 階段; — 横断歩道; - - - ESC; —

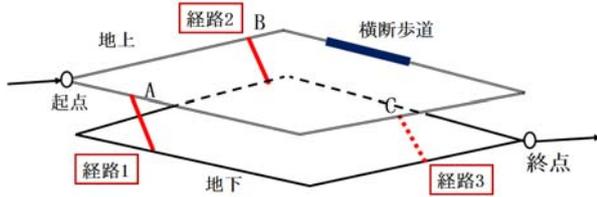


図6 地上→地下行動のイメージ

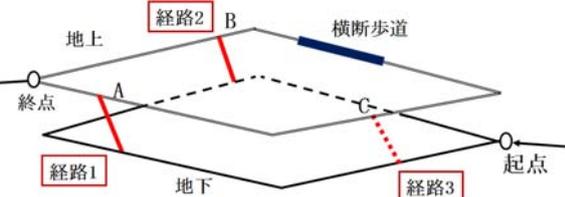


図7 地下→地上行動のイメージ

表7 地上→地下モデル

説明変数	パラメータ値	t検定値
全距離	-2.19E-02	-2.30**
地上距離	-5.65E-03	-2.95*
昇降施設種類	1.54E+00	2.16**
尤度比	0.15	
的中率	76.47 = 39 / 51	

表8 地下→地上モデル

説明変数	パラメータ値	t検定値
全距離	-4.95E-02	-3.30*
地上距離	-7.21E-03	-2.77*
昇降施設種類	1.69E+00	2.57*
尤度比	0.31	
的中率	75.61 = 31 / 41	

* : 1%有意
 ** : 2.5%有意

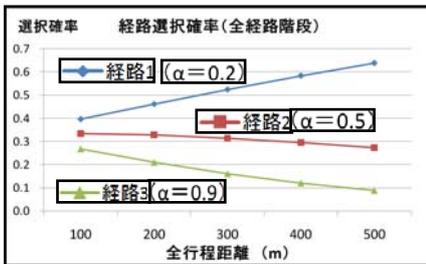


図8 全経路階段時の確率 (地上→地下)

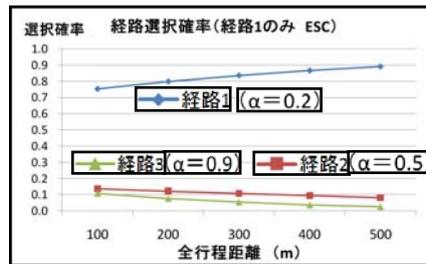


図10 経路1のみESC時の確率 (地上→地下)

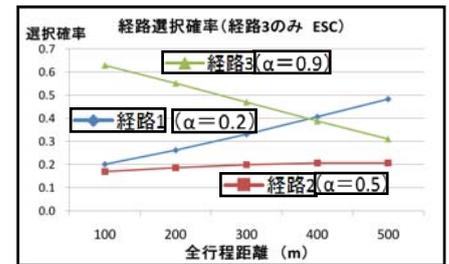


図12 経路3のみESC時の確率 (地上→地下)

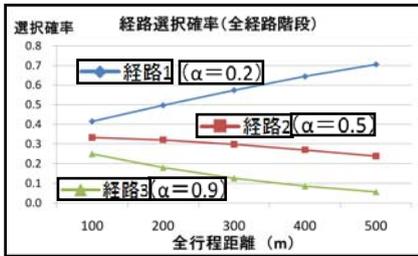


図9 全経路階段時の確率 (地下→地上)

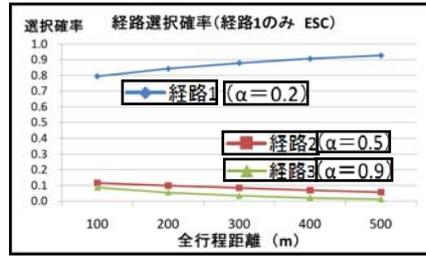


図11 経路1のみESC時の確率 (地下→地上)

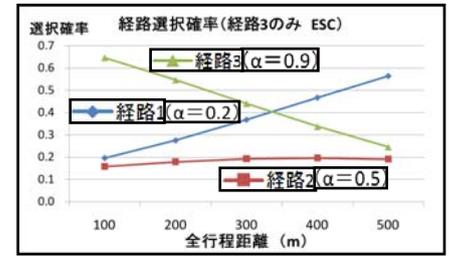


図13 経路3のみESC時の確率 (地下→地上)

表9 地上街路モデル (格子状街路対象)

パラメータ (t値)		尤度比	的中率 (%)	パラメータ比 (目的地/進入)
目的地方向角度 (°)	進入方向角度 (°)			
-1.5802×10^{-2} (-14.03 *)	-8.9417×10^{-3} (-17.06 *)	0.16	69.4 =1708/2460	1.767

表10 地下街路モデル (格子状街路対象)

パラメータ (t値)		尤度比	的中率 (%)	パラメータ比 (目的地/進入)
目的地方向角度 (°)	進入方向角度 (°)			
-1.3193×10^{-2} (-9.46 *)	-7.66631×10^{-3} (-8.63 *)	0.17	69.2 =633/915	1.721

* : 1%有意

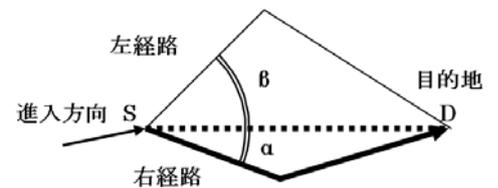


図14 目的地方向角度 (目的地指向性)

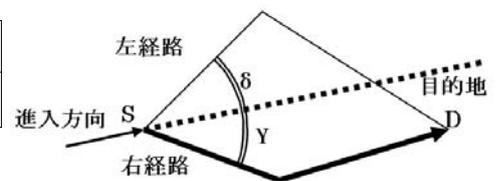


図15 進入方向角度 (方向保持性)

5. 地上、地下街路網における経路選択モデル

前述の通り、筆者らは空間的定位置に基づいた経路選択行動モデルを地上および地下街路網における構築している。ここでは次章にて3次元格子状街路網において歩行者行動を推定するにあたり、既に構築している平面モデルの概要を示す。モデル構築に当たっては、格子状街路を有する地上街路網（西宮北口、高槻、堀江、三宮、淀屋橋、四条烏丸、御池エリア）と地下街路網（東京駅八重洲地下街）で実施した追跡調査結果を用いた²⁴⁾。街路区分の類型化に関しては塚口・松田²⁾に基づいている。

平面の経路選択モデルは、目的地方向性を表す目的地方向角度（図14）および方向保持性を表す進入方向角度（図15）の2要因のみを説明変数とする経路選択行動モデルである。モデル式は、2肢選択ロジットモデルであり、選択肢は右経路と左経路である。3肢以上の選択も生じるが、平面では迂回率が0.2（地上）あるいは0.3（地下）を超えることは稀であるため、このような場合には迂回率が小さい方の経路を対象とすることとした。右経路と左経路の効用をそれぞれ V_1 、 V_2 とすると、各経路の選択確率は以下の式で求められる。

$$\text{右経路選択確率} = \exp(V_1) / (\exp(V_1) + \exp(V_2)) \quad (4)$$

$$\text{左経路選択確率} = \exp(V_2) / (\exp(V_1) + \exp(V_2)) \quad (5)$$

地上および地下格子状街路網におけるパラメータ推定結果を表9および10に示す。パラメータの符号、尤度比、およびt検定値より、良好なモデルが作成されたと言えよう。両者ともパラメータ比が1以上であることから、格子状街路では「目的地指向性」に重きを置いて経

路が選択されていると考えられる。ただし、不整形な地下街路網地区においては方向保持性が優先されるという結果も得られている²⁵⁾。

6. 3次元格子状街路網における歩行者流動の推定

本章では、4、5章で示した経路選択行動モデルを用いて、3次元格子状街路網における歩行者流動をシミュレートし推定する。対象とする格子状街路網は図16に示す抽象化された街路網であり、上下移動箇所は簡単のため3ヶ所とし、1区画は70mとした。上下移動箇所No1は地下ノード21と地上ノード1を連結しており、他の上下移動箇所もそれに倣っている。シミュレーションは、地上ノード19と地下ノード20をそれぞれODとし、歩行者500人について起点から終点までの経路選択行動を調べた。

地下→地上の歩行者流動の推定手法としては、まず、地下→地上行動の3次元モデルから、各々の上り箇所の選択確率を算出する。次に、起点から上り箇所までの経路選択行動を地下モデルにより推定する。最後に上り行動後、目的地までの経路選択行動を地上モデルにより推定する。地上→地下行動もこの方法を逆に用いて推定した。なお、上下移動直後の経路選択行動については、方向保持性の議論ができていないため、両経路選択の選択確率を同一とした。

全昇降施設が階段の場合（図17、18）、昇降施設No1のみESCの場合（図19、20）、昇降施設No3のみESCの場合（図21、22）について結果を示す。

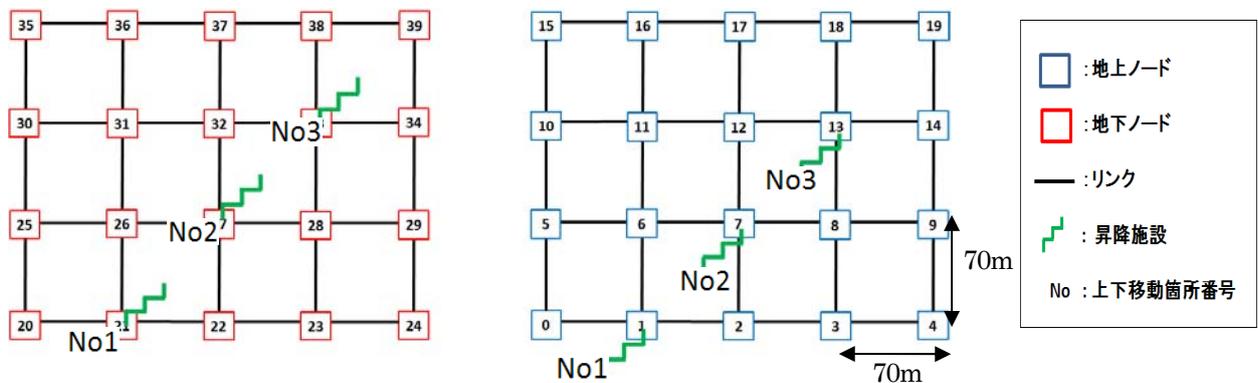


図16 分析対象街路ネットワーク（左：地下街路網 右：地上街路網）

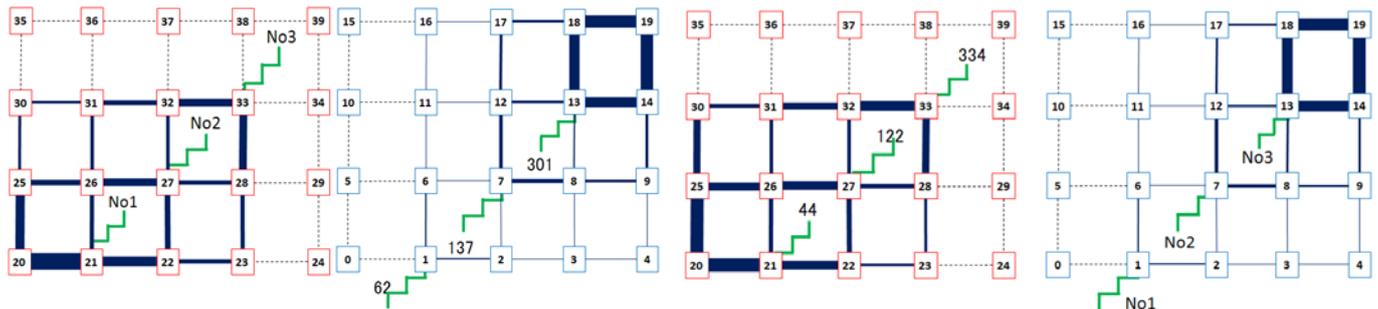


図17 全経路階段時の流動図（地上→地下）

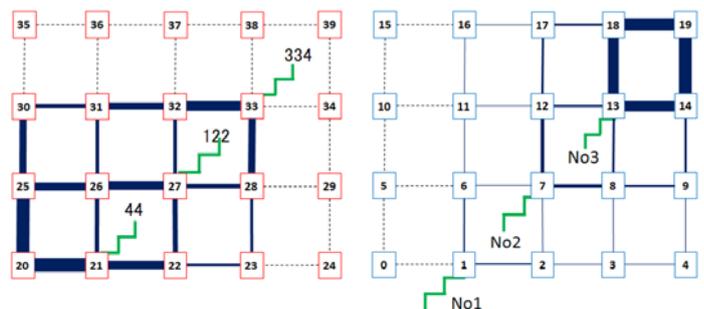
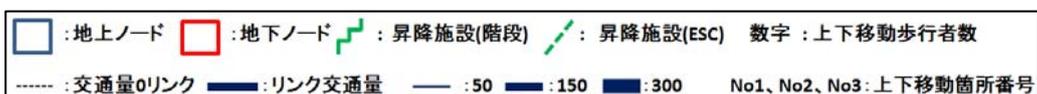


図18 全経路階段時の流動図（地下→地上）



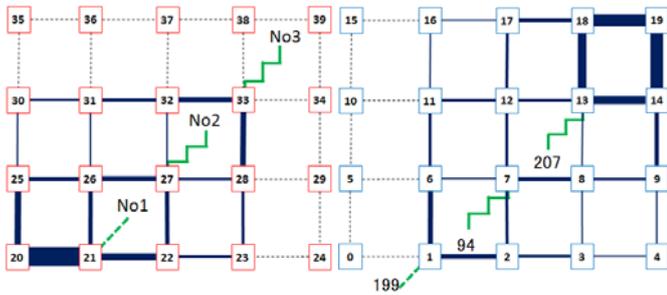


図19 経路1のみESC時の流動図（地上→地下）

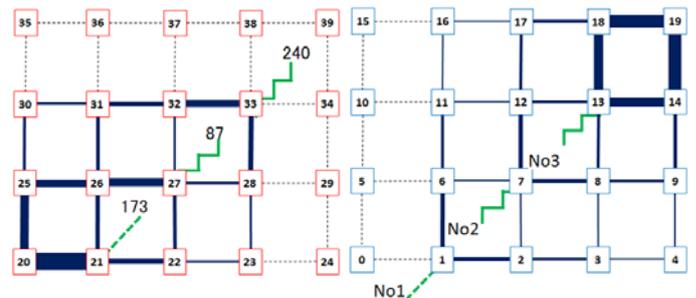


図20 経路1のみESC時の流動図（地下→地上）

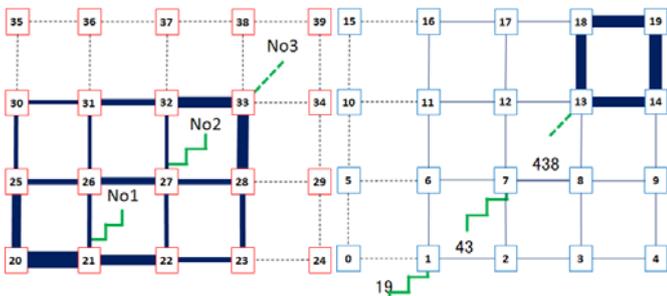


図21 経路3のみESC時の流動図（地上→地下）

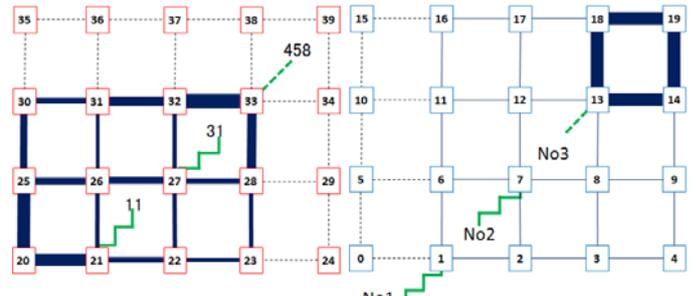


図22 経路3のみESC時の流動図（地下→地上）

上下移動箇所 No1 を介する経路は通常最も選択されにくい経路であるが、当該箇所のみを ESC にした場合（図 19、20）、地上→地下では 199 人(39.8%)、地下→地上では 173 人(34.6%)となり、歩行者がある程度分散していることがわかる。各昇降施設の種類が同一の場合、地下に歩行者が集中し、地上は特定のリンクに交通が集中するが、このように ESC を配置することで、地上距離が長い経路に歩行者を誘導することができる。

図 21、22 のように、選択されやすい経路の昇降施設が ESC に置き換わると、地上→地下では 438 人(87.6%)、地下→地上では 458 人(91.6%)が上下移動地点 No3 に集中しており、過度の集中を招く恐れがある。また、それに伴い、この上下移動地点に接続する地上、地下リンクでの交通量がかなり増加する。このため、本研究では検証できていないが、上下移動箇所付近での歩行者の交錯が多く発生すると考えられる。もっとも、その地点付近で、沿道利用状況を考慮した上で歩行者の整流化を重点的に行えば、逆に効率的な歩行者動線計画に繋がる可能性もあろう。

7. まとめ

参考文献

- 1) 紙野桂人・船橋國男：群集行動にみられる空間的定位の傾向について、日本建築学会論文報告集、No217 1974.03
- 2) 塚口博司・松田浩一郎：歩行者の経路選択行動分析、土木学会論文集、No.709、117-126、2002.07
- 3) 竹上直也・塚口博司・阿部了：空間的定位に基づく歩行者経路選択行動モデルの体系化、土木計画学研究・講演集、Vol.31、2005.06
- 4) 竹上直也・塚口博司：空間的定位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、2006.01
- 5) 塚口博司・大橋祐貴：大規模地下街における歩行者の経路選択行動分析、土木計画学研究・論文集、Vol.25 No.3、615-621、2008.09

本稿では、3次元空間における経路選択行動モデルを構築するとともに、これを筆者らがすでに構築してきた地上街路網および地下街路網における経路選択行動モデルと組み合わせて、面的に広がった3次元空間における歩行者の行動を分析する方法を提案した。

3次元経路選択行動モデルに関しては、地上から地下への移動、地下から地上への移動のいずれにおいても、地下距離を短くする傾向が認められた。この傾向は実態調査を実施した JR 大阪駅周辺地区の特性を反映したものであり、一般性については今後の検討課題とせざるを得ないが、本モデルを利用することによって、当該地区における歩行者の3次元の行動を面的に分析し推定するための手法を提案することができたと考える。

本研究では、3次元格子状街路網における歩行者流動を仮想街路網において推定しているが、今後、実空間を対象として歩行者の3次元の行動を推定していきたい。さらに、それらの結果に基づいて、大規模交通ターミナル地区における平常時および緊急時の歩行者の誘導方法について検討していきたい。