大規模地下街における歩行者の経路選択行動分析*

Analysis on Pedestrian Route Choice Behavior in Underground Shopping Streets*

塚口博司**・大橋祐貴***

By Hiroshi TSUKAGUCHI** and Yuki OHASHI***

1. はじめに

日本の大都市は都心部の交通ターミナルに大規模な地下街を有していることが多い。これらの地下街は商店街を形成しているだけでなく、隣接する駅間あるいは駅とターミナル地区に立地する主要施設との連絡通路としての機能も有している。これらの通路を利用する歩行者は、彼らの現在位置と目的地との関係を考えて最も効率的な経路を選択していると思われる。

一般に、小さなネットワークであっても起点と終点間にはいくつかの経路が存在する。このような経路が数多く存在する場合もあるが、歩行者が選択対象とするのは、事実上、最短経路とそれに近いいくつかの経路である。どのような経路が歩行者によって選択される傾向にあるのかを知ることが、街路を安全にそして快適に整備するために非常に重要である。

歩行者の経路選択行動に関して多くの研究が行われてきたが、その多くでは街路環境に焦点を当ててモデル化されていた。このようなアプローチによって構築されたモデルは、結果として他地域への適用性が低いものであったと思われる。そこで筆者らは、各交差点における右左折確率に関係する新たな方法を採用している。この方法は、Garbrecht^{1) 2)} が採用した方法、あるいは紙野・舟橋³⁾、舟橋⁴⁾ の研究方法と類似している。

地上の街路網における詳細な実測調査に基づいて、筆者らはすでに多様な街路網に適用可能な歩行者経路選択行動モデルを開発している^{5) ~ 8)}。目的地指向性と方向保持性によって歩行者の経路選択行動を説明しようという同一の考え方に基づいて、本研究は地下街における歩行者の経路選択行動を分析しようとするものである。本研究は、歩行者の経路選択行動の根元的なメカニズム

を分析し、これによって地下街の計画に適用可能な経路選択モデルを提案することを目的とする。

地下街を通行する歩行者は、一連の歩行行動において、地上街路から、あるいは地上街路へと移動することが多い。すなわち、地下街を平面的に移動するとともに、地上街路との上下移動を含むトリップを行うことが少なくない。このため、地下街における歩行者の経路選択行動を対象とする場合には、地下街における平面的な経路選択行動特性と、地上街路網との接続を考慮した3次元的な経路選択行動特性の双方について分析しなければならない。本研究では、前者のモデル化に重点をおくこととし、後者に関してはモデル化の方向を示すことにする。

本研究は以下の段階から構成されている。まず、歩行者の経路選択行動データを取得するために、大規模地下街で実測調査を実施した。ここでは調査員による追跡によってデータを取得した。次に、歩行者の経路選択行動と歩行者行動に関連する2種類の基本的な角度との関係を分析し、地下街における平面的な経路選択モデルを構築した。さらに、この経路選択モデルを地上街路網も考慮した3次元的な経路選択行動モデルへと発展させる方向について論じた。

2. 歩行者経路選択行動モデル化の基本的考え方

経路長、街路幅員、自動車交通量、歩道利用の可否、ならびに沿道のアメニティ等の工学的変数はすべて歩行者の経路選択行動に影響を与えており、これらの変数は竹内⁹⁾、高辻・深海¹⁰⁾ らによる歩行者の経路選択行動の研究に用いられてきた。しかしながら、一般に、これらの経路選択モデルは他地区への移転性に欠けていた。これは、既往モデルの多くが歩行環境に係る要因の影響を重視しすぎていたからであろうと思われる⁹⁾。

本研究は、歩行者が経路上の分岐点において、ほぼ等距離の経路ならば、直進経路を選択する傾向、すなわち物理学の慣性のような行動特性を有しているとの仮説を設定している。また本研究は、歩行者は現在地点と目的地を結ぶベクトルと進行方向との角度を最小にする経路を好むという傾向を有しているとの仮説を設定している。また本研究は、歩行者は現在地点と目的地を結ぶベクトル

*キーワード: 歩行者経路選択行動, 地下街, 歩行者計画

**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、(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
Tel: 077-561-2735, FAX: 077-561-3418)

***正会員、修士(工学)、パシフィックコンサルタンツ
(株) 社会政策本部道路計画部 (東京都新宿区西新宿
2-7-1)

図-1 交差点における歩行者行動を表す角度

ルと進行方向との角度を最小にする経路を好むという傾向を有しているとの仮説を設定している。具体的に示すと以下のようである^{5)~8)}。

- 1) 目的地指向性の強い経路を選択する：歩行者は現在地点と目的地を結ぶベクトルと進行方向とが成す挟角をおおむね理解しており、この挟角を最小にする経路を選択する。
- 2) 方向保持性の強い経路を選択する：歩行者は分岐点において確率的な行動を行う。分岐点において、ほぼ経路長が等しい経路が複数存在する場合、歩行者は格子状街路網においては直進歩行、あるいは非格子状街路網においては直進に近い方向を選択する。

たとえば、図-1 に示すように、地点 D を目的地とする歩行者が地点 O に近づいているとする。地点 O は起点あるいは経路上の仮の起点である。仮説 1) に関係する角度 α 、 β を目的地方向角度と呼び、仮説 2) に関係する角度 γ 、 δ を進入方向角度と呼ぶ。本研究は、もし α が β よりも小さければ歩行者は経路 1 を選択する確率が高いと仮定する。逆に、 α が β よりも大きければ経路 2 が選択される確率が高いと仮定する。さらに、 γ が δ よりも小さければ経路 1 が選択される確率が高く、 γ よりも δ が大きければ経路 2 が選択される確率が高いと仮定する。

以上の基本的考え方は、筆者らが地上街路網において歩行者の行動特性を分析する際に一貫して採用してきた方法であり^{5)~8)}、本研究ではこのような考え方によって地下街における歩行者の経路選択行動特性を表現できるかを検証する。

3. 実測調査

大阪と東京の都心部に位置する 2 つの地下街を研究対象として選んだ。これらの地下街のネットワークを図-2 に示す。両地下街は独立した複数の地下街から構

図-2 実測調査を行った地下街街路網

成されているが、簡単のため、それぞれ「梅田地下街」および「八重洲地下街」と呼ぶことにする。梅田地下街は格子状と非格子状を含んだ複雑なネットワークから形成されているが、八重洲地下街はおおむね格子状の街路網から形成されている。

歩行者の経路選択行動を観測するために、調査員による追跡調査手法によって実測調査を実施した。梅田地下街における追跡調査は 2004 年、八重洲地下街における

図-3 地上街路網地区の例

図-4 地下街における迂回率

図-5 地下街における迂回率

調査は 2006 年に実施した。これらの調査は数名の調査員によって実施され、調査員は上記のネットワークにおいて歩行者を起点から終点まで追跡した。ここで、起点

および終点は地下街に面した鉄道駅、事業所の出入口、ならびに地上への階段等とした。梅田地区では 588 の歩行者のデータが得られ、八重洲地区では 462 の歩行者のデータが得られた。

筆者らは先に京阪神地域の 20 地区の地上街路網において同様の調査を実施している⁸⁾。対象とした地区の例を図-3に示しておく。本研究で使用了調査手法は地上の街路網を対象とした場合の手法と同一である。

歩行者が経路を選択する場合、特に必要が無いならば、できるだけ経路長が短い経路を選択すると思われる。しかしながら、現実には最短経路のみが選択されるとは限らない。そこで、歩行者に選択される可能性の高い経路を予め抽出しておくことが必要である。地下街および地上道路網において、実際に利用された経路の経路長と最短経路長の差を最短経路長で除して求めた迂回率を図-4および図-5に示す。図-5に示すように、地上街路網においては、約 95%の歩行者が迂回率 0.2 以下の経路を選択している。一方、地下街においては、95%に対応する迂回率を求めると 0.3 であった。地上街路網においては歩行者の迂回率はおおむね 0.2 程度までであると考えられるが、地下街においては最短経路の 1.3 倍程度までの経路は使用されているようである。現時点ではこの差が生じる理由は明らかではないが、本研究では最短経路の 1.3 倍以内の経路を分析対象とした。

先に述べた仮説を検証するために、実測調査において確認された経路上の全交差点（分岐点）において、上記の条件を満足するリンクを対象として、図-1 に示した目的地方向角度と進入方向角度を測定した。

4. 歩行者の経路選択行動のモデル化

上記のようにして測定した目的地指向性を表す目的地方向角度および方向保持性を表す進入方向角度を用いて非集計経路選択モデルを構築した。ここで用いたモデルは 2 項ロジットモデルであり、式 (1) に示すように、本モデルの効用関数の説明変数は目的地方向角度と進入方向角度の 2 変数のみである。

$$V_i = \sum_{j=1}^2 \omega_j X_{ij} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

ここで、 $X_{11}=\alpha$ 、 $X_{12}=\beta$ 、 $X_{21}=\gamma$ 、 $X_{22}=\delta$ である。経路 1 と経路 2 の選択率は以下の通りである。

$$P_1 = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2}} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{e^{V_2}}{e^{V_1} + e^{V_2}} \quad (3)$$

表-1 経路選択モデルのパラメータ推定結果

区域	目的地方向角度(°)		進入方向角度(°)		尤度比 ρ^2	的中率(%)	パラメータ比 (目的地/進入)
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値			
地下街	梅田	-9.57×10^3	-5.0*	-1.30×10^2	-11.3*	0.21	74.0 (478/646)
	八重洲	-1.31×10^2	-10.0*	-8.13×10^3	-9.4*	0.18	70.1 (705/1005)
地上道路網**		-1.53×10^2	-19.4*	-9.59×10^3	-24.7*	0.17	70.0 (3461/4945)

1)* 1% 有意

2)** 最短経路よりも1.2倍以上長い経路は実測調査によってほとんど使用されていないことを確認しているから、これらの経路を除いている。

本研究において推定されたパラメータ ω_j は表-1 に示されている。t 値、尤度比 ρ^2 、的中率といった諸指標を考慮することにより、両地下街のいずれにおいても、進入方向角度と目的地方向角度の2つの角度のみで歩行者経路選択モデルを構築することができた。表-1 には地上の街路網において構築した経路選択モデルと地下街において構築した経路選択モデルを比較するために、地上街路網を対象として開発したモデルも示した。この経路選択モデルは、街路網形態が異なる 20 地区のうちで地区固有特性からモデル化が困難であった 5 地区を除いた 15 地区に共通して適用できるモデルであり、格子状街路網ならびに不整形な街路網を含む多様な街路網に対して適用可能なかなり汎用性の高いモデルである⁸⁾。

地下街は無窓空間であり、地上のように遠方のランドマーク等によって方角を確認しにくい反面、区域が限定されたものとなっているなど、地上の街路網とはやや異なる特徴を有している。しかしながら、本研究の分析によると、一般に、地上街路網において構築された経路選択モデルと地下街で開発されたモデルの構造が同様であり、経路選択行動のメカニズムが類似していることを示唆していると考えられる。もっとも、経路選択モデルを詳細に見ていくと、表-1 に示した3モデル間にいくつかの差異があることがわかる。地上街路網における経路選択モデルの場合には、進入方向角度のパラメータに対する目的地方向角度のパラメータの比が1.6倍になっており、目的地指向性の方が有意であることを示している。一方、地下街の場合には梅田地下街と八重洲地下街で傾向が異なっている。すなわち、八重洲モデルでは地上街路網と同様に目的地指向性の寄与が大きくなっているが、梅田モデルでは方向保持性の寄与が大きくなっている。

地上街路網と地下街とで傾向が異なる理由を明らかにするには至っていないが、両地下街において差異が生じる理由は以下のように推測することができる。筆者らの一連の研究では、歩行者はある程度の方角感覚を有しているが当該地区を熟知しているわけではないとの前提に立っている。つまり、当該地区を全く知らない歩行者は対象としていない。このことは調査に当たって、明らか

に迷っていると思われる行動をとったり、地図を見ながら歩いている歩行者は対象から除いていることから、ある程度担保されている。梅田地下街は図-2に示すように、不整形な街路網を有している。本研究で対象としている歩行者にとって、梅田地下街において方向を正確に把握することは容易でない。このため、目的地指向性よりも方向保持性を優先させて、より確実な地点まで移動しているのではないかと思われる。一方、八重洲地下街の場合には図-2に示すように基本的にほぼ格子状街路網となっており、上記の歩行者にとっても方向が比較的把握しやすいから目的地指向性を優先させているのではないかと考えられる。このようなネットワーク特性が歩行者の経路選択行動に影響していると思われる。

5. 3次元経路選択モデルへの展開

以上で述べたように、地下街における歩行者の経路選択行動には、基本的には、地上街路網における歩行者の行動と同様のメカニズムが存在することが明らかとなった。すなわち、歩行者の経路選択行動は目的地指向性と方向保持性から説明することができる。したがって、このモデルを用いて地下街を通行する歩行者の流れの概略を推定することができる。

もっとも、地下街を通行する歩行者の目的施設は地下街の内部に留まるとは限らない。すなわち、地上に目的施設がある場合には、起点から終点までの経路上の何れかの地点で上下移動が必要となる。この行動を模式的に示すと図-6のようである。

地下街は地上レベルと接続していなければならないから、階段、スロープ、エスカレータ、エレベータ等の上下移動を含んだ歩行者の3次元的な動きが考慮されなければならない。さらに、多層構造になっている地下ショッピングモールの場合には、平面的な経路選択行動とともに多くの上下移動場所の選択行動が発生する。これらの経路選択行動が総合的に解明されて初めて地下街における経路選択行動を全体として説明できることになる。このためには、地下街に即した3次元の経路選択モデルに改善することが必要となる。

表-2 地上街路網における経路選択モデルのパラメータ推定結果

地区	目的地方向角度(°)		進行方向角度(°)		最短経路ダミー(該当=1, 非該当=0)		尤度比 ρ^2	的中率(%)	パラメータ比 (目的地/進行)
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値			
十三地区	-1.18×10^{-2}	-3.8**	-1.50×10^{-2}	-8.6**	5.61×10^{-1}	4.4**	0.29	79.2 (319/403)	0.79
千林地区	-1.78×10^{-2}	-4.4**	-9.58×10^{-3}	-4.9**	7.32×10^{-1}	4.7**	0.31	77.7 (213/274)	1.86
苔染園口	-1.57×10^{-2}	-3.5**	-1.09×10^{-2}	-3.5**	3.61×10^{-1}	2.0*	0.25	70.0 (172/224)	1.44

**1%有意、*5%有意

図-6 上下移動を伴う歩行者経路

図-6に示したように地下街における歩行者の上下移動を伴う経路選択行動は2つに大別できる。一方は、ある歩行者にとって上下移動地点が1つしか存在していない場合であり、他方は複数の上下移動地点が存在する場合である。

前者の場合には、その歩行者が目的地のおおよその方向を知っていれば、本研究で提案した経路選択モデルを上下のレベルで2回使用することによって当該歩行者の経路を推定することができる。たとえば、図-6(a)に示すように、選択モデルを2回使用することによって地点Sから地点Mへの経路と地点M'から地点Dへの経路をそれぞれ推定することができる。ここで、地モデルを上下のレベルで2回使用することによって当該歩行者の経路を推定することができる。たとえば、図-6(a)に示すように、選択モデルを2回使用することによって地点Sから地点Mへの経路と地点M'から地点Dへの経路をそれぞれ推定することができる。ここで、地点Mは仮の終点、地点M'は仮の基点である。このようにして地点Sから地点Dへの経路が推定できる。

後者の場合には、あるODペア間に上下移動地点が複数存在するわけであり、新たな検討が必要になる。たとえば、図-6(b)に示すように、あるODペア間に複数

の上下移動地点M、Nが存在し、この上下移動地点に対応して、選択対象と成り得る複数経路が存在する場合を考える。上下移動地点には、階段、エスカレータあるいはエレベータが設置されているとする。ここで、地点Mを経由すると仮定した場合、最も使用されやすい経路が経路1であり、地点Nを経由する最も使用されやすい経路が経路2であるとする。これらはそれぞれ上述の経路選択モデルを用いることによって求められる。

さて、S地点における経路選択に関しては以下の視点からの検討が必要である。

- 1) 上下移動地点MならびにNにおける施設（階段、エスカレータ（上りのみ、あるいは上りと下り）、エレベータ）の整備状況が経路選択に決定的な影響を及ぼす場合
- 2) 上下移動施設は歩行者にとって抵抗要因とはなるが、その影響は水平歩行距離に換算できると思われる場合

1)の場合には、これらの歩行者の行動は、もはや経路選択行動の対象ではなく、上下移動施設間の選択行動となる。歩行者交通計画の立場からは、地点Mあるいは地点Nの方向を示すサインの整備等が検討されることとなる。

一方、2)の場合には、筆者らが先に提案してきた歩行者の経路選択モデルを修正して用いる方法が考えられる⁷⁾。本研究では梅田地下街と八重洲地下街においてそれぞれ数100名の歩行者の経路選択データを取得した。しかしながら、起終点が地下街内の鉄道駅あるいは地下街の外延部に位置する階段等であることが多かったことなどから、2)の場合の検討を行うために十分なデータを取得できなかった。そこで、以下では、今後のモデル化の方向について記載するに留めたい。

ここで、先に図-3に示した3地区で構築された経路選択行動モデルの例を示す⁷⁾（表-2）。このモデルでは、目的地方向角度、進入方向角度の他に最短経路か否かも説明変数に加えられている。なお、目的地方向角度と進入方向角度のみで表わしたモデルも当然構築しているが、ここでは、上下移動施設の抵抗を水平距離換算することを考慮して、最短経路ダミーを含めたモデルを示した。最短経路ダミーに関しては、パラメータの符号が

正であり、最短経路が選択されやすいことを表わしている。一般に階段等の上下移動施設は、歩行者にとって抵抗要因となる。ここで、階段、エスカレータあるいはエレベータの利用抵抗を水平距離に換算し、これを用いて上記の経路長を修正することが考えられる。水平歩行時と階段の昇降、エスカレータやエレベータの利用の負荷の水平距離換算に関しては、それぞれの行動時における身体エネルギー消費量から推定することができる¹¹⁾。

このようにして経路1と経路2の経路長が求められれば、表-2に示すモデルを参考にして、上下移動を考慮した経路選択行動を表すことができる。

6. まとめ

本研究は大阪および東京の都心に位置する大規模地下街において歩行者の経路選択モデルを開発した。モデル作成の考え方は筆者らが先に開発した地上街路網における経路選択モデルを同一であり、また両地下街におけるモデルの構造が地上街路網において開発したモデルと同様であるから、地上街路網と地下街における歩行者の経路選択メカニズムはほぼ同様であると言えることができる。

梅田モデルと八重洲モデルにおいて採用されたパラメータには若干の差異が見られる。すなわち、梅田モデルでは目的地指向性よりも方向保持性が有力であり、逆に八重洲モデルでは目的地指向性の方が有力であることがわかる。この差異の理由を特定するには至っていないが、地下街におけるネットワーク特性が反映していると思われる。すなわち、基本的に格子状街路網となっている八重洲地下街では比較的方向が認識しやすいから方向保持性が優先され、不整形な街路網である梅田地下街では、方向保持性を優先して歩行者が経路選択行動に影響していると思われる。

地下街においては、地上との連絡が必要となるから、3次元的な経路選択モデルが必要となる。本研究では3次元モデルを構築する際に不可欠である3次元モデルの作成方法について取りまとめた。

本研究で提案した行者経路選択モデルは、平常時における地下街活性化ならびに緊急時における避難計画に活

用できる可能性があり、今後、地下街における歩行者OD交通量の推計手法等と組合せていくことが望ましいであろう。

参考文献

- 1) Garbrecht, D., Frequency distributions of pedestrian in a rectangular grid, *Journal of Transport Economics and Policy*, IV(1), pp.66-88, 1970.
- 2) Garbrecht, D., Pedestrian paths through a uniform environment, *Town Planning Review*, 42(1), pp.71-84, 1971.
- 3) 紙野桂人, 舟橋國男: 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*, 217, 45-51, 1974.
- 4) 舟橋國男: 格子状街路網地区における経路の選択ならびに探索に関する調査実験, *日本建築学会計画系論文報告集*, 428, 85-92, 1991.
- 5) 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/IV-56, 117-126, 2002.7.
- 6) Tsukaguchi, H. Vandebona, U. and Matsuda, K., Modelling of pedestrian route choice behaviour for development of information systems architecture, *The Selected Proceedings of the 9th WCTR*, 2003.
- 7) 塚口博司, 竹上直也, 松田浩一郎: 不整形街路網地区における歩行者の経路選択行動に関する研究, *土木学会論文集*, No.779/IV-66, 45-52, 2005.1.
- 8) 竹上直也・塚口博司(2006)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 D Vol.62, No.1* pp.64-73.
- 9) 竹内伝史 (1977) 歩行者の経路選択性向に関する研究, *土木学会論文集*, No.259, pp.91-101.
- 10) 高辻秀興・深海隆恒(1983)住宅地における歩行者の経路選択行動についての分析, *日本都市計画学会学術研究発表会論文集*, No.18, pp.199-204.
- 11) 例えば, (財)運輸経済研究センター: スムーズに乗り継げる公共交通—交通機関の乗り継ぎ施設・方式の改善に関する調査—, 1979.

大規模地下街における歩行者の経路選択行動分析*

塚口博司**・大橋祐貴***

日本の大都市の交通ターミナルには大規模地下街が設置されている。地下街は商店街を形成するとともに駅と周辺の目的施設と間の主要な通路となっている。本研究は詳細な実態調査に基づいて、大規模地下街にける歩行者の経路選択行動モデルを開発した。本研究で構築した経路選択モデルは、地上で開発されたモデルと同様の構造となっており、地下街と地上街路網における歩行者の経路選択行動メカニズムがほぼ同一であることを示している。本モデルは商業活性化ならびに緊急時の避難計画を含んだ地下街の種々の計画に活用できると考えられる。

Analysis on Pedestrian Route Choice Behavior in Underground Shopping Street*

By Hiroshi Tsukaguchi** and Yuki Ohashi***

Most populous cities in Japan have large underground shopping streets located at transportation hubs. These areas are used for retail purposes and also serve as commuter links between adjacent railway stations and attractions. Through detailed observations and surveys, this study developed pedestrian route-choice models in these large, underground shopping areas. These models have the potential to play an important role in the planning of underground shopping malls, including plans for stimulating retail activity during non-threatening times and a refuge plan during times of emergency.