

都心回遊モデルを用いた 都市空間改変効果の分析

伊藤 創太¹・福山 祥代²・三谷 卓摩³・羽藤 英二⁴

¹学生非会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: itoh@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²学生非会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: fukuyama@bin.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 復建調査設計株式会社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-8-15)
E-mail: mitani@fukken.co.jp

⁴正会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

都市生活者の都心部における活動や滞在が見直され、安全で快適な街路空間整備が進められていく中で、都市空間の改変効果を定量的なデータで分析していくことが重要である。本研究ではプローブパーソンデータをもとに、都市の街路空間に対する個人間の嗜好の異質性をMixed Logitモデルにより解析し、ポテンシャルモデルを用いた都心回遊行動モデルによって都市空間改変の効果分析を行うモデルフレームワークの構築を行ったので、この内容について報告する。

Key Words : pedestrian, probe person, micro simulation, spatial changes

1. はじめに

都市の縮退や高齢化、中心市街地の空洞化が昨今の都市を巡る問題として叫ばれており、都市生活者の移動の性質も変化していると考えられる。そうした文脈の中で、街路整備においても歩行者が安全かつ快適に歩ける空間を形成することが課題となっており、都市におけるwellbeingを考える上でも、人間由来の移動である徒歩空間が見直され、単なる移動だけでなく移動自体を愉しむ行為としての回遊行動を促す心地よい空間づくりのための工夫が各所で行われている。既存の都市計画手法で重視されて来なかった歩行者回遊行動の誘発を目的とした事業や新たなアクティビティプログラムの挿入では従来にない回遊行動の評価が重要となる。

従来の都心回遊モデルでは、斎藤ら¹⁾などの施設間の選択確率に着目した研究が多く見られるが、実際に移動する経路や空間に注目したものは少ない。中心市街地の回遊行動の経路選択のシミュレーションを行った例では桶野ら²⁾などがある。本研究では、街路空間での歩行者の移動をポテンシャルモデルを用いて、街路空間の経路選択への影響を考慮して表現した。歩行者シミュレーションモデルはHelbing³⁾のSocial Force Modelを端緒に多くの

手法が提案され、ポテンシャルモデルは横山ら⁴⁾の避難行動への適用例や、移動の不確実性を考慮して経路選択も含めて考慮しているHoogendoorn⁵⁾の例がある。

土木計画での街路空間の整備では、回遊行動のエリア間の関係構造や、回遊行動の特徴ともいえる多様な個人間での異質性を考慮する必要があると考える。本研究では、Mixed Logitモデルによる分析をもとに、街路環境を考慮するポテンシャルモデルで表現した2次元空間と周辺の街路ネットワークを接続させる手法により、街路改変の効果の波及性を都心部のネットワーク構造の中で分析することを試みる。回遊行動の個人間異質性とエリア間での行動の多様性を、街路空間環境による歩行への影響を仮定したポテンシャルモデルの枠組みの中に入れることでシミュレーションで再現すること、また空間改変の効果を定量的な指標で評価することを目的とする。

2. データ概要

(1) 調査概要

本研究では2011年9月7日から10月2日までの26日間で行われた神戸プローブパーソン調査2011（以下PP調査）

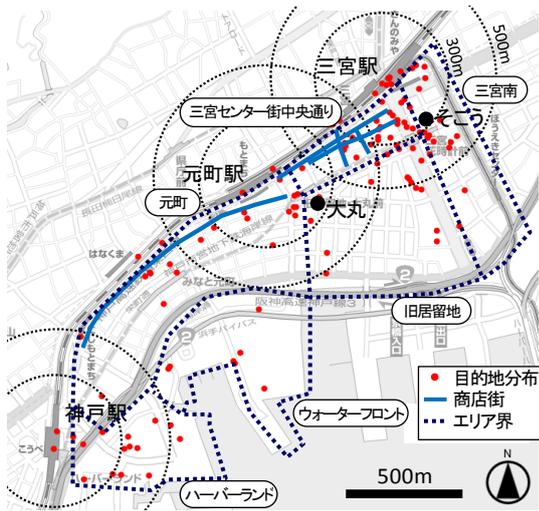


図-1 非義務目的のトリップ目的地分布

を用いて分析した。被験者は神戸市都心部を勤務・買い物・レジャーで日常的に利用する男女30名である。被験者の行動分析はBCALsによる行動データと紙媒体による行動日誌によって行われた。BCALsは位置情報や加速度情報を移動中に数秒ごとに取得する携帯端末である。調査では108787件のロケーションデータ、569件のトリップデータが取得された。

(2) 追加アンケート調査

プローブパーソン調査の被験者12名に対して、行動調査終了後にアンケート調査を行った。アンケートはワークショップまたは郵送にて行われ、神戸市都心部での日常生活における活動場所や、都市空間の中での愛着を持つ場について調査を行った。

(3) 基礎分析

本研究では、都心部における非義務目的の徒歩での連続した移動と滞在を回遊行動と定義して、集計したデータをもとに、神戸市都心部における回遊行動の特徴を分析する。まず、PP調査で取得された目的地の分布を図-1に示す。目的地の分布をみると、神戸市都心部全体の中でも主要駅から約300m以内に多くの地点が集中しており、旧居留地やウォーターフロントのエリアにはあまり足が伸びていないことが伺える。図-2に示したトリップのルートマッチングによる経路距離も、およそ半数は200m以内のトリップであり、500m以内のトリップで7割以上を占める。また、三宮センター街や元町商店街といった歩行者が安全に歩ける商店街沿いに带状に目的地が分布しており、連続した歩行者専用空間の拡がり回遊行動を引き出していると考えられる。

次に、神戸市都心部での活動場所について、実際にどこを訪れ、またどういった場所を選択肢として認知して

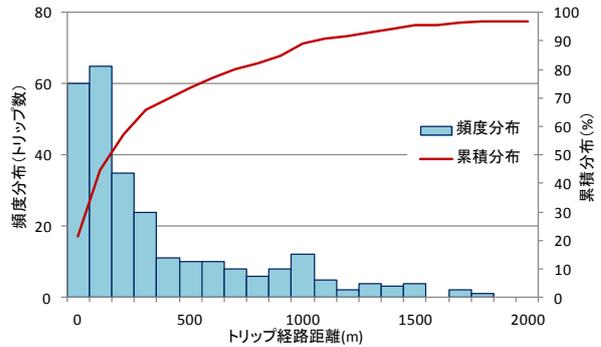


図-2 トリップ距離の頻度分布

表-1 回答目的地と愛着を持つ場所の比較

行動日誌回答 トリップ目的地(N=566)		都市の中で居場所と 感じる場所(N=15)	
場所	回答数	場所	回答数
三宮周辺	49	そごう神戸店(周辺含む)	11
大丸神戸店	29	三宮センター街	9
そごう神戸店	26	大丸神戸店	7
元町周辺	17	南京町・中華街	7
ハーバーランド	14	元町商店街	4
元町商店街	13	センタープラザ	3
神戸国際会館	6	メリケンパーク	2
神戸駅周辺	6	モザイク	2
三宮センター街	6	ジュンク堂書店	2

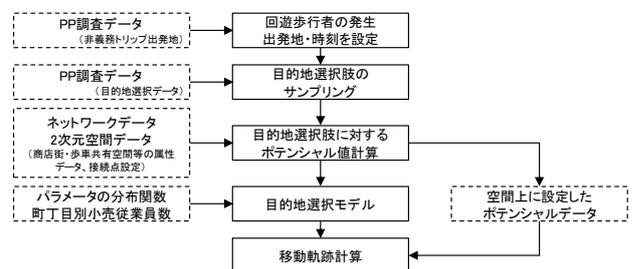


図-3 シミュレーションモデルフロー図

いるか分析を行う。行動日誌で回答されたトリップ目的地と、追加アンケート調査で交流や消費の場として愛着を持つ場所と回答した場所の中でそれぞれ上位に挙げられた場所を比較する(表-1)。

いずれの回答においても、元町商店街や三宮といった一定の領域を持った場所と、そごうや大丸といった特定の施設が同じレベルで目的地として挙げられている。特に、そごう神戸店と大丸神戸店はいずれの回答でも上位であり、都市の中で突出して認知されていると考えられる。一方で、エリアごとの回答にばらつきが見られ、回遊目的地としての認知や嗜好には個人間でもばらつきがあると考えられる。

3. シミュレーションモデルの構築

回遊行動モデルは活動スケジュールの決定、都心-郊外の選択や滞在時間選択など多様な要素を反映して包括的に構築されるが、ここでは都心内での徒歩での目的地選択と経路選択行動を取り上げ、街路環境の影響や、歩行者全体での好みの異質性に注目して分析を行う。シミュレーション全体のフローを図-3に示す。

(1) ポテンシャルモデル

a) ポテンシャルモデルの定式化

本研究では歩行者が動く空間上に、移動によるコストを考慮したポテンシャルを設定し、経路を決定することによって歩行者行動を表現する。ポテンシャルモデルでは歩行者は目的地を中心に広がるポテンシャルの勾配が最も急な方向に移動し、要するにコストが最小となるような経路をとる。環境や障害物への感度を面的に表すことができることがポテンシャルモデルの特徴である。

2次元空間上の x で単位長さを歩く時のコストを以下のように定義する。

$$L(x) = \exp(c_1 + c_2 \sum_i a_m \exp(-d_i / b_m) + c_3 X_{shopmall} + c_4 X_{cross}) \quad (3a)$$

d_i は x から各障害物 i までの最短距離、 a_m 、 b_m は障害物に対する感度を示すパラメータ、 $X_{shopmall}$ は x が商店街に属することを示すダミー変数、 X_{cross} は x が歩車共有空間（横断歩道を含む）であることを示すダミー変数、 c_1, c_2, c_3, c_4 は各パラメータである。式(3a)を用いて、目的地地点のポテンシャル値を0として、空間を0.5m単位のグリッドで分割して各点で周囲8つの隣接地点から逐次計算することによりポテンシャル値を確定させる。すなわち、各地点のポテンシャル値はその場所から目的地までの移動コストを表す。時刻 t 、地点 x のポテンシャル値を $W(t, x)$ とすると、自由速度 v_0 を持つ歩行者の進行方向と速度は以下の式で表される。

$$v(t, x) = - \frac{\nabla W(t, x)}{|\nabla W(t, x)|} v_0 \quad (3b)$$

空間上のポテンシャルの勾配により、現在地と目的地を結ぶ移動軌跡が決定される。同一ODでパラメータを変化させたときの移動軌跡・経路の変化例を図-4に示す。(2)の例では、障害物への感度を強めたことで、より広い経路を遠回りでも通る軌跡となり、(3)ではできるだけ車との共有空間を短く通る軌跡に変化している。本研究では図中(1)のパラメータ設定条件でシミュレーションを行う。

b) 1次元・2次元の接続

前項で2次元空間に対してポテンシャルモデルを設定

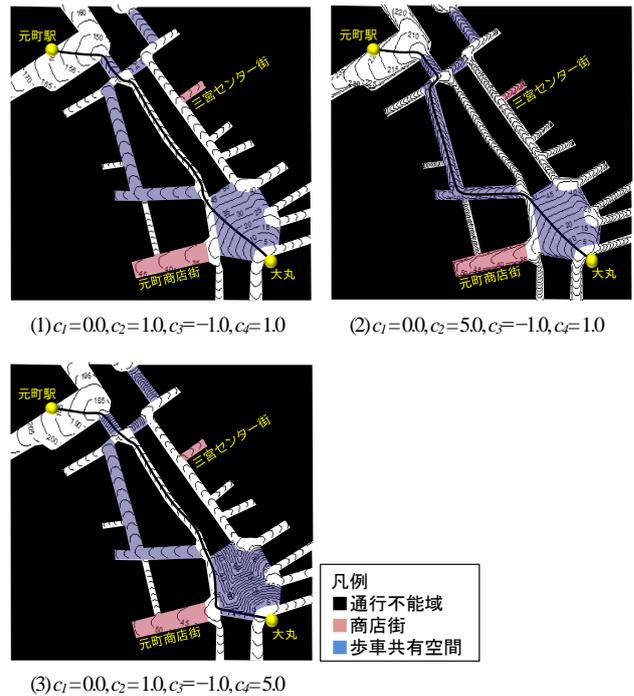


図4 パラメータ設定による等ポテンシャル線・移動軌跡変化

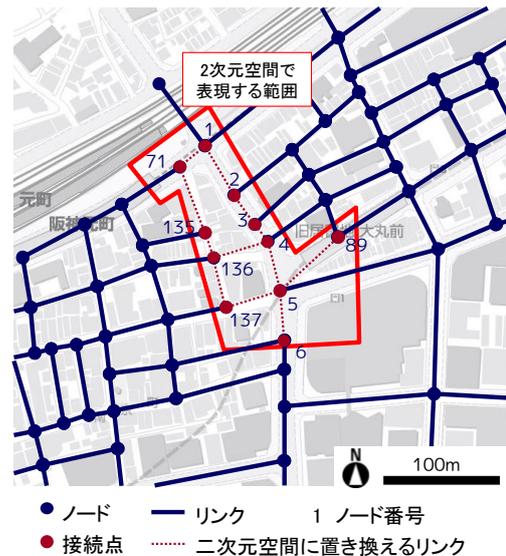


図5 2次元空間とネットワークデータの接続図

したが、都心部の回遊空間全体を詳細な2次元空間で表現することは、計算コストやデータ作成の手間は膨大なものになると考えられる。そこで、本研究ではノードとリンクで表す街路のネットワークデータについても、ポテンシャルモデルで説明変数としたものと同様の属性を考慮することで連続的に設定することを考える。

式(3a)で設定した移動コストについて、各リンク上では、歩道、或いは街路の幅員の2分の1の距離を障害物までの距離と擬似的に考え、また商店街に含まれるか、歩車分離されているかも反映させ、各ノードに対してポテンシャル値は設定される。

表-2 目的地選択肢エリア・施設の特性

選択肢	所属ノード数	PP調査での目的地選択回数
三宮中央通りセンター街	35	236
元町	154	268
旧居留地	36	225
大丸	7	14
ウォーターフロント	37	155
そごう	4	329
ハーバーランド	14	155
三宮南	32	387

図-5に本分析で対象とする範囲と周辺のネットワークデータを示した。図中にあるように、2次元空間とネットワークのノードの間で接続点を設定し、ポテンシャル値が連続性を持つようにする。

(2) 目的地選択モデル

本モデルでは、目的地の選択をMixed Logitモデル（以下MXL）で記述する。MXLは推定するパラメータが確率的な分布を持つと仮定したモデルであり、ランダムパラメータモデルとも呼ばれる。MXLでは、個人*n*の選択肢*i*への効用 U_{ni} は式(3c)で表される。

$$U_{ni} = x_{ni}^T \beta_n + \varepsilon_{ni} = x_{ni}^T b_n + x_{ni}^T \eta_n + \varepsilon_{ni} \quad (3c)$$

ただし、 x_{ni} は説明変数ベクトル、 β_n は平均**b**、分散共分散行列**Q**の正規分布に従うパラメータ、 η_n は平均**0**の正規分布に従う確率変数ベクトル、 ε_{ni} はガンベル分布に従う誤差項である。

パラメータが確率的に変動するため、個人*n*の選択肢*i*の選択確率 P_{ni} はR回のシミュレーションの乱数発生により式(3d)のように計算される。

$$P_{ni} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \frac{\exp(x_{ni}^T \beta_n)}{\sum_{j \in J} \exp(x_{nj}^T \beta_n)} \quad (3d)$$

目的地選択モデルでは、街路ネットワークデータの各ノードを選択肢とし、また選択肢集合として神戸市都心部を6つに分割して各エリアから1つサンプリングを行った。また目的地としての回答が顕著に多いそごう・大丸については独立した選択肢として、選択肢のサンプリングを平準化し、8肢選択でモデルを構築した（表-2）。

説明変数は、トリップ出発地から目的地選択肢までの(1)で定義した移動コストと、その場所自体の魅力度を表す吸引力として、ノードが属する町丁目の、平成19年商業統計調査による小売・飲食・その他サービス業の単位面積当たり従業員数(人/ha)を適用した。ポテンシャルモデルで表した移動コストを説明変数とすることで、

表-3 目的地選択モデル推定結果

説明変数	MNL		MXL	
	推定値	t値	推定値	t値
β_1 移動コスト($\times 10^3$)	-1.378	-28.91 *	-1.385	-28.92 *
標準偏差(β_1)			0.022	0.58
β_2 単位面積小売従業員数(千人/ha)	0.053	0.54	0.068	0.70
標準偏差(β_2)			0.052	0.87
β_3 三宮センター街中央通り	-0.365	-3.37 *	-0.357	-3.33 *
標準偏差(β_3)			0.034	0.49
β_4 元町	0.350	3.53 *	0.340	3.44 *
標準偏差(β_4)			0.020	0.29
β_5 旧居留地	0.260	2.68 *	0.236	2.44 *
標準偏差(β_5)			0.074	1.03
β_6 大丸	-1.929	-10.15 *	-2.281	-10.51 *
標準偏差(β_6)			0.040	0.20
β_7 ウォーターフロント	1.150	9.48 *	1.062	8.68 *
標準偏差(β_7)			0.075	0.87
β_8 そごう	0.236	2.04 *	0.220	1.90
標準偏差(β_8)			0.052	0.80
β_9 ハーバーランド	1.316	9.48 *	1.308	9.42 *
標準偏差(β_9)			0.037	0.36
サンプル数	1769		1769	
初期尤度	-3678.53		-3678.53	
最終尤度	-2861.86		-2854.39	
尤度比	0.222		0.224	
修正済尤度比	0.217		0.218	

* : 5%有意

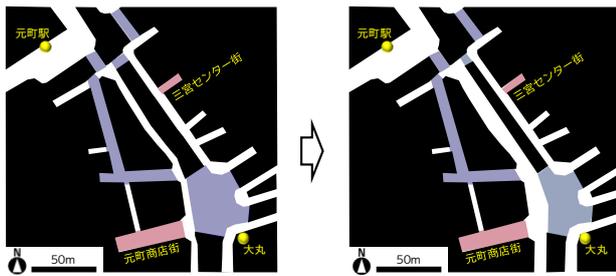
目的地まで移動の不効用が最小となるような経路をとると仮定した時の街路環境を、目的地選択に反映させる。また、モデルは通常多項ロジットモデル（以下MNL）との比較を行った。モデルの推定結果を表-3に示す。

説明変数の符号については妥当な結果が得られている。MXLの推定結果は、MNLに比べて僅かながら尤度比が改善しているが、パラメータの分散に関するt値は全体にやや低く、格段の説明力の向上は見られていない。分散の大きいエリアは、その地域に対する認知や好みの違いの異質性を反映していると考えられるものの、分散のパラメータは有意な値を示していない。ただし、シミュレーションにおいては回遊歩行者の多様な目的地選択を記述する上で、分散パラメータを導入することで、目的地選択における好みのばらつきを表現できることから、一定の効果があると考えられる。

4. 改変シナリオの効果分析

(1) シナリオシミュレーション

構築したシミュレーションをもとに、街路改変の効果



凡例：■ 通行不能域 ■ 商店街 ■ 歩車共有空間

図-6 空間改変シナリオ図

を評価する。対象とする神戸市のJR元町駅周辺は、大丸神戸店が立地し、三宮センター街と元町商店街の結節点であり、大丸前の五差路を中心として賑わいの多い場所である。一方で、元町駅前から南へ続くメリケンロードは、歩道幅員も広いとはいえず、PP調査のアンケート時の回答にも歩行環境が良くないという回答がみられた。こうした街路環境が南側の南京町・旧居留地エリアへの周遊の心理的・物理的妨げとなっている可能性がある。

そこで、本研究では、街路空間の改善として、駅や商店街などを結ぶメリケンロード西側の歩道を拡幅し、五差路を中心として歩行者にとって安全で広い空間を確保することを想定し、シミュレーションを行い、空間改変による回遊行動や移動軌跡の変化を分析する。空間改変シナリオの図を図-6に示している。

シミュレーションでは、第3章(2)で推定したモデルを用いて、また、目的地選択でのパラメータについてはモデル推定値より確率的に割り当てることで再現を試みる。歩行者の発生は、PP調査で得られた非義務目的でのトリップデータの出発地をそのまま使用した。

(2) 移動軌跡の変化

改変区間周辺の2次元空間を設定した範囲の中で、主な20種類のODをサンプリングし、ポテンシャルモデルによりシミュレーションを行った移動軌跡の改変前後での比較を図-6に示す。現況再現では、メリケンロード道路両側の歩道で東側が西側より選ばれやすいが、シナリオでは西側が選ばれるODが増加している。西側では歩道幅員が広がったため移動コストが低減され、選択される可能性が高まっていることが示されている。

(3) 目的地選択の変化

ここでは、街路改変による目的地選択・経路選択の変化について、選択モデルにおけるパラメータの分散を考慮したシミュレーションによって分析する。

まず、出発地を与えた時の全体のトリップ距離を集計した。なお、選択肢はランダムにサンプリングされるため、シミュレーションを10回行った平均値を表-4に示し



図-7 主要20ODの移動軌跡比較

表-4 トリップ距離比較

	実観測結果	現況再現 (シミュレーション)	空間改変シナリオ (シミュレーション)
全体	238.0	241.7	244.6
元町駅出発者	-	287.2	283.6

※数値はトリップの経路距離(m)、実観測結果はルートマッチングで経路を特定

た。また、改変区間近傍でのトリップの変化をみるために、回遊歩行者の出発地点となる元町駅を出発地とした歩行者を1000サンプル発生させ、同様の比較を行った。

トリップ距離を比較すると、PPデータの発生条件での現況再現でのトリップ距離は観測データとほぼ同じであり、再現性を確認できた。トリップ距離は全体では微増であるが、元町駅起点に限定したシミュレーションでは短くなっている。このことは、これまで移動コストを低く設定していた商店街を歩いている歩行者が、改変区間周辺へと立ち寄り地点を移した影響が考えられ、経路途中での仮定したポテンシャルの変化が行動自体の変化を生んでいることを確認できた。

さらに、元町駅起点の歩行者を設定したシミュレーションにおいて、エリアごとの立ち寄り回数の変化を図-8に、またどういった嗜好を持った人がそれらの場所を選択しているかを選択したサンプルのパラメータ値からみたものを図-9に示す。

目的地選択回数の変化をみると、元町駅側からみて改変街路の先に位置する大丸や旧居留地では選択回数が増加しており、移動コスト低減によるアクセス性の向上がこれらのエリアに回遊歩行者を引き出していると考えられる。また、改変前後での各エリア選択者のパラメータ値をみても、大丸や旧居留地ではより移動コストが高い人の滞在が増えていることが見て取れ、歩行の抵抗への感度が大きい人が移動コストの低減で足を伸ばしていることが裏付けられた。

5. おわりに

本研究では、プローブパーソン調査によるデータをも

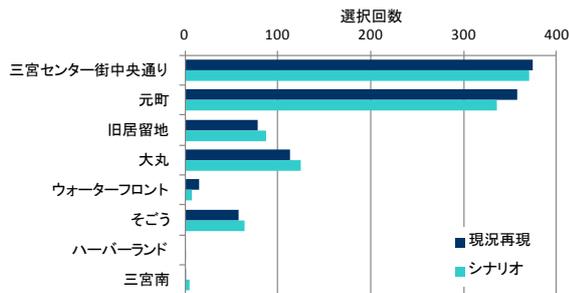


図-8 目的地エリア別選択回数 (元町駅出発者)

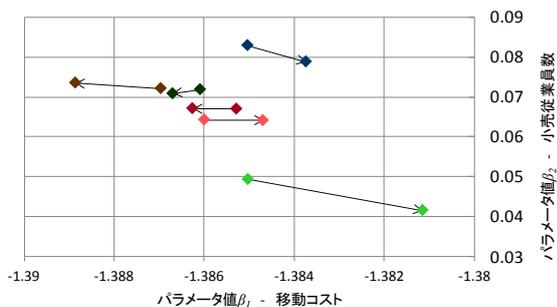


図-9 目的地エリア別の選択者パラメータ平均値変化

とに回遊行動モデルを構築し、街路空間の特性が回遊行動の目的地・経路の選択に影響を与えていることを、ポテンシャルモデルを組み込んだ歩行者シミュレーションモデルを適用することにより、2次元空間でのミクロなスケールから都心部全体のスケールまでの一体的な分析が可能となることを示した。また、移動のコストや場所の吸引力の影響のばらつき分析も行い、変動を明らかにした。

構築したモデルをもとにシミュレーションでは、街路空間の改変シナリオを分析し、行動の変化や移動軌跡を定量的な評価を示した。

回遊行動においては、移動を誘発することや快適な移動空間を計画することを考慮すれば、歩行者空間でどのような要因が影響しているかを分析することが重要である。今後は詳細な影響要因の因果関係や感度を明らかにし、歩行者モデルでのパラメータ値の設定など、定量的に裏付けのある評価が必要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、神戸市の宮川氏、岸氏、復建調査設計株式会社の石飛氏、山根氏、川本氏に多大なる協力を得た。また、本研究を実施するに当たって文部科学省科研費基盤 A「プローブ技術を援用したデータフュージョン理論による総合的交通行動調査の高度化(代表：羽藤英二)」の協力を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 斎藤参郎, 石橋健一: 説明変数を含んだマルコフチェインモデルによる都心再開発に伴う消費者回遊行動の変化予測, 都市計画論文集, No.27, pp.439-444, 1992.
- 2) 桶野俊介, 大貝彰, 五十嵐誠, 菊地晃生: 中心市街地における歩行回遊行動シミュレーションモデルの開発, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.41, pp.761-764, 2003.
- 3) Helbing, D. and Molnar, P. : Social force model for pedestrian dynamics, The American Physical Society, pp.4282-4286, 1995.
- 4) 横山秀史, 目黒公芳, 片山恒雄: 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.225-232, 1995.
- 5) Hoogendoorn, S. P. and Bovy, P. H. L. : Pedestrian Travel Behavior Modeling, Network and Spatial Economics, Vol.5, No.2, pp.193-216, 2005.

(?)

An Analysis of the Effects of Spatial Changes Using a Pedestrian-Behavior Model

Sohta ITOH, Sachiyo FUKUYAMA, Takuma MITANI, and Eiji HATO

When a street improvement program in the city center is planned, it is essential to analyze the effects of the project with quantitative indicators. We compose the pedestrian model based on probe person data. In this model, we estimate pedestrians' heterogeneity for the destination choice and the route choice, using Mixed Multinomial Logit Model. We compute pedestrians' trajectory by using potential model so that the environment of the street is reflected. The results show that the proposed simulation can be used to evaluate the effects of spatial changes by some indicators and the transition of pedestrians' trajectories.