動的離散選択歩行者モデルによる移動と滞在の競合性評価：数値シミュレーション分析

藤原　啓示[1]・大山　雄己[2]・力石　真[3]・藤原　章正[4]

[1]学生会員　広島大学大学院　先進理工系科学研究科（〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1－5－1）
E-mail: fujiwara-keishi@hiroshima-u.ac.jp

[2]正会員　芝浦工業大学准教授　工学部土木工学科（〒135-8548 東京都江東区豊洲 3―7―5）
E-mail: oyama@shibaura-it.ac.jp

[3]正会員　広島大学教授　先進理工系科学研究科（〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1－5－1）
E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp(Corresponding Author)

[4]正会員　広島大学教授　先進理工系科学研究科（〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1－5－1）
E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

駅まち空間などのパブリックスペースでは，歩行者の移動，滞在双方の用途を程よく混合した空間設計が求められる．このような空間設計においては，オブジェクトなどの配置により滞在者にとって快適な空間を創出できる一方，移動者の利便性を低下させるといった移動機能と滞在機能の競合が生じ得る．本研究では，このような移動と滞在の競合が存在する状況における空間設計を支援することを念頭に，移動機能と滞在機能の競合を定量的に評価する手法を提案する．提案手法では，動的離散選択モデルを用いた歩行者モデルを構築し，本モデルから算出するログサム値を歩行者の空間全体の利用の評価指標として利用する．歩行路にオブジェクトを配置した仮想的なパブリックスペースを対象にシミュレーション分析を実施し，オブジェクトの配置が滞在者・移動者双方のログサム値に及ぼす影響を定量的に確認した．

Key Words: *stay, move, pedestrian, dynamic discrete choice model*

1. はじめに

パブリックスペースの設計においては，歩行者の移動の利便性や安全性（移動機能）を高めるだけでなく，利用の多様性や居心地の良さ（滞在機能）を高める空間づくりが求められる [1]．この双方の機能を両立させた空間設計が理想ではあるものの，公共空間が限られた土地利用や高密度都市においては，双方の需要を同時に満たさせない二律背反性の問題が生じる可能性がある．例えば，渋谷駅構内に設置されている岡本太郎の壁画や名古屋駅構内に設置されている「金時計」といったオブジェクトは，人々が滞在する（人々が待ち合わせをする，絵を見る，写真をとるなど）空間を生み，オブジェクトの周囲にまとまった数の人々が留まる魅力空間を形成する．一方で，図 1，2 のように，魅力空間に留まる滞在者が一定の密度を超えると移動者の利便性を低下させる可能性がある．移動者と滞在者の双方が快適に機能を満たすことのできる空間にするようオブジェクトの配置パターンを考える必要があるが，そのためには，移動者と滞在者両方の視点から，その空間がどのように利用されるか（利用者ニーズ）を正しく把握しなければならない．移動者と滞在者は相互に作用しながら行動し，行動結果の集合として空間利用の解が決まるため，移動と滞在の競合性の評価は容易ではない．

以上のような移動者と滞在者の競合性を考慮した空間評価手法の開発には，滞在者と移動者の双方を含む歩行者の軌跡を高解像度に観測する必要がある．近年，Yolo といった機械学習を用いた画像解析技術の発達や，GPS や Wi-Fi などによる位置情報の取得が可能になり，移動者と滞在者の双方の行動を常時観測できるようになってきている．本研究では，それらの歩行者データが利用できるという前提に立ち，パブリックスペースの移動と滞在の競合性を定量的に評価する枠組みを構築する．具体的には，動的離散選択モデル [2]を改良した歩行者モデルを構築し，提案モデルから算出されるログサム値を評価指標として利用する．さらに，移動者と滞在者の競合を考慮するために，(1) 移動者内相互作用，(2) 滞在者内相互作用，(3) 移動者-滞在者間相互作用の項を効用関数に導入する．つまり，本手法では移動と滞在の競合性を考慮したログサム値を用いて，歩行者の空間全体の利用を評価する．実証分析として図 1 と図 2 を模倣した移動と滞在が可能なパブリックスペースを想定した数値シミュレーション分析を行い，オブジェクトの配置の違いによるログサム値の変化について考察する．

本研究の主な学術的貢献は以下の通りである：(1) 移動行動と滞在行動を同一の動的離散選択モデルの枠組

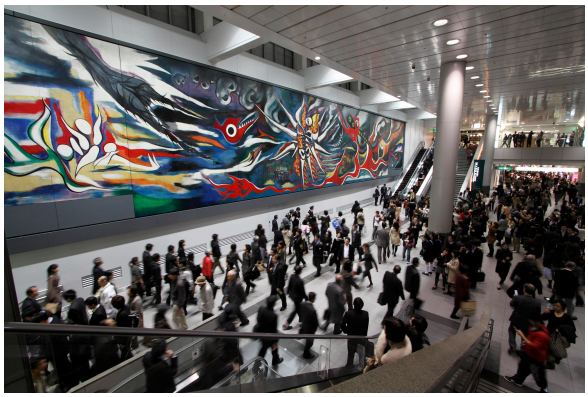


図１：渋谷駅の岡本太郎の壁画付近の歩行者の行動（出典：https://taro-okamoto.or.jp/asunoshinwa/）



図２：名古屋駅の「金時計」付近の歩行者の行動（出典：https://www.nagoyastation.com/nagoya-station-map-finding-your-way/）

みで記述する点，(2) 動的離散選択モデルの構造を維持しつつ，連続空間上において発生する移動者同士／滞在者同士／移動者-滞在者間の相互作用を記述する方法を提案する点，(3) 提案モデルから算出されるログサム値をパブリックスペースの評価指標として用いることを提案，移動者と滞在者の競合を定量的に評価する点である．

本論文は以下の通り構成される．第 2 章では，文献レビューを行い，第 3 章では方法論について述べる．第 4 章で数値シミュレーション分析を行い，第 5 章で結論と今後の展望を整理する．

2. 文献レビュー

歩行者の行動レベルは，Hoogendoorn, et. al. (2004)[3]では Strategic level，Tactical level，Operational level の 3 つに分類される．本研究のモデルは，連続空間上における歩行者同士の相互作用を扱うモデルを開発するため，Operational level のモデルに該当する．これまで，セル単位で個人の行動を記述する Cellular Automata (CA)[4]や運動方程式を用いて歩行者間の反発力と吸引力をモデル化する Helbing and Molnár(1995)[5]や Kwak, et. al. (2013)[6]の Social force model など数多くが Operational level のモデルとして構築されてきているが以下のような未解決課題が残されている．

表 1 は従来から開発されてきた歩行者モデルを，(1) 滞在者と移動者の双方を考慮したモデルかどうか，(2) 経路選択レベルにおける効用最大化理論と整合したモデルかどうか（ログサム値を用いた評価が可能かどうか），(3)他の歩行者との相互作用を考慮したモデルかどうか，の 3 つの観点から従来の歩行者行動モデルを分類した表である．Fosgerau, et. al. (2013)[7]は，physical ネットワーク上のドライバーの経路選択行動を記述する Recursive logit (RL) model を提案した．このモデルは歩行者の行動も容易にモデル化でき，さらに経路選択レベルで効用最大化理論と整合しているため，ログサム値を算出し，その値をドライバーのアクセシビリティなどの評価に適用できる．一方，この RL モデルは，滞在を誘発する正の瞬間効用（緑地面積など）を扱えないため，本質的に滞在行動を記述することが難しい [8]．大山・羽藤(2016)[9]は，RL モデルを physical ネットワークから時間構造化ネットワークに拡張した Prism-constrained RL モデル（Prism-RL）を提案した．このモデルは，単一ネットワークにおいて移動者と滞在者の両方の行動を記述できる．しかし，このモデルは離散化した歩行空間上の行動を記述するため，連続空間における移動者と滞在者の物理的な相互作用を表現できない．一方で，連続空間上の他の歩行者との相互作用を記述できる歩行者モデルは多く提案されている．例えば，離散選択モデルの枠組みで各時刻における速度と角度の選択行動をモデル化した Robin, et. al. (2009) [10]や Asano, et. al. (2009) [11]の離散選択歩行者モデルや，Social force model[5]などがある．しかしながら，以上の連続空間上のモデルは歩行者の逐次的な行動を記述するが，経路選択レベルにおける効用最大化理論との整合性がとれず，ログサム値を用いた評価ができない．これに対し Hoogendoorn, et. al(2004)[3]は，効用最大化理論と整合的な枠組みの中で移動者間の連続空間上の相互作用を記述する歩行者モデルを提案している．しかしながら，このモデルでは滞在行動を記述できない．

本研究では，大山・羽藤(2016)[9]のモデルを拡張し，連続空間における移動者内／滞在者内／移動者-滞在者間相互作用をモデルに導入することを試みる．具体的には，まず，RL モデルや Prism-RL モデルにおいて仮定される決定論的な状態遷移ではなく，確率論的な状態遷移へと改良する．この確率論的な状態遷移の仮定により，連続的な物理空間における歩行者同士の相互作用（衝突回避行動など）のモデル化を可能にする．

まとめると，本研究では，確率的な状態遷移を記述する動的離散選択モデルの枠組みを構築し，パブリックスペースにおける移動者と滞在者の競合性を記述し，移

表 1：3 つの観点に対応する歩行者モデル

	滞在者と移動者の双方の考慮	経路選択レベルにおける効用最大化理論との整合性	他の歩行者との相互作用の考慮
Fosgerau, et. al. (2013)	-	○	-
大山・羽藤 (2016)	○	○	-
Robin, et. al. (2009) / Asano, et.al (2009)	-	-	○
Helbing and Molnár (1995)	-	-	○
Kwak, et. al. (2013)	-	-	○
Hoogendoorn, et. al. (2004)	-	○	○
本モデル	○	○	○

動者と滞在者が混在するパブリックスペースを評価するためにログサム値を用いるフレームワークを提案する．

3. モデル

本研究では移動行動と滞在行動の両方をとる可能性がある歩行者を対象とする．

多くの既存の歩行者モデルは，(1)連続時間・連続空間（Helbing and Molnár, 1995[5]など），(2)離散時間・離散空間（大山・羽藤, 2016[9]など），(3)離散時間・連続空間（Robin, et. al., 2009[10]など）のいずれかの行動を対象としてきた．上述したように，歩行者間の相互作用を適切に扱うには，歩行者の行動を連続空間で記述する必要がため，本研究では，離散時間・連続空間を扱う(3)のモデリングアプローチを適用する．以下に本研究で扱うモデリングアプローチの概要を説明する．

まず，大山・羽藤(2016)のモデルで用いられている決定論的な状態遷移を確率論的な状態遷移へ変更し，離散的な場所（リンクやノードなど）選択を連続空間上の選択に拡張させる．これにより，各時点における各歩行者の位置を正確に特定でき，例えば，空間上の歩行者同士の衝突可能性を記述できるようになる．提案モデルの枠組みにおける歩行者の行動が，時間構造化ネットワーク（離散時間・離散空間）における歩行者の行動とどのように乖離しているかを図 3 に示す．従来の時間構造化ネットワークでは，歩行者は離散点（濃い緑色の点＝選択された場所，オレンジ色の点＝選択集合の候補地）を選択するが，本手法では，歩行者は薄い緑色とオレンジ色の斜線部分の連続的な空間内から点を選択すると仮定する．

次に，連続空間上の価値関数（後に詳細に記述する）の計算は容易ではないため，従来の時間構造化ネットワークの価値関数を用いて価値関数の計算を近似する．

(1) 動的離散選択歩行者モデルの定式化

離散時間−連続空間上の歩行者行動を記述するために，$j \in J$を意思決定段階(離散時間)，s_jを意思決定段階jにおける状態空間とし，以下のように定義する．

$$s_j = l \in L \tag{1}$$

ここで，lは連続空間上のs_jの場所であり，Lは対象エリアである．個人nの経路σは，離散化された意思決定段階時点0~Jまでの状態系列$[s_0, \dots, s_j, \dots s_J]$として定義される．$\sigma$と$J$は個人間で異なるが，個人を表す添字$n$は簡便化のため省略する．また，初期状態$s_0$と吸収状態$s_J$は，パブリックスペースの流入地点と流出地点である．個人nが状態s_jにおいて選択する行動をaとし，以下のように定義する．

$$a \in A(s_j) \tag{2}$$

$A(s_j)$は状態s_jにおける選択肢集合である．本モデルでは，Robin, et. al. (2009)を参考に，歩行者が離散化された薄い緑色の斜線部分（図 3）を選択し，次の状態s_{j+1}は斜線エリア内（状態s_jにより決まる）から確率的に決まると仮定する．具体的には，状態s_jで行動aを選択した際に状態s_{j+1}に遷移する確率$q_j(s_{j+1}|s_j, a)$は，斜線エリア内に一様分布すると仮定する．確率的に状態遷移を扱うことで，歩行者の正確な位置を記述でき，例えば，物理空間上の他の歩行者との衝突可能性を算出できる．

状態s_jにいる個人nは，瞬時効用$u_j(a|s_j)$と吸収状態s_J(目的地)までの価値関数$EV_{j+1}(s_j, a)$の期待値の和を最大にする行動aを選択すると仮定する．また，$V_j(s_j)$は期待価値関数(期待最大効用)であり，以下の Bellman 方程式で定式化できる．

$$V_j(s_j) = \max_{a \in A(s_j)} \left(v_j(a|s_j) + EV_j(s_j, a) + \mu\varepsilon_j(a) \right) \tag{3}$$

$\varepsilon_j(a)$は標準ガンベル分布に従う誤差項であり，μはスケールパラメータである．$EV_j(s_j,a)$は以下となる．

$$EV_j(s_j,a) = \int_{\check{s}} \left(q_j(\check{s}|s_j,a)\bar{V}_{j+1}(\check{s})\right) dq_j(\check{s}|s_j,a) \quad (4)$$

ここで，$\bar{V}_j(s_j)$は期待最大効用である．$\varepsilon_j(a)$はガンベル分布に従うことから，$\bar{V}_j(s_j)$は以下のログサム値で定義される．

$$\bar{V}_j(s_j) = \log\left(\sum_{a\in A(s_j)} e^{\frac{1}{\mu}\left(v_j(a|s_j)+EV_j(s_j,a)\right)}\right) \quad (5)$$

そして，状態s_jで行動aを選択する確率は以下のMultinominal Logit (MNL)モデルで定式化される．

$$P_j(a|s_j) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}\left(v_j(a|s_j)+EV_j(s_j,a)\right)}}{\sum_{a\in A(s_j)} e^{\frac{1}{\mu}\left(v_j(a|s_j)+EV_j(s_j,a)\right)}} \quad (6)$$

式(5)は，移動と滞在内／間の相互作用を考慮したログサム値であるため，移動者と滞在者の競合を定量的に評価するために直接適用できる．

(2) 相互作用の取り入れ方

本モデルの瞬時効用を以下のように定義する．

$$v_j(a|s_j) = \begin{cases} \boldsymbol{\beta}^{mo}\boldsymbol{x}_j^{mo}(a|s_j) + \boldsymbol{\gamma}^{mo}\boldsymbol{w}_j^{mo}(a|s_j) \\ if\ a = move\ action \\ \boldsymbol{\beta}^{st}\boldsymbol{x}_j^{st}(a|s_j) + \boldsymbol{\gamma}^{st}\boldsymbol{w}_j^{st}(a|s_j) \\ if\ a = stay\ action \end{cases} \quad (7)$$

添字mo, stは，それぞれ移動と滞在を表す．状態s_jで行動aを選択する際に，滞在行動をとる場合は，滞在効用$\boldsymbol{\beta}^{st}\boldsymbol{x}_j^{st}(a|s_j) + \boldsymbol{\gamma}^{st}\boldsymbol{w}_j^{st}(a|s_j)$，移動行動をとる場合は移動効用$\boldsymbol{\beta}^{mo}\boldsymbol{x}_j^{mo}(a|s_j) + \boldsymbol{\gamma}^{mo}\boldsymbol{w}_j^{mo}(a|s_j)$を得る．$\boldsymbol{\beta}^{st}, \boldsymbol{\gamma}^{st}, \boldsymbol{\beta}^{mo}, \boldsymbol{w}^{mo}$は，未知パラメータベクトルであり，$\boldsymbol{x}_j^{mo}(a|s_j), \boldsymbol{x}_j^{st}(a|s_j)$は外生変数ベクトル，$\boldsymbol{w}_j^{mo}(a|s_j), \boldsymbol{w}_j^{st}(a|s_j)$は内生変数ベクトルであり，具体的には，内生変数として移動者同士の衝突回避に関する変数，滞在者の集合へ近寄る変数，移動者が滞在者の集合を避ける変数などがある．

本モデルでは，オブジェクトの配置による行動への影響として，(1) オブジェクトに近づくまたは避けるといった直接的な影響，(2) 周囲の歩行者の行動変化による間接的な影響の 2 つを考慮する．前者は外生変数，後者は内生変数としてモデルに導入される．間接的な影響は，歩行者内／間の相互作用（例えば，移動者はオブジェクト周辺の滞在者を避けるように挙動する／滞在者は，既存の滞在者の周辺に滞在するように挙動される）により記述される．

4. 数値シミュレーション

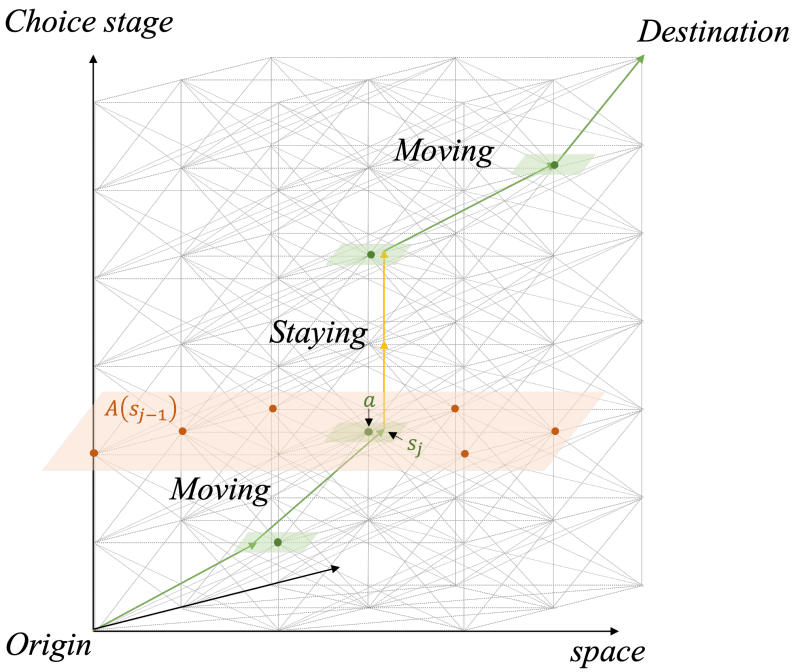


図 3：提案モデルが対象とする歩行者の行動

オブジェクトの異なる配置により，歩行者のログサム値がどのように変化するかを分析するために本シミュレーションを実施した．本シミュレーションにおけるオブジェクトとは，滞在者のまとまりを形成するものとする．本シミュレーションで図 4 に示すような 2 つの状況：(1)オブジェクトを中央に配置する場合，(2)オブジェクトを上下に配置する場合を設定した．灰色の長方形は，オブジェクトを表し，緑点は歩行者を表す．

(1) シミュレーション条件

シミュレーション条件は以下とする．

- 街路空間の大きさは，10m × 20mとする．
- 歩行者は両側から街路空間に流入・流出する．歩行者は途中で止まることができる．
- 歩行者の出発時間と人数は以下とする．
  0秒から 74秒，各秒，4 人ずつ出発
- 意思決定段階は 1 秒間隔とする．
- 事前の滞在者は，オブジェクト周り 3m以内に一様分布に従い，20 人配置される．
- 意思決定段階の間隔は 1.0 秒とする．
- 目的地までの意思決定段階数は 30 とする．

(2) 効用関数

瞬時効用は以下の式で記述される．また，各モデルのパラメータと説明変数の定義と値は，表 2 に示す．

$$v_j(a|s_j) = \begin{cases} \gamma^{ca} w^{ca}(a|s_j) + \gamma^{st} w^{st}(a|s_j) + \beta^{ob} x^{ob}(a|s_j) \\ \quad + \beta^{tt} x^{tt}(a|s_j) + \beta^{tts} x^{tts}(a|s_j) \\ \qquad\qquad a = move\ action \\ \gamma^{stp} w^{stp}(a|s_j) + \beta^{att} x^{att}(a|s_j) + \beta^{pts} x^{pts}(a|s_j) \\ \qquad\qquad a = stay\ action \end{cases} \quad (8)$$

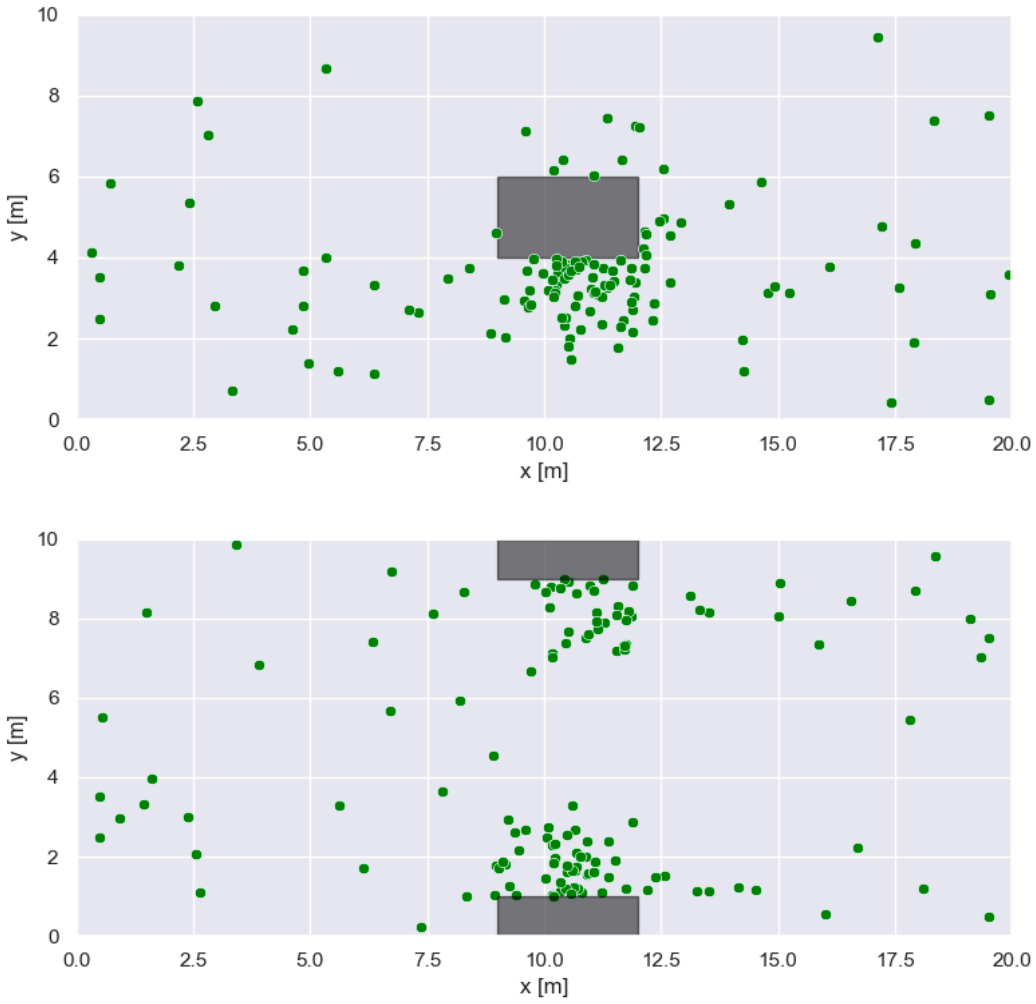


図 4：シミュレーション上のオブジェクトの配置
（上側：オブジェクトを中央に配置した場合，下側：オブジェクトを上下に配置した場合）

表 2：シミュレーションで用いたパラメータと説明変数

	パラメータ	説明変数
移動者との衝突回避	$\gamma^{ca}=-0.1$	$w^{ca}(a_n\|s_{n,j})$:$\min_{-n_m} D(\dot{a}_n,\dot{a}_{-n_m};-n_m\in H_a)$ $\dot{a}$：リンクaの終点の位置 D：距離関数 $-n_m$：意思決定者以外の移動者 H_a：前方半径3m以内の逆方向に進む移動者の集合
滞在場所の回避	$\gamma^{stt}=-0.1$	$w^{st}(a_n\|s_{n,j})$:$\|H'_a\|$ H'_a：2m以内の滞在者の集合
オブジェクトの回避	$\beta^{ob}=-0.1$	$x^{ob}(a_n\|s_{n,j})$:$1/\min_k D(\dot{a}_n,O_k;k\in K)$ O_k：オブジェクトkの位置 K：オブジェクトの集合
移動時間	$\beta^{tt}=-0.1$	$x^{tt}(a_n\|s_{n,j})$:$D(s_{n,j},\dot{a}_n),a_n\in A(s_{n,j})$
遷移コスト（滞在から移動）	$\beta^{tts}=-0.1$	$x^{tts}(a_n\|s_{n,j})$:滞在から移動であれば1，そうでなければ0
滞在場所への近寄り	$\gamma^{stp}=1.0$	$w^{stp}(a_n\|s_{n,j})$:$\log(\|H'_a\|+1)$
オブジェクトへの近寄り	$\beta^{att}=1.0$	$x^{att}(a_n\|s_{n,j})$:$1/\min_k D(\dot{a}_n,O_k;k\in K)$
遷移コスト（移動から滞在）	$\beta^{pts}=-0.1$	$x^{pts}(a_n\|s_{n,j})$:移動から滞在であれば1，そうでなければ0

移動者と滞在者の相互作用を考慮するため，内生変数に移動者との回避，滞在場所の回避・近寄りに関する変数を導入した．また，外生変数として，オブジェクトの回避・近寄り，移動時間，遷移コストに関する変数を導入した．

(3) シミュレーション手順

歩行者の行動は以下の手順でシミュレーションする．

STEP1. 事前滞在者の分布と説明変数の初期状態を設定する．

STEP2. 意思決定段階jで全ての内生変数を計算する．

STEP3. 説明変数を用いて瞬時効用$v_j(a|s_j)$と期待最大効用$V_j(a)$を計算する．

STEP4. 各選択肢の選択確率を計算する．選択肢集合の中から，求めた選択確率に従いランダムに行動aを選択する．そして，一様分布に従い，行動aの部分空間の中の次の状態s_{j+1}に遷移し，歩行者の位置を更新する．

STEP5. もし，歩行者が目的地に到着したら，上記の手順を終了する．そうでなければ，$j=j+1$とし，STEP2 に戻る．

(4) シミュレーション結果

本シミュレーションは，歩行者の確率的な行動／複数均衡の影響を確認するため，オブジェクトを上下と中央に配置して 5 回行った．ログサム値は，各時刻の各方向の 10 個の出発点のログサム値の期待値とする．5 回分のログサム値の変動を図 5,6 に示す．なお，初期の 20 ステップと 74 ステップ以降の意思決定段階は，十分な量の歩行者が空間に放たれていない状態であることから，図から削除している．

シミュレーション結果より，混雑が激しい時間帯は，どちらの場合もログサム値がある値付近で安定した．つまり，空間はある一定の混雑度に達し，それに応じてログサム値が安定したと考えられる．さらに，オブジェクトを上下に配置した場合，歩行者のログサム値が高くなった．また，中央に配置するよりも上下に配置した方がログサム値が安定（分散が低下する）ことが確認された．考えられる理由として，(1) 上下に配置されているケースの方が歩行者の経路が明確であり，歩行空間と滞在空間の空間的な分離が自然形成されやすいこと，(2) 中央に配置されているケースの場合，滞在者の集団が別の均衡状態に頻繁に移動する可能性があること（例えば，オブジェクトの上側に集まっていた滞在者が，徐々に左右／下側に移動するなど）が考えられるが，詳細な考察については，今後の課題である．ただし，以上の分析から，オブジェクトの配置がログサム値に影響を及ぼす点は明らかと思われ，移動者と滞在者双方への影響を考慮した上でオブジェクトを配置することの重要性は示唆された

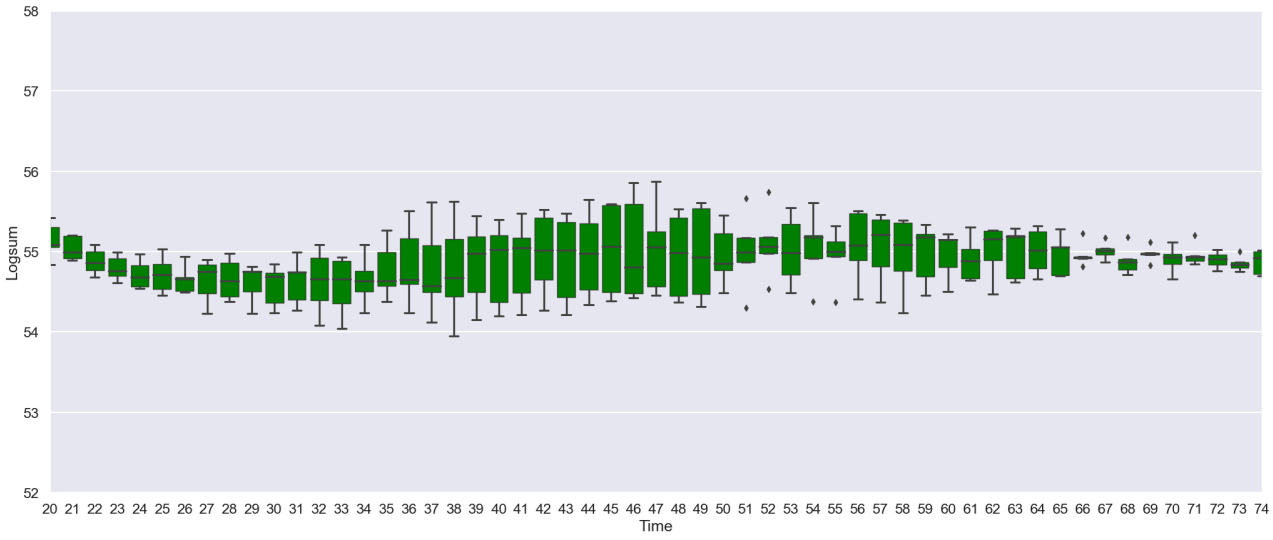


図 5：オブジェクトを中央に配置した場合のログサム値の変動

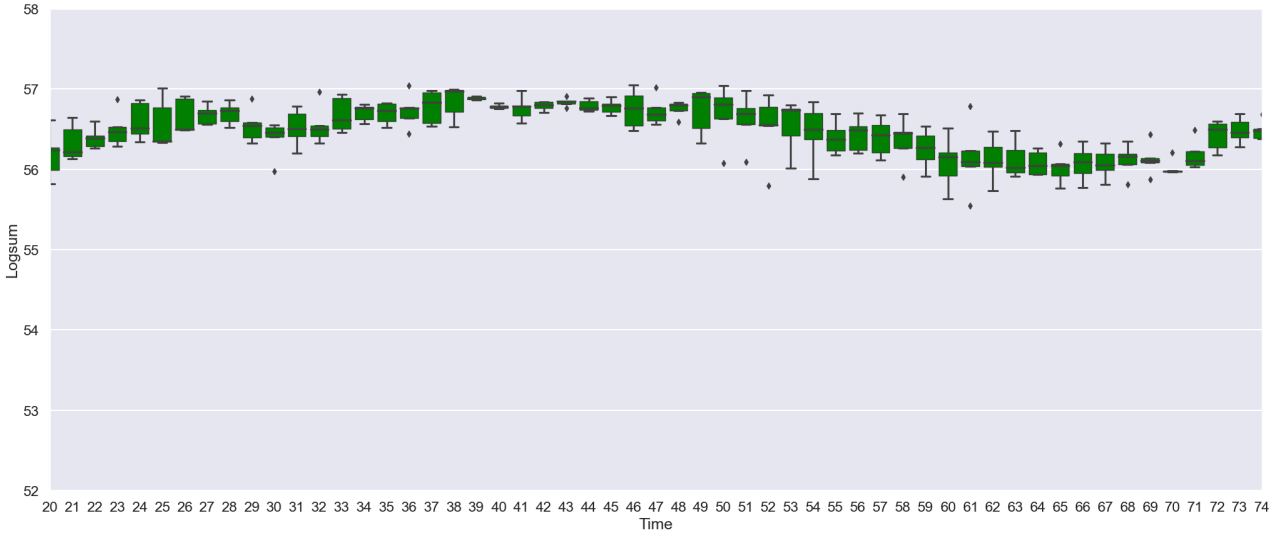


図 6：オブジェクトを上下に配置した場合のログサム値の変動

といえる．

本シミュレーション結果より，中央に配置した場合よりも上下に配置した場合の方がログサム値が高いため，上下に配置した場合の方が良いといえる．しかしながら，結果はパラメータなどの初期条件などに依存するため，今後，追加の検討を行う必要がある．

5　まとめ

本研究では，移動者と滞在者の競合を定量的に評価するための枠組みを構築した．具体的には，歩行者の移動と滞在を動的離散選択モデルを用いて記述する動的離散選択歩行者モデルし，提案モデルから算出されるログサム値を用いて評価する方法を提案した．本研究の学術的な貢献は以下の 3 つである：(1)移動と滞在を同一の動的離散選択モデルの枠組みで記述した点，(2) 動的離散選択モデルの枠組みを維持しながら，連続空間上の移動者内／滞在者内／移動者-滞在者間の相互作用を記述する方法を提案した点，(3) 提案モデルから算出されたログサム値を，パブリックスペースを評価する指標として用いることを提案した点．さらに，数値シミュレーションを行い，オブジェクトの配置の違いによるログサム値の変化を分析した．本数値シミュレーションの結果，オブジェクトの配置がログサム値に影響を及ぼすことが示された．

今後の展望は以下の通りである．第一に，特に内生変数について，説明変数の設定を変えた場合のシミュレーション分析を行う．第二に，シミュレーションのパラメータ変化に対するログサム値の感度を分析する．第三に，また，滞在者の集団が均衡間で移動する可能性について，

移動軌跡とログサム値の軌跡を用いて分析する．第四に，パブリックスペースをより大きなネットワークの一部として見た場合に，移動者は滞在者が多く存在する経路を選択しない可能性があり，ネットワークレベルでは移動者と滞在者の間にも相補関係が発生する可能性がある．提案モデルをネットワークレベルの経路選択モデルと組み合わせることで，このような相補関係に関するシミュレーション分析を行う．

参考文献

1) Jones, P., and Boujenko, N. (2009). “Link” and “Place”: A new approach to street planning and design. *Road and Transport Research*, Vol. 18, No.4, pp.38-48
2) Rust, J. (1987). Optimal Replacement of GMC Bus Engines: An Empirical Model of Harold Zurcher. Econometrica: journal of the Econometric Society, 55, 999–1033.
3) Hoogendoorn SP, Bovy PHL. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.38, No.2, pp.169-190.
4) Blue V. J., Adler J. L. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological,* 35(3), 293-312.
5) Helbing, D., Molnár, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics,* 51(5): 4282-4286.
6) Kwak J, Jo. H-H., Luttinen T., Kosonen I. (2013). Collective dynamics of pedestrians interacting with attractions. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 88, 062810-1-6.
7) Fosgerau, M., E. Frejinger, and A. Karlstrom. (2013). A Link Based Network Route Choice Model with Unrestricted Choice Set. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.56, pp.70-80.
8) Oyama, Y. (2023) Capturing positive network attributes during the estimation of recursive logit models: A prism-based approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 147, 104014.
9) 大山，羽藤．(2016)．時空間制約と経路相関を考慮した歩行者の活動経路配分問題，*都市計画論文集*, 51(3), 680-687.
10) Robin, T., Antonini, G., Bierlaire, M., Cruz, J. (2009). Specification, Estimation and Validation of a Pedestrian Walking Behavior Model. *Transportation Research Part B: Methodological,* 43(1), 36-56.
11) Asano, M., Iryo, T., Kuwahara, M. (2009). A Pedestrian Model Considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation. *Transportation and Traffic Flow Theory, Springer,* 559-581.

(Received ????, ????)
(Accepted ????, ???)