

Household Residential Location Choice Equilibrium Model Based on Reference-Dependent Theory

参照依存理論に基づく居住地選択均衡モデル

Tongfei Li, Ph.D.¹; Huijun Sun²; Jianjun Wu³; and Der-Horng Lee⁴ Journal of Urban Planning and Development Volume 146, Issue 1

交通・都市・国土学研究室

M1 加藤小百合

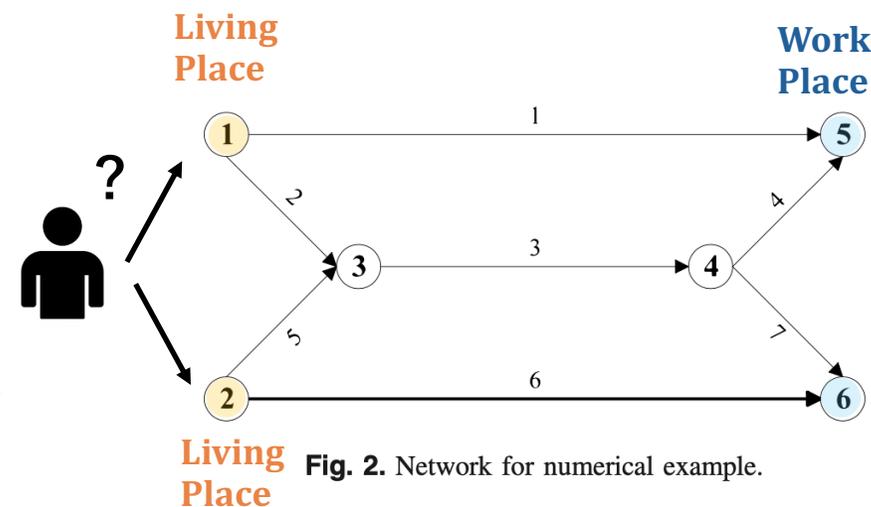
Introduction

本研究の意義

- 急速な都市化により，都市に新たな住民の流入
→ **新住民の居住地選択行動のモデル化は重要**
- 居住地選択は交通需要に直接的影響がある
→ **交通計画，都市計画，交通需要管理の実務において重要**

本研究の3つの特徴

- 新住民は居住地選択の際に現住民を参考にするはず
→ **参照依存理論と離散選択モデルを組み合わせた新しい世帯居住地選択平衡モデルを開発**
- 新住民の居住地選択と **都市交通状況との相互作用** を研究
- 大規模な数値実験を行い，“高速料金”や“現在の居住状況”による均衡時の住居分布の変化を分析**

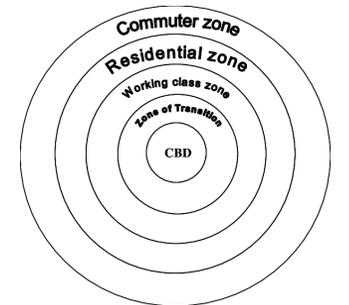


1.2 Literature Review

Literature Review

1. **空間相互作用モデル**：Lowty（1964）の交通と土地利用の相互作用を考慮した最初の都市モデル。集計レベルでシンプルだが詳細なモデリングには適さない
2. **ビッドレント理論**：Alonso（1964）がビッドレント理論を最初に提案。入札者は有利な場所を見つけようとし、地主は最高入札者に賃貸。経済の視点から居住地選択行動を分析するためのマイクロツール
3. **世帯均衡理論**：都市は中心的な雇用を持つものとしてモデル化。古典的な単中心都市モデルなど。
4. **計画配分モデル**（Yim et al. 2011）：Yimは、土地利用計画と交通計画が限られた予算の下で同時に行われるという仮定に基づいて、統合最適化問題を確立
5. **ランダム効用理論（RUT）**：人々が効用を最大化するものとしてロジットモデルによるモデル化

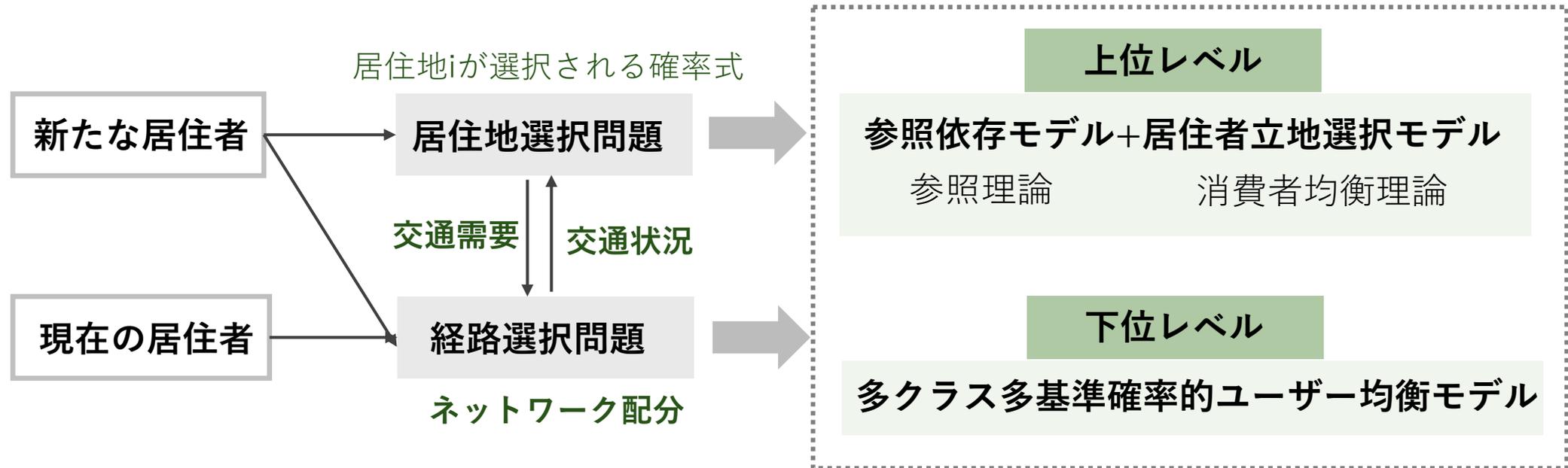
→居住選択行動のモデル化と交通と土地利用の相互作用の理論、モデルは多数あるが、世帯ごとの異質性とネットワークの不確実性の両方を扱った論文はない



2. Model Framework

Model Framework

■ モデルフレームワーク



■ 仮定

- 1世帯当たり1人の働き手が存在
- **所得により2クラス分類**（高所得，低所得）
- 新住民は異なる所得階層に属し，働く場所は外生的に与えられる

3. Formulation

Formulation(Upper level)

- 世帯の効用関数

$$U^{ijr} = \theta_1 \log g^{ijr} + \theta_2 \log \phi^{ijr} \quad \theta_1, \theta_2 > 0$$

住居以外コスト 住居コスト

i : 居住場所, j : 仕事場所, r : 所得階級
 θ_1, θ_2 : 正の定数 $\theta_1 + \theta_2 = 1(1^*)$

(1*) θ_1, θ_2 : 住宅, 住宅以外のコスト比率
 国, 地域により住宅, 住宅以外のコスト比率は異なる

- 世帯の財産制約

$$\phi^{ijr} = I^r + L^r - g(U^{ijr}) - \mu^{ijr}$$

収入 余暇時間 移動コスト

- 経済的価値 ; 時間とお金
- 余暇時間 → (収入を産む潜在的可能性) 価値換算

均衡*

同所得者は居住地, 仕事場所によらず同じ効用

- 世帯の住宅以外コスト

$$g^*(U^{ijr}) = (\phi^{ijr})^{-\frac{\theta_2}{\theta_1}} \cdot \exp\left(\frac{U^{ijr*}}{\theta_1}\right) \quad (U^{ijr*} = U^{r*})$$

- 世帯の住宅コスト

$$\phi^{ijr*} = I^r + L^{ijr} - g(U^{ijr*}) - \mu^{ijr}$$

新住民が来る時, 元の住民は既に均衡に達している
 → 現住民の住宅コストを参照し, 比較 (参照理論)

- 現住民の世帯の平均住宅コスト

$$\phi_0^{ir*} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j \in J} \phi_0^{ijr*} \quad M: \text{仕事場所の数}$$

↑ 現住民の意味

Formulation(Upper level)

- gain-loss効用関数 v^{ijr} の定義

$$v^{ijr} = \psi([\phi_0^{ir*} - \phi^{ijr*}]^+) + \psi([\phi_0^{ir*} - \phi^{ijr*}]^-)$$

$$([x]^+ \equiv \max(x, 0), [x]^- \equiv \min(x, 0))$$

$$\psi(x) = \begin{cases} x^{\sigma_1} & x \geq 0 \\ -\lambda(-x)^{\sigma_2} & x < 0 \end{cases} \quad \sigma_1 = \sigma_2 = 0.88 \text{ and } \lambda = 2.25$$

3つの重要な原理

1. 個人は参照損失なのか, 利得なのか区別する
2. 利益より損失の方を気にする (重みづけ) (λ)
3. 差が開くほど, 損失/利得に対する感度は下がる (σ_1, σ_2)

- 新住民の居住地選択のルール

- 最大の世帯効用を追求. 均衡時は皆同じ効用(仕事場所好み無)
- 最大のgain-loss効用関数の追求

最大の移動コストを負担する各所得階層の住民は、
均衡状態での非住宅支出=所得と設定

- 居住地*i*の選択確率

$$\Pr^{i|jr} = \Pr(v^{ijr} \geq v^{i'jr}, \forall i' \in I \cap i' \neq i)$$

$$= \frac{\exp(\xi \cdot v^{ijr})}{\sum_{r' \in R} \exp(\xi \cdot v^{i'jr'})} \quad \forall i \in I$$

ξ : 認識誤差を表すパラメータ

居住地*i*に対する効用の指数関数

全ての居住地候補*i'*に対する効用の指数関数の合計

- 移動需要

新住民の移動需要 \bar{q}^{ijr} = \bar{D}^{jr} (確率) \cdot $\Pr^{i|jr}$ (新住民の総数)

$$q^{ijr} = \bar{q}^{ijr} + q_0^{ijr}$$

全体 新住民 現住民

→交通需要が求められた

Formulation(below level)

■ 経路の移動コストを定式化

- リンクaにかかる時間

$$t_a = t_a^0 \cdot \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a}\right)^\gamma\right)$$

x_a :与えられたリンクフロー

- 金額換算された経路pの移動コスト

$$c_p^{ijr} = \sum_{a \in A} \delta_{a,p}^{ij} (\eta^r \cdot t_a + \chi^r \rho_a)$$

時間コスト 金銭コスト

$\delta_{a,p}^{ij}$: 0 or 1 (パスpがリンクaを含めば1)

η^r : 時間価値パラメータ

χ^r : 金銭価値パラメータ

ρ_a : 移動コスト (燃料代など)

全てのエージェントは最小の移動コストの経路を選択する

多項ロジットモデルなのでIIA特性(選択肢が独立であることを要求するが, 独立ではない

→SUEモデルmultinomial logit-based stochastic user equilibriumを使用 (簡易化)

- 経路pが選択される確率

$$\Pr_p^{ijr} = \frac{\exp(-\beta^r \cdot c_p^{ijr})}{\sum_{p' \in P^{ij}} \exp(-\beta^r \cdot c_{p'}^{ijr})}$$

移動コストが低いものほど
選ばれやすい

β^r : 認識の個人差を表すパラメータ

→異なる収入クラスの移動コストに対する反応を表す

経路pの移動コストの指数関数

i からj までのすべての可能な経路の選択確率の総和

- 一般化された移動コスト

$$\mu^{ijr} = -\frac{1}{\beta^r} \ln \left(\sum_{p \in P^{ij}} \exp(-\beta^r \cdot c_p^{ijr}) \right)$$

Formulation(below level)

- 実行可能な交通流の集合

$$\Omega = \left\{ f_p^{ijr} \mid \sum_{p \in P^{ij}} f_p^{ijr} = \underbrace{q^{rsk}}_{\text{移動需要}}, f_p^{ijr} \geq 0 \forall i \in I, j \in J, r \in R, p \in P^{ij} \right\}$$

経路pの交通流

経路pの実行可能な全ての交通流から均衡解を見つける“変分不等式問題(VI問題)”として定式化可能

- 変分不等式(VI問題)の形式で交通流の均衡を定義

$$\sum_i \sum_j \sum_r \sum_p \left(c_p^{ijr}(f_p^{ijr*}) + \frac{1}{\beta^k} \ln f_p^{ijr*} \right) (f_p^{ijr} - f_p^{ijr*}) \geq 0$$

$$x_a = \sum_{r \in R} x_a^r \quad \leftarrow \text{リンクaの交通量}$$

$$x_a^r = \sum_i \sum_j \sum_n f_p^{ijr} \delta_{a,p}^{ij}$$

$$c_p^{ijr} = \sum_{a \in A} \delta_{a,p}^{ij} (\eta^r \cdot t_a + \chi^r \rho_a) \quad \leftarrow \text{居住地iと仕事場所jまでの移動コスト}$$

VI問題は少なくとも1つの均衡解を持つ

SUEモデルとVI問題は等価で、一意の均衡解が存在 (証明略)

Solution Algorithm

居住地選択問題



経路選択問題

Step 0 初期の総OD需要を求める

Step 1 現住民の住宅コストを得る

Step 2 M世代での総OD移動需要を求める



↓
下位レベルの計画：移動需要をネットワークにインプット



↓
経路の交通量を得る

Step 3 新住民の住宅コストを計算し、新住民のOD移動需要を再計算

Step 4 収束を確認。No→m+1世代としてstep2へ

- OD需要 $\bar{q}^{ijr}(0)$ を満たす可行解から開始
- $\sum_i \bar{q}^{ijr} = \bar{D}^{jr}$ を満たす
- 初期の総OD需要 $q^{ijr}(0)$ を求め、世代数mを0とする

Solution Algorithm

居住地選択問題



経路選択問題

Step 0 初期の総OD需要を求める

Step 1 現住民の住宅コスト(参照点)を得る

Step 2 M世代での総OD移動需要を求める

↓
下位レベルの計画：移動需要をネットワークにインプット
↓
経路の交通量を得る

Step 3 新住民の住宅コストを計算し、新住民のOD移動需要を再計算

Step 4 収束を確認。No→m+1世代としてstep2へ

1.1

外性的に与えられた q^{ijr} (移動需要)をネットワークにロード

1.2

Step0に従い均衡状態の一般化移動コスト μ^{ijr} を得る

1.3

元の住民の住宅コスト $\varphi^{ijr}(m)$ を得る



Solution Algorithm

- Step 0** 初期の総OD需要を求める
- Step 1** 現住民の住宅コスト(参照点) を得る
- Step 2** M世代での総OD移動需要を求める
 ↓
 下位レベルの計画：移動需要をネットワークにインプット
 ↓
 経路の交通量を得る
- Step 3** 新住民の住宅コストを計算し、新住民のOD移動需要を再計算
- Step 4** 収束を確認。 No→m+1世代としてstep2へ

2.1:

初期リンク交通流 $x_a^{(0)}$ を0に設定。経路選択確率式より、移動需要 $q^{ijr(m)}$ を各リンクに割り当て、リンク交通量 $x_a^{(t)} \rightarrow$ 経路 p の交通量 $f_p^{ijr(t)}$

2.2:

現在のリンク交通流 $x_a^{(t)}$ から、リンクコスト $t_a^{(t)}$ を更新→一般化移動コスト $c_p^{ijr(t)}$ を更新

2.3,2.4:

2.2で更新された $c_p^{ijr(t)}$ に基づいて交通割り当て→リンクフロー $x_a^{(t+1)}$ を得る。

2.5:

収束確認。 Yes→次ステップへ。 No→2.2へ



Solution Algorithm

Step 0 初期の総OD需要を求める

Step 1 現住民の住宅コスト(参照点) を得る

Step 2 m世代での総OD移動需要を求める
 ↓
 下位レベルの計画：移動需要をネットワークにインプット
 ↓
 経路の交通量を得る

Step 3 新住民の住宅コストを計算し、新住民のOD移動需要を再計算

- 上位モデルを解き、新住民が加わった状態での ϕ^{ijr*} を求める
- 新しい交通需要 $q^{ijr(m+1)}$ を求める

Step 4 収束を確認。No→m+1世代としてstep2へ

4. Experiments and Results

Numerical Experiments

- ネットワーク図

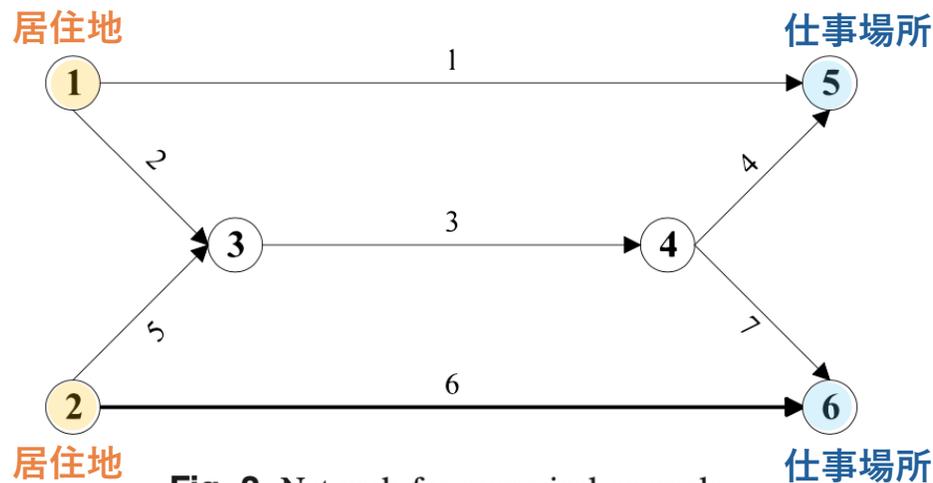


Fig. 2. Network for numerical example.

Table 2. Link properties of test network

Link	Capacity	Free-flow travel time	Link length	α	γ	Type
1	60	15	15	0.25	4	Local street
2	60	5	5	0.25	4	Local street
3	60	10	10	0.25	4	Local street
4	60	5	5	0.25	4	Local street
5	60	8	8	0.25	4	Local street
6	120	10	13.3	0.25	5.5	Highway
7	60	5	5	0.25	4	Local street

Table 3. Value of parameters

Parameter	Description	Value
β^r	Parameter of perception variation	0.68
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Exogenously given error term	0.05
η_1, η_2	VOT of different classes	\$10/h, \$20/h
θ_1, θ_2	Positive constants in utility function	0.65, 0.35
ξ	Parameter of perception variation in residents' location choice	0.68
τ_a	Toll charge on link a	0
χ^1, χ^2	Parameters that represent the degree of emphasis toward travel monetary cost of different classes	0.6, 1
ω	Fuel cost of per km	\$0.1/km
ϖ_1, ϖ_2	Value of leisure time corresponding to different classes	\$3.5/h, \$5/h
I_1	Annual income of lower-income residents	\$18,250/year
I_2	Annual income of higher-income residents	\$36,500/year

Table 4. Residents' distribution of working place in test network

Working place	Before		After	
	Lower-income	Higher-income	Lower-income	Higher-income
5	49	51	69	71
6	51	49	71	69

20ずつ増

Results and Analysis

1000のランダムな初期解を与えた場合の低所得者の居住地選択の反復プロセス

Table 5. OD demand in test network

OD	Before		After	
	Lower-income	Higher-income	Lower-income	Higher-income
1-5	25	25	31	41
2-5	24	26	38	30
1-6	26	24	33	38
2-6	25	25	38	31

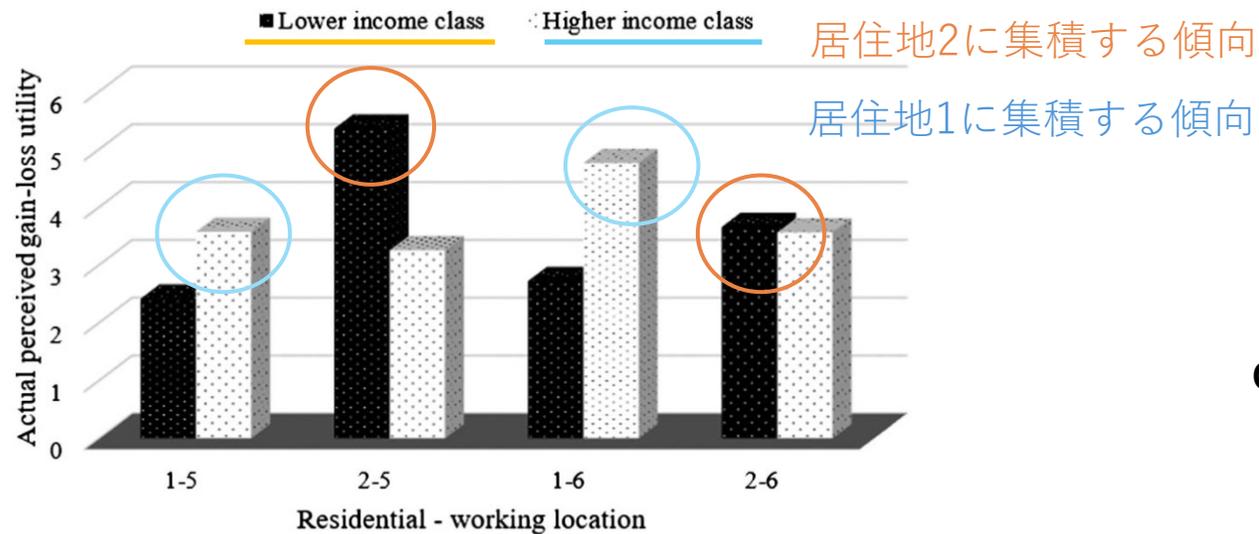


Fig. 4. Actual perceived gain-loss utility of households.

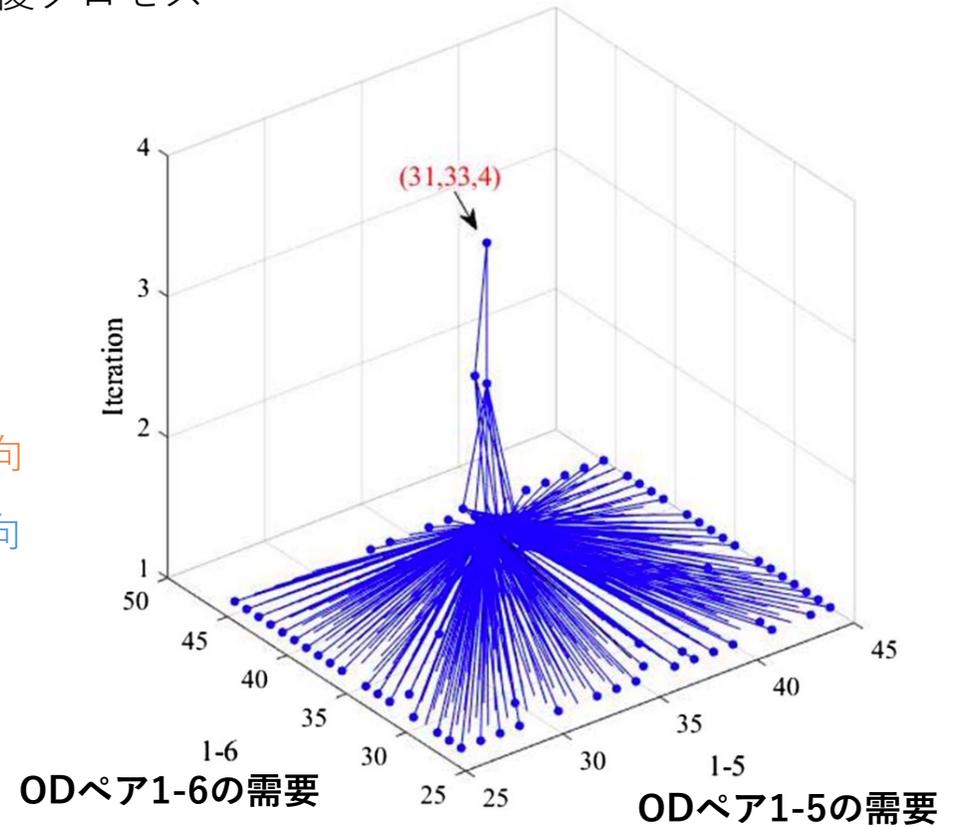
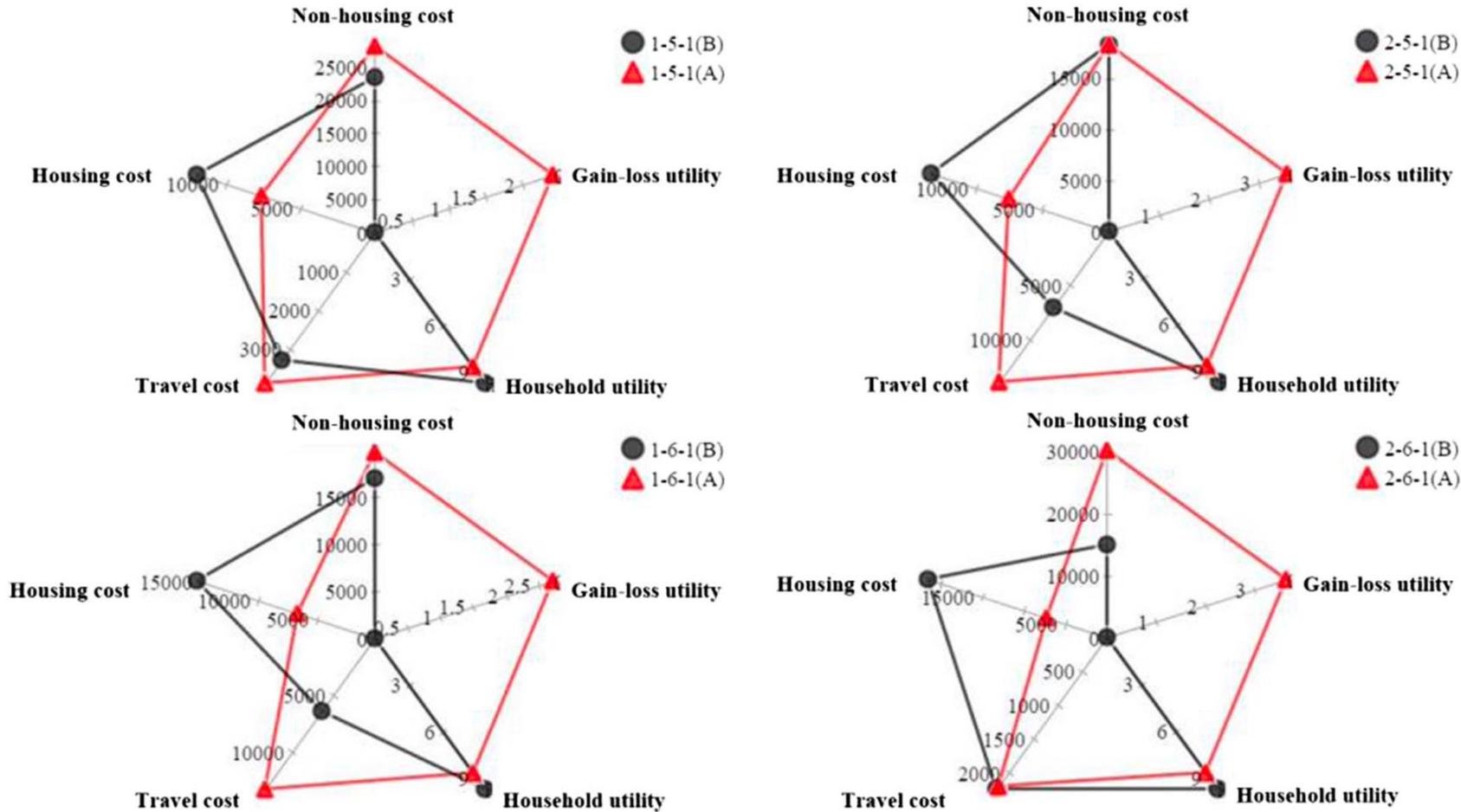


Fig. 3. Iterative solving process corresponding to 1,000 initial random feasible solutions (lower income).

低所得者の需要の可視化

Results and Analysis

Changes in various indicators of urban system before and after new households come into the city (lower income).



- 新住民が都市に入った後、住宅費と家庭効用↓
非住宅費と交通費↑

Fig. 5. Changes in various indicators of urban system before and after new households come into the city (lower income).

Contrast Experiments and Sensitivity Analysis

- 高速道路料金を設定した場合

低所得者の方が高所得者よりも影響を受けやすい

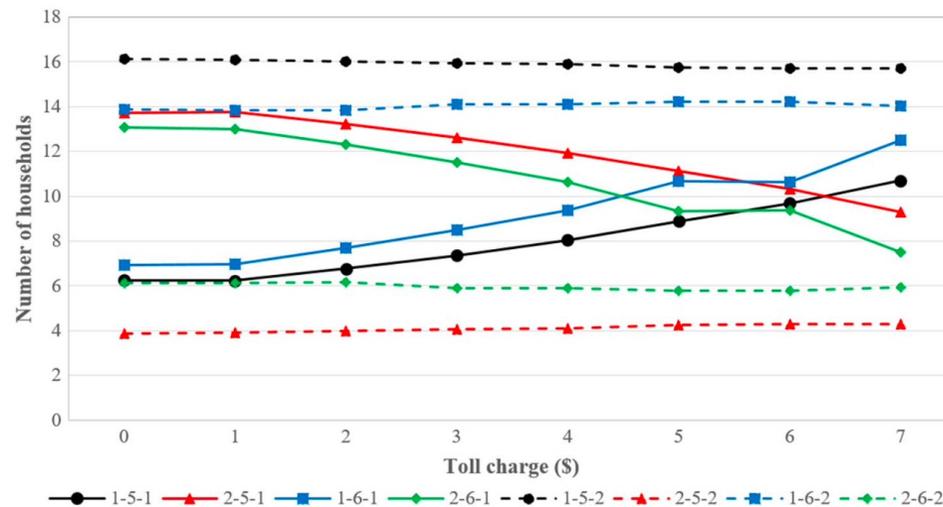


Fig. 6. Change in new households' distribution with toll charge increase.

低所得者の移動時間が下がる箇所が存在
→高速料金の価格設定が重要

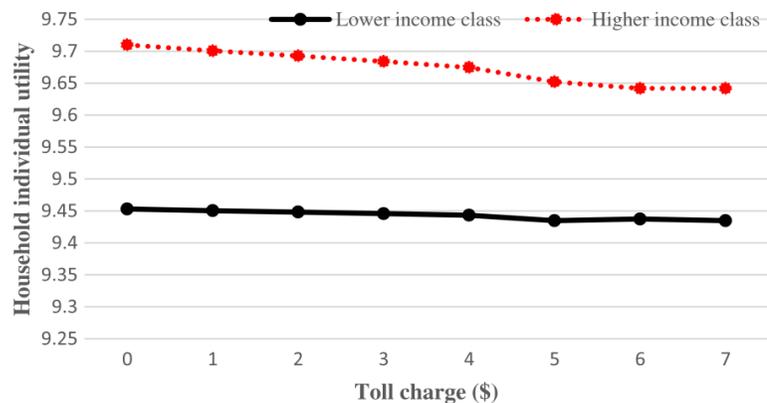


Fig. 7. Change in household individual utility with toll charge increase.

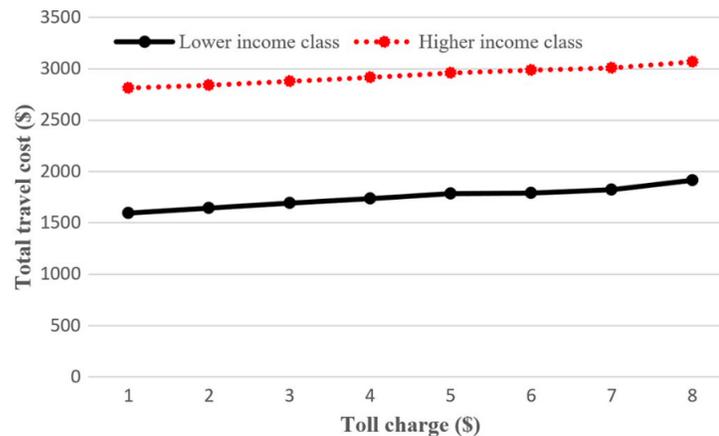


Fig. 8. Change in total travel cost with increase in toll charge.

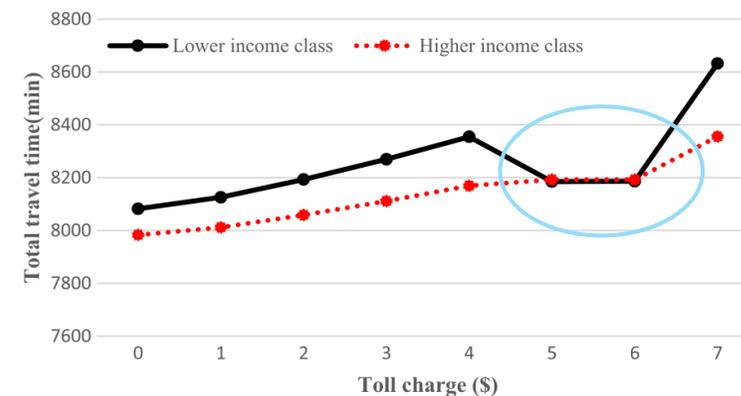


Fig. 9. Change in total travel time with increase in toll charge.

Contrast Experiments and Sensitivity Analysis

- 参照レベルを変化させた場合

- No.1 : 同住宅場所と同所得
- No.2 : 同所得のみ
- No.3 : 同住宅場所のみ

→No.1が最も結果が良い



同収入 + 同住宅場所の人の
参照情報を得るべき

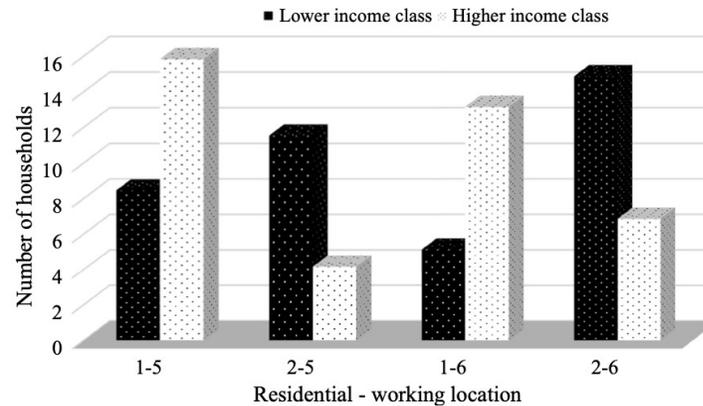


Fig. 10. Spatial distribution of households' residential location (Experiment No. 1).

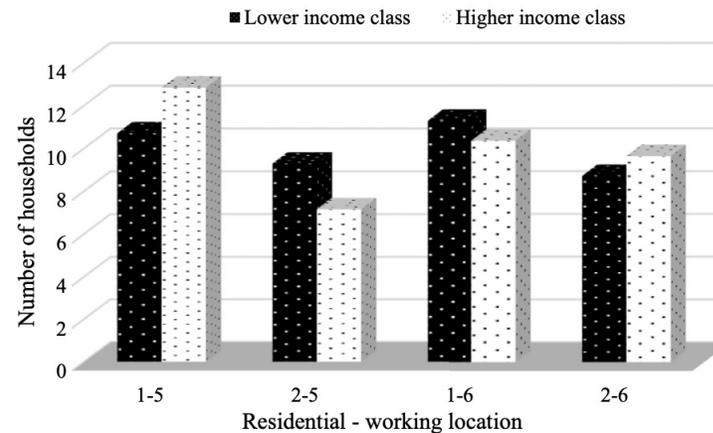


Fig. 11. Spatial distribution of households' residential location (Experiment No. 3).

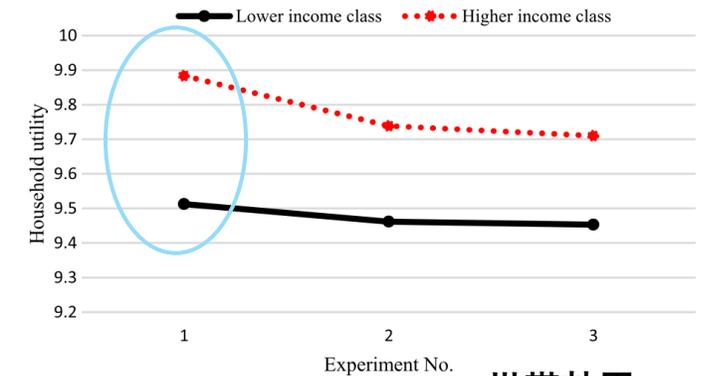


Fig. 12. Household utility of different experiments. **世帯効用**

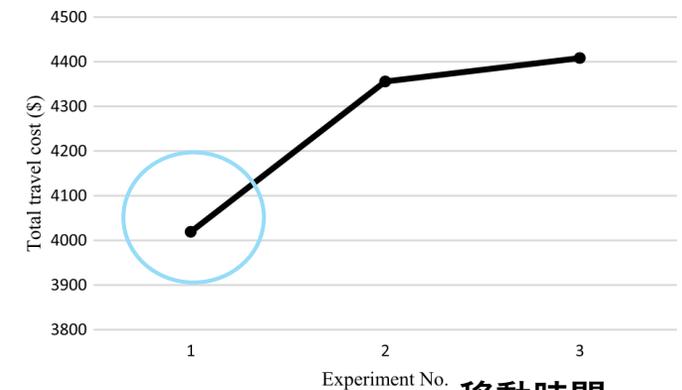


Fig. 13. Total travel cost of different experiments. **移動時間**

Conclusions and Future Studies

■ 実験より判明したこと

- 新住民が来ることで世帯の非住宅費と旅行費用が増加し、住宅費と世帯効用が減少する
- 新住民が都市に来るかどうかに関わらず、高所得者の効用は常に低所得者よりも高い
- 高速料金の設定により移動費用は上がる一方、低所得者の移動時間が減少するタイミングもある
→高速料金の価格設定が重要
- 新住民の住宅決定の場合に参照情報のレベルが住宅分布の均衡に大きな影響を与える

■ 今後の展望

- 政府の政策や住宅施策が反映されない
- 住宅選択の際には交通以外に周辺の公共施設や住宅価格などが影響するのを無視している

所感

- 実験で想定している都市が日本ではあまり該当する都市を想像できず、またリモートワークなどを想定していない
- 居住地と仕事場、だけでない移動で生活の可能性を考えると研究の適用可能性が広がりそう？だが世帯収入との制約などが？