

NTTデータ数理システム 学生研究奨励賞

マルチエージェントシミュレーションを活用した
電動キックボードのユーザー満足度改善を
実現する戦略の検討

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

経営システム工学専攻 計画数理学研究室

上木翔太

指導教員：蓮池隆

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. 従来研究
3. 分析手法
4. 実験結果及び考察
5. まとめと今後の課題

電動キックボードの普及と現状の課題

- 電動キックボードの普及率は増加傾向にあり、国内の市場規模は約1兆円にのぼる^[1]
- この背景には電動キックボードが社会情勢を捉えた特徴を有することが挙げられる

表1 社会情勢と電動キックボードの特徴の親和性

社会情勢	電動キックボードの特徴
タイムパフォーマンス重視のライフスタイルへと人々の生活が変化している	設置スペースを要さないため、狭小ポートの多数設置が可能で短距離移動に優れている
SDGsの観点から環境にやさしいモビリティの普及が急務である	電気とモーターを使ったモビリティで二酸化炭素排出量が少ない
経済合理性の観点からシェアリングエコノミーの人気の高まっている	シェアサイクルと同様にシェアリングで使用されることが一般的である

- 電動キックボードは様々な観点から注目されており、普及率を高めることが求められている

電動キックボードの普及と現状の課題

■一方で、電動キックボードの普及を阻む要素も多数ありその例を以下に示す

- 法律の不整備による安全性の問題
- 各ポートにおける電動キックボードの需要変動による利用機会損失の発生
- 各ポートにおける電動キックボードの台数の偏り発生に伴う返却機会損失の発生

→これらの課題を解決することが電動キックボードの普及に急務である

本研究の目的

各ポートにおける電動キックボードの需要変動や台数の偏りを考慮したうえでマルチエージェントシミュレーションを実施し、電動キックボードの利用率を改善するのに有効な戦略を検討する

■ 矢嶋ら^[2]

マルチエージェントシミュレーションによるシェアサイクル運用システムの検証

- ✓ 自転車の偏在を変動型のインセンティブを提示することで解消
- ✓ インセンティブ額が自転車のコスト関数を上回れば、偏在を防ぐ指定ポートまで移動するというシミュレーションを実施

■ 上木・蓮池^[3]

多目的最適化問題を活用した電動キックボードの最適配置

- ✓ スカラー化の一種である線形加重和最小化法を用いて、タイムパフォーマンスとコストパフォーマンスを考慮したユーザー目線の電動キックボードの最適配置を実現
- ✓ 電動キックボードの収容可能台数に関する制約条件が最適配置に影響を与えることを検証

本研究の位置づけ

マルチエージェントシミュレーションを実施することで、電動キックボード利用者を増やすのに有効な値下げ幅を検証するとともに、電動キックボードの収容可能台数をどのように増加させることが電動キックボードの利用促進につながるかを検証

モデル概要

■ シミュレーションパッケージとモデルについて

- NTTデータ数理システムの**S⁴ Simulation System**を用いてMAS（Multi Agent Simulation）を実施
 - ✓ 人をエージェントとし、その行動ルールとエージェント同士の相互作用をモデル化してシミュレーションを実施
- Middle Range Model：実際に電動キックボードを使用する地域の縮小版を想定

■ 対象地域・対象ポート

- 東京都世田谷区池尻
- 電動キックボードが配置されるコンビニとマンションの10か所をポート地点とする

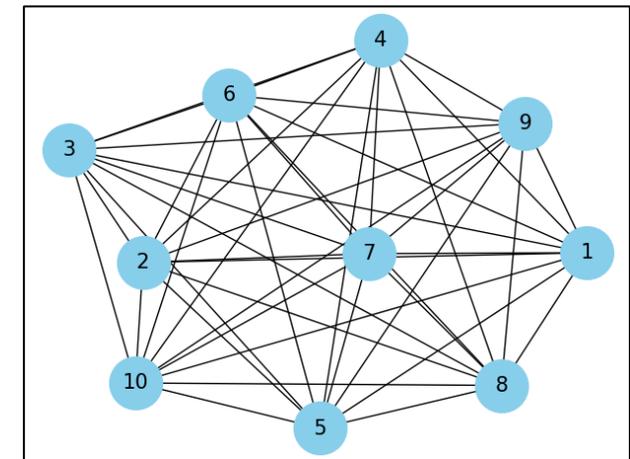


図1 ポート間の移動のイメージ

各ポートの概要

■ 各ポートの収容可能台数について

- 収容可能台数は各ポートの敷地の規模によって決定
- マンションに関しては戸数に応じて収容可能台数を決定^[4]
- コンビニエンスストアについては敷地の規模に関する情報が得られなかったため各ポートにつき8台の設置を可能とする

表2 各ポートにおける収容可能台数

	Port 0	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9
種別	マンション	マンション	コンビニ	マンション	マンション	コンビニ	マンション	マンション	マンション	コンビニ
戸数	195	113		205	168		241	175	270	
台数	10	6	8	12	8	8	14	9	16	8

需要予測

■ 各ポートの電動キックボードの需要について

- 24時間の期限を設けて各ポートにおける電動キックボードの需要を予測
- 各ポートにおける「地域人口」, 「駅までの移動距離」, 「時間帯」の3要素を基に需要予測を実施
- 「地域人口」は世田谷区が公開する住民基本台帳に基づいたデータ^[5]を採用
- 「駅までの移動距離」はNAVITIMEの検索ツールを用いて算出されたデータ^[6]を採用
- 各時間帯における需要は「通常」, 「閑散」, 「混雑」の3つに分類され、図2の順序で需要が発生

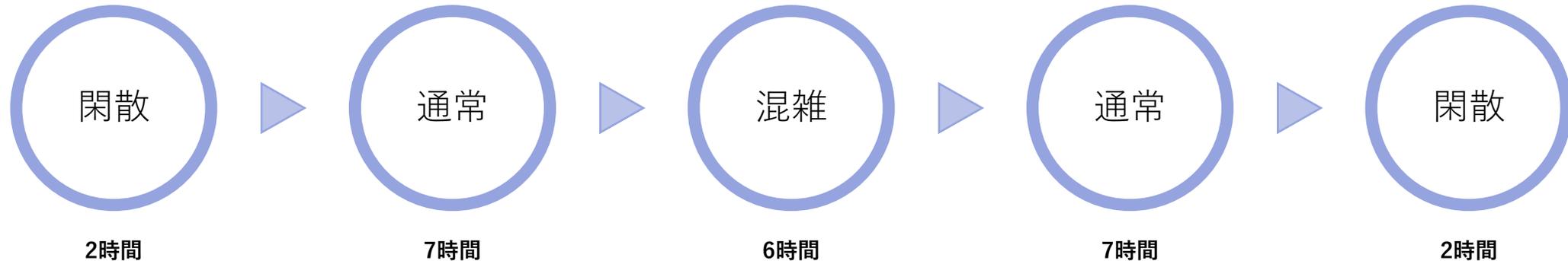


図2 ポート間の需要発生順序

エージェントの行動

- 各エージェントは図3に従って行動
 - ✓ 終了条件：24時間のシミュレーション完了時
 - ✓ 目的ポート選択：推移確率行列（P.10）に従う
 - ✓ 移動手段選択：ロジットモデル（P.11）に従う

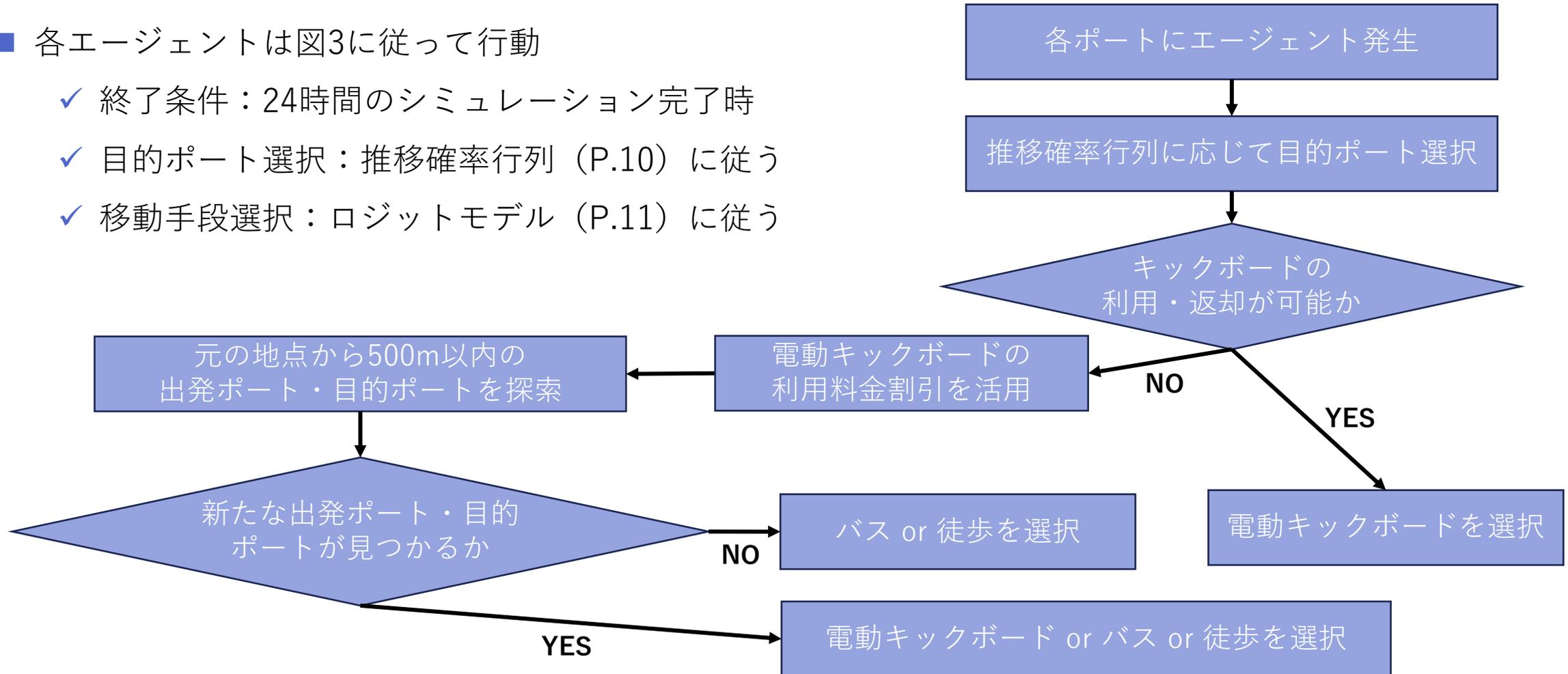


図3 フロー図

推移確率行列

■ Port I からPort J に移動するすべての確率を表した行列

- 推移確率は「ポート間の距離」と「目的ポートの住宅数」に応じて決定
- 「ポート間」の距離はNAVITIMEの検索ツールを用いて算出されたデータ^[6]を採用
- 「目的ポートの住宅数」はいつもNAVIの住所検索機能を用いて算出されたデータ^[7]を採用

表3 各ポート間の推移確率行列

地点	Port 0	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9
Port 0	0	0.126	0.119	0.146	0.086	0.079	0.086	0.060	0.132	0.166
Port 1	0.099	0	0.120	0.141	0.094	0.089	0.094	0.073	0.131	0.157
Port 2	0.098	0.126	0	0.142	0.093	0.087	0.093	0.071	0.131	0.158
Port 3	0.102	0.126	0.121	0	0.098	0.093	0.098	0.080	0.130	0.153
Port 4	0.091	0.126	0.119	0.147	0	0.077	0.084	0.056	0.133	0.168
Port 5	0.089	0.126	0.119	0.148	0.081	0	0.081	0.052	0.133	0.170
Port 6	0.091	0.126	0.119	0.147	0.084	0.077	0	0.056	0.133	0.168
Port 7	0.081	0.126	0.117	0.153	0.072	0.063	0.072	0	0.135	0.180
Port 8	0.101	0.126	0.121	0.140	0.095	0.090	0.095	0.075	0	0.156
Port 9	0.105	0.126	0.121	0.138	0.100	0.096	0.100	0.084	0.130	0

ロジットモデル

- 複数の選択肢から選択対象を決定する行動をモデル化する手法
 - ✓ 本研究ではロジットモデルに基づき移動手段を決定する
- ロジットモデルの指標
 - ポート間の移動にかかるコスト：*USAGE COST*
 - ポート間の移動にかかる時間：*TIME COST*
 - ※ 割引活用時にポートを選びなおす場合に発生する時間
 - 新たな出発ポートに移動する時間：*T'IME COST*
 - 新たな目的ポートに移動する時間：*T''IME COST*
 - バス利用時に発生する待ち時間：*WAIT TIME COST*
 - 新たなポートを探索するのにかかる時間：*SEARCH TIME COST*
- ロジットモデルの重みづけ係数
 - *USAGE COST*： α , *TIME COST*・*T'IME COST*・*T''IME COST*： β , *WAIT TIME COST*： γ , *SEARCH TIME COST*： δ

$$P_k = \frac{\exp[V_k]}{\sum \exp[V_k]} \quad (k \in O_k)$$

$$A = \alpha(1 - \rho) \times \text{USAGE COST}$$

$$B = \beta \times (\text{TIME COST} + T'IME COST + T''IME COST)$$

$$C = \gamma \times \text{WAIT TIME COST}$$

$$D = \delta \times \text{SEARCH TIME COST}$$

$$V_k = \frac{1}{A + B + C + D}$$

※ ρ は割引率を表す

※ V_k が逆数の和で表現されるのはコストが小さい移動手段を優先して選択するモデルであるため

パラメータの設定

■ シミュレーションに必要なパラメータ

- ▶ ポート間の移動距離： d_{ij}
- ▶ 電動キックボード利用時に発生するポート間の移動コスト及びタイムコスト： CE_{ij} , TE_{ij}
- ▶ バス利用時に発生するポート間の移動コスト及びタイムコスト： CB_{ij} , TB_{ij}
- ▶ 徒歩利用時に発生するポート間の移動コスト及びタイムコスト： CW_{ij} , TW_{ij}
- ▶ 割引活用時に新たな出発ポートに徒歩で移動する場合にかかる時間： $T'W_{ij}$
- ▶ 割引活用時に元の目的地点まで徒歩で移動する場合にかかる時間： $T''W_{ij}$
- ▶ 割引率： ρ
- ▶ エージェントの需要： De_{ij}
- ▶ バスの待ち時間： WB (ランダム変数)
- ▶ 代替りのポートを探すのにかかる時間： ST (固定値)

エージェントの移動手段

- エージェントの移動手段は8パターンに分類される
- 「Option 1,2,3」, 「Option 4,5」, 「Option 6,7,8」の各々についてロジットモデルが使用される

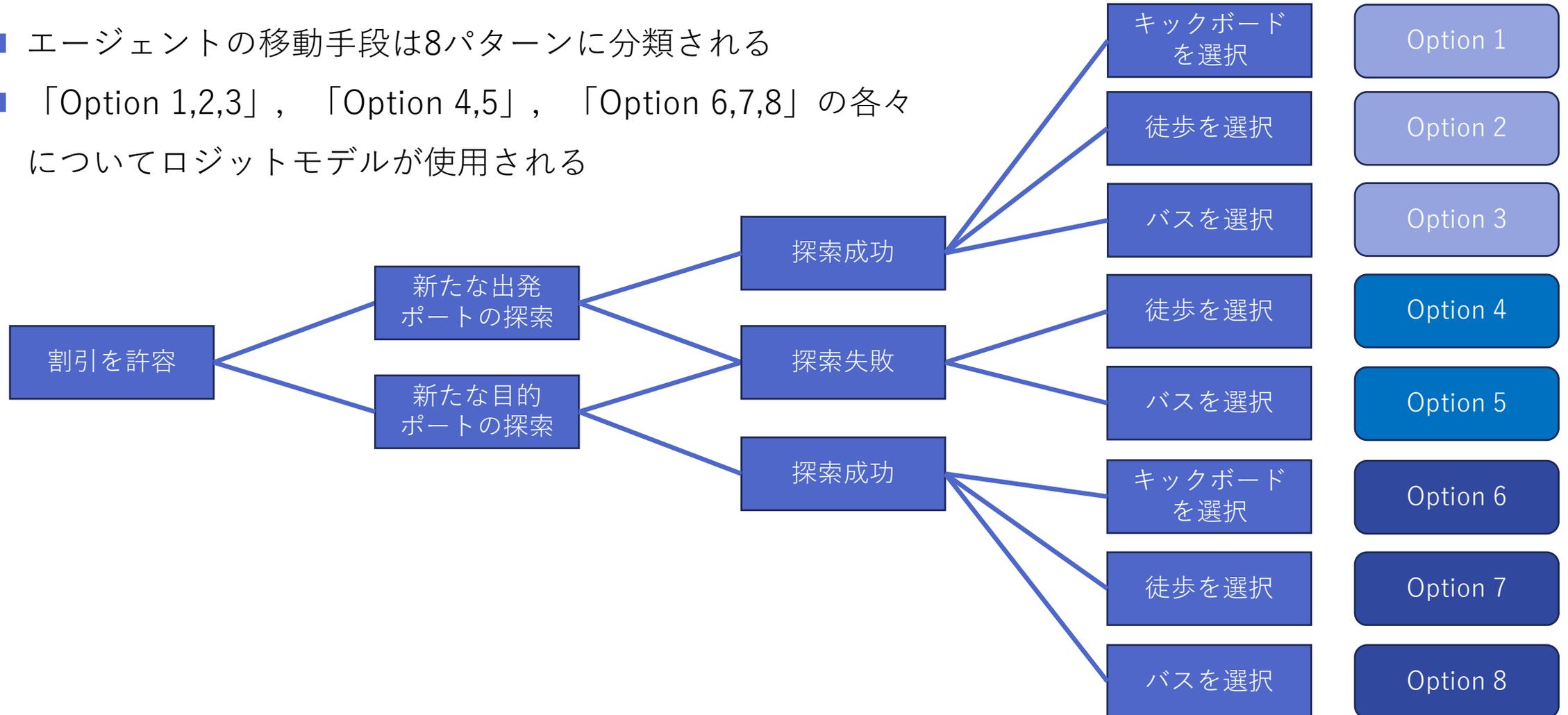


図4 移動手段の選択候補

各移動手段のロジットモデル

- 各オプションにおける V_k は下記の通り

Option 1

$$V_{o1} = \frac{1}{\alpha CE \times (1 - \rho) + \beta(TE + T'W) + \gamma \times 0 + \delta ST}$$

Option 2

$$V_{o2} = \frac{1}{\alpha \times 0 + \beta TW + \gamma \times 0 + \delta ST}$$

Option 3

$$V_{o3} = \frac{1}{\alpha CB + \beta TB + \gamma WB + \delta ST}$$

Option 4

$$V_{o4} = \frac{1}{\alpha \times 0 + \beta TW + \gamma \times 0 + \delta ST}$$

Option 5

$$V_{o5} = \frac{1}{\alpha CB + \beta TB + \gamma WB + \delta ST}$$

Option 6

$$V_{o6} = \frac{1}{\alpha CE \times (1 - \rho) + \beta(TE + T''W) + \gamma \times 0 + \delta ST}$$

Option 7

$$V_{o7} = \frac{1}{\alpha \times 0 + \beta TW + \gamma \times 0 + \delta ST}$$

Option 8

$$V_{o12} = \frac{1}{\alpha CB + \beta TB + \gamma WB + \delta ST}$$

評価指標

■ 電動キックボードの利用率

- 全エージェントが3つの移動手段の中で電動キックボードを利用した割合

■ 電動キックボードの利用機会損失の発生回数

- 出発ポートに電動キックボードがなく、電動キックボードを利用できなかった回数と電動キックボードの代わりにバスと徒歩が優先して使われた回数の和

■ 電動キックボードの返却機会損失の発生回数

- 目的ポートに電動キックボードの返却場所がなく、電動キックボードを利用できなかった回数

実験概要

- シミュレーションに必要なパラメータは正規化した値（最小値：0，最大値：1）とする
- 探索時間 $ST = 0.1$ （固定値）、待ち時間 $WB = [0.25, 0.75]$ （ランダム変数）とする
- ロジットモデルの各指標の重みは $\alpha : \beta : \gamma : \delta = 4 : 2 : 6 : 1$ とする^[8]
- シミュレーションは10回実行し、出力結果はその平均値を採用する（外れ値は除く）
- 各ポートの收容可能台数と初期在庫台数は表4のように設定する

表4 各ポートの收容可能台数と初期在庫台数

Port Number	Port 0	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9
收容可能台数	10	6	8	12	8	8	14	9	16	8
初期在庫台数	7	3	5	9	5	5	11	6	13	5

実験 1：通常時における各評価指標の結果 ($\rho = 0.5$)

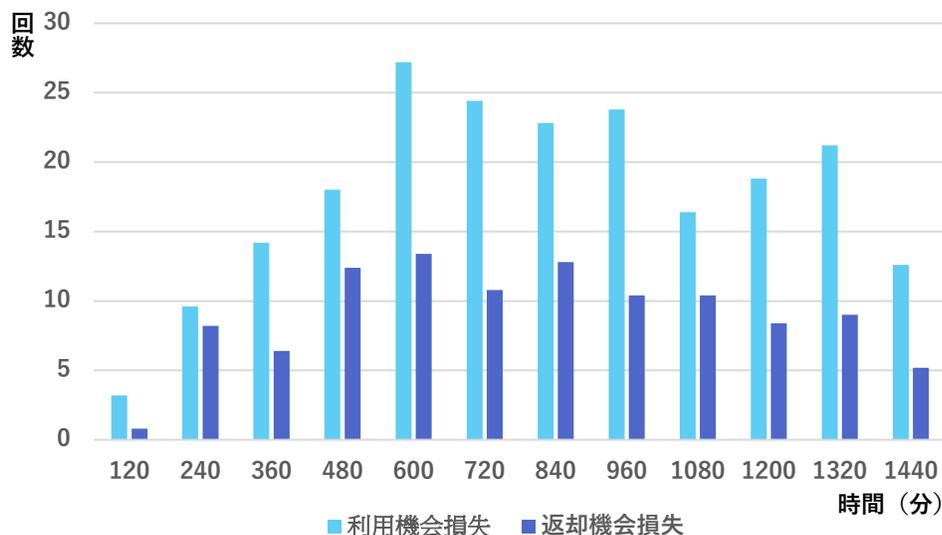


図5 各時間帯における利用機会損失と返却機会損失の発生回数 (通常時)

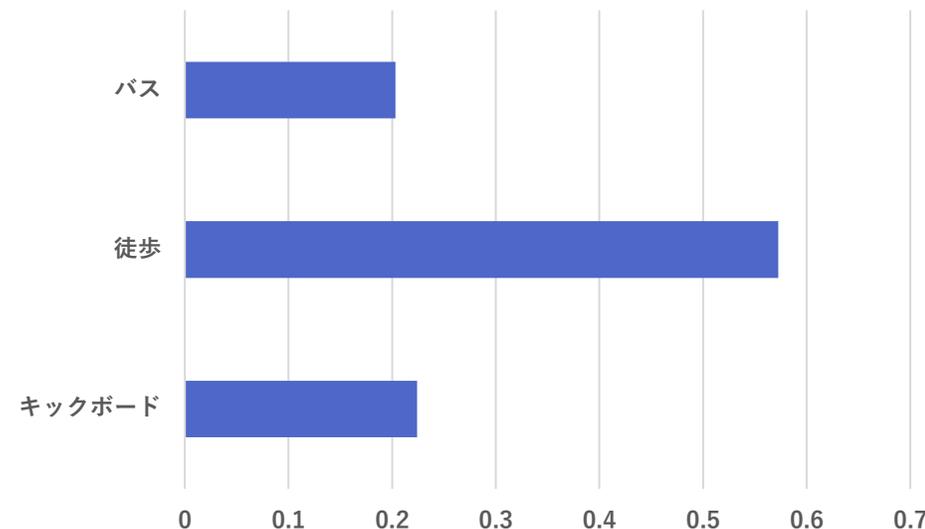


図6 各移動手段の利用率 (通常時)

- 全ての時間帯で利用機会損失の発生回数が返却機会損失の発生回数を上回っている
- 電動キックボードの利用率は約20%に留まっており、徒歩の利用率が最大である
 - ✓ 本実験は現状の課題を表しており、機会損失の軽減と利用率の改善を実現するような戦略を検討する必要性を示唆している

実験 2 : 割引率の変更

- 電動キックボードの割引率 ρ を変更
 - ✓ [0.1,0.9] の範囲で ρ の値を0.1間隔で変化させる
- 評価指標
 1. 電動キックボード (EK) の利用率
 2. 電動キックボード (EK) の利用機会損失の発生回数
 3. 電動キックボード (EK) の返却機会損失の発生回数
- 実社会における電動キックボードの料金割引
 - ✓ 出発するとライド料金が25% OFFになる出発ポートがある
 - ✓ 返却するとライド料金が25% OFFになる返却ポートがある
 - 現在の割引率が電動キックボードの利用率を高めるのに十分であるかが争点となる

実験 2 : 結果と考察

注釈について

ロジットモデルが逆数で表現されるため

- ρ の値が大きくなるにつれて電動キックボードの利用率は増加する
- 電動キックボードの利用率は最大でも35.2%と低水準にとどまっている
 - ✓ 各ポート間の移動距離が短く移動時間に決定的な差が生じないため、電動キックボードの優位性が徒歩と比較して小さいことが影響していると推察される
- 感度分析の結果から有効な割引率は70%以上であり、現在の割引率の効果は薄いと考えられる
 - ✓ 利用時間 β の重みが利用コスト α の重みより小さく*利用時間の方が重視されることから、大きめの割引率でないと電動キックボードの利用率に劇的な効果を与えるのは難しいことを示唆している

表5 各割引率に対応したEK利用率と感度分析

ρ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
EK利用率	19.7%	19.9%	20.4%	21.7%	22.4%	23.5%	27.8%	32.5%	35.2%
感度分析	感度が小さい						感度が大きい		

実験3：收容可能台数の変更

- 各ポートの收容可能台数を表6に従い変更 ($\rho = 0.5$)
 - 全ポートを対象に合計10台收容可能台数を増やす

表6 各施策における收容可能台数の増やし方

施策1	各ポートの收容可能台数を1台ずつ増やす
施策2	機会損失発生回数上位5つのポートの收容可能台数を2台増やす ⇒Port 1,4,7,8,9を2台増加
施策3	機会損失の発生回数に応じて收容可能台数を増やす ⇒Port 1,9を2台増加し、Port 2,3,4,6,7,8を1台増加

■ 評価指標

1. 電動キックボード (EK) の利用率
2. 電動キックボード (EK) の利用機会損失の発生回数
3. 電動キックボード (EK) の返却機会損失の発生回数

実験3：機会損失の合計に着目した結果

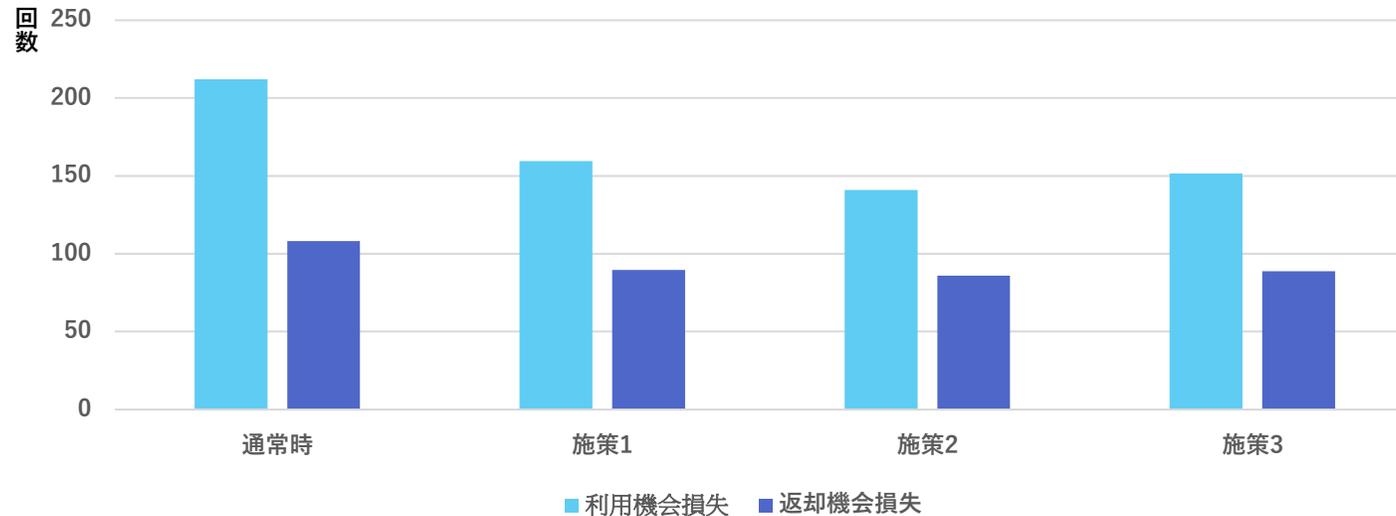


図7 通常時と実験3の各施策における利用機会損失と返却機会損失の発生回数

- 通常時と比較し、施策1から施策3を実施した場合の方が利用機会損失・返却機会損失ともに減少している
 - ✓ 効率的なシェアリングシステムが実現され、利用可能な電動キックボードが増加したと推察される
- 施策1と比較し、施策2と施策3を実施した場合の方が利用機会損失と返却機会損失が減少している
 - ✓ 機会損失が発生したポートの收容可能台数を集中的に増やす必要性を示唆している

実験3：各ポートの機会損失に着目した結果

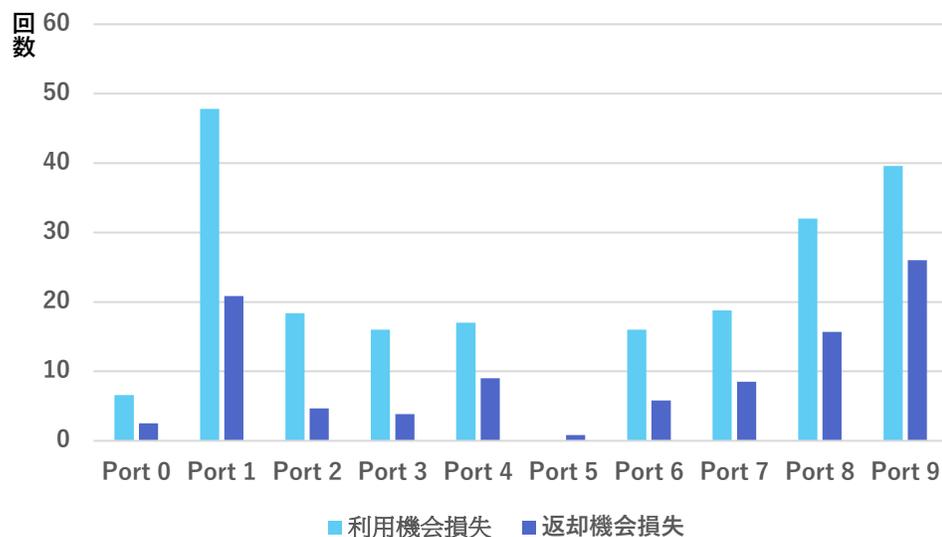


図8 利用機会損失と返却機会損失が発生したポート（通常時）

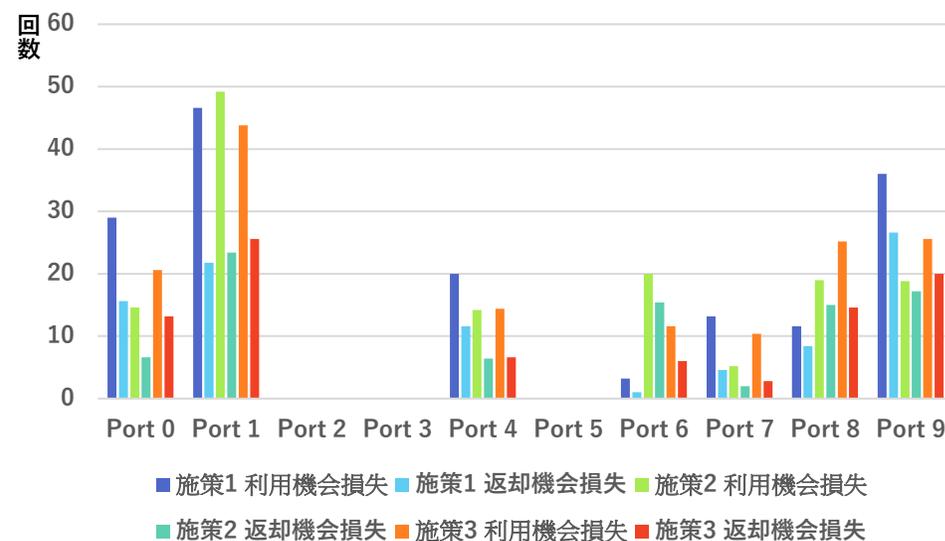


図9 各施策において利用機会損失と返却機会損失が発生したポート

- 通常時と比較し、各施策を実施した場合の方がPort 0の利用機会損失と返却機会損失が増加している
- 各施策を実施した場合、收容可能台数を増加させたほとんどのポートで利用機会損失と返却機会損失の減少がみられるが、Port 1では変化がみられなかった

実験3：Port 0の機会損失増加に対する考察

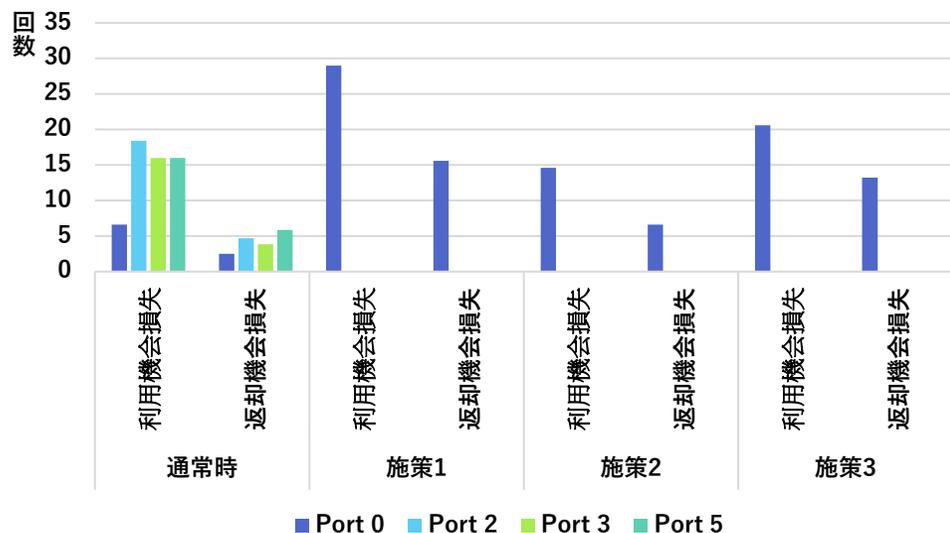


図10 Port 0,2,3,5における利用機会損失及び返却機会損失の増減

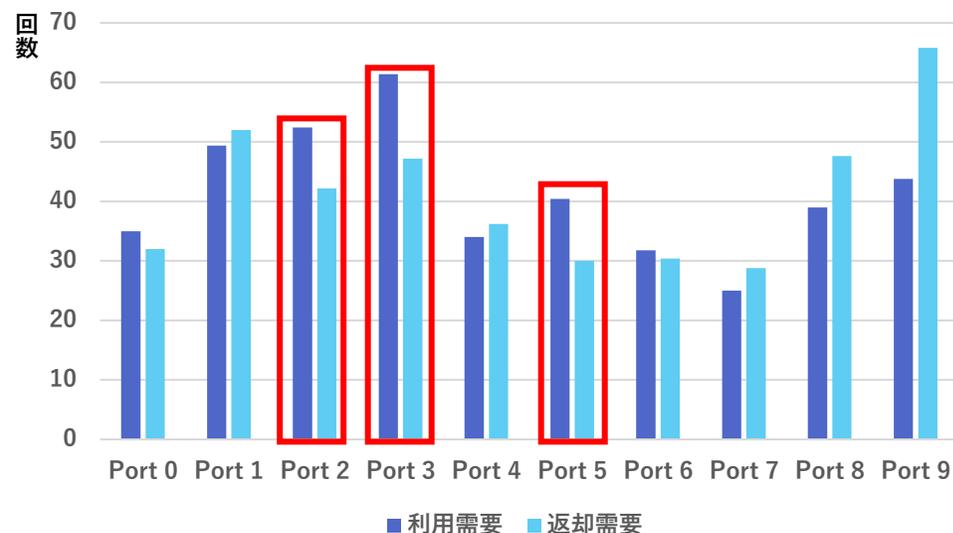


図11 各ポートにおける利用需要と返却需要

- シェアリングシステムの効率化により利用可能な電動キックボードが増加したことで、**返却需要に対して利用需要が大きいPort 2,3,5の機会損失が優先的に解消されたが、その分だけ通常時にPort 0で利用・返却可能だった電動キックボードが利用できなくなったと推察される**

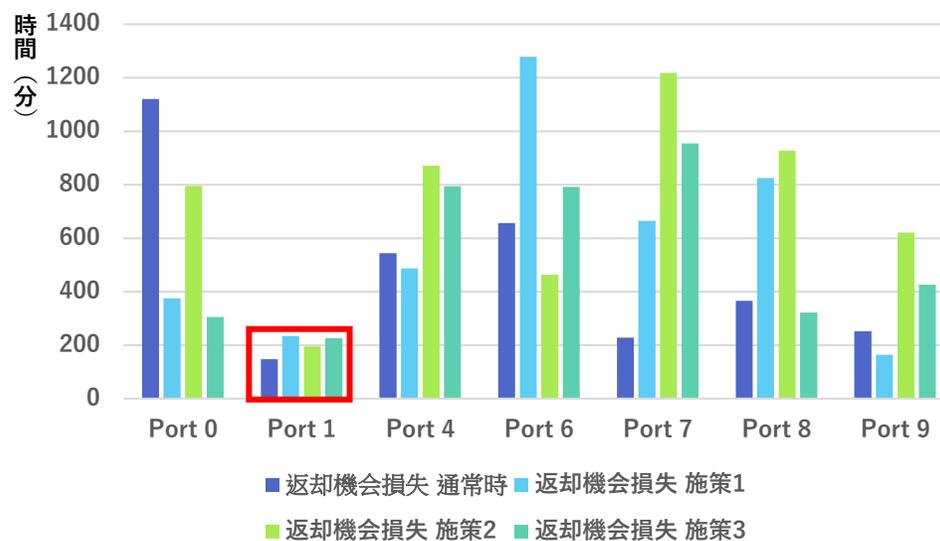
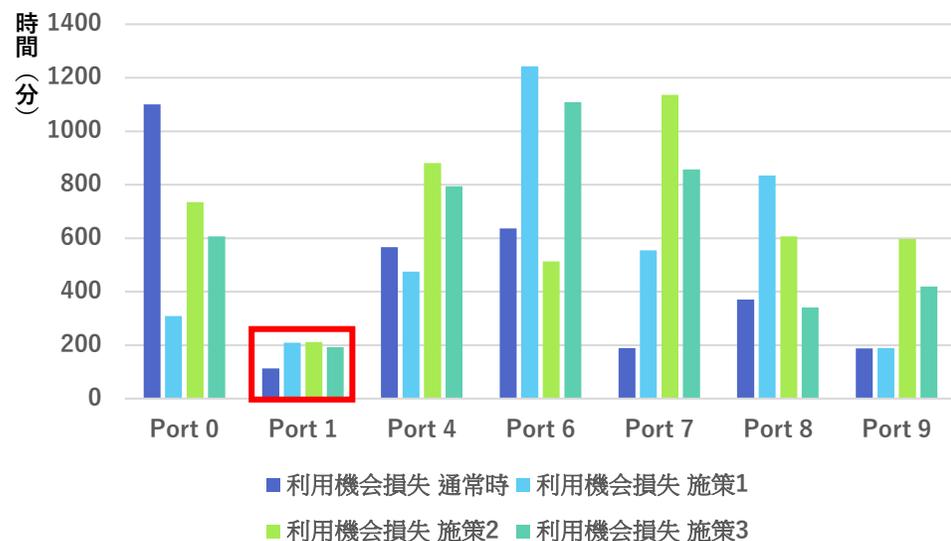
実験3：Port 1の機会損失改善失敗に対する考察

- 表7より利用機会損失及び返却機会損失は一度発生すると**同じポートで連続して発生**する傾向がある
 - 利用機会損失及び返却機会損失は短時間で急激に増加する
 - ✓ **利用機会損失及び返却機会損失の発生時刻を遅らせる必要性**を示唆している

表7 通常時及び各施策における利用機会損失及び返却機会損失が発生した時刻とポート地点

利用機会損失								返却機会損失							
通常時		施策1		施策2		施策3		通常時		施策1		施策2		施策3	
時間	Port	時間	Port	時間	Port	時間	Port	時間	Port	時間	Port	時間	Port	時間	Port
112	1	174	4	57	1	99	4	120	8	113	1	117	9	65	1
124	1	183	4	83	0	185	1	125	1	123	8	170	9	144	1
149	8	188	9	90	1	190	1	126	8	143	8	173	9	159	1
159	1	190	9	93	0	197	1	136	8	178	1	200	9	164	0
171	1	198	9	120	0	201	4	139	7	191	1	204	9	177	0
175	8	219	9	204	1	217	1	142	7	209	1	307	1	180	1
207	8	235	4	218	1	217	4	169	7	216	8	329	1	187	1

実験3：Port 1の機会損失改善失敗に対する考察



注釈について
Port 2,3,5については各施策実行時に機会損失が発生していないためグラフを省略している

図12 *Port 0,1,4,6,7,8,9における1回目の利用機会損失発生時刻

図13 *Port 0,1,4,6,7,8,9における1回目の返却機会損失発生時刻

- 通常時と各施策実施時を比較したとき、Port 1では1回目の利用機会損失発生時刻と返却機会損失発生時刻に違いがみられず、**どの施策を実施しても機会損失が早い時刻に発生することが読み取れる**
 - ✓ **機会損失が早い時刻に連続して発生したため、改善実現には至らなかったと推察される**
- Port 1の1回目の利用機会損失発生時刻と返却機会損失発生時刻が早いのは、**全ポートの中で初期在庫台数が最も少ない**ことが影響していると推察される (P.16 表4参照)

実験4：初期在庫台数の変更

注釈について

「初期在庫台数」の増加戦略のみを考えるため減少については考慮しないものとする

実験3の結果

各ポートの「収容可能台数」を調整することで機会損失を減少させることが可能である

EKの台数に関連する指標

各ポートの「収容可能台数」以外では各ポートにおける「初期在庫台数」が該当する

仮説

各ポートの「初期在庫台数」を*調整することで機会損失の減少を実現できる可能性がある

■ 評価指標

1. 電動キックボード（EK）の利用率
2. 電動キックボード（EK）の利用機会損失の発生回数
3. 電動キックボード（EK）の返却機会損失の発生回数

実験4：各ポートにおける初期在庫台数の増加戦略

戦略1（不採用）

利用機会損失が多く発生したポートの「初期在庫台数」を増加させる戦略

戦略2（採用）

利用需要から返却需要を差し引いた値が大きいポートの「初期在庫台数」を増加させる戦略

実験1～実験3の結果を基にした推測（戦略1の不採用理由）

利用機会損失と返却機会損失は同じポートで発生しやすい傾向がみられ、利用機会損失が多く発生するポートの「初期在庫台数」を増加させた場合、ポートの余裕がなくなり返却機会損失が発生しやすくなる懸念がある

- 各ポートの初期在庫台数を表8に従い変更 ($\rho = 0.5$)
 - 全ポートを対象に合計3台初期在庫台数を増加

表8 各施策における初期在庫台数の増やし方（表9を基に作成）

施策1	Port 3の初期在庫台数を3台増やす
施策2	Port 2,3,5の初期在庫台数を1台ずつ増やす

表9 通常実験における各ポートの利用需要・返却需要及びその差引

	Port 0	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9
利用需要	35	49.4	52.4	61.4	34	40.4	31.8	25	39	43.8
返却需要	32	52	42.2	47.2	36.2	30	30.4	28.8	47.6	65.8
差引	3	-2.6	10.2	14.2	-2.2	10.4	1.4	-3.8	-8.6	-22

実験4：結果と考察

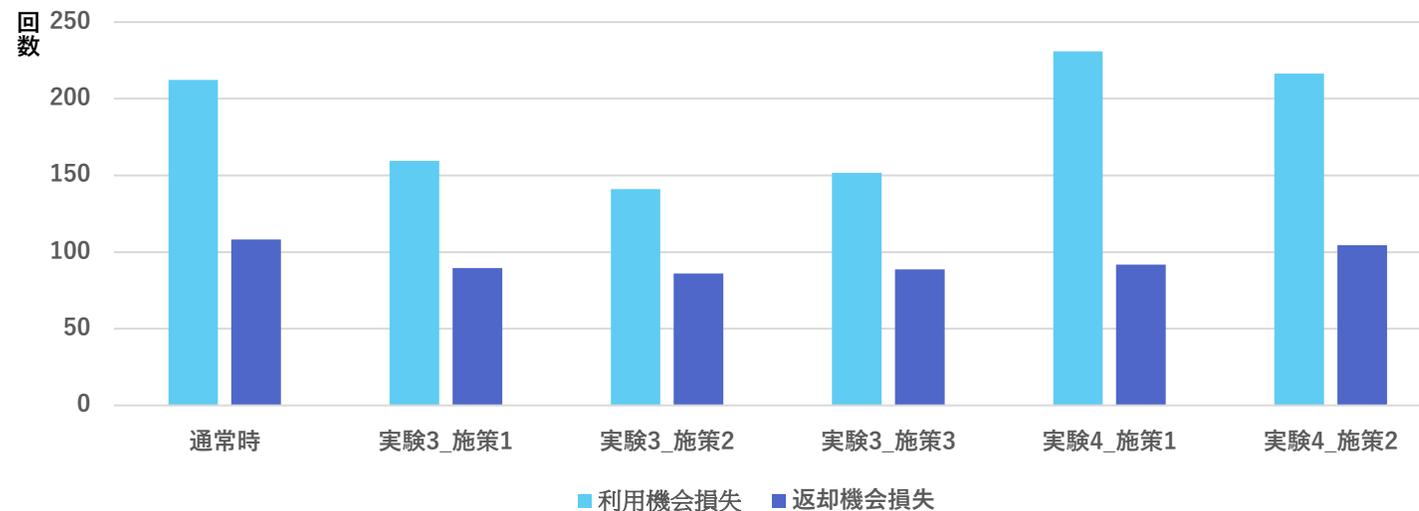


図14 通常時と実験3・実験4の各施策における利用機会損失と返却機会損失の発生回数

- 通常時と実験4_施策1・実験4_施策2を比較したとき、機会損失発生回数に違いはみられなかった
 - ✓ 初期在庫台数の増加戦略は機会損失の改善に効果がないと読み取れる
- 実験4_施策1を実施した場合、利用機会損失がすべての施策の中で最も多く発生しており、返却需要に対して利用需要が多いポートに初期在庫台数を集中させる戦略に欠点があると推察される
 - ✓ 一時的に利用できる電動キックボードが増加する利点より、各ポートの「空きの余裕」がなくなる欠点の方が大きく各ポートの収容可能台数を増加させて「空きの余裕」を作ることが機会損失の減少に有効だと推察される

まとめと今後の課題

■ まとめ

1. 電動キックボードの利用率を上げるのに有効な割引率は70%以上である
2. 機会損失は短期間に連続して発生するため1回目の発生時刻を遅らせることが重要である
3. 現在機会損失が多く発生しているポートの収容可能台数を増加させることが大幅な機会損失減少につながると考えられる
4. 初期在庫台数の増加戦略は機会損失減少に効果を与えない

■ 今後の課題

1. 他地域においてシミュレーションを実行することで本研究の戦略の妥当性を評価する
2. 新たなポート候補地を追加してシミュレーションを実行することで実社会に近い状況を再現し、本研究の戦略の妥当性を評価するとともに新戦略について検討する
3. 電動キックボードの再配送を考慮したシミュレーションを実行する

参考文献

[1] 経済産業省、“電動キックボード 市場のご紹介”

https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/mobility/pdf/001_05_03.pdf 最終閲覧日：2024/7/26

[2] 矢嶋耕平、倉橋節也、“マルチエージェントシミュレーションによるシェアサイクル運用システムの検証”，人工知能学会第二種研究会資料 BI-011（2019）

[3] 上木翔太、蓮池隆、“多目的最適化問題を活用した電動キックボードの最適配置”，2022年度 経営システム工学科卒業論文

[4] Brillia “世田谷区のマンション一覧”，<https://sumikae.ttfuhan.co.jp/database/city/670.html> 最終閲覧日：2024/7/26

[5] 世田谷区、“令和4年（2022年）の世田谷区の町丁別人口と世帯数”

<https://www.city.setagaya.lg.jp/mokuji/kusei/001/003/002/d00195203.html> 最終閲覧日：2024/7/26

[6] NAVITIME、“最寄り駅検索”

<https://sumikae.ttfuhan.co.jp/database/city/670.html> 最終閲覧日：2024/7/26

[7] いつもNABI、“ゼンリン地図・住所検索”，<https://www.its-mo.com/> 最終閲覧日：2024/7/26

[8] PRTIMES、“【LUUPユーザー3,660名にアンケート実施】他のシェアモビリティサービスと比較して、LUUPを利用している理由第1位は「ポートが多いから」”

<https://prtmes.jp/main/html/rd/p/000000137.000043250.html> 最終閲覧日：2024/7/26